

Hochtemperatur-Supraleiter und die neuen Chancen für das Magnetische Schweben

V. Jung *)

Einführung

Seit etwa 1993 ist bekannt, dass gute Proben des Hochtemperatur-Supraleiters $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bei einer magnetischen Flussdichte von 1,0 Tesla und einer Temperatur von 77 K kritische Stromdichten von $10\,000\text{ A/mm}^2$ erreichen können [1, 2], die dieses Material für den Bau großer Hochfeld-Magnete interessant machen. Da eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff bei 77 K wesentlich einfacher und kostengünstiger ist als die für Tieftemperatur-Supraleiter wie z. B. NbTi erforderliche Kühlung mit flüssigem Helium, versprechen Hochtemperatur-Supraleiter neue Chancen für den technischen Durchbruch der Supraleitung.

Im Forschungszentrum Karlsruhe wurde ein supraleitendes magnetisches Lager mit $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (im folgenden als YBaCuO abgekürzt) gebaut, das einer im Vakuum rotierenden Schwungmasse erlaubte, in 24 h nur ca. 1% seiner Rotationsenergie zu verlieren [3]. Ähnliche Untersuchungen werden auch an anderer Stelle vorangetrieben [4 bis 8]. Supraleitende Magnetschwebesysteme, welche entlang einer aktiven Bahn – mit Permanentmagneten oder Elektromagneten – bewegt werden können, werden in Deutschland [4, 5, 11], China [10], Brasilien [12] und Südafrika [13] untersucht. Japan entwickelt bekanntlich schon seit 1974 eine Magnetschwebebahn mit Tieftemperatur-Supraleiter-Magneten im Fahrzeug, eine entsprechende deutsche Testbahn in Erlangen wurde ca. 1980 abgebaut.

Die kommerzielle Anwendung der Hochtemperatur-Supraleiter wird allerdings durch ihre besonderen Materialeigenschaften erheblich erschwert. Es handelt sich um Oxide, die Supraleitung, d. h. verlustfreien Transport elektrischen Stromes, hauptsächlich in bestimmten Kristallebenen (a-b-Ebene) zeigen. In der dazu senkrechten Richtung (c-Achse) findet kaum Supraleitung statt. Die jeweilige Ausrichtung der Kristallite, die sogenannte Textur einer Probe, ist also von ausschlaggebender Bedeutung (anders als bei den klassischen Tieftemperatur-Supraleitern). Eine gewünschte Textur lässt sich dadurch erzielen, dass beim Erstarren aus der Schmelze ein Saatkristall die Orientierung vorgibt. Dieses als Schmelztexturierung bezeichnete Verfahren erlaubt größere, fast einkristalline Proben – oder mit mehreren Saatkristallen auch solche mit variierender Kristallorientierung – zu erzeugen, die für das magnetische Schweben erforderlich sind. Im folgenden wird über Texturuntersuchungen im besonderen [9] und das magnetische Schweben im allgemeinen berichtet. Dabei ist der mit normalleitenden Magneten arbeitende deutsche Schwebesystem Transrapid von herausragender Bedeutung.

Anwendungen neuer Supraleiter bei berührungsfreien Transporttechniken

Der Transrapid arbeitet mit einem auf Anziehung basierenden elektromagnetischen Schwebesystem.

Ein solches System ist inhärent instabil, da die Anziehungskraft mit abnehmendem Schwebesystem anwächst. Stabilität wird durch ein sehr schnelles Regelsystem hergestellt, bei welchem Induktionsspulen ständig den Schwebesystem messen und das elektromagnetische Feld entsprechend nachregeln.

Der spezifische Leistungsbedarf zum Aufrechterhalten des Schwebesystemes beträgt hier 2 bis 4 kW/t. Er ist im wesentlichen unabhängig von der Geschwindigkeit. Daher ist es ungünstig, ein Schwebesystem langsam fahren zu lassen. Erst bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h ist der Transrapid energetisch günstiger als das Rad/Schiene-System [14].

Einen etwa 10fach höheren Energieverbrauch pro Zeiteinheit weist das noch in Japan geförderte elektrodynamische Schwebesystem auf. Dies liegt daran, dass die Reaktionsschienen in der Trasse, in welchen die supraleitenden (Tieftemperatur)-Magnete des Schwebefahrzeugs Wirbelströme induzieren, nur normalleitend sind. Somit entstehen hohe Ohmsche Verlustleistungen in den Reaktionsschienen der Trasse [15].

Würde dieses elektrodynamische Schwebesystem nun umgedreht, d.h. würden von Permanentmagneten in der Trasse hohe Induktionsströme in massiven Hochtemperatur-Supraleitern im Fahrzeug induziert, so erreichte man einen spezifischen Energieverbrauch, der nur durch den Aufwand für die Kühlung der Supra-

*) Dr. Volkhard Jung, Elbinger Str. 2a, 76139 Karlsruhe

leiter mit flüssigem Stickstoff und durch den Luftwiderstand des Fahrzeugs bedingt wäre. Durch gute thermische Isolation könnte der Energieaufwand zur Stickstoffkühlung der Supraleiter stark minimiert werden. Zur Reduzierung des Luftwiderstandes gibt es Ideen, das Fahrzeug in einem teilevakuierten Rohr verkehren zu lassen [16], [17].

Um in den Supraleitern des Schwebefahrzeugs keine hohen Verluste entstehen zu lassen, muss das Magnetfeld der Trasse in Bahnrichtung sehr gut konstant sein, bis auf etwa 1%. Transversal zur Bewegungsrichtung soll es durchaus variieren, wie aus Abb. 1 hervorgeht. In dieser Ab-

bildung ist das Schwebeprinzip für nur eine Spur dargestellt. Es werden 2 Spuren der in Abb. 1 gezeigten Schwebearrangement benötigt, entsprechend einer Achse mit 2 Rädern. Die transversale Stabilität wird durch sogenannte „Pinning“-Kräfte im Supraleiter hergestellt. Hierfür wären im normalleitenden Falle seitliche Reaktionsleiter am Fahrzeug nötig.

In technisch einsetzbare, sogenannte „harte“ Supraleiter dringt magnetischer Fluss in Form von Flussschläuchen ein, die an Störstellen im Supraleiter, meist normalleitenden Ausscheidungen, durch Haftkräfte, die erwähnten Pinning-Kräfte, festgehalten wer-

den. Somit treten transversal zur Bahnrichtung retardierende Kräfte auf und der Schwebezustand ist transversal stabil. Vertikal ist der Schwebezustand ohnehin stabil, da bei Annäherung an das inhomogene Magnetfeld der Trasse ein höherer Strom im Supraleiter induziert wird, dessen Magnetfeld die abstoßende Kraft gegen die Trasse verstärkt. Im Gegensatz zum Schweben aufgrund magnetischer Anziehung, wie beim Transrapid, aber auch bei magnetischer Abstoßung zwischen zwei Permanentmagneten, ist das Schweben aufgrund magnetischer Abstoßung bei supraleitenden Lagern also selbststabilisierend.

Da der magnetische Fluss im Supraleiter nicht nur eine Vertikal-Komponente sondern auch eine Transversal-Komponente aufweist, wirken die Pinning-Kräfte auch vertikal dämpfend, ja sie wirken sogar anziehend, wenn das Schwebefahrzeug z.B. durch äußere Kräfte abgehoben wird. Dies lässt sich anhand eines Modells mit Supraleitern im Fahrzeug und Permanentmagneten auf der Trasse demonstrieren, wenn die Spur umgedreht wird und das dann nach unten hängende Schwebefahrzeug trägt [5].

Spulen in der Trasse anstelle von Permanentmagneten

Nun wäre es sehr teuer, eine Trasse mit Permanentmagneten (selbst mit solchen aus Ferriten [12]) auszustatten. Als Alternative wird ein Schwebesystem vorgeschlagen, bei welchem normal-

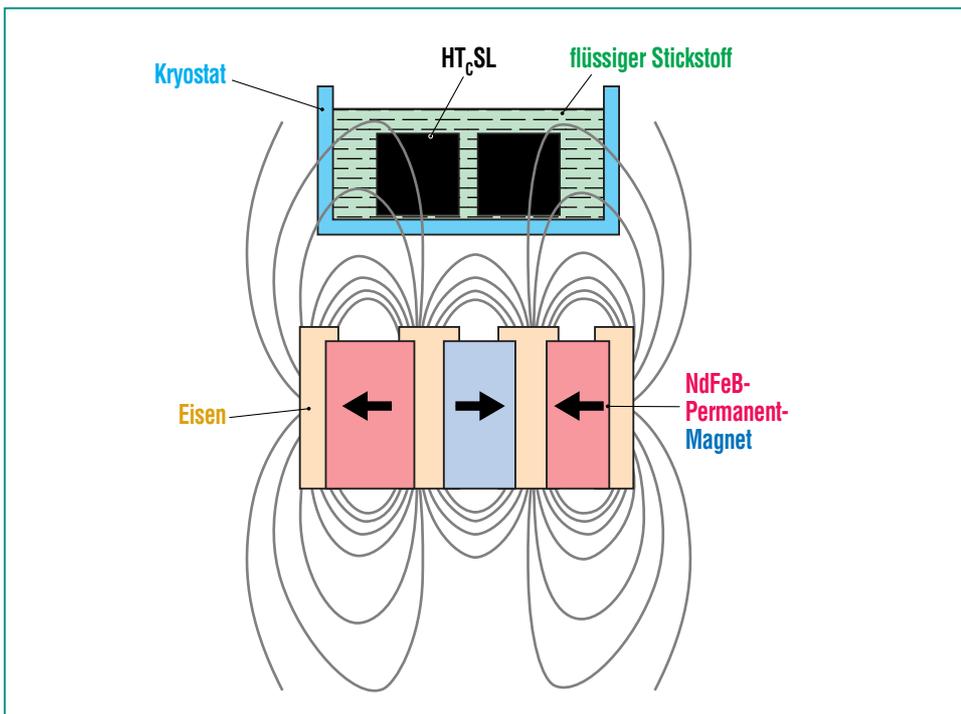


Abb. 1: Schwebearrangement von massiven YBaCuO-Blöcken, in welchen die magnetischen Felder von Permanentmagneten in der Trasse, verstärkt durch Weicheisenkerne, Supraströme induzieren, die ihrerseits abstoßende Magnetfelder erzeugen. In die Supraleiter dringt magnetischer Fluss in Form von Flussschläuchen ein, die durch Haftzentren festgehalten werden („Pinning“) und dadurch für Stabilität auch in transversaler Richtung sorgen.

leitende Spulen in der Trasse verlegt sind, die nur temporär erregt werden müssten, nämlich nur dort, wo sich gerade das Schwebefahrzeug befindet (Abb. 2).

Normalleitende Spulen in der Trasse sind verständlicherweise, wie in Abb. 2 zu sehen ist, von Eisenjochen mit E-förmigem Querschnitt eingehüllt. Dadurch entsteht eine ähnliche Feldverteilung wie im Falle von Permanentmagneten in der Trasse (Abb. 1). Die normalleitenden Spulen mit Eisen-Umhüllung induzieren in den Hochtemperatur-Supraleitern im Fahrzeug in gleicher Weise Ströme wie Permanentmagnete, wenn das Fahrzeug von oben auf die Trasse aufgesetzt wird oder die Supraleiter unter ihre sogenannte kritische Temperatur abgekühlt werden (Meißner-Effekt). Das von den induzierten Strömen erzeugte Gegenfeld wirkt abstoßend auf das Feld der Trassenspulen.

Auch beim Transrapid wird die Vortriebseinrichtung, der Langstator-Linear-Motor, nur örtlich erregt. Deswegen steigt der Wirkungsgrad des Langstatorantriebes auch mit zunehmender Zuglänge des Transrapid. Bei einem 200 m langen Zuge wird ein Wert von 95% erreicht, der bei nur 50 m Zuglänge auf 80% abfällt [14]. Ein Linearantrieb kann entweder aktiv vom Schwebefahrzeug aus wirken oder auch aktiv von der Trasse aus wie beim Transrapid. In Abb. 2 ist ein aktives Fahrzeug dargestellt. Die Energieversorgung erfolgt – wie auch beim Transrapid – über einen Induktionsleiter.

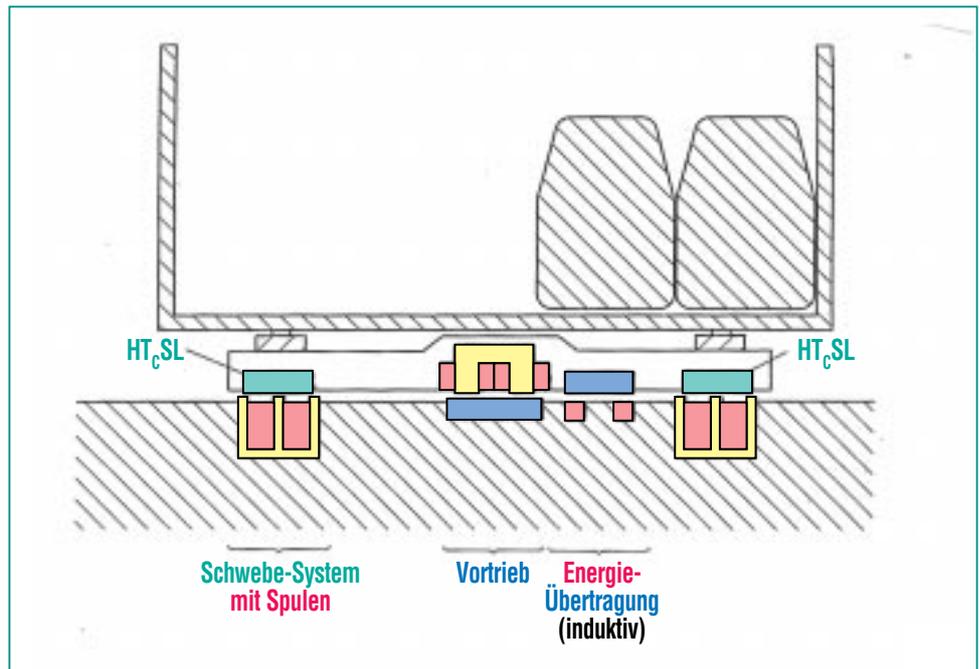


Abb. 2: Alternative Schwebeanordnung mit Supraleitern im Schwebefahrzeug, aber mit normalleitenden Magnetspulen in der Trasse. Die Weicheisenkerne, welche die Spulen umhüllen, geben dem magnetischen Feld der Trasse eine ähnliche Konfiguration wie die Permanentmagnete in Abb. 1.

Bei langsamen Bewegungen eines Schwebefahrzeuges nach Abb. 2 könnten die Speiseabschnitte der Trassenspulen kurz gehalten werden, so dass die Ohmschen Verluste in ihnen erträglich blieben. Supraleitende Spulen in der Trasse sind jedenfalls wegen der enormen Kühlprobleme und der Vereisung der Trasse auch mit den heutigen „Hochtemperatur“-Supraleitern nicht praktikabel.

Selbststabilisierende supraleitende magnetische Lager

Im Gegensatz zu Linearbewegungen von supraleitenden Schwebefahrzeugen benötigen supraleitende selbststabilisierende magnetische Lager nur einige

ringförmige Permanentmagnete mit einer Induktion von z.B. 0,46 T an der Oberfläche. (Permanentmagnete höherer Induktion, z. B. aus Sm Fe Co, würden etwa die doppelte Magnetisierung liefern. Sie sind jedoch teuer und würden höhere Anforderungen an die Qualität der Texturen in den YBaCuO-Supraleitern stellen.) Bei dieser Induktion ist es gelungen, einen fast vollständigen Spiegelfluss im Supraleiter zu induzieren. Immerhin wurden 95% der theoretisch möglichen abstoßenden Kraft gemessen. Bei schlechter Textur und regellosem Anteil in der Probe wurden manchmal nur 35% der theoretisch maximal möglichen Abstoßungskraft gemessen.

In Abb. 3 ist die geometrische Anordnung von Permanentmagnet

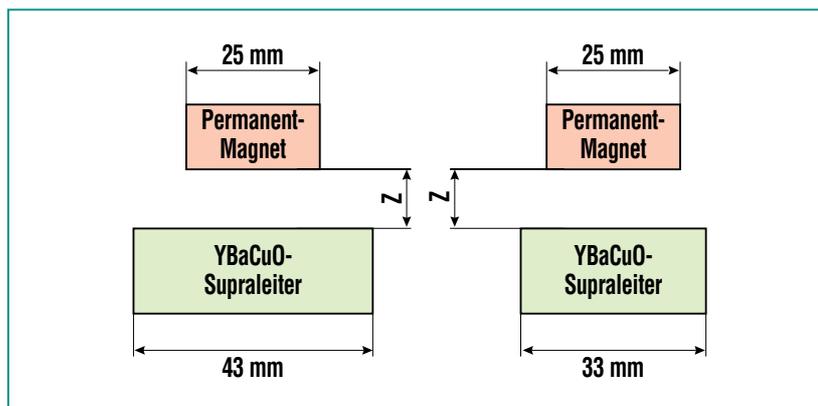


Abb. 3: Messkonfiguration von Zylindern aus YBaCuO mit unterschiedlichen Durchmessern und einem zylindrischen Permanentmagneten. Bei guter Textur des YBaCuO wird jeweils der Spiegelfluß im Supraleiter induziert. Die abstoßende Kraft erwies sich in beiden Fällen als gleich groß.

mit 25 mm Durchmesser und zwei YBaCuO-Proben mit 43 mm bzw. 33 mm Durchmesser gezeigt. Interessant ist dabei die Tatsache, daß bei gleich guter Textur beide Proben von 43 mm Durchmesser und von 33 mm Durchmesser gleiche Abstoßungskräfte erbringen, denn das Streufeld des Permanentmagneten greift nicht weiter als über die Probe mit 33 mm Durchmesser hinaus. So wird in beiden Fällen der Spiegelfluß des Permanentmagneten von 25 mm Durchmesser in den Supraleitern induziert.

Aus Messungen der abstoßenden Kräfte gewinnt man die Kennlinien. Bei Annäherung bzw. bei Entfernung des Permanentmagneten vom YBaCuO-Supraleiter ergeben sich die obere bzw. die untere Messkurve. Der Hysterese-Effekt entsteht durch Abschirmung des Feldes des Permanentmagneten im Supraleiter.

Bei einem bestmöglich texturierten YBaCuO-Zylinder von 43 mm

Durchmesser wurde mit dem Permanentmagneten von 25 mm Durchmesser und einer Induktion von 0,46 T eine maximale abstoßende Kraft von 94,5 N er-

reicht. Bezieht man diese Kraft nur auf die Oberfläche des Permanentmagneten, so resultiert ein Druck von $19,3 \text{ N/cm}^2$ auf den supraleitenden Zylinder. Berücksichtigt man allerdings, dass der Streufluss des Permanentmagneten weiter über den Rand des Permanentmagneten hinausreicht, so erhält man einen Maximaldruck von $15,9 \text{ N/cm}^2$. Diesem Druck muss der keramische Supraleiter standhalten und nicht zerbröckeln – möglichst während seiner ganzen Lebensdauer. Immerhin wurden mit der genannten Probe ca. 95% der theoretisch möglichen maximalen Abstoßungskraft erreicht.

Aus 8 ähnlich gut texturierten YBaCuO-Zylindern wurden 8 keilförmige Stücke geschnitten und zu einer Kreisringscheibe von ca.

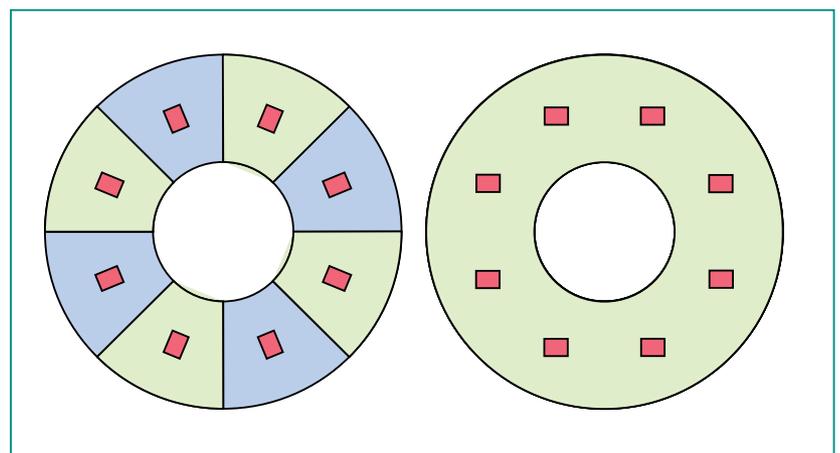


Abb. 4: Linke Seite: Wenn aus den zylindrischen YBaCuO-Proben keilförmige Stücke geschnitten werden und diese Stücke zu einem Kreisring zusammengesetzt werden, stellen die Schnittstellen ein Hindernis dar. Die Anordnung der Saatkristalle kann dann beliebig geschehen.

Rechte Seite: Wenn eine YBaCuO-Kreisringscheibe als Ganzes schmelztexturiert wird, ist es nötig, alle 8 Saatkristalle mit gleicher Orientierung der a-/b-Achsen in die erstarrende Schmelze zu implantieren. Dann gibt es in den Grenzbereichen zwischen zwei benachbarten Saatkristallen keine Fehlorientierungen der a-/b-Achsen um die dazu senkrechte c-Achse.

12 cm Durchmesser zusammengesetzt (siehe Abb. 4). Über dieser Kreisringscheibe schwebt ein ringförmiger Permanentmagnet, der seinerseits eine Schwungmasse trägt. Diese Schwebeanordnung ist im Schnitt in Abb. 5 zu sehen. In einer früheren Anordnung wurden 6 YBaCuO-Zylinder verwendet, auf welchen ein ringförmiger Permanentmagnet schwebte [18]. In fortgeschrittenen Versionen magnetischer Lager sind 2 solcher Lager gekoppelt, wie sie in Abb. 5 dargestellt sind. Zur Erhöhung der Tragkraft können jeweils 3 solcher Schwebeanordnungen stockwerkartig übereinander gelagert werden, so dass insgesamt 6 dieser Anordnungen das magnetische Lager bilden.

Neuere Entwicklungen von ringförmigen schmelztexturierten YBaCuO-Scheiben

Anstatt aus 8 schmelztexturierten YBaCuO-Zylindern von 43 mm Durchmesser 8 Segmente für eine Kreisringscheibe zu schneiden, werden künftig Kreisringscheiben von ca. 12 cm Durchmesser mit Hilfe von z. B. 8 Saatkristallen durch Bekeimen der YBaCuO-Schmelze hergestellt. Ob es nun 8 Saatkristalle sein können oder vielleicht mehr erforderlich sein werden, müssen künftige Neutronen-Texturuntersuchungen im GKSS-Forschungszentrum Geesthacht zeigen. Im kleinen Rahmen können diese Untersuchungen der Textur mit Röntgen-Beugung auch im Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt werden. Doch ist klar, dass mit Röntgenbeugung

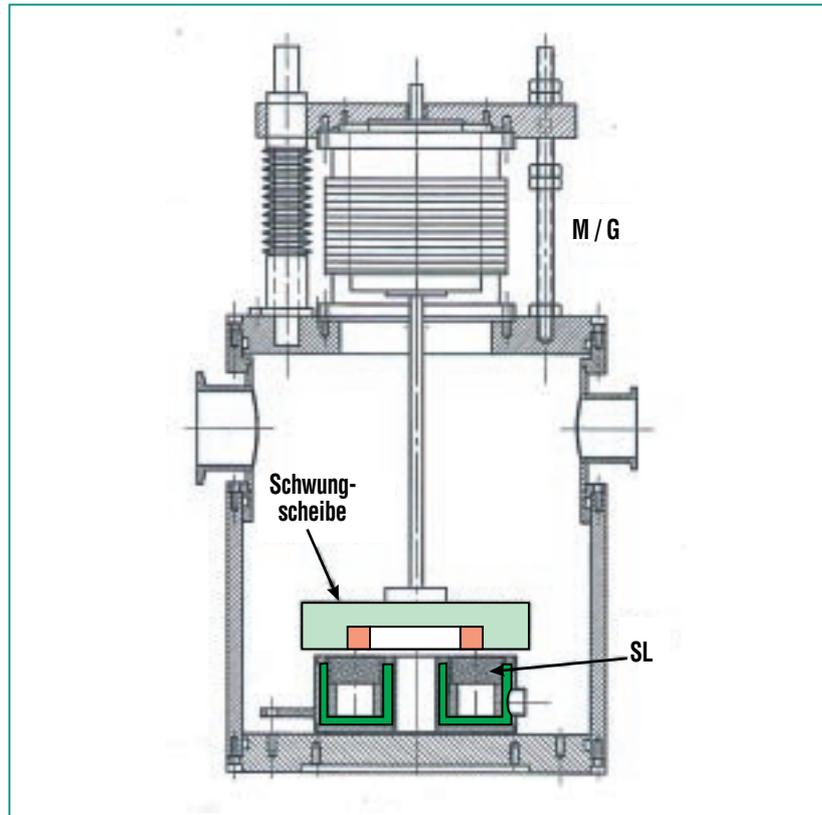


Abb. 5: Schnitt durch einen Rotor mit selbststabilisierendem supraleitendem magnetischen Lager. Der induzierende ringförmige Permanentmagnet ist in die Schwungscheibe eingelassen. Oben befindet sich ein Motor- und Generator-Teil. Die Anlage dient der Speicherung von Energie.

nur eine Aussage über die Textur an der Oberfläche der Kreisringscheiben möglich ist.

Besonders die Frage nach der Güte der Texturierung im Grenzbereich zwischen den Einflusssphären zweier benachbarter Saatkristalle auf den YBaCuO-Kreisring-Scheiben könnten nur Neutronen-Textur-Messungen im GKSS-Forschungszentrum Geesthacht beantworten. Dass allein aus Röntgen-Textur-Messungen, die auch in Karlsruhe möglich sind, keine Schlüsse auf die Textur im gesamten Volumen zu ziehen sind, geht eindeutig aus un-

seren [19] Neutronen-Textur-Messungen in Geesthacht hervor. Dabei wurde eine YBaCuO-Probe mit einer Tragkraft von 94,5 N – gegenüber einem Permanentmagneten von 25 mm Durchmesser und 0,46 T Induktion –, die zuvor in Karlsruhe in viele Teile zerschnitten wurde, auf die Variation der Textur im gesamten Volumen untersucht. Es zeigten sich erhebliche Schwankungen innerhalb eines Randstückes der zerschnittenen Probe. Dieses Randstück wurde wiederum vertikal in 3 Schichten zerteilt, so dass die Variation der Textur von der Oberfläche mit dem Saatkri-

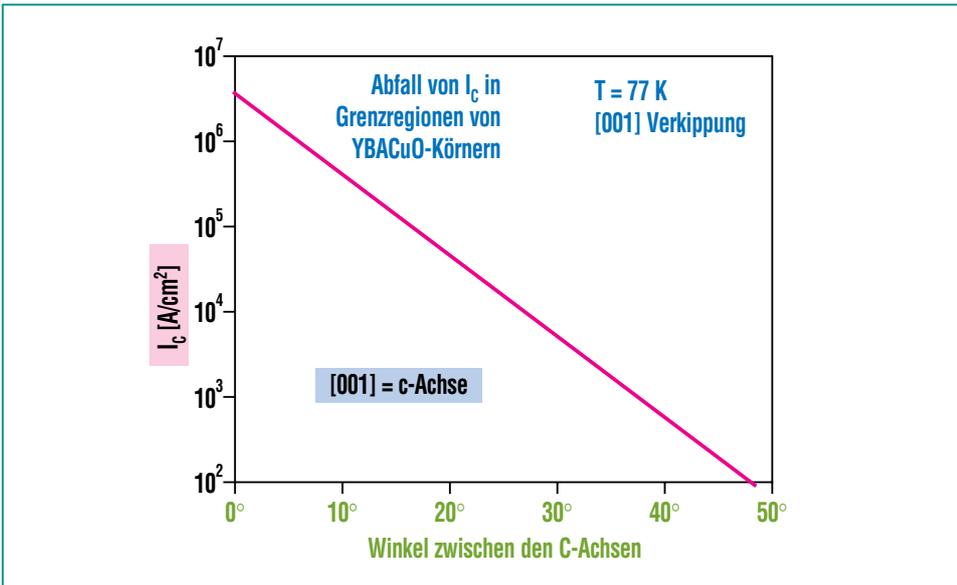


Abb. 6: Abfall der maximal induzierbaren Stromdichte, wenn die c-Achsen benachbarter Körner einen Winkel einschließen. Eine Verkipfung um 10° reduziert die maximal induzierbare Stromdichte bereits auf ein Zehntel.

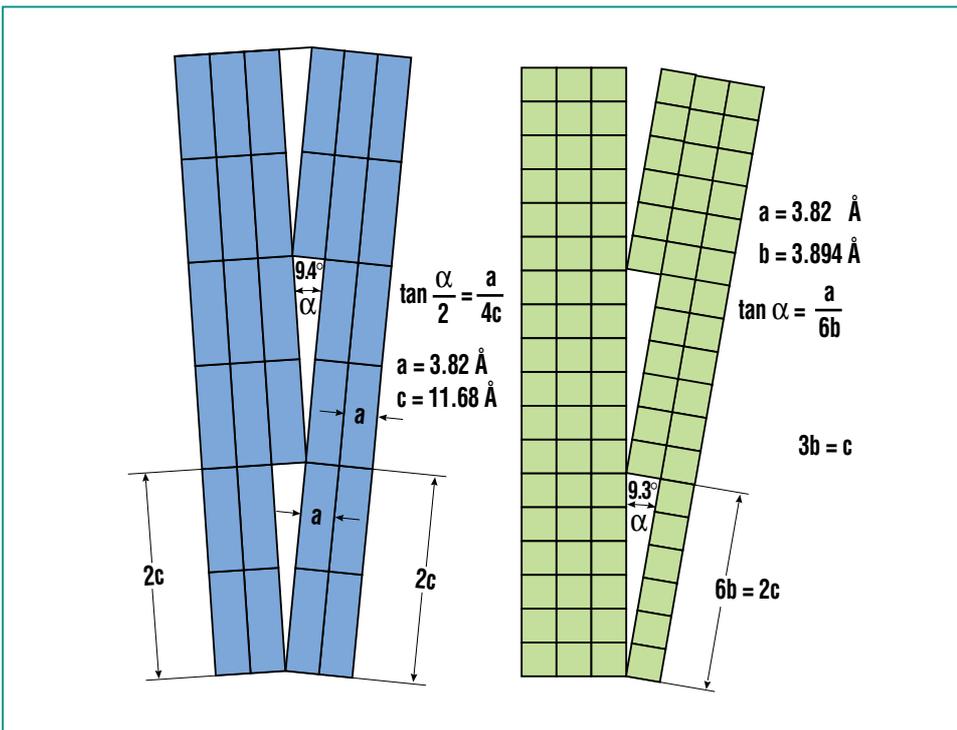


Abb. 7: Mögliche Konfigurationen an den Korngrenzen zweier benachbarter Körner. Links ist eine Verkipfung der c-Richtung, rechts eine Verdrehung in der a-b-Ebene um die c-Achse gezeigt. Solche Konfigurationen würden die maximal induzierbare Stromdichte bereits auf ein Zehntel des Wertes reduzieren, welche ohne Verkipfung bzw. Verdrehung der Körner zu erwarten ist.

stall in die Tiefe untersucht werden konnte. Die Halbwertsbreite der c-Achsen-Richtungsverteilung lag in der Mitte der Probe bei $5,7^\circ$. In einem Randstück stieg diese Halbwertsbreite bis auf 10° an, jedoch nur an der Oberfläche. Darunter lag die Halbwertsbreite der c-Achsen-Richtungsverteilung bei nur 3° , und an der Unterseite wurden 4° gemessen.

(Die Richtungsverteilung der c-Achsen wurde mit Hilfe des (005) Reflexes und die der a- bzw. b-Achsen am (113) Reflex gemessen. Die gesamte Polkugel wurde schließlich mit Hilfe des (002) Reflexes auf parasitäre Orientierungen von c-Achsen abgefahren [19].) Auch ein eventueller regelloser Anteil der Probe konnte durch Vergleiche der Reflexintensitäten im Maximum der Texturverteilung ermittelt werden. So wurde bei einer Probe mit nur halber Tragkraft, aber schmaler c-Achsen-Richtungsverteilung, ein regelloser Anteil in der Probe von etwa 50% ermittelt.

Es ist unschwer einzusehen, dass es innerhalb einer Probe keinen regellosen Anteil geben darf. Bei einem regellosen Anteil kommen sehr große Winkel zwischen den c-Achsen benachbarter Körner vor, wodurch die induzierbare Suprastromdichte ganz erheblich reduziert wird, wie im Folgenden noch näher erläutert wird. Abb. 6 zeigt den Abfall der maximal induzierbaren Stromdichte als Funktion des Winkels zwischen den c-Achsen [20]. Bereits bei einem Winkel von 10° liegt eine Reduktion auf $1/10$ vor. Abb. 7 zeigt, wie solche Winkel durch Verkipfung oder Verdre-

hung in der a-b-Ebene zustandekommen.

Wenn die gesamte Probe gut texturiert ist, mit einer c-Achsen-Richtungs-Verteilung, deren Halbwertsbreite bei 5 bis 6° liegt, die a- bzw. b-Achsen-Richtungs-Verteilungen ähnlich gute Werte aufweisen und die Probe auch keine Mikrorisse hat, steht einer maximalen magnetischen Tragkraft nichts mehr im Wege. Bei großen Kreisringscheiben aus YBaCuO ist jedoch die Gefahr von Mikrorissen größer als bei massiven Zylindern von 43 mm Durchmesser. Bereits bei den massiven Zylindern werden Stahlbandagen zur Vermeidung von Rissausbreitung bei hohen Feldern eingesetzt [21]. Mit den Kreisring-Scheiben von 12 cm Außendurchmesser wird Neuland betreten.

Gründe für die Reduzierung der maximal induzierbaren Stromdichte im Supraleiter

Ist die Breite der c-Achsen-Richtungs-Verteilung klein, so treten auch kleine Winkel zwischen den c-Achsen benachbarter Körner auf. Doch gibt es – abhängig von der Korngröße – keine feste Korrelation zwischen beiden Verteilungen, der globalen Textur-Verteilung und der Verteilung der Größe der Winkel zwischen den c-Achsen jeweils benachbarter Körner. Bei gleicher Verteilungsbreite der Richtungen aller c-Achsen zweier YBaCuO-Proben kann es durchaus unterschiedliche Verteilungsbreiten der Größe der Winkel zwischen den c-Achsen jeweils benachbarter YBaCuO-

Körner geben. Die globale Texturverteilung ist also nur ein grober Richtwert, der erwarten lässt, dass auch die Winkel zwischen den c-Achsen benachbarter Körner in gewissen Grenzen liegen.

Wichtig für die Größe des induzierbaren supraleitenden Stromes ist aber die Größenverteilung der Winkel zwischen den c-Achsen benachbarter Körner und die Zahl der zu überwindenden Grenzbereiche zwischen den Körnern. Um die Verteilung der Winkel zwischen den c-Achsen benachbarter Körner zu erfassen, wären zusätzliche Korn-Korn-Korrelationsmessungen nötig.

Wie aus Abb. 6 zu ersehen ist, sinkt die maximal induzierbare Stromdichte im Grenzbereich zwischen 2 benachbarten Körnern auf 1/10 des Maximalwertes, wenn die c-Achsen benachbarter Körner einen Winkel von 10° einschließen. Bei Verdrehungen um die c-Achsen, sogenannten Twists, also einem Winkel zwischen den a- bzw. b-Achsen benachbarter Körner, sinkt die maximal induzierbare Stromdichte in ähnlicher Weise ab wie bei der Verkippung der c-Achsen [20]. Warum dies so ist, lässt sich noch nicht befriedigend erklären. Die Cooper-Paare der Supraleitung bewegen sich bevorzugt in den a-b-Ebenen der Kristallite aus YBaCuO. Und da darf es keine zu großen Lücken geben, sonst brechen die Cooper-Paare auseinander. In Abb. 7 ist eine Konstellation benachbarter Körner für die Verkippung der c-Achsen und auch für die Verdrehung um die c-Achsen gezeigt. Man könnte sich auch vorstellen, daß bei der an-

gegebenen Konfiguration der Querschnitt, auf welchem die Cooper-Paare hinüberspringen können, auf ca. 1/10 des Wertes sinkt, welcher bei fehlender Verkippung bzw. bei nicht vorhandener Verdrehung um die c-Achsen sich den Cooper-Paaren darbietet.

Aussichten für die Hochtemperatur-Supraleitung

In welchem Maße Hochtemperatur-Supraleiter für magnetische Lager in Zukunft technische Anwendung finden werden, ist schwer abzuschätzen. Magnetische Lager werden vorerst ohne Supraleiter verwendet, z.B. bei Turbo-Molekularpumpen und bei Neutronen-Choppers [22], oder versuchsweise mit wenigstens supraleitender Stabilisierung [23]. Weitere Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der supraleitenden selbststabilisierenden magnetischen Lager wird hauptsächlich in Deutschland [24-26] und in Japan [27-29] durchgeführt.

In der Transporttechnik mit der berührungsfreien Beförderung von Personen und Gütern, auch innerbetrieblich bei Reinstraumbedingungen, ist vielleicht eher ein Durchbruch für die Supraleitung denkbar.

Die keramischen Hochtemperatur-Supraleiter, wie z.B. das YBaCuO, bringen als wichtigen Vorteil den Wegfall der Kühlung mit flüssigem Helium. Dafür sind die Anforderungen an die Textur, die jeweilige Kristallitorientierung des Materials, wie hier gezeigt wurde, erheblich.

Im Januar diesen Jahres 2001 wurde nun überraschenderweise ein neuer Supraleiter, das Magnesiumdiborid, entdeckt, dessen Sprungtemperatur immerhin 39 K beträgt [30]. Dieses Material ähnelt in vieler Hinsicht den klassischen metallischen Tieftemperatur-Supraleitern, auch im Hinblick auf geringe Texturanforderungen. Vielleicht sind auf dieser Basis in einigen Jahren gut verarbeitbare Supraleiter verfügbar, deren Sprungtemperaturen ebenfalls nur Kühlung mit flüssigem Stickstoff erfordern. Das würde neue Aussichten für das magnetische Schweben eröffnen.

Zukunft der Magnetschwebbahn

Die geplante Verbindung des Transrapid zwischen Hamburg und Berlin scheiterte nicht nur an zu hohen Kosten für die Trasse, sondern auch daran, dass die Deutsche Bahn AG sich selbst mit dem Transrapid Konkurrenz aufgebaut hätte und auf der bestehenden Rad-Schiene-Verbin-

dung durch Abwanderung von Fahrgästen Einnahmeverluste von ca. 230 Mio DM/Jahr hätte erwarten müssen [31].

Anders sieht es im Ruhrgebiet aus, wo ohnehin ein Verkehrs-Engpass besteht. Dort könnte auf einer ca. 100 km langen Städte-Verbindung ein schnelles Regional-Verkehrssystem für etwa 3 Mrd. DM eingerichtet werden. Bei einem mittleren Stationsabstand von ca. 15 km käme zwar nur eine Maximalgeschwindigkeit von 280 km/h in Frage, doch bei dieser Geschwindigkeit ist der Transrapid energetisch schon günstiger als z. B. der ICE 3. Auch wäre die Lärmbelastung gegenüber dem ICE 3 rund 5 dB(A) geringer [32]. Gegenüber herkömmlichen IC-Zügen wären es sogar bis zu 20 dB(A).

Da nun die aktive Trasse, in welcher der Antrieb ortsfest installiert ist, aber eine hohe Kapitalbindung mit sich bringt, ist der Transrapid nur bei einem sehr hohen Fahrgastaufkommen rentabel. Dabei muss der Besetzungsgrad

eines Zuges über die gesamte Strecke gemittelt werden. Die Auslastung einer Strecke wird deswegen in Personenkilometer/Streckenkilometer und Jahr angegeben. Eine Auslastung von 12 Mio. Pers.-km/Strecken-km.a wäre wohl für den kapitalintensiven Transrapid nötig. Bei einer mittleren Platzausnutzung von 50% (dabei müssen schon manche Fahrgäste stehen) könnten Transrapid-Züge von 4 Sektionen Länge (4 Wagen) in einem mittleren 10-Minuten-Takt (verdichtet in den Hauptverkehrszeiten und verdünnt in den Schwachlastzeiten) bei 108 Fahrten pro Tag und Richtung das Ruhrgebiet als Superschnellbahn erschließen. Wenn ein Zug 320 Plätze aufweist und das Jahr wegen des Verkehrsrückganges an Feiertagen mit 347 Tagen/a berechnet wird, ergeben sich bei 50% Platzausnutzung die durchschnittlichen 12 Mio. Fahrgäste pro Jahr auf der ganzen Strecke.

Bei einem mittleren Stationsabstand von 15 km, bei effektiver Beschleunigung und Verzögerung von $1,0 \text{ m/s}^2$ und einer halben Minute Haltestellen-Aufenthaltszeit ergeben sich 180 km/h als Reisegeschwindigkeit. Steigt die Haltezeit auf 1,5 Minuten an, so können nur noch 150 km/h als Reisegeschwindigkeit erreicht werden.

Wenn öffentliche Investitionen getätigt werden, ist ein Realzins von 3% in Ansatz zu bringen (Zinssatz 6% abzüglich 1,5% Verzicht auf Zinsabschlagsteuer und 1,5% Inflationsrate ergibt 3% Realzins). Bei Investitionskosten von 3 Mrd. DM für 100 Streckenkilometer und einem Realzins



Abb. 8: Der Transrapid 07 auf einer Trasse in Hochlage.

von 3% wäre bei 12 Mio. Personen-km/Strecken-km.a der Personenkilometer mit 7,5 Dpf/Person und km vorbelastet. Dieser Wert erscheint erträglich. Bei nur 6 Mio. Pers.-km/Strecken-km.a betrüge die Zinsvorbelastung schon 15 Dpf/Pers. km. Ein hohes Verkehrsaufkommen ist also entscheidend für die Rentabilität des Transrapid.

In China mit seiner sehr hohen Bevölkerungsdichte dürfte die Rentabilität des Transrapid sicher gegeben sein. Auf der 31,5 km langen Strecke von Schanghai bis zum Flughafen Pudong, deren Bauausführung nun unterschrieben ist, rechnet man mit 60 bis 80 Mio. Fahrgästen pro Jahr. Damit würden die Kapitalkosten bei 4.4 Mrd. DM Investitionen auf 1,7 bis 2,3 Dpf/Person und km kommen. Auch für die Strecke vom Flughafen Peking in die Stadt (Nähe deutsche Botschaft) von etwa 26 km Länge wird der Einsatz des Transrapid anvisiert.

Aus der Tagespresse (z.B. „Die Welt“ vom 16.08.2001) wurde bekannt, dass in China inzwischen auch ein eigenes Magnetbahn-System entwickelt wurde. Doch schon auf der MAGLEV 2000 in

Rio de Janeiro wurde im Rahmen eines Tagungsbeitrages aus China eine Modell-Magnetschwebbahn vorgeführt, die auf YBaCuO-Supraleitern im Fahrzeug und auf Permanentmagneten in der Spur basierte [10]. In der Presse wurde jedoch nicht berichtet, auf welchem System die chinesische Entwicklung beruht. Es wurde lediglich berichtet, dass das entwickelte Schwebesystem nur ca. 80 km/h schnell sei. Dies lässt vermuten, dass es sich um ein Magnet-Schwebesystem handelt, das mit Supraleitern im Fahrzeug und Permanentmagneten bzw. Elektromagneten in der Trasse arbeitet (siehe Abb. 1 und Abb. 2). Denn nur bei einem solchen System ist es vertretbar, die Schwebefahrzeuge auch bei niedrigen Geschwindigkeiten zu betreiben, da für das Aufrechterhalten des Schwebezustandes – im Gegensatz zum Transrapid – kaum Energie verbraucht wird, nur diejenige zum Kalthalten der Supraleiter im Schwebefahrzeug.

Auffallend war, dass auf der ICOTOM 11 in Xi'an dem Posterbeitrag aus dem Forschungszentrum Karlsruhe, der zugleich in den auf der Tagung verteilten

Proceedings enthalten war [33] und von Neutronen-Textur-Messungen an YBaCuO-Zylinderproben handelt, von chinesischer Seite äußerst reges Interesse entgegengebracht wurde. So war es dann auch nicht verwunderlich, dass 4 Jahre später auf der MAGLEV 2000 in Rio de Janeiro das oben genannte Modell einer Magnetschwebbahn mit YBaCuO-Supraleitern im Fahrzeug und Permanentmagneten auf der Spur vorgeführt wurde [10].

Inzwischen scheint auch die Deutsche Bahn AG entschlossen, den Transrapid sowohl in Bayern als auch in Nordrhein-Westfalen zu betreiben [34].

Diesen Transrapid (07) zeigt schließlich die Abb. 8 auf einer aufgeständerten Magnetbahntrasse, wie wir ihn in Zukunft vielleicht in München und auch im Ruhrgebiet sehen könnten.

Literatur

- [1] P. Görnert, W. Gawalek, *Proceed. of the 14th Int. Conf. On Magnetically Levitated Systems (MAGLEV 95), Bremen, pp. 483-488 (1995)*
- [2] G. Bogner, *10th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems (MAGLEV), Hamburg, pp. 381-390 (1988)*
- [3] H. J. Bornemann, C. Urban, R. Zabka, H. Rietschel, P. de Rango, X. Chaud, P. Gautier-Picard, R. Turnier, *Applied Superconductivity, Vol. 1, H.C. Freyhardt (ed.) DGM Informationsgesellschaft Verlag, pp. 277-283 (1993).*
- [4] H. Weh, H. Pahl, H. Hupe, A. Steingröver, H. May, *Proceed. of the 14th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems, Bremen, pp. 217-222 (1995)*
- [5] L. Schultz, *Vortrag und Demonstration im Physikalischen Kolloquium der Universität Karlsruhe am 14. 01. 2000.*
- [6] L. Schmidt, M. Ullrich, W.F. Kuhs, *Textures and Microstructures, Vol. 33, pp. 75-92 (1999).*
- [7] P. Görnert, *Crystal Research and Technology 32, pp. 7-33 (1997)*

- [8] H. J. Bornemann, A. Tonoli, T. Ritter, C. Urban, O. Zaitsev, K. Weber, H. Rietschel, *Applied Superconductivity Conference 1994, Boston, USA, IEEE Transactions on Appl. Supercond., Vol. 5, pp. 618-621 (1995).*
- [9] V. Jung, H.-G. Brokmeier, *Crystal Research and Technology 35, pp. 321-328 (2000)*
- [10] W.M. Yang, L. Zhou, Feng Yong, P.X. Zhang, J.R. Wang, C.P. Zhang, Z.M. Yu, X.D. Tang, W. Wei, X.Z. Wu, *Proceedings of the MAGLEV 2000, 16th Int. Conf. on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro, pp. 107-110 (2000)*
- [11] Karin Oberleiter, *Konstruktion einer supraleitenden Modellschwebbahn mit magnetischem Linearantrieb. Zulassungsarbeit für das Lehramt, Physikalisches Institut III der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Auch: <http://www.pit.physik.uni-tuebingen.de/Kleiner/Deutsch/Festkoerperphysik.html>*
- [12] R. Nicolsky, R. Stephan, R. Andrade Jr., A.C. Ferreira, *Proc. of the MAGLEV 2000 (ibid.) pp. 179-182 (2000)*
- [13] K. Vandenbrouke, R.J. Cruise, Ch.F. Landy, A. Zachas, M.D. McCulloch, G. Barnes, *Proc. of the MAGLEV 2000 (ibid.) pp. 177-178 (2000)*
- [14] V. Jung, *Internationales Verkehrswesen 44, S. 482-487 (1992).*
- [15] V. Jung, *Magnetisches Schweben, Springer-Verlag, Heidelberg, (1988)*
- [16] L. K. Edwards, *Transportation Engineering Journal ASCE Vol. 95, pp. 173-202 (1969)*
- [17] A. Cassat, M. Rosenmayr, N. Macabrey, M. Jufer, *Proc. of the MAGLEV 2000, (ibid.) pp. 119-130 (2000)*
- [18] P. Komarek, *Hochstromanwendung der Supraleitung, B.G. Teubner, Stuttgart 1995, S. 304-306.*
- [19] V. Jung, M. Adam, H.J. Bornemann, H.-G. Brokmeier, A. Kaiser, R. Schnieber, J. Thoms, *Textures and Microstructures, Vol. 33, pp. 93-100 (1999).*
- [20] R. Gross, *Interfaces in High-Tc Superconducting Systems, Springer-Verlag Heidelberg, pp. 176-209 (1993)*
- [21] G. Fuchs, G. Krabbes, *Physikalische Blätter 57 (2001) Nr. 5, S. 304-306*
- [22] J. K. Fremerey, *Permanentmagnetische Lager, Lehrgangsskriptum zum Thema Luftlagerungen, Technische Akademie Esslingen (2000)*
- [23] D. F. B. David, A. Ripper, J. A. Santisteban, R. N. Stephan, R. de Andrade Jr., R. Nicolsky, D. N. Gomes, *Proc. of the MAGLEV 2000, (ibid.) pp. 441-446 (2000)*
- [24] F. Werfel, U. Flögel-Delor, R. Rothfeld, D. Wippich, Th. Riedel, *in Proc. 7th Int. Sympos. Magnetic Bearings, ETH Zürich, 23-25 Aug. 2000, p. 601-606.*
- [25] S.O. Siems, H. May, E. Portabella, W.-R. Canders, *in Proc. 7th Int. Sympos. Magnetic Bearings, ETH Zürich, 23-25 Aug. 2000, p. 607-612.*
- [26] E. Portabella, R. Palka, H. May, W.-R. Canders, *in Proc. 7th Int. Sympos. Magnetic Bearings, ETH Zürich, 23-25 Aug. 2000, p. 625-630.*
- [27] M. Komori, N. Akinaga, H. Sahai, *in Proc. 7th Int. Sympos. Magnetic Bearings, ETH Zürich, 23-25 Aug. 2000, p. 613-618.*
- [28] H. Fukuyama, T. Takizawa, *in Proc. 7th Int. Sympos. Magnetic Bearings, ETH Zürich, 23-25 Aug. 2000, p. 619-624.*
- [29] Y. Zhang, K. Nonami, H. Higasa, *in Proc. 7th Int. Sympos. Magnetic Bearings, ETH Zürich, 23-25 Aug. 2000, p. 631-636.*
- [30] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Akimitsu, *Nature 410, pp. 63-64 (2001)*
- [31] R. Breimeier, *Internationales Verkehrswesen 51, S. 568-572 (1999)*
- [32] G. Kratz, *ZEV + DET Glas. Ann. 123, S. 93-106 (1999)*
- [33] H. J. Bornemann, H.-G. Brokmeier, T. Burghardt, W. Hennig, V. Jung, U. Zink, *Textures of Materials, Proc. of the 11th Int. Conf. on Textures of Materials, Vol 2, pp. 951-955, ICOTOM 11, Xi'an (1996).*
- [34] H. Mehdorn, *Die Zeit 30, S. 22 (2001).*