

# Kapitel 1

**MgB<sub>2</sub> –**

**bekanntes Material, neuer Supraleiter**

---

*„Auch wenn MgB<sub>2</sub> nicht der heilige Gral der angewandten Supraleitung ist, so hat dieses Material zum jetzigen Zeitpunkt das Potential wichtige Anwendungen zu realisieren.“*

*P. Komarek*

Die Entdeckung der Supraleitung in Magnesiumdiborid durch Nagamatsu *et al.* [Nag01] im Jahr 2001 überraschte die wissenschaftliche Gemeinschaft nachhaltig. Diese intermetallische Phase mit vergleichsweise simpler, hexagonaler Struktur zeigt mit 39 K die bislang höchste Sprungtemperatur für binäre Systeme.

Viel erstaunlicher ist jedoch die Tatsache, dass es sich bei  $MgB_2$  keineswegs um eine bis dato unbekannte Verbindung handelte. Schon 1953 entdeckten Russell *et al.* [Rus53] die Existenz von  $MgB_2$  im Rahmen einer röntgenographischen Untersuchung am Magnesium-Bor-System.

Es dauerte weitere 50 Jahre bis die Entdeckung der Supraleitung in Magnesiumdiborid einen erneuten Ansturm des Interesses auf dem Gebiet der Tieftemperatursupraleitung entfachte, in dessen Folge eine Vielzahl von Verbindungen mit ähnlicher Struktur untersucht wurde, die allerdings hinter den Eigenschaften von  $MgB_2$  zurückblieben [Buz01].

Zeitnah wurde der Einsatz von  $MgB_2$ -Bandleitern für technische Anwendungen diskutiert und erste Möglichkeiten der Herstellung demonstriert [Jin01, Buz01, Glo01, Gol01, Gra01]. Gegenüber der Präparation von dünnen Schichten [Eom01, Kom02] und alternativen Ansätzen zur Herstellung von  $MgB_2$ -Filamenten über eine Mg-Diffusion in Bordröhren [Can01, Wil05] hat sich die Pulver-im-Rohr-Technologie als Standardmethode für die Leiterherstellung etabliert [Buz01, Flü03]. Dieses bereits von der Herstellung anderer Supraleiter, wie z. B. BSCCO oder  $Nb_3Sn$ , bekannte Verfahren befindet sich derzeit auf einem technologisch sehr ausgereiften Stand, so dass für die Produktion von  $MgB_2$ -Leitermaterialien im km-Maßstab keine grundlegenden Probleme bestehen [Lar01a].

Es stellt sich also die Frage, ob  $MgB_2$  auf dem wachsenden Markt der angewandten Supraleitung eine zentrale Rolle einnehmen kann, oder nur ein Nischenprodukt darstellt [Iwa06]. Momentan werden  $MgB_2$ -Leitermaterialien sowohl in kleineren Anwendungen, z.B. als Stromzuführung am Röntgenspektrometer des japanischen Suzaku-Satelliten oder Füllstandssensoren für Tanks mit flüssigem Wasserstoff [Sch06b], als auch im größeren Maßstab als Spulenmaterial in Magnetresonanztomographen [Mod08] eingesetzt. Um erfolgreich zu sein, müssen  $MgB_2$ -Leiter in erster Linie das Potential aufweisen, die derzeit angewandten Tieftemperatursupraleiter auf Nb-Basis ersetzen und darüber hinaus mit den Hochtemperatursupraleitern, z. B. BSCCO und YBCO konkurrieren zu können. Dies kann auf der Basis von anwendungsspezifischen Eigenschaften und/oder unter ökonomischen Aspekten geschehen [Xu08].

Erste Vorteile von  $MgB_2$  gegenüber anderen Supraleitern liegen in den geringen Materialkosten und der technologisch einfachen Herstellung. Die daraus erwachsende ökonomische Attraktivität wiegt gleichzeitig den geringen Mehraufwand der erhöhten Kühlkosten gegenüber den Hochtemperaturmaterialien auf. Darüber hinaus können Anwendungen mit  $MgB_2$ -Bandleitern im Temperaturbereich zwischen 15 und 25 K betrieben werden. Der damit

---

verbundene Einsatz von Kältemaschinen stellt einen weiteren Vorteil gegenüber den bislang angewandten Supraleitern auf Nb-Basis dar und verringert den Verbrauch von kryogenen Flüssigkeiten [Gur04, Xu08]. Die vergleichsweise große Kohärenzlänge macht MgB<sub>2</sub> weitestgehend unempfindlich für das in einigen Hochtemperatursupraleitern, z. B. YBCO, auftretende *weak-link* Verhalten an Korngrenzen [Lar01b, Flü03].

Nachteilig wirkt sich die in MgB<sub>2</sub> aufgrund des schichtartigen Aufbaus auftretende Anisotropie der kritischen Felder aus ( $H_{c2}^{\parallel} / H_{c2}^{\perp} \approx 5 - 6$ ). Zwar ist diese im Vergleich zu einigen Hoch- $T_c$ -Materialien ( $H_{c2}^{\parallel} / H_{c2}^{\perp} > 20$ ) deutlich geringer, dennoch kann reines MgB<sub>2</sub> ( $H_{c2}^{\perp} \approx 3,5$  T,  $H_{c2}^{\parallel} \approx 18$  T) nicht als Konkurrenz zu den existierenden isotropen Hochfeld-Supraleitern NbTi ( $T_c = 10$  K,  $H_{c2}(4,2$  K) = 10 T) und Nb<sub>3</sub>Sn ( $T_c = 18$  K,  $H_{c2}(4,2$  K) = 28 T) angesehen werden [Gur04].

Um das supraleitende Material MgB<sub>2</sub> in einen für Anwendungen nutzbaren technischen Leiter zu überführen, ist es notwendig, neben den kritischen Feldern auch die Stromtragfähigkeit des Materials zu verbessern. Durch das gezielte Einbringen von Streuzentren besteht die Möglichkeit, die supraleitenden Eigenschaften von MgB<sub>2</sub> deutlich zu steigern [Gur04]. Existierende Prototypen, u. a. in Form von Spulen, Strombegrenzern und allen voran der erste Magnetresonanztomograph in offener Bauweise, belegen das große Potential dieses Werkstoffes, aus dem gleichzeitig die Motivation der durchgeführten Untersuchungen erwächst. „Auch wenn MgB<sub>2</sub> nicht der heilige Gral der angewandten Supraleitung ist, so hat dieses Material zum jetzigen Zeitpunkt das Potential wichtige Anwendungen zu realisieren“ [Kom08].

Die vorliegende Arbeit, die im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten HIPERMAG-Projektes zur Entwicklung und Verbesserung von MgB<sub>2</sub>-Bandleitern entstanden ist, untersucht sowohl den Einfluss der Präparation, als auch eine mögliche Steigerung der supraleitenden Eigenschaften durch kohlenstoffhaltige Dotierungen. Ziel ist es, die auftretenden Struktur-Eigenschafts-Beziehungen genauer aufzuklären und dieses Wissen für eine weitere Verbesserung der Eigenschaften nutzbar zu machen.

Ausgehend von einer kurzen Vorstellung des Mg-B-Stoffsystems, sowie der Kristallographie und Bandstruktur von MgB<sub>2</sub> werden in Kapitel 2 grundlegende Aspekte der Typ-II Supraleitung dargelegt. Kapitel 3 ist der Probenpräparation und den verwendeten Charakterisierungsverfahren gewidmet, wobei genauer auf die Grundlagen des Mechanischen Legierens eingegangen wird und generelle Eigenschaften der damit hergestellten Pulver vorgestellt werden. Resultate zum Einfluss der Präparation auf die Eigenschaften von MgB<sub>2</sub> werden in Kapitel 4 untersucht, wobei die Schwerpunkte auf der Stöchiometrie der Einwaage und der Qualität der verwendeten Bor-Pulver liegen. Die Auswirkungen der Zugabe von Kohlenstoff zur Ausgangszusammensetzung sind Gegenstand von Kapitel 5. Die Übertragung dieser Ei-

enschaften auf die Präparation von C-dotierten MgB<sub>2</sub>-Bandleitern schließt sich in Kapitel 6 an. Kapitel 7 fasst die erhaltenen Untersuchungsergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf aktuelle Fragestellungen.