

# Pnictidoxide – eine neue Klasse von Hoch- $T_C$ -Supraleitern

Dirk Johrendt\* und Rainer Pöttgen\*

Eisen · Nickel · Pnictidoxide · Seltenerdelemente ·

Supraleitung

Aktuelle Berichte über Supraleitung bei Temperaturen bis 55 K in Pnictidoxiden mit ZrCuSiAs-Struktur haben großes Aufsehen erregt. Von diesen Verbindungen waren bereits LaFePO und LaNiPO als supraleitend bekannt, allerdings nur bei tiefen Temperaturen von 4–7 K.<sup>[1–3]</sup> Als im März 2008 Supraleitung bei 26 K in dem mit Fluorid dotierten Eisenarsenid LaFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub> bekannt wurde,<sup>[4]</sup> überschlugen sich kurz darauf Meldungen über immer höhere kritische Temperaturen ( $T_C$ ). Fast täglich werden auf dem Preprint-Server der Cornell University Library (arXiv.org) neue Ergebnisse bekannt. Durch den Austausch von Lanthan gegen Seltenerdionen mit kleinerem Radius stiegen die Übergangstemperaturen innerhalb weniger Tage von 26 K in LaFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub> bis auf 55 K in SmFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>.<sup>[5]</sup> Außer mit Fluorid kann die Dotierung auch mit zweiwertigem Strontium (La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>FeAsO,  $T_C=25$  K) oder durch Sauerstoffunderschuss (SmFeAsO<sub>1-x</sub>,  $T_C=55$  K) erfolgen.<sup>[6]</sup> Die kritischen Felder ( $B_{c2}$ ) erreichen sehr hohe Werte bis zu 65 T.<sup>[7]</sup> Übergangstemperaturen von über 50 K sind seit der Entdeckung der Cupratsupraleiter 1986<sup>[8]</sup> in keiner anderen Verbindungsklasse mehr aufgetreten. Hier wurde eine neuartige Klasse von Hochtemperatursupraleitern entdeckt.

LaFeAsO und die anderen neuen Supraleiter kristallisieren in der tetragonalen ZrCuSiAs-Struktur (Raumgruppe  $P4/nmm$ ).<sup>[9]</sup> In dieser aufgefüllten Variante des PbFCl-Typs bilden über gemeinsame Kanten verknüpfte FeAs<sub>4/4</sub>-Tetraeder zweidimensionale Schichten, die sich mit Schichten aus ebenfalls kantenverknüpften OLa<sub>4/4</sub>-Tetraedern abwechseln (Abbildung 1). Wegen der großen Unterschiede zwischen den ionischen Ln-O- und den eher kovalenten Fe-As-Bindungen entsteht eine ausgeprägt zweidimensionale Struktur, in der sich salzartige Schichten aus Lanthanoxid mit metallischen Schichten aus Eisenarsenid abwechseln. Die metallische Eigenschaft und auch die Supraleitung entstehen in den FeAs-Schichten.

[\*] Prof. Dr. D. Johrendt  
Department Chemie und Biochemie  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Butenandtstraße 5–13 (Haus D), 81377 München (Deutschland)  
Fax: (+49) 892-1807-7431  
E-Mail: johrendt@lmu.de  
  
Prof. Dr. R. Pöttgen  
Institut für Anorganische und Analytische Chemie  
Westfälische Wilhelms-Universität Münster  
Corrensstraße 30, 48149 Münster (Deutschland)  
Fax: (+49) 251-833-6002  
E-Mail: pottgen@uni-muenster.de

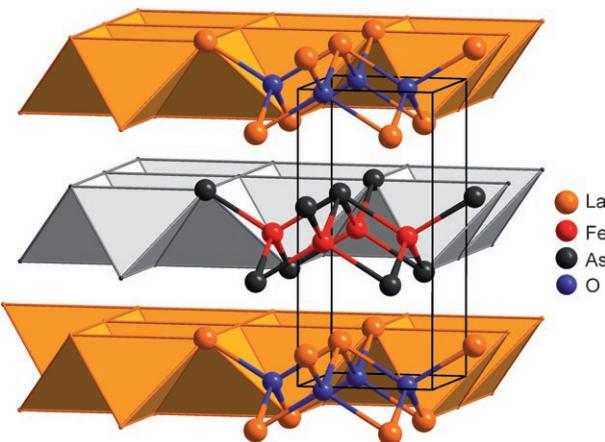


Abbildung 1. Kristallstruktur von LaFeAsO.

Topologisch ähneln die neuen Verbindungen den Cupratsupraleitern mit ihren zweidimensionalen Kupferoxidschichten, dennoch besteht ein wichtiger Unterschied: In den Cupraten gibt es keine direkten Wechselwirkungen zwischen den Kupferatomen, während die 3d-Orbitale der Eisenatome in LaFeAsO aufgrund relativ kurzer Fe-Fe-Abstände (ca. 285 pm) überlappen. Aus diesem Grund sind die neuen Pnictidoxid-Supraleiter bei Raumtemperatur metallische Leiter.

Nach der Bardeen-Cooper-Schrieffer(BCS)-Theorie entsteht Supraleitung in Metallen durch eine paarweise Kopplung der Leitungselektronen zu Cooper-Paaren, die über Gitterschwingungen (Phononen) vermittelt wird. In seiner ursprünglichen Form limitierte der BCS-Mechanismus die Supraleitung auf Temperaturen unterhalb etwa 30 K. Tatsächlich gab es lange keine metallischen Verbindungen, die oberhalb dieser Temperatur supraleitend waren. Zu den wichtigsten metallischen Supraleitern zählen die A15-Verbindungen (Nb<sub>3</sub>Ge,  $T_C=23$  K), die Chevrel-Phasen (PbMo<sub>6</sub>Se<sub>8</sub>,  $T_C=18$  K) und die seit 1994 bekannten Seltenerdborocarbide (YPd<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C,  $T_C=23$  K).<sup>[10]</sup> Die bisher höchste kritische Temperatur aller metallischen Verbindungen wurde erst 2001 in dem metallischen Borid MgB<sub>2</sub> gefunden, das bei 39 K supraleitend wird – also deutlich oberhalb der Grenze für klassische BCS-Supraleiter. Heute ist es akzeptiert, dass die Bildung der Cooper-Paare auch in MgB<sub>2</sub> durch Phononen vermittelt wird und mit einer erweiterten BCS-Theorie (Zweibandsupraleitung) erklärbar ist.<sup>[11]</sup>

Außer diesen ausgewählten Beispielen gibt es noch eine kaum überschaubare Menge metallischer Supraleiter mit kritischen Temperaturen deutlich unterhalb von 10 K. Es überrascht daher nicht, dass die ersten Berichte über Supraleitung in den metallischen quaternären Phosphidoxiden LaFePO ( $T_C \approx 7$  K) und LaNiPO ( $T_C = 4.5$  K) zunächst wenig beachtet wurden. Nun hat sich gezeigt, dass in diesen Systemen enormes Potenzial liegt: SmFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub> weist mit 55 K die bisher höchste Übergangstemperatur aller metallischen Supraleiter überhaupt auf. Noch höhere Sprungtemperaturen bis über 130 K (HgBa<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>6+x</sub>,  $T_C = 133$  K)<sup>[12]</sup> haben bisher nur die keramischen Cupratsupraleiter erreicht. Schon kurz nach deren Entdeckung wurde klar, dass diese Supraleitung nicht mit der BCS-Theorie allein erklärbar ist. Die zentrale und noch heute höchst umstrittene Frage nach dem Bildungsmechanismus der Cooper-Paare wird weiterhin aus physikalischen und chemischen Blickwinkeln diskutiert. Nach inzwischen mehr als zwei Dekaden intensiver Forschung gibt es mehr als zwanzig neuere Theorien über Hochtemperatursupraleitung in Cupraten, die in mehr oder weniger enger Beziehung zur klassischen BCS-Theorie stehen.<sup>[13]</sup> Eine klare Konvergenz ist derzeit nicht erkennbar, doch neuartige supraleitende Systeme wie MgB<sub>2</sub> und jetzt die Pnictodoxide haben stets auch der Theorie neue Impulse gegeben.

Neueste Befunde lassen darauf schließen, dass die Pnictodoxide wie die Cuprate unkonventionelle Supraleiter sind. Die mit Dichtefunktionalmethoden (local density approximation, LDA) berechnete Elektron-Phonon-Kopplungskonstante ( $\lambda$ ) von 0.21 ist zu klein für derartig hohe kritische Temperaturen und vergleichbar mit der von Cupraten ( $\lambda \approx 0.3$ ). Dies spricht für einen nicht vorwiegend durch Phononen vermittelten Mechanismus.<sup>[14]</sup> Undotiert ist LaFeAsO nicht supraleitend, jedoch an der Grenze einer magnetischen Instabilität. Letztere äußert sich durch Anomalien in der elektrischen Leitfähigkeit und der magnetischen Suszeptibilität bei etwa 150 K. Ursache ist eine instabile Spindichthewelle (SDW), die unterhalb dieser Temperatur zu einer Verzerrung der Struktur führt. Unterhalb von 134 K sind die magnetischen Momente antiferromagnetisch geordnet. Weder die Strukturverzerrung noch die magnetische Ordnung treten in dotiertem supraleitendem LaFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub> auf, da durch die Dotierung die Ausordnung der antiferromagnetischen SDW unterdrückt wird. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass magnetische Fluktuationen in den Eisenschichten eine fundamentale Rolle für die Kopplung der Leitungselektronen zu Cooper-Paaren spielen.<sup>[15]</sup> Auch hier zeigt sich eine Parallele zu den Cupraten, in denen Supraleitung durch Lochdotierung einer antiferromagnetischen Mutterverbindung entsteht. In den Pnictodoxiden ist die Supraleitung sogar durch Dotierung der FeAs-Schichten sowohl mit Elektronen (LaFeAsO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>,  $T_C = 26$  K) als auch mit Löchern (La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>FeAsO,  $T_C = 25$  K) induzierbar. Wie weit die Analogie mit den Cupratsupraleitern wirklich reicht, wird sich zeigen, wenn in naher Zukunft weitere experimentelle Daten zum Isotopeneffekt, zur Symmetrie der BCS-Wellenfunktion und zur supraleitenden Energielücke vorliegen. Aus chemischer Sicht ist als wesentlicher Unterschied festzuhalten, dass die magnetischen und supraleitenden Eigenschaften von LaFeAsO auch von direkten Kontakt zwischen den 3d-

Metallatomen bestimmt werden, was in den Cupraten nicht der Fall ist.

Präparativ wurden die Seltenerd-Pnictodoxide schon vor mehreren Jahren von der Gruppe Jeitschko erschlossen.<sup>[16]</sup> Zunächst wurde der Sauerstoffgehalt nicht im Detail geklärt, und einige der Verbindungen wurden als ternäre Phosphide beschrieben. Mittlerweile sind über 100 dieser quaternären SETPnO-Verbindungen ( $SE =$  Seltenerdmetall,  $T =$  Übergangsmetall der d-Reihen,  $Pn = P, As, Sb$ ) mit der ZrCuSiAs-Struktur von der Münsteraner Gruppe synthetisiert worden.<sup>[17]</sup> Dabei zeichnet sich diese Substanzklasse durch eine große Variabilität in den beteiligten Elementen aus. Die meisten Serien existieren mit fast allen dreiwertigen Seltenerdelementen, und bei den Übergangsmetallen sind Beispiele mit Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Ru und Os bekannt. In der Summe gibt es mehr Verbindungen mit Phosphor und Arsen als solche mit Antimon, von denen bisher nur Vertreter mit Mangan und Zink als Übergangsmetallkomponente bekannt sind.<sup>[18]</sup> Generell besteht bei dieser Verbindungsklasse auch die Möglichkeit unterschiedlicher Stapelvarianten, jedoch sind bislang nur der Strukturtyp  $SE_3Cu_4P_4O_2$  mit  $SE = La, Ce, Pr$  und Nd<sup>[19]</sup> sowie einige Vertreter mit Actinoiden als elektropositiver Komponente bekannt.<sup>[17,20]</sup> In diesem Zusammenhang müssen auch die vielen Mangan-haltigen Verbindungen der zweiwertigen Erdalkalimetalle wie  $EA_2Mn_3Pn_2O_2$  ( $EA = Sr, Ba; Pn = P, As, Sb, Bi$ ) genannt werden, die von Schäfer sowie Kauzlarich und Mitarbeitern auf ihre Strukturchemie und magnetischen Eigenschaften untersucht wurden.<sup>[21]</sup>

Zur Synthese der Pnictodoxide sind mehrere Wege möglich: Einphasige polykristalline Proben lassen sich über eine keramische Route erhalten. Dazu wird im ersten Schritt das Seltenerdelement mit den Pnicogen gemäß  $SE + Pn \rightarrow SEPn$  zum Seltenerdmonopnictid umgesetzt.<sup>[1]</sup> Hier kann Kieselglas als Tiegelmaterial verwendet werden. Anschließend wird das Monopnictid mit dem Übergangsmetallocid TO zu Pillen gepresst und bei 970–1520 K geglüht. Temperatur und Glühzeit richten sich nach den jeweiligen Ausgangskomponenten. Tantal oder Kieselglas können als Tiegelmaterial eingesetzt werden. In einigen Fällen kann Hochdrucksintern die Synthese unterstützen. Zur Züchtung von Einkristallen (bis in den mm-Bereich) werden Salzschmelzen eingesetzt. In einem typischen Experiment setzt man  $SE + Pn + TO$  mit einem Überschuss eines NaCl/KCl-Flussmittels um. Die Salzschmelze kann einfach mit destilliertem Wasser gelöst werden. In einigen Fällen bietet sich der Einsatz von Zinnschmelzen an, wie sie auch für ternäre Phosphide eingesetzt werden.<sup>[22]</sup> Als Sauerstofflieferanten können außer den Übergangsmetallociden auch  $SE_2O_3$  oder  $CeO_2$  fungieren. Für die unterschiedlichen Dotierungen der supraleitenden SETPnO<sub>1-x</sub>F<sub>x</sub>-Phasen wurden die Seltenerdtrifluoride oder FeF<sub>3</sub> als Fluoridlieferanten eingesetzt.<sup>[1,2]</sup>

Das Hauptaugenmerk liegt derzeit verständlicherweise auf der Untersuchung der supraleitenden Eigenschaften der dotierten Phasen. Erste orientierende Untersuchungen an Verbindungen mit paramagnetischen Seltenerdmetallen zeigen aber auch interessante magnetische Eigenschaften: So ist CeRuPO ein seltenes Beispiel für ein ferromagnetisches Kondo-Gitter. CeOsPO ordnet antiferromagnetisch,<sup>[23]</sup> ebenso  $\beta$ -CeZnPO und  $\beta$ -PrZnPO,<sup>[24]</sup> wohingegen die Anti-

monide CeZnSbO und PrZnSbO bis zu tiefen Temperaturen paramagnetisch bleiben.<sup>[25]</sup> Erste <sup>121</sup>Sb-Mößbauer-spektroskopische Untersuchungen an PrMnPO und NdMnPO zeigen übertragene Hyperfeinfelder bei tiefen Temperaturen.<sup>[18]</sup>

Elektronenpräzise aufgebaute Pnictidoxide vom Typ  $SE^{3+}T^{2+}P^{3-}O^{2-}$  sind oft im sichtbaren Bereich transparent mit – je nach Schichtdicke – gelber bis tiefroter Farbe.<sup>[24,26]</sup> Dementsprechend sind die Verbindungen  $SEZnPnO$  Halbleiter.<sup>[25]</sup> Absorptionsspektren an Einkristallen der Verbindungen  $SEZnPO$  ( $SE = Y, La, Pr, Nd, Sm, Dy$ ) im NIR/Vis-Bereich zeigen eine interessante Variation der optischen Bandlücken und f-f-Übergänge mit gut aufgelösten Ligandenfeldaufspaltungen.<sup>[24]</sup>

Die neuen Pnictidoxid-Supraleiter werden zweifellos enormes Interesse auf sich ziehen. Ihre hohen Übergangstemperaturen und kritischen Magnetfelder machen sie bereits jetzt für Anwendungen interessant, die derzeit von A15-Supraleitern dominiert sind. Sollten die kritischen Temperaturen der neuen Verbindungen den Siedepunkt des flüssigen Stickstoffes (77.13 K) erreichen, was nicht auszuschließen ist, könnten sie sogar die keramischen Cupratsupraleiter verdrängen. Ihr großer Vorteil wäre die gute metallische Leitfähigkeit im normalleitenden Temperaturbereich.

Darüber hinaus wird die neue Klasse von Hochtemperatursupraleitern der Forschung auf diesem Gebiet allgemein neue Impulse geben, auch – aber nicht nur – hinsichtlich eines Verständnisses von Supraleitung bei höheren Temperaturen. Daneben gibt es eine Fülle von Ansatzmöglichkeiten besonders für die Festkörperchemie, diese Systeme chemisch zu modifizieren und ihre physikalischen Eigenschaften zu studieren. Nach MgB<sub>2</sub> tritt erneut eine scheinbar einfache und schon lange bekannte Verbindungsklasse in das Zentrum des Interesses. Angesichts der enormen Zahl weiterer „einfacher“ Festkörperverbindungen, die bisher nur strukturell, aber nicht hinsichtlich ihrer Eigenschaften charakterisiert sind, können wir uns vielleicht noch auf ähnliche Überraschungen freuen, wie wir sie jetzt mit den Pnictidoxiden erleben.

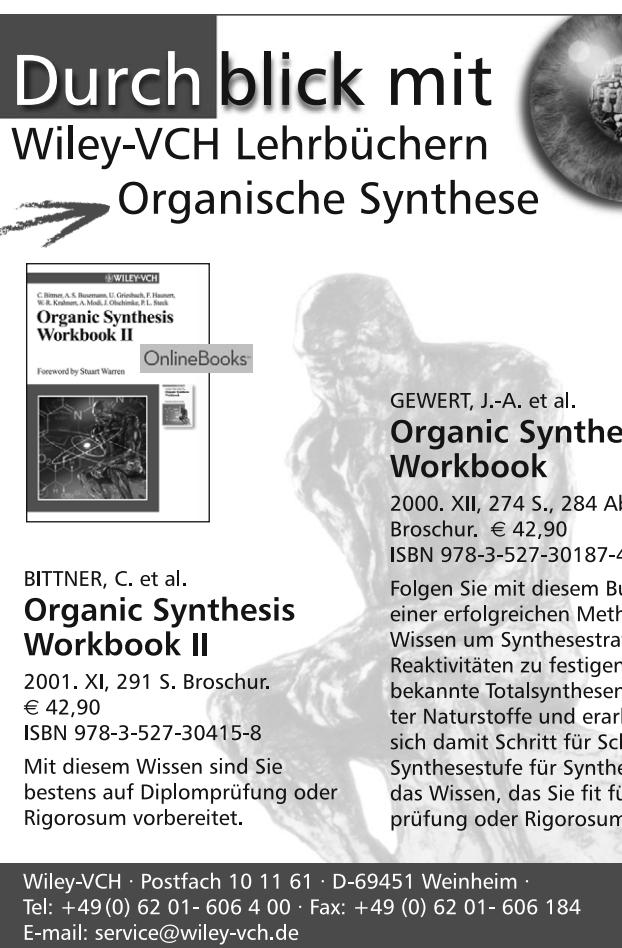
Online veröffentlicht am 19. Mai 2008

- [1] Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, R. Kawamura, H. Yanagi, T. Kamiya, H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128*, 10012–10013.
- [2] T. Watanabe, H. Yanagi, T. Kamiya, Y. Kamihara, H. Hiramatsu, M. Hirano, H. Hosono, *Inorg. Chem.* **2007**, *46*, 7719–7721.
- [3] M. Tegel, D. Bichler, D. Johrendt, *Solid State Sci.* **2008**, *10*, 193–197.
- [4] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 3296–3297.
- [5] G. F. Chen, Z. Li, D. Wu, G. Li, W. Z. Hu, J. Dong, P. Zheng, J. L. Luo, N. L. Wang, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.3790; Z.-A. Ren, J. Yang, W. Lu, W. Yi, G.-C. Che, X.-L. Dong, L.-L. Sun, Z.-X. Zhao, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.4283; Z.-A. Ren, J. Yang, W. Lu, W. Yi, X.-L. Shen, Z.-C. Li, G.-C. Che, X.-L. Dong, L.-L. Sun, F. Zhou, Z.-X. Zhao, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.4234; Z.-A. Ren, W. Lu, J. Yang, W. Yi, X.-L. Shen, Z.-C. Li, G.-C. Che, X.-L. Dong, L.-L. Sun, F. Zhou, Z.-X. Zhao, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0804.2053.

- [6] H.-H. Wen, G. Mu, L. Fang, H. Yang, X. Zhu, *Europhys. Lett.* **2008**, *82*, 17009(5p); Z.-A. Ren, G.-C. Che, X.-L. Dong, J. Yang, W. Lu, W. Yi, X.-L. Shen, Z.-C. Li, L.-L. Sun, F. Zhou, Z.-X. Zhao, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0804.2582.
- [7] F. Hunte, J. Jaroszynski, A. Gurevich, D. C. Larbalestier, R. Jin, A. S. Sefat, M. A. McGuire, B. C. Sales, D. K. Christen, D. Mandrus, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0804.0485.
- [8] J. G. Bednorz, K. A. Müller, *Z. Phys. B* **1986**, *64*, 189–193; M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Chu, *Phys. Rev. Lett.* **1987**, *58*, 908–910.
- [9] V. Johnson, W. Jeitschko, *J. Solid State Chem.* **1974**, *11*, 161–166.
- [10] B. T. Matthias, T. H. Geballe, R. H. Willens, E. Corenzwit, G. W. Hull, Jr., *Phys. Rev.* **1965**, *139*, 1501–1503; R. Chevrel, M. Hirrien, M. Sergeant, *Polyhedron* **1986**, *5*, 87–94; R. J. Cava, H. Takagi, H. W. Zandbergen, J. J. Krajewski, W. F. Peck, Jr., T. Siegrist, B. Batlogg, R. B. van Dover, R. J. Felder, K. Mizuhashi, J. O. Lee, H. Eisaki, S. Uchida, *Nature* **1994**, *367*, 252–253.
- [11] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Akimitsu, *Nature* **2001**, *410*, 63–64; A. Y. Liu, I. I. Mazin, J. Kortus, *Phys. Rev. Lett.* **2001**, *87*, 087005(4p).
- [12] A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo, H. R. Ott, *Nature* **1993**, *363*, 56–58.
- [13] A. Cho, *Science* **2006**, *314*, 1072–1075; S. Deng, A. Simon, J. Köhler, *Struct. Bonding (Berlin, Ger.)* **2005**, *114*, 103–141; A. Simon, *Angew. Chem.* **1997**, *109*, 1872–1918; *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **1997**, *36*, 1788–1806.
- [14] D. J. Singh, M.-H. Du, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.0429; L. Boeri, O. V. Dolgov, A. A. Golubov, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.2703; I. I. Mazin, D. J. Singh, M. D. Johannes, M. H. Du, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.2740.
- [15] J. Dong, H. J. Zhang, G. Xu, Z. Li, G. Li, W. Z. Hu, D. Wu, G. F. Chen, X. Dai, J. L. Luo, Z. Fang, N. L. Wang, *arXiv.org, e-Print Archive, Condens. Matter* **2008**, 0803.3426; C. de la Cruz, Q. Huang, J. W. Lynn, J. Li, W. Ratcliff II, J. L. Zarestky, H. A. Mook, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, P. Dai, *ArXiv.org, e-Print Archive, Condensed Matter* **2008**, 0804.0795.
- [16] B. I. Zimmer, Dissertation, Universität Münster, **1996**.
- [17] M. Reehuis, W. Jeitschko, *J. Phys. Chem. Solids* **1990**, *51*, 961–968; J. H. Albering, W. Jeitschko, *Z. Naturforsch. B* **1996**, *51*, 257–262; B. I. Zimmer, W. Jeitschko, J. H. Albering, R. Glaum, M. Reehuis, *J. Alloys Compd.* **1995**, *229*, 238–242; A. T. Nientiedt, B. I. Zimmer, P. Wollesen, W. Jeitschko, *Z. Kristallogr.* **1996**, *Suppl. 11*, 101; A. T. Nientiedt, W. Jeitschko, P. G. Pollmeier, M. Brylak, *Z. Naturforsch. B* **1997**, *52*, 560–564; A. T. Nientiedt, W. Jeitschko, *Inorg. Chem.* **1998**, *37*, 386–389; P. Quebe, L. J. Terbüchte, W. Jeitschko, *J. Alloys Compd.* **2000**, *302*, 70–74.
- [18] I. Schellenberg, T. Nilges, R. Pöttgen, *Z. Naturforsch. B* **2008**, im Druck.
- [19] R. J. Cava, H. W. Zandbergen, J. J. Krajewski, T. Siegrist, H. Y. Hwang, B. Batlogg, *J. Solid State Chem.* **1997**, *129*, 250–256; J. W. Kaiser, W. Jeitschko, *Z. Naturforsch. B* **2002**, *57*, 165–170.
- [20] D. Kaczorowski, M. Potel, H. Noël, *J. Solid State Chem.* **1994**, *112*, 228–231; D. Kaczorowski, J. H. Albering, H. Noël, W. Jeitschko, *J. Alloys Compd.* **1994**, *216*, 117–121.
- [21] S. L. Brock, S. M. Kauzlarich, *Comments Inorg. Chem.* **1995**, *17*, 213; „Phosphides: Solid State Chemistry“: R. Pöttgen, W. Höhnle, H. G. von Schnerring in *Encyclopedia of Inorganic Chemistry*, 2. Aufl., Bd. VII, Wiley, Chichester, **2005**, S. 4255–4308.
- [22] M. G. Kanatzidis, R. Pöttgen, W. Jeitschko, *Angew. Chem.* **2005**, *117*, 7156–7184; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005**, *44*, 6996–7023.
- [23] C. Krellner, N. S. Kini, E. M. Brüning, K. Koch, H. Rosner, M. Nicklas, M. Baenitz, C. Geibel, *Phys. Rev. B* **2007**, *76*, 104418.

- [24] H. Lincke, R. Glaum, V. Dittrich, M. Tegel, D. Johrendt, W. Hermes, M. H. Möller, T. Nilges, R. Pöttgen, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2008**, im Druck.
- [25] Y. Takano, S. Komatsuzaki, H. Komasaki, T. Watanabe, Y. Takahashi, K. Takase, *J. Alloys Compd.* **2008**, *451*, 467–469.
- [26] H. Lincke, T. Nilges, R. Pöttgen, *Z. Anorg. Allg. Chem.* **2006**, *632*, 1804.

# Durchblick mit Wiley-VCH Lehrbüchern Organische Synthese





C. Birner, A. S. Bannwart, U. Grönbach, F. Hamer, W. R. Krahulec, A. Modl, J. Olesnicka, F. L. Sank  
**Organic Synthesis Workbook II**

Foreword by Stuart Warren

OnlineBooks

**BITTNER, C. et al.  
Organic Synthesis  
Workbook II**

2001. XI, 291 S. Broschur.  
€ 42,90  
ISBN 978-3-527-30415-8

Mit diesem Wissen sind Sie bestens auf Diplomprüfung oder Rigorosum vorbereitet.

**HOPF, H.  
Classics in  
Hydrocarbon  
Chemistry**

Syntheses, Concepts,  
Perspectives

2000. XIII, 547 S.,  
434 Abb. Broschur.  
€ 69,-  
ISBN 978-3-527-29606-4

**GEWERT, J.-A. et al.  
Organic Synthesis  
Workbook**

2000. XII, 274 S., 284 Abb.  
Broschur. € 42,90  
ISBN 978-3-527-30187-4

Folgen Sie mit diesem Buch einer erfolgreichen Methode, Ihr Wissen um Synthesestrategien und Reaktivitäten zu festigen. Lösen Sie bekannte Totalsynthesen bekannter Naturstoffe und erarbeiten Sie sich damit Schritt für Schritt und Synthesestufe für Synthesestufe das Wissen, das Sie fit für Diplomprüfung oder Rigorosum macht.

**Rezensionen:**

„Jedem, der sich für die Synthese organischer Verbindungen interessiert, ist dieses Buch zu empfehlen...“  
*Chemistry in Britain*

„...Diese schier unerschöpfliche Informationsquelle, gleichermaßen für Forschende und Lehrende, kann ich wärmstens empfehlen...“  
*Journal of the Chemical Society*

Besuchen Sie unsere Homepage:  
[www.wiley-vch.de](http://www.wiley-vch.de)



**WILEY-VCH**