

Das Hochfeldlabor Dresden

Wie sich gepulste Magnetfelder mit 100 Tesla erreichen lassen

Frank Pobell

Das Magnetfeld ist neben der Temperatur der wichtigste Parameter, mit dem Wissenschaftler im Labor die Eigenschaften der Materie verändern, um diese besser zu verstehen, „maßzu-schneidern“ oder um neuartige magnetisch induzierte Zustände zu erzeugen. Die Forschung in hohen Magnetfeldern hat im letzten Jahrzehnt einen bedeutenden Aufschwung genommen; weltweit steigt der Bedarf nach immer höheren Feldern. Das ehrgeizigste europäische Projekt, das diesem Bedarf nachkommen wird, ist das Hochfeldlabor Dresden (HLD). Hier sollen gepulste Magnetfelder bis zu 100 Tesla zur Verfügung stehen; das ist das Zwei-Millionenfache des Erdmagnetfelds.

Bei Untersuchungen in Magnetfeldern hat sich gezeigt, dass jede Erweiterung des zugänglichen Feldbereiches – wie bei Erweiterungen des zugänglichen Temperaturbereiches – mit der Entdeckung neuer Effekte belohnt worden ist. Prominente Beispiele sind die Quanten-Hall-Effekte¹⁾, das kritische Feld der Supraleiter oder neue magnetische Zustände. Entdeckungen mit Hilfe von Magnetfeldern hatten und haben weiterhin entscheidenden Einfluss auf unser Verständnis von Festkörpern, insbesondere von Halbleitern, Supraleitern und magnetischen Materialien [1, 2]. Die technischen Anwendungen dieser Forschungsergebnisse sind im Alltag allgegenwärtig. So enthalten unsere Verkehrssysteme, Autos, Eisenbahnen und Flugzeuge eine Vielzahl von Bauteilen, z. B. magnetische Sensoren, die das Resultat der Magnetfeldforschung sind. Ohne diese Forschung wären auch die modernen Informations- und Kommunikationstechnologien nicht möglich gewesen; man denke nur an die Computer-Festplatte. Daher ist es nicht verwunderlich, dass in der Forschung weltweit der Wunsch nach immer höheren Magnetfeldern wächst [2].

Natürliche Magnetfelder variieren über mehr als 20 Größenordnungen und erreichen bis zu 10^7 T. Im Labor lassen sich mit kommerziellen supraleitenden Spulen statische Magnetfelder bis 20 T erzeugen (Tab. 1). Dieser Wert könnte sich in Zukunft durch die Weiterentwicklung der



Ein Blick in die Halle des Hochfeldlabors Dresden. Hier wird die große Kondensatoranlage aufgebaut, welche die enorme Energie für die Magnetfeldspulen liefern soll. Um eine Feldstärke von 100 Tesla zu erreichen, sind 50 Megajoule nötig. (Foto: FZR)

so genannten „Hoch- T_c -Supraleiter“ auf 25 bis 30 T steigern lassen. Begrenzt wird dies durch das kritische Magnetfeld, bei dem die Supraleitung unterdrückt wird, bzw. bei Hoch- T_c -Supraleitern durch das Irreversibilitätsfeld, bei dem elektrische Verluste auftreten. Deutlich höhere Magnetfelder sind für die Forschung nur durch resistive Spulen in nationalen „Hochfeldlabors“ zugänglich, denen die entsprechende finanzielle und personelle Ausstattung zur Verfügung steht. Die derzeitigen Rekordwerte für statische Felder, 33 T für resistive Spulen und 45 T für Hybridspulen (resistive Spule umgeben von einer supraleitenden Spule), dürften in absehbarer Zukunft nicht wesentlich

zu steigern sein [1, 2]. Das liegt nicht nur an den hohen Kosten, sondern hat vor allem physikalische Gründe: Auf die Leiter der Spulen wirken enorme Drücke im GPa-Bereich (s. u.), die benötigte Leistung liegt bei ca. 20 MW und für die Wasserkühlung der Spule braucht man etwa 1000 Kubikmeter Wasser pro Stunde. Noch höhere Magnetfelder sind allerdings mit gepulsten Spulen erreichbar, denen eine hohe Energie nur für eine kurze Zeit zugeführt wird.

KOMPAKT

- ▶ Im Hochfeldlabor Dresden (HLD) sollen ab 2007 gepulste Magnetfelder mit Pulsdauern von 10 Millisekunden und Feldstärken bis zu 100 Tesla zur Verfügung stehen.
- ▶ Das Hauptinteresse der Hochfeldforschung liegt im Bereich der Festkörperphysik, z. B. bei der Erforschung der Hoch- T_c -Supraleiter.
- ▶ Die unmittelbare Nähe des HLD zum neuen Freie-Elektronen-Laser ELBE bietet die Aussicht auf einzigartige Hochfeld-Infrarot-Spektroskopie-Experimente.

1) Siehe Physik Journal, Juni 2005, S. 37

Prof. Dr. Frank Pobell, c/o Forschungszentrum Rossendorf, 01314 Dresden

Die kurzzeitige Energiezufuhr (und die dadurch erfolgende Erwärmung der Spule von 80 K, der Temperatur vor dem Puls, auf 250 bis 350 K, der Temperatur nach dem Puls) senkt die Materialanforderungen, die notwendige Energie und die Kosten ganz wesentlich. Die angestrebten Pulszeiten von 10 bis 100 ms erlauben es, mit deutlich höheren Feldstärken bei weniger technischem Aufwand und zu geringeren Kosten in vielen Bereichen die gleichen Untersuchungen durchzuführen wie mit statischen Magnetfeldern.

Tab. 1: Typische Werte für Magnetfelder in Natur und Technik

Gehirnaktivität	10^{-13} T
Felder in Galaxien	10^{-12} T
Herzaktivität	10^{-10} T
Feld in Milchstraße	10^{-9} T
Technische Streufelder („urban noise“)	$10^{-6} - 10^{-8}$ T
Erdoberfläche	5×10^{-5} T
Einfache Laborspule	10^{-3} T
Sonnenflecken	0,3 T
Oberfläche von Ferromagneten	1 T
Felder in klinischen NMR-Geräten	1,5 T
Supraleitende Spulen, typisch	8 T
Supraleitende Spulen	bis 20 T
Resistive Spulen	bis 33 T
Pulsspulen (10 ms) (Stand 2005)	50 - 70 T
El.magn. Flusskompression (μ s)	300 - 600 T
Innere Austauschfelder in Ferromagneten	$10^2 - 10^3$ T
Flusskompression durch Explosion (μ s)	2×10^3 T
Weißer Zwerge	10^4 T
Neutronensterne	10^7 T

In mehreren Labors werden heute Magnetfelder von 60–70 T bei Pulsdauern von 10 ms erreicht [1, 2].²⁾ Vier dieser Labors (Los Alamos, Toulouse, Dresden, Kashiwa) mit Energieversorgungen im Megajoule-Bereich stehen mit der entsprechenden Infrastruktur auch externen Interessenten für ihre Experimente zur Verfügung. Alle vier Labors planen, den zugänglichen Feldbereich zu erweitern [2] (Tab. 2). Neben der Feldstärke und der Pulsdauer ist dabei der Durchmesser der Spulenbohrung die dritte wichtige Kennzahl, da er den für das Experiment zur Verfügung stehenden Platz bestimmt. Eine größere Bohrung bietet mehr Platz für Experimente und Proben, führt aber bei gleicher Energie E zu einem schwächeren Feld.

Forschung in hohen Magnetfeldern

Das Hauptinteresse an hohen Magnetfeldern kommt aus der Festkörperphysik. Eine besonders wichtige Rolle spielen sehr hohe gepulste Magnetfelder für diejenigen supraleitenden Materialien, die bislang am wenigsten verstanden sind: die Hoch- T_c -Supraleiter. Diese Substanzen zeigen sowohl im supraleitenden als auch im normalleitenden Zustand ungewöhnliche Eigenschaften, die auf eine starke Wechselwirkung und Korrelation der Leitungselektronen zurückgeführt werden. Die hohen kritischen Temperaturen der Phasenübergänge zwischen normal- und supraleitendem Zustand (bis ca. 140 K) führen zu entsprechend hohen kritischen Magnetfeldern B_{c2} (bis deutlich über 100 T), bei denen die Supraleitung in Hoch- T_c -Supraleitern unterdrückt wird. Diese hohen Werte machen diese Substanzen für viele praktische Anwendungen hochinteressant. Nicht zuletzt sind Materialuntersuchungen in nur gepulst zugänglichen Magnetfeldern Voraussetzung für

die nächste Generation supraleitender Spulen für die Erzeugung von statischen Magnetfeldern oberhalb 20 T.

Grundlegende Fragen des mikroskopischen Mechanismus der Hoch- T_c -Supraleitung sind jedoch weiterhin ungeklärt und lassen sich nur durch Untersuchungen in ihrem normalleitenden Zustand, d. h. bei $B > B_{c2}$, klären. Von besonderem Interesse sind z. B. die Temperaturabhängigkeit des kritischen Magnetfeldes B_{c2} über einen großen Bereich sowie die Magnetfeldabhängigkeit der kernmagnetischen Resonanz. Dasselbe gilt für die Messung von Quanten-Oszillationen („de Haas-van Alphen-Effekt“) im normalleitenden Zustand, die Aussagen über die elektronische Struktur der Hoch- T_c -Supraleiter geben. Außerdem muss die Temperaturabhängigkeit von Transporteigenschaften wie dem Hall-Widerstand, der Thermospannung oder dem Magnetowiderstand an diesen Systemen bei sehr hohen Magnetfeldern untersucht werden.

Entscheidend für den technischen Einsatz der Hoch- T_c -Supraleiter sind Untersuchungen der Bindung von magnetischen Flussschläuchen („Flux Pinning“) bei sehr hohen, für die Anwendung interessanten Feldern. Nur Materialien, bei denen die Flussschläuche auch bei höchsten Feldern gebunden bleiben, d. h. bei denen keine Verluste auftreten, sind für Anwendungen von Interesse. Abb. 1 zeigt ein Beispiel für die Messung der Temperaturabhängigkeit dieses „Irreversibilitätsfeldes“ B_{irr} in gepulsten Feldern.

Besondere Bedeutung bei Hochfeld-Untersuchungen sollte in Zukunft die Spektroskopie erhalten; z. B. die im HLD geplante Kernspinresonanz (NMR) bei GHz-Frequenzen (s. Abb. 2), die THz-Spektroskopie und die Spektroskopie mit der intensiven Infrarotstrahlung des Freie-Elektronen-Lasers des FZR (s. u.) sowie die

2) In diesem Artikel werden nicht die im Mikrosekunden-Bereich mit destruktiven Methoden, wie elektromagnetische oder explosive Flusskompression, erreichbaren noch höheren Felder diskutiert.

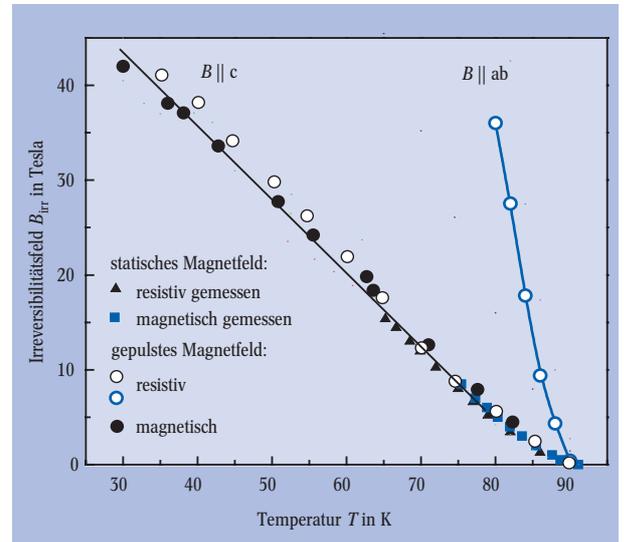


Abb. 1: Irreversibilitäts-Feld B_{irr} von schmelz-texturisiertem $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ in statischen und gepulsten Magnetfeldern bis 42 T (parallel und senkrecht zur kristallografischen c -Achse). B_{irr} trennt die Phase, in der sich Flusswirbel wie ein Glas verhalten, von einer flüssigkeitsähnlichen Phase. In letzterer treten Verluste auf und der kritische Strom verschwindet. Damit ist B_{irr} das höchste für die Anwendung von Supraleitern geeignete Magnetfeld; für Hoch- T_c -Supraleiter ist – anders als bei „konventionellen“ Supraleitern – in der Regel B_{irr} deutlich kleiner als das obere kritische Feld, bei der die Supraleitung verschwindet. Während sich die bei $B < 20$ T erhaltenen Daten durch den genannten Phasenübergang bzw. durch thermisch aktiviertes Flusswirbel-Kriechen erklären lassen, sind für das Verständnis der linearen T -Abhängigkeit von B_{irr} bei noch höheren Feldstärken Messungen bei noch stärkeren Feldern nötig. [nach Y. Skourski et al., Physica B 346-347, 325 (2004)]

Hochfeld-Röntgenstreuung und -Spektroskopie an Synchrotrons.

Auch in der Biologie und den anderen Lebenswissenschaften gibt es eine Vielzahl von Fragen, die mit Hilfe hoher Magnetfelder untersucht werden sollten, etwa der bisher unbekannte Einfluss von über 4 T starken Magnetfeldern auf den Menschen, die Ausrichtung von biologischen Objekten oder der Einfluss auf Wachstum, Zellteilung etc. Diese Fragen scheinen aber den statischen Feldern vorbehalten, da in der Regel – anders als in der Festkörperphysik – die typischen Zeiten für biologische Vorgänge wesentlich länger sind als die hier diskutierten Pulszeiten der Magnetfelder. Ausnahmen sind die oben erwähnten Hochfeld-Spektroskopien, z. B. NMR- und IR-Spektroskopie in hohen gepulsten Magnetfeldern, die auch für die Lebenswissenschaften von Bedeutung sein werden.

Die bedeutenden Ergebnisse der letzten Jahre und die offenen Fragen der Hochfeldforschung zu schildern, würde den Rahmen dieses Artikels sprengen (vgl. hierzu etwa [1, 2]) – das gilt bereits für die zahlreichen Experimente, die von den Dresdner Instituten am HLD geplant sind [3]. Trotzdem möchte ich zumindest stichwortartig einige der besonders interessanten Bereiche nennen: Hochkorrelierte Elektronensysteme, Feldinduzierte Supraleitung, magnetische Strukturen und metamagnetische Phasenübergänge magnetischer Substanzen, niederdimensionale Spinsysteme und Halbleiterstrukturen³⁾, Magnetophonon-, -polaron-, -plasmon und -exziton-Effekte in Halbleitern.

Vom Vorschlag zur Realisierung

Dresden ist seit langem eine Hochburg der Festkörperphysik und Materialforschung. Diese Bedeutung ist seit 1991 durch die Gründung von Max-Planck-, Fraunhofer- und Leibniz-Instituten sowie die Entwicklungen an der TU Dresden noch verstärkt worden. In Dresden gibt es heute eine Vielzahl führender Forschergruppen

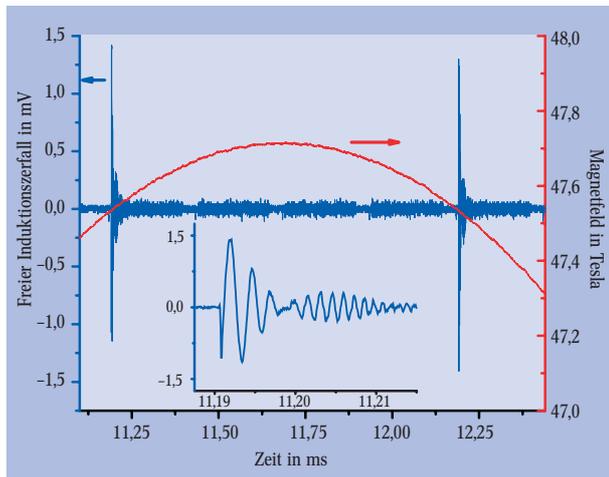


Abb. 2: Mit den gepulsten Magnetfeldern gelang es am IFW Dresden, das erste NMR-Spektrum bei einer Frequenz von deutlich über 1 GHz zu erhalten. Untersucht wurde der freie Induktionszerfall der kernmagnetischen Resonanz von Protonen in einem gepulsten Magnetfeld. Zu sehen sind im einzelnen:
 ▶ der zeitliche Verlauf des Magnetfeldes (rote Kurve, rechte Achse) nahe seines Maximums;
 ▶ fünf NMR-Pulse (blaue Kurve, linke Achse) während der gleichen Zeit und
 ▶ vergrößerte Darstellung des ersten Induktionszerfalls (Inset). Der freie Induktionszerfall der Resonanz bei 2,027 GHz tritt bei steigendem (1. Puls) und fallendem (5. Puls) Feld bei 47,54 T auf. [J. Haase et al., Solid State Nucl. Magn. Reson. 27, 206 (2005)]

der Gebiete Supraleitung, Magnetismus, korrelierte Elektronensysteme, Schwere-Fermionen-Systeme und Halbleiterphysik – also den Gebieten, die besonders auf den Zugang zu höchsten Magnetfeldern angewiesen sind. In Deutschland existiert aber kein international konkurrenzfähiges Hochfeldlabor. Um dieses Defizit zu beheben, haben im Jahr 1999 fünf Dresdner Institute der Festkörperphysik und Materialforschung eine Studie über die durchzuführende Forschung, die techni-

Tab. 2: Erreichte und geplante Pulsfelder in vier führenden Hochfeldlabors [1, 2, 6]

Ort	Feld (erreicht/ geplamt) in T	Pulsdauer ^{*)} in ms	Spulenbohrung in mm
Toulouse	76	3	15
	80	10	15
Kashiva	70	10	12
	100	1 – 10	15
Los Alamos/ Tallahassee	65	5	15
	100	7	15
Dresden	65	12	24
	60	500	40
	70	100	24
	100	10	20

^{*)} „Pulsdauer“ definiert als „Pulsbreite bei halbem Maximalfeld“

schon Voraussetzungen sowie die entstehenden Kosten für ein führendes Pulsfeldlabor angefertigt [3].

Ein wichtiger Aspekt des Vorschlags besteht darin, das neu zu errichtende Hochfeldlabor an die in den vergangenen Jahren vom Forschungszentrum Rossendorf aufgebaute „Strahlungsquelle ELBE“ [4] anzubinden. Diese Anlage besteht aus einem supraleitenden Elektronenbeschleuniger (40 MeV, 1 mA, cw-Betrieb mit 2 ps Pulsen), der u. a. Freie-Elektronen-Laser (FEL) für das mittlere und ferne Infrarot ($\lambda = 5$ bis $150 \mu\text{m}$) treibt. Durch die Kombination von Hochfeldlabor und FEL werden einzigartige Experimente der Infrarotspektroskopie ermöglicht. So liegen viele Zyklotronresonanzen von Halbleitern bei den angestrebten Magnetfeldern im Bereich der IR-Strahlung des Rossendorfer FEL. In diesem Wellenlängenbereich liegen auch Energielücken von Hoch- T_c -Supraleitern und von Halbleitern sowie die Bindungsenergien von Verunreinigungen in Halbleitern. Für den Magnetismus ist u. a. interessant, dass für ein Ion mit einem magnetischen Moment von $2\mu_B$ die Zeeman-Aufspaltung in 100 T einer IR-Strahlung von etwa $100 \mu\text{m}$ Wellenlänge entspricht.

Der Projektvorschlag HLD [3] wurde unter Federführung des Forschungszentrums Rossendorf (FZR) in einer Kooperation mit dem Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW; H. Eschrig und L. Schultz), den Max-Planck-Instituten für chemische Physik fester Stoffe (F. Steglich) sowie Physik komplexer Systeme (P. Fulde) und dem Institut für Angewandte Physik der TU Dresden (M. Löwenhaupt) erarbeitet und zur Begutachtung und Finanzierung eingereicht. Nach einem außerordentlich positiven Votum durch den Wissenschaftsrat im Jahr 2002 haben das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie das Sächsische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst die Bereitstellung der Mittel für die Jahre 2003 bis 2006 zuge-

³⁾ die magnetische Länge $l = (h/eB)^{1/2}$ beträgt 2,6 nm bei 100 T

sagt. Die Investitionskosten von 23 Millionen Euro (hinzu kommen 3,7 Millionen Euro jährliche Betriebskosten) für den Aufbau des HLD werden zu je 50 % vom BMBF und vom SMWK im Rahmen einer Sonderfinanzierung an das FZR getragen. Weitere Unterstützung erfährt das Vorhaben aus der Grundfinanzierung des FZR. Das Labor wird vom FZR (ca. 15 km nordöstlich von Dresdens Stadtzentrum) errichtet und betrieben werden.⁴⁾

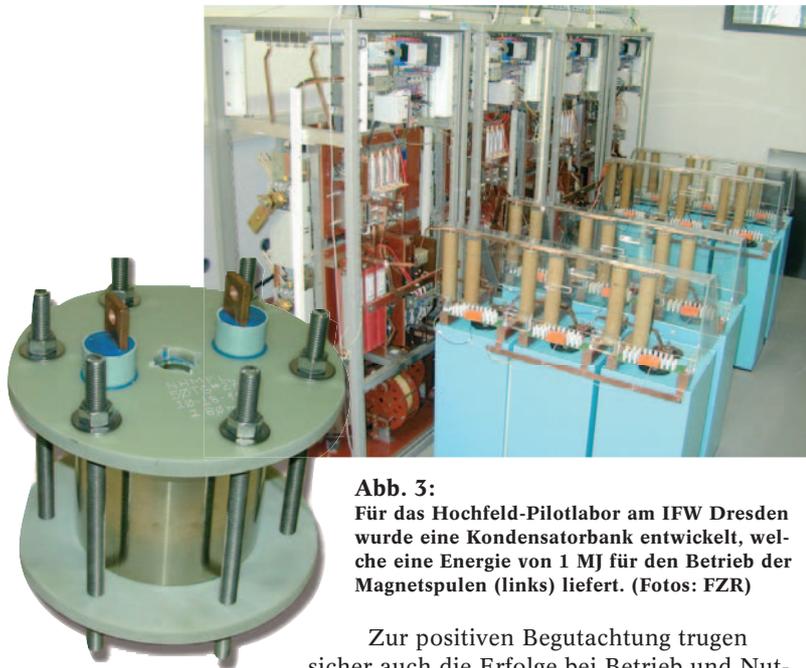


Abb. 3: Für das Hochfeld-Pilotlabor am IFW Dresden wurde eine Kondensatorbank entwickelt, welche eine Energie von 1 MJ für den Betrieb der Magnetspulen (links) liefert. (Fotos: FZR)

Zur positiven Begutachtung trugen sicher auch die Erfolge bei Betrieb und Nutzung eines Pilotlabors am IFW Dresden bei [5]. Für dieses Pilotlabor wurde vom FZR eine Kondensatoranlage mit 1 MJ Speicherenergie und 10 kV Ladepannung als gepulste Stromversorgung für die Spulen entwickelt. Mit vom amerikanischen Hochfeldlabor in Tallahassee erworbenen Spulen (Abb. 3) werden in diesem Labor seit dem Jahr 2000 Magnetfelder bis 61 T bei Pulsdauern von 10 ms erreicht. Mit diesem Pilotlabor ließen sich wichtige Erfahrungen für den Betrieb einer Pulsfeldanlage gewinnen. Darüber hinaus haben bereits mehrere Forschungsgruppen an dieser Anlage ihre Experimente durchgeführt (vgl. Abb. 1). Der Erfolg von Jürgen Haase und seinen Kollegen ist besonders erwähnenswert. Ihnen gelang es erstmals, kernmagnetische Resonanz in hohen gepulsten Magnetfeldern durchzuführen (Abb. 2). Der bereits jetzt durch diese Untersuchungen für die NMR zugängliche Bereich bis zu 56 T, d. h. bis 2,4 GHz für Protonen, wird der kernmagnetischen Resonanz einen neuen Forschungsbereich erschließen. Mit statischen Magnetfeldern ist für die NMR bisher nur der Frequenzbereich unter 1 GHz erreichbar. Die in Pulsspulen zugänglichen höheren Magnetfelder und Frequenzen ergeben bei geringeren Kosten eine höhere Auflösung und Empfindlichkeit (Signal/Rausch-Verhältnis) für die NMR-Spektroskopie; sie erlauben daneben auch die Beobachtung von Phänomenen, die nur bei höheren Feldern auftreten.

Das 100 Tesla-Hochfeldlabor Dresden

Bevor im Hochfeldlabor Dresden die bislang unerreichten Magnetfeldstärken bis zu 100 Tesla Realität werden, sind schwierige Aufgaben zu meistern, etwa beim Aufbau einer neuartigen Kondensatoranlage, welche die nötige Energie bereitstellt. Die Spulen mit den entsprechenden hochfesten Materialien sind zu

entwickeln und zu untersuchen, und schließlich müssen die Experimentiereinrichtungen (Elektronik, Kryo- und Vakuumtechnik, Optik) aufgebaut werden.

Bereits der Bau des Gebäudes, das im September 2004 fertiggestellt wurde, stellte besondere Anforderungen. Das wird deutlich, wenn man sich die in einer Spule gespeicherte Energie veranschaulicht: Um die enorme Feldstärke von 100 Tesla zu erreichen, ist nach $E = (B^2/2\mu_0)V$ (V ist das vom Feld erfüllte Volumen) eine elektromagnetische Energie von 50 MJ nötig. Diese entspricht der kinetischen Energie einer mit 150 km/h fahrenden 60 Tonnen schweren Lokomotive! Zudem müssen die Pulsfeldspulen, um mit den derzeit erhältlichen Materialien die angestrebten Magnetfelder zu erreichen, mit einem kleineren als sonst bei technischen Anlagen üblichen Sicherheitsabstand betrieben werden, d. h. nahe ihrer mechanischen Grenze; ihr Versagen muss also in Betracht gezogen werden. Aus diesem Grund und wegen der hohen gespeicherten Energie stellen sie eine Gefahrenquelle dar, die geeignete Sicherheitsmaßnahmen erfordert, mit denen sich größere Zerstörungen bei der Explosion einer Spule vermeiden lassen. Die Spulen befinden sich daher in Gruben, und die Türen und Wände des Labors sind besonders verstärkt. Daneben ist eine ständige Überwachung notwendig, um zu verhindern, dass sich Personen während eines Feldpulses im Labor befinden.

Das Gebäude des HLD wurde im Forschungsgelände Rossendorf in unmittelbarer Nähe zur Strahlungsquelle ELBE errichtet. Durch einen Tunnel wird der Infrarotstrahl vom Freie-Elektronen-Laser (FEL) der Strahlungsquelle ELBE [4] in die Pulsfeldlabors des HLD geführt. Wegen der hohen Intensität der IR-Strahlung des FEL fällt der Intensitätsverlust im ca. 50 m langen Strahlrohr bis in die Spulen nicht ins Gewicht.

Das Herzstück des Hochfeldlabors

Im Zentrum des Gebäudes befindet sich die Halle, in der derzeit die Kondensatoranlage aufgebaut wird (Abb. auf S. 25). Auf der einen Seite der Halle sind fünf Labors für die Unterbringung der Pulsspulen und der Experimentiereinrichtungen angeordnet, auf der gegenüberliegenden Seite der Halle stehen vier Labors für Experimentvorbereitungen sowie ein Labor für supraleitende 14 T- bzw. 20 T-Gleichfeldspulen zur Verfügung.

Um eine Feldstärke von 100 Tesla zu erreichen, muss die elektromagnetische Energie von 50 MJ gespeichert und dann pulsartig in die Pulsfeldspule übertragen werden. Hierfür eignen sich prinzipiell Kondensatoranlagen, große Batterien, Schwungradgeneratoren oder induktive Speicher. In einer vergleichenden Analyse [3] von Kosten, Betriebs- und Wartungsaufwand, Verlusten, Übertragungsfaktor, benötigter Ausgangsenergie und Störeinfluss auf die Experimente stellte sich eine Kondensatorbank als überlegen heraus. Sie lässt sich mit einem kleinen Strom aufladen und dann mit großem Strom nahezu vollständig entladen.

Als Energieversorgung für die Spulen wurde zunächst eine kleinere gepulste Kondensatoranlage (1 MJ/10 kV/90 kA) entwickelt und seit 1999 im Pilotlabor des IFW betrieben (Abb. 3) [5]. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse flossen dann in eine größere Anlage ein (1,44 MJ/24 kV/37 kA) [5]. Von großer Bedeutung ist der Schritt von der bei derartigen Anlagen bisher üblichen Spannung von 10 oder 12 kV [1, 2] zu 24 kV (wie auch seit kurzem in Toulouse [6]). Nur dadurch bleiben die Leiterquerschnitte und die Größen

4) Ab 1. Dezember 2004 hat das Forschungszentrum Rossendorf das „Projekt HLD“ in sein 6. Institut mit dem Namen „Institut Hochfeld-Magnetlabor Dresden“ überführt. Direktor dieses neuen Instituts ist seither J. Wosnitza.

5) Hier haben sich Materialien wie Kapton oder Formvar bewährt.

der Spulen in vertretbarem Rahmen. Allerdings erhöhen sich durch diesen Schritt die Anforderungen an die Isolation⁵⁾ in den Spulen sowie an die Komponenten der Kondensatoranlage.

Die 1,44 MJ-Anlage wird jetzt zur Erprobung der ersten im FZR gebauten Spulen eingesetzt. Die aus diesen Kondensatoranlagen gewonnenen Erkenntnisse wurden mit der Firma Rheinmetall für den Aufbau

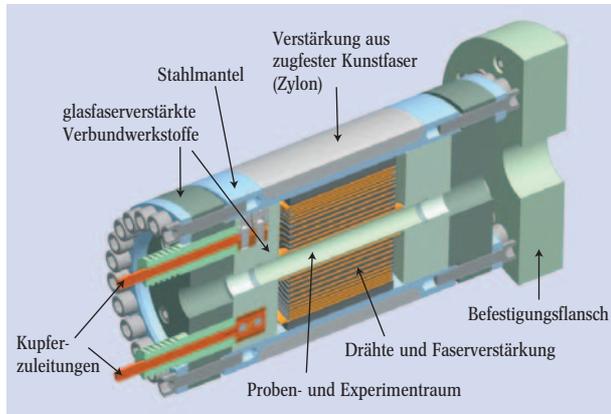


Abb. 4: Schema einer kompakten Spule (Länge ca. 40 cm) zur Erzeugung von Feldern mit 70 T/15 ms/24 mm. Die enormen Drücke infolge der Lorentz-Kräfte erfordern dabei Materialien mit extrem hoher Festigkeit.

einer 50 MJ/24 kV-Anlage weiterentwickelt.⁶⁾ Dabei spielten umfangreiche Computersimulationen des Verhaltens der Anlage, insbesondere von eventuellen Störfällen, eine bedeutende Rolle. Diese leistungsfähigste bisher für ein Hochfeldlabor gebaute Kondensatoranlage ist aus 15 Modulen aufgebaut, die Energien zwischen 0,9 und 2,9 MJ bereitstellen [5]. Sie erlaubt es, Spulen mit bis zu vier coaxialen Sektionen zu speisen, die mit unterschiedlichen Energien und Pulsängen betrieben werden können.

Zerreißprobe für das Material

Die Erzeugung sehr hoher Magnetfelder ist vor allem ein Materialproblem, denn der durch die Lorentz-Kräfte in den Spulen erzeugte Druck ist enorm. Die Kräfte sind dabei radial nach außen sowie axial nach innen gerichtet. In erster Näherung gilt für den Druck $P=B^2/2\mu_0$. Bei $B = 50$ T erhält man damit bereits einen Druck von 1 GPa, der an der Versagensgrenze von Stahl liegt.

Bei den in Dresden angestrebten Magnetfeldern liegen die in den Spulen auftretenden Drücke (bis zu 4 GPa bei 100 T) jenseits der Festigkeit der besten Stähle. Hochfeste Nichtleiter, die zwischen die Leiterlagen gewickelt und mit Epoxydharz verklebt werden, müssen diese Drücke aufnehmen (Abb. 4). Für diese innere Verstärkung wird seit einigen Jahren vor allem die synthetische Faser „Zylon“ der Firma Toyobo, Osaka, verwendet; sie hat in Testversuchen Zerreifestigkeiten bis 5 GPa gezeigt. Als zusätzliche äußere Verstärkung sind die kompakten Spulen des HLD mit einem aufgeschumpften Stahlzylinder plus Faser-Kompositen und starken Endflanschen versehen.

Rechnungen und Erfahrungswerte zeigen, dass sich die Spulen für den Bereich bis ca. 65 T/2 MJ aus hartgezogenem Kupfer-Draht (Zerreißfestigkeit $\sigma \sim 0,3$ GPa), verstärkt durch hochfeste Fasern aufbauen lassen. Für höhere Felder müssen neu entwickelte Leiter mit höherer Festigkeit bei dennoch guter Leitfähigkeit (wenig-

tens 70 % der Leitfähigkeit von Cu) verwendet werden. Beispiele für geeignete Leitermaterialien sind Glidcop Al 15 bzw. 60, das aus Kupfer mit 0,3 bzw. 1,1 Gewichtsprozent Al_2O_3 besteht, oder Cu in einem Stahlmantel bzw. Cu-Ag- oder Cu-Nb-Legierungen. Für kurze Drahtlängen mit wenigen mm^2 Querschnitt ließen sich bisher Zugfestigkeiten bis 1,3 GPa, in Einzelfällen bis 1,5 GPa erreichen [6, 7]. Kommerziell erhältliche

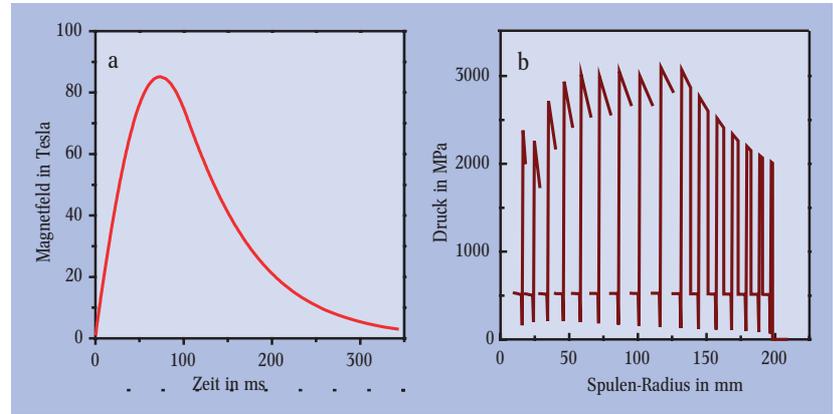


Abb. 5: Berechnetes Magnetfeld einer 85 T/120 ms/20 mm-Spule bei einer Energie von 48 MJ als Funktion der Zeit (a) sowie der in den einzelnen Lagen auftretende Druck als Funktion des Spulenradius (b).

Dabei beträgt der Druck am Leiter aus „Glidcop Al 15“ ca. 0,56 GPa und an der jeweils dazwischen befindlichen Zylon-Verstärkung 2 bis 3 GPa.

Leiter mit etwa 200 m Länge bei Querschnitten von z. B. 10 mm^2 erreichen bis zu 1 GPa.

Dem Bau jeder Hochfeldspule gehen umfangreiche analytische und numerische Computersimulationen von Strom, Magnetfeld, Kräften, Deformationen und Temperatur der Spule voraus. Sie behandeln die in der Spule zeitlich und örtlich variierenden, gekoppelten, hohen mechanischen, thermischen und elektrischen Belastungen [8]. Ein Ergebnis zeigt Abb. 5. Anhand der Rechnungen wird aber auch deutlich, dass mit den derzeit erhältlichen Materialien die geplante 100 T/10 ms/20 mm-Spule aus mindestens zwei coaxialen Sektionen aufgebaut sein muss.⁷⁾ Mit diesem sog. „coil-in/coil-out“ Konzept ist kürzlich im Hochfeldlabor Toulouse mit einer 14 MJ/24 kV-Kondensatorbank in einer Kooperation mehrerer europäischer Institute 76 T/3 ms/15 mm erreicht worden [6].

Erste Cu-Spulen für Felder bis 65 T wurden vom FZR gebaut und getestet (Abb. 6). Die erfolgreichen Testergebnisse bestätigen, dass

- das neu entwickelte 1,44 MJ-Kondensatormodul funktionsfähig ist,
- die für den genannten Parameterbereich entwickelten Simulationen und der entsprechende Spulenbau beherrscht werden,
- die Isolationsprobleme bei 24 kV gelöst sind,
- die Zylonfaser die in den Testspulen auftretenden enormen Drücke bis 3 GPa trägt.

Die magnetische Energie einer Spule steigt theoretisch mit $B^2 \times \text{Zeit} \times \text{Volumen}$ an. Der Vergleich der oben genannten Spulen, die mit Energien von 1,4 MJ, 48 MJ und 46 MJ Felder von 64 T/15 ms/24mm (Abb. 6) bzw. 85 T/120 ms/20 mm (Abb. 5) mit einer Sektion, sowie 100 T/10 ms/20 mm mit zwei Sektionen erreichen, zeigt jedoch, dass vor allem auf Grund der mit B^2 ansteigenden Kräfte und der daraus resultierenden Konstruktions- und Materialänderungen in der Praxis die Zusammenhänge viel komplizierter sind; sie

6) Neben dem Aufbau der Gesamtanlage bis Anfang 2006 hat die Fa. Rheinmetall umfangreiche Tests der wichtigsten Hochstrom-/Hochspannungs-Komponenten, den Aufbau der Sicherheits- und Steuereinrichtungen sowie die Gewährleistung für die Gesamtanlage übernommen.

7) Die von einigen Autoren [2] vorgeschlagenen 100 T/100–1000 ms Spulen erscheinen in absehbarer Zukunft ohne die nicht erkennbare Entwicklung wesentlich geeigneterer Materialien nicht realistisch.

können nur durch detaillierte Computersimulationen [8] und Tests von Spulen realisiert werden.

Als nächste Aufgabe für die Jahre 2005 und 2006 stehen Bau und Untersuchung von Spulen für die Bereiche bis 60 T/500 ms, 70 T/100 ms und 100 T/10 ms mit Cu-Stahl und CuNb-Leitern an. Eine weitere Aufgabe ist es, die Lebensdauer der Spulen, die bei jedem Puls starken Kräften und Verformungen ausgesetzt sind, zu erhöhen. Das Ziel sind dabei einige 100 Pulse bei nahezu vollem Feld. (Eine Herabsetzung des Feldes ermöglicht wesent-

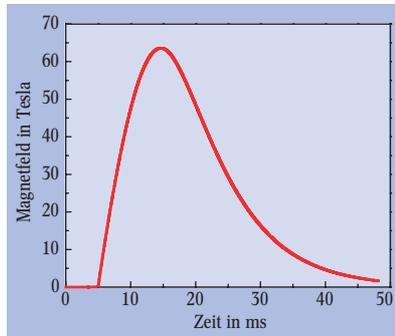


Abb. 6: Gemessenes Magnetfeld mit $B_{\max} = 63,6$ T als Funktion der Zeit einer in Dresden gebauten Spule, die mit einer Energie von 1,42 MJ ein Feld von 63,6 T/15 ms/24 mm erreicht hat und bisher in 30 Pulsen getestet wurde. Die berechnete maximale mechanische Spannung an der Zylon-Verstärkung beträgt 3,2 GPa.

lich mehr Pulse, z. B. erlaubt ein um 10 % schwächeres Magnetfeld eine Erhöhung der Pulszahl bis zur Zerstörung der Spule um ca. einen Faktor 10). Auch ist eine Verkürzung der Abkühldauer der Spulen von der Temperatur nach einem Puls (250 bis 350 K) auf die Starttemperatur für den nächsten Puls (80 K) notwendig. Die derzeit übliche Abkühldauer von bis zu einer Stunde sollte sich durch Konstruktionsänderungen auf etwa 20 Minuten herabsetzen lassen; diese Verbesserung wird für größere Spulen von zunehmender Bedeutung.

An diesen Problemen sowie an weiteren Verbesserungen des Baus von Pulsfeldspulen und der Verfolgung ihres Verhaltens während des Pulses arbeitet das HLD gemeinsam mit den Hochfeldlabors in Toulouse, Nijmegen und Oxford in den Jahren 2005 bis 2008 im Rahmen eines EU-Projektes.

Ausblick

In diesem Jahr stehen auch die Anschaffung und der Aufbau von ersten Experimentiereinrichtungen an. Dabei ist die Beteiligung weiterer Dresdner Institute vorgesehen. Zunächst werden Messungen von Magnetowiderstand, Magnetisierung und Suszeptibilität sowie von Hall-, de Haas-van Alphen- sowie Skubnikov-de Haas-Effekten in Feldern von 60 bis 70 T möglich sein. Als nächstes werden dann Einrichtungen für Messungen der spezifischen Wärme folgen. Schließlich sollen akustische und magneto-optische Untersuchungen, Infrarotspektroskopie, Elektronen- und Kernspinresonanz in gepulsten Feldern, dann auch bei höheren Werten, ermöglicht werden. Für Experimente unterhalb von 1 K wird in einem der Pulsfeldlabors ein ^3He - ^4He -Mischungskühler zur Verfügung stehen. Besondere Anstrengungen wird die Führung des Infrarotstrahls vom FEL der Strahlungsquelle ELBE in das HLD, seine wiederholte Refokussierung auf diesem Weg sowie der Aufbau der Infrarotspektroskopie für $\lambda > 5 \mu\text{m}$ erfordern.

Die Messtechnik muss natürlich den elektrischen und mechanischen Störungen Rechnung tragen, die bei jedem Feldpuls auftreten. In Zukunft wird es auch wichtig sein, mikrostrukturierte Messsysteme zu entwickeln (Kalorimeter, Messspulen, Optik, mechanische Oszillatoren). Dadurch lässt sich die Bohrung der Spulen verringern und damit das Feld steigern.

Danksagung

Die bisherigen Arbeiten wurden vor allem von A. Bianchi, T. Herrmannsdörfer, H. Krug und S. Zherlitsyn durchgeführt. Ihnen und unseren technischen Mitarbeitern S. Dittrich, A. Lange, F. Möller und B. Wustmann bin ich für ihren Einsatz und die hervorragenden Beiträge dankbar, ohne die das ehrgeizige Vorhaben nicht so schnell vorangekommen wäre. Dazu beigetragen haben auch Beratungen durch H. Schneider-Muntau (NHMFL Tallahassee) und F. Herlach (KU Leuven).

Literatur

- [1] F. Herlach und N. Miura (Hrsg.), High Magnetic Fields, Techniques and Experiments, Bd. 1 und 2, World Scientific, Singapur (2003)
- [2] M. Springfield, L. J. Challis und H. U. Karow (Hrsg.), The Scientific Case for a European Laboratory for 100 T Science, European Science Foundation, Strasbourg (1998): www.esf.org/jp/pdf/Pesc/100T.pdf; Report of the IUPAP Working Group of Facilities for Condensed Matter Physics: High Magnetic Fields (2004): www.iupap.org/wg/fcmp/hmff/highmagneticreport.pdf; Opportunities in High Magnetic Field Science, National Research Council, The National Academics Press, Washington, D.C. (2004): http://7.nationalacademies.org/bpa/COMMAG_Final_report_PREPUB.pdf
- [3] Vorschlag zur Errichtung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden: www.fz-rossendorf.de/HLD/
- [4] P. Michel et al., Proc. 26th Int. Free-Electron-Laser Conf., Trieste (2004): www.elettra.trieste.it/fel2004 sowie www.fz-rossendorf.de/ELBE/
- [5] T. Herrmannsdörfer et al., J. Low Temp. Phys. **133**, 41 (2003); H. Krug et al., Physica **B 294-295**, 605 (2001)
- [6] H. Jones et al., Physica **B 346-347**, 553 (2004)
- [7] J. Freudenberger et al., Adv. Eng. Mat. **4**, 677 (2002); F. Lecouturier et al., Physica **B 346-347**, 582 (2004)
- [8] T. Herrmannsdörfer, S. Zherlitsyn und J. Wosnitzer, Physik Journal, Juni 2005, S. 90

Der Autor

Frank Pobell hat an der TU München 1965 promoviert und dort 1969 habilitiert. Nach zwei Jahren an der Cornell University ist er 1971 an das FZ Jülich gegangen, wo er von 1975 bis 1983 Direktor am Institut für Festkörperforschung war; gleichzeitig hatte er eine Professur an der Universität Köln inne. Anschließend lehrte und forschte er bis 1996 an der Universität Bayreuth und war dann von 1996 bis 2003 wissenschaftlicher Direktor des Forschungszentrums Rossendorf, verbunden mit einer Professur an der TU Dresden. Daneben war Frank Pobell u. a. Vizepräsident der International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) (1990 bis 1996) und Präsident (Past-Präsident) der Leibniz-Gemeinschaft (1998 bis 2001 bzw. 2001 bis 2005).

