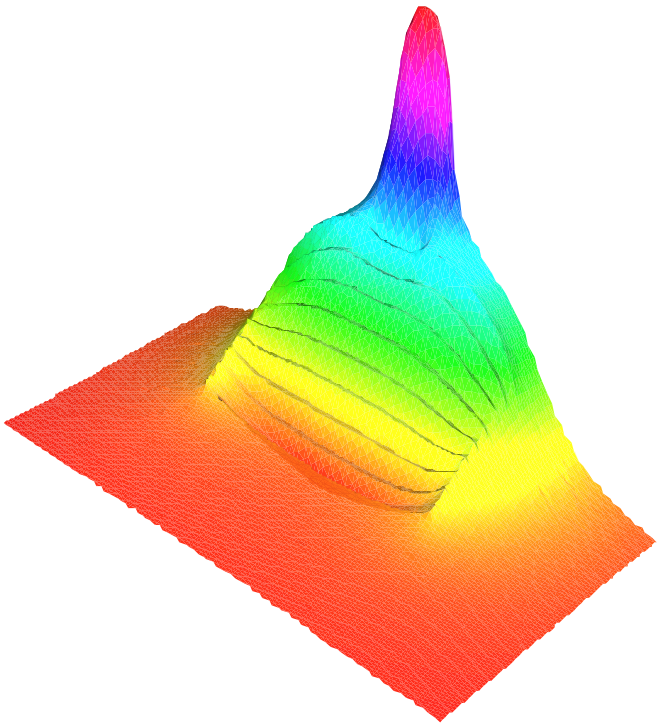
Vorschlag zur Errichtung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden



Hochfeldlabor Dresden

Der eilige Leser sollte sich auf folgende Kapitel konzentrieren:

Vorwort
Kapitel I Einführung und Begründung
Kapitel VI Schlussfolgerungen mit Tabellen

Stand: Mai 1999

Vorwort

Der vorliegende Text unterbreitet einen Vorschlag zur Errichtung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden. Die Vorschlagenden* gehören folgenden Institutionen† in Dresden an:

- Forschungszentrum Rossendorf e.V., Dresden (WGL) **FZR**
- Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden e.V., Dresden (WGL) **IFW**
- Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden (MPG) **MPI–CPfS**
- Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Dresden (MPG) **MPI–PKS**
- Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Dresden, Dresden **TUD**

Der späteren Trägerorganisation können weitere Institutionen, wie z. B. der Materialforschungsverbund Dresden, angehören. Eine assoziierte Mitgliedschaft der Technischen Universität Wien, der Karls–Universität Prag, der Tschechischen Akademie der Wissenschaften, des Internationalen Hochfeldlabors in Wroclaw/Polen und der Humboldt–Universität Berlin ist bereits besprochen; Gespräche mit Vertretern anderer ausländischer Institutionen, insbesondere aus östlichen und südöstlichen Nachbarländern, sind geplant. Das Labor soll auf dem Gelände des Forschungszentrums Rossendorf in unmittelbarer Nähe des dort im Aufbau befindlichen supraleitenden Elektronenbeschleunigers mit Freie–Elektronen–Laser für das ferne Infrarot errichtet werden.

An der Diskussion und Erarbeitung dieses Vorschlags waren beteiligt:

- Dr. F. Brenscheidt, Dr. H. Krug, Dr. J. Leib, Prof. F. Pobell (FZR)
- Prof. G. Dörfel, Dr. D. Elefant, Prof. H. Eschrig, Prof. J. Fink, Dr. W. Grünberger, Dr. M. Heilmaier, Dr. R. Herrmann, Dr. K.–H. Müller, Prof. L. Schultz (IFW)
- Dr. M. Lang, Prof. F. Steglich, Dr. P. Thalmeier (MPI–CPfS)
- Prof. P. Fulde, Dr. R. Kratz (MPI–PKS)
- Dr. M. Dörr, Prof. M. Loewenhaupt (TUD)
- Prof. R. Grössinger (Institut für Experimentalphysik, TU Wien)
- Prof. V. Sechovsky (Institut für Physik, Karls–Universität Prag)
- Prof. M. v. Ortenberg (Institut für Physik, Humboldt–Universität Berlin)

*siehe auch Adressenliste im Anhang A, S. 113

†In Klammern ist die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Wissenschaftsorganisationen — Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL) und Max–Planck–Gesellschaft (MPG) — angegeben.

Über die Begründung der wissenschaftlichen Notwendigkeit hinaus, ein solches Hochfeldlabor zu errichten, wie sie auch eindringlich durch eine im November 1998 erschienene Studie der European Science Foundation (ESF) [1] unterstrichen wurde, wird in diesem Dresdner Projektvorschlag detailliert die technische Realisierung sowie ein konkreter Investitions- und Zeitplan vorgelegt.

Die vorliegende überarbeitete Version des Projektvorschlags vom 20. 1. 1998 berücksichtigt aktuelle Entwicklungen und erste Ergebnisse aus einem vom Freistaat Sachsen und den beteiligten Instituten finanzierten und im Herbst 1998 begonnen Vorprojekt, in dem die Materialentwicklung vorangetrieben und eine Testanlage aufgebaut werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **iii**

I Einführung und Begründung **1**
I.1 Erzeugung von Magnetfeldern 1
I.2 Die weltweit führenden Hochfeldlabors 4
I.2.1 Deutsch–Französisches Hochfeldlabor Grenoble 4
I.2.2 National High Magnetic Field Laboratory Tallahassee / Los Alamos, USA 5
I.2.3 Tsukuba, Japan 5
I.3 Die Situation in Europa 5
I.3.1 Europäische Pläne 5
I.3.2 ESF–Studie 6
I.3.3 Stellung des Dresdner Vorschlags 7
I.3.4 Rolle deutscher Einrichtungen 8
I.4 Die Situation in Dresden 9
I.4.1 Wissenschaftliches und technologisches Umfeld 9
I.4.2 Kooperationen und Unterstützung durch Dritte 11
I.5 Vorprojekt: Hochfeldlabor Dresden 13
I.6 Physik und Chemie in sehr hohen Feldern 14
I.6.1 Nobelpreise 1985 und 1998 15
I.6.2 Halbleiterphysik 16
I.6.3 Magnetismus 17
I.6.4 Supraleitung 17
I.6.5 Stark korrelierte Elektronensysteme 17
I.6.6 Molekulare Systeme und Cluster 18
I.6.7 Fern–Infrarotspektroskopie in hohen Magnetfeldern . . . 18

II Physik und Chemie in sehr hohen Magnetfeldern — Das wissenschaftliche Programm in Dresden **19**
II.1 Halbleiterphysik und niedrigdimensionale Systeme 19
II.2 Magnetismus und Metallphysik 21
II.3 Supraleitung 25
II.4 Atom– und Molekülphysik 27

II.5 Komplexe Flüssigkeiten, Chemie und Biologie 27
II.6 Anwendungen und Wirtschaftsrelevanz 29
II.7 Beiträge aus Berlin, Prag, Wien und Wroclaw 30

III Messmethoden und Ausrüstung 31
III.1 Messmethoden 31
III.1.1 Elektrische Transportmessungen 32
III.1.2 Magnetisierung, Suszeptibilität, de Haas–van Alphen–Effekt 33
III.1.3 Magnetostriktion und magnetoelastische Eigenschaften . 34
III.1.4 mm–Wellen–Spektroskopie, ESR 35
III.1.5 Optische Eigenschaften im FIR–VIS–UV 35
III.2 Messgeräte 36
III.3 Allgemeine Ausrüstung 38
III.3.1 Kryotechnik für die Experimente 38
III.3.2 Technische Kryo– und Vakuumausstattung 39
III.3.3 Supraleitende Gleichfeldspule 40
III.3.4 Hochdruck 40
III.3.5 Elektronische Datenverarbeitung und Experimentsteuerung 41
III.3.6 Mechanische Werkstatt 41
III.4 Zusammenfassung 41

IV Technische Installationen 43
IV.1 Magnete 43
IV.1.1 Einleitung 43
IV.1.2 Abschätzung des Feldes und der benötigten Energie . . . 46
IV.1.3 Vorschlag eines Spulensystems 47
IV.1.4 Berechnung eines Zweispulensystems für 100 T 49
IV.1.5 Vorschlag einer Spule für 70 T 55
IV.1.6 Vorschlag einer Spule für 60 T 57
IV.2 Materialentwicklungen 59
IV.2.1 Stand der Forschung 59
IV.2.2 Vorarbeiten des IFW Dresden 66
IV.2.3 Arbeitsprogramm 67
IV.3 Energieversorgung 70
IV.3.1 Pulsanlage, gespeist aus dem Netz 74
IV.3.2 Pulsanlage mit einem Generator 77
IV.3.3 Pulsanlage mit Batterie und Speicherspule 81
IV.3.4 Pulsanlage mit Homopolargenerator und Speichertransformator 86
IV.3.5 Pulsanlage mit Kondensatorbank 90
IV.3.6 Zusammenfassung und Vorschlag 95
IV.3.7 Vorprojekt 99

V Gebäude **101**

VI Schlussfolgerungen **105**

Anhang

A Namen und Adressen **113**
A.1 Projektgruppe Hochfeldlabor Dresden — HLD 113
A.2 Assoziierte Mitglieder 114
A.3 Kooperationspartner 114
A.4 Beratung und Unterstützung 115

B Vorprojekt **117**
B.1 Ziele des Vorprojektes 117
B.1.1 Entwicklung hochleitfähiger, hochfester Leiterwerkstoffe . 117
B.1.2 Computersimulationen 118
B.1.3 Testlabors für gepulste, hohe Magnetfelder 119
B.2 Stand des Vorprojektes (April 1999) 120

C Executive Summary der ESF–Studie **121**

D Angebote zur Energieversorgung **129**
D.1 Netzversorgung (Energieversorgung Sachsen Ost AG) 130
D.2 Generator (ABB Industie AG) 132
D.3 Generator (Siemens AG) 133
D.4 Homopolargenerator (Prof. Kuchinsky) 135
D.5 Kondensatorbank (Prof. Askenazy) 137
D.6 Kondensatorbank (TZN Unterlüß) 138
D.7 Kondensatorbank (Vishay Electronic GmbH) 139
D.8 Kondensatoren (Haefely Trench S.A.) 140
D.9 Kondensatoren (Aerovox Inc.) 141
D.10 Kondensatoren (AMS Electronic) 142

Literaturverzeichnis **143**

Abbildungsverzeichnis

IV.1 von Mises–Spannungen in der Mittelebene der Außenspule . . . 51
IV.2 von Mises–Spannungen in der Mittelebene der Innenspule 53
IV.3 von Mises–Spannungen in der Mittelebene der 70 T–Spule 56
IV.4 von Mises–Spannungen in der Mittelebene der 60–T–Spule . . . 58
IV.5 Pulsanlage gespeist aus dem Netz 75
IV.5(a) Schaltungsschema 75
IV.5(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen 75
IV.5(c) Strom und magnetische Energie der Spulen 76
IV.5(d) Leistung und Spannung der Energieversorger 76
IV.6 Pulsanlage gespeist mit einem Generator 78
IV.6(a) Schaltungsschema 78
IV.6(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen 78
IV.6(c) Strom und magnetische Energie der Spulen 79
IV.6(d) Leistung und Spannung der Energieversorger 79
IV.7 Pulsanlage gespeist aus Batterie und Speicherspule 82
IV.7(a) Schaltungsschema 82
IV.7(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen 82
IV.7(c) Strom und magnetische Energie der Spulen 83
IV.7(d) Leistung und Spannung der Energieversorger 83
IV.8 Pulsanlage mit Homopolargenerator und Speichertransformator . 87
IV.8(a) Schaltungsschema 87
IV.8(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen 87
IV.8(c) Strom und magnetische Energie der Spulen 88
IV.8(d) Leistung und Spannung der Energieversorger 88
IV.9 Pulsanlage mit Kondensatorbank 91
IV.9(a) Schaltungsschema 91
IV.9(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen 91
IV.9(c) Strom und magnetische Energie der Spulen 92
IV.9(d) Leistung und Spannung der Energieversorger 92
IV.10 Pulsanlage mit Kondensatorbank für bipolare Magnetfelder . . . 99
IV.10(a) Schaltungsschema für bipolare Kondensatoren 99
IV.10(b) Schaltungsschema für unipolare Kondensatoren 100

V.1 Gebäudegrundriss 102

Tabellenverzeichnis

I.1 Führende Labors für statische Magnetfelder oberhalb 30 Tesla . 2
I.2 Führende Labors für gepulste, nicht–destruktive Magnetfelder . . 3
I.3 Ziele oder Projekte der führenden Hochfeld–Puls–Labors 4
I.4 Führende deutsche Hochfeldlabors 8
I.5 Einige Dresdner Institute der Festkörper– und Materialforschung 10

III.1 Kosten für Experimentierausrüstung 38
III.2 Kostenkalkulation Kryotechnik für die Experimente 39
III.3 Kostenkalkulation technische Kryo– und Vakuumausrüstung . . 40

IV.1 Parameter der projektierten Hochfeldspulen 45
IV.2 Materialeigenschaften von Leiter– und Verstärkungsmaterial . . 50
IV.3 Technische Daten eines 100–T–Zweispulensystems 54
IV.4 Technische Daten einer 70–T–Spule 55
IV.5 Technische Daten einer 60–T–Spule für lange Pulszeiten 57
IV.6 Parameter für die Simulation des 100–T–Zwei–Spulensystems . . 73
IV.7 Vergleich verschiedener Energieversorgungseinheiten 98

VI.1 Zeitplan Hochfeldlabor 108
VI.2 Personalplan – Aufbauphase 108
VI.3 Personalplan – Betrieb 109
VI.4 Investitionen 1999–2002 110
VI.5 Investitions– und Kostenplan 111

Kapitel I

Einführung und Begründung

I.1 Erzeugung von Magnetfeldern — bisher erreichte Magnetfelder

Die mit einem Eisenjoch erzeugbaren Magnetfelder* sind durch die Sättigungsmagnetisierung des Eisens auf Werte unter 3 Tesla (T) begrenzt. Höhere Felder können nur mit stromdurchflossenen Spulen erzeugt werden. Um aber z. B. ein Feld von 20 T in einer normalleitenden Spule mit 50 mm Innendurchmesser zu erzeugen, muss die Spule ein elektrischer Strom durchfließen, der einer Leistung von 10 Megawatt (MW) entspricht. Die bei der Erzeugung sehr hoher Magnetfelder auftretenden Probleme sind daher die Bereitstellung einer leistungsfähigen Elektroversorgung, die Beherrschung der aus den hohen Strömen in den Spulenwicklungen resultierenden extremen Kräfte auf die Drähte und die Anforderungen an die Kühlung der Spule zur Abführung der Verlustleistung (1500 m^3 Wasser/Std. bei 40 MW elektr. Leistung). Diese Kühlprobleme können durch die Verwendung supraleitender Spulen in gewissen Grenzen umgangen werden. Trotz großer Fortschritte können aber mit den heute erhältlichen supraleitenden Drähten nur Spulen für Felder bis etwa 20 T erzeugt werden, da höhere Felder die Supraleitfähigkeit dieser Materialien zerstören.

Magnetfelder oberhalb von 20 T, die mit normalleitenden Spulen erzeugt werden müssen, stehen wegen der oben angedeuteten Probleme nur in Speziallabors zur Verfügung. Bisher wurden **statische** Magnetfelder bis etwa 36 T erreicht; eine Anlage für statische Magnetfelder bis 45 T ist in den USA im Aufbau (Tab. I.1, S. 2).

Magnetfelder oberhalb von 50 T können mit heute bekannter Technologie auf Grund der Anforderungen an die elektrische Versorgung, an die mechanischen Eigenschaften und an die Kühlung der Spule grundsätzlich nur **gepulst** erzeugt werden. Durch die kurzzeitige Zuführung eines hohen Stromes in Form eines starken Strompulses kann die insgesamt erforderliche elektrische Energie

*Im Folgenden wird die magnetische Flussdichte $B = \mu_r \mu_0 H$ Magnetfeld oder kurz Feld genannt.

Labor	Gründung / Aufrüstung	El. Leistung	Resistive Spule Feld / Bohrung	Hybridspule† Feld / Bohrung
GHMFL, Grenoble, F/D	1972 / 1991	24 MW	25 T / 50 mm	31,4 T / 50 mm (40 T im Aufbau)
HMFL, Nijmegen, Niederlande	1976	6 MW (20 MW in Planung)	20 T / 32 mm	30,4 T / 32 mm
IMR, Sendai, Japan	1981	8 MW	19,5 T / 32 mm	31,1 T / 32 mm
NRIM, Tsukuba, Japan	1988 / 1995	15 MW	30 T / 32 mm	35,7 T/ 30 mm (40 T im Aufbau)
NHMFL, Tallahassee, Los Alamos, USA	1990	40 MW	33 T / 32 mm	im Aufbau: (45 T / 32 mm)

Tabelle I.1: Führende Labors für statische Magnetfelder oberhalb 30 Tesla

und damit der Aufwand und die Kosten für die Energieversorgung und Spulenkühlung in akzeptablen Grenzen gehalten werden.

Mit Strompulsen von wenigen Mikrosekunden können Magnetfelder von mehreren 100 T erreicht werden. Die dabei auftretenden Kräfte zerstören jedoch in der Regel die Magnetfeldspule und vielfach auch die zu untersuchende Probe. Darüber hinaus sind sehr viele Untersuchungsmethoden in so kurzen Zeitintervallen nicht anwendbar. Diese sogenannten destruktiven Mikrosekunden–Methoden werden deshalb hier nicht weiter behandelt; wir beschränken die Diskussion auf **nicht–destruktive Methoden der Erzeugung von Magnetfeldern mit Pulsdauern im Millisekunden–Bereich**.

Wesentliche Steigerungen bei der Erzeugung statischer Felder — auch aus Kostengründen, denn eine Verdopplung des Feldes verlangt eine Steigerung der Leistung der Elektroversorgung um etwa einen Faktor fünf — sind in den nächsten Jahren nicht zu erwarten. Große Fortschritte wurden in den letzten Jahren jedoch bei der Entwicklung und dem Einsatz von Kurzzeit–Messtechniken erzielt. Daher drängt sich die Weiterentwicklung von Pulsfeldanlagen auf, die bisher nicht an ihre prinzipiellen technischen Grenzen getrieben wurden. Sie verlangt eine sorgfältige Betrachtung der Strom– und Kraftverteilung in der Spule, der mechanischen Eigenschaften der Leiter– und Isolationsmaterialien, ihrer Kühlung sowie der Auslegung und Auswahl der elektrischen Versorgung. Neben Maximalfeld und Pulsdauer sind Pulsform, die Feldhomogenität und –stabilität sowie die für die Experimente zugängliche Bohrung der Feldspule weitere wesentliche Parameter der Anlage. Die Optimierung dieser Parameter ist ein kompliziertes Problem, das im Kapitel IV detailliert behandelt wird.

Die elektrische Energie, die der Spule durch den Strompuls zugeführt wird, wird nicht vollständig in die magnetische Energie des Hochfeldes überführt, sondern dissipiert teilweise in der Spule. Dies führt zur Erwärmung der Spule in Abhängigkeit von der Wärmekapazität des verwendeten Spulenmaterials. Um hohe Magnetfelder (und die dafür notwendigen hohen Ströme) und lange Pulsdauern mit der Feldspule verwirklichen zu können, wird die Spule vor dem

†Eine Kombination aus einer supraleitenden Spule und einer normalleitenden Spule.

Experiment abgekühlt und man gestattet ein Aufwärmen der Spule durch den Strompuls auf etwa Raumtemperatur. Üblicherweise — vor allem aus Kostengründen — kühlt man die Spule in flüssigem Stickstoff (LN_2) auf 77 K (-196 °C) ab und lässt ein Aufwärmen auf Raumtemperatur (ca. 300 K, teilweise bis 400 K) zu. Offensichtlich begrenzt die hierbei maximal zugelassene Endtemperatur die **Pulsdauer** für das erzeugte Hochfeld. Da vor dem nächsten Puls die erneute Abkühlung der Spule abgewartet werden muss, beträgt die Pulsfolge ca. 1 bis 3 pro Stunde. Die Begrenzung der **maximalen Magnetfeldstärke** gepulst erzeugter Felder ist im Wesentlichen durch die mechanischen Eigenschaften der Spule gegeben, die die entstehenden elektromagnetischen Kräfte aufnehmen muss. Die bei Feldern von z. B. den bereits realisierten 60 T in der Spule auftretenden mechanischen Spannungen betragen bis zu 1,5 GPa ($\hat{=}$ 15 Tonnen/cm^2) und erreichen damit die Grenze der elastischen Verformbarkeit heutzutage für derartige Zwecke hergestellter Materialien. Dies unterstreicht die Notwendigkeit für eine sorgfältige Optimierung des Spulendesigns (Kap. IV.1) sowie der Weiterentwicklung von Leitermaterialien (IV.2).

Aber auch für die Erzeugung gepulster, sehr hoher Magnetfelder sind aufwendige Elektroversorgungen (Kap. IV.3) mit kurzzeitig schaltbaren Energien von einigen 10 Megajoule (MJ) und Leistungen bis in den Gigawatt–Bereich notwendig (s. Tab. IV.7, S. 98). Sie stellen einen wesentlichen Kostenfaktor der Anlage dar.

Bei der Erzeugung gepulster, nicht–destruktiver Magnetfelder wurden bisher mit Pulsen mit einer Dauer von ca. 100 Millisekunden (ms) Felder bis 60 T und mit Pulsen von 10 ms Felder bis 80 T erreicht (Tab. I.2). Weltweit wird

Einrichtung	**El. Energie**	**max. Magnetfeld** Feld / Bohrung / Puls
Leuven, Belgien	1,2 MJ	60 T / 20 mm / 20 ms 70 T / 10 mm / 10 ms
NHMFL, Tallahassee/ Los Alamos, USA	1,6 MJ (+ 600 MJ Generator)	80 T / 15 mm / 10 ms 60 T / 32 mm / 100 ms
Bristol, UK	0,18 MJ	60 T / 10 mm / 10 ms
Bell Labs Murray Hill, USA	0,52 MJ	72 T / 10 mm / 15 ms
Kurchatov Moskau, Russland	0,18 MJ	55 T / 5 mm / 15 ms
UNSW, Sydney, Australien	0,8 MJ	60 T / 22 mm / 25 ms
SNCMP Toulouse, Frankreich	1,25 MJ	61 T / 14 mm / 200 ms
NRIM, Tsukuba, Japan	1,6 MJ	73 T / 10 mm / 3 ms 65 T / 16 mm / 100 ms

Tabelle I.2: Führende Labors für gepulste, nicht–destruktive Magnetfelder größer als 50 Tesla, mit Pulszeiten größer als 10 Millisekunden
(deutsche Labors siehe Tab. I.4, S. 8)

von mehreren Gruppen — dabei insbesondere vom nationalen amerikanischen Hochfeldlabor in Tallahassee und Los Alamos — angestrebt, die Feldstärke für Pulsdauern von 10 ms auf ca. 100 T und die Dauer von 60 T–Pulsen auf einige Sekunden zu erhöhen (Tab. I.3, S. 4). Solche relativ langen Pulsdauern eröffnen die Möglichkeit, das Verhalten eines breiten Feldes von Substanzen im thermodynamischen Gleichgewicht in sehr hohen Magnetfeldern zu erforschen. Die angegebenen Ziele des amerikanischen Labors sollen auch mit dem hier vorliegenden Vorschlag erreicht werden.

Einrichtung	**El. Energie**	**max. Magnetfeld** Feld / Bohrung / Puls
GHMFL Grenoble, Frankreich	60 MJ Speicherspule	100 T / 10 mm / 10 ms
SNCMP Toulouse, Frankreich	12 MJ Kondensatorbank	85 T / / 20 ms 60 T / 30 mm / 1000 ms
NHMFL Tallahassee/ Los Alamos, USA	600 MJ Generator + Kondensatorbank	100 T / 24 mm / 20 ms 60 T / 32 mm / 1000 ms flat top
NRIM Tsukuba, Japan	 Kondensatorbank	80 T / 20 mm / 60 ms
HLD Dresden, D	50 MJ Kondensatorbank	100 T / 20 mm / 10 – 20 ms 70 T / 24 mm / 100 – 200 ms 60 T / 50 mm / 1000 ms

Tabelle I.3: Gegenwärtige Ziele oder Projekte der führenden Hochfeld–Puls–Labors

I.2 Die weltweit führenden Hochfeldlabors

Die Erzeugung der höchsten, heute zugänglichen Magnetfelder geht an die Grenzen der Ingenieurtechnologie und der Materialeigenschaften verfügbarer Werkstoffe; sie verlangt darüber hinaus erhebliche Investitionen. Diese Magnetfelder sind heute deshalb nur in Speziallabors verfügbar. Hier soll auf den Stand und die Entwicklungstendenzen der drei weltweit führenden Hochfeldlabors eingegangen werden. Die besondere Situation in Europa wird im folgenden Kapitel vertieft.
Die derzeit weltweit führenden Hochfeldlabors sind (s. auch Tab. I.1 bis Tab. I.3):

I.2.1 Deutsch–Französisches Hochfeldlabor Grenoble

Das Deutsch–Französische Hochfeldlabor Grenoble wurde 1972 gegründet. Eine wesentliche Aufrüstung und Erneuerung, insbesondere die Erhöhung der elektrischen Leistung von 10 MW auf 24 MW, wurde im Jahr 1991 für ca. 35 Mio. DM durchgeführt (d. h. in etwa der Größenordnung, die als Gesamtinvestition für

den Bau und die Installationen des neuen Dresdner Hochfeldlabors notwendig ist). In Grenoble wurden statische Magnetfelder von 31,4 T erreicht. Eine Spule für 40 T statisch bzw. ein Prototyp für eine Pulsspule sind im Aufbau (Tab. I.1 und Tab. I.3).

I.2.2 National High Magnetic Field Laboratory Tallahassee / Los Alamos, USA

Zum Aufbau des neugegründeten National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL) wurden Mittel von ca. 500 Mio. DM, verteilt über die Jahre 1990 bis 2000, zur Verfügung gestellt. Nach dem Aufbau von resistiven Spulen für statische Felder von 27 T und 33 T ist dort z. Z. ein 45 T–Hybridsystem in Entwicklung. Es stehen 40 MW elektrische Leistung in Tallahassee und ein Generator für 1,4 GW (!) in Los Alamos zur Verfügung. Dieser wandelt die in der Rotation eines angekoppelten Schwungrades gespeicherte Energie von 600 MJ zur elektrischen Versorgung für die Magnetspule. In Los Alamos wurden mit einer 1,6 MJ–Kondensatorbank–Anlage 80 T in einer Spule mit einer Bohrung von 15 mm mit einer Pulsdauer von 10 ms erreicht. Als nächster Schritt sind gepulste Anlagen für 100 T / 24 mm / 20 ms (50 T / 200 mm, in den ein zweiter 50 T / 24 mm / 20 ms Einsatz gesetzt werden soll) sowie für 60 T / 1 s „flat top“[‡] geplant (kürzlich erreicht: 60 T / 100 ms; siehe Tab. I.1–I.3); diese Ziele für gepulste Felder entsprechen in etwa dem Dresdner Vorhaben.

I.2.3 Tsukuba, Japan

Neue Investition von ca. 80 Mio. DM zuzüglich eines neuen Gebäudes wurden in den Jahren 1989 – 1993 getätigt. Es wird angestrebt, mit einer 15 MW–Energieversorgung statische Magnetfelder von 40 T in einer Bohrung von bis zu 40 mm mit einem Hybridsystem zu erzeugen sowie gepulste Magnetfelder mit 80 T / 20 mm / 10 ms zu erreichen (siehe Tab. I.1–I.3).

I.3 Die Situation in Europa

Europa war lange Zeit auf dem Gebiet der Erzeugung und der Nutzung sehr hoher Magnetfelder führend. Mit dem „Altern“ des Grenobler Labors und den neuen Nationallabors für sehr hohe Felder in den USA (Tallahassee/Los Alamos) und Japan (Tsukuba) ist diese Führung verlorengegangen.

I.3.1 Europäische Pläne

In Erkenntnis dieser Situation hat das European Commission Advisory Committee on Large Scale Installations im Januar 1990 ein Study Panel on Large

[‡] Das Magnetfeld wird während des Pulses für längere Zeit auf dem Maximalwert konstant gehalten.

Magnetic Fields eingesetzt. Dieses Gremium hat im Dezember 1990 empfohlen, Studien für Prototypen für gepulste, sehr hohe Magnetfeder und für statische Hybridsysteme anzufertigen und langfristig ein europäisches Hochfeldlabor zu errichten. Als Fernziel wurden drei Schwerpunkte gesetzt: die Erzeugung statischer Magnetfelder von bis zu 50 T, gepulster Magnetfelder von 100 T mit 100 ms Pulsdauer und hoch–homogener Felder für magnetische Kernresonanz. Als Folge wurden 1992 und 1994 in Leuven EC–Workshops zu diesem Thema und auch zur Physik bei sehr hohen Magnetfeldern abgehalten. Als Ergebnis dieser Workshops hat ein seit 1988 bestehendes Konsortium aus europäischen Labors (Amsterdam, Berlin, Grenoble, Leuven, Oxford, Parma, Toulouse) von der EU 1,8 Mio. Euro (ca. 3,5 Mio. DM) zur Entwicklung von Prototypmagneten bis 100 T / bis 10 ms bis zum Jahr 2000 erhalten. Anschließend sollte die Entscheidung für ein europäisches Hochfeldlabor fallen.

I.3.2 ESF–Studie

Im November 1998 erschien die Studie der European Science Foundation (ESF) on Large Scale Facilities in Europe mit dem Titel „The Scientific Case for a European Laboratory for 100 Tesla Science“ (s. auch Anhang C) [1]. Auf Initiative der ständigen ESF–Ausschüsse PESC (physical and engineering science) und LESC (life and environmental science) entwickelte ein zehnköpfiges Expertenteam in dieser Studie die wissenschaftliche Begründung für eine europäische Hochfeldeinrichtung ELMF (European Large Magnetic Field Facility).

In der wissenschaftlich fundierten und detaillierten Studie wird die Notwendigkeit für die Errichtung einer europäischen Hochfeldeinrichtung deutlich gemacht. Auf Grund der fundamentalen Rolle des Magnetfelds in der Natur könnte eine solche Einrichtung wesentliche Beiträge in verschiedensten Bereichen der Wissenschaft (z. B. auch den Lebenswissenschaften, der Chemie u.a.) leisten. Auch der positive Einfluss auf die industrielle Forschung und Unternehmen wird herausgearbeitet.

Ein mögliches neues europäisches Hochfeldlabor bedürfe eines starken wissenschaftlichen Umfelds vor Ort. Es könnte sowohl als Einzelstandort als auch als Netzwerk verschiedener Standorte konzipiert werden und sollte eng mit anderen europäischen und internationalen Einrichtungen zusammenarbeiten.

Die ESF–Stude hebt besonderes hervor, dass die Kombination mit einem anderen Forschungs–Großgerät wie z. B. einem explizit angesprochenen Freie–Elektronen–Laser neuartige experimentelle Möglichkeiten, insbesondere auf dem Gebiet der Halbleiterforschung, eröffnen würde.

Ein Europäisches Hochfeldlabor sollte bis zum Jahr 2003 in Betrieb gehen. Am vordringlichsten wird die Errichtung einer gepulsten 100–Tesla–Anlage dargestellt. Eine Entscheidung über statische Felder soll aus technologischen und wissenschaftspolitischen Gründen zu einem späteren Zeitpunkt gefällt werden. Zur Bewertung der Notwendigkeit europäischer Aktivitäten auf dem Gebiet hoch–homogener Magnetfelder für die Kernspinresonanz sollten weitere Schritte erfolgen.

Die Investitionskosten für ein solches Hochfeldlabor für gepulste, sehr hohe Magnetfelder werden in der ESF–Studie auf eine Größenordnung von 50 Mio. Euro (ca. 98 Mio. DM), mit laufenden Kosten von etwa 5 Mio. Euro (ca. 10 Mio. DM) pro Jahr, beziffert. Eine detaillierte Aufschlüsselung des Finanzbedarfs wird jedoch nicht gegeben. Es wird jedoch darauf hingwiesen, dass vorzugsweise eine nationale Einrichtung zu einem europäischen Labor erweitert werden soll. Ein Neuaufbau eines Labors unter Regie der Europäischen Union wird nicht angestrebt. Es werden auch keine konkreten Aussagen zu technischen Details z. B. der Spulen und der Energieversorgung gemacht. Auch bleibt der Standort eines möglichen Hochfeld–Pulslabors offen. **Bisher liegt kein abgestimmter, einheitlicher Vorschlag des europäischen Konsortiums vor.**

Es sei angemerkt, dass, während in Grenoble der Aufbau eines Magneten nach dem Polyhelix-System betrieben wird, die anderen Labors und der vorliegende Dresdner Vorschlag den uns aussichtsreicher erscheinenden Weg einer drahtgewickelten Spule (siehe Kap. IV.1) gehen. Ähnlich wie bei den unterschiedlichen Magnetkonstruktionen gehen die Partner des europäischen Konsortiums auch unterschiedliche Wege bei der Elektroversorgung (Kondensatoren oder Generatoren; siehe Kap. IV.3) und bei der Materialentwicklung.

Die z. T. vorhandenen unterschiedlichen Zielsetzungen und Prioritäten der Partner des europäischen Konsortiums über das Vorgehen und auch große Änderungen in den örtlichen personellen Situationen lassen den Zeitpunkt der Erreichung der Ziele und der angestrebten Kooperation des bereits seit 1988 arbeitenden europäischen Konsortiums als unsicher erscheinen. Dies mag auch ein Grund dafür sein, dass sich drei der wichtigsten Partner des Konsortiums, Grenoble, Toulouse und Berlin, für eine Unterstützung des Dresdner Vorhabens ausgesprochen haben (s. Kap. I.4.2, S. 11f). Zwar ist das Dresdner Hochfeldprojekt bisher noch nicht Teil der europäischen Initiative, dennoch haben Prof. L. Schultz und Dr. K.–H. Müller (IFW Dresden) sowie Prof. P. Fulde (MPI–PKS) bereits an der Erarbeitung der wissenschaftlichen Zielstellungen der ESF–Studie mitgewirkt.

I.3.3 Stellung des Dresdner Vorschlags

In eindrucksvoller Weise macht die ESF–Studie die wissenschaftliche Notwendigkeit für die Errichtung einer europäischen Hochfeldeinrichtung deutlich. Alle bereits in der ersten Version des Dresdner Hochfeldprojektes vom 20. Januar 1998 gesteckten wissenschaftlichen Ziele und Fragestellungen werden auch von der europäischen Expertenkommission als vordringlich bezeichnet.

Über die wissenschaftliche Notwendigkeit hinaus behandelt der Dresdner Vorschlag jedoch auch detailliert die technischen Realisationsmöglichkeiten. Die im Dresdner Vorschlag gesteckten Ziele schließen die technischen Anforderun-

gen und Ziele der ESF–Studie für gepulste Magnetfelder bereits mit ein. Auch bietet der Standort eines Pulsfeldlabors am Forschungszentrum Rossendorf in Kombination mit dem Freie–Elektronen–Laser, wie auch in der ESF–Studie vorgeschlagen, die Möglichkeit, ein weltweit einzigartiges Forschungsgerät aufzubauen (s. Kap. I.4.1, S. 11).

Darüber hinaus enthält der Dresdner Vorschlag auch einen detaillierten Investitions–, Personal– und Zeitplan zur Verwirklichung des Projekts. Die Kosten zur Errichtung des hier vorgeschlagenen nationalen Hochfeldlabors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder belaufen sich auf 44,5 Mio. DM (ca. 23 Mio. Euro), die etwa die Hälfte der in der ESF–Studie angegebenen Gesamtkosten für ein europäisches Pulsfeldlabor ausmachen.
Mit einer Realisierung des vorliegenden Vorschlags bietet sich Dresden als Standort für ein europäisches Pulsfeldlabor an. Eine weitere Profilierung von Grenoble als Standort für den Teil „statische Felder“ und Dresdens für den Teil „gepulste Felder“ eines europäischen Hochfeldlabors erscheint sinnvoll.

I.3.4 Rolle deutscher Einrichtungen

Abgesehen von der Beteiligung am Deutsch–Französischen Hochfeldlabor in Grenoble sind die in Deutschland bestehenden Hochfeldeinrichtungen (Tab. I.4, S. 8) als Nutzerlabors im internationalen Maßstab nicht konkurrenzfähig. Mit den im vorliegendem Vorschlag für das „Hochfeldlabor Dresden (HLD)“ angestrebten Werten für drei Hochfeld–Pulsanlagen (60 T / 1 s ; 70 T / 0,1 bis 0,2 s ; 100 T / 10 bis 20 ms, Kap. IV.1) soll ein wesentlicher Schritt über das bisher in Deutschland und Europa Erreichte hinaus getan und die internationale Spitze erreicht werden.
Die führenden deutschen Hochfeldeinrichtungen in Berlin und Frankfurt (Tab. I.4) unterstützen das Dresdner Vorhaben teils durch Beratung und Diskussion, teils durch konkrete Zusammenarbeit und Kooperation (s. Kap. I.4.2, S. 11).

Einrichtung	Gründungsjahr	El. Energie	max. Feld Feld / Bohrung / Puls
TU Braunschweig	1972	0,02 MJ	27 T / 12 mm / 12 ms
HU Berlin	1994	0,4 MJ	62 T / 18 mm / 12 ms
Uni. Frankfurt	1995	0,8 MJ	40 T / 22 mm / 100 ms 50 T / 24 mm / 20 ms

Tabelle I.4: Führende deutsche Hochfeldlabors
(für das deutsch–französische Hochfeldlabor in Grenoble siehe Tab. I.1, S. 2)

I.4 Die Situation in Dresden und Unterstützung des Vorhabens durch Dritte

Die Entwicklung der Hochfeldtechnologie ist nicht Selbstzweck. Ihr Ziel ist die Bereitstellung hoher Magnetfelder, um vor allem die Eigenschaften der Materie zu verändern und sie besser zu verstehen. Die Anregung für die Errichtung eines Hochfeldlabors muss deshalb von den Nutzern kommen. Der Erfolg eines Hochfeldlabors hängt von der Qualität der technischen Infrastruktur (z. B. Magnetspulen und Elektroversorgung), vor allem aber von der wissenschaftlichen Qualität und der Bedeutung der dort durchgeführten Hochfeld-Experimente ab. Zum einen werden diese von externen Nutzern durchgeführt werden; eine entscheidende Voraussetzung für den Erfolg des Labors ist jedoch eine eigene starke Gruppe von Wissenschaftlern mit einem eigenen anspruchsvollen Forschungsprogramm.

I.4.1 Wissenschaftliches und technologisches Umfeld

Das Dresdner Hochfeldlabor wird in ein reiches wissenschaftliches und industrielles Umfeld eingegliedert sein, was eine grundlegende Voraussetzung für seinen Erfolg darstellt: In Dresden sind seit 1991 mehrere Institute der Materialforschung und Festkörperphysik gegründet oder umstrukturiert worden (Tab. I.4.1, S. 10). Viele dieser Institute kooperieren im Materialforschungsverbund Dresden. Zusammen mit den in Dresden erfolgten weltweit führenden neuen Industrieansiedlungen der Halbleitertechnologie und Mikroelektronik (z. B. Infineon Technologies AG der Siemens AG, ehemals Simec; Advanced Micro Devices, AMD) hat sich Dresden in wenigen Jahren zu einem in Deutschland führenden Forschungs– und Technologie–Standort auf dem Gebiet der Festkörperphysik und Materialforschung entwickelt. Auf diesen Gebieten arbeiten inzwischen mehrere hundert Wissenschaftler in Dresden, von denen ein wesentlicher Teil Interesse an der Durchführung von Experimenten in sehr hohen Magnetfeldern hat.

Führende Wissenschaftler der Hochfeldforschung in Dresden

Neugründungen und Umstrukturierungen haben führende Festkörperphysiker nach Dresden geführt, die maßgeblich an der Erarbeitung des vorliegenden Vorschlags beteiligt sind.[§] Nahezu alle der in Kapitel II diskutierten Gebiete

[§] Wesentliche Ergebnisse beteiligter Wissenschaftler mit Bezug zur Hochfeldforschung: z. B.

Eschrig: Berechnungen von Festkörpereigenschaften, insbesondere magnetischer Materialien;

Fink: Elektronenstruktur von Supraleitern; Kohlenstoff–Nanostrukturen und hochkorrelierte Elektronensysteme;

Fulde: Theorie hochkorrelierte Elektronensysteme; Fulde-Ferrell Zustand der Supraleitung;

Loewenhaupt: Neutronenstreuung an Systemen mit stabilen und instabilen magnetischen Momenten.

Pobell: Tiefsttemperatur–Weltrekord durch Adiabatische Kernentmagnetisierung; Nachweis der Koexistenz von Kern–Ferromagnetismus und Supraleitung;

Schultz: Metamagnetische Phasenübergänge in Seltenerd–Übergangsmetallverbindungen; oberes kritisches Magnetfeld in Supraleitern; Entwicklung hochleitender, hochfester Materialien;

Steglich: Entdeckung der Schwere–Fermionen–Supraleitung; Hochfeld–Supraleitung;

- **Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz (WGL)**
  - **Forschungszentrum Rossendorf (FZR)**
  - **Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden (IFW)**
  - Institut für Polymerforschung Dresden
- **Max-Planck-Gesellschaft (MPG)**
  - **Max–Planck–Institut für Chemische Physik fester Stoffe (MPI–CPfS)**
  - **Max–Planck–Institut für Physik komplexer Systeme (MPI–PKS)**
- **Technische Universität Dresden (TUD)**
  - **Institut für Angewandte Physik (IAPD)**
  - Institut für Theoretische Physik
  - Institut für Tieftemperaturphysik
  - Institut für Physikalische Metallkunde
  - Institut für Oberflächenphysik und Mikrostrukturphysik
  - Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik
  - Institut für Werkstoffwissenschaft
  - Institut für Kristallographie und Festkörperphysik

Tabelle I.5: Einige Dresdner Institute der Festkörper– und Materialforschung (Teilnehmer am Vorschlag sind fett gedruckt)

der Festkörperphysik und Materialforschung sind durch führende Wissenschaftler in Dresden vertreten. Großes Interesse an der Nutzung der Einrichtungen des Hochfeldlabors wird auch vom Sonderforschungsbereich 463 *„Seltenerd-Übergangsmetallverbindungen: Struktur, Magnetismus und Transport“*, vom Sonderforschungsbereich 422 *„Strukturbildung und Eigenschaften in Grenzschichten“* sowie vom Graduiertenkolleg *„Struktur und Korrelationseffekte in Festkörpern“* an der TU Dresden entgegengebracht. Die Möglichkeit, ihre Forschungsarbeiten auch bei sehr hohen Magnetfeldern durchführen zu können, würde eine wesentliche Erweiterung des Dresdner Forschungspotentials ergeben. Das Dresdner Hochfeldlabor würde wesentliche neue Experimente für die Dresdner Physik und Materialforschung ermöglichen und neue Erkenntnisse zum Verhalten der Materie liefern. Das Hochfeldlabor würde dabei zu einer weiteren Integration der Dresdner Forschungsinstitute der Festkörperphysik und Materialforschung, insbesondere auch des Materialforschungsverbunds Dresden, führen. Die Dresdner Experimentalphysiker, die maßgeblich an der Erarbeitung des vorliegenden Vorschlags beteiligt sind, bringen profunde Kenntnisse einer Vielzahl der im Dresdner Hochfeldlabor geplanten Experimentiertechniken ein. Sie garantieren ein weltweit führendes eigenes Experimentierprogramm und werden ohne Zweifel einen Fokus für die Kooperation mit auswärtigen deutschen und europäischen Wissenschaftlern und Instituten darstellen. Aufbauend auf der Synergie zwischen Forschung, Technologie und Industrie wird das Dresdner Hochfeldlabor ein für viele Nutzer attraktives Labor von internationalem Rang darstellen.

Kombination mit FEL — Hochfeld–FIR–Spektroskopie

Es ist geplant, das Dresdner Hochfeldlabor auf dem Gelände des Forschungszentrums Rossendorf e. V. in unmittelbarer Nähe des dort im Aufbau befindlichen supraleitenden Elektronenbeschleunigers mit Freie–Elektronen–Laser (FEL) aufzubauen. Der Freie–Elektronen–Laser wird hochintensives Licht hoher Energieauflösung und mit Pikosekunden–Pulsen im fern-infraroten Wellenlängenbereich (FIR) von 5 μm bis 150 μm liefern. In diesem Wellenlängenbereich gibt es keine andere durchstimmbare Lichtquelle. Durch die Kombination der beiden Forschungsgeräte — das FIR–Licht kann, z. B. auch über eine Entfernung von mehreren hundert Metern, zu den Hochfeldexperimenten transportiert werden — sind weltweit einmalige Experimente zur Infrarotspektroskopie bei sehr hohen Magnetfeldern möglich. Sie haben insbesondere Bedeutung für die Halbleiterphysik, die Erforschung der Supraleitung und des Magnetismus (Kap. I.6.7 u. Kap. II).

Materialentwicklung

Eine Schlüsselrolle bei der Erzeugung von sehr hohen Magnetfeldern kommt der Entwicklung der für die Spulen notwendigen hochfesten und hochleitfähigen Drähte zu. Es müssen spezielle, für die geforderten Zwecke geeignete Drähte hergestellt werden, welche die zum Teil gegensätzlichen Anforderungen nach hoher Leitfähigkeit (z. B. reines Cu, Ag oder Al) und hoher Zugfestigkeit (Legierungen) optimieren. Innovative Werkstoffe und Verfahren sowie bereits vorhandene Materialien und Prozesse müssen hierbei untersucht bzw. weiterentwickelt werden. Die Umsetzung und Anwendung der Ergebnisse aus der Materialentwicklung sind dabei, auch über ihre Bedeutung für die Hochfeldphysik hinaus, von technologischem und wirtschaftlichem Interesse. Hier können die langjährige Erfahrung und das Know–how sowie die bereits bestehenden Einrichtungen des Instituts für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg des Projektes leisten (Kap. IV.2 sowie Kap. I.5).

I.4.2 Kooperationen und Unterstützung durch Dritte

Da in Dresden bisher keine einschlägigen Erfahrungen für die Errichtung und den Betrieb eines Hochfeld–Nutzerlabors bestehen, haben sich die Initiatoren des vorliegenden Vorschlags die Unterstützung von auf dem Gebiet erfahrenen, führenden Wissenschaftlern und Instituten gesichert. Hierzu gehören:

Prof. S. Askenazy, Direktor (Service National des Champs Magnetiques Pulses, Toulouse): Unterstützung des Dresdner Vorhabens durch Informationen über die Elektroversorgung und die Drahtentwicklung im Hochfeldlabor Toulouse des CNRS; mit Industrie ausgearbeiteter Vorschlag einer Kondensatorbank für das Dresdner Vorhaben (siehe Kap. IV.3).

Dr. G. Boebinger (bisher Lucent Technology, Bell Labs. und jetzt Los Alamos National Laboratory): Kürzliche Erzielung von 80 T; Angebot der Unterstützung bei der Realisierung des Dresdner Vorhabens.

Prof. J. Crow, Direktor; Prof. H. Schneider–Muntau, stellv. Direktor (National High Magnetic Field Laboratory, Tallahassee/Los Alamos): Unterstützung des Dresdner Vorhabens durch eingehende Diskussionen, dabei insbesondere: Nutzung von Computerprogrammen; gemeinsame Berechnungen von 100–T–Spulen für das Dresdner Vorhaben; Kooperation bei der Materialentwicklung; Zusammenarbeit bei/oder Übernahme (gegen Kostenerstattung) der Spulenherstellung; Auslegung der Kodensatorbank; Erfahrungen zur Experimentier– und Kryotechnik bei hohen Magnetfeldern; Erfahrungen einer Nutzer–Anlage für externe Forscher. Im März 1999 wurde mit dem National High Field Laboratory ein offizieller **Kooperationsvertrag** vereinbart.

Dr. P. Frings (Universiteit van Amsterdam): Gemeinsame Entwicklung eines Computerprogramms zur Berechnung der Kräfte in Hochfeldspulen.

Prof. R. Grössinger (Institut für Experimentalphysik, Technische Universität Wien): Erbauer und Betreiber einer 40–T–Anlage in Wien; Mitarbeit an der Erarbeitung des Vorschlags (insb. Kap. II und Kap. IV); **geplante Assoziation** an das Dresdner Hochfeldlabor.

Prof. F. Herlach (Katholieke Universiteit Leuven): Unterstützung des Dresdner Vorhabens durch Beratung und Diskussionen.

Prof. J. Klamut, Direktor (International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures, Wroclaw): Geplante Zusammenarbeit mit der internationalen Hochfeldeinrichtung in Wroclaw/Polen. **geplante Assoziation** an das Dresdner Hochfeldlabor.

Dr. R. Kratz (früher Deutsch–Französisches Hochfeldlabor Grenoble): Einstellung in Dresden für die Mitarbeit an der Erarbeitung des Vorschlags (insb. Kap. IV); Berechnung und Design der Hochfeldspulen (Kap. IV.1).

Prof. V. Kuchinsky (Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus St. Petersburg): Experte für Hochstromanlagen; Diskussion und Vorschlag eines Homopolar–Generators für die Elektroversorgung in Dresden (siehe Kap. IV.3).

Prof. B. Lüthi (Universität Frankfurt): BMBF-Projekt „Hochfeldexperimente an stark korrelierten elektronischen Systemen“; Aufbau einer 50 T–Pulsfeldanlage in Frankfurt; Unterstützung des Dresdner Vorhabens durch Beratung und Diskussionen.

Prof. M. v. Ortenberg (Humboldt-Universität Berlin): Erbauer und Betreiber des Magnetlabors Berlin, vor allem für Mikrosekunden-Pulse; Experte für Messtechnik in gepulsten Magnetfeldern; Unterstützung des vorliegenden Vorschlags und **geplante Assoziation** an das Dresdner Hochfeldlabor.

Prof. V. Sechovsky (Institut für Physik, Karls-Universität Prag): Führender Fachmann für magnetisches Verhalten von 5f–Metallen; Beitrag zum Vorschlag, insbesondere Hochdruck–Experimente (Kap. II.7); **geplante Assoziation** und enge Kooperation mit dem Dresdner Hochfeldlabor.

Prof. P. Wyder, Direktor; Dr. W. Joss, Abteilungsleiter Magnetbau (Deutsch–Französisches Hochfeldlabor Grenoble): Unterstützung des Dresdner Vorhabens und Zurverfügungstellung aller entsprechenden Grenobler Informationen und Unterlagen; ausdrückliche Unterstützung für den Standort eines europäischen Pulsfeldlabors in Dresden/Rossendorf.

Es ist darüber hinaus geplant, weitere mitteleuropäische Institutionen, zusätzlich zu den bereits kooperierenden Instituten aus Prag und Wien, z. B. das Hochfeldlabor in Wroclaw, in das Dresdner Vorhaben einzubeziehen. Nach Inbetriebnahme des Dresdner Hochfeldlabors soll an die Europäische Gemeinschaft ein Antrag zur Aufnahme der Anlage als europäische „Large–Scale Facility" gestellt werden. Damit ist die finanzielle Förderung der Nutzung der Einrichtung durch Interessenten aus der EU sowie ein weiterer Ausbau der Anlage zu einer internationalen Einrichtung möglich.

I.5 Vorprojekt: Hochfeldlabor Dresden

Die erste Version des vorliegenden Projektvorschlags, erschienen am 20. Januar 1998, wurde im Frühjahr 1998 dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst sowie im Sommer 1998 dem Wissenschaftsministerium des Bundes vorgestellt. Als unmittelbares Ergebnis der ermutigenden Vorstellung des Vorschlags wurde im Sommer 1998 ein bis Ende 2000 laufendes Vorprojekt begonnen. Hierbei sollen das Konzept und alle wesentlichen Komponenten des Dresdner Hochfeldlabors an einer „kleinen" Anlage erprobt und entwickelt werden. Darüber hinaus soll die Materialentwicklung der für die Magnetspulen benötigten hochfesten, hochleitfähigen Drähte vorangetrieben werden. Es wird eine 1 MJ–Kondensatorbank und zunächst ein 50 T–Magnet (50 T / 24 mm / 10 ms) aufgebaut (später bis 60 T).

Diese „kleine Anlage" wird nicht von einem kommerziellen Anbieter gekauft, sondern stellt eine Eigenentwicklung dar, die von den Mitarbeitern der Projektgruppe Hochfeldlabor Dresden unter Leitung von Dr. K.-H. Müller (IFW Dresden) aufgebaut wird, und bei der alle wesentlichen Komponenten der Energieversorgung und deren elektrischer Beschaltung, die Sicherheitssysteme, die Kryotechnik sowie die Mess– und Steuerungstechnik für den Einsatz in der projektierten 50 MJ/100 T–Anlage erprobt und getestet werden.

Auch bietet die Anlage den Ausgangspunkt für die technische Erprobung neuer Leitermaterialien und neuer Magnetfeldspulen. Als Standort der „kleinen" 1 MJ–Anlage wurde das IFW–Dresden gewählt[¶], da hier die Hauptaktivitäten auf dem Gebiet der Materialentwicklung angesiedelt sind. Die Spulen werden

[¶] abweichend vom Standort des späteren Dresdner Hochfeldlabors am Forschungszentrum Rossendorf; der Aufwand für die notwendigen Laborumbauten für die kleine Anlage ist ohnehin weitaus geringer und unabhängig von Anforderungen an ein Gebäude für ein zukünftiges Nutzerlabor.

in enger Kooperation und unter direkter Dresdner Mitarbeit am NHMFL in Tallahassee/USA hergestellt.

Durch das Vorprojekt werden grundlegende Erfahrung und Know–How im Vorfeld erarbeitet und ein zügiger Aufbau des 100–Tesla–Projektes gewährleistet. Ziele, Stand und erste Ergebnisse des Vorprojekts werden ausführlicher im Anhang B (S. 117 ff) und in den jeweiligen Abschnitten des Kapitels IV diskutiert. Das Vorprojekt mit einem Finanzvolumen von ca. 1 Mio. DM (ca. 0,5 Mio. Euro) wird je etwa zur Hälfte vom Freistaat Sachsen und den beteiligten Instituten selbst finanziert.

I.6 Physik und Chemie in sehr hohen Feldern

Im Bezug auf kondensierte Materie ist das Magnetfeld eine fundamentale intensive thermodynamische Variable. Wegen seiner grundlegenden Bedeutung in der Natur, ähnlich wie z. B. Temperatur und Druck, hat das Magnetfeld einen tiefgreifenden Einfluss auf Zustand und Zustandsänderungen der Materie und spielt daher auch in einer Vielzahl wissenschaftlicher Disziplinen — weit über die Grenzen der Physik hinaus — eine wesentliche Rolle.

Die Erweiterung des Bereiches, in dem ein solch grundlegender Parameter variiert werden kann, hat immer wieder zu bahnbrechenden Entdeckungen geführt und unsere Kenntnis über die Materie erweitert.

Unerwartete Phänomene, wie sie z. B. bei der Erweiterung des Forschern zugänglichen Temperaturbereiches auf heutzutage mehr als 15 Größenordnungen entdeckt wurden — z. B. die Supraleitung[‖] und Superfluidität[**]— sind vor dem Horizont unseres Wissens und unserer Alltagserfahrung weder voraussehbar noch erklärbar.

Vergleichbare Bedeutung kommt auch der Erweiterung der experimentell zugänglichen Stärke der Magnetfelder zu. Die Motivation für die Errichtung von Hochfeldlabors kommt deshalb von den Wissenschaftlern, die den fundamentalen Einfluss eines Magnetfeldes zum Verständnis des Verhaltens der Materie ausnutzen wollen oder auf der Suche nach neuen physikalischen, chemischen und biologischen Effekten sind.

[‖] **Nobelpreis für Physik 1913:** Heike Kamerlingh–Onnes; „für seine Untersuchungen der Eigenschaften von Materie bei tiefen Temperaturen, welche unter anderem zu der Produktion von flüssigem Helium führten."

Nobelpreis für Physik 1972: John Bardeen, Leon N. Cooper, J. Robert Schrieffer; „für die gemeinsam entwickelte Theorie der Supraleitung, BSC–Theorie genannt."

Nobelpreis für Physik 1973 (geteilt): Leo Esaki, Ivar Giaever; „für ihre experimentelle Entdeckung von Tunnel–Phänomenen in Halbleitern und Supraleitern."

Nobelpreis für Physik 1973 (geteilt): Brian D. Josephson; „für seine theoretische Vorhersage der Eigenschaften eines Suprastroms durch eine Tunnelbarriere, insbesondere solche Phänomene, welche gemeinhin als der Josephson–Effekt bekannt sind."

Nobelpreis für Physik 1987: J. Georg Bednorz, K. Alexander Müller; „für ihren wichtigen Durchbruch bei der Entdeckung der Supraleitung in keramischen Materialien."

[**] **Nobelpreis für Physik 1978 (geteilt):** Pjotr L. Kapitsa; „für seine grundlegenden Erfindungen und Entdeckungen auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik."

Nobelpreis für Physik 1996: David M. Lee, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson; „für ihre Entdeckung der Superfluidität von Helium–3".

Ein Magnetfeld beeinflusst das quantisierte Drehmoment (Spin) eines Teilchens, es liefert eine zusätzliche Kraft (Lorentz–Kraft) auf ein bewegtes geladenes Teilchen, es quantisiert die Energie, es ändert die Dichte der elektronischen Zustände, und schließlich bricht ein äußeres Magnetfeld die Zeitumkehrsymmetrie. Die Anwendung eines Magnetfeldes auf Materie und die Beobachtung ihres daraus resultierenden Verhaltens ist bei der Erforschung von Gleichgewichtszuständen und Phasenübergängen kollektiver Systeme, einzelner Atome oder Moleküle eine wesentliche Untersuchungsmethode, z. B. in den Bereichen Halbleiterphysik, Magnetismus, Supraleitung und in jüngerer Zeit auch in Chemie und Biologie. Ein sehr hohes Magnetfeld kann neue Phänomene hervorrufen, die auf anderem Weg nicht zugänglich sind. Der Einsatz von gepulsten Feldern deckt dabei eine Vielzahl wesentlicher Forschungsthemen ab.

I.6.1 Nobelpreise 1985 und 1998

Ein Höhepunkt der Magnetfeldforschung war 1980 die **Entdeckung des Quanten–Hall–Effektes in zweidimensionalen Elektronensystemen an Halbleitergrenzflächen durch Klaus von Klitzing** im Hochfeldlabor in Grenoble, für die er **1985** den **Nobelpreis** erhalten hat. Diese Entdeckung hat unter anderem die Möglichkeit erschlossen, einen neuen Standard für die Einheit des elektrischen Widerstands, das Ohm, festzulegen. Damit kann auch diese elektrische Größe unseres Maßsystems auf Naturkonstanten zurückgeführt und in der Praxis mit hoher Präzision bestimmt werden. Des Weiteren hat sie auch zu neuen Phänomenen wie der Wigner–Kristallisation und dem fraktionierten Quanten–Hall–Effekt geführt, der erst vor kurzem mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurde. **Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer und Daniel C. Tsui** erhielten den **Nobelpreis 1998** für ihre Entdeckung einer neuen Art von Quantenflüssigkeit mit gebrochenzahlig geladenen Anregungen. Bei ihrer **Entdeckung des fraktionierten Quanten–Hall–Effekts** zeigten die drei Forscher, dass **wechselwirkende Elektronen in einem starken Magnetfeld** eine neue Art von Quasiteilchen bilden, deren Ladung ein gebrochenes Vielfaches der Elementarladung beträgt.
Diese Entdeckung war erst durch den Zugang zu hohen Magnetfeldern möglich. Weder der ganzzahlige noch der fraktionierte Quanten–Hall-Effekt wurden von der Theorie erwartet oder vorausgesagt.

Der Fortschritt und die zunehmende Bedeutung der Hochfeldphysik spiegelt sich auch in der Zahl der „Hochfeld–Publikationen“ wider, die anteilig stärker angestiegen ist als die Gesamtzahl der Physik–Publikationen. Auch als Folge dieser Entwicklungen sind in mehreren Ländern — vor allem USA und Japan — in den letzten Jahren erhebliche finanzielle Anstrengungen unternommen worden, neue Zentrallabors oder die Erweiterung existierender Labors für die Hochfeldforschung für externe Nutzer zur Verfügung zu stellen (Kap. I.2). Das Interesse an sehr hohen Magnetfeldern zeigt z. B. der Jahresbericht 1998

des Deutsch–Französischen Hochfeldlabors, in dem Berichte von 61 externen Nutzergruppen zu 72 Projekten aufgeführt sind; der Jahresbericht 1998 des amerikanischen National High Magnetic Field Laboratory nennt 293 Projekte (dem ansteigenden Trend von 193, 239 und 256 Projekten in den Jahren zuvor folgend).

In einem Magnetfeld von 100 T erfahren physikalische Systeme eine Energieänderung von etwa 10 meV. Auf einer verallgemeinerten Energieskala entspricht dieser Wert einer thermischen Energie bei etwa 100 K bzw. der elektromagnetischen Strahlungsenergie bei einer Wellenlänge von 100 μm (fernes Infrarot). Im Bereich von einigen Millielektronenvolt (meV) liegen eine Vielzahl von Wechselwirkungen und Anregungen fester Körper. Die weitere Erhöhung der Feldstärke verfügbarer gepulster Magnetfelder eröffnet damit neue Möglichkeiten bei der Untersuchung der Dynamik entsprechender Systeme. In Bereichen, in denen starke äußere Felder von 70 ... 80 T gerade noch nicht für prognostizierte qualitative Änderungen ausreichen (z. B. kritische Felder in Hoch–T_c–Supraleitern, induzierter Bandmagnetismus in Seltenerd–Verbindungen), ist durch Erreichen von 100 T— der Wert, der mit diesem Projekt angestrebt wird — ein wesentlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten.[††]

Eine weitere Motivation für die Entwicklung nicht–destruktiver gepulster Magnetfelder hoher Feldstärke besteht darin, dass in den dabei erreichenbaren Pulsdauern die durchführbaren pyhsikalischen Messungen praktisch quasistatisch stattfinden. Daraus ergeben sich breitere Anwendungsmöglichkeiten, bei denen eine Vielzahl von Substanzklassen untersucht werden können.

Im Folgenden soll für einige Bereiche, vor allem aus der Festkörperphysik, die Bedeutung erläutert werden, die eine Erweiterung des Feldbereiches von den höchsten, derzeit erreichten 36 T statisch bzw. 80 T gepulst auf 100 T hätte. Eine detaillierte und auf die besonderen Interessen in Dresden abgestimmte Diskussion erfolgt in Kapitel II.

I.6.2 Halbleiterphysik

In der **Halbleiterphysik** wurden viele fundamentale Entdeckungen der letzten Jahrzehnte mit Hilfe von hohen Magnetfeldern gemacht. In einem Magnetfeld bewegen sich die Elektronen im Festkörper auf Zyklotronbahnen. Dies führt zu einer linear vom Kehrwert des Magnetfeldes abhängenden Oszillation der Magnetisierung (de Haas – van Alphen – Effekt) oder des elektrischen Widerstands (Shubnikov – de Haas – Effekt). Die Temperatur– und Feld–Abhängigkeiten dieser Oszillationen geben Informationen über die elektronische Bandstruktur („Fermi–Flächen“) und die Wechselwirkung der Elektronen („effektive Massen“, Elektron–Phonon–Wechselwirkung).

[††]Zur Abgrenzung des Forschungsvorhabens soll jedoch auch erwähnt werden, dass diese Felder nicht ausreichen, um in den Bereich typischer elektronischer oder chemischer Bindungsenergien des Festkörpers (0,1 bis 1 eV) vorzustoßen.

Bei 100 T gelangen die Abmessungen dieser Elektronenbahnen und die magnetische Länge $\sqrt{\hbar/eB}$ in den Nano– und Mikrometerbereich; die Zyklotronenergie $\hbar eB/m^\star$ (mit der effektiven Masse $m^\star$) kommt in die Größenordnung z. B. von Energien moderater elektrischer Felder; die Zeeman–Energie ($g^\star \mu_B B$) wird vergleichbar z. B. mit einfach handhabbaren thermischen Energien bzw. der Energie von Infrarot–Strahlung. Eine Vielzahl neuer Effekte, insbesondere in **nieder–dimensionalen Systemen**, in **nanostrukturierten Materialien**, Quantum Dots und Supergittern könnten entdeckt und untersucht werden.

I.6.3 Magnetismus

Die Bedeutung hoher Felder im Bereich des **Magnetismus** resultiert aus der Tatsache, dass die den Magnetismus bestimmenden Austausch– und Anisotropiefelder in der Größenordnung von bis zu einigen 1000 T liegen. Ein externes Feld von 100 T ist stark genug, um diese Felder messbar zu beeinflussen. Ein Beispiel für die wissenschaftliche und auch technologische Wichtigkeit hoher Magnetfelder sind in diesem Bereich Verbindungen zwischen 4f–Seltenerd–Metallen und 3d–Metallen, deren Einsatz als Permanentmagnete von großem Interesse ist. Magnetfelder bis 100 T könnten neue Informationen z. B. über 3d–4f–Elektronenwechselwirkungen, magnetische Phasenübergänge, Riesen–Magnetostriktion, magnetische Flüssigkeiten und magneto–optische Eigenschaften liefern.

I.6.4 Supraleitung

Auch auf dem Gebiet der **Supraleitung**, insbesondere der „Hoch–T_c–Supraleitung“, sind hohe Magnetfelder unerlässlich, um durch Unterdrückung der Supraleitung den normalleitenden Zustand untersuchen zu können. Wegen der hohen kritischen Temperaturen bis 140 K und den damit verbundenen hohen kritischen Feldern sind dazu z. T. Felder bis über 100 T nötig. Zur Klärung des Mechanismus der Hoch–T_c–Supraleitung ist z. B. die Messung der Temperaturabhängigkeit des kritischen Magnetfeldes zur Unterdrückung der Supraleitfähigkeit sowie die Magnetfeldabhängigkeit der kernmagnetischen Resonanz von Interesse; entsprechend werden auch hier sehr hohe Felder benötigt. Dasselbe gilt für die Messung von Quanten–Oszillationen („de Haas – van Alphen – Effekt“), die Aussagen über die elektronische Struktur der Hoch–T_c–Supraleiter geben.

I.6.5 Stark korrelierte Elektronensysteme

Eines der aktuellsten Forschungsgebiete der Festkörperphysik ist die Untersuchung von **Schwere–Fermionen–Systemen**. Wie beim Studium der Supraleiter sowie von organischen Leitern, könnten Untersuchungen dieser Verbindungen bei sehr hohen Feldern (z. B. de Haas – van Alphen

– Effekt–Messungen) wesentliche Beiträge zum weiteren Verständnis der zugrunde liegenden Vielteilchen–Effekte einschließlich magnetischer Quanten–Phänomene liefern.

I.6.6 Molekulare Systeme und Cluster

Bei der Erforschung einzelner **Atome, Moleküle und Cluster** ist eine Vielzahl neuer wissenschaftlich und technologisch bedeutender Entdeckungen zu erwarten. Da sehr hohe Magnetfelder oftmals nicht mehr nur als kleine Störung eines Gleichgewichtszustandes behandelt werden können, werden die durch sie erzeugten Effekte wesentlich zur Erweiterung unseres Verständnisses von z. T. grundlegenden Phänomenen, wie der Elektron–Elektron–Wechselwirkung, Mehr–Teilchen–Problemen, Quanten–Chaos und Riesenmomenten von Atomclustern und Molekülen beitragen.
Die Auswirkungen auf weitere Bereiche der Wissenschaft sind naheliegend. Im Bereich der **Chemie** sind hohe Magnetfelder interessant, um chemische Gleichgewichte zu verschieben oder neue Reaktionskanäle zu öffnen und so chemische Reaktionen gezielt zu steuern. Für einen merklichen Einfluss auf chemische Prozesse sind jedoch Felder in der Größe von 100 T unerlässlich. Ähnliches gilt für die Untersuchung von **biologischen Prozessen**.

I.6.7 Fern–Infrarotspektroskopie in hohen Magnetfeldern

Besondere, auf der Welt einzigartige Experimentiermöglichkeiten ergeben sich durch die **Kombination sehr hoher Magnetfelder mit** dem in Rossendorf im Aufbau befindlichen **Freie–Elektronen–Laser für das ferne Infrarot**. Es wird so z. B. möglich, Zyklotronübergänge in Halbleitern im Infraroten durch Variation der Wellenlänge des Lichts zu vermessen. Eine weitere Möglichkeit ist die Elektron–Spin–Resonanz bei sehr hohen Frequenzen, mit der z. B. der Einfluss von Molekülschwingungen auf elektronische Zustände untersucht werden kann. Schließlich werden im Bereich der Spin–Chemie neue Experimente möglich, da der Wellenlängenbereich des Freie–Elektronen–Lasers im Bereich vieler elektronischer Spin–Übergänge bei hohen Magnetfeldern liegt.

Sehr hohe Magnetfelder sind ein Werkzeug, welches der Wissenschaft in den verschiedensten Bereichen neue Forschungsgebiete erschließen wird, über deren Konsequenzen für unser Verständnis der Materie und dessen technologische Auswirkungen nur spekuliert werden kann. Wie bei jedem entscheidenden Schritt vorwärts in der Wissenschaft, werden wir auch hier mit bahnbrechenden Entdeckungen rechnen können.

Kapitel II

Physik und Chemie in sehr hohen Magnetfeldern — Das wissenschaftliche Programm in Dresden

Das vorgeschlagene Hochfeldlabor soll ein Nutzerlabor für alle daran interessierten deutschen, europäischen und außereuropäischen Wissenschaftler sein. Die große Bedeutung, die hohe Magnetfelder für die moderne Forschung in den verschiedensten Disziplinen wie der Physik, Chemie und Biologie besitzen, ist der Ausgangspunkt für diesen, bereits im Januar 1998 in der ersten Version vorgelegten Vorschlag zur Errichtung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden. Die Wichtigkeit der grundlegenden wissenschaftlichen Ziele und die Notwendigkeit, der daraus resultierenden experimentellen Erfordernisse, wurden nachfolgend in einer im November 1998 erschienenen Studie der European Science Foundation deutlich gemacht und bestätigten das Konzept des Dresdner Vorschlags (s. Kap. I.3.2, S. 6 sowie Anhang C, S. 121). Bei den folgenden, für die Hochfeldforschung besonders wichtigen Wissenschaftsgebieten wird aber insbesondere auf Dresdner Experimentvorschläge eingegangen, um das große Dresdner Interesse und Potential für den Einsatz sehr hoher Magnetfelder zu unterstreichen.

II.1 Halbleiterphysik und niedrigdimensionale Systeme

Hohe Magnetfelder haben in der Entwicklung der Halbleiterphysik eine grundlegende Rolle gespielt. Sie haben das Verständnis für die Physik der Halbleiter entscheidend vorangebracht, zu neuen Halbleitern geführt und schließlich die Entwicklung der Mikro- und Nanostrukturen wesentlich beeinflusst. Ein

hohes Magnetfeld zwingt die Leitungselektronen, sich mit der „Zyklotronfrequenz“ auf geschlossenen Bahnen zu bewegen. Dadurch wird die vorher kontinuierliche Elektronenenergie in diskrete Zustände („Landau–Niveaus“) geändert. Die durch Einstrahlung elektromagnetischer Energie erzeugten Übergänge zwischen den Zyklotronzuständen geben wichtige Informationen über Elektronen–Energiezustände und effektive Massen, die durch Wechselwirkungen zwischen den Elektronen und anderen Anregungen, z. B. Phononen, zustande kommen. Aber nur bei den höchsten hier diskutierten Feldern kann die Zyklotronenergie mit der Coulombenergie zwischen den Ladungsträgern und den Energien der Gitterschwingungen („Phononen“; Elektron–Phonon–Wechselwirkungen) konkurrieren oder sie übertreffen. Der Zyklotronradius wird dann vergleichbar mit atomaren Abmessungen („Nanometer–Physik“; bei 100 T 2,5 nm), was entscheidend für viele kollektive Phänomene in Halbleitern ist.

Bei vielen Halbleitern (z. B. PbTe oder GaAs) liegen die optischen Übergänge zwischen Zyklotronzuständen in Feldern von 50 T bis 100 T bei Ferninfrarot–Wellenlängen von ca. 10 μm. Sie wurden bisher nur bei festen Wellenlängen des Lichtes unter Variation des Magnetfeldes untersucht. Die genannte Wellenlänge liegt im Bereich des im **Forschungszentrum Rossendorf** im Aufbau befindlichen **Freie–Elektronen–Lasers (FEL)** für das ferne Infrarot, der eine kontinuierliche Durchstimmung der Wellenlänge von 5 μm bis 150 μm erlauben wird. Durch diese einmalige Kombination der Durchstimmbarkeit der Wellenlänge im fernen Infrarot mit sehr hohen Magnetfeldern und durch die hohe Qualität des Lichtstrahls des Rossendorfer FEL (Pulslänge, Pulsfrequenz, Intensität, Energieschärfe, Zwei–Farben–Experimente) werden neuartige Experimente möglich, die neue, weiterführende Informationen liefern werden.

Ein weiteres, erst durch die Kombination Hochfeldlabor / Freie–Elektronen–Laser ermöglichtes neues Arbeitsgebiet ist die Elektron–Spin–Resonanz bei durchstimmbaren, sehr hohen Frequenzen (bei einem typischen elektronischen g–Faktor von 2 entsprechen 100 T einer Frequenz von etwa $3 \cdot 10^{12}$ Hz, also einer Wellenlänge von etwa 100 μm). Durch diese Terahertz–Experimente kann z. B. der Einfluss von Molekülschwingungen auf elektronische Zustände mit hoher Empfindlichkeit und spektraler Auflösung untersucht werden.

Auch bei der Untersuchung von stark dotierten Substanzen, Materialien mit hohen effektiven Massen bzw. geringer Beweglichkeit der Ladungsträger, spielen hohe Magnetfelder eine wichtige Rolle, da die Messung der Zyklotronresonanz, aber auch die Beobachtbarkeit von Quantenoszillationen, wie z. B. der de Haas–van Alphen–Effekt, davon abhängt, wie gut die Landau–Zustände aufgelöst sind. Durch Stöße an Verunreinigungs– oder Dotieratomen werden die Landau–Zustände verbreitert. Die Auflösung der Zyklotronresonanzen und der Quantenoszillationen sowie die Größe der entsprechenden Signale steigen mit steigendem Magnetfeld.

In quasi zwei–dimensionalen Ladungsträgersystemen werden quantisierte Plateaus des Hall–Widerstands beobachtet, wenn die Fermi–Energie (Grenzenergie, bis zu der Elektronenzustände besetzt sind) zwischen zwei Landau–Niveaus fällt. Für diese 1980 am Hochfeldlabor in Grenoble gemachte Ent-

deckung hat K. von Klitzing 1985 den Nobelpreis erhalten. Zur Beobachtung des Effekts sind hohe Magnetfelder notwendig, um die quantisierten Zustände scharf auftreten zu lassen. Bei sehr hohen Magnetfeldern tritt schließlich der fraktionierte Quanten–Hall–Effekt auf, für dessen Entdeckung und physikalische Interpretation Horst L. Störmer, Robert B. Laughlin und Daniel C. Tsui der Physik–Nobelpreis 1998 verliehen wurde. Die dabei von Laughlin postulierte fraktionierte Elementarladung im Festkörper wurde im letztem Jahr erstmalig direkt beobachtet. Für ein grundlegendes Verständnis des fraktionierten Quanten–Hall–Effekts sind weitere Experimente notwendig. Des Weiteren sind in sehr hohen Magnetfeldern auch neuartige Effekte sowohl für die hochaktuellen Halbleiter–Nanostrukturen (Nanometer–Supergitter; Quantum–Lines und Quantum–Dots) als auch für stark anisotrope Schichtkristalle (z. B. Bi_2Te_3) zu erwarten, da in diesen Systemen der Zyklotronradius der Elektronen bei sehr hohen Magnetfeldern in den Nanometerbereich gelangt (2,5 nm bei 100 T).

Zur Stärkung der Forschungsaktivität in der Halbleiterphysik — und auch im Hinblick auf die konzentrierten Industrieansiedlungen dieser Branche in Dresden (z. B. Infineon (Siemens), AMD, ZMD) — hat das **Forschungszentrum Rossendorf** einen neuen, zusätzlichen Institutsdirektor für dieses Gebiet der Materialforschung berufen (insbesondere Infrarot–Spektroskopie mit dem Freie–Elektronen–Laser); die Berufung erfolgte gemeinsam mit der TU Dresden. Darüber hinaus hat die **TU Dresden** eine Stiftungsprofessur für die Halbleiterphysik eingerichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass beide Berufungen zu einer deutlichen Verstärkung des Interesses der Dresdner Halbleiterphysik an der Nutzung des Hochfeldlabors führen werden.

II.2 Magnetismus und Metallphysik

Der Magnetismus ist eines der bedeutendsten Gebiete der Festkörperphysik und der Materialforschung. Er ist auch deshalb von fundamentaler Wichtigkeit, da er makroskopische Observable (magnetisches Moment, Anisotropie etc.) mit quantenmechanischen Theorien verknüpft und in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle in der statistischen Physik und Quantenfeldtheorie spielt. Außerdem gibt es viele technologische Anwendungen des Magnetismus (hart– und weichmagnetische Werkstoffe, Permanentmagnete, Motoren, Generatoren, Transformatoren, magnetische Übertrager, Sensoren und Datenspeicher, Magnetostriktion, Magnetooptik), deren Weiterentwicklung nur durch ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden magnetischen Phänomene möglich ist. Trotz intensiver Anstrengungen auf diesem Gebiet in den letzten Jahrzehnten sind viele magnetische Effekte immer noch nicht oder nur teilweise verstanden. Ein Grund hierfür sind die vielen unterschiedlichen Wechselwirkungen (Dipolwechselwirkung; Austauschwechselwirkungen; Spin–Bahn–Kopplung der Elektronen) und Erscheinungsformen (Dia–, Para–, Ferro–, Ferri–, Antiferro–, Meta–, Micto–Magnetismus; Spingläser; Kondo–Effekt) des Magnetismus. Die inneren magnetischen Wechselwirkungen in magnetischen Substanzen erreichen

Werte bis zu einigen 1000 T. Ein äußeres Feld von 100 T wäre in der Lage, mit diesen inneren Feldern zu konkurrieren und sie zu beeinflussen, z. B. auch die Konfiguration der magnetischen Momente zu ändern. Als Beispiel für wichtige und interessante magnetische Substanzen seien die intermetallischen Verbindungen aus 4f–Seltenen Erden und 3d–Übergangsmetallen (z. B. $R_2Fe_{14}B$ mit R=Nd, Pr oder auch R_2Co_{17}) genannt. Zu dieser Thematik wurde ein Sonderforschungsbereich (SFB 463) an der TU Dresden in Kooperation mit dem IFW Dresden und den Max–Planck–Instituten für Physik komplexer Systeme und für Chemische Physik fester Stoffe eingerichtet (derzeitige Laufzeit bis 2002). Die oben genannten Substanzen stellen die momentan stärksten Permanentmagnete dar und finden bereits breite technologische Anwendung z. B. als Stellmotoren, Aktuatoren, aber auch als Sensoren. Ähnliche Verbindungen sind für die in der modernen Computertechnologie wichtige magnetooptische Speicherung in Verwendung. Vielfältige Untersuchungen an diesen Systemen sind von der **TU Wien und den beteiligten Dresdner Instituten** geplant.

Um die Austauschwechselwirkung zu bestimmen, muss die magnetische Kopplung durch ein externes Magnetfeld aufgebrochen werden. Theoretische Überlegungen zeigen, dass man z. B. zum Aufbrechen der Kopplung in R_2Co_{17}–Verbindungen externe Feldstärken zwischen 20 und 200 T benötigen würde. Die Untersuchungen in Feldern bis 100 T würden neue Informationen über magnetische Zustandsdiagramme, Wechselwirkungsparameter, aber auch über die magnetische Anisotropie, 4f–Kristallfeldzustände, magnetische Phasenübergänge, relative Ausrichtung der 3d– zu den 4f–Momenten und Riesen–Magnetostriktion liefern.

In jüngster Zeit haben sogenannte austauschgekoppelte Magnete — bei denen infolge einer nanokristallinen Struktur die Körner über die Korngrenzen hinweg koppeln — an Bedeutung gewonnen. Die Mikrostruktur und damit die Koerzitivfeldstärke sind außerordentlich empfindlich vom Herstellungsprozess abhängig. Die Natur dieser „Austauschkopplung“, die über die Korngrenzen hinweg wirkt, ist noch nicht völlig klar. Hierzu planen Wissenschaftler der **TU Wien** Experimente an nanokristallinen Modellsubstanzen mit den verschiedensten Kopplungsmechanismen, um mehr über diese Austauschkopplung zu erfahren. Dies kann dann zu Magneten mit besseren Eigenschaften, d. h. zu einem höheren Energieprodukt oder auch zu einer Verbesserung der Koerzitivfeldstärke führen.

Von der **TU Wien** wurden weitere, anwendungsorientierte Vorhaben vorgeschlagen. Manche Pulver für Permanentmagnete können bei erhöhter Temperatur gepresst werden, dadurch wird eine Ausrichtung der magnetischen Momente erzielt. Es gibt Vorschläge, diesen hohen Druck magnetisch durch ein gepulstes, hohes Feld zu erzeugen. Ein anderer praktisch orientierter Vorschlag sieht das Tiefziehen von Blechen in gepulsten Magnetfeldern vor. Im Falle erfolgreicher derartiger Experimente scheinen hier interessante technologische Anwendungen hoher Felder zu liegen.

Es wird auch erwartet, dass Magnetisierungsmessungen in hohen Feldern wesentlich zum Verständnis der magnetischen Wechselwirkungen und der elektroni-

schen Eigenschaften nicht nur klassischer, sondern auch neuartiger Materialien, wie z. B. der rein organischen, schwach ferromagnetischen Substanz TDAE–C_{60} oder niederdimensionaler Kupferoxide, beitragen werden. Die **Dresdner Institute** beabsichtigen, die magnetischen Eigenschaften (Spin–Gaps, metamagnetische Übergänge) sowie Transporteigenschaften in diesen Systemen in hohen Feldern zu untersuchen. Von großem Interesse ist außerdem die Untersuchung von Spin–Peierls–Systemen wie $CuGeO_3$ und, möglicherweise, α'–NaV_2O_5, in denen eine Dimerisierung mit Entstehung eines Spingaps beobachtet wurde. Auch hierzu sollen von **Dresdner Gruppen** Untersuchungen in hohen Feldern durchgeführt werden.

Ein weiteres interessantes Gebiet sind eindimensionale Elektronensysteme in Nitrido–Verbindungen. Verbindungen dieses Typs, z. B. $(Ca_7N_4)M_x$ (M = Tl, In mit $x = 1$; M = Ag, Ga mit $1 \leq x \leq 1,33$) enthalten starre, dreidimensional verknüpfte Kationenteilstrukturen $(Ca_7N_4)^{2+}$, die von parallel zueinander verlaufenden, eindimensionalen, unendlichen Kanälen durchzogen sind. Die Kanäle sind mit ebenfalls eindimensional–unendlichen $(M_x)^{2-}$–Ketten gefüllt. Die Kristallstrukturen und erste Rechnungen lassen erwarten, dass Übergänge zwischen eindimensionalen Metallen und lokalisierten Elektronen untersucht werden können. Kollegen der neuen **Dresdner Max–Planck–Institute** planen entsprechende Untersuchungen an diesen Systemen, um neue, bisher unbekannte, elektronische Zustände erforschen zu können.

Magnetoelektrische Transportphänomene (Magnetowiderstand, Hall–Effekt usw.), die an bestimmte feldinduzierte Phänomene (z. B. metamagnetische Übergänge sowohl in Bulkmaterialien als auch in dünnen Schichten) oder an bestimmte Mikrostrukturen (z. B. zwei– oder dreidimensionale Nanostrukturen) geknüpft sind, wie GMR (giant magnetoresistance), CMR (colossal magnetoresistance) oder spinabhängiges Tunneln (TMR – tunneling magnetoresistance), können auf einer breiteren als bisher zur Verfügung stehenden Feldskala untersucht werden. Hierzu haben **Dresdner theoretische Physiker** eine Reihe von Vorhersagen getroffen, und weitere Untersuchungen der **Dresdner Institute** sind vorgesehen.

Eine interessante Substanzklasse für Hochfelduntersuchungen sind dotierte perovskitartige Oxide, z. B. $La_{1-x}Sr_xMnO_3$, in denen oberhalb der Curie–Temperatur T_c ein Phasenübergang von einem ferromagnetischen Metall zu einem Isolator auftritt. An diesen metallischen Oxiden wurden u. a. die beiden oben genannten Transportphänomene CMR und TMR beobachtet. Untersuchungen in höheren als den bisher eingesetzten Magnetfeldern sind notwendig, um das Verhalten dieser Substanzen, z. B. die Verschiebung von T_c durch ein hohes Feld, besser zu verstehen.

Es gibt Metalle mit magnetischen Momenten, die sich oberhalb einer charakteristischen Temperatur T^* (typisch 10 bis 100 K) wie ein übliches Metall mit lokalisierten Spinmomenten verhalten. Unterhalb T^* wird ihre Suszeptibilität allmählich temperaturunabhängig („Pauli–artig"), und ihre Leitungselektronen erhalten sehr große effektive Massen, die lokalisierten Spinmomente sind dann abgeschirmt. Einige dieser „Schwere–Fermionen"–Metalle werden bei

noch tieferen Temperaturen supraleitend. Da die typische Energie der den neuen Zustand hervorrufenden effektiven Hybridisierung von f–Elektronen mit s– oder d–Elektronen („Kondo–Effekt“) etwa $k_B T^*$ ist und 1 K etwa 1 T entspricht, können Magnetfelder im Bereich 10 bis 100 T diesen bei 10 bis 100 K auftretenden neuen Zustand unterdrücken; dies äußert sich z. B. in einer dramatischen Abnahme der effektiven Elektronenmasse mit zunehmendem Magnetfeld. Diese Aufhebung des Kondo–Effekts ermöglicht es, Aussagen über den Ursprung der hohen Elektronenmassen zu treffen. Kondo–Effekt und Schwere–Fermionen–Metalle gehören zu den aktuellsten Forschungsgebieten der Festkörperphysik, zu denen **von Dresdner Physikern wesentliche Beiträge** geleistet worden sind. Zur Verbesserung des noch unbefriedigenden Verständnisses dieser Phänomene sind Untersuchungen bei sehr hohen Magnetfeldern, z. B. de Haas–van Alphen–Experimente dringend notwendig. Ebenso unverstanden ist die erstmalig bei 50 T für $Ce_3Bi_4Pt_3$ beobachtete Überführung eines „Kondo–Isolators“ in ein Metall. Bei „Kondo–Isolatoren“ wird die Zahl der Ladungsträger unterhalb T^* stark reduziert. Dies kann bei einfach kubischen Kristallstrukturen mit der Hybridisierung eines Bandes itineranter Elektronen mit einem flachen Band lokalisierter f–Elektronen erklärt werden, die zu einer Energielücke führt, in der bei tiefen Temperaturen die Fermi–Energie liegt. Durch ein äußeres Magnetfeld werden diese Bänder aufgespalten, dies führt zu einem metallischen Zustand, wenn die Aufspaltung der Bänder größer als die Energielücke wird. An den **Dresdner Instituten** sind Untersuchungen an den Systemen $Ce_3Bi_4Pt_3$, YbB_{12}, FeSi, $Ce_3Sb_4Au_3$ und $Ce_3Sb_4Pt_3$ geplant. Durch Messungen der Leitfähigkeit, der Magnetisierung und der Suszeptibilität soll die Natur der Bandlücke geklärt werden. Außerdem soll untersucht werden, ob das Verschwinden der Energielücke kontinuierlich oder sprunghaft vor sich geht. Für YbB_{12} werden dabei 55 T benötigt; Systeme mit größerer Energielücke erfordern entsprechend höhere Felder.

Metamagnetische Phasenübergänge in Schwere–Fermionen–Verbindungen treten oft bei hohen Feldern auf. Dazu sind von den **Dresdner Instituten** Untersuchungen an UPt_3, URu_2Si_2, $YbCu_2Si_2$, $CeNi_2Ge_2$, YCo_2 sowie $LuCo_2$ geplant. Es soll geklärt werden, welche mikroskopischen Änderungen im elektronischen System beim metamagnetischen Übergang stattfinden und wie sich die Fermiflächen und effektiven Massen der Quasiteilchen verändern. Ebenso soll geklärt werden, ob prinzipielle Unterschiede zwischen Yb–, Ce–, U– und 3d–Systemen auf Grund der unterschiedlichen Lokalisierung der Wellenfunktionen bestehen. Hierbei sind sehr hohe Felder notwendig, um hohe effektive Massen auch oberhalb des metamagnetischen Übergangs ausmessen zu können.

Des Weiteren besteht in **Dresden** Interesse an der Untersuchung der 4f– bzw. 5f–Verbindungen CeB_6, TmTe, $Ce_3Pd_{20}Ge_6$ und URu_2Si_2. Diese Substanzen zeigen bei tiefen Temperaturen einen geordneten Quadrupolzustand. Durch Messungen der Hochfeld–Suszeptibilität, der Magnetostriktion und des Magnetowiderstands soll geklärt werden, wie die Ordnung der Quadrupol– und der höheren Multipolmomente nachgewiesen werden kann, warum vielfach die Ordnungstemperatur mit steigendem Feld wächst und bei welchen Feldern die kritischen Feldkurven wieder ein normales Verhalten zeigen.

Ungewöhnliche magnetische Eigenschaften werden ebenfalls bei bestimmten organischen Materialien beobachtet. So werden in der Familie der Ladungstransfersalze α–(BEDT–TTF)$_2$MHg(XCN)$_4$, abhängig von der Wahl von M (= K, Rb, Tl) und X (= S, Se), die Grundzustände „einfach metallisch", „supraleitend" oder „metallisch und magnetisch" beobachtet. Bisherige Untersuchungen bis B $\leq$ 30 T am System mit M = K und X = S haben sehr komplexe und z. T. widersprüchliche B–T–Phasendiagramme ergeben. Hierzu wollen die Dresdner Institute durch Magnetisierungs–, Magnetostriktions– und de Haas–van Alphen–Effekt–Messungen an oben genannten Systemen Aussagen über die Natur des in diesen Verbindungen auftretenden Magnetismus erhalten.

Die Energie eines Teilchens mit einem typischen magnetischen Moment von 2 μ_B wird in einem Magnetfeld von 100 T in Zeeman–Zustände aufgespalten, deren Abstand einer elektromagnetischen Energie mit einer Wellenlänge von 100 μm entspricht, also im Fern–Infrarot–Bereich des **in Rossendorf im Aufbau befindlichen Freie–Elektronen–Lasers** liegt. Es ergibt sich damit aus der Kombination dieses Lasers mit dem Hochfeldlabor die **weltweit einmalige Möglichkeit**, diese Zeeman–Zustände mit einem durchstimmbaren Infrarotstrahl höchster Qualität auszumessen. Hieraus wird sich ohne Zweifel eine Vielzahl neuer Informationen zum Magnetismus ergeben, z. B. neue Möglichkeiten, g–Faktoren zu messen und sonst schwer unterscheidbare elektronische $5f^2$– und $5f^3$–Zustände zu bestimmen.

II.3 Supraleitung

Das aktuellste und gleichzeitig am wenigsten verstandene Teilgebiet der Supraleitung ist die Hoch–T_c–Supraleitung. Die hohen kritischen Temperaturen der supraleitenden Phasenübergänge von Hoch–T_c–Supraleitern (bis ca. 140 K) führen zu entsprechend hohen kritischen Magnetfeldern (bis über 100 T). Diese hohen Werte machen diese Substanzen für viele praktische Anwendungen hochinteressant. In Dresden betreibt z. Z. das am Vorschlag beteiligte **Institut für Festkörper– und Werkstofforschung** auf dem Gebiet der Hoch–T_c–Supraleiter grundlegende Forschung zur Elektronenstruktur, zu Phasendiagrammen, zur Stromtragfähigkeit und zu magnetischen Eigenschaften. Bei der angewandten Forschung auf diesem Gebiet wird an der Optimierung von supraleitenden Bändern und Schichten sowie von supraleitenden Permanentmagneten für den Einsatz in der Technik gearbeitet. Grundlegende Fragen des mikroskopischen Mechanismus der Hoch–T_c–Supraleitung sind jedoch weiterhin ungeklärt und können nur durch Untersuchungen dieser Substanzklasse im normalleitenden Zustand geklärt werden. Hierzu ist eine Unterdrückung des supraleitenden Zustands durch Magnetfelder notwendig, die größer als die kritischen Felder sind. So wurde z. B. in $La_{2-x}Sr_xCuO_4$ die Supraleitung durch ein Feld von 70 T unterdrückt. Die normale Leitfähigkeit zeigt dann bei tiefen Temperaturen eine logarithmische Singularität und einen quantenkritischen Punkt bei x=0,15. Diese Ergebnisse eines anomalen normalleitenden Zustands

bedürfen dringend einer Bestätigung bei verwandten Systemen. Hierzu sind von den **Dresdner Instituten** Untersuchungen an zahlreichen Verbindungen* aus der Klasse der niederdimensionalen Kuprate geplant. Außerdem muss die Temperaturabhängigkeit weiterer Transporteigenschaften wie Hall–Effekt, Thermospannung oder Magnetowiderstand an diesen Systemen bei sehr hohen Magnetfeldern untersucht werden. Besonders relevant für die Anwendung ist die Bestimmung des oberen kritischen Magnetfeldes B_{c2} in diesen Systemen. Für die entsprechenden, von den **Dresdner Instituten** geplanten Experimenten sind ebenfalls sehr hohe Magnetfelder notwendig.

Zu einem weiteren Verständnis der Hoch–T_c–Supraleiter ist eine Messung der Temperaturabhängigkeit des kritischen Magnetfelds zur Unterdrückung der Supraleitfähigkeit über einen großen Bereich, also auch bis zu sehr hohen Magnetfeldern, notwendig. So wurde in Abweichung vom theoretischen Verständnis ein extrem starker Anstieg ohne Anzeichen einer Sättigung für das kritische Magnetfeld für $Bi_2Sr_2Cu0_{6-\delta}$ bis zu Werten von 28 T gefunden. Dagegen zeigt z. B. $Nd_{2-x}Ce_xCu0_4$ mit etwa der gleichen kritischen Temperatur, $T_c = 20$ K, nur einen schwachen Anstieg des kritischen Feldes auf einen Wert von 6 T bei Temperaturabsenkung. Die wichtigsten, insbesondere für den technologischen Einsatz bedeutensten Hoch–T_c–Supraleiter mit weit höherem T_c haben entsprechend höhere kritische Magnetfelder, die z. T. deutlich über die heute zugänglichen Felder hinausgehen.

Die Untersuchung der Oszillationen der Magnetisierung („de Haas–van Alphen–Effekt“) in Magnetfeldern, die größer als das kritische Feld sind, würden weitere wesentliche Informationen über die elektronische Struktur der Hoch–T_c–Supraleiter geben. 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, sind für Anwendungen von Interesse. Hieran wird ebenfalls in **Dresden** gearbeitet. Die genannten Materialuntersuchungen sind Voraussetzung für die nächste Generation supraleitender Spulen für die Erzeugung von statischen Magnetfeldern oberhalb 20 T.

Von hohem grundlegendem Interesse für die Untersuchung in sehr hohen Magnetfeldern ist die Suche nach dem von der Theorie vorhergesagten, aber bisher nicht beobachteten Zustand einer feldinduzierten (Triplett–)Supraleitung oder die bisher erst an einer Substanz gefundene feldinduzierte Supraleitung durch Kompensation innerer Felder durch ein hohes angelegtes äußeres Feld („Jaccarino–Peter Effekt“).

*z. B. $YBa_2Cu_3O_7$, $YBa_2Cu_4O_8$, $Bi_2Ca_{n-1}Sr_2Cu_nO_{2n+2}$, $Tl_2Ca_{n-1}Ba_2Cu_nO_{2n+2}$, $HgBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2}$ und $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$

II.4 Atom– und Molekülphysik

Die Attraktivität hoher Magnetfelder für die Atomphysik liegt darin begründet, dass mit einem sehr hohen Feld Zustände erreicht werden können, in denen die Änderung der Energieniveaus durch das Magnetfeld vergleichbar oder sogar größer als Wechselwirkungen im Atom selbst ist. Solche Zustände können auch bei Schwerionenkollisionen entstehen, wo quantenelektrodynamische Effekte erzeugt werden, oder in intensiver Laserstrahlung auftreten, in der das elektromagnetische Feld größer als die atomaren Felder werden kann.

Ein wichtiger Bereich der Atomphysik ist die Untersuchung des Wasserstoffatoms in starken Feldern. Hier wurden Übergänge zu chaotischem Verhalten des Systems bei Quantenzahlen im semiklassischen Bereich gefunden. Höhere Magnetfelder würden Experimente bei niedrigeren Quantenzahlen erlauben, wodurch die Beobachtung von Quantenchaos möglich wäre. Ein weiterer Vorteil ist die Erhöhung der spektroskopischen Auflösung.

In der Molekülphysik ergeben sich interessante Perspektiven, wenn durch das Magnetfeld die Zyklotronfrequenz so hoch wird, dass Übergänge zu Rotations– oder Vibrationszuständen möglich werden.

II.5 Komplexe Flüssigkeiten, Chemie und Biologie

Komplexe Flüssigkeiten reagieren in vielfältiger Weise auf ein von aussen angelegtes Magnetfeld. Es richtet Moleküle, suspensierte makromolekulare Komplexe oder Flüssigkristalle aus, wenn sie eine anisotrope Anordnung der chemischen Bindungen oder eine anisotrope Form besitzen. Diese Ausrichtung, die als Cotton–Mouton–Effekt bezeichnet wird, kann durch optische Doppelbrechung gemessen werden. Da die Auflösung dieser Messmethode sich mit dem Quadrat des Feldes erhöht, können in sehr hohen Feldern kleinere Konzentrationen von suspensierten Teilchen oder kleinere Probenvolumina untersucht werden. So ist es dann z. B. möglich, schwierig zu präparierende biologische Objekte oder dünne Schichten zu untersuchen.

Sind an einer chemischen Reaktion Partner beteiligt, die ein magnetisches Moment tragen, tritt zu der die Reaktion bestimmenden freien Energie bei Einschalten eines Magnetfeldes ein zusätzlicher magnetischer Beitrag, der das chemische Gleichgewicht verschieben kann. Bei üblichen Magnetfeldern ist dieser Effekt sehr klein. Die Gleichgewichtskonstante bei Reaktionen zwischen einer diamagnetischen Substanz und einer paramagnetischen Substanz mit einem Moment von 1 μ_B wird durch ein Magnetfeld von 10 T bei Raumtemperatur nur um höchstens 10^{-3} verschoben. Wegen der quadratischen Feldabhängigkeit der Reaktionskonstanten würde aber in einem Feld von 100 T diese Verschiebung des chemischen Gleichgewichts Werte von einigen Prozent erreichen. Damit wäre ein neues Gebiet für die „magnetische“ Chemie eröffnet. Die meisten Spin–Chemie–Experimente verlangen die Einstrahlung elektromagnetischer Energie, um Reaktionen zu induzieren oder zu untersuchen. Hier würde wiederum die

Kombination des Hochfeldlabors mit dem **Rossendorfer Freie–Elektronen–Laser** weltweit einmalige, **neuartige Experimente** erlauben, denn viele elektronische Spin–Übergänge entsprechen dem Wellenlängengebiet dieses Infrarot–Lasers.

Untersuchungen zu Einflüssen starker magnetischer Felder auf biologische Objekte wurden bereits in den 60er Jahren mit zunächst phänomenologischen Beobachtungen begonnen. Bis jetzt kann die fundamentale Frage, ob magnetische Felder für biologische Objekte und Vorgänge nützlich sein können oder gegebenenfalls den Organismus zerstörende Effekte auftreten können, nicht beantwortet werden. Eine große Anzahl dazu veröffentlichter Literatur beweist das große Interesse an diesem wichtigen Forschungsgebiet. Die Notwendigkeit des Einsatzes hoher Magnetfelder leitet sich zum einen von der schwachen Feldabhängigkeit der Effekte und zum anderen von der Möglichkeit ab, zwischen verschiedenen Mechanismen mit unterschiedlichen Abhängigkeiten von Feldstärke, Polarität, Richtung usw. unterscheiden zu können. Von großer Bedeutung ist ebenfalls, von Magnetfeldern im menschlichen Körper hervorgerufene Effekte untersuchen und beurteilen zu können, damit Sicherheitsrichtlinien bei der Anwendung diagnostischer Verfahren entwickelt werden können.

Zumeist ist biologische Substanz diamagnetisch. Der Haupteffekt magnetischer Felder auf biologische Materie ist daher die magnetische Orientierung als Folge diamagnetischer Anisotropie von Bindungen, Molekülen, molekularen Strukturen u. a. Da die Orientierung mit dem Quadrat der magnetischen Feldstärke steigt, ist zu vermuten, dass z. B. für Viren und Chromosomen die völlige Ausrichtung erst bei sehr großen Feldstärken um 100 T erfolgt. Interessante Einblicke in den Mechanismus von Zellorganisation und Zellteilung wären möglich.

Eine japanische Gruppe hat den Einfluss magnetischer Felder auf das Wachstum des Bakteriums Escherichia coli untersucht. Mit Hilfe ausgefeilter Messtechnik wurden variierende biologische Reaktionen sowohl im homogenen als auch im inhomogenen Feld bis etwa 12 T verfolgt. Das Zellwachstum erhöhte sich um 70 % im Vergleich zum Erdmagnetfeld, ohne Schäden oder Mutationen hervorzurufen. Diese erstmalige Beobachtung verlangt weitere Untersuchungen in höheren Magnetfeldern.

Ebenfalls in Japan wurden Effekte starker magnetischer Felder auf Blutplättchen untersucht. Sichelzellen, die als Folge abnormaler Hämoglobinstruktur entstehen, aber auch gesunde Blutzellen, stellen sich, durch die Anisotropie der Membran bedingt, mit ihrer Hauptachse senkrecht zum Magnetfeld. Damit kann es zur Änderung der Blutzirkulation kommen und diese bei hohen Magnetfeldern u. U. negativ beeinflusst werden.

Bei Feldstärken von 100 T sollte es möglich sein, Zellen oder sogar Membranen magnetisch zu deformieren. Erste Untersuchungen haben sich mit Magnetfeldeffekten auf Phospholipidmembranen, die als einfachstes mögliches Modellsystem für reale biologische Systeme angesehen werden können, beschäftigt. Dabei wurden von einem Magnetfeld induzierte Phasenumwandlungen gefunden. Der Phasenzustand der Membranen hat eine große Bedeutung in biologi-

schen Systemen. Bei den bisher verwendeten geringen Feldstärken ergaben sich nur geringe Änderungen dieser Größen, so dass ganz offensichtlich hohe Felder in der Membranforschung notwendig sind.

Eine besondere Bedeutung kommt Untersuchungen zum Einfluss von Magnetfeldern auf den Separationsmechanismus von Erythrozyten zu. Forschungen in dieser Richtung können wichtige Fortschritte in der Malariaforschung bewirken. In gesundem menschlichen Blut befindet sich Oxyhämoglobin im diamagnetischen und das Deoxyhämoglobin im paramagnetischen Zustand. Der Malariaparasit verdaut Hämoglobin zu oxidierten Produkten, die jedoch paramagnetisch sind und damit den magnetischen Zustand des Blutes ändern. Magnetfelder mit sehr hohen Feldgradienten erlauben eine Separation der malariainfizierten Erythrozyten. Damit können Formveränderungen, Mobilitäts– und Membranveränderungen der Erythrozyten untersucht werden.

Wesentliche Impulse zur biologischen, mikrobiologischen und biochemischen Forschung werden hierbei vom **verstärkten Dresdner Engagement im Bereich Biotechnologie**, wie z. B. der gemeinsamen Initiative „Molecular Bioengineering“ verschiedener Dresdner Institute, vorallem der TU Dresden, sowie vom in Dresden neugegründeten Max–Planck–Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik ausgehen.

Untersuchungen in Magnetfeldern zwischen 20 und 100 T, die in der biophysikalischen Forschung erst am Anfang stehen, werden zu wichtigen neuen Einsichten führen. Gepulste Magnetfelder können dabei einen wichtigen Beitrag leisten.

II.6 Anwendungen und Wirtschaftsrelevanz

Ohne Zweifel haben viele der wissenschaftlich–technischen Ergebnisse eines führenden Hochfeldlabors direktes Anwendungspotential. Neben der bereits in den vorangehenden Abschnitten dieses Kapitels diskutierten Bedeutung der Hochfeld–Untersuchungen im Bereich des Magnetismus, der Hoch–T_c–Supraleitung, Halbleiterphysik und Mikroelektronik sowie der Biologie seien hier ein paar Beispiele mit Anwendungspotential aus dem Bereich der technologischen Entwicklungen des Gebiets Hochfeld–Pulstechnik angeführt:

- Entwicklung von Legierungen sehr hoher Festigkeit bei guter Leitfähigkeit (z. B. Stromzuführungen für Hochgeschwindigkeitszüge)
- Entwicklung von hochfesten Isolationsmaterialien für Hochspannungstechnik
- Entwicklungen für die Starkstromtechnik (z. B. Hochstromschalter)
- Einsatz von Hoch–T_c–Supraleitern
- Pulsfeldtechnologie für die Fusion
- Kurzzeit–Experimentiertechnik; Datenübertragung (Glasfaser, Fiberoptik) bei entsprechenden Bedingungen
- Verformung von Metallen
- Aufmagnetisierung von technisch einsetzbaren, supraleitenden, superstarken Permanentmagneten

Auf Grund der absehbar hohen technologischen Relevanz wird bereits im Vorfeld des Projektes möglicher Technologietransfer erörtert. Die Zusammenarbeit ist dabei nicht nur auf den Bereich der Hochfeldforschung und Materialentwicklung beschränkt, sondern er umfasst auch die direkte Nutzung der entstehenden Infrastruktur (insbesondere z. B. der 50 MJ–Energieversorgung). Besonders angesprochen wurden kleine und mittelständische Hochtechnologieunternehmen aus der Region Dresden und Sachsens, aber auch bundesweit und international arbeitende Betriebe, die Interesse an der Nutzung der Einrichtungen für Eigenentwicklungen oder gemeinsame Forschungsprojekte bekundet haben.
Ohne Zweifel wird das Dresdner Hochfeldlabor wesentliche technologische Impulse für Sachsen und die Bundesrepublik Deutschland liefern.

II.7 Beiträge aus Berlin, Prag, Wien und Wroclaw

Wie bereits im Kapitel I.4.2 dargestellt, wird der Dresdner Hochfeld–Projektvorschlag von führenden Einrichtung und Wissenschaftlern unterstützt. Darüber hinaus konnten bereits konkrete Absprachen über eine geplante Assoziation der Partner Berlin, Prag, Wien und Wroclaw getroffen werden, die großes wissenschaftliches Interesse an der Nutzung eines Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden haben.

Wie z. B. Prag, wo kürzlich ein gemeinsames „Labor für Magnetismus und Tieftemperaturphysik“ der Tschechischen Akademie der Wissenschaften und der Karls–Universität Prag gegründet wurde. Der Leiter diese Labors, Herr Prof. Sechovsky, hat sein großes Interesse an der Nutzung und an einer formellen Mitgliedschaft des Prager Instituts am Dresdner Hochfeldlabor mitgeteilt. Herr Professor Sechovsky, ein international führender Wissenschaftler auf dem Gebiet des Magnetismus bei sehr hohen Magnetfeldern, hat schon jetzt die folgenden tschechischen Projekte für das Hochfeldlabor benannt:

- Metamagnetische Phasenübergänge in stark korrelierten elektronischen Systemen
- Verschiedene Aspekte hartmagnetischer Materialien
- Amorphe magnetische Materialien
- Niederdimensionale Halbleiterstrukturen
- Mangan–Perovskite

Darüber hinaus werden die tschechischen Kollegen nichtmetallische Hochdruckzellen entwickeln, die Untersuchungen in gepulsten, sehr hohen Magnetfeldern erlauben sollen. In diesen Zellen können Messungen des Magnetowiderstands, der Suszeptibilität und von magnetoelastischen Effekten durchgeführt werden; sie dienen vor allem der Untersuchung von magnetischen Phasenübergängen, die durch sehr hohe Magnetfelder unter Druck induziert werden.

Kapitel III

Messmethoden, Messgeräte und allgemeine Ausrüstung

III.1 Messmethoden

Die im Folgenden angeführten experimentellen Anordnungen und Verfahren sind so konzipiert, dass sie weitgehend universellen Charakter besitzen und damit in einer Vielzahl von Teilgebieten einsetzbar sind. Die Anpassung an Probenform und –beschaffenheit wird über spezielle (eventuell gekapselte) Probenhalter vorgenommen, so dass es auch möglich ist, besondere chemische Substanzen und biologische Proben zu untersuchen.

Die Ziele der Untersuchungen, besonders in der Festkörperphysik und der Materialforschung, können in folgende Schwerpunktgebiete unterteilt werden:

1. Magnetische und elektrische Eigenschaften und Phasenübergänge, vorzugsweise von Metallen und Halbleitern (Transportphänomene, elementare magnetische Korrelationen und Ordnungszustände, metamagnetische Übergänge, Quantenoszillationen und magnetoelastische Eigenschaften)

2. Aufbrechen des Grundzustands von hochkorrelierten Elektronensystemen (Spin–Peierls–Systeme, Schwere–Fermionen–Systeme, metamagnetische Übergänge, Kondo–Isolatoren, quasi–2D–Ladungstransfersalze)

3. Niederdimensionale Systeme (Quanten–Hall–Effekt, Metall–Halbleiter–Übergänge, Ordnungszustände, Nanostrukturen, magnetooptische Eigenschaften)

4. Supraleitung (kritische Ströme und Felder, Flusslinienbewegung, Elektronenstruktur, Koexistenz von Supraleitung und Magnetismus, Schwere–Fermionen–Systeme)

Im Allgemeinen sollten die Messungen in einem Temperaturbereich von 4,2 K bis Raumtemperatur durchgeführt werden können. In Spezialfällen soll dieser

Bereich zu tiefen Temperaturen bis auf ca. 0,03 K und zu höheren Temperaturen bis etwa 1000 K ausgedehnt werden können. In Kooperation mit der Karls–Universität Prag ist auch die Durchführung von Hochdruckexperimenten geplant.

Eine dem maximal erreichbaren Feld, der Pulsdauer und den Feldänderungen entsprechende Anpassung der Messtechnik ist für die Durchführung der Experimente von gleicher Bedeutung wie die Spulenentwicklung. Bei den nachfolgend dargestellten experimentellen Verfahren wird von folgenden technischen Parametern der Hochfeldanlage ausgegangen (s. auch Tab. IV.1, S. 45):

Magnet A Magnetfeld 100 T, Pulsdauer 10–20 ms, Bohrung 20 mm, (insbesondere für Experimente an Metallen schlechter Leitfähigkeit, an Halbleitern und Isolatoren)

Magnet B Magnetfeld 70 T, Pulsdauer 100–200 ms, Bohrung 24 mm, (insbesondere für Experimente an Metallen mittlerer Leitfähigkeit)

Magnet C Magnetfeld 60 T, Pulsdauer 1 s, Bohrung 50 mm, (insbesondere für Experimente an hochleitenden Metallen und für großen Platzbedarf)

Eine Verringerung der wesentlichen Kennwerte, z. B. des verfügbaren Bohrungsdurchmessers, erscheint nicht sinnvoll, um eine breite Nutzung des Gesamtsystems sowie eine Ergänzung und Erweiterung der verfügbaren Methoden zu ermöglichen und Proben bis zu einer charakteristischen Größe von mindestens 5 mm untersuchen zu können. Die angegebenen Pulsdauern stellen für die Untersuchung metallischer Proben eine untere Grenze dar, da bei kürzeren Zeiten Probleme durch Wirbelstromaufheizung auftreten können. Der Einsatz mikromechanischer Systeme, die derzeit einen Entwicklungsschwerpunkt darstellen, jedoch in Hochfeldsystemen noch nicht etabliert sind, sollte weiter betrachtet werden.

Zur Bearbeitung der vielfältigen wissenschaftlichen Fragestellungen sind folgende grundlegende physikalische Untersuchungsmethoden vorgesehen:

III.1.1 Elektrische Transportmessungen, DC/AC ($f \leq 1$ MHz) (Leitfähigkeit, Magnetowiderstand, Hall–Effekt)

Die Messung des Magnetowiderstands und Magneto–Hall–Effekts an kompakten Proben erfolgt in der Mehrzahl der Fälle mittels der Vierleitermethode (Strom–Spannungs–Messung), wobei für die geplanten Pulsdauern neben konventionellen Datenerfassungssystemen (z. B. Digital–Speicheroszilloskope, s. Kap. III.2) eine schnelle Lock–In–Technik verwendet werden kann [2]. Eine neue Entwicklung, die die Vorteile digitaler Filtersysteme nutzt, besteht in der Erweiterung zu digitalen Lock–In Verfahren [3].

Bei elektrischen Transportmessungen in gepulsten Hochfeldmagneten entstehen — insbesondere für metallische Proben — experimentelle Schwierigkeiten, die in der Wirbelstromaufheizung der Probe während des Feldpulses sowie

der Induzierung von Parasitärspannungen begründet sind. Bei Impedanzmessungen tritt zusätzlich das Problem der inneren Relaxationszeiten der Proben sowie ihrer Anpassung an die Messanordnung auf. Möglichkeiten der Minimierung der genannten Störungen sind die Verwendung sehr dünner, gut fixierter Zuleitungen und die Verringerung der effektiven Probenfläche. Wenn diese Maßnahmen allein noch nicht ausreichen, müssen die erhaltenen Messsignale korrigiert werden: Eine erste experimentelle Lösung besteht in der Aufnahme der Induktionsspannung während des Feldimpulses mit Hilfe einer separaten Pick–up–Spule und der anschließenden Korrektur des Spannungssignals der Probe. Eine zweite Möglichkeit ist die Wiederholung der Messung mit vertauschten Stromzuführungen und Differenzbildung der Messsignale [4]. Voraussetzung für die genannten Methoden ist eine Änderung des Feldpulses mit $dB/dt \leq 10^4$ T/s.

Für Transportuntersuchungen bei Magnetfeldänderungen 10^4 T/s $\leq dB/dT \leq 10^9$ T/s sind die Proben als parallele Dünnschichtstreifen herzustellen, und es ist eine kontaktlose kapazitive Kopplung der elektrischen Zuleitungen (photolithographisch hergestellt) zu realisieren. Der Einsatz von Hochfrequenzmesstechnik bis in den GHz–Bereich muss dann in Betracht gezogen werden [5, 6].

III.1.2 Magnetisierung, dynamische Suszeptibilität, de Haas–van Alphen–Effekt

Zur Messung magnetischer Eigenschaften in hohen gepulsten Magnetfeldern werden in der Mehrzahl induktive Verfahren eingesetzt [7, 8, 9, 10, 11]. Diese Methoden beruhen im Allgemeinen auf der Messung der Spannung, die in einer Aufnehmerspule induziert wird. In dieser Aufnehmerspule ist die Probe fixiert. Um die Beiträge zum Signal durch die leeren Spulen auszuschließen, werden zwei gegengekoppelte Aufnehmerspulen eingesetzt. Das Messsignal ist damit durch die magnetische Substanz im Inneren der Spule gegeben und theoretisch weitgehend unabhängig von externen Induktionsspannungen infolge des Magnetpulses. Um eine hohe Empfindlichkeit des Systems zu erreichen, muss das System sehr gut kompensiert sein und eine wohldefinierte Wicklungsdichte und Wicklungsverteilung besitzen.
Die in hohen gepulsten Magnetfeldern angewandten induktiven Messverfahren unterliegen jedoch nach wie vor den in Punkt III.1.1 genannten Störungen.

Generell kommt der Entwicklung rauscharmer, multipolkompensierter Messsysteme eine hohe Bedeutung zu. Die hier erreichbare Technologie entscheidet über die Empfindlichkeit des Systems. Leider nehmen die Messprobleme (Rauschen, Induktionsspannung) mit dem externen Magnetfeld zu. Die Geometrie der Sensoren ist deshalb speziell zu optimieren. Eine gute technische Lösung stellen zwei ineinandergeschachtelte, kompensierte Aufnehmerspulen dar [12]. Diese Anordnung besitzt den speziellen Vorteil, dass Inhomogenitäten des Magnetfeldes keine Rolle spielen und Momente höherer Ordnung kompensiert werden. Allerdings schränkt diese Koaxialanordnung den verfügbaren Probenraum stark ein.

Eine weitere Variante, Magnetisierungen zu messen, bieten optische Verfahren, die auf dem Faraday–Effekt (Drehung der Polarisationsebene von eingestrahltem Licht im Magnetfeld) [9, 13] bzw. dem magnetooptischen Kerr–Effekt beruhen. Ihr Anwendungsgebiet stellen im wesentlichen dünne Schichten, intermetallische magnetische Multilagen und halbleitende Substanzen dar. In Verbindung mit der für optische Messungen vorgesehenen messtechnischen Ausrüstung (siehe Kap. III.1.5) ist der Aufbau von entsprechenden Versuchsplätzen geplant. Optischen Messverfahren unterliegen weit weniger dem Einfluss externer störender Einflüsse in gepulsten Magnetfeldern. Bisherige Anwendungen setzen meist eine Lichtdurchlässigkeit der Proben voraus und sind damit auf durchstrahlbare Substrate eingeschränkt, jedoch kann in speziellen Fällen durch reflektierende Messungen (Rückstreugeometrie) das Einsatzgebiet der Verfahren deutlich erweitert werden. Bei sehr hohen Feldern und sehr kurzen Pulszeiten sind die optischen magnetischen Messverfahren gegenüber der induktiven Magnetisierungsmessung als überlegen zu betrachten.

Eine neue Methode, die in statischen Feldern erfolgreich verwirklicht wurde, stellt die Ermittlung der Magnetisierung mittels Kraftmessung dar (Cantilever–Verfahren). Die im Allgemeinen dünne Probe ist an einem verformbaren Stab angebracht und dient gleichzeitig als Kondensatorplatte. Die Verformung des Stabes infolge der Wirkung des Magnetfeldes kann kapazitiv gegen eine feststehende Kondensatorplatte gemessen werden. Dieses neue, in gepulsten Hochfeldmagneten noch nicht angewendete Verfahren könnte im Rahmen des Projekts gemeinsam mit anderen Einrichtungen [12] entwickelt werden. Die erforderliche Messtechnik kann z. T. von anderen Methoden (siehe Kap. III.1.3) übernommen werden.

III.1.3 Magnetostriktion und magnetoelastische Eigenschaften (Ultraschall)

Magnetostriktive Messungen in gepulsten Hochfeldmagneten stellen derzeit noch keine etablierte Methode dar, sind aber als Zugang zur Bestimmung von Gitterparametern im Zusammenhang mit magnetischen Eigenschaften von eminenter Bedeutung. Erfolgreich geplante und durchgeführte Experimente [14], deren Aufbau übernommen und in Feldern bis 100 T erprobt werden soll, beruhen auf einem kapazitiven Messverfahren und ermöglichen sowohl Messungen in transversaler als auch longitudinaler Richtung der im Allgemeinen kompakten Probensubstanzen. Der Messkondensator enthält Glas– oder Saphirplatten, die mit Titan beschichtet sind. Das Hauptproblem stellt neben der induktionsarmen Führung der Messdrähte die mechanische Fixierung des Kondensatorblocks dar. Eine alternative Messmethode auf der Grundlage eines miniaturisierten piezoelektrischen Quartz–Aufnehmers wird von Levitin et al. vorgeschlagen [15], ist jedoch in der Empfindlichkeit auf ca. 10^{-6} begrenzt. Eine weitere Messmöglichkeit besteht in der Verwendung von Dehnungsmessstreifen, die für Magnetostriktionsmessungen in gepulsten Magnetfeldern bereits verwendet wurden.

Zur Untersuchung magnetoelastischer Eigenschaften und speziell deren Änderungen bei Phasenübergängen können Ultraschall–Messungen eingesetzt werden. Die früher nur in statischen Magnetfeldern angewendeten Methoden sind für gepulste Hochfeldmagnete weiterentwickelt worden [16]. Dabei wird das Puls–Echo–Verfahren, das die simultane Bestimmung der Änderungen von Ultraschallgeschwindigkeit und Dämpfung ermöglicht, abgewandelt: Die ursprüngliche Frequenzabstimmung ist auf Grund der Trägheit des Regelkreises innerhalb einer Pulsdauer nicht mehr praktikabel. Deshalb wird eine Festfrequenz gewählt und aus den Messdaten die Frequenzverschiebung numerisch ermittelt. Die Messfrequenzen liegen im Bereich 50 bis 500 MHz. Da die Probengröße nicht beliebig minimiert werden kann, stellen Aufheizeffekte gegebenenfalls ein Problem dar.

III.1.4 mm–Wellen–Spektroskopie, ESR

Die magnetische Spektroskopie im mm–Wellenbereich erlaubt die Untersuchung der Leitfähigkeit und dynamischen Suszeptibilität bei Frequenzen zwischen 1 GHz und 1 THz. Dies ist der Grenzbereich zwischen statischen und optischen Messungen; die Photonenergien liegen im Bereich zwischen 4 μeV und 4 meV. In diesem Energiebereich liegen eine Reihe von Anregungs– und Ordnungsenergien (Supraleitung, Spindichtwellen etc.).

Mit dem vorgesehenen Aufbau kann man Zyklotronresonanz und ESR an Halbleitern, Schwere–Fermionen–Systemen, Hoch–T_c–Supraleitern u. a. messen, die den Zugang zur elektronischen Struktur ermöglichen. Mit Hilfe von Resonatoren können auch metallische Systeme, bei denen der Skineffekt eine starke Rolle spielt, untersucht werden. Diese Methoden bieten den Vorteil, dass man die Proben nicht elektrisch kontaktieren muss (vgl. Kap. III.1). Die Gerätetechnik stellt eine Neuentwicklung dar, die die gleichzeitige Bestimmung von Amplitude und Phase und damit die komplette Charakterisierung des Systems erlaubt.

III.1.5 Optische Eigenschaften im FIR–VIS–UV, Magneto–Optik (Absorption, Reflektometrie, Photo–Luminiszenz)

Optische Messungen erlauben Untersuchungen eines breiten Energiebereichs von 1 meV bis 10 eV und liefern damit Aussagen über Anregungen und elektronische Struktur. Die Einkopplung des Lichts erfolgt bei gepulsten Magneten nach der Monochromatisierung über entsprechende Fenster und Lichtleiter. Bei den Experimenten im Infrarot bis fernen Infrarot kann der Detektor im allgemeinen direkt im Probenhalter, der sich bei tiefer Temperatur befindet, integriert werden. Dagegen ist bei kommerziellen Messgeräten, die im sichtbaren bis ultravioletten Bereich eingesetzt werden sollen, der Detektor außerhalb des Kryostaten angebracht. Dies erfordert eine Miniaturisierung der Lichtleiter– und Spiegelsysteme [19]. Bei optischen Experimenten werden die Messungen nicht durch Induktions-

effekte infolge schneller Feldänderung beeinflusst. Sie erlauben in Kombination mit einem Hochfeldlabor eine Vielzahl neuartiger Experimente.

III.2 Messgeräte

Für die Messung kleiner Signale mit entsprechender Genauigkeit und Auflösung müssen die Messgeräte und elektronischen Hilfseinrichtungen oftmals in ausreichendem Abstand und in magnetisch geschirmten Gerätetürmen („Faraday–Racks“) untergebracht und betrieben werden. Diese mobilen Einrichtungen sind für jeweils eines der geplanten Experimente vorzusehen und können innerhalb einer Stunde gewechselt und an den Magnetkryostaten gefahren und angekoppelt werden. Sie sollen folgende Grundkonfiguration enthalten: Spannungsversorgung (5 ... 240 V, galvanisch vom Netz getrennt), Vorverstärker, schnelle Datenerfassungssysteme, Computer, Schnittstellen. Der Sicherheitsaspekt erfordert Erstens eine vollständige galvanische Trennung des im Kryostaten befindlichen Messeinsatzes von den nachfolgenden technischen Geräten. Dies ist mittels optischer Datenübertragungssysteme zu realisieren. Größtmögliche Sicherheit bietet die Variante, dass die Messsignale zwischen dem Analogteil (Vorverstärker/Filter/Integratoren), der sich unmittelbar am Messeinsatz befinden sollte, und den nachfolgenden digitalen Systemen zur Datenerfassung und -verarbeitung optisch übertragen werden. Gegenwärtig verfügbare optische Systeme besitzen eine ausreichende Bandbreite von ca. 100 MHz. Alternativ bzw. auch zusätzlich empfiehlt sich ein optisches Interface zwischen Messgerätetürmen und den Bediencomputern. Um eine Gefährdung des Bedienpersonals während des Magnetpulses auszuschließen, ist Zweitens eine räumliche Trennung von Steuerzentrale und Pulsanlage vorzusehen, d. h. die Computerarbeitsplätze sind in einem separaten Raum aufzustellen. Drittens wird vorgeschlagen, die Service- und Steuerprozeduren für die Magnete mit einem nur diesem Zweck dienenden Computer („Master-PC“), auf den nur wenige unterwiesene Personen Zugriff haben, durchzuführen. Der allen Nutzern zugängliche Computer zur Steuerung der Messprozesse und zur Datenverarbeitung sollte eigenständig sein.

Spezielle Beachtung ist auf die Abschirmung der Datenübertragungsleitungen zwischen der im Magnetkryostaten angeordneten Probe und der Messgerätekonfiguration zu legen, da dabei wesentliche Störungen während des Magnetpulses auftreten können. Entsprechende Erfahrungen mit elektrischen Übertragungssystemen bei sehr hohen gepulsten Magnetfeldern liegen vor [3, 4]. Wesentliche Arbeiten sollten aber auf die Entwicklung optischer Datenübertragungssysteme ausgerichtet werden. Damit ist eine vollständige galvanische Entkopplung der Messtechnik vom Hochfeldmagneten möglich.

Ausgehend von einer Magnetpulsdauer von 10–20 ms muss eine schnelle Messtechnik eingesetzt werden. Abtastraten von mehreren 100 MS/s* sind standardmäßig verfügbar (Firmen: LeCroy, Tectronix, Gould-Nicolet, Fast Comtec), jedoch besitzt die Mehrzahl der angebotenen Transientenrecorder bzw. Digital–Speicheroszilloskope mit hohen Abtastraten nur eine Auflösung von 8 bit. Für die Datenerfassungssysteme sind folgende Konfigurationen möglich:

- Digital-Speicheroszilloskope mit „enhanced resolution mode“: Moderne Speicheroszilloskope mit einer realen Auflösung von 8 bit bei hoher Abtastrate bieten die Möglichkeit, die Auflösung durch nachfolgende mathematische Operationen auf ca. „pseudo–12–bit“ zu erhöhen. Für viele der vorgeschlagenen Messverfahren ist dieses Vorgehen ausreichend.

- Datenerfassung mit Einsteckkarten für PC: Die Erfassung der Messdaten kann auch direkt im Messcomputer erfolgen. Dazu sind kommerziell angebotene Einsteckkarten in den PC zu integrieren. Diese Variante ist modular und kann durch Wechsel der Einsteckkarten schnell auf die speziellen Anforderungen der Messaufgabe abgestimmt werden. Außerdem entfällt das Interface zwischen Datenerfassungssystem und Computer und es ist eine schnelle Datenauswertung möglich. Einfache Einsteckkarten mit 12 bit Auflösung bei 10 MHz Bandbreite, einer Abtastrate von 10 MS/s und einer Speicherkapazität von 30 kB sind für normale PC verfügbar und sollten für einfache Messaufgaben ausreichen. Für kompliziertere Verfahren, insbesondere Wechselstromexperimente, sollte eine höhere Auflösung von 14 bzw. 16 bit bei Abtastraten von 100 MS/s und einer Speicherkapazität von 4 MB angestrebt werden. Dafür können spezielle Data–Aquisition–Cards in Verbindung mit einem Industrie-PC eingesetzt werden.

Die verfügbaren Datenerfassungssysteme besitzen im Allgemeinen einen Messbereich zwischen ± 100 mV und ± 5 V, so dass bei einer Reihe von Experimenten mit Spannungssignalen im mV–Bereich schnelle analoge Vorverstärker eingesetzt werden müssen. Darüber hinaus sollten die Geräte über mehrere (vorzusehen: 4) differentielle Eingänge verfügen, um Potentialverschiebungen während des Magnetpulses ausgleichen zu können. Einer dieser Kanäle kann zur simultanen Messung der Stärke des momentanen Magnetfeldes dienen.

Oftmals sind die Ausgangssignale einer schnellen Fourier–Transformation (FFT) zu unterziehen, um das Messsignal gegenüber Rausch– und Induktionsstörungen filtern zu können.

Die Kosten für die Experimentierausrüstung für die geplanten Experimente in den gepulsten Hochfeldmagneten sind nachfolgend dargestellt. Dabei liegt den aufgeführten Summen eine detaillierte Geräteaufstellung zugrunde, die vorgelegt werden kann.

*MS := Mega Samples - Millionen Wandlungen

Elektrische Transportmessungen (Kap. III.1.1)		
(Leitfähigkeit, Magnetowiderstand, Hall–Effekt)		
2 Messplätze à DM 250.000,–	DM	500.000,–
Magnetische Eigenschaften (Kap. III.1.2)		
(Magnetisierung, Suszeptibiltät, de Haas–van Alphen–Effekt)		
2 Messplätze à DM 200.000,–	DM	400.000,–
Magnetostriktion (Kap. III.1.3)	DM	250.000,–
Ultraschall (zu Kap. III.1.3)	DM	300.000,–
mm–Wellen Spektroskopie, ESR (Kap. III.1.4)	DM	600.000,–
FIR – VIS –UV Optik (Kap. III.1.5)	DM	800.000,–
Allgemeine Laborausstattung	DM	600.000,–
		=======
Summe	**DM**	**3.500.000,–**

Tabelle III.1: Kosten für Experimentierausrüstung

III.3 Allgemeine Ausrüstung (Kryo, Vakuum, Hochdruck, EDV, Werkstatt)

III.3.1 Kryotechnik für die Experimente

Da eine Vielzahl der Experimente, besonders zur Untersuchung von Wechselwirkungen, tiefe Temperaturen erfordern, kommt der Kryotechnik entscheidende Bedeutung zu. Daneben muss aber auch angestrebt werden, Experimente bei hohen Temperaturen durchführen zu können (z. B. Untersuchung von Hartmagneten). Zur Verringerung mechanischer Vibrationen müssen für manche Experimente die Kryostate speziell gelagert weden. Als Standard sind folgende Systeme zu betrachten:

- Ofen (T = 300 bis 1000 K)
- ^{4}He–Durchflusskryostat (T = 1,6 bis 300 K)
- ^{4}He–Badkryostat (T = 1,6 bis 4,2 K)
- ^{3}He–Kryostat (T = 0,3 bis 10 K)
- ^{3}He–^{4}He–Mischungskühler (T = 0,03 bis 1 K)

Durch kryotechnische Einsätze wird der zur Verfügung stehende Probenraumdurchmesser etwa halbiert, bei einer Magnetbohrung von 20 bzw. 24 mm

Durchmesser sind ca. 10 mm freier Durchmesser realistisch. Dieser Raum steht für Probe und Zuleitungen/Lichtleiter zur Verfügung, magnetische Messspulen führen zu einer weiteren Verringerung, so dass dann Proben mit etwa 5 mm Durchmesser verwendbar sind.

Bei den angestrebten gepulsten Magnetfeldern bis 100 T können durch Wirbelströme Aufheizeffekte auftreten. Abschätzungen zeigen, dass bei den angegebenen Werten für die Hochfeldspule (100 T, 20 ms) ein metallisches Kryostaten–Endstück innerhalb des Magneten um mehr als 10 K aufgeheizt wird. Damit ist die mit einem metallischen Endstück erreichbare Temperaturstabilität für viele Experimente nicht ausreichend: Im Temperaturbereich unter 4 K, insbesondere aber bei Experimenten im Millikelvin–Bereich, müssen deshalb spezielle technische Lösungen gewählt werden. Erstens müssen die direkt im Magneten befindlichen Teile der Einsätze oftmals aus Kunststoff (Glasfiber, Verbundwerkstoffe etc.) gefertigt sein. Für die Verbindungen zu metallischen Bauteilen muss eine besondere Verbindungstechnologie Metall–Kunststoff eingesetzt werden. Kommerzielle Standardlösungen sind nicht verfügbar; in Zusammenarbeit zwischen Anwendern und Firmen für kryotechnische Ausrüstung sind spezielle Lösungen entwickelt worden [8, 17, 18].
Die Feldbeeinflussung durch Wirbelströme ist im Allgemeinen nicht signifikant.

2	Öfen	à DM 30.000,–	DM	60.000,–
2	^{4}He–Durchflusskryostate	à DM 80.000,–	DM	160.000,–
4	^{4}He–Badkryostate	à DM 50.000,–	DM	200.000,–
1	^{3}He–Badkryostat		DM	200.000,–
1	^{3}He–^{4}He–Mischungskühler		DM	500.000,–
4	Temperature–Controller		DM	80.000,–
4	Thermometrie–Brücken		DM	120.000,–
4	Vakuummantel–Heber		DM	40.000,–
	div. Thermometer und kryotechn. Zubehör		DM	140.000,–
				=======
		Summe	**DM**	**1.500.000,–**

Tabelle III.2: Kostenkalkulation Kryotechnik für die Experimente

III.3.2 Technische Kryo– und Vakuumausstattung

Die vorgesehene Kühlung der Kryostaten für die Hochfeldspulen mit flüssigem Stickstoff (LN_2) erfordert den Einsatz und damit die Bevorratung großer Mengen LN_2. Bei einem geschätzten Bedarf von ca. 150 bis 200 l LN_2 pro Puls muss die Aufstellung eines Vorratstanks von mindestens 30.000 l angestrebt werden. Entsprechende Versorgungsleitungen und Abfülleinrichtungen sind zusätzlich zu berücksichtigen. Die für die Experimente benötigte Menge an LN_2 (Kleinmenge) wird problemlos durch dieses System abgedeckt.

Die Verwendung von Tieftemperatureinsätzen erfordert ca. 500 bis 1000 l flüssiges Helium pro Woche. Diese Menge kann gegen Kostenberechnung vom **Heliumverflüssiger des Elektronenbeschleunigers ELBE des Forschungszentrums Rossendorf** bereitgestellt werden. Für die Rückgewinnung des Heliumgases ist eine Helium–Rückgewinnungsanlage vorzusehen.

Zur Erzeugung entsprechender thermischer Isolationsvakua bzw. zur Druckregulierung in Kryostaten sind Hochvakuumpumpstände erforderlich. Weitere Vakuumpumpen, z. B. zur Temperaturerniedrigung kryogener Flüssigkeiten und Vakuum–Messtechnik zur Totaldruckmessung, müssen zur Verfügung stehen.

1	LN_2–Vorratstank, 30.000 l, mit Zubehör, Aufstellung, etc.	DM	100.000,–
5	LN_2–Vorrats– und Transportbehälter (100 l und 200 l)	DM	60.000,–
5	LHe–Vorrats– und Transportbehälter (100 l)	DM	80.000,–
1	Rückgewinnungsanlage für Heliumgas (Kompressor, Hochdruckgaslager)	DM	300.000,–
1	Massenspektrometer–Leckdetektor	DM	50.000,–
6	Hochvakuumpumpstände	DM	120.000,–
4	Grobvakuumpumpen	DM	20.000,–
	Vakuummessgeräte	DM	70.000,–
	Vakuumtechnische Bauteile (Flansche, Rohre etc.)	DM	100.000,–
			=====
	Summe	**DM**	**900.000,–**

Tabelle III.3: Kostenkalkulation technische Kryo– und Vakuumausrüstung

III.3.3 Supraleitende Gleichfeldspule

Für vorbereitende Untersuchungen sowie für Referenzmessungen sollte eine supraleitende Gleichfeldspule für 20 T mit einer Raumtemperaturbohrung von 50 mm angeschafft werden. Diese Ausrüstung erscheint auch für biologische Untersuchungen von großem Interesse.
Für die Spule mit dem notwendigen Kryostaten sowie entsprechender Messausrüstung werden angesetzt:

20 T–supraleitender Magnet	**DM**	**800.000,–**

III.3.4 Hochdruck

In Kooperation mit der **Karls–Universität Prag** sind magnetische Untersuchungen in gepulsten hohen Magnetfeldern auch unter Hochdruck geplant. Für

die Entwicklung und den Bau der notwendigen Hochdruckzellen und für die Hochdruck–Messtechnik werden angesetzt:

Hochdruck–Messtechnik	**DM**	**300.000,–**

III.3.5 Elektronische Datenverarbeitung und Experimentsteuerung

Für die Grundausstattung der elektronischen Datenverarbeitung und Experimentsteuerung sowie für die Anbindung des Hochfeldlabors an die Rechenzentren des Forschungszentrums Rossendorf sowie der Technischen Universität Dresden werden angesetzt:

Datenverarbeitung und Experimentsteuerung	**DM**	**500.000,–**

III.3.6 Mechanische Werkstatt

Das Hochfeldlabor muss mit einer eigenen mechanischen Werkstatt ausgestattet werden. Für die Erstausstattung (z. B. Drehbank, Fräsmaschine etc.) werden angesetzt:

Mechanische Werkstatt	**DM**	**500.000,–**

Für größere Arbeiten kann die zentrale Werkstatt des Forschungszentrums Rossendorf gegen Kostenerstattung benutzt werden.

III.4 Zusammenfassung der Investitionen für Messtechnik

Damit ergibt sich eine Gesamtsumme für die notwendigen Investititonen für Grundausstattung der Labors mit Messgeräten (Kap. III.2), Kryo- und Vakuumtechnik, incl. supraleitender Magnet (Kap. III.3.1, III.3.2, III.3.3) Hochdruck (Kap. III.3.4), EDV (Kap. III.3.5) und Werkstatt (Kap. III.3.6):

Gesamtinvestition Messgeräte und allg. Ausrüstung	**DM**	**8.000.000,–**

Kapitel IV

Technische Installationen

IV.1 Magnete

IV.1.1 Einleitung

Die Herstellung hoher Magnetfelder sowie deren Grenzen sind durch die verschiedenen Herstellungstechnologien bestimmt. Wir wollen uns für die folgende Diskussion zuerst auf statische Felder beschränken. Die älteste und einfachste Methode, die auf Faraday zurückgeht, ist die Verwendung eines Eisenjochs mit einem Luftspalt. Unter Vernachlässigung aller Streufeldverluste kann man damit Feldstärken von 2 bis 3 T erzeugen. Der Wert ist durch die Sättigungsmagnetisierung des Eisenjochs bzw. des Materials der verwendeten Polschuhe bestimmt. Höhere statische Feldstärken sind nur durch stromdurchflossene Spulen erreichbar. Dabei sind die Grenzen für Spulen aus supraleitenden Drähten durch das obere kritische Magnetfeld B_{c2} als auch durch die kritische Stromdichte des Leitermaterials bei der Einsatztemperatur bestimmt. Beide Größen sind eine Funktion der Temperatur. Somit kann man mit supraleitenden Nb–Ti Spulen Feldstärken bis ca. 10 T und mit supraleitenden Nb_3Sn Spulen Feldstärken bis zu 20 T erreichen. Höhere Feldstärken sind nur mit normalleitenden Spulen wie z. B. mit Bitterspulen oder mit Polyhelixspulen bei Einsatz von regelbaren Stromquellen mit hohen eingesetzten Leistungen von 10–40 MW erreichbar (Tab. I.1, S. 2). Dabei muss ein Großteil der zugeführten Leistung als Joulesche Wärme wieder weggekühlt werden. Darüber hinaus können supraleitende Systeme mit normalleitenden Spulen kombiniert werden („Hybridsysteme“), wodurch bisher statische Felder von bis zu 36 T erreicht werden konnten und Felder bis zu 45 T angestrebt werden (siehe Tab. I.1). Derartige Hybridsysteme wurden z. B. im deutsch-französischen Hochfeldlabor in Grenoble, am NHMFL in Tallahassee (USA) sowie in Tsukuba (Japan) gebaut. Mit den derzeit zur Verfügung stehenden Leitermaterialien scheint jedoch die Grenze derartiger Systeme bei etwa 50 T zu liegen. Die Herstellung höherer Feldstärken wird durch zwei Faktoren begrenzt:

1. Die Erwärmung der normalleitenden inneren Spule – bei sehr hohen Leistungen wird das Abführen der Jouleschen Wärme immer schwieriger.

2. Die in den Spulen auftretenden Kräfte.

Auf dem Weg zu immer höheren Feldstärken tritt die Erwärmung der Spule als erste Grenzbedingung auf. Sie kann umgangen werden, indem man das Feld nur über einen kurzen Zeitraum aufrecht erhält – dies sind dann sogenannte Pulsspulen. Während der Pulszeit erwärmt sich die Spule adiabatisch, man nützt also ihre eigene Wärmekapazität aus.

Als nächste Randbedingung treten dann die Lorentzkräfte in Erscheinung. Auch diese Grenze kann überschritten werden, wenn man zulässt, dass die Spule während des Strompulses sich selbst zerstört. Bei der sogenannten single-turn-Technik wird durch eine aus nur einer Windung bestehende Spule ein sehr großer Strom geschickt. Für kurze Zeit – etwa eine Mikrosekunde – bleibt die Spule noch intakt, und es werden Felder bis über 300 T erreicht. Noch höhere Felder lassen sich mittels Flusskompression erzielen. Hierbei wird mittels Explosivstoffen ein Kupferring zur Implosion gebracht. Der vom Kupferring umschlossene magnetische Fluss kann nicht schnell genug durch das Kupfer diffundieren und wird deshalb komprimiert. Der Rekord bei diesen Methoden liegt derzeit bei 2800 T.

In dem hier vorgelegten Vorschlag werden diese destruktiven Methoden nicht angestrebt, es sollen nicht-destruktive Feldspulen zum Einsatz kommen. Die Pulsdauer legt die Art der in dem Feld durchführbaren Experimente fest. So sind zur Untersuchung von sehr gut leitenden metallischen Proben bei sehr tiefen Temperaturen quasistatische Systeme mit Pulsdauern von etwa 1 s erforderlich. Schlechter leitende Metalle, wie z. B. intermetallische Verbindungen und Legierungen können mit Pulsen von 100 ms untersucht werden. Für Untersuchungen an Isolatoren und Halbleitern, bei denen kaum Wirbelstromheizung auftritt, reichen im Allgemeinen Pulsdauern von einigen Millisekunden. Jedoch gilt auch hier, dass Experimente bei sehr tiefen Temperaturen (z. B. bei 30 mK) oftmals längere Pulsdauern erfordern, da sich das Messsystem bzw. der Kryostat infolge der magnetisch zugeführten Energie aufheizen können.

Da im Rahmen des hier vorliegenden Antrags ein Hochfeldlabor aufgebaut werden soll, das für möglichst viele Benutzer sinnvoll nutzbar ist, ergibt sich aus dieser kurzen Diskussion, dass man Systeme mit unterschiedlicher Pulsdauer anstreben muss. Auf Grund der Probleme der Spulenkühlung und der Aufnahme der magnetischen Kräfte stellen die mit den derzeit und in naher Zukunft zur Verfügung stehenden Leitermaterialien erreichbaren Felder einen Kompromiss zwischen Pulsdauer und Maximalfeld dar.

Beim Aufbau eines Pulsfeldlabors sind zwei grundlegende Probleme zu lösen, nämlich zum einen die Frage nach der Energieversorgung und zum anderen die Frage nach den richtigen Hochfeldmagneten. Die Energieversorgung muss die Magnetspulen mit der notwendigen Energie versorgen. Dabei ist neben der erforderlichen Energie auch die notwendige Leistung zu berücksichtigen.

Der Hochfeldmagnet soll ein Magnetfeld in einem ausreichend großen Probenvolumen mit einer vorgegebenen, räumlichen Homogenität und Konstanz für hinreichend lange Zeit produzieren. Die in diesem Projekt angestrebten Werte für die Hochfeldspulen sind in Tabelle IV.1 zusammengefasst. Diese Ziele liegen

	Magnet A	**Magnet B**	**Magnet C**
Maximalfeld	100 T	70 T	60 T
Pulsdauer	10 – 20 ms	100 – 200 ms	1000 ms
Bohrung	20 mm	24 mm	50 mm
Feldhomogenität (über 1 cm^3 Kugelvolumen)	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^{-2}$	$\leq 10^{-2}$

Tabelle IV.1: Parameter der projektierten Hochfeldspulen

an der Grenze des derzeitig technisch Machbaren. Ähnliche Werte werden mittelfristig von einem europäischen Konsortium (Toulouse, Leuven, Amsterdam, Oxford, Grenoble) und für die nächsten zwei Jahre in den USA (Tallahassee, Los Alamos) angestrebt; ihr experimenteller Nachweis steht bisher aus.

Beim Bau einer Pulsfeldanlage ist die genaue Abstimmung der Energieversorgungseinheit auf die Hochfeldspule notwendig. Ausgangspunkt ist dabei das gewünschte Magnetfeld, seine räumliche Homogenität im Probenvolumen sowie die Pulsdauer. Es ergeben sich aus diesen Forderungen je nach Spulentechnologie (Polyhelixspule, Drahtspule, Bitterspule, monolithische Spule, Mehrspulensystem) und den verwendeten Leitermaterialien (Zugfestigkeit, Leitfähigkeit, spezifische Wärme) völlig unterschiedliche Spulen, die entsprechend verschiedene Anforderungen in Bezug auf Energie und Leistung der Energieversorgung haben können.

Das maximal erzielbare Feld ist bei nicht-destruktiven Spulen durch die Zugfestigkeit des verwendeten Leiters begrenzt. Das von den Strömen in der Spule produzierte Feld hat Rückwirkungen auf die Ströme und die entstehenden Lorentzkräfte müssen mechanisch vom Magneten aufgefangen werden.

Eine weitere Randbedingung ergibt sich aus der Wärmekapazität der Spule. Bei einer Pulsspule darf der Strom nur für eine bestimmte Zeit fließen, während der sich die Spule adiabatisch erwärmt. Die Länge dieses Strompulses bestimmt sich durch die gewählten Anfangs- und Endtemperaturen und das verwendete Leitermaterial. Weiterhin hat noch die Form des Strompulses einen Einfluss. Üblicherweise werden Pulsspulen mit flüssigem Stickstoff vorgekühlt, die Endtemperatur ist durch die zulässige Höchsttemperatur der Leiterisolation gegeben, ein typisches Temperaturintervall wäre 77 K bis 300 K, maximal 400 K.

Das aus Sicht der Erwärmung beste Leitermaterial ist auf Grund seiner hohen elektrischen Leitfähigkeit und hohen Wärmekapazität im interessierenden Temperaturbereich Kupfer. Kupfer hat jedoch eine geringe mechanische Zugfestigkeit. Dieses Verhalten ist bei allen bekannten Metallen und Legierungen zu

beobachten, eine hohe Zugfestigkeit ist verbunden mit schlechter elektrischer Leitfähigkeit und umgekehrt. Einen Ausweg aus dieser Lage bieten Kompositsysteme oder Legierungen, die aus Kupfer und einem Zusatzmaterial bestehen. Das Kupfer sorgt für gute elektrische und thermische Eigenschaften, der Zusatz liefert die nötige Zugfestigkeit. Zwei bekannte und aussichtsreiche Vertreter solcher Kompositsysteme, die in Entwicklung sind, sind Kupfer mit einer Ummantelung aus Stahl oder Kupfer, das mit einer großen Anzahl äußerst dünner Niob– oder Silberfilamente durchsetzt ist. Darauf wird im Detail in Kapitel IV.2 eingegangen.

IV.1.2 Abschätzung des Feldes und der benötigten Energie

Es folgt eine Abschätzung des Feldes im Zentrum des Magneten sowie der benötigten magnetischen Energie für zwei Spulentypen, nämlich zum einen für eine Spule mit konstanter Stromdichte und zum anderen für eine Spule mit konstanten mechanischen Spannungen, was durch eine geeignete Variation der Stromdichte erreicht wird. Erstere nützt die Wärmekapazität der Spule am besten aus und besitzt deshalb die größten Pulslängen. Letztere nützt die mechanische Zugfestigkeit am optimalsten aus, was im Vergleich zur Spule mit konstanter Stromdichte zum einen höhere Felder, zum anderen aber geringere Pulslängen bewirkt. Weiter wird angenommen, dass die Spulen unendlich lang und die einzelnen Windungen unabhängig voneinander sind.

Die zylindrische, unendlich lange Spule besitze den inneren Radius a_1 und den äußeren Radius $\alpha \cdot a_1$. Das Leitermaterial habe die Zugfestigkeit σ_{B}. Die zentralen Felder, die magnetischen Energien und die Pulslänge sind dann

$$\begin{aligned} B_0 &= \sqrt{\mu_0\,\sigma_{\mathsf{B}}} && \mathcal{B} \\ W_{\mathsf{mag}} &= \pi\,\sigma_{\mathsf{B}}\,a_1^3 && \mathcal{W} \\ t_{\mathsf{puls}} &= (\mu_0\,\lambda\,a_1)^2\,\frac{\mathcal{F}_{\mathsf{Mat}}(T_i,T_f)}{\xi\,\mu_0\,\sigma_{\mathsf{B}}} && \mathcal{T} \end{aligned}$$

Ganz genau bedeutet die Größe W_{mag} die in einem endlichen Spulenstück enthaltene magnetische Energie. Die Länge dieses Spulenstücks wird dabei gleich dem Außendurchmesser gesetzt. μ_0 beschreibt die Vakuumpermeabilität. Weiter bedeuten λ den Füllfaktor, der den Anteil des Leiters am gesamten Spulenquerschnitt berücksichtigt, $\mathcal{F}_{\mathsf{Mat}}$ eine materialabhängige Funktion (vgl. S. 59) und ξ einen Faktor, der durch die Form des Strompulses bestimmt ist. Für Kupfer und ein Temperaturintervall von 77 bis 400 K gilt $\mathcal{F}_{\mathsf{Mat}} = 9,42 \cdot 10^{16}\,\mathsf{A^2sm^{-4}}$. Eine Halbwelle einer Sinusschwingung ergibt $\xi = 0,5$.

Für den Spulentyp mit konstanter Stromdichte und den Spulentyp mit konstanten mechanischen Span-nung-en ergeben sich die folgenden, führenden Terme für die dimensionslosen Größen $\mathcal{B}$, $\mathcal{W}$ und $\mathcal{T}$:

	konst. Stromdichte	konst. mechan. Spannung
$\mathcal{B}$	$2\,(1-\frac{1}{\alpha})$	$\sqrt{2\ln\alpha}$
$\mathcal{W}$	$\frac{2}{3}\,\alpha^3$	α^3
$\mathcal{T}$	$\frac{1}{4}\,\alpha^2$	$2\ln\alpha$

Bei der Spule mit konstanter Stromdichte ist das maximal erreichbare Feld nur durch die Zugfestigkeit σ_B bestimmt, zur Erzielung von Feldern um 100 T sind Zugfestigkeiten von über 2 GPa erforderlich. Bei der Spulenbauart mit konstanten mechanischen Spannungen kann dagegen das Magnetfeld bei gegebener Zugfestigkeit σ_B durch Vergrößern des Außenradius $\alpha \cdot a_1$ erhöht werden. Die magnetischen Energien der Spulen sind proportional zum Volumen der Spule, zur mechanischen Zugfestigkeit und einem numerischen Faktor, der von der Spulenbauart abhängt. Die Bauweise mit konstanten mechanischen Spannungen braucht bei gleichen Volumina und Zugfestigkeiten 50 % mehr magnetische Energie als die Bauweise mit konstanter Stromdichte. Bei der Pulsdauer ist die Bauweise mit konstanter Stromdichte klar überlegen.

Für einige beispielhafte Zahlenwerte legen wir eine Spule mit einem Innenradius von 10 mm und eine Zugfestigkeit von 1,5 GPa zugrunde. 70 % des Spulenquerschnitts seien von Kupfer belegt, das sich während des sinusförmigen Strompulses (Halbwelle) adiabatisch von 77 auf 400 K erwärmt. Der Rest des Querschnitts sei von einem geeigneten Verstärkungsmaterial und Isolation belegt, so dass sich im Mittel die oben erwähnte Zugfestigkeit von 1,5 GPa ergibt.

Unter diesen Voraussetzungen benötigt die auf mechanische Spannungen optimierte Spule zur Herstellung eines Feldes von 100 T eine magnetische Energie von 13,2 MJ, die Spule hat einen Außendurchmesser von 288 mm, und die Pulsdauer beläuft sich auf 7,5 ms.

Die Spule mit konstanter Stromdichteverteilung kann mit der selben magnetischen Energie nur ein Feld von 81,5 T bei einer Pulsdauer von 92 ms produzieren.

Aus diesen Abschätzungen folgt, dass bei mittleren Zugfestigkeiten von 1,5 GPa Felder von 100 T nur dann erzielt werden können, wenn die Stromdichte im Magneten auf eine Gleichverteilung der mechanischen Spannungen ausgelegt wird. Pulszeiten im Bereich von 10 ms können dann erwartet werden.

Die hier vorgestellten Abschätzungen sollen lediglich als Anhaltswerte dienen. Sie weisen jedoch einen Weg für eine realistische Hochfeldspule.

IV.1.3 Vorschlag eines Spulensystems

Wie im vorigen Abschnitt erläutert wurde, sind zur Erzielung möglichst langer Pulsdauern Spulensysteme mit konstanter Verteilung der Stromdichte die optimalste Bauart. Leider lassen sich jedoch mit dieser Spulenbauweise mit den

heute zur Verfügung stehenden Leitermaterialien (siehe Tab. IV.2) keine Felder von 100 T erzielen. Dies ist nur mit Spulenbauweisen möglich, bei denen die (mittlere) Stromdichte über den Querschnitt der Spule variiert.

Eine besonders einfache Methode, eine räumliche Verteilung der Stromdichte zu erreichen, besteht darin, eine Anordnung von zwei konzentrisch angeordneten Spulen zu wählen, deren jede für sich eine konstante Stromdichte aufweist, wobei die innere Spule jedoch höhere Werte der Stromdichte hat. Weiter bietet es sich dann an, die beiden Spulen mit separaten Energiequellen zu versorgen. Dadurch werden die Anforderungen, insbesondere an die benötigte Leistung im Vergleich zu einem System aus nur einer Spule, beträchtlich vermindert, wie die folgenden, qualitativen Überlegungen zeigen:

Die äußere Spule eines 100–T–Spulensystems alleine produziert ein hohes Feld (im Zentrum etwa 50 T) in einem großen Volumen, d. h., es ist damit eine hohe magnetische Energie verknüpft, im Beispiel auf Seite 54 sind es etwa 25 MJ. Um die Leistung der Energiequelle klein zu halten, sollte die Zeitdauer, in der diese Energie in die Spule transferiert wird, möglichst lang sein. Wegen der großen Masse der äußeren Spule steht die Erwärmung der Spule dem nicht entgegen.

Mit der inneren Spule ist wegen ihres wesentlich kleineren Volumens eine viel geringere magnetische Energie verbunden. Die kleine Masse der Spule in Kombination mit der maximal zulässigen Erwärmung bedingt, dass die Pulsdauer der inneren Spule klein sein muss. Das wiederum heißt, dass die Leistung der Energiequelle für die innere Spule ebenfalls nicht sehr hoch sein muss.

Die äußere Spule besitzt also eine lange Pulsdauer, die zugehörige Energieversorgung muss den Hauptteil der Energie des gesamten Zwei–Spulensystems speichern und bei einer zwar hohen, aber dennoch beherrschbaren Leistung abgeben. Die innere Spule hat eine kleine Pulsdauer, die zugehörige Energieversorgung muss nur wenig Energie speichern, die nötige Leistung stellt ebenfalls keine Probleme dar. Der Strompuls in die innere Spule wird eine geeignete Zeitspanne nach dem Einschalten des Strompulses der äußeren Spule gegeben, so dass die Feldmaxima beider Spulen zum selben Zeitpunkt auftreten.

Die Trennung in zwei Spulen hat noch weitere Vorteile. Die mechanische Trennung hat einen vorteilhaften Einfluss auf die Verteilung der mechanischen Spannungen in beiden Spulen, wie sich durch Rechnungen nachweisen lässt. Eine fortgesetzte Unterteilung der Spulen in immer kleinere Einheiten führt zur sogenannten Polyhelixspule, bei der jede Drahtlage mechanisch nicht in Kontakt mit ihren benachbarten Drahtlagen steht. Im Hinblick auf eine Verringerung der mechanischen Spannungen ist die Polyhelixbauweise die optimalste. Im Hinblick auf die Herstellung ist eine Polyhelix jedoch sehr aufwendig und teuer. Sie soll hier nicht weiter betrachtet werden.

Die Aufteilung in zwei Spulen erlaubt auch eine große Flexibilität bei der Auswahl der Felder. Zum einen kann die innere Spule komplett entfernt werden. Dann steht ein Feld von etwa 50 T in der äußeren Spule mit großer Bohrung zur Verfügung. Zum anderen lassen sich die verschiedensten Innenspulen einsetzen,

womit sich dann diverse Maximalfelder und Pulsdauern erreichen lassen. Die höchsten Felder werden für die kleinsten Pulsdauern erzielt und umgekehrt.

Wegen des hohen Herstellungsaufwandes folgt, dass die äußere Spule sehr robust und verlässlich aufgebaut werden muss, d. h., sie muss so konstruiert sein, dass sie aus mechanischer Sicht immer im elastischen Bereich betrieben werden soll. Weder der verwendete Leiter noch die Verstärkungselemente dürfen ihre jeweiligen Werte der Zugfestigkeit überschreiten.

Im Gegensatz dazu soll bei der Innenspule, da diese klein und damit relativ billig ist, eine endliche Lebensdauer zugelassen werden. Das heißt, man nimmt mechanische Ermüdungserscheinungen wie plastische Verformungen der Innenspule in Kauf, kann also die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien bis an ihre Grenzen ausnutzen. Wie Rechnungen zeigen, kann man unter Verwendung der momentan zur Verfügung stehenden Leitermaterialien ein 100–T–System auch nicht anders realisieren.

IV.1.4 Berechnung eines Zweispulensystems für 100 T

Der Entwurf eines realistischen Zweispulensystems erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst werden die geometrischen Abmessungen (innerer und äußerer Durchmesser, Höhe) sowie die Beiträge zum zentralen Feld der beiden Spulen bestimmt. Mit der Festlegung der freien Bohrung des 100–T–Spulensystems mit einem Durchmesser von 20 mm ist der Innenradius der inneren Spule mit 10 mm vorgegeben. Mit dem Modell eines unendlich langen Zweispulensystems folgt damit der Durchmesser der äußeren Spule zu 460 mm und der Trennradius zwischen innerer und äußerer Spule zu etwa 55 mm. Es wurde dabei eine mittlere Zugfestigkeit von 4 bzw. 2 GPa in der Innen– und Außenspule angenommen. Die Feldbeiträge teilen sich in 46 T für die Innenspule und 54 T für die Außenspule auf.

Zur Montage der inneren Spule und aus Gründen der elektrischen Isolation wird der äußere Radius der Innenspule auf 50 mm und der innere Radius der Außenspule auf 60 mm festgelegt. Die Höhe der Außenspule ergibt sich aus dem erforderlichen Feldbeitrag und der Menge an Energie, die man einzusetzen bereit ist. Eine flache Spule benötigt wenig Energie, liefert jedoch sehr inhomogene Felder, eine Vergrößerung der Spulenhöhe verbessert die Homogenität des Feldes. Der Betrag des Feldes strebt jedoch einem Sättigungswert zu, so dass mit einer größeren Spulenhöhe lediglich die benötigte Energie ansteigt. Zwischen beiden Grenzfällen ist also ein Optimum zu finden, dies wird etwa dann errreicht, wenn die Spulenhöhe und der Spulendurchmesser gleich sind. Damit ergeben sich die Höhe der Innenspule zu 100 mm und die der Außenspule zu 460 mm.

Nachdem der Gesamtquerschnitt der zwei Spulen nun festliegt, sind in einem nächsten Schritt der genaue Aufbau der Spulen wie z. B. die Auswahl der Materialien für den Leiter und die Verstärkungen, deren Lage und Stärke etc., zu bestimmen. Dies erfolgt mit einem Programm, welches mit der Methode der finiten Elemente arbeitet.

Die Außenspule

Wie bereits erwähnt, soll die Außenspule immer innerhalb ihres elastischen Bereiches betrieben werden. Eine mögliche Anordnung besteht aus einer Spule mit neun Wicklungslagen, von denen die innersten fünf aus einem Kupfer-Stahl-Draht bestehen und die restlichen vier Lagen aus Glidcop (vgl. Kap. IV.2). Der Anteil des Stahls am Kupfer-Stahl-Draht beträgt 50 %. Beide Drahtarten haben einen Gesamtquerschnitt einschließlich Isolation von $10 \times 10\,\mathrm{mm}^2$. Zur mechanischen Aufnahme der Lorentzkräfte jeder Wicklungslage wird eine aus der hochfesten Kunststofffaser Zylon [32] gefertigte Verstärkung verwendet. Die für die numerischen Berechnungen verwendeten Materialeigenschaften sind in Tabelle IV.2 aufgeführt. Die Aufteilung in neun Leiterlagen erfolgt aus

	Kupfer–Stahl		Glidcop	Kupfer–	Kupfer	Zylon
	CuSS50	CuSS30	AL60	Niob	hart	
Elasitzitätsmodul [GPa]	160	150	130	115	125	280
Poissonzahl	0,34	0,34	0,30	0,33	0,33	0,30
Zugfestigkeit [GPa]	1,3	1,0	0,6	1,2	0,4	5
$\mathcal{F}_{\mathrm{Mat}}(77\,\mathrm{K}, 300\,\mathrm{K})$ $[10^{16}\ \mathrm{A^2sm^{-4}}]$	$1,95$	$3,83$	$6,00$	3,90	7,81	
$\mathcal{F}_{\mathrm{Mat}}(77\,\mathrm{K}, 400\,\mathrm{K})$ $[10^{16}\ \mathrm{A^2sm^{-4}}]$	$2,35$	$4,61$	$7,52$		9,40	

Tabelle IV.2: Die für die numerischen Rechnungen verwendeten Materialeigenschaften vorhandener Leitersorten und des Verstärkungsmaterials bei Raumtemperatur.

einem Kompromiss im Zusammenhang mit der Elektroversorgung der Spule. Da die geometrischen Dimensionen der Spule sowie der Feldbeitrag vorgegeben sind, folgt daraus eine mittlere Stromdichte im Spulenquerschnitt. Diese mittlere Stromdichte kann entweder durch viele Windungen aus Draht mit kleinem Querschnitt oder durch wenige Windungen aus Draht mit großem Querschnitt erreicht werden. Der dünne Draht ist beim Bau der Spule leichter zu wickeln, dafür ist jedoch die elektrische Spannung der Elektroversorgung hoch. Beim Draht mit großem Querschnitt liegen die Verhältnisse genau entgegengesetzt. Der vorgeschlagene Querschnitt benötigt eine Versorgungsspannung von etwa 28 kV (siehe Kap. IV.3).

Die von Mises–Spannungen [25] in der Mittelebene der Spule sind in Abbildung IV.1 dargestellt.

Die größten Spannungen von etwa 2 GPa treten in der ersten Verstärkungslage auf, die innerste Leiterlage wird bis an die Grenzen ihrer Zugfestigkeit belastet. Die restlichen, aus CuSS50 gewickelten Lagen sind nur Spannungen weit unterhalb ihrer Zugfestigkeit ausgesetzt. Von den äußeren vier Lagen aus Glidcop AL60 wird wiederum die innerste bis knapp an ihre Zugfestigkeit belastet, bei den anderen liegen niedrigere Spannungen vor. Die von Mises–Spannungen in den Verstärkungslagen liegen immer weit unterhalb

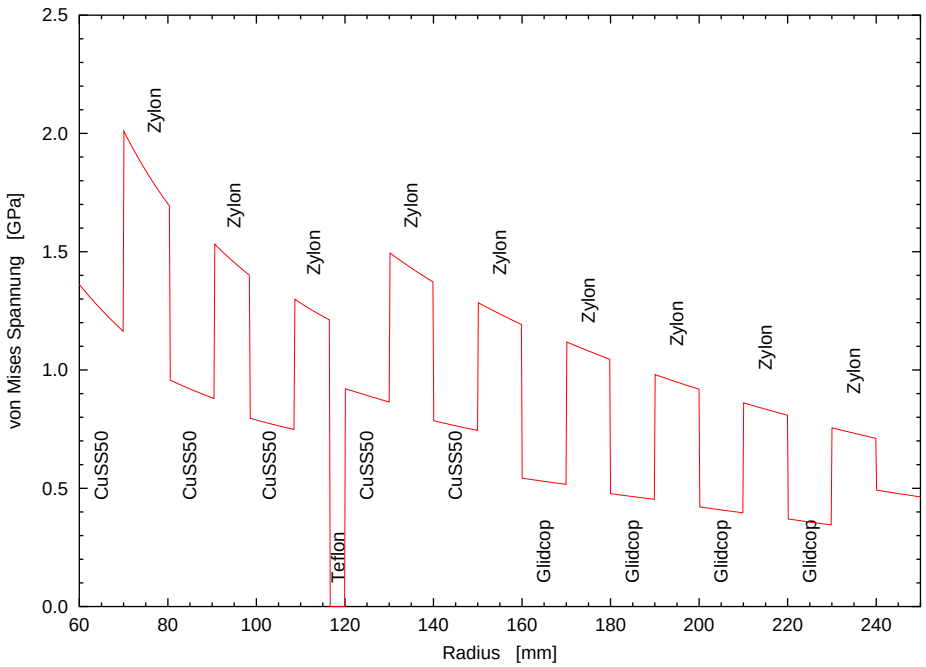


Abbildung IV.1: von Mises–Spannungen in der Mittelebene der Außenspule. Von der Innenseite der Spule (links) aus gesehen, wechselt sich jeweils eine Leiterlage mit einer Verstärkungslage aus Zylon ab. Zwischen der dritten und vierten Wicklungslage liegt eine Zwischenlage aus Teflon, um die Spule an dieser Stelle mechanisch zu entkoppeln. Die Verstärkungslagen aus Zylon nehmen den Großteil der mechanischen Spannungen auf, es sind maximal etwa 2 GPa. Die inneren fünf Leiterlagen sind aus einer Kupfer-Stahl-Kombination gefertigt (CuSS50). Die mechanischen Spannungen in den äußeren vier Leiterlagen sind bereits so gering, dass Glidcop AL60 als Leitermaterial verwendet werden kann. Dies hat den Vorteil, dass wegen der besseren Kombination von elektrischer Leitfähigkeit und spezifischer Wärme von Glidcop im Vergleich zu CuSS50 die Temperatur in den äußeren Lagen nach einem Strompuls nur auf etwa 140 K ansteigt. Dies verringert die mechanische Belastung der Spule auf Grund thermischer Ausdehnung. Zusätzlich noch wird nach dem Strompuls die Dauer der Abkühlung der Spule auf 77 K verkürzt als auch die dazu nötige Menge an flüssigem Stickstoff verringert.

der Zugfestigkeit von Zylon. Zwischen der dritten und vierten Wicklungslage befindet sich ein Luftspalt. Dadurch werden an dieser Stelle die Drahtlagen mechanisch entkoppelt. Rechnungen zeigen nämlich, dass im radial innen liegenden Teil einer beliebigen Spule die radialen mechanischen Spannungen die einzelnen Wicklungslagen voneinander trennen wollen. Der Luftspalt erlaubt eben diese Trennung. Sind im Gegensatz dazu die Wicklungslagen fest miteinander verklebt, so wird von zwei benachbarten Lagen die innere von der äußeren nach außen gezogen und damit einer zusätzlichen mechanischen Spannung ausgesetzt.

Derartige Luftspalte sind also nur bei radial innen liegenden Wicklungslagen einer Spule sinnvoll. Sie können allerdings mit einem leicht deformierbaren Material wie etwa Teflon ausgefüllt sein, was die Herstellung der Spule erleichtert, da keine separaten Halterungen und Zentrierungen nötig sind.

Bei der Berechnung der Spule wird zuerst ein Objekt ohne Teflonlagen berechnet. Es wechseln sich jeweils eine Leiterlage mit einer Zwischenschicht aus Verstärkungsmaterial ab. Sind dann die mechanischen Spannungen beim gewünschten Feld, das die Spule produzieren soll, zu hoch, werden versuchsweise Teflonlagen eingebaut. Aus Gründen der Einfachheit des Aufbaus versucht man natürlich, mit möglichst wenig solcher Zwischenschichten auszukommen und nur eine Teflonlage an einer optimalen Stelle einzubauen. Bei der Außenspule zeigt sich, dass man mit einer solchen Teflonlage auskommt, die unmittelbar vor der vierten Leiterlage anzubringen ist.

Die geometrische Anordnung der Leiter sowie die elektrischen Eigenschaften der verwendeten Leitermaterialien resultieren in einer Induktivität der Außenspule von 15,4 mH, bei einer Temperatur von 77 K beträgt der Widerstand 20,4 mΩ. Nach dem Strompuls beträgt die Temperatur in den Wicklungslagen aus Kupfer–Stahl 300 K, wogegen der Leiter aus Glidcop sich nur auf etwa 140 K erwärmt. Der Gesamtwiderstand der Spule ist auf 75,5 mΩ angestiegen. Für die Erwärmung der Spule von 77 K auf die genannten Temperaturen ist eine thermische Energie von 8,3 MJ notwendig.

Die Innenspule

Die Innenspule soll einen Feldbeitrag von 46 T liefern, sie liegt in einem von der Außenspule produzierten Feld von 54 T, wodurch in der Innenspule äußerst hohe mechanische Spannungen auftreten. Hier vorgeschlagen wird eine aus acht Lagen Kupfer–Stahl–Draht (CuSS50) bestehende Spule, wobei jede Drahtlage von einer Verstärkungslage aus Zylon umgeben ist. Bei der Herstellung der Spule wird nach jedem Aufbringen der Lage aus Zylon eine dünne Lage aus Teflonband aufgebracht. Dadurch kann zum einen das Wickeln der Spule wie gewöhnlich durchgeführt werden, die dünne Zwischenschicht aus Teflon bewirkt zum anderen, dass die einzelnen Lagen mechanisch nahezu entkoppelt sind, sich insbesondere trennen können. Es werden hierdurch näherungsweise die Verhältnisse einer Polyhelixspule realisiert.

In der Mittelebene der Innenspule resultieren dann von Mises–Spannungen, wie sie in Abbildung. IV.2 dargestellt sind. Nun befinden sich alle Drahtlagen im Bereich der plastischen Deformation, die Lorentzkräfte müssen deshalb im Wesentlichen von den Verstärkungslagen aus Zylon aufgenommen werden, dort betragen dann die von Mises–Spannungen zwischen vier und fünf Gigapascal.

Die Geometrie und das Leitermaterial der Innenspule ergeben eine Induktivität von 1,55 mH, der Widerstand steigt von 53 mΩ bei einer Temperatur von 77 K auf einen Wert von 440 mΩ bei 400 K an, wozu eine thermische Ener-

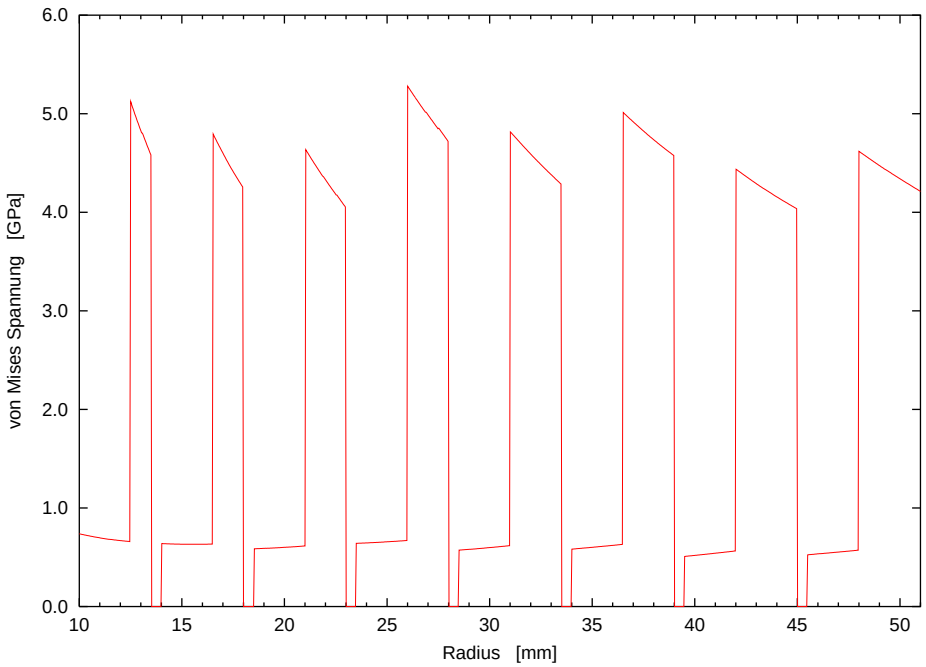


Abbildung IV.2: von Mises–Spannungen in der Mittelebene der Innenspule. Von der Innenseite der Spule wechselt sich jeweils eine Leiterlage aus Kupfer-Stahl CuSS50 mit einer Verstärkungslage aus Zylon ab, auf die noch eine dünne Lage aus Teflon folgt. Dies bewirkt in guter Näherung eine mechanische Entkopplung der einzelnen Lagen, insbesondere können sich einzelne Lagen voneinander trennen.

gie von 0,17 MJ notwendig ist. Die elektrischen Daten der Innenspule und der Außenspule sind in Tabelle IV.3 zusammengefasst.

Die magnetischen Energien sind die unter Berücksichtigung der jeweiligen Selbstinduktion berechneten Werte, beim gemeinsamen Betrieb beider Spulen muss noch der mit der Gegeninduktivität verbundene Anteil berücksichtigt werden: dieser beträgt etwa 0,66 MJ. Der Koppelfaktor zwischen beiden Spulen berechnet sich zu 0,18. Als Pulsdauer wurde diejenige einer Sinushalbwelle eines Strompulses angegeben. Dies ist jedoch nur ein Anhaltswert. Die genaue Pulsdauer ergibt sich aus einer Simulation im Zusammenhang mit der Elektroversorgung (siehe Kapitel IV.3). Wegen der starken Erwärmung der Spule ist nämlich die Dämpfung eines mit der Spule aufgebauten RLC-Kreises eine Funktion der Zeit, womit der Stromverlauf keineswegs die Form einer Sinushalbwelle annimmt. Die Pulsdauer wird dadurch etwas verlängert.

	Innenspule	Außenspule
Feldbeitrag	46 T	54 T
Innenradius	10 mm	60 mm
Außenradius	50 mm	230 mm
Spulenhöhe	100 mm	460 mm
Induktivität	1,55 mH	15,4 mH
magnet. Energie	0,14 MJ	24,6 MJ
Widerstand bei 77 K	53 mΩ	20,4 mΩ
Widerstand bei 300 K		75,5 mΩ
Widerstand bei 400 K	440 mΩ	
therm. Energie $77 \rightarrow 300$ K		8,3 MJ
therm. Energie $77 \rightarrow 400$ K	0,17 MJ	
Pulsdauer, Sinushalbwelle	10 ms	120 ms

Tabelle IV.3: Technische Daten eines 100–T–Zweispulensystems

IV.1.5 Vorschlag einer Spule für 70 T

Bei einer 70–T–Spule ist eine Unterteilung in zwei Spulen nicht unbedingt zwingend. Mit einem geeigneten Leitermaterial — wir wählen hier Kupfer–Stahl CuSS50 — bleiben die mechanischen Spannungen auch im Leiter im elastischen Bereich. Deshalb lässt sich das gewünschte Feld durch eine einzige Spule erzeugen. Dies hat noch die Vorteile, dass die Herstellung einfacher und die mechanische Fixierung und Aufhängung der fertigen Spule erleichtert wird. Außerdem ist nur eine Stromversorgung nötig.

Beim Entwurf der Spule wird hier derselbe Weg eingeschlagen wie bei der Außenspule im 100–T–Vorschlag. Auf jede Drahtlage folgt eine Verstärkung aus Zylonfaser, und an geeigneten Stellen wird durch Anbringen einer Zwischenschicht aus Teflon eine mechanische Trennung der Lagen ermöglicht. Als Drahtmaterial wird wieder eine Kupfer–Stahl–Kombination (CuSS50) zu Grunde gelegt*.

Die Daten einer möglichen Spule sind in Tabelle IV.4 zusammengestellt, in Abbildung IV.3 ist die von Mises–Spannung in der Mittelebene der Spule als Funktion der radialen Position dargestellt. Für die Pulsdauer gilt das vorher Gesagte, erst eine Simulation im Zusammenhang mit der elektrischen Beschaltung ergibt die richtigen Werte (siehe Kapitel IV.3).

Innenradius	12	mm
Außenradius	258	mm
Spulenhöhe	440	mm
zentrales Feld	70	T
Induktivität	23	mH
magnet. Energie	30	MJ
Widerstand bei 77 K	30	mΩ
Widerstand bei 300 K	168	mΩ
therm. Energie $77 \rightarrow 300$ K	15,5	MJ
Pulsdauer, Sinushalbwelle	150	ms

Tabelle IV.4: Technische Daten einer 70–T–Spule

*Bei dieser Finite–Elemente–Rechnung wurde zur Optimierung der Rechenzeit von einem fiktiven Leiterquerschnitt von $10 \times 10\,\mathrm{mm}^2$ ausgegangen. In der Praxis wird anstelle dieses sehr großen Querschnittes, der insbesondere bei Wicklungen um kleine Krümmungsradien kritisch ist, ein kleinerer Leiterquerschnitt gewählt werden. Dies ändert aber an der prinzipiellen Verteilung der von Mises–Spannung nichts; der zu große Querschnitt stellt eher eine pessimistische Abschätzung dar. Der Leiter unterliegt nach wie vor plastischer Verformung, und die Verstärkungslagen aus Zylon nehmen den Hauptteil der Lorentzkräfte auf.
Eine Verkleinerung des Leiterquerschnitts verursacht ein Ansteigen der benötigten elektrischen Versorgungsspannung, die sich jedoch bei den behandelten Spulen im Rahmen der projektierten Energieversorgung bewegen.

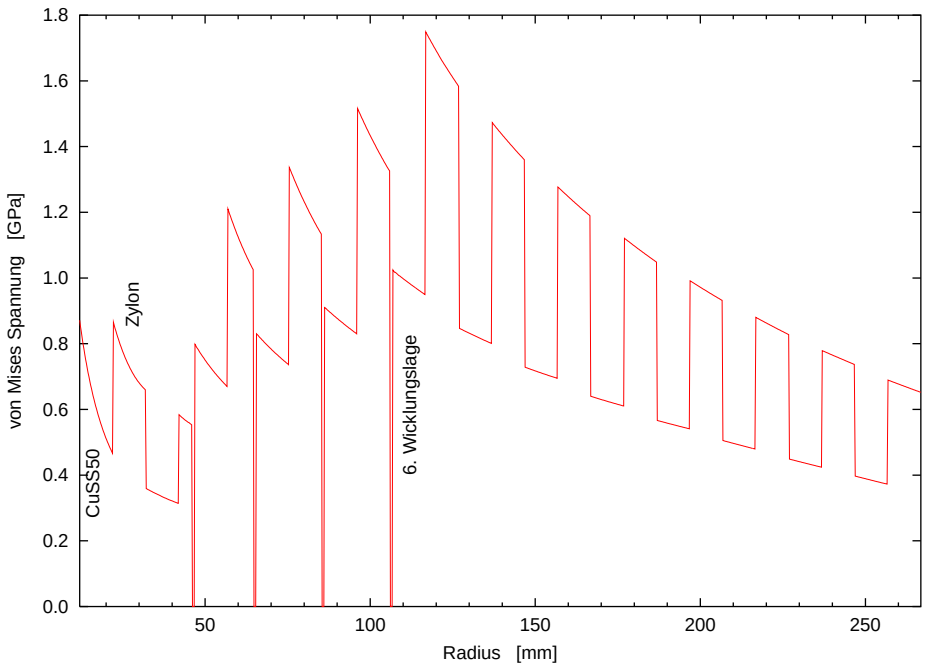


Abbildung IV.3: von Mises–Spannungen in der Mittelebene der 70–T–Spule
Von der Innenseite der Spule aus gesehen wechselt sich jeweils eine Leiterlage (CuSS50) mit einer Verstärkungslage aus Zylon ab. Insgesamt vier Lagen aus Teflon sind ebenfalls vorhanden, sie liegen an den Stellen, wo die von Mises–Spannung auf Null abfällt. Lediglich in der sechsten Wicklungslage erreichen die mechanischen Spannungen Werte um 1 GPa.

Die mechanischen Spannungen erreichen lediglich in der sechsten Leiterlage Werte um 1 GPa. Es bietet sich insbesondere an, die äußeren drei Lagen aus Glidcop AL60 zu wickeln. Die Verhältnisse liegen ähnlich wie bei der Außenspule des 100–T–Vorschlags. Wegen der günstigeren Kombination aus elektrischer Leitfähigkeit und spezifischer Wärme von Glidcop im Vergleich zu Kupfer–Stahl wird erreicht, dass nach einem Strompuls die Temperaturerhöhung in den Leitern aus Glidcop wesentlich geringer ausfällt. Die zur erneuten Abkühlung auf 77 K wegzukühlende thermische Energie wird kleiner, und es sind geringere Mengen an flüssigem Stickstoff zur erneuten Abkühlung notwendig. Außerdem verkürzt sich die benötigte Abkühlzeit entsprechend. Dies trifft natürlich auf alle hier vorgestellten Spulen zu. Ein Nachteil bei mehreren Leitersorten besteht darin, dass eine elektrische Verbindung zwischen den Leitersorten hergestellt werden muss.

IV.1.6 Vorschlag einer Spule für 60 T

Beim Entwurf der Spule für Felder von 60 T und einer langen Pulsdauer um eine Sekunde wird hier derselbe Weg eingeschlagen wie bei der 70–T–Spule. Auf jede Drahtlage folgt eine Verstärkung aus Zylonfaser, und an geeigneten Stellen wird durch Anbringen einer Zwischenschicht aus Teflon eine mechanische Trennung der Lagen ermöglicht. Als Drahtmaterial wird wieder eine Kupfer–Stahl–Kombination gewählt. Das niedrigere Feld und die längere Pulsdauer im Vergleich zur 70–T–Spule führen dazu, dass ein höherer Kupferanteil gewählt werden muss. Als Drahtmaterial wird deshalb CuSS30 gewählt, d. h., 70 % des Drahtquerschnittes werden vom Kupfer eingenommen. Dieser Draht hat im Vergleich zu CuSS50 ein kleineres Elastizitätsmodul und eine kleinere Poissonzahl sowie eine Zugfestigkeit von etwa 1 GPa bei gleichzeitig höherer Leitfähigkeit und spezifischer Wärme (siehe Tab. IV.2).

Die Daten einer möglichen Spule sind in Tabelle IV.5 zusammengestellt, in Abbildung IV.4 ist die von Mises–Spannung in der Mittelebene der Spule als Funktion der radialen Position dargestellt.

Innenradius	25	mm
Außenradius	274	mm
Spulenhöhe	550	mm
zentrales Feld	60	T
Induktivität	73	mH
magnet. Energie	33,8	MJ
Widerstand bei 77 K	41	mΩ
Widerstand bei 400 K	320	mΩ
therm. Energie $77 \rightarrow 400$ K	63,4	MJ
Pulsdauer, Sinushalbwelle	1	s

Tabelle IV.5: Technische Daten einer 60–T–Spule für lange Pulszeiten

Anmerkung: Mit dem gegebenen Leitermaterial, einem Temperaturanstieg von 77 K auf 400 K und einer gewünschten Pulsdauer von einer Sekunde folgt, dass in der Spule am Ende des Strompulses eine thermische Energie von 63,4 MJ vorliegen muss. Die vorgesehene Kondensatorbank speichert aber nur 50 MJ, d. h., mit dieser Bank ist die mögliche Pulszeit kleiner als eine Sekunde. Durch die Modularität der angestrebten Energieversorgung ist bei Bedarf eine Vergrößerung der Bankenergie auf diesen geforderten Wert (ca. +25 %) von der technischen Seite problemlos.

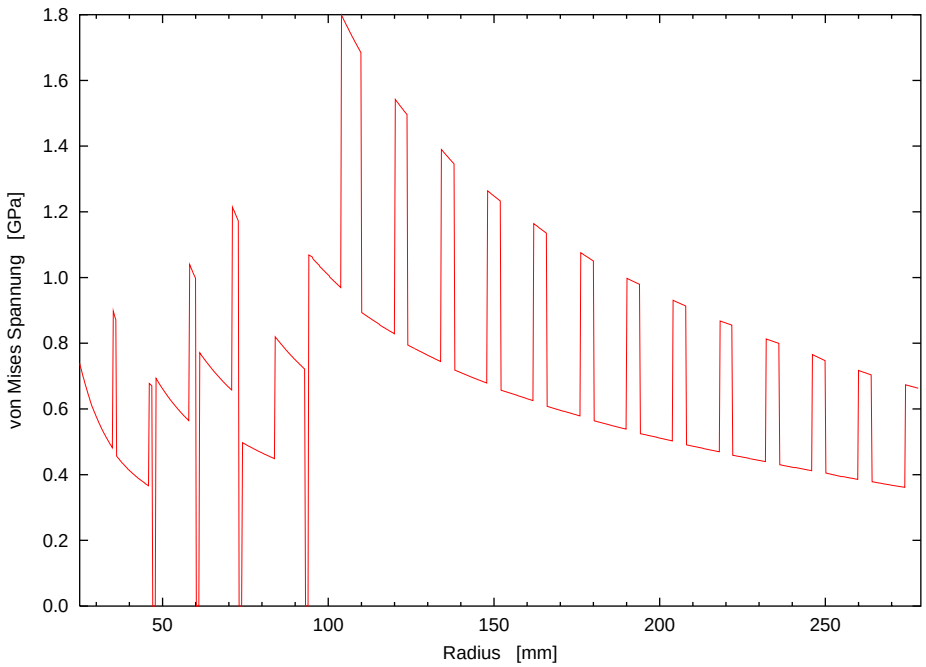


Abbildung IV.4: von Mises–Spannungen in der Mittelebene der 60 T–Spule
Von der Innenseite der Spule aus gesehen, wechselt sich jeweils eine Leiterlage mit einer Verstärkungslage aus Zylon ab. Insgesamt vier Lagen aus Teflon sind ebenfalls vorhanden, sie liegen an den Stellen, wo die von Mises–Spannung auf Null abfällt.

IV.2 Materialentwicklungen

IV.2.1 Stand der Forschung

Leiterwerkstoffe für gepulste Hochfeldmagnete beruhen in der Regel auf Kupferbasis. Die wichtigsten allgemeinen Anforderungen an den Leiter sind [35, 36, 37, 38]:

- hohe elektrische Leitfähigkeit,
- hohe mechanische Festigkeit,
- hohe Duktilität bzw. Bruchdehnung und
- Leiterquerschnitt $\geqslant 6\,\mathrm{mm}^2$ (z. B. 2x3 mm^2, 4x6 mm^2, 5x8 mm^2)

Eine **hohe elektrische Leitfähigkeit** ist erforderlich, um während der Pulszeit den Temperaturanstieg durch die Joulesche Wärme zu begrenzen. Die elektrische Leitfähigkeit wird gewöhnlich in %–IACS ausgedrückt (**I**nternational **A**nnealed **C**opper **S**tandard $= 58\ \mathrm{Sm}/\mathrm{mm}^2$). Zur anwendungsnahen elektrisch–thermischen Charakterisierung der Leiterwerkstoffe wird die bereits im Kapitel IV.1.2 (S. 46) benutzte materialabhängige Funktion $\mathcal{F}_{\mathrm{Mat}}$ (auch als sog. „Action Integral“ bezeichnet) verwendet. Sie beschreibt die adiabatische Erwärmung eines stromführenden Leiters mit dem spezifischen elektrischen Widerstand $\rho(T)$ und der spezifischen Wärme $C_v(T)$ während der Pulszeit t_p von der Ausgangs- zur Endtemperatur (z. B. 77 K[†] → 300 K[‡]), wobei j die Stromdichte ist:

$$\mathcal{F}_{\mathrm{Mat}} = \int_{77\,\mathrm{K}}^{300\,\mathrm{K}} \frac{C_v(T)}{\rho(T)} dT = \int_0^{t_p} j^2 dt$$

Ein höheres Verhältnis $\frac{C_v}{\rho}$ ermöglicht eine längere Pulszeit t_p. Beim Vergleich verschiedener Leiterwerkstoffe bedeuten höhere $\mathcal{F}_{\mathrm{Mat}}$–Werte auch bessere elektrisch–thermische Eigenschaften. In der Literatur werden die verschiedenen Materialklassen noch unterschiedlich bewertet, was auf mangelnde Kenntnis der Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften hinweist (vergl. [39, 40]).

Eine **hohe mechanische Festigkeit** des Leiters ist erforderlich, um die im Pulsbetrieb entstehende Lorentzkraft ohne Zerstörung des Magneten zu beherrschen. Diese Kraft bzw. die damit erforderliche Festigkeit des Leiters nimmt mit dem Quadrat des erzeugten Magnetfeldes zu. Da eine höhere Festigkeit des Cu–Leiters auch immer eine Abnahme seiner elektrischen Leitfähigkeit bedeutet, ist die Leiterentwicklung ein Optimierungsproblem. Wie im Falle des elektrischen Widerstandes ist die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften im Temperaturbereich ab 77 K erforderlich, da abhängig von z. B. Leitertyp, Pulsprofil und

[†] Temperatur des flüssigen Stickstoffs LN_2
[‡] etwa Raumtemperatur

Spulenkonstruktion die maximale mechanische Belastung bei durchaus unterschiedlichen Temperaturen erfolgen kann. Höhere Festigkeit ist in der Regel auch mit einer Abnahme der **Duktilität** bzw. der Bruchdehnung verbunden. Eine ausreichende Duktilität ist jedoch erforderlich,

- um bis zum vorgesehenen Endquerschnitt einen rissfreien Drahtzug zu ermöglichen,
- um unter entsprechender Zugspannung die Spule rissfrei zu wickeln und
- um die wechselnden Spannungsanforderungen im Pulsbetrieb rissfrei zu überstehen.

Der Leiterquerschnitt soll möglichst groß sein, um die elektrische Versorgungsspannung klein zu halten. Auf Grund der beschränkten Duktilität hochfester Leiter ergeben sich jedoch Obergrenzen, um eine rissfreie Wicklung der inneren Windungen zu ermöglichen. Die o. a. verhältnismäßig großen Leiterquerschnitte können auch in solchen Fällen ein Problem werden, wenn ausreichend hohe Festigkeiten nur mit sehr hohen Umformgraden erzielbar sind. Die anlagenbedingten Grenzen für eine Kaltumformung (Kaliberwalzen, Stangenzug) dürften im Durchmesserbereich von 60–80 mm liegen, so dass für die geforderten Endquerschnitte mit maximalen Umformgraden von $\eta_{max} = 5 - 6$ gerechnet werden muss ($\eta = \ln \frac{A_0}{A}$, A_0 = Ausgangsquerschnitt). Weitere Materialprobleme entstehen mit der Auswahl geeigneter Isolations– und Verstärkermaterialien. Die Isolationsmaterialien müssen thermisch und mechanisch schockbeständig sein, ohne dabei ihre elektrische Stabilität oder ihre Adhäsion zum Leiter zu verlieren. Andererseits muss beachtet werden, dass die Festigkeit der Leiter durch notwendige thermische Behandlungen während der Isolation nicht beeinträchtigt wird. Die Erfüllung der elektrischen und mechanischen Anforderungen in der Spule wird in der Regel durch eine Kombination von höherfesten Leitern und Verstärkerkomponenten realisiert. Als Verstärkerwerkstoffe werden z. Z. vorwiegend Glas– und Kohlefaser–Produkte eingesetzt. Diskutiert wird der Einsatz von z. B. SiC–Faser [41], Zylon–Faser ($\sigma_B = 5{,}8\,\text{GPa}$) [42] und perlitischem Stahldraht mit Rechteck-Querschnitt [43]. Bei der Auswahl von Verstärkerwerkstoffen ist zu beachten, dass ihr E–Modul nicht geringer als der des Leiterwerkstoffes ist, da sonst der Leiter bei entsprechender Beanspruchung nicht mehr gestützt wird. Aus diesem Grund sind Glasfasern zur Verstärkung von hochfesten Leiterwerkstoffen nicht geeignet [30]. Die Kombination von hoher elektrischer Leitfähigkeit und hoher mechanischer Festigkeit in einem Leiter kann als sog. Mikroverbund oder als Makroverbund geschehen (die Begriffe „Microcomposite“ und „Macrocomposite“ wurden von Dew Hughes geprägt [35]). Beispiele für Mikroverbunde sind die Kombinationen von Cu mit (nahezu) unlöslichen Legierungselementen, wie Ag, Nb, Cr, Be, Fe, oder die Kombination mit Dispersoiden, wie Al_2O_3, TiC, TiB_2. Im Falle der unlöslichen Legierungselemente entsteht ein Phasengemisch (Cu + Zusatzelement). Die

Herstellung kann schmelzmetallurgisch („in–situ"), durch wiederholtes Stapeln von Mehrkernleitern, pulvermetallurgisch (inkl. mechanisches Legieren oder Intensivmahlen) oder durch Sonderverfahren erfolgen. Im Falle der Dispersoide bieten sich insbesondere pulvermetallurgische Verfahren an. In jedem Falle muss der Verbund durch eine entsprechende Kaltumformung (durch Hämmern, Walzen, Ziehen) rissfrei auf den gewünschten Endquerschnitt gebracht werden, wobei das Ziel eine hohe Festigkeit bei minimalem Umformgrad ist. Bezüglich der mechanischen Eigenschaften der Cu–Basis–Legierungen (Ag, Nb, ...) ist das gemeinsame Kennzeichen, dass die Festigkeiten weit über den nach der linearen Mischungsregel erwarteten Werten liegen. Die zur Festigkeitserhöhung führenden mikrostrukturellen Mechanismen werden in der Literatur noch kontrovers diskutiert (z. B. [44, 45]). Sie werden für die verschiedenen Materialkombinationen auch unterschiedlich sein, da unterschiedliche kristallographische Strukturen (Grenzflächen), Geometrien und Dichten (Abstände) der Teilchen vorliegen. Allen gemeinsam ist, dass zur Erzielung höchster Festigkeiten die zweite Komponente im Durchmesserbereich von wenigen Nanometern liegen muss. In Bezug auf die Minimierung des notwendigen Umformgrades bedeutet dies die Forderung nach der Minimierung der Gefügeparameter des Ausgangszustandes. Ein die Anwendung betreffendes Problem der Mikroverbunde ist die Frage nach der strukturellen Stabilität der Leiter durch Temperaturspitzen im Pulsbetrieb. Es ist bekannt, dass die mechanischen Eigenschaften bereits bei Temperaturen $> 150\,°C$ abnehmen, weshalb nach wiederholter Beanspruchung in diesem Temperaturbereich mit irreversiblen Veränderungen zu rechnen ist [46]. Hier liegt jedoch der Vorteil von dispersionsgehärteten Legierungen, die als besonderes thermisch stabil bekannt sind. Ein weiteres allgemeines Problem der Mikroverbunde ist, dass mit zunehmender Gefügefeinheit nicht nur die Festigkeit, sondern auch der elektrische Widerstand (durch inelastische Streuung der Leitungselektronen) überproportional zunehmen. Diese nachteilige Kopplung kann in Makroverbunden vermieden werden. Makroverbunde sind durch den Verbund eines Cu–Leiters mit einem Stahl hoher Festigkeit gekennzeichnet. Der Stahl kann z. B. als Mantel um einen Kupferkern, als Rohr, das innen und außen von Kupfer umgeben ist, oder in Form von mehreren Stahlseelen im Kupferleiter angeordnet sein. Als Stähle kommen austenitische rostfreie Stähle, perlitische Stähle und martensitaushärtende Stähle in Frage. Eine erfolgreiche rissfreie Umformung setzt bei der Verbundkonstruktion die Berücksichtigung der sich stark unterscheidenden Formänderungsfestigkeiten der Komponenten voraus. Die Optimierung des Design von Makroverbunden steht ebenfalls noch aus. Bezüglich der elektrischen und mechanischen Eigenschaften kann von der Anwendbarkeit der linearen Mischungsregel ausgegangen werden, wenn als Leiterwerkstoff ein Makroverbund verwendet wird.

Im Folgenden soll der aus der Literatur zugängliche derzeitige Entwicklungsstand zu ausgewählten Mikro– und Makroverbunden kurz dargestellt und diskutiert werden.

Mikroverbunde

Cu–Nb–Leiter

Schmelzmetallurgie (in–situ composite) Grundlegende Arbeiten zur anomalen Erhöhung der Festigkeit von hochverformten in–situ Cu–Nb–Verbunden wurden von J. Bevk durchgeführt [47]. Die gezielte Entwicklung von hochfesten Leiterwerkstoffen erfolgte im Ames Laboratory der Iowa State University in Zusammenarbeit mit Supercon, Inc. [48, 49] sowie im Bochvar Institut Moskau [50]. Die vorherrschende Schmelztechnologie ist auf Grund der hohen Unterschiede der Schmelzpunkte von Cu und Nb das Lichtbogenschmelzen mit selbstverzehrender Elektrode. Zur Vermeidung von Inhomogenitäten durch nichtaufgeschmolzene Nb–Teilchen muss dieser Prozess mehrfach wiederholt werden. Die Feinheit des Ausgangsgefüges kann durch Steuerung des Erstarrungsprozesses beeinflusst werden. Auch die Erschmelzung im Induktionsofen konnte erfolgreich durchgeführt werden [51]. Die Zusammensetzungen liegen im Bereich Cu – (15-20) m% Nb. An Legierungen mit 20 m% Nb wurden nach sehr hoher Kaltumformung ($\eta = 12, \varnothing\, 61\,\mathrm{mm} \rightarrow \varnothing\, 0,15\,\mathrm{mm}$) Zugfestigkeiten von ca. 2 GPa realisiert [52]. Im interessierenden Durchmesserbereich von größer als 3 mm ($\eta = 6$) betrug die Zugfestigkeit allerdings nur ca. 0,7 GPa. Versuche, den notwendigen Gesamtumformgrad und die gewünschten Leiterabmessungen durch ein– oder mehrmaliges Stapeln der Leiter in Cu–Büchsen und anschließendes Strangpressen und Ziehen zu realisieren, ergaben Leiter, die bei Raumtemperatur Zugfestigkeiten von 1,0 – 1,1 GPa und eine Leitfähigkeit im Bereich von 68 – 76 %IACS aufwiesen. Der Grund für die verminderte Festigkeit liegt entweder an der „Verdünnung“ der Leiter durch die erforderlichen Cu–Hüllen oder, wenn die Kupferhülle nach dem Strangpressen entfernt werden soll, an den zum „bonding“ der gebündelten Kerne erforderlichen hohen Umformtemperaturen ($> 700\,^{\circ}\mathrm{C}$), die zum teilweisen Abbau der Verfestigung durch Agglomeration der Nb–Filamente führen. Die folgende Tabelle enthält einige veröffentlichte Werte für Leiter des Querschnitts 2x3 mm^2 [35, 53]:

Hersteller	$\sigma_B(300\,\mathrm{K})$ [GPa]	$\rho^{-1}(300\,\mathrm{K})$ [%IACS]	$\sigma_B(77\,\mathrm{K})$ [GPa]	$\rho^{-1}(77\,\mathrm{K})$ [%IACS]
Supercon	1,01	71	1,18	304
Bochvar	1,07	71	1,33	261

Stapeltechnologie Die Variante des wiederholten Stapelns von Cu–Nb–Verbunden wurde im INSA, Toulouse, im Rahmen einer Dissertation untersucht [54]. Ausgehend von einem Einkernleiter–Verbund (Cu–Mantel–Nb–Kern) wurde durch 4–malige Bündelung von jeweils 55 Kernen in Kupferbüchsen sowie durch Strangpressen (bei 700 °C) und Ziehen ein Mehrkernleiter mit 9 150 625 Filaments hergestellt. Dieser Leiter erreichte nach dem Ziehen auf einem Durchmesser von 0,3 mm eine Zugfestigkeit größer als 1,5 GPa (bei Raumtemperatur),

im Durchmesser-Bereich um 3 mm wurde jedoch 1 GPa nicht überschritten. Auch hier verhindern offenbar Vergröberungserscheinungen während des Strangpressens die Erzielung höherer Festigkeitswerte.

Pulvermetallurgie Die Nutzung der pulvermetallurgischen Techniken zur Erzeugung von Cu–Nb–Verbunden wurde bereits im Rahmen der Forschungsarbeiten zur Entwicklung von harten Supraleiterwerkstoffen eingehend untersucht, wobei allerdings nicht die Erzielung hoher Zugfestigkeiten im Vordergrund stand [55, 56],(s. dazu auch Kap. IV.2.2). Nach Spitzig et al. [57] führt die klassische pulvermetallurgische Technik, d. h., das Mischen von Ausgangspulvern, die Konsolidierung durch Strangpressen bei höheren Temperaturen und die sich anschließende Kaltumformung nicht zu besseren Festigkeitswerten gegenüber der schmelzmetallurgischen Variante. Dies wird u. a. auf die großen Ausgangsdurchmesser der Pulverteilchen (20–40 μm) zurückgeführt. Aussichtsreicher kann jedoch die Nutzung des mechanischen Legierens bzw. des Intensivmahlens eingeschätzt werden [58].

Cu–Ag–Legierungen

Grundlegende Arbeiten zu den anomalen Änderungen der elektrischen und mechanischen Eigenschaften von in–situ Cu–Ag–Verbunden nach hoher Kaltumformung wurden von Frommeyer und Wassermann durchgeführt [59, 60]. Die Entwicklung von Leitern auf Cu–Ag–Basis erfolgte insbesondere in den Tsukuba Magnet Laboratories [61, 62, 63]. Cu–Ag–Legierungen bilden ein eutektisches System, wobei die maximalen gegenseitigen Löslichkeiten der Randkomponenten jeweils etwas über 8 m% liegen. In den interessierenden kupferreichen Legierungen (bislang vorzugsweise mit Ag–Gehalten < 25 m%) liegt ein Phasengemisch von primär erstarrten Cu–Dendriten und dem sich bei ca. 780 °C bildenden Eutektikum (Ag + Cu) vor. Die Abnahme der gegenseitigen Löslichkeiten der beiden Komponenten mit fallender Temperatur bietet die Chance, durch gezielte Wärmebehandlungen Ausscheidungsreaktionen in den übersättigten Cu– bzw. Ag–Kristalliten zu induzieren, wodurch nach hohen Umformgraden infolge der Bildung eines feinlamellaren Cu–Ag–Gefüges die Grundstruktur für hohe Festigkeiten erzeugt werden kann. Tatsächlich lassen sich durch Wärmebehandlungen vor der Kaltumformung oder durch Zwischenglühungen bereits nach Umformgraden von $\eta = 4$ Zugfestigkeiten $\sigma_B > 1$ GPa erzielen. Die gegenwärtig veröffentlichten Spitzenwerte, gemessen an Cu–24 m%Ag–Leitern, hergestellt unter Produktionsbedingungen und im Labor, enthält die folgende Tabelle [61, 63]:

Geometrie [mm]	η $\ln(\frac{A}{A_0})$	$\sigma_B(300\,K)$ [GPa]	$\rho^{-1}(300\,K)$ [%IACS]	$\sigma_B(77\,K)$ [GPa]	$\rho^{-1}(77\,K)$ [%IACS]
4 x 6	4	1,035	79	1,235	246
⌀ 2,5	4	1,150	72	–	–
⌀ 1	6	1,5	65	–	–

Cu–Ag–Nb–Legierungen

Die bisher untersuchten Legierungsvarianten ordnen sich in ihren elektrischen und mechanischen Eigenschaften zwischen den binären Grundvarianten ein. Die ternären Legierungen verfestigen stärker als die binären Cu–Nb–Legierungen, erreichen aber bei gleichen Umformgraden bisher nicht die Festigkeitswerte der optimal geglühten binären Cu–Ag–Legierungen [64, 65].

Cu + Dispersoide

Cu–Al_20_3 (GlidCop) Mikroverbunde auf Cu–Al_2O_3–Basis werden kommerziell hergestellt (GlidCop) und seit mehreren Jahren erfolgreich als Leitermaterial in gepulsten Hochfeldmagneten benutzt [66]. Die Herstellung umfasst die Schritte: Verdüsen einer CuAl–Schmelze, innere Oxidation der Pulver durch Glühen unter oxidierenden Bedingungen und Konsolidierung durch Strangpressen. Die mechanischen und elektrischen Eigenschaften werden vom Al–Gehalt und Umformgrad bestimmt. Typische Eigenschaften bei Raumtemperatur zeigt die nachstehende Tabelle. Gegenwärtig wird versucht, durch Zusatz von Nb die mechanischen Eigenschaften weiter zu verbessern. Angestrebt wird $\sigma_B(300\,K) = 0{,}85\,GPa$.

Material	σ_B [GPa]	$\sigma_{B0,2}$ [GPa]	ϵ_B [%]	ρ^{-1} [%IACS]
AL–15 (0,15 m%Al)	0,44	0,36	27	92
AL–60 (0,60 m%Al)	0,54	0,44	18	78

Cu–TiC Entwicklungsarbeiten zur Herstellung von dispersionsverfestigten Cu–TiC–Verbunden wurden in jüngster Zeit von einer Dresdner Arbeitsgruppe, mit der die Antragsteller in intensivem Kontakt stehen, durchgeführt [67]. Die Herstellung des Pulvers erfolgt durch Reaktionsmahlen einer Cu–Ti–Legierung mit Graphit. Zur Konsolidierung wird ebenfalls das Strangpressen genutzt. An Cu–10 Vol.% TiC–Verbunden wurden Zugfestigkeiten von 1,2 GPa und Leitfähigkeiten im Bereich um 55 %IACS erreicht.

Makroverbunde

Cu — rostfreier CrNi–Stahl Pionierarbeit zur Entwicklung von Makroverbunden auf der Basis Kupferkern–Stahlmantel wurde vor allem im Clarendon Laboratory der Universität Oxford geleistet [68, 69]. Auch im INSA Toulouse sind entsprechende Arbeiten durchgeführt worden, wobei auch der Einfluss von geringen Ag–Zusätzen (0,2 %) zum Kupfer auf die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Leiter nach einer Glühung bei 250 °C (Beanspruchung während der Isolation) untersucht wurde [54]. Der Verbundaufbau erfolgt durch Ziehplattierung (z. B. Start mit ∅25 mm–Rohren). Unterschiedliche Querschnittsanteile von Kern und Mantel können durch unterschiedliche Rohr–Wanddicken eingestellt werden. Als Mantelmaterial wurden die Qualitäten AISI 316L (X2CrNiMo 18/10) oder AISI 304 (X5CrNi 18/9) benutzt. Um die Ziehfähigkeit der austenitischen Stahlhülle zu gewährleisten, sind Rekristallisationsglühungen in den Umformprozess einzufügen. Der Durchmesser vor der letzten Zwischenglühung muss so gewählt werden, dass beim vorgesehenen Endquerschnitt eine maximale Verfestigung des Stahlmantels erreicht wird. Die folgende Tabelle enthält die Daten einiger Cu–Stahl–Verbunde, hergestellt in Oxford [68]:

Leiter (2 x 3 mm²)	$\sigma_B(300\,K)$ [GPa]	$\rho^{-1}(300\,K)$ [%IACS]	$\sigma_B(77\,K)$ [GPa]	$\rho^{-1}(77\,K)$ [%IACS]
AH5.4 (44 % Stahl)	0,846	55,1	1,130	342
AH8 (40 % Stahl)	0,773	60,3	1,032	440
AH9 (42 % Stahl)	0,883	58,2	1,203	425

Die wesentlichen Vorteile dieser Leiter im Vergleich zu Mikroverbunden sind:

1. die um mehr als 30 % höhere Festigkeit bei 77 K gegenüber der 300 K–Festigkeit und,
2. dass dieser Effekt auch beim Pulsbetrieb voll genutzt werden kann.

Durch die örtliche Trennung von Cu und Stahlmantel liegt dessen Temperatur zum Zeitpunkt der höchsten mechanischen Belastung noch im Bereich von 77 K.

Cu–perlitischer Stahl Außergewöhnlich hohe Zugfestigkeiten von größer als 4 GPa können an patentierten hypereutektoiden Stahldrähten nach Umformgraden $\eta > 4$ ($\varnothing < 0,1$ mm) erzielt werden („Klaviersaitendrähte"). In der Literatur wurde ein Maximalwert von 5,7 GPa ($\varnothing = 0,04$ mm) gefunden [70]. Eine der Voraussetzungen für diese hohen Werte ist ein feinlamellares perlitisches Ausgangsgefüge (Lamellenabstand < 100 nm), das vor der Kaltumformung durch eine spezielle Wärmebehandlung (Patentieren) erzeugt werden muss. Da die erzielbaren Festigkeitswerte mit zunehmendem Querschnitt des Glühgutes abnehmen, ist die o. a. Zugfestigkeit für die Stahlhülle vermutlich nicht erreichbar. Erste vielversprechende Versuche zur Herstellung und Umformung von Cu–Perlitstahl–Verbunden wurden von R. Zhou et al. [71] unter Verwendung von

zwei Stahlqualitäten (0,45 %C und 0,70 %C) durchgeführt. Der Verbundaufbau erfolgte über einen Strangpressschritt, die Patentierungsbehandlug wurde an den stranggepressten Cu–Stahl–Verbunden vorgenommen. Nach Umformgraden von $\eta = 4,2$ (Drahtdurchmesser $\approx 1\,\mathrm{mm}$) wurden bei Raumtemperatur folgende Werte gemessen:

$$\sigma_B = 1,67\,\mathrm{GPa} \qquad \rho^{-1} \approx 61,5\,\%\mathrm{IACS}$$

IV.2.2 Vorarbeiten des IFW Dresden

Am Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden (IFW) bestehen langjährige Erfahrungen auf den Gebieten der Phasenbildung und der Eigenschaften neuartiger metallischer Werkstoffe, hergestellt durch mechanisches Legieren und Intensivmahlen. In der Projektgruppe sind zudem umfangreiche Kenntnisse auf dem speziellen Gebiet der Herstellung von CuNb–Verbundwerkstoffen auf pulvermetallurischem Wege vorhanden[55, 56]. Durch die Anwendung der pulvermetallurgischen Techniken konnten in den 70er Jahren neue dispersionsgehärtete nanokristalline Materialien erstmalig hergestellt und charakterisiert werden. Diese Arbeiten umspannen dabei sowohl intermetallische Phasen als Modellsystem für spröde Materialien [72] als auch Edelmetall–Basiswerkstoffe auf Silber– oder Kupferbasis [73]. Es wurde gezeigt, dass die Zugfestigkeit durch eine besonders feine und homogene Verteilung der keramischen Partikel (Karbide oder Oxide) drastisch gesteigert werden kann. Durch den wegen der feinen Verteilung lediglich geringen Volumengehalt an Dispersoiden sinkt die Leitfähigkeit nicht im gleichen Maße ab, vorausgesetzt, dass die durch das Mahlen eingebrachte Menge an Verunreinigungen gering gehalten werden kann. Insgesamt bieten diese Methoden die Chance, die kommerziell über innere Oxidation hergestellte Legierung GlidCop bei vergleichbarer Leitfähigkeit, jedoch höherer Festigkeit, zu substituieren. Erfahrungen zur Herstellung von Makroverbundwerkstoffen wurden im Institut bereits in den 70ger Jahren mit der Entwicklung der konventionellen Supraleiterwerkstoffe auf NbTi– bzw. V_3Ga–Basis erworben. Im ersteren Fall musste die schmelzmetallurgische Herstellung der NbTi–Legierungen (Probleme wie bei CuNb–Legierungen) sowie die Umformung von Cu–NbTi–Mehrkernleiter–Verbunden beherrscht werden. Für die Herstellung von V_3Ga–Mehrkernleitern war die erfolgreiche Umformung von CuGa–V–Verbunden erforderlich. Die hierbei gewonnen Erfahrungen fließen gegenwärtig in die Entwicklungsarbeiten zur Herstellung von Multifilamentbändern des Hoch–T_c–Supraleiter–Verbundes BiPbSrCaCuO – Ag, die in Längen bis 500 m gefertigt werden, ein [74]. Es liegen auch umfangreiche Erfahrungen zum Ziehen hochfester Stähle mit Festigkeiten größer als 2 GPa vor [75]. Dies schließt die Lösung von zunehmenden Problemen der Schmierung bei der Kaltumformung ein. Bis heute werden im Institut Spezialschmierstoffe für das Ziehen von hochfesten, schwerumformbaren Werkstoffen gezielt entwickelt [76]. Sie dienten u.a. zur Herstellung von Nb–Feindraht. Das IFW

verfügt über eine komplette Einrichtung zum Schmelzen von metallischen Werkstoffen (Induktions–, Vakuumlichtbogen–, Elektronenstrahl–Öfen), so dass die Ausgangslegierungen selbst hergestellt und optimiert werden können. Die notwendigen Umform–Einrichtungen, wie Kaliberwalzwerke, Hämmermaschinen, Stangen– und Rundzüge, sind vorhanden bzw. können bei langjährigen Kooperationspartnern im Raum Dresden genutzt werden. Dies gilt auch für entsprechende Glüheinrichtungen. Schließlich verfügt das IFW über alle üblichen Verfahren zur Struktur– und Gefügecharakterisierung von Werkstoffen, über ein modern und komplett eingerichtetes Werkstoffprüftechnikum zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften sowie über entsprechende Messeinrichtungen zur Bestimmung des temperaturabhängigen elektrischen Widerstandes.

IV.2.3 Arbeitsprogramm

Bezug nehmend auf die anspruchsvolle Gesamtzielstellung des Vorhabens sowie auf den bereits international erarbeiteten Kenntnisstand muss sich die Materialentwicklung vorrangig auf Leiterwerkstoffe mit höchsten Festigkeitseigenschaften konzentrieren. Nach [77] ist die bei einem magnetischen Feld von 100 T auftretende Spannung im Bereich von 4 GPa. Wie gezeigt wurde, ist dies auch etwa die gegenwärtig erreichbare Grenze bei hochverformten perlitischen Stählen. Aus dieser Sicht ist zu erwarten, dass ein Verbundleiter mit einer Leitfähigkeit größer als 50 %IACS eine Festigkeit von 2 GPa nicht überschreiten wird. Zur Beherrschung der o. a. Spannung müssen deshalb wahrscheinlich sowohl der Querschnittsanteil des Stahls im Verbund weiter erhöht als auch zusätzlich höchstfeste Verstärkerwerkstoffe (Zylonfaser, perlitischer Stahldraht) benutzt werden. Beim gegenwärtigen internationalen Stand ist für Leiterquerschnitte größer oder gleich 6 mm^2 die Erzielung von Festigkeiten $\sigma_B(300K) > 1,5$ GPa bei Leitfähigkeiten $\rho^{-1} > 65\,\%$IACS das Nahziel, bevor die 2 GPa–Grenze angepeilt werden kann. Die Realisierung der eben genannten Parameter ist an die entscheidende „Nebenbedingung“ gebunden, dass sich nämlich die spezielle Geometrie der Leiter durch die Anwendung der verschiedenen Umformverfahren, wie Strangpressen, Walzen, Hämmern und Ziehen, rissfrei mit den erforderlichen Querschnitten und Längen herstellen lässt. Dies schließt für jede der nachfolgend genannten Materialklassen entsprechende Grundlagenuntersuchungen zur Optimierung des Verbundaufbaus, der Gefügestrukturen und der notwendigen Umformschritte ein. Im Kapitel IV.2.2 wurde bereits dargestellt, dass im IFW neben umfangreichen Erfahrungen, gewonnen mit vergleichbaren Werkstoffen, auch die materiellen Voraussetzungen zur Herstellung und umfassenden Charakterisierung der Leiter vorhanden sind. Bezüglich der Messung der mechanischen Eigenschaften ist eine Erweiterung der Messmöglichkeit bis 77 K im Aufbau. Es ist weiterhin erforderlich, für Testversuche, aber auch für die Herstellung konkreter Probespulen, eine Spulenwickelmaschine zu konstruieren und aufzubauen. Dabei können die Erfahrungen in anderen Hochfeldlaboratorien genutzt werden, insbesondere die des NHMFL Thallahassee (USA), mit dem ein Koope-

rationsvertrag besteht. Die im Rahmen des Vorprojektes (Anhang B, S. 117) begonnenen Forschungs– und Entwicklungsarbeiten sollen sich zunächst auf folgende Materialklassen konzentrieren:

Mikroverbunde

Cu–Ag–Mikroverbunde

Wie gezeigt, lassen sich mit dieser Materialklasse bereits nach Umformgraden $\eta = 6$ Zugfestigkeiten von ca. 1,5 GPa erzielen. Diese im Labor erreichten Werte sind zunächst nachzuvollziehen und vor allem aber auf Leiterquerschnitte größer gleich 6 mm^2 auszudehnen. Dabei sind die Einflüsse der Parameter des Ausgangsgefüges, der Zusammensetzung sowie der notwendigen Wärmebehandlungen auf das Eigenschaftsbild zu untersuchen. Der Schlüssel zum Verständnis der mechanischen Eigenschaften und damit für die Chance ihrer gezielten Beeinflussung wird im Verständnis der mikrostrukturellen Veränderungen während des Glüh– und Umformregimes zu suchen sein. Die Beherrschung der Herstellung hochfester Cu–Ag–Verbunde ist darüber hinaus die Voraussetzung für eine spätere Entwicklung von CuAg–Stahl–Verbunden.

Dipersionsgehärtete Legierungen auf Basis von Cu–TiC und Cu–Nb

Es ist das Potential dieser durch mechanisches Legierungen hergestellter Mikroverbunde für den Einsatz als Leiterwerkstoff zu erkunden. Hierbei sind insbesondere die Einflüsse der Variation des Volumenanteils der Karbide sowie von Verunreinigungen an Eisen bzw. Sauerstoff, die während des Mahlvorganges bzw. des Pulverhandlings von den Legierungen aufgenommen werden, auf die Gefügeentwicklung sowie die mechanischen und elektrischen Eigenschaften zu untersuchen. Ein weiteres wichtiges Kriterium ist natürlich die Umformfähigkeit des durch Strangpressen konsolidierten Verbundes. Ein Maßstab für die Eignung dieser Legierungen wird der Vergleich mit den bereits eingeführten GlidCop–Legierungen (Cu–Al_2O_3) sein.

Mikroverbunde

Cu–Stahl–Makroverbunde

Es ist die Herstellbarkeit von hochfesten Cu–Verbunden mit perlitischen Stählen, mit martensitaushärtenden Stählen (Maraging) sowie mit stickstoffhaltigen austenitischen Stählen zu überprüfen. Bezüglich des Verbundaufbaus wird zunächst die Variante des Cu–Kerns mit Stahlmantel bevorzugt. Eine weitere Option ist ein Querschnitt mit Stahlseelen in einer Cu–Matrix, wobei die Seelen im Umfangsbereich angeordnet sind (im Zentrum nur Cu). Bei der Benutzung von perlitischen Stählen ist ein Grundproblem die Erzeugung eines feinlamellaren Perlits durch die sog. Patentierungsbehandlung. Das dabei

einzuhaltende kritische Temperatur–Zeit–Regime erfordert wahrscheinlich, dass diese Behandlung vor dem eigentlichen Verbundaufbau durchgeführt werden muss. Erste Erfahrungen zur Umformung derartiger Verbunde sollen zunächst mit einem unlegierten Stahl mit 0,6 %C gewonnen werden. Höhere C–Gehalte (bis ca. 1 %) sowie geringe Cr–Zusätze lassen geringere Lamellenabstände im Perlit und auch gleichmäßigeres Perlitgefüge und damit noch bessere mechanische Kennwerte erwarten. Bei der Herstellung von Maraging–Cu–Verbunden ist die Benutzung verschiedener Maraging–Grundlegierungen möglich. Es soll zunächst mit dem 18 %Ni–Typ X2NiCoMoTi 18 12 4 (Werkstoff–Nr. 1.6356) begonnen werden, der nach Kaltumformung und Aushärtung bei ca. 500 °C Festigkeiten bis ca. 3 GPa erwarten lässt.

Mit der Verwendung stickstoffhaltiger austenitischer Stähle soll überprüft werden, ob das mit konventionellen austenitischen Stählen erreichte Niveau der mechanischen Eigenschaften noch wesentlich angehoben werden kann. Offen ist, ob sich die Ausscheidung von Chromnitrid während der notwendigen Zwischenglühungen im Umformprozess vermeiden lässt, da im Verbund die maximal mögliche Rekristallisationstemperatur vom Schmelzpunkt des Kupfers begrenzt wird.

Die während der Laufzeit des Vorprojektes erarbeiteten eigenen Erkenntnisse sollen unter Berücksichtigung des bis dahin erreichten internationalen Standes zu einer weiteren Konzentration der Forschungsaktivitäten führen.

Die Möglichkeit, die für den Erfolg eines Hochfeldlabors mitentscheidende Materialentwicklung im eigenen Haus und dabei aufbauend auf langjähriger entsprechender Erfahrung durchführen zu können, erscheint als ein wesentlicher Vorteil des Dresdner Vorhabens. Trotz der Erfahrungen und Möglichkeiten im eigenen Haus sollen die Entwicklungen natürlich in Abstimmung mit anderen, an ähnlichen Problemen arbeitenden Gruppen, insbesondere mit den Hochfeldlabors in Tallahassee (USA) und Toulouse (Frankreich), erfolgen. Für die Materialentwicklung und den Bau von Testspulen werden erhebliche Kosten anfallen, die in Tabelle VI.4 (S. 110) berücksichtigt sind.

IV.3 Energieversorgung

Im Folgenden werden die für das Dresdener Hochfeldlabor in Frage kommenden Verfahren zur Energieversorgung hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit und Eignung verglichen. Dabei spielen sowohl die Kostenfrage als auch Fragen der Realisierbarkeit am geplanten Standort Rossendorf sowie die technischen Parameter der Verfahren die entscheidenden Rollen. Die Energiequelle muss eine hohe Energie in kurzer Zeit an den Hochfeldmagneten übertragen, also hohe Leistungen abgeben. Zur Magnetfelderzeugung ist es erforderlich, sowohl die im magnetischen Feld selbst enthaltene Energie als auch die bei der Erzeugung auftretenden Verluste zur Verfügung zu stellen. Die Transferzeit soll deswegen kurz sein, um Verluste gering zu halten. Die hohen Energien können i. Allg. dem Netz nicht direkt entnommen werden, sondern nur unter Zwischenschaltung eines Energiespeichers (siehe unten). Alle Verfahren, die nur mit Explosivschaltern betrieben werden können, haben für die Verfügbarkeit des Labors für viele Nutzer entscheidende Nachteile. Um vielseitige Experimente durchführen zu können, ist es wesentlich, dass viele Pulse erzeugt werden können und dass der zeitliche Feldverlauf (Anstieg, Abfall, Pulsdauer) variiert werden kann. Die Anlage soll möglichst mit dem in Rossendorf vorhandenen Netzanschluss betrieben werden können. Die z. T. für die Elektroversorgung benötigten sehr schweren Geräte müssen auch ohne Gleisanschluss in das Forschungszentrum Rossendorf transportiert werden können. Um den Energiebedarf und die Spulengröße zu optimieren, muss man sowohl die Abmessungen der Feldspule (Bohrungsdurchmesser) sowie die Dauer der Bereitstellung des Feldes klein halten. Dabei spielt auch die Stärke des wickelbaren Drahtes eine Rolle. Da man sich auf technisch sinnvolle Spannungen und Ströme bei der Energieübergabe beschränken muss, ist eine hohe Energie im Magnetfeld immer auch mit einer relativ großen Pulsdauer verbunden, die wiederum zu höheren Verlustenergien führen kann. Andererseits sind für bestimmte Experimente lange Pulsdauern auch zwingend erforderlich. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf folgende Verfahren:

1. Netz mit oder ohne Speicherspule
2. Generator mit oder ohne Speicherspule
3. Batterie und Speicherspule
4. Homopolargenerator und Speichertransformator
5. Kondensatorbank

aus denen die für das hier vorgeschlagene Projekt optimale Lösung erarbeitet wird. Die Energiespeicherung in supraleitenden Spulen erscheint noch nicht ausgereift genug zu sein, um sie hier zu betrachten. Es gibt erste Versuchsanlagen für supraleitende pulsbetriebene Speicher, die gespeicherten Energien betragen aber nur etwa 1 MJ.

Die bisherigen Diskussionen mit international anerkannten Experten haben ergeben, dass Felder von 100 T mit einer äußeren Spule mit hoher magnetischer Energie und großer Pulszeit und mindestens einer inneren Spule mit deutlich kleinerer magnetischer Energie und kleinerer Pulszeit mit einem vertretbaren Energieaufwand erreicht werden können (siehe Kap. IV.1). Für Magnetfeldanlagen mit äußeren und inneren Spulen kommt jedes der untersuchten Verfahren der Energiebereitstellung oder auch eine Kombination aus ihnen in Frage. Die geringe elektromagnetische Kopplung der Spulen (typisch 0,2) wird bei der Simulation berücksichtigt. Das wesentliche Problem bei der Energieversorgung bereitet nur die Außenspule, die eine hohe Energie erfordert. Als sehr nützlich für die Beurteilung der in Frage kommenden Schaltungen erwies sich die Schaltungssimulation mit einem PC. Neben einem tieferen Verständnis der Wirkungsweise liefert das Verfahren Antworten auf folgende wichtige Fragen:

- Beanspruchungen der Schalter sowie ihre Dimensionierung
- Berechnung der erforderlichen Primärenergie für die benötigte Energie in der Hochfeldspule. Damit ist eine Beurteilung der Effizienz der Energieübertragung möglich.
- Berechnung der erforderlichen Leistung der Speisequelle
- Untersuchung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen, wie z. B. von Strombegrenzungsdrosseln
- Möglichkeit der Bereitstellung unterschiedlicher zeitlicher Feldverläufe
- Berechnung der Verlustenergien in Spulen und Schaltern
- Beurteilung des Einflusses der gegenseitigen Kopplung bei Anordnungen mit mehreren Spulen.
- Berechnung der Auswirkungen von Streuinduktivitäten und Erdschleifen

Als Simulationsprogramm zur Berechnung der in Frage kommenden Energieversorgungsanlagen wurde PSPICE [87] gewählt. Es ermöglicht auch die Simulation von Anordnungen mit äußeren und inneren Magneten unter Berücksichtigung der Kopplung der Spulen. Damit steht ein Verfahren zur genauen Dimensionierung und Vorausberechnung einer Energieversorgungsanlage für jedes beliebige Magnetdesign zur Verfügung.

Die nachfolgenden Überlegungen sollen verdeutlichen, dass der Entwurf der Spule und der Energieversorgungsanlage gemeinsam erfolgen muss und dass die hier berechneten elektrischen Parameter, insbesondere die Leistungsangabe, wegen der Begrenzung der Spannung der Energieversorgungsanlage nur durch einen anderen Spulenentwurf verändert werden können.

Die Energie, die die Versorgungsanlage bei einem Puls bereitstellen muss, setzt sich zusammen aus der erforderlichen Energie des zu erzeugenden magnetischen Feldes $W_{magn} = \frac{1}{2}LI^2$, der Verlustenergie der Spule $W_{verlust} = \int I^2 R\, dt$, dem Energiebedarf $W^*_{magn} = \frac{1}{2}L^*I^2$ von evtl. vorgesehenen Drosseln zur Kurzschlussstrombegrenzung sowie zusätzlicher Verlustenergien, die z. B. in den Leitungen auftreten. Die Energie des Magnetfeldes und die Summe der Verlustenergien liegen nach den Erfahrungen aus bisherigen Spulenentwürfen unabhängig vom Material in der gleichen Größenordnung.

Der Leistungsbedarf, der bei einem Puls entsteht, ergibt sich dann aus der Zeit, in der die erforderliche Gesamtenergie in die Spule transferiert werden muss. Je kürzer die Transferzeit ist, desto geringer ist die für die Erwärmung der Spule maßgebende Verlustenergie, umso größer ist aber auch die erforderliche Leistung der Energieversorgungsanlage. Welche Leistung die Energieversorgungsanlage tatsächlich an die Hochfeldspule abgeben kann, wird wegen der begrenzten elektrischen Spannung wiederum durch die Parameter der Spule selbst bestimmt.

Eine Vergleichsrechnung ergab beispielsweise für eine Kupferspule mit der Energieversorgung durch einen Generator mit einer Energie von 250 MJ und einer Spannung von 10 kV, deren Induktivität durch Wahl des Drahtquerschnittes im Verhältnis 1:10 geändert wurde, folgendes Resultat:

	Spule 1	**Spule 2**
Induktivität	400 mH	40 mH
Zeikonstante bei 77 K	2,16 s	2,16 s
Magnetische Energie	30 MJ	30 MJ
Transferzeit	0,6 s	0,29 s
Verlustenergie bei 77 K	13,5 MJ	3 MJ
Leistungsbedarf	105 MW	270 MW

Im Beispiel wurde nur durch Vergrößerung des Drahtquerschnittes erreicht, dass die Verlustenergie auf etwa ein Viertel verringert wird. Der Leistungsbedarf steigt dabei auf das Zweieinhalbfache. Wenn Materialien mit höheren spezifischen Widerständen zur Anwendung kommen, muss die Transferzeit zur Verlustbegrenzung weiter verringert werden. Damit steigt die erforderliche Leistung weiter an. Das Beispiel macht deutlich, dass der Leistungsbedarf sehr von der Festlegung der Spulenparameter und vom Drahtmaterial abhängt. Damit erklären sich die differierenden Angaben in den internationalen Veröffentlichungen. Der Entwurf der Spule und der Energieversorgungsanlage muss gemeinsam erfolgen. Dabei muss unter Berücksichtigung der Begrenzungen in der Spule (Erwärmung und Kräfte) und in der Energieversorgungsanlage (Spannung und Strom) eine optimale Gesamtlösung gefunden werden.

	Spule 1 (innen)	Spule 2 (außen)
Feldbeitrag B_0	46 T	54 T
Zeitkonstante[§] **(77 K)**	29 ms	750 ms
magnetische Energie	0,14 MJ	24,6 MJ
Induktivität	1,54 mH	15,4 mH
Widerstand (77 K)	53 mΩ	20,4 mΩ

Tabelle IV.6: Parameter für die Simulation des 100–T–Zwei–Spulensystems (vgl. Kap.IV.1.4, insb. Tab.IV.3, S.54)

Voraussetzungen:

- Prinzipiell muss vor der Festlegung der Details der Energieversorgung der Spulenaufbau festliegen. Außerdem muss man wiederum beim Spulendesign die gewählte Elektroversorgung berücksichtigen, um im Nachhinein aufwendige Anpassungseinheiten wie Transformatoren oder Speicherspulen oder Änderungen an ihnen zu vermeiden. So ist es beispielsweise bei der Generatorvariante sinnvoll zu berücksichtigen, dass nicht wesentlich mehr als 10 kV zur Verfügung stehen, da Generatoren mit höherer Spannung kaum gebaut werden. Bei kleinerer Spannung muss man größere Ströme zulassen und die Spule mit einer kleineren Induktivität wickeln. Das führt zu Drähten mit großen Querschnitten, die dann nicht mehr ohne weiteres wickelbar sind. Das gilt ganz besonders für das Verfahren mit Speicherbatterie.

- Für die ersten orientierenden Untersuchungen mit dem Ziel des Vergleichs der in Frage kommenden Varianten wurden folgende Annahmen getroffen:

  1. Der Simulation wurde generell die bei der Erarbeitung des Proposals u. a. berechnete Anordnung von zwei konzentrischen Spulen zur Erreichung eines Feldes von 100 T zugrunde gelegt. Die in der Simulation verwendeten Daten sind in der folgenden Tabelle IV.6 zusammengefasst.
  2. Als Schalter wird eine reale Diode in Reihe mit einem Ein- und einem Ausschalter mit einem Durchlasswiderstand von 0,01 Ω als Nachbildung eines Thyristorschalters verwendet.
  3. Die Temperaturabhängigkeit der Widerstände der Hochfeldspulen durch die adiabatische Erwärmung wird durch ein lineares PSPICE–Modell berücksichtigt. Die Parameter des Modells werden aus den Ergebnissen der genauen Spulenberechnung bestimmt. Ansonsten wurden die nicht idealen Eigenschaften der Kapazitäten und Induktivitäten sowie der Einfluss der erforderlichen Beschaltungselemen-

[§] nicht Pulsdauer!

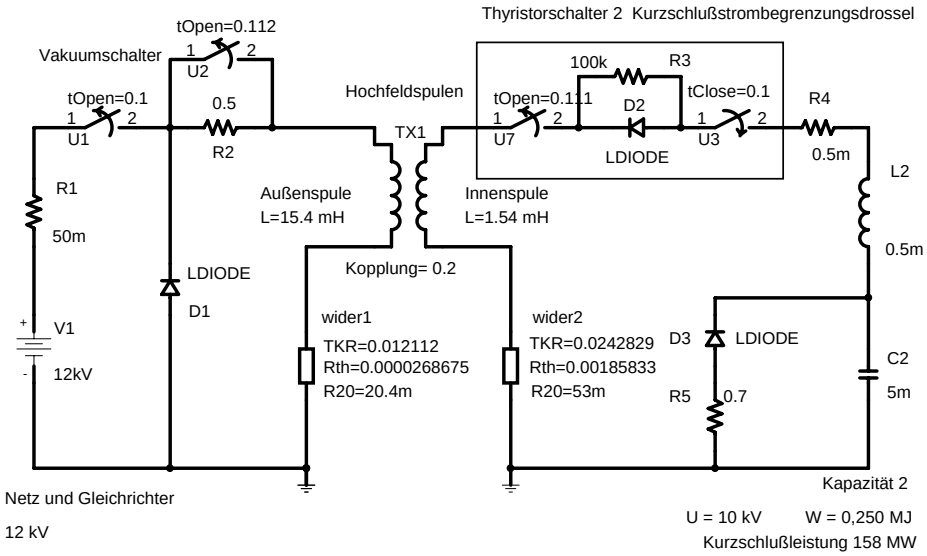
te bei dem vorliegendem Variantenvergleich nicht berücksichtigt. Zusätzliche Energie- und Leistungsanteile sind durch den Skineffekt und die Leitungsverluste zu erwarten. Die Drosseln zur Begrenzung der Kurzschlussleistung bei der Energieversorgung durch Kondensatoren wurden bei der Simulation berücksichtigt.

4. Durch die konsistente Simulation sind die Energieversorgungsverfahren gut vergleichbar. Es soll jedoch nicht verschwiegen werden, dass bei den Verfahren mit relativ geringer Spannung (Batterie, Homopolargenerator) etwas bessere Ergebnisse durch einen gezielt optimierten Spulenentwurf (insbesondere Spulen mit kleineren Induktivitäten) erreicht werden können. Die Energieversorgungsanlagen wurden durch Wahl der Spannung der gewählten Spulenanordnung so angepasst, dass etwa die zulässige Erwärmung der Hochfeldspulen im Bereich 300 ... 400 K erreicht wird.

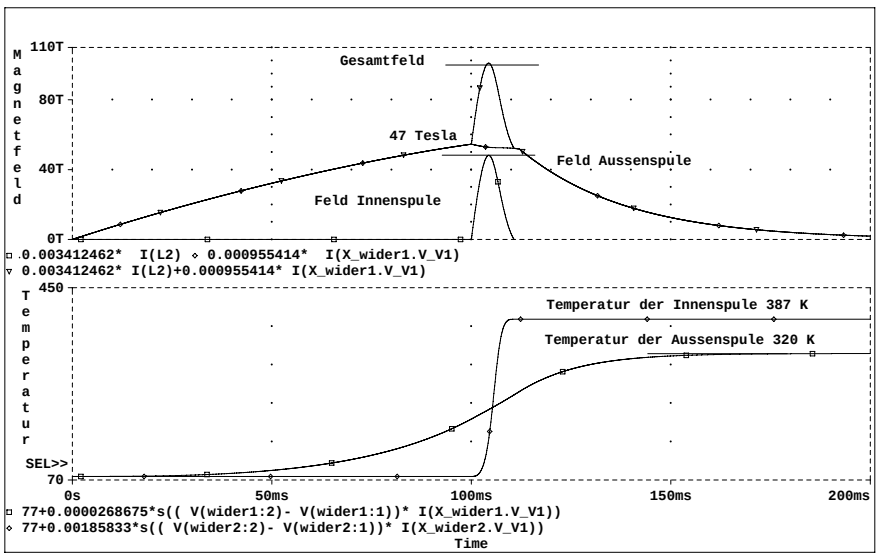
5. Die innere Spule wird in allen Varianten mit einem Kondensator als Energiespeicher betrieben.

IV.3.1 Pulsanlage, gespeist aus dem Netz

Die direkte Netzeinspeisung ist eine ökonomische Lösung, wenn die Hochfeldspule direkt, d. h. ohne zusätzliche induktive Speicher, angeschlossen werden kann. Die Simulation dieses Verfahrens ist in Abbildung IV.5 dargestellt. Es wurde eine Generatorspannung von 12 kV gewählt, um die Erwärmung der Außenspule auf ca. 350 K zu begrenzen. Bei einer kleineren Generatorspannung wird die Pulsanstiegszeit größer und die Erwärmung ist unzulässig hoch. Es ist jedoch zusätzlich erforderlich, nach dem Puls die Spule über einen Widerstand schnell zu entladen, um die Energie schnell abzubauen. Das Verfahren kommt mit einem Stromrichter (ca. 1 Mio. DM) und ggf. mit einem Transformator (ca. 3 Mio. DM) aus. Die direkte Erregung der Hochfeldspule führt aber in Rossendorf zu einer unzulässigen Impulsbelastung des Netzpunktes, da eine Spitzenleistung von ca. 685 MW erforderlich ist. Nach einem Gutachten des Versorgers ESAG Dresden (Anhang D.1, S. 130) muss die Leistung einer möglichen Einspeisung in Rossendorf auf 50 MW begrenzt bleiben. Mit einem leistungsfähigen Netzeinspeisepunkt könnte über einen Transformator und einen Gleichrichter eine Speicherspule aufgeladen werden, die dann auf die Hochfeldspule geschaltet wird. Es sind dann nur kleinere Leistungen der Netzeinspeisung erforderlich, weil der Aufladevorgang der Speicherspule auf ca. 3 s verlängert werden kann. Nach der gewünschten Experimentzeit kann der Vorgang mit einem Widerstand im Entladekreis der Hochfeldspule abgebrochen werden. Es sind **leistungsfähige Ausschalter** erforderlich. Im Wesentlichen gibt es zwei Verfahren für die induktive Energiespeicherung:

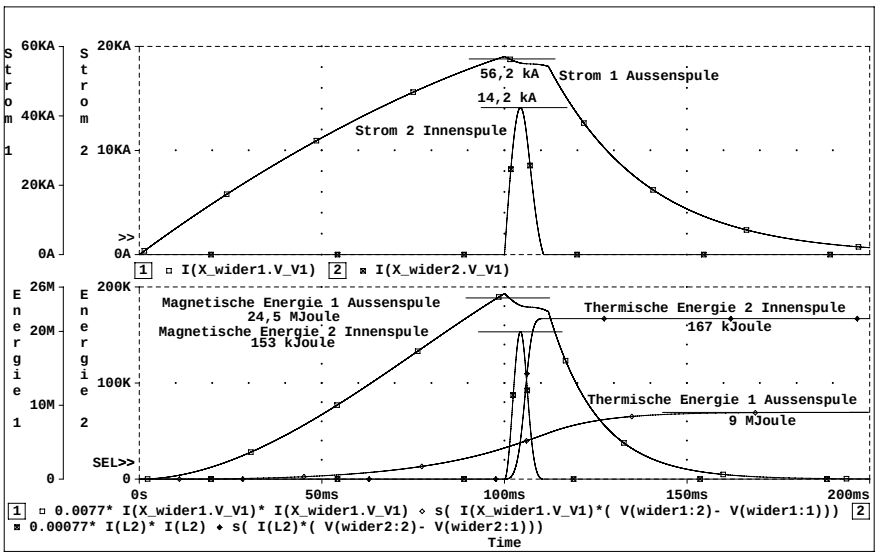


(a) Schaltungsschema

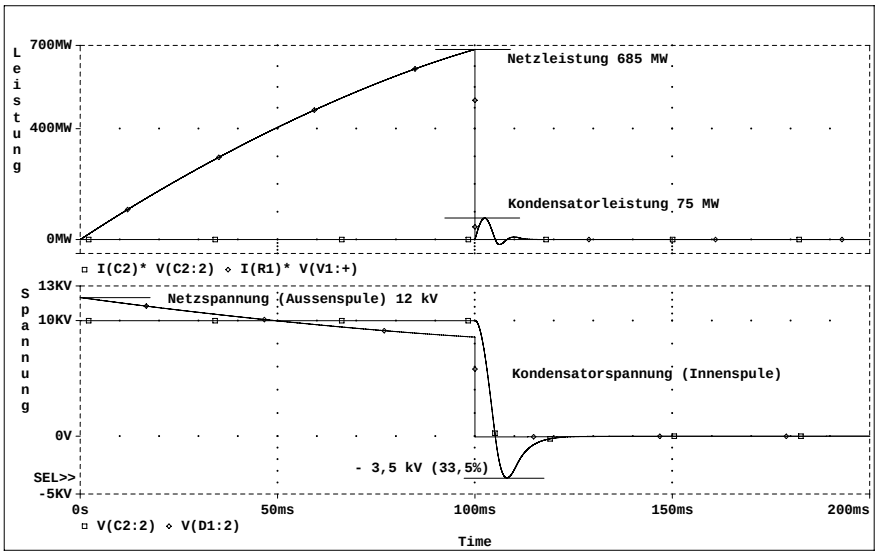


(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen

Abbildung IV.5: Pulsanlage gespeist aus dem Netz:
Energieversorgung der Außenspule aus dem Netz; Innenspule mit einem Kondensator



(c) Strom und magnetische Energie der Spulen



(d) Leistung und Spannung der Energieversorger

Abbildung IV.5: Pulsanlage gespeist aus dem Netz:
Energieversorgung der Außenspule aus dem Netz; Innenspule mit einem Kondensator

Induktive Energiespeicherung ohne Reihen– / Parallelschaltung

Dieses Verfahren wird später bei dem Verfahren mit Homopolargenerator demonstriert (Kap. IV.3.4, insb. Abb. IV.8). Um möglichst viel Energie in die Hochfeldspule zu übertragen, müssen die Induktivitäten der Speicherspule und der Hochfeldspule etwa gleich sein. Dann können theoretisch maximal 25 % der in der Speicherspule enthaltenen Energie in die Hochfeldspule übertragen werden. Durch Simulation ergab sich beispielsweise für den verwendeten Magneten, dass die Speicherinduktivität auf eine Energie von 134 MJ aufgeladen werden muss, damit in der Hochfeldspule ein Strom von 56,4 kA und eine magnetische Energie von 24,5 MJ aufgebaut werden (18,3 %). Wenn die Speicherspule in 3 s aufgeladen werden soll, ist dann eine maximale Netzleistung von 117,5 MW erforderlich. Das ist mit einem in Rossendorf zu bauenden Netzpunkt ebenfalls nicht zu realisieren.

Induktive Energiespeicherung mit Reihen– / Parallelschaltung

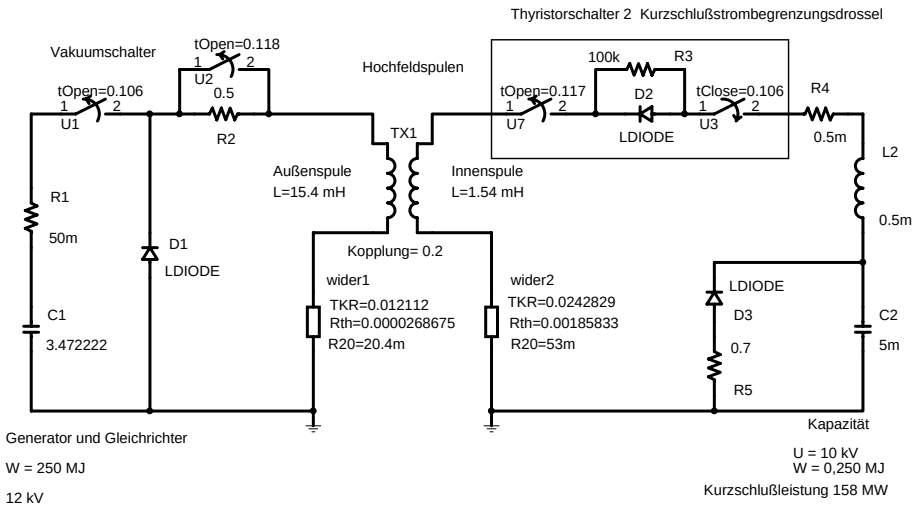
Dieses Verfahren wird bei dem Verfahren mit Batteriespeisung (Kap. IV.3.3, insb. Abb. IV.7) demonstriert. Die Speicherspule muss aus zwei Anteilen mit jeweils der Induktivität der Hochfeldspule bestehen, die zunächst in Reihe geschaltet sind und dann in die Parallelschaltung umgruppiert werden. Abbildung IV.7 zeigt deutlich den Energieschub, der durch die Umgruppierung aus der Reihen- in die Parallelschaltung entsteht. Die Speicherspule muss nun bei der gleichen Energie in der Hochfeldspule nur auf 74,5 MJ aufgeladen werden. Das bedeutet, dass 30 % der Energie der Speicherspule in die Hochfeldspule übertragen werden. Kratz [78] gibt 35 % für ein anderes Spulendesign an. Die Simulation des Aufladevorgangs ergab, dass eine maximale Netzleistung von 91,5 MW erforderlich ist, wenn wiederum die Speicherspule in 3 s aufgeladen wird. Auch diese Leistung kann in Rossendorf nicht zur Verfügung gestellt werden.

Notwendige Investitionskosten

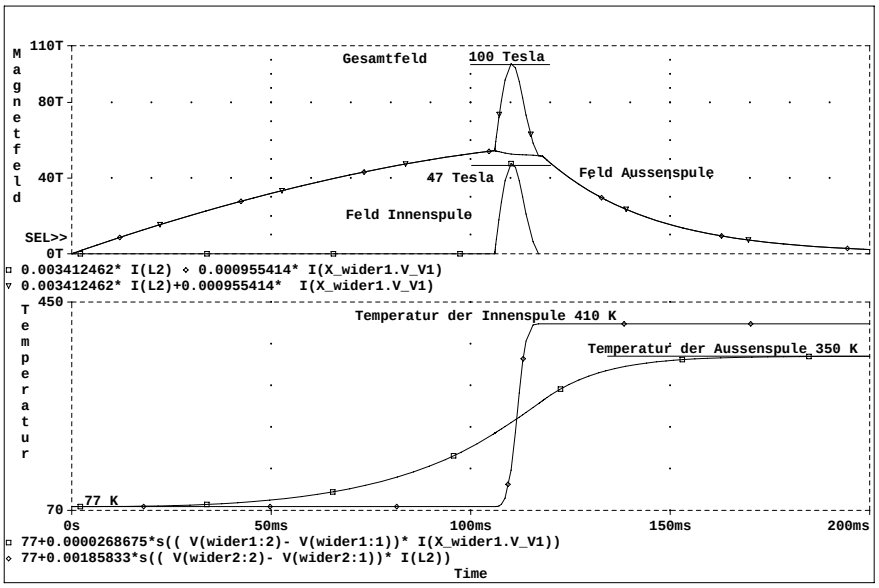
Von der Energieversorgung Sachsen Ost AG wurde ein Angebot über einen möglichen Netzeinspeisepunkt im FZR, ausgehend von der ca. 1 km entfernten 110–kV–Leitung, übergeben (s. Anhang D.1, S. 130). Es ist nur eine Leistung von 50 – 55 MW zu realisieren. Die Kosten für den 110–kV–Anschluss betragen ca. 16 Mio. DM.

IV.3.2 Pulsanlage mit einem Generator

Generatoren können als mechanische Speicher eine erhebliche Energiemenge speichern, die aber nur zum Teil wieder als elektrische Energie pulsförmig entnommen werden kann. Der Pulsbetrieb eines Generators kann über sein Magnetfeld oder direkt über den Ankerkreis gesteuert werden. Als Steuerelemente kommen sowohl 6– oder 12–pulsige Stromrichter oder Schalter in Verbindung

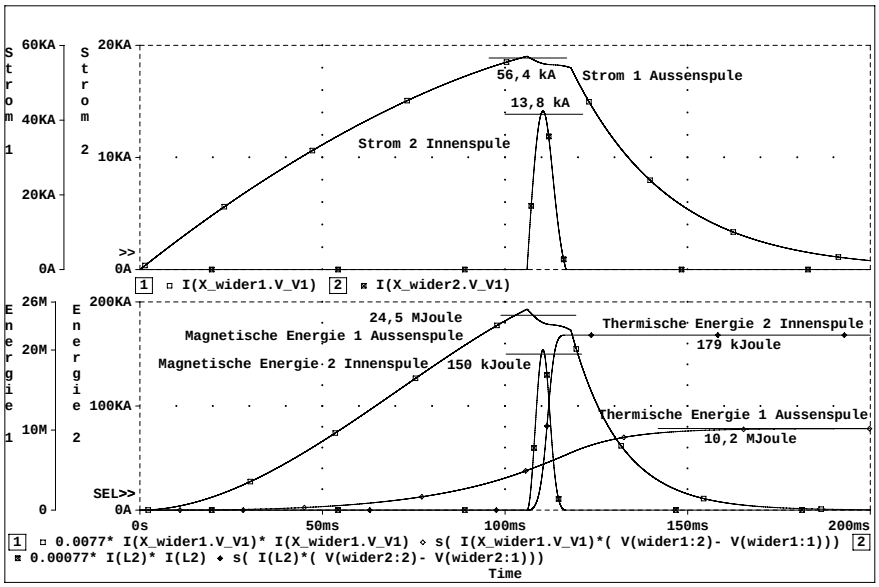


(a) Schaltungsschema

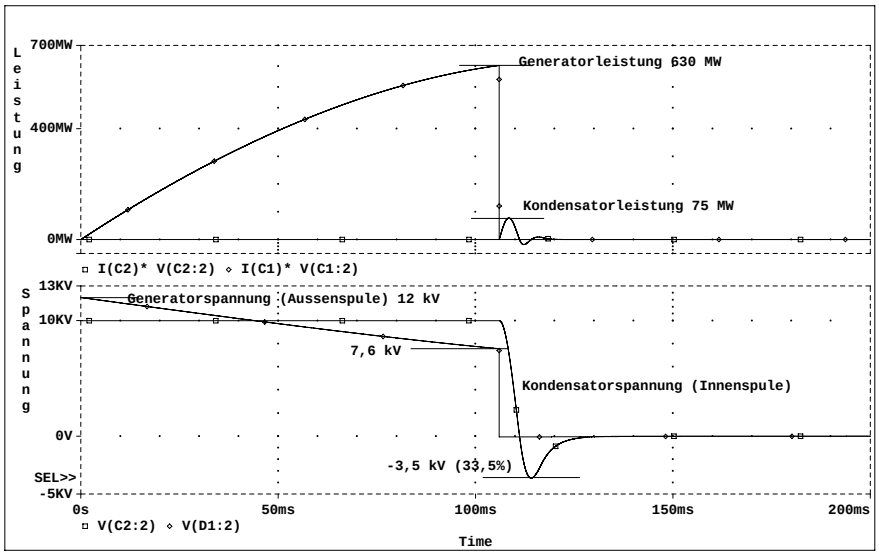


(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen

Abbildung IV.6: Pulsanlage gespeist mit einem Generator:
Energieversorgung der Außenspule mit einem Generator;
Innenspule mit einem Kondensator



(c) Strom und magnetische Energie der Spulen



(d) Leistung und Spannung der Energieversorger

Abbildung IV.6: Pulsanlage gespeist mit einem Generator:
Energieversorgung der Außenspule mit einem Generator;
Innenspule mit einem Kondensator

mit einem ungesteuerten Gleichrichter in Frage. Mit Stromrichtern kann man die Pulsform regeln und die Energie der Hochfeldspule generatorisch zurückspeisen. Diese Geräte sind jedoch für die in Frage kommenden Spannungen und Ströme sehr aufwendig und teuer. Sie erfordern eine Aufteilung der Hochfeldspule in parallele Zweige. Es ist zu befürchten, dass die Messungen bei der Pulsformregelung durch Oberwellen erschwert werden. Das zwingt in der Regel zur Anwendung höherpulsiger Schaltungen mit entsprechend teuren Transformatoren. Deshalb sollte mit Schaltern gearbeitet werden, z. B. mit den zwangskommutierten Vakuumschaltern der Firma Siemens, die für ca. 1000 Pulse wartungsfrei sind. Die Experimente werden in der störungsarmen Zeit zwischen den Schaltvorgängen zur Aufladung und Entladung der Hochfeldspule durchgeführt. Bei einem Generator muss man auf alle Fälle auch versuchen, ohne zusätzliche Speicherspulen auszukommen, obwohl natürlich beide bei der Pulsanlage mit Netz erläuterten Verfahren mit Speicherspule möglich sind.

- Generatoren benötigen als Zusatzaggregate die Antriebseinheit, die zur Beschleunigung auf die Betriebsdrehzahl dient, und das Erregersystem. Anlagen, bei denen der Generator im Motorbetrieb ohne zusätzliche Antriebseinheit selbst hochgefahren wird, sind nach Auskunft bei der Firma Siemens bereits gebaut worden. Sie vermeiden den zusätzlichen Aufwand eines Antriebsaggregats.
- Generatoren haben einen hohen Wartungsbedarf.
- Generatoren können für lange Pulsdauern von ca. 3 s für die äußere Spule unserer Anwendung als Energiespeicher dienen.
- Durch die Thyristorregelung der Pulsform entstehen immer Oberwellen, die transformatorisch auf die innere Spule übertragen werden.

In Abbildung IV.6 wurde das Verfahren ohne zusätzliche Speicherspule untersucht. Der Generator wurde für die Simulation durch einen Kondensator mit gleichem Energieinhalt ersetzt. In diesem Fall ist wie bei der direkten Netzspeisung eine Generatorleistung von ca. 630 MW und eine im Generator gespeicherte mechanische Energie von ca. 250 MJ erforderlich.

Notwendige Investitionskosten

ABB Industrie AG Von der Firma ABB Industrie AG liegt ein Budgetangebot für eine Pulsanlage inklusive Generatoren, Trafos und Gleichrichter vor (s. Anhang D.2, S. 132 und Anhang D.3, S. 133). Es werden folgende Preise genannt:

100 MW, 300 MJ	20 Mio. CHF = 25 Mio. DM
200 MW, 600 MJ	30 Mio. CHF = 37,5 Mio. DM
400 MW, 1200 MJ	43 Mio. CHF = 53,8 Mio. DM

Siemens AG Von der Firma Siemens wurden einige Pulsanlagen geliefert, die als Anhaltspunkt dienen können, wenn der Zeitpunkt der Preisbildung berücksichtigt wird. Alle Beispiele weisen eine hohe gespeicherte Energie aus. Sie sind aber wegen der zu geringen Generatorspitzenleistung für unser Vorhaben nicht ausreichend. Mündlich wurde uns noch folgende Anlage genannt, deren Preis von ca. 19 Mio. DM heute aber auch nicht mehr gültig ist:

750 MW, 240 MJ für 3 s (mit Schwungrad)

Damit sind bei ABB das Angebot mit der größten Leistung und bei Siemens evtl. die genannte Anlage geeignet. Insgesamt kann mit einem Platzbedarf für die größere Anlage von ca. 150 m^2 gerechnet werden.

Bewertung

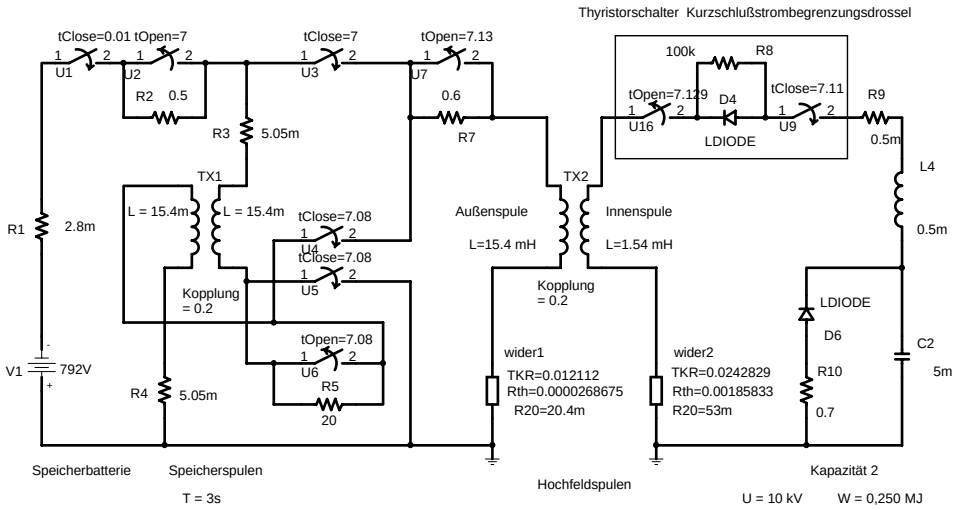
Es muss festgestellt werden, dass die Generatorvariante aus Preisgründen nicht in Frage kommt. Die Nachnutzung preisgünstiger gebrauchter Generatoren wurde geprüft (KKW Greifswald). Da es sich um ältere russische Geräte handelt, sind jedoch Schwierigkeiten bei der Genehmigung des Einsatzes in einer neuen Anlage zu erwarten. Der Transport nach Rossendorf würde teuer, da kein direkter Bahnanschluss vorhanden ist. Von der erforderlichen Infrastruktur (Wasser und Öl) und vom Personalbedarf (1 Maschinist, 1 Elektriker) her handelt es sich um eine aufwendige Lösung.

IV.3.3 Pulsanlage mit Batterie und Speicherspule

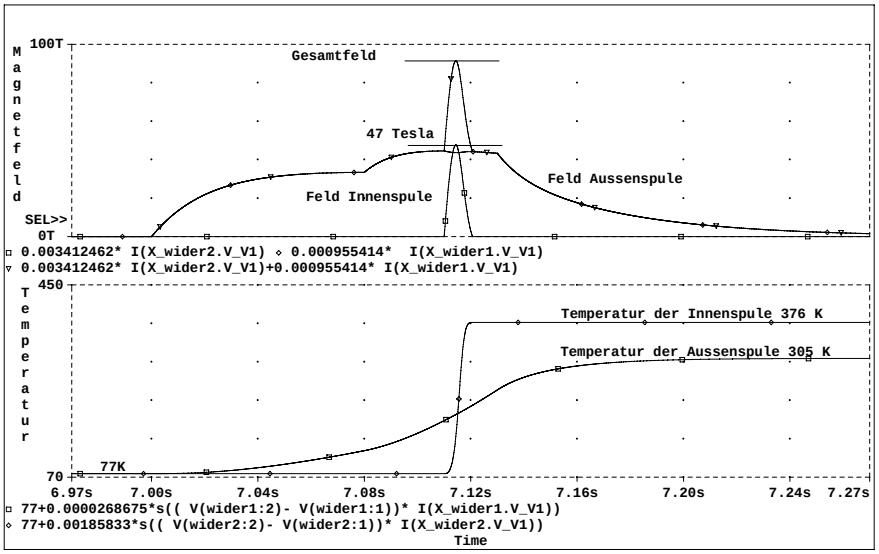
Batterien können zusammen mit einer Speicherspule als Energiespeicher für die Hochfelderzeugung dienen. Die Speicherspule kann mit einer kleinen Spannung aufgeladen und mit hohen Spannungen wieder entladen werden. Im Gegensatz zu Homopolargeneratoren (Kap. IV.3.4) kann die erforderliche Spannung zur Aufladung der Speicherspule durch Reihenschaltung vieler Batterien erzeugt werden, so dass nicht unbedingt Schaltungen mit Speichertransformator angewendet werden müssen. Aus der Literatur sind beispielsweise Batterieanlagen mit Spannungen bis 700 V bekannt, die sogar für den Einsatz auf Schiffen vorgesehen wurden [79]. Erfahrungsträger auf diesem Gebiet ist insbesondere die Firma GNB Battery Technologies, die schon Batterien für 500 MJ / 5 MA geliefert hat [80].

Simulationsergebnisse

Bei Batterieversorgung wurde das Verfahren mit einer Speicherspule mit Reihen–Parallelschaltung von zwei Wicklungen demonstriert. Wegen der kleinen Batteriespannung ist ein völlig anderes Spulendesign mit hohen Strömen und kleinen Induktivitäten erforderlich, wenn man einen Speichertransformator vermeiden

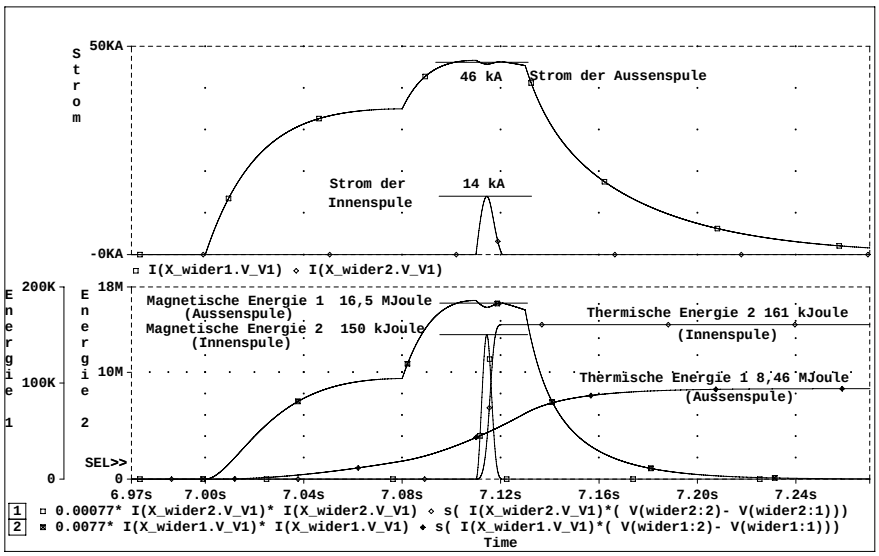


(a) Schaltungsschema

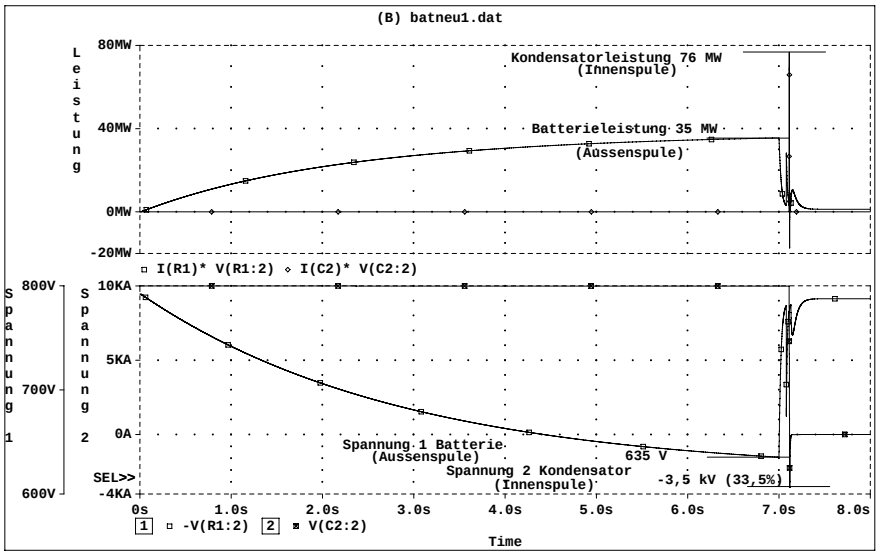


(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen

Abbildung IV.7: Pulsanlage gespeist aus Batterie und Speicherspule:
Energieversorgung der Außenspule mit Batterie und Speicherspule;
Innenspule aus einem Kondensator



(c) Strom und magnetische Energie der Spulen



(d) Leistung und Spannung der Energieversorger

Abbildung IV.7: Pulsanlage gespeist aus Batterie und Speicherspule:
Energieversorgung der Außenspule mit Batterie und Speicherspule;
Innenspule aus einem Kondensator

will. Das kann zu Problemen durch die schwer wickelbaren großen Leiterquerschnitte führen. Der Simulation wurde bei den hier dargestellten Vergleichsuntersuchungen die gleiche Spulenanordnung zur Hochfelderzeugung wie bei den anderen Energieversorgungsverfahren zugrunde gelegt. Die Induktivitäten der Speicherspulen wurden so gewählt, dass die größtmögliche Energie in die Hochfeldspule übertragen werden kann. Einige Simulationsergebnisse sind in Abbildung IV.7 zusammengestellt. Wegen der kleinen Batteriespannung dauert der Aufladevorgang der Speicherspule ca. 7 s. Das hat eine enorme thermische Beanspruchung dieser Spule und eine sehr ungünstige Bemessung zur Folge. Die maximale Leistung beträgt dabei jedoch nur 35 MW.

Notwendige Investitionskosten

Die Firma GNB gibt für ihre Batterien folgende spezifische Werte an:

PULSAR Pb/acid (GNB):
15 US $/ kW (ca. 26 DM/ kW) ; 0,959 kW/ kg; 1730 kW/ m^3

Damit kostet die für die Speicherspule mit Reihen–Parallelschaltung erforderliche Batterie von

ca. 35 MW insgesamt etwa 1 Mio. DM.

Die gleiche Größenordnung des Preises wurde mit Listenpreisen der Firma HITACHI für deren Serienbatterien ermittelt. Der Batteriespeicher ist, betrachtet man ausschließlich die Anschaffungskosten, mit Abstand der billigste Speicher.

Die Batterieanlage wiegt 37 t und hat einen Rauminhalt von 21 m^3. Eine Abschätzung des Platzbedarfs ergab ca. 150 m^2 (5 Lagen übereinander, 0,5 m breite Zwischenräume).

Beurteilung der Gesamtschaltung; Probleme

Es wird eine zusätzliche Speicherspule benötigt, die eine Reihen–Parallelschaltung ermöglicht, um wenigstens ca. 35 % der Energie in die Hochfeldspule zu bekommen. Dazu ist jedoch ein großer Aufwand an Schaltern erforderlich (Abb. IV.7, S. 82). Die gesamte Energie muss nach dem Experiment in einem Widerstand schnell abgebaut werden.

Bei der Batterievariante benötigt man, wie bei allen Schaltungen mit Speicherspule, einen **leistungsfähigen Ausschalter**. Dieses Problem ist nicht mit Halbleiterschaltern zu lösen. Es müssen z. B. die von Prof. Kuchinsky (St. Petersburg) angebotenen Explosivschalter eingesetzt werden. Damit bestehen ständig Probleme durch die erforderliche Regenerierung der Schalter, die nach Prof. Kuchinsky nach jedem Puls ca. 1 h in Anspruch nimmt. Der Preis für eine vollständige Schalteranlage wird in [85] mit 0,5 Mio. DM angegeben. Die Schaltung ist wegen der Ausschaltvorgänge an Induktivitäten nicht rauscharm. Das vergrößert den Aufwand auf der Experimentseite.

In der aufgeladenen Batterie ist eine sehr große Energie gespeichert. Infolge des begrenzten Entladestroms kann jedoch durch einen Puls nur ein sehr kleiner Anteil davon entnommen werden. Im Simulationsbeispiel ist das etwa ein halbes Prozent der gespeicherten Energie. Da die gewaltige, in der Batterie gespeicherte Energiemenge im Havariefall zu sehr großen Problemen führen würde, ist ein hoher Aufwand in den Schutz, die Wartung und die Aufstellung der Batterien zu investieren. Im Gegensatz zu anderen Energiespeichern, die die hohe Energie nur für eine kurze Zeit enthalten (z. B. 1 bis 5 Minuten bei einer Kondensatorbank), muss die Batterie ständig durch eine Erhaltungsladung im aufgeladenen Zustand gehalten werden, um die Lebensdauer nicht zu verkürzen. Die Batterien werden in Blöcke gegliedert, die einzeln durch elektromechanische Schalter und Sicherungen geschützt werden. Auch explosive Schutzschalter werden in der Literatur erwähnt. Der direkte Plattenkurzschluss wird durch konstruktive Maßnahmen innerhalb der Batterie vermieden.

Obwohl die Batterien von den Herstellern als gasdicht garantiert werden, müssen Wasserstoffgassensoren und durchsichtige Einfriedungen für den Personenschutz eingesetzt werden. Für eine ausreichende Belüftung der Räume ist zu sorgen.

Sehr unterschiedliche Angaben werden von den Herstellern zur Lebensdauer der Batterien gemacht. Während normale Batterien für 3 bis 5 Jahre Lebensdauer gehandelt werden, gibt GNB bis zu 20 Jahre an [80], dabei ist jedoch ein hoher Wartungsaufwand (siehe unten) zu betreiben. Nach dem Ende ihrer Lebensdauer müssen die Batterien umweltfreundlich entsorgt werden. Das kann eigentlich nur die Herstellerfirma.

Batterien müssen in sauberen, trockenen und kühlen Räumen gelagert werden. Die optimale Temperatur ist 25 °C. Eine Überschreitung um 10 °C setzt die Lebensdauer der Batterie bereits um 50 % herab. Bei Unterschreitung der Betriebstemperatur sinkt stark die Leistungsfähigkeit.

Die Batteriespannung muss durch eine Erhaltungsladung immer bei 2,25 – 2,30 V (25 °C) pro Zelle gehalten werden. Schon bei 2,31 – 2,35 V verringert sich die Lebensdauer um 50 %.

Die Batterien müssen laufend auf ihren Ladungszustand überwacht werden. Es sind die individuellen Batteriespannungen und die Spannung über der gesamten Reihenschaltung zu messen und aufzuzeichnen. Das gilt mindestens für ausgewählte Pilotbatterien. Die Verbindungen und Sicherungsblöcke sind über ihren Widerstand zu prüfen und mindestens einmal jährlich festzuziehen.

Der Boden muss für das hohe Batteriegewicht (ca. 37 t) geeignet sein. Es müssen Gänge für Inspektionen usw. freibleiben. Die Batterien sind ständig von Staub zu reinigen und nach feuchten oder korrodierten Stellen abzusuchen. Bei einer so großen Ansammlung von Batterien besteht die Gefahr von Batteriefeuer, des Schmelzens der Batterie, der örtlichen Erhitzung und der Explosion von Wasserstoffgasen sowie von Säureunfällen. Damit wird auch der Aufwand für den Personenschutz relativ hoch. Ein weiteres Problem stellt der hohe Energieinhalt einer Batterieanlage dar. Eine Abschätzung mit der Batte-

rie 6–90A15 von GNB Technologies ergab, dass die benötigte Batterieanlage eine Kapazität von 0,952 MAh über 8 Stunden hat. Dabei wurde angenommen, dass einer Teilbatterie der maximal zulässige Strom von 1011 A entnommen wird. Es werden 2574 Batterien (12 V) benötigt, um auf die Spannung von 792 V und den mittleren Ladestrom der Speicherspule von 38,3 kA zu kommen. Die gesamte Batterie hat dann den unvorstellbaren Energieinhalt von $0,952\,\mathrm{MAh} \cdot 12\,\mathrm{V} \cdot 3600\,\mathrm{s} = 41126\,\mathrm{MJ}$, von dem nur ca. 0,44 % bei einem Puls entnommen werden. Diese riesige Energiemenge muss durch Erhaltungsladung ständig konstant gehalten werden, um die Lebensdauer der Batterie zu sichern und könnte im Havariefall schwerwiegende Folgen haben.

Schlussfolgerung

Trotzdem der geringen Anschaffungskosten der Batterien wird von der Anwendung einer Batterieanlage und einer Speicherspule abgesehen. Ausschlaggebend dafür sind die hohen Folgekosten für Wartung, Personenschutz und Entsorgung sowie den technischen Eigenschaften (kein rauscharmer Halbleiterschalter, zusätzliche Speicherspule), insbesondere aber dem großen Gefahrenpotential durch die ständige hohe Energiekonzentration.

IV.3.4 Pulsanlage mit Homopolargenerator und Speichertransformator

Ein Homopolargenerator kann zusammen mit einem Speichertransformator als Energiespeicher für die Hochfelderzeugung dienen. Es handelt sich dabei um einen Hochstromgenerator, der auf Grund seines einfachen Rotoraufbaus ohne Wicklung als mechanischer Energiespeicher geeignet ist. Derartige Generatoren haben in der Impulstechnik vielfältige Anwendungen gefunden. Für diese Variante liegt ein Projekt und ein entsprechendes Angebot vor [85], aus dem die im Folgenden benutzten Zahlen entnommen sind.

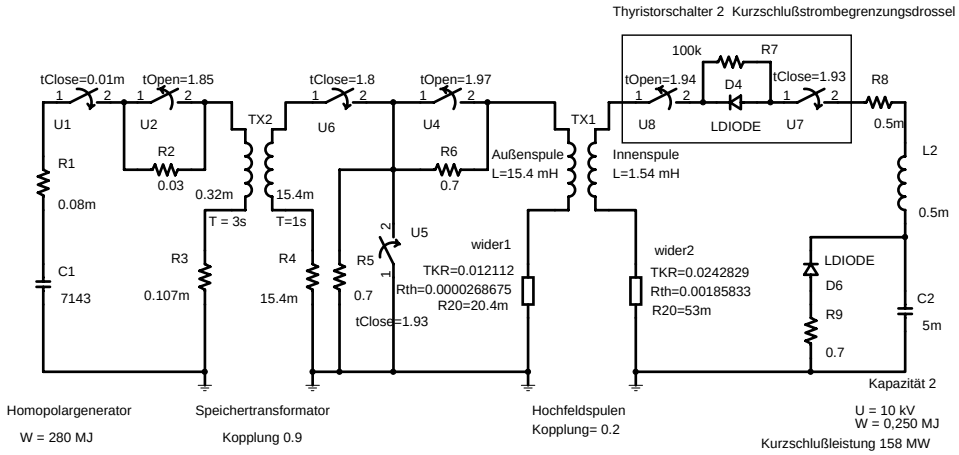
Beurteilung der Gesamtschaltung zur Energieversorgung

Der Homopolargenerator benötigt von der Netzseite her zwei zusätzliche Systeme:

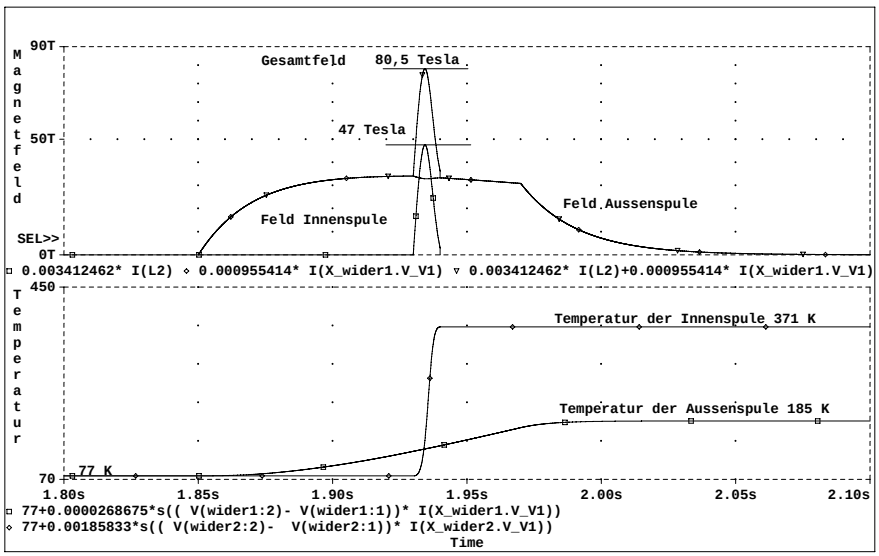
- das Antriebssystem von 2,5 MW
- das Erregersystem von 650 kW

Wegen der ungünstigen Strom– und Spannungswerte kann der Homopolargenerator nicht selbst im Motorbetrieb hochgefahren werden.

Sekundärseitig wird wegen der geringen Ausgangsspannung von 280 V ein Speichertransformator benötigt. Es entstehen die gleichen Probleme wie bei der Batteriespeisung. Im Gegensatz zur Batterievariante muss wegen des begrenzten Energieinhalts des Homopolargenerators die Aufladung des Speichertransformators nach ca. 2 s abgebrochen werden, so dass die erforderliche Energie gar nicht

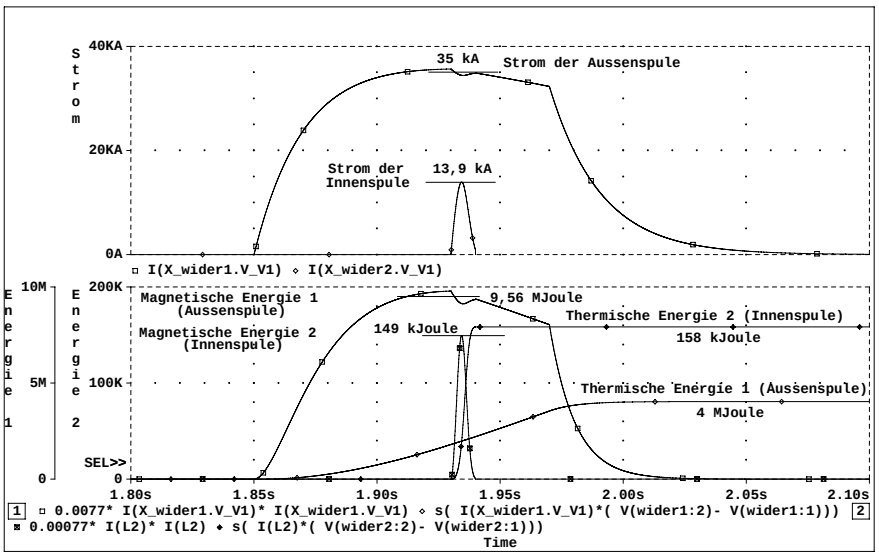


(a) Schaltungsschema

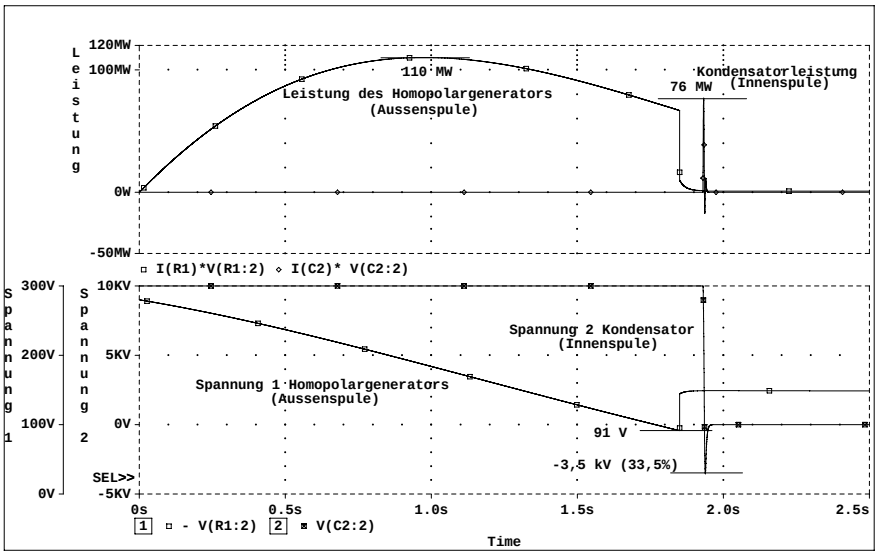


(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen

Abbildung IV.8: Pulsanlage mit Homopolargenerator und Speichertransformator: Energieversorgung der Außenspule mit Homopolargenerator und Speichertransformatorspule; Innenspule aus einem Kondensator



(c) Strom und magnetische Energie der Spulen



(d) Leistung und Spannung der Energieversorger

Abbildung IV.8: Pulsanlage mit Homopolargenerator und Speichertransformator: Energieversorgung der Außenspule mit Homopolargenerator und Speichertransformatorspule; Innenspule aus einem Kondensator

erreicht wird. Es sollte eine Reihen–Parallel–Umschaltung angewendet werden, um einen größeren Energieanteil in die Hochfeldspule zu bekommen. Der Aufwand an Schaltern ist hoch, insbesondere wird ein leistungsfähiger Ausschalter benötigt. Es kommen keine Halbleiterschalter in Frage, weil der Aufwand für die Zwangskommutierung unbezahlbar wäre. Auch Vakuumschalter sind wegen der hohen Ströme nicht geeignet, sondern nur die im Projekt [85] vorgeschlagenen Explosivschalter. Damit gibt es ständig Probleme mit der Regenerierung der Schalter, die ca. 1 Stunde dauert. Es ist zu erwarten, dass die Energieversorgung wegen der Schalter nicht rauscharm ist. Das erhöht den Aufwand auf der Experimentseite. Durch die Eigenschaften der Schalter ist die Spannung auf 20 kV begrenzt.

Simulationsergebnisse

Der Simulation wurden die Parameter des Projektvorschlags von Prof. Kuchinsky [85] zugrunde gelegt. Der Homopolargenerator wurde für die Simulation durch einen Kondensator mit gleichem Energieinhalt ersetzt. Die sekundäre Induktivität des Speichertransformators wurde entsprechend unseres Dimensionierungsbeispiels bei gleicher Zeitkonstante auf 15,4 mH geändert, um eine gute Anpassung an die Außenspule zu erreichen. Unter Berücksichtigung der durch die Schalter bedingten Begrenzung der Spannung auf 20 kV wurden als Maximalwert der magnetischen Energie im Speichertransformator ca. 86 MJ und in der äußeren Hochfeldspule ca. 10 MJ erreicht. Bei einer anderen Spulenauslegung können, wie Simulationen gezeigt haben, in der äußeren Hochfeldspule maximal ca. 15 MJ erreicht werden. Diesen Energiebereich gibt auch Prof. Kuchinsky in seinem Angebot an. Ein wesentlicher Grund für den uneffektiven Energietransfer liegt in dem Koppelfaktor des Speichertransformators von 0,9, der aber in dieser Größe real sein dürfte. Eine weitere Erhöhung der magnetischen Energie in der Hochfeldspule ist dann nur noch durch Reihen– / Parallelschaltung zu erreichen. Dann würde die Schaltung wegen der Umgruppierungsschalter aber noch komplexer, als sie ohnehin schon ist.

Der Primärkreis ist sehr parameterempfindlich, insbesondere bezüglich des ohmschen Widerstands von Generator, Primärspule des Speichertransformators und Schaltern. Das Problem bei Homopolargeneratoren besteht vor allem in den kleinen Ausgangsspannungen und den damit extrem hohen Strömen. Mit den erreichbaren Strömen von ca. 700 kA bestehen wenig Erfahrungen. Zudem zeigte die Simulation, dass die mindest benötigte magnetische Energie von 24,5 MJ in der Hochfeldspule mit dem angebotenen Homopolargenerator, wenn überhaupt, dann nur mit einer aufwendigen Reihen– / Parallelschaltung erreicht werden kann.

Im Projekt wird ein Platzbedarf von 150 m^3 genannt. Die wesentlichen Massen sind:

- Homopolargenerator: 120 t
- Antriebsmotor: 9 t

Preis

Im Angebot [85] werden für die Entwicklungs– und Herstellungskosten der gesamten Energieversorgungsanlage folgende Preise genannt (einfache Schaltung für 10 ... 15 MJ magnetische Energie; siehe Anhang D.4, S. 135):

Homopolargenerator und Antriebssystem	3,8 Mio. DM
Speichertransformatoren	0,7 Mio. DM
Schaltersystem	0,5 Mio. DM
	=======
Summe	**5,0 Mio. DM**

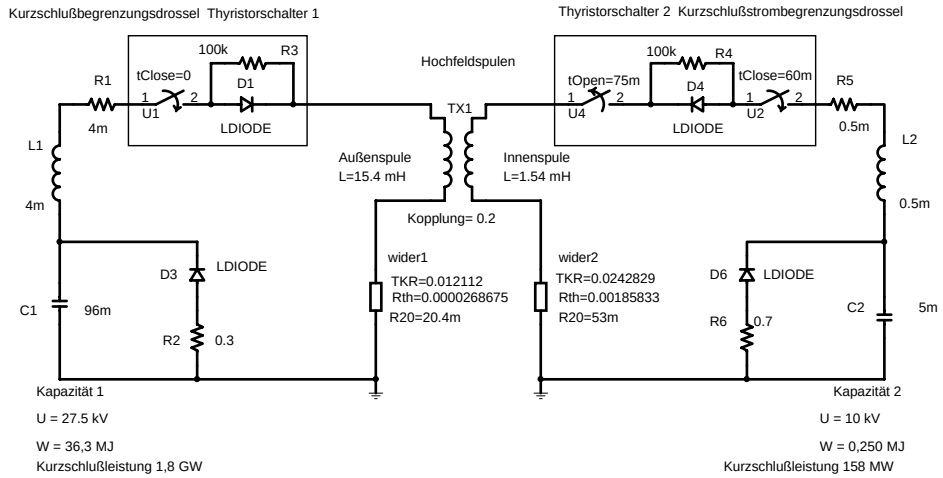
Das ist eine kostengünstige Variante, jedoch reicht die angebotene Anlage bezüglich der in der Hochfeldspule erreichbaren Energie für den von uns angestrebten Magneten nicht aus. Um die benötigte Energie von 24,5 MJ in der Außenspule zu erreichen, würden 3 Anlagen benötigt.

IV.3.5 Pulsanlage mit Kondensatorbank

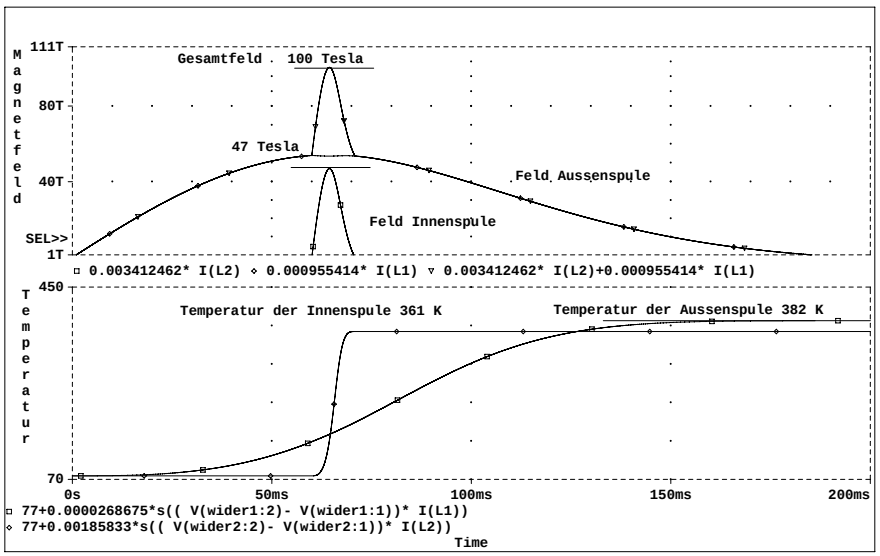
Kondensatoren können mit kleinen Strömen aufgeladen und mit sehr großen Strömen wieder entladen werden. Eine Kondensatorbank eignet sich deshalb hervorragend als Energiespeicher für die Hochfeldspule. Die Energie der Kondensatorbank kann fast vollständig in die Hochfeldspule transferiert werden. Nur die Energieverluste in den Widerständen der Leitungen und der Hochfeldspule begrenzen den Energietransfer auf ca. 90 %. Ein prinzipbedingter zusätzlicher Energiebedarf entsteht nur, wenn man z. B. mit zusätzlichen Induktivitäten das maximale Feld verlängern oder die Kurzschlussleistung verringern will. Der Einsatz von Kondensatorbänken ist deshalb sehr verbreitet. Erfahrungsträger sind z. B. Prof. Askenazy (Toulouse) [86], Prof. v. Ortenberg (Berlin) [84], Prof. Grössinger (Wien) [83], Dr. Boebinger (USA) [82] und Prof. Herlach (Belgien) — mit allen wurde bereits im Vorfeld eng zusammengearbeitet (s. Kap. I.4.2, S. 11). Es wurden mehrere Schaltungen mit Kondensatorbatterien simuliert. Dazu gehören u. a. Kettenschaltungen zum Erzielen einer Messzeit mit relativ konstantem Feld oder Schaltungen mit sequentieller Zuschaltung von Kondensatorbänken mit dem Ziel, unabhängig von der Last ein fast konstantes Feld für eine bestimmte Zeit zu erzeugen. Letztendlich erwies sich die in Abbildung IV.9 dargestellte Schaltung gerade wegen ihrer Unkompliziertheit und den geringen Betriebs– und Wartungskosten als die geeignetste. Die Pulsform und –amplitude kann durch Umschalten der Kondensatoreinheiten in weiten Grenzen variiert werden. Es können auch Magnetisierungsmessungen mit Umpolung des Feldes durchgeführt werden.

Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse mit einer Kondensatorbank als Energiespeicher sind in Abbildung IV.9 dargestellt. Die notwendige Energie von 24,5 MJ für die Hoch-

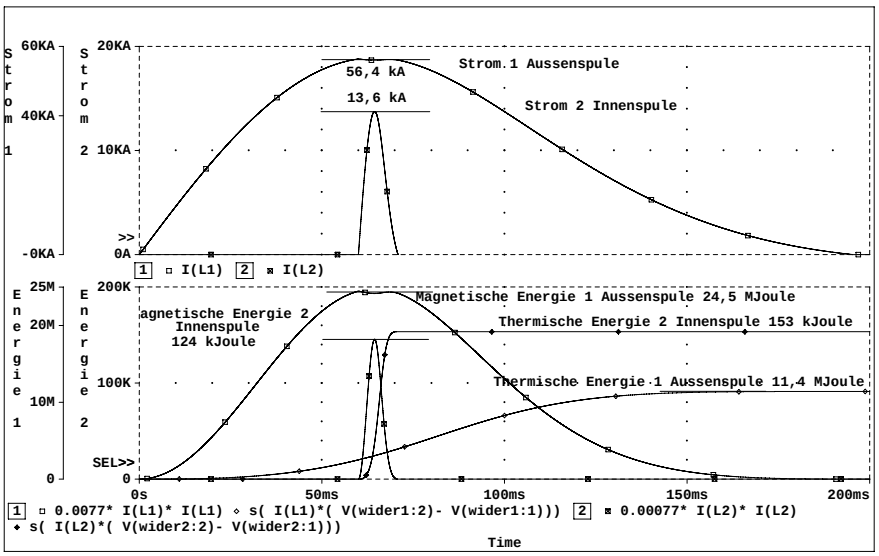


(a) Schaltungsschema

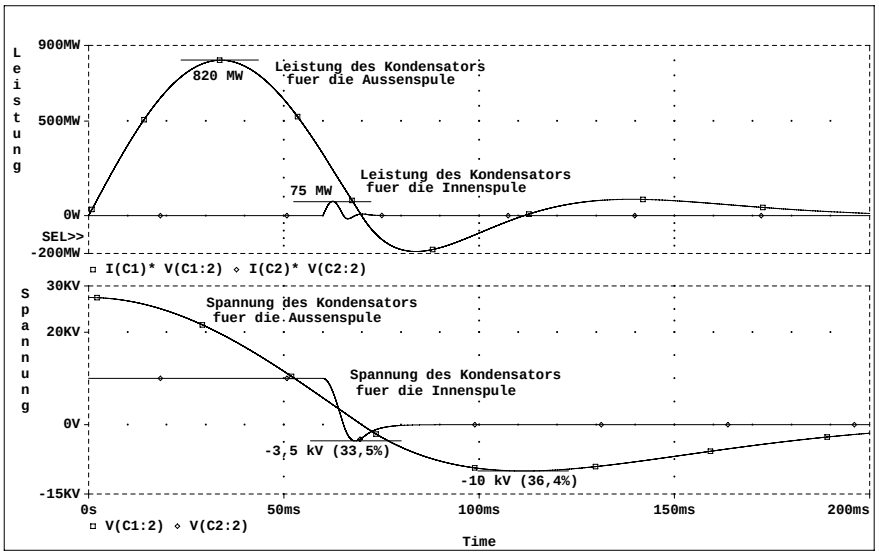


(b) Magnetfeld und Temperaturverlauf der Spulen

Abbildung IV.9: Pulsanlage mit Kondensatorbank:
Energieversorgung der Außenspule und Innenspule aus einem Kondensator



(c) Strom und magnetische Energie der Spulen



(d) Leistung und Spannung der Energieversorger

Abbildung IV.9: Pulsanlage mit Kondensatorbank:
Energieversorgung der Außenspule und Innenspule aus einem Kondensator

feldspule kann man unter Berücksichtigung der getroffenen Vernachlässigungen schon einer Kondensatorbank von 36,3 MJ (96 mF bei 27,5 kV) entnehmen. Für eine reale Anlage wird unter Berücksichtigung einer Sicherheitsreserve von etwa 25 % (z. B. erhöhte ohmsche Verluste, Alterung der Kondensatoren) eine 50–MJ–Kondensatorbank benötigt. Damit ist in der Kondensatorbank entscheidend weniger Energie konzentriert als in jedem anderen Speichermedium.
Die harmonischen Strom– und Spannungsverläufe machen die Schaltung besonders geeignet für den Einsatz von Halbleiterschaltern. Dafür spricht auch, dass der Hauptschalter ein „Ein"–Schalter ist. Die Widerstände R2 und R6 bestimmen durch ihre Größe, welcher Prozentsatz der Energie in den Kondensator zurückgeladen wird. Mit ihrer Hilfe wird eingestellt, auf welche negative Spannung die Kondensatoren umschwingen und ob eine Langpuls- oder Kurzpulsspule betrieben werden können. Eine Abrüstung der Schaltung ist möglich, wenn man die gesamte Restenergie in den Kondensator zurückladen kann, d. h., eine Kondensatorbatterie einsetzt, die auf ca. 80 % umgeladen werden kann. Dann entfällt der gesamte Crowbardiodenkreis, und die Energie ist schnellstmöglich aus der Hochfeldspule heraus. Damit sind auch magnetische Hysteresismessungen einfach realisierbar. Die erforderlichen Kondensatoren mit hohen zulässigen Umschwingfaktoren sind in diesem Fall jedoch groß und teuer.

Ein Vorteil für den sicheren Betrieb der Kondensatorbatterie ist die Möglichkeit, die Bank modular aufzubauen. Jeder Modul hat einen eigenen Thyristorschalter und eine eigene Schutzdrossel. Die Module sind durch die Thyristorschalter entkoppelt. Im Havariefall kann sich damit nicht die gesamte Bank auf einen Kondensator entladen. Die auf die gesamte Bank verteilten Schutzdrosseln begrenzen den Strom auch in internen Kurzschlusskreisen.

Sehr vorteilhaft ist außerdem, dass nur ein relativ leistungsarmer Netzpunkt zum schnellen Aufladen der Kondensatorbatterie erforderlich ist. Bei der allgemein als sinnvoll genannten Aufladezeit von 1 min wird zur Aufladung einer 50–MJ–Bank mit konstantem Strom nur eine Leistung von ca. 0,8 MW benötigt. Die Unterteilung der Kondensatoranlage in Untereinheiten ermöglicht unter Verwendung von mehreren Aufladeeinheiten die Speisung von mehreren Spulensystemen.

Durch die große Kapazität, die während der Messungen parallel zur Hochfeldspule liegt, und die Halbleiterschalter ist die Schaltung sehr rauscharm. Eine zusätzliche Speicherspule wird nicht benötigt.

Investitionskosten

Es liegen folgende Angebote vor (siehe Anhang D.5–D.10, S. 137–142):

Fa. SOTEREM, Frankreich
vermittelt von Prof. Askenazi (Toulouse):
50 MJ–Kondensatorbank mit Crowbardiode: **17 – 18,5 Mio. DM**

Fa. MAXWELL, USA:
Kondensatoren zu je 83,3 kJ $\grave{a}$ 9697 DM
(Reine Kondensatorkosten) Gesamtkosten für **50** MJ: **5,82 Mio. DM**

Fa. HAEFELY TRENCH, Frankreich:
Kondensatoren zu je 21,75 kJ $\grave{a}$ 4960 DM
(Reine Kondensatorkosten) Gesamtkosten für **50** MJ: **11,4 Mio. DM**

Fa. AEROVOX,USA:
Kondensatoren zu je 30 kJ $\grave{a}$ 4650 DM
(Reine Kondensatorkosten) Gesamtkosten für **50** MJ: **7,75 Mio. DM**

VISHAY ELECTRONIK GmbH:
Kondensatoreinheiten im Gestell **ohne Verschaltung** zu je 0,5 MJ $\grave{a}$ 163000 DM
(Reine Kondensatorkosten) Gesamtkosten für **50** MJ: **16,3 Mio. DM**

TZN Forschungs– und Entwicklungszentrum Unterlüß
30 MJ–Energieversorgungsanlage in Modulen zu 5 MJ mit **Funkenstrecken** als Hauptschalter zu 11 Mio. DM.
Gesamtkosten für **50** MJ: **18,3 Mio. DM**

Der Vergleich der Energieversorgungsvarianten zeigt, dass bei allen Schaltungen mit einer Spannungsbegrenzung auf ca. 20 kV eine relativ lange Stromanstiegszeit von ca. 50 ms in der Hochfeldspule zu verzeichnen ist. Bei der direkten Speisung der Außenspule durch das Netz (Abb. IV.5, S. 75) oder einen Generator (Abb. IV.6, S. 78) ohne induktiven Speicher bei einer Spannung von 12 kV beträgt die Aufladezeit sogar 100 bis 110 ms. Die Energieforderungen folgen aus der Höhe und geometrischen Ausdehnung des Magnetfeldes. Die Anstiegszeit kann deshalb nur durch höhere Spulenströme oder durch eine höhere Spannung der Energiequelle verringert werden. Als Vorteil erweist es sich deshalb, dass eine Kondensatorbank eine höhere Spannung haben kann. In Abbildung IV.9 ist erkennbar, dass die Anstiegszeit auf ca. 30 ms verringert ist.

Platzbedarf

Zur Bestimmung des Platzbedarfs wurden die preiswerten Kondensatoren mit hoher Energiedichte der Firma Maxwell zugrunde gelegt. Zum Aufstellen der im Vorprojekt realisierten 1 MJ–Kondensatorbank werden einschließlich aller Schalt– und Schutzeinrichtungen ca. 5 m^2 benötigt. Das bedeutet, dass die erforderliche Bank mit einer Energie von 50 MJ einen Platzbedarf von ca. 250 m^2 hat.

IV.3.6 Zusammenfassung und Vorschlag

In der folgenden Tabelle IV.7 (S. 98) sind einige Eigenschaften der betrachteten Energieversorgungsverfahren zusammengestellt. Unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen wird mit den folgenden Begründungen eine Kondensatoranlage nach dem Vorbild des Angebots der Fa. SOTEREM (Frankreich), vermittelt von Prof. Askenazy [86], vorgeschlagen. Es kann erwartet werden, dass die Anlage mit den Erfahrungen aus dem Vorprojekt beim Aufbau der 1 MJ–Bank zügig entwickelt und erfolgreich aufgebaut werden kann.

1. Ein **direkter Netzanschluss** im FZR kann nicht mit der erforderlichen Leistung realisiert werden, auch dann nicht, wenn eine zusätzliche Speicherspule mit Reihen- und Parallelschaltung zwischengeschaltet wird. Schon die Kosten für 50 – 55 MW würden 16 Mio. DM ohne alle zusätzlichen Anlagen (Transformator, Stromrichter, Kompensationsanlagen) betragen.

2. Ein **Generator** müsste mindestens eine Leistung von 630 MW im Sekundenbereich abgeben können, wenn ohne Speicherspule gearbeitet werden soll. Damit kommt dieses Verfahren aus Preisgründen überhaupt nicht in Frage. Auch mit Speicherspule wird diese Variante (mittleres Angebot von ABB ca. 35 Mio. DM) viel zu teuer. Die Risiken des Einsatzes preisgünstiger gebrauchter Generatoren sind zu groß.

3. **Batterien** sind wegen des hohen Gefahrenfaktors, der durch die ständige Erhaltung einer Energie im GJ–Bereich entsteht, für ein Magnetlabor in Rossendorf nicht geeignet. Der geringe Investitionspreis wird durch hohe Wartungs– und Überwachungskosten wieder kompensiert. Wegen der relativ geringen Spannung ist eine zusätzliche Speicherinduktivität zwingend erforderlich. Diese hat eine geringe Güte und gestattet, ohne teure Zusatzmaßnahmen, nur einen Teil der Energie an die Hochfeldspule zu übertragen. Das Schalterproblem ist nur mit Explosivschaltern zu lösen, die einen hohen Betriebsaufwand erfordern und die Experimente stören. Weitere Probleme entstehen durch die i. Allg. geringe Lebensdauer der Batterien und die aufwendige Entsorgung. Bei Berücksichtigung aller Kosten, vor allem für Sicherheit, Wartung und Entsorgung, verliert diese Lösung ihren zunächst erscheinenden Kostenvorteil.

4. Mit der vorgeschlagenen Schaltung mit **Homopolargenerator und Speichertransformator** mit einer Sekundärwicklung können an unsere Musterspule trotz einer im Generator gespeicherten Energie von 280 MJ nur ca. 10 MJ übertragen werden. Bei Polyhelix–Spulen sind es mit der gleichen Schaltung ca. 15 MJ. Eine weitere Erhöhung der magnetischen Energie ist nur durch einen Speichertransformator mit Reihen–Parallelschaltung von zwei Sekundärwicklungen möglich. Dann wird aber die Schalteranordnung sehr aufwendig, und das ohnehin vorhandene Problem der Schalterregenerierung nach jedem Puls verschärft sich. Der Hauptnachteil des Homopolargenerators ist aber seine geringe Spannung von 280 V. Daraus resultieren Maximalströme von ca. 700 kA, die besondere Schalter erfordern, und es wird der wegen seines Koppelfaktors von 0,9 für den Energietransfer ungünstige Speichertransformator benötigt.

5. Eine **Kondensatorbank** benötigt keine zusätzlichen Speicherinduktivitäten und eignet sich hervorragend zur Energieversorgung eines Magneten mit äußerer und innerer Spule. Der Unterschied zwischen Primärenergie und Energie in der Hochfeldspule ist der bei allen Varianten mit Abstand geringste. Es ist nur kurzzeitig eine Energie von maximal 50 MJ gespeichert. Sie kann mit Halbleiterschaltern, die wenig Störungen verursachen, theoretisch vollständig in die Hochfeldspule gebracht und auch schnell wieder aus dieser entfernt werden. Es ist nur ein Schließkontakt („Ein“–Schalter) erforderlich, der das Schalterproblem gegenüber der induktiven Speichermethode entscheidend entschärft. Das Verfahren ist durch die große Kapazität in hohem Grade störungsfrei. Der Transport nach Rossendorf kann in kleinen Einheiten erfolgen und ist somit unkritisch. Zur Aufladung der Kondensatorbank ist der vorhandene Netzanschluss im FZR ausreichend. Die äußere Hochfeldspule wird nur ca. 0,2 s mit Strom belastet. Damit sind die ohmschen Verluste in erträglichen Grenzen. Kondensatoren sind wartungsfrei und können mit Einzelsicherungen und Strombegrenzungsdrosseln sicher geschützt werden.

   Ein nur scheinbarer Nachteil ist, dass der Strom– und damit der Feldverlauf kaum regelbar ist. Es gibt jedoch nur wenig Experimente, wo der regelbare Feldverlauf wirklich notwendig ist. Es kann auch mathematisch gezeigt werden, dass ein Feldimpuls mit Plateau zu den gleichen Wirbelstromverlusten führt — weil der Anstieg steiler ist — wie eine sinusförmige Kondensatorentladung mit gleicher „Feld über Zeit“–Fläche. Daher ist das oft gebrachte Argument, dass ein oder mehrere Plateaus erforderlich sind, um die Wirbelströme in der Probe abklingen zu lassen, falsch.

Die angebotene französische Kondensatorbank kostet beispielsweise komplett 16,5 – 18 Mio. DM. Bei Realisierung dieses Vorschlags ist zu erwarten, dass im Forschungszentrum Rossendorf unter Nutzung der Erfahrungen aus dem Vorprojekt und durch die enge Zusammenarbeit mit internationalen Experten, z. B. mit Prof. Askenazy (Toulouse), sehr schnell ein Magnetlabor mit internationalem Spitzenrang entstehen kann.

[§] Anmerkungen für Tabelle IV.7:

[§] Dieser Vorschlag liefert nicht die erforderliche magnetische Energie in der Hochfeldspule. Es wären 3 Anlagen erforderlich, deren Gesamtpreis dann mit den anderen Varianten vergleichbar wird.

[¶] Es handelt sich bei den Varianten Netz, Generator und Kondensator um die Leistung, die die Energieversorgungsanlage an die Außenspule des Beispiels abgeben muss, um die zur Einhaltung der maximalen Temperatur erforderliche kurze Stromanstiegszeit in der Hochfeldspule zu erreichen. Bei der Batterie und dem Homopolargenerator ist es die erforderliche Leistung zum Aufladen der Speicherspule bzw. des Speichertransformators

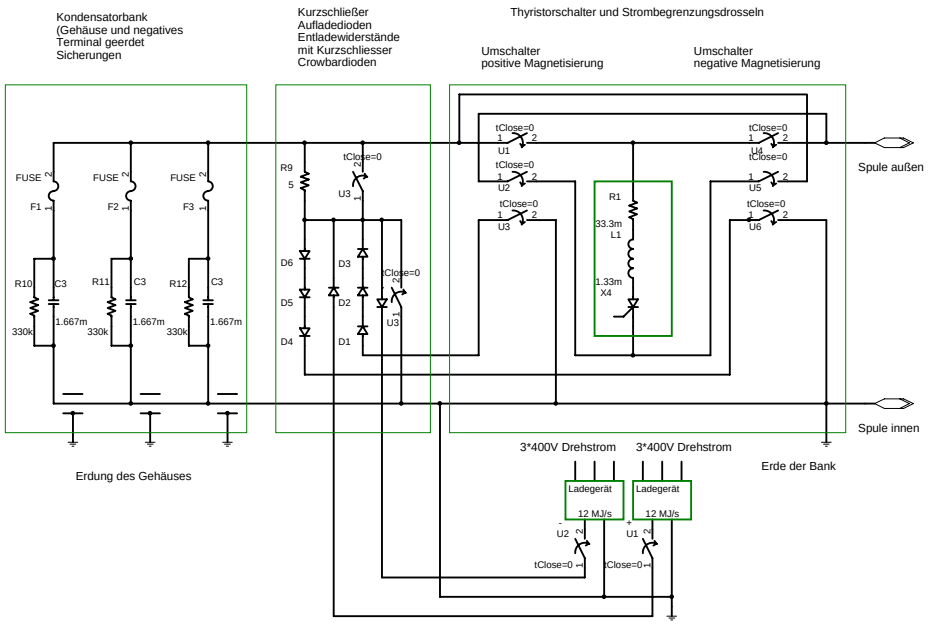
[‖] Bei einem Magneten mit einer Induktivität von z. B. L=5 mH und einer Zeitkonstante von 1 s werden 15 MJ erreicht. Dies bestätigt den in [85] genannten erreichbaren Energiebereich von 10 bis 15 MJ.

	Netz	**Generator**	**Batterie**	**Homopolargenerator**[§]	**Kondensator**
Leistung[¶]	685 MW	630 MW	35 MW	110 MW	820 MW
Anstiegszeit Hochfeldspule	100 ms	110 ms	120 ms	80 ms	64 ms
Primärenergie	unbegrenzt	250 MJ	55000 MJ	280 MJ	36,3 MJ
magn. Energie der Hochfeldspule	24,5 MJ	24,5 MJ	16,5 MJ	9,56 MJ[‖]	24,5 MJ
Verlustenergie Außenspule	9 MJ	10,2 MJ	8,46 MJ	4 MJ	11,4 MJ
Verlustenergie Innenspule	167 kJ	179 kJ	161 kJ	158 kJ	153 kJ
Netzrückwirkung	sehr hoch (Kompensation erforderlich)	gering	keine	gering	keine
Störung der Experimente	groß (durch Stromrichter)	mäßig	gering	mäßig	sehr gering
Investitionskosten	20 Mio. DM Netzpunkt: 16 Mio. DM 50 MW–Trafo: 3 Mio. DM Stromrichter: 1 Mio. DM	35 Mio. DM	3 Mio. DM Batterien: 2 Mio. DM Speicherspule: 1 Mio. DM	15 Mio. DM 5 Mio. DM je 34 MJ	18,5 Mio. DM
Betriebsaufwand	gering	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr gering
Raumbedarf		150 m^2	150 m^2	150 m^2	200 m^2
Hauptprobleme	Leistung im FZR nicht realisierbar	hoher Preis, hohe Betriebs– und Wartungskosten	Sicherheit, geringe Lebensdauer, hohe Betriebs– und Wartungskosten	zu kleine Ausgangsspannung, zu geringe magnetische Energie	

Tabelle IV.7: Vergleich verschiedener Energieversorgungseinheiten
vgl. Anmerkungen in den Fußnoten auf Seite 97

IV.3.7 Vorprojekt

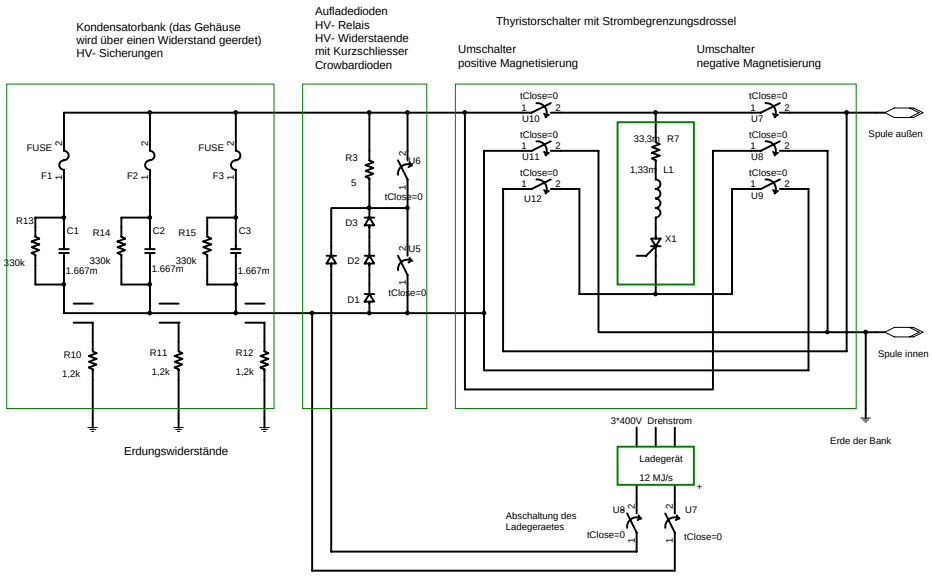
Mit dem Vorprojekt soll insbesondere geklärt werden, ob die Pulsfeldanlage mit den Kondensatoren mit metallisierter Elektrode und hoher Energiedichte der Firma Maxwell entwickelt werden kann. Diese Kondensatoren sind eine sehr preisgünstige Variante für den Millisekunden–Zeitbereich, wie aus den Vergleichsangeboten im Anhang ersichtlich ist. Die Bank im IFW wird modular aufgebaut und soll den vielseitigen Anforderungen der Nutzer z. B. nach einer Ummagnetisierung von Proben, dem Betrieb von Langpuls– und Kurzpulsspulen und variablem Umschwingen für Magnetisierungsmessungen gerecht werden. Ein Modul der Bank kann nach den in Abbildung IV.10(a) und Abbildung IV.10(b) dargestellten Schaltbildern aufgebaut werden.



(a) Schaltungsschema für bipolare Kondensatoren

Abbildung IV.10: Pulsanlage mit Kondensatorbank für bipolare Magnetfelder

Die Schaltung nach Abbildung IV.10(a) setzt positiv und negativ aufladbare Kondensatoren voraus. Sowohl die Innenseite der Hochfeldspule als auch ein Terminal der Kondensatoren ist fest geerdet. Die negative Magnetisierung wird durch die negative Aufladung der Kondensatoren mit einem zweiten Netzteil realisiert. Bei der Schaltung nach Abbildung IV.10(b) wird der negative Schuss durch Umpolung der Kondensatorbank erreicht. Die Umgruppierung für einen negativen Sschuss erfolgt erst nach Aufladen des Kondensators. Nach der Umgruppierung und vor dem Zünden des Thyristorschalters ist dann ebenfalls die



(b) Schaltungsschema für unipolare Kondensatoren mit Umpolung

Abbildung IV.10: Pulsanlage mit Kondensatorbank für bipolare Magnetfelder

Innenseite der Hochfeldspule und ein Kondensatorterminal geerdet, so dass alle Ausgleichsvorgänge über Streukapazitäten und Erdschleifen abgeklungen sind. Bei dieser Schaltung wird der Kondensator nur mit einer Spannungspolarität beansprucht, und die Kondensatoren mit hoher Energiedichte sind ohne Einbuße an Lebensdauer einsetzbar.

Kapitel V

Gebäude

Die Form des Gebäudes wird ganz wesentlich durch die große Fläche bestimmt, die für die Elektroversorgung (Kondensatorbank, Kap. IV.3.5, S. 90) benötigt wird. Diese Fläche kann nach bisherigen Informationen der Anbieter mehrere hundert Quadratmeter betragen (Kap. IV.3.5).
Im Folgenden ist ein Grobentwurf (Abb. V.1) für einen möglichen Aufbau des Gebäudes für das Hochfeldlabor gezeigt. Er geht davon aus, dass die Elektroversorgung im Keller untergebracht wird. Dort ist zusätzlich die Werkstatt untergebracht, während im Parterre sämtliche Labors und Büros angeordnet sind. Alternativ könnten Elektroversorgung und Werkstatt ebenfalls ebenerdig seitlich angesetzt werden. Das Zentrum des Gebäudes stellen die sechs Doppellabors dar, die jeweils eine Kabine ($20\,m^2$) für die Hochfeldmagneten und eine Kabine ($20\,m^2$) für die zugehörigen Experimentiereinrichtungen enthalten. Diese räumliche Trennung und die besondere Auslegung der Magnetkabinen (elektromagnetische Abschirmung, Explosionssicherheit, vergrößerte Wandstärke) soll größtmögliche Sicherheit gegen einen Unfall der Hochfeldmagnete bieten. Während des Hochfeldpulses haben Personen keinen Zutritt zu den Magnetkabinen. Die Experimente werden rechnergesteuert aus den Laborkabinen verfolgt.
Von den sechs Magnetlabors werden in der ersten hier vorgeschlagenen Ausbaustufe drei Labors mit den im Projektvorschlag beschriebenen Hochfeldmagneten bestückt. Drei weitere Labors sind einem späteren Ausbau, z. B. zu einem europäischen Hochfeldlabor, vorbehalten.
Die Steuerung aller Hochfeldmagnete wird von einem zentralen Steuerstand vorgenommen.

In dem beigefügten Vorschlag sind keine Räume für die Materialentwicklung vorgesehen, da die Materialentwicklung für das Dresdner Hochfeldlabor im Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden durchgeführt wird (Kap. IV.2, S. 59).

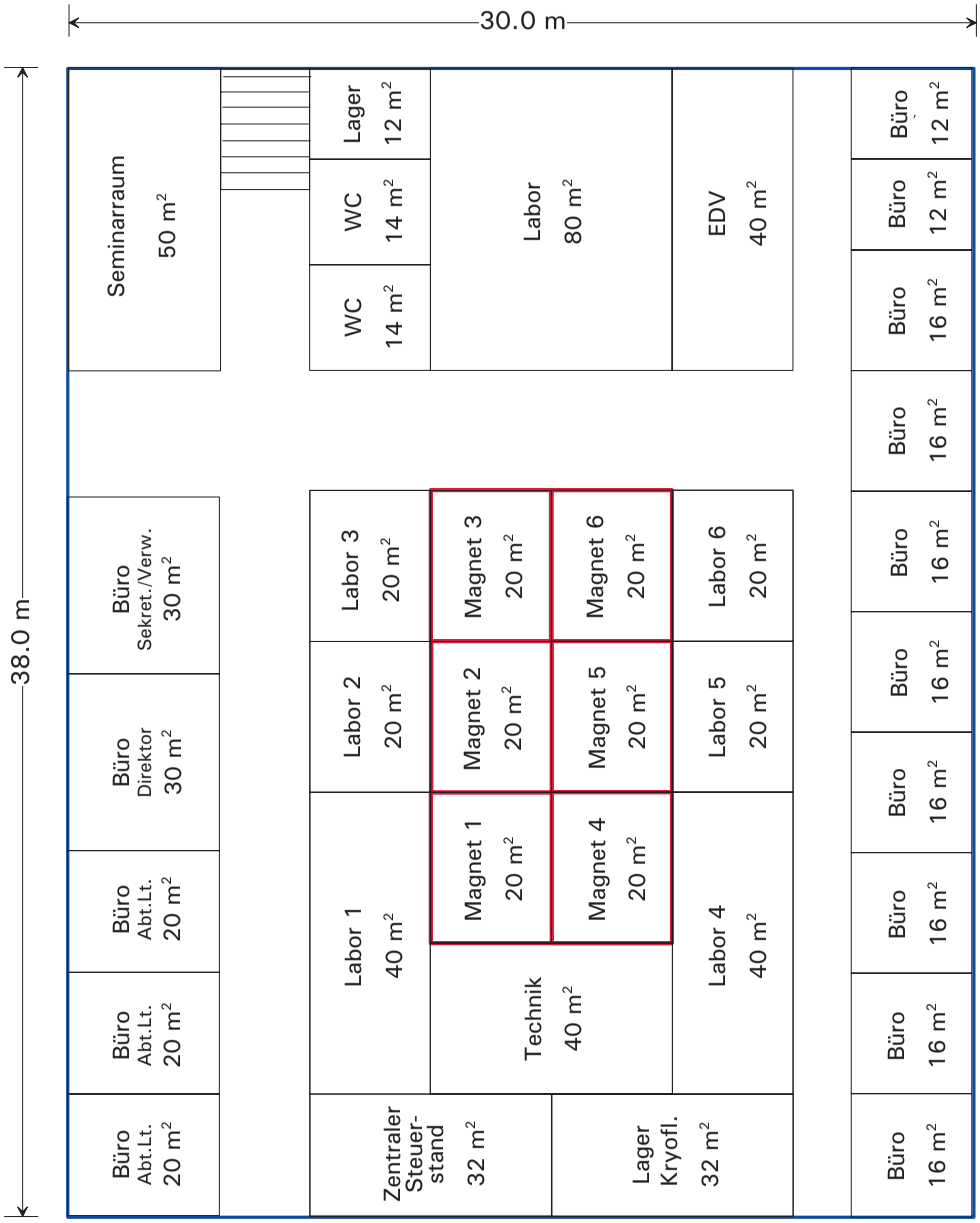


Abbildung V.1: Möglicher Grundriss für das Gebäude des Hochfeldlabors
Erdgeschoss (Gesamtfläche ca. 1200 m²)

Das Gebäude soll auf dem Gelände des Forschungszentrums Rossendorf in unmittelbarer Nähe der Strahlungsquelle ELBE errichtet werden. Das dort erzeugte Infrarot–Licht soll den Magnetlabors für entsprechende Spektroskopie–Experimente zugeführt werden. Diese Kombination eines supraleitenden Elektronenbeschleunigers plus Freie–Elektronen–Laser für das Infrarot mit einem Hochfeldlabor wird weltweit einmalige Hochfeld–Spektroskopie–Experimente erlauben.

Für die Kostenberechnung werden folgende Zahlen zugrunde gelegt:

Labors	1000 DM/ m^3 umbauten Raum
Kellergeschoss	750 DM/ m^3 umbauten Raum
Büros	500 DM/ m^3 umbauten Raum

Für die Raumhöhe werden 4 m angenommen. Damit berechnen sich die Kosten für das Gebäude des Hochfeldlabors wie folgt:

Kellergeschoss	(Elektroversorgung, Werkstatt) (1200 x 4) m^3 x 750 DM/ m^3	=	3,60 Mio. DM
Erdgeschoss	(Hälfte Labors/Hälfte Büros) (1200 x 4) m^3 x 750 DM/ m^3	=	3,60 Mio. DM
			7,20 Mio. DM
	plus 25 % für Planung, Genehmigung, Spezialanforderungen für Hochfeldlabor (Abschirmungen, Sicherheit)		1,8 Mio. DM
	Gesamtsumme für Gebäude		**9,0 Mio. DM**

Kapitel VI

Schlussfolgerungen

Die derzeitige Zahl und z. T. auch Ausstattung der weltweit vorhandenen Hochfeldlabors ist der großen Breite und großen wissenschaftlichen und technologischen Bedeutung der Hochfeld–Anwendungen (Kap. I.6, Kap. II) nicht mehr angemessen. Insbesondere die europäische Situation verlangt dringend eine Verbesserung. Mit Investitionen im vergangenen Jahrzehnt in das in Europa führende Labor in Grenoble, die um eine Größenordnung unter den Mitteln liegen, die in die nationalen amerikanischen und japanischen Hochfeldlabors flossen (Kap. I.3), wegen des hohen Alters und der Unsicherheit über die Zukunft des deutsch–französischen Labors in Grenoble nach Beendigung des Betreibervertrags zwischen CNRS, Frankreich, und Max–Planck–Gesellschaft, Deutschland, in wenigen Jahren, ist die Lage der europäischen Hochfeldforschung außerordentlich unbefriedigend und erfordert dringend eine europäische Initiative. Diese Ansicht wird auch von der European Science Foundation vertreten, die in einer Studie die zwingende wissenschaftliche Notwendigkeit für den Aufbau eines europäischen Hochfeldlabors hervorhebt. Eine europäische Hochfeldinitiative muss und kann nur mit wesentlicher deutscher Beteiligung erfolgen. Derzeit existiert auf dem Gebiet der Hochfeldforschung auf „deutschem Boden“ jedoch keine gebündelte Kompetenz oder keine Erfahrung (Tab. I.4, S. 8), die auf dem Niveau der drei derzeitigen „big–players“, Grenoble, Tallahassee und Tsukuba (Tab. I.1 – I.3), anzusiedeln wäre und die bei einer möglichen Entscheidung über ein europäisches Hochfeldlabor eingebracht werden könnte. Ganz im Gegensatz dazu gibt es in Deutschland und **insbesondere in Dresden (Tab. I.4) eine große, angesehene und erfahrene Nutzergemeinde für die höchsten Magnetfelder**.

Um an die **Weltspitze** der Labors für die höchsten, heute möglichen **statischen Magnetfelder** zu gelangen, sind Investitionen im Bereich bis ca. einer **halben Milliarde DM** notwendig. Um dagegen ein international führendes Labor für **gepulste, nicht–destruktive Magnetfelder** aufzubauen, ist nur etwa ein Zehntel des Betrags notwendig, also Investitionen von etwa **50 Millionen DM** (s. Tab. VI.4 u. Tab. VI.5). Die Magnetfelder, die mit heutiger Techno-

logie gepulst erzeugbar sind, liegen dabei um einen Faktor zwei über der höchsten heute statisch prinzipiell möglichen Feldstärke (100 T statt 50 T; Tab. I.1 – I.3). Da zudem die dabei erreichbaren Pulsdauern (einige 10 bis 100 ms) für die Mehrzahl der Experimente ausreicht und ein weites Feld der Forschung in hohen Magnetfeldern abdecken kann, erscheint der zunächst vordringlichste Schritt, im nationalen Rahmen ein Labor für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Europa zu errichten. Es ist dabei durchaus möglich, dass die langfristigere Perspektive der Hochfeld–Technologie und –Forschung völlig im Bereich der gepulsten Felder mit Pulslängen von 0,01 bis einigen Sekunden liegt.

Für die Errichtung eines solchen international konkurrenzfähigen, nationalen Labors für gepulste, sehr hohe Magnetfelder in Dresden sprechen eine Vielzahl wissenschaftlicher Gründe, deren Fundament die große, an sehr hohen Magnetfeldern interessierte und hochkompetente Nutzergemeinde in Dresden (Kap. I.4, insb. Kap. I.4.1) bildet. Auch das Defizit an nationalen Groß– oder mittelgroßen Forschungsgeräten in den neuen Bundesländern (insbesondere nach Abschaltung des Rossendorfer Reaktors und der Entscheidung, das nächste deutsche Synchrotron in Karlsruhe und nicht in Rossendorf zu bauen) sowie die Notwendigkeit, auch in der Bundesrepublik die notwendige Kompetenz für die später zu treffenden Entscheidungen über ein offensichtlich notwendiges europäisches Hochfeldlabor zu schaffen, begründen diese Initiative.

Der Dresdner Vorschlag geht über das hinaus, was in Europa und Japan existiert oder für die nächsten Jahre geplant ist; er entspricht den amerikanischen Plänen für die kommenden Jahre (Tab. I.2 u. Tab. I.3). Er kann in den Jahren 2000 bis 2003 zügig realisieren (Tab. VI.1), was Fachleute als die Grenze des heute und in naher Zukunft technisch Möglichen betrachten. Mit der Errichtung des Labors **am Forschungsstandort Rossendorf** und der geplanten **Kombination mit dem dort im Aufbau befindlichen Freie–Elektronen–Laser für das ferne Infrarot** ist eine weltweit einmalige Möglichkeit der Infrarotspektroskopie bei sehr hohen Magnetfeldern geschaffen; sie erscheint insbesondere für die Erforschung von Halbleitern, der Supraleitung und des Magnetismus von hohem Interesse (Kap. II). Auch wird die **in Rossendorf vorhandene technische Infrastruktur**, wie z. B. der für den supraleitenden Elektronenbeschleuniger ELBE genutzte, sehr leistungsfähige **Heliumverflüssiger**, der die Versorgung der Hochfeld–Experimente mit flüssigem Helium übernehmen kann, wertvolle Beiträge liefern. Einen weiteren Standortvorteil bildet das **im Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden vorhandene Know–how und die entsprechenden Einrichtungen für die Materialentwicklung und das Drahtziehen**. Diese für ein führendes und erfolgreiches Hochfeldlabor entscheidenden Voraussetzungen werden in das Hochfeldlabor Dresden eingebracht.

Dieses Labor, zunächst als „nationales Nutzerlabor“ errichtet, wird für alle interessierten und qualifizierten Forscher aus Deutschland und anderen Ländern offenstehen. Eine entsprechende personelle wissenschaftlich–technische Unterstützung und die experimentelle Grundausrüstung für die eigenen und für die Experimente externer Nutzer muss daher vorhanden sein. Der Betrieb der Anla-

ge, die technologische Weiterentwicklung, die Betreuung und Unterstützung der Nutzer und deren Experimente muss, insbesondere für die Kooperation mit externen Nutzern, durch wissenschaftlich–technisches Personal vor Ort gewährleistet werden (Tab. VI.3). Ein externer wissenschaftlicher Beirat wird die zur Durchführung vorgeschlagenen Experimente auswählen und richtungsweisende Entscheidungen, z. B. zur Weiterentwicklung der technologischen Infrastruktur, treffen.

Nach Inbetriebnahme des Dresdner Hochfeldlabors soll an die Europäische Union ein Antrag zur Aufnahme der Anlage als europäische „Large–Scale Facility“ gestellt werden. Damit ist eine finanzielle Förderung der Nutzung der Anlage durch Interessenten aus der EU sowie der weitere Ausbau der Anlage möglich. Der hier im Text beschriebene Vorschlag mit der 50 MJ–Elektroversorgung und den gepulsten Hochfeldmagneten für 60, 70 und 100 T könnte in einem zweiten, kleineren Schritt zu einem zentralen europäischen Hochfeld–Pulslabor, z. B. an der Seite Grenobles als Standort für statische Magnetfelder, ausgebaut werden. Die hierfür notwendigen baulichen Voraussetzungen wurden bereits weitgehend berücksichtigt, so dass der weitere Ausbau mit relativ geringen Investitionen erfolgen könnte.

In Anbetracht der wissenschaftlichen und technologischen Perspektiven ließe sich mit einer vergleichsweise „bescheidenen“ Investition von 45 Millionen DM eine weltweit führende Einrichtung für ein bisher in Deutschland vernachlässigtes und auch für Europa mit dringendem Nachholbedarf behaftetes Forschungsgebiet verwirklichen. Im Umfeld eines sich **zu einem führenden Forschungs– und Technologiestandort Deutschlands entwickelnden Dresden** würde ein **interdisziplinär arbeitendes, an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und Technologie arbeitendes Labor von internationalem Rang** errichtet werden, das sowohl für eine deutsche als auch europäische Nutzergemeinde zur Verfügung stünde. Das Labor würde insbesondere auch die wissenschaftlichen Kooperationen mit ost– und südosteuropäischen Instituten fördern. Es wäre in Kombination mit dem in Rossendorf im Aufbau befindlichen supraleitenden Elektronenbeschleuniger mit Freie–Elektronen–Laser ein wesentlicher Schritt zu dem angestrebten Ziel, **den Forschungsstandort Rossendorf zum „Grenoble Osteuropas“ auszubauen**. Diese Entwicklung erscheint auch für den Technologietransfer und für das sich zu einem Zentrum der Halbleitertechnologie und Mikroelektronik entwickelnde Dresden von großer Bedeutung.

Der Zeitplan für die Errichtung des Hochfeldlabors Dresden und die hierfür notwendigen Investitionen und das Personal für Bau– und Betriebsphasen sind in den folgenden Tabellen VI.1 bis VI.4 aufgeführt, die Gesamtkosten sind in Tabelle VI.5 zusammengestellt.

A	**Arbeiten der Vorschlagenden:**	
1.	Erster Entwurf des Vorschlags	1.9.1997 – 20.1.1998
2.	Erste Diskussion mit Geldgebern	Februar/März 1998
3.	Versenden des 1. Entwurfs an Gutachter	Februar/März 1998
4.	Detaillierte Computersimulationen der Spulen (mit NHMFL, USA)	April – Juni / September 1998
5.	Erarbeitung des endgültigen Vorschlags	Mai 1999
6.	Entwicklungsarbeiten Vorprojekt	August 1998 – Dezember 2000
B	**Avisierter weiterer Ablauf; abhängig von Geldgebern:**	
7.	Entscheidung der Geldgeber zum Vorschlag	1999
8.	Entwicklung, Konstruktions– und Bauphase	2000–2002
9.	Betriebsbeginn für Nutzer	2003

Tabelle VI.1: Zeitplan Hochfeldlabor

Material für Spulen (Auswahl, Tests, Produktion)	1 WMA	
Berechnung, Design und Bau der Spulen, Bau von Testanlagen	1 WMA	1 TMA
Elektroversorgung, Kontrollsystem, Sicherheit, Gebäudeplanung, Kryotechnik, Messtechnik, Baubegleitung	1 WMA	1 TMA
	3 WMA	2 TMA

Tabelle VI.2: Personal Hochfeldlabor, Entwicklungs– und Bauphase:
1.1.2000 – 31.12.2002 (500 TDM/Jahr je für 3 Jahre)

I.)	**Leitung / Verwaltung**		**(4)**
	1 Direktor (C4)		
	1 Sekretariat (Vc)		
	1 Verwaltungsleiter (Ib)		
	1 Verwaltungsangestellte (VIb/VII)		
II.)	**Betrieb / Entwicklung / EDV / Werkstatt**		**(9)**
	1 Abt.–Leiter (I)		
	2 Wiss.–MA (Ib/IIa)		
	1 Ing. (III)		
	5 Techn. MA (IVa/Vc/VIb)		
III.)	**Nutzerservice / Forschung / Exp.–technik und –ausrüstung**		**(14)**
	1 Abt.–Leiter (I)		
	1 Sekretariat (VIb)		
	Halbleiter/Isolatoren:	1 WMA (Ib/IIa), 1 TMA (IVa/Vc)	
	Metalle/Magnetismus/Supraleiter:	1 WMA (Ib/IIa), 1 TMA (IVa/Vc)	
	Biologie/Chemie/Polymere:	1 WMA (Ib/IIa), 1 TMA (IVa/Vc)	
	Anwendung/Industrie:	1 WMA (Ib/IIa)	
	Optik/Freie–Elektronen–Laser:	1 WMA (Ib/IIa), 1 TMA (IVa/Vc)	
	ESR/Ultraschall:	1 WMA (Ib/IIa)	
	Tiefe Temp./Hochdruck:	1 WMA (Ib/IIa), 1 TMA (IVa/Vc)	
27 Stellen (12 Wiss. MA / 11 Techn. MA / 4 Verw.) → ca. 2,5 Mio. DM			
IV.)	**2 Gaststellen Ib/IIa:**	0,2 Mio. DM	**(5)**
	6 Doktoranden IIa/2:	0,3 Mio. DM	
		Gesamte Personalkosten pro Jahr: 3,0 Mio. DM	

Tabelle VI.3: Personal – Hochfeldlabor, Betriebsphase ab 01.01.2003

Materialentwicklung, Testspulen		1,5 Mio. DM
3 Hochfeldspulen:	60 T / 50 mm / 1 s 70 T / 24 mm / 100–200 ms 100 T / 20 mm / 10–20 ms	5,5 Mio. DM
50 MJ Elektroversorgung (Kondensatoranlage)		18,5 Mio. DM
Steuerung, Pulsung, Sicherheit, Verbindung zu Spulen		2,0 Mio. DM
Mess–, Kryo–, Vakuumtechnik, EDV, Werkstatt		8,0 Mio. DM
Gebäude (inkl. Genehmigungen, Planung, Möbel)		9,0 Mio. DM
		========
Investitionsvolumen Hochfeldlabor		**44,5 Mio. DM**

Tabelle VI.4: Investitionen Hochfeldlabor 2000–2003

I.)	**Investitionen 2000 – 2003:**		**44,5 Mio. DM**
	2000:	5,0 Mio. DM	
	2001:	21,0 Mio. DM	
	2002:	15,5 Mio. DM	
	2003:	3,0 Mio. DM	
II.)	**Personal während Bauphase 2000 – 2002:**		**1,5 Mio. DM**
	für je 5 Personen 2000:	0,5 Mio. DM	
	2001:	0,5 Mio. DM	
	2002:	0,5 Mio. DM	
III.)	**Laufender Betrieb ab 1.1.2003:**		**p.a. 5,5 Mio. DM**
	Betriebs– und Sachmittel:	p.a. 2,5 Mio. DM	
	Personal:	p.a. 3,0 Mio. DM	
IV.)	**Laufende Investitionen ab 1.1.2004:**		**p.a. 1,5 Mio. DM**

	Investitionen	Personalkosten	Betriebsmittel	Gesamtkosten
2000	5,0 Mio. DM	0,5 Mio. DM		**5,5 Mio. DM**
2001	21,0 Mio. DM	0,5 Mio. DM		**21,5 Mio. DM**
2002	15,5 Mio. DM	0,5 Mio. DM		**16,0 Mio. DM**
2003	3,0 Mio. DM	3,0 Mio. DM	2,5 Mio. DM	**8,5 Mio. DM**
2004	1,5 Mio. DM	3,0 Mio. DM	2,5 Mio. DM	**7,0 Mio. DM**
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tabelle VI.5: Investitions– und Kostenplan Hochfeldlabor Dresden

Anhang A

Namen und Adressen

A.1 Projektgruppe Hochfeldlabor Dresden — HLD

Prof. Dr. Helmut Eschrig

Institut für Festkörper– und
Werkstofforschung Dresden e.V.
Postfach 20 00 16, D–01171 Dresden

Tel.: +49 (351) 46 59 – 380
Fax: +49 (351) 46 59 – 500
E-Mail: h.eschrig@ifw-dresden.de
WWW: http://www.ifw-dresden.de/

Prof. Dr. Peter Fulde

Max–Planck–Institut für
Physik komplexer Systeme
Nöthnitzer Str. 38, D–01187 Dresden

Tel.: +49 (351) 871 – 1103
Fax: +49 (351) 871 – 1199
E-Mail: fulde@mpipks-dresden.mpg.de
WWW: http://www.mpipks-dresden.mpg.de/

Prof. Dr. Ludwig Schultz

Institut für Festkörper– und
Werkstofforschung Dresden e.V.
Postfach 20 00 16, D–01171 Dresden

Tel.: +49 (351) 46 59 – 460
Fax: +49 (351) 46 59 – 541
E-Mail: l.schultz@ifw-dresden.de
WWW: http://www.ifw-dresden.de/

Prof. Dr. Frank Pobell

Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Postfach 51 01 19, D–01314 Dresden

Tel.: +49 (351) 260 – 3344
Fax: +49 (351) 260 – 2700
E-Mail: f.pobell@fz-rossendorf.de
WWW: http://www.fz-rossendorf.de/

Prof. Dr. Frank Steglich
Prof. Dr. Rüdiger Kniep

Max–Planck–Institut für
Chemische Physik fester Stoffe
Bayreuther Str. 40, D–01187 Dresden

Tel.: +49 (351) 463 – 7696
Fax: +49 (351) 463 – 7279
E-Mail: steglich@cpfs.mpg.de
WWW: http://www.cpfs.mpg.de/

Prof. Dr. Michael Loewenhaupt

Technische Universität Dresden
Institut für Angewandte Physik (IAPD)
D–01062 Dresden

Tel.: +49 (351) 463 – 6055
Fax: +49 (351) 463 – 3199
E-Mail: Loewenhaupt@physik.tu-dresden.de
WWW: http://www.phy.tu-dresden.de/iapd/

A.2 Assoziierte Mitglieder

Prof. Dr. Hans Kirchmayr

Technische Universität Wien
Institut für Experimentalphysik
Wiedner Hauptstraße 8–10, A–1040 Wien, Austria

Tel.: +43 (1) 58801 131 00
Fax: +43 (1) 58801 131 99
E-Mail: hans.kirchmayr+e131@tuwien.ac.at
WWW: http://www.tuwien.ac.at/

Prof. Dr. Michael v. Ortenberg

Humboldt–Universität Berlin
Institut für Physik
Invalidenstraße 110, D–10115 Berlin

Tel.: +49 (30) 2093 – 7730
Fax: +49 (30) 2093 – 7729
E-Mail: orten@physik.hu-berlin.de
WWW: http://www.physik.hu-berlin.de/

Prof. Dr. Jan Klamut

International Laboratory of High Magnetic Fields and Low Temperatures
P.O. Box 1410, 50–950 Wroclaw 2, Poland

E-Mail: pklamut@highscreen.int.pan.wroc.pl
WWW: http://www.int.pan.wroc.pl/

Prof. Bruno Lüthi

Johann Wolfgang Goethe Universität
Physikalisches Institut
Robert–Mayer–Straße 2–4,
D–60054 Frankfurt am Main

Tel.: +49 (69) 798 – 23745
Fax: +49 (69) 798 – 28409
E-Mail: luethi@physik.uni-frankfurt.de
WWW: http://www.rz.uni-frankfurt.de/piweb/

Prof. Dr. Jozef Sznajd

Institut of Low Temperature and Structure Research
Polish Academy of Science
P.O. Box 1410, 50–950 Wroclaw 2, Poland

E-Mail: sznajd@apollo.int.pan.wroc.pl
WWW: http://www.int.pan.wroc.pl

Prof. Dr. V. Sechovsky

Karls–Universität Prag
Institut für Physik
Ovocny trh 3/5, 116 36 Praque
Czech Republic

Tschechische Akademie der Wissenschaften
Narodni 3, 117 20 Prague 1,
Czech Republic

Tel.: +420 (2) 24 22 03 84
Fax: +420 (2) 24 24 05 72
E-Mail: kav@cas.cz
WWW: http://www.cas.cz/

A.3 Kooperationspartner

Prof. Jack E. Crow

National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL)
1800 E. Paul Dirac Dr., Thallahassee, Fl 32310

Tel.: +1 (850) 644 – 0850
Fax: +1 (850) 644 – 9462
E-Mail: crow@magnet.fsu.edu
WWW: http://www.nhmfl.gov/

Prof. Hans Schneider–Muntau

National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL)
1800 E. Paul Dirac Dr., Thallahassee, Fl 32310

Tel.: +1 (850) 644 – 0863
Fax: +1 (850) 644 – 0867
E-Mail: smuntau@magnet.fsu.edu
WWW: http://www.nhmfl.gov/

A.4 Beratung und Unterstützung

Prof. Salomon Askenazy

Service National des Champs Magnetique Pulses
CNRS–UPS–INSA
Avenue de Rangueil,
F–31077 Toulouse Cedex, France

Fax: +33 (61) 559929
E-Mail: askenazy@insa-tlse.fr
WWW: http://www.insa-tlse.fr/

Dr. Gregory Boebinger

National High Magnetic Field Laboratory (NHMFL)
Pulsed Field Facility
Los Alamos, New Mexico 87545, USA

Tel.: +1 (505) 665 – 8092
Fax: +1 (505) 665 – 4311
E-Mail: gsb@lanl.gov
WWW: http://www.nhmfl.gov/

Dr. Paul Frings

Van der Waals – Zeeman Laboratory
Universiteit van Amsterdam
Valckenierstraat 65,
NL–1018 XE Amsterdam, The Netherlands

Tel.: +31 (20) 525 – 5744
Fax: +31 (20) 525 – 5788
E-Mail: frings@wins.uva.nl
WWW: http://www.wins.uva.nl/

Prof. Dr. Roland Grössinger

Technische Universität Wien
Institut für Experimentalphysik
Wiedner Hauptstraße 8–10, A–1040 Wien, Austria

Tel.: +43 (1) 58801 131 50
Fax: +43 (1) 58801 131 99
E-Mail: rgroess@pop.xphys.tuwien.ac.at
WWW: http://www.tuwien.ac.at/

Prof. Fritz Herlach

Katholieke Universiteit Leuven
Laboratory of Solid State Physics and Magnetism
Celestijnenlaan 200D
B–3001 Leuven, Belgium

Tel: +32 16 327170
Fax: +32 16 327983
E-Mail: Fritz.Herlach@fys.kuleuven.ac.be
WWW: http://www.fys.kuleuven.ac.be/vsm/

Dr. W. Joss

Grenoble High Magnetic Field Laboratory
Max–Planck–Institut für Festkörperforschung
Avenue des Martyrs 25,
F–38042 Grenoble Cedex 9, France

Tel.: +33 4 76 88 10 01
Fax: +33 4 76 85 56 10
E-Mail: joss@polycnrs-gre.fr
WWW: http://GHMFL.polycnrs-gre.fr/

Prof. Peter Wyder

Grenoble High Magnetic Field Laboratory
Max–Planck–Institut für Festkörperforschung
Avenue des Martyrs 25,
F–38042 Grenoble Cedex 9, France

Tel.: +33 4 76 88 10 50
Fax: +33 4 76 85 56 10
E-Mail: wyder@polycnrs-gre.fr
WWW: http://GHMFL.polycnrs-gre.fr/

Anhang B

Vorprojekt

Als unmittelbares Ergebnis der Vorstellung des ersten Entwurfs des Hochfeld–Projektvorschlags beim Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst wurde im Herbst 1998 ein Vorprojekt unter dem Titel „Entwicklung hochfester, hochleitfähiger Legierungen sowie Vorarbeiten für ein nationales Hochfeldlabor“ begonnen. Das bis Dezember 2000 laufende Projekt, mit einem Finanzvolumen von ca. 1 Mio. DM (ca. 0,5 Mio. Euro) wird etwa je zur Hälfte vom Freistaat Sachsen und den folgenden Institute getragen:

- Forschungszentrum Rossendorf e.V., Dresden
- Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden e.V., Dresden
- Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden
- Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Dresden
- Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Dresden

Mit diesem Vorprojekt (s. auch Kap. I.5, S. 13) soll zum einen Dresden als Standort für ein europäisches Pulsfeldlabor etabliert werden, zum anderen können die beteiligten Wissenschaftler und Ingenieure wertvolle Erfahrungen sammeln, wie sie für den späteren, erfolgreichen Aufbau einer 100 T–Pulsfeldanlage unabdingbar sind.

B.1 Ziele des Vorprojektes

Im Rahmen des Vorprojektes wurden die folgenden Arbeitsschwerpunkte gesetzt:

B.1.1 Entwicklung hochleitfähiger und hochfester Leitwerkstoffe

Entwicklung hochleitfähiger und hochfester Leitwerkstoffe für den Bau von Hochfeldmagneten und für andere Anwendungen in der Elektrotechnik, wo es auf hohe Leitfähigkeit und hohe Zugfestigkeit ankommt. Die Weiterentwicklung von Spulen für die Erreichung sehr hoher Magnetfelder hat mit den statisch erreichten 36 T und mit den nicht destruktiv gepulst erreichten 80 T derzeit

eine Grenze erreicht, da keine Leitermaterialien zur Verfügung stehen, die die auftretenden elektromagnetischen Kräfte bei noch höheren Feldern aufnehmen könnten*. Ein weiterer Fortschritt in der Entwicklung von Hochfeldmagneten und ihrem Einsatz für die Festkörperphysik und Materialforschung wird deshalb entscheidend davon abhängen, Leitermaterialien hoher Leitfähigkeit mit noch höherer als der bisher erreichten Festigkeit zur Verfügung zu stellen. Hierfür erscheinen insbesondere Mikroverbunde auf Kupfer–Silber– und Kupfer–Dispersid–Basis sowie Makroverbunde auf Kupfer–Stahl–Basis geeignet. In dem vorgeschlagenen Vorhaben sollen diese und ähnliche, auf Kupferbasis beruhende Leiterverbundstoffe weiterentwickelt, Herstellungsverfahren mit reproduzierbaren Ergebnissen sichergestellt sowie Verfahren für die Herstellung derartiger Leiter mit großen Leiterlängen entwickelt werden.

B.1.2 Computersimulationen

Für die Entwicklung und Konstruktion der gepulsten Hochfeldspulen und die dafür notwendige Elektroversorgung müssen eingehende Computersimulationen durchgeführt werden.

Die sorgfältige Betrachtung der Strom-, Kraft- und Temperaturverteilung in einer Hochfeldspulsspule unter Beachtung der mechanischen Eigenschaften der Leiter- und Isolationsmaterialien, der Kühlung der Spule sowie ihrer elektrischen Versorgung sind ein hochkompliziertes mathematisches Problem. Neben Maximalfeld und Pulsdauer sind die Pulsform, die Feldhomogenität und -stabilität sowie die für die Experimente zugängliche Bohrung der Feldspule wesentliche Parameter der Anlage, die optimiert werden müssen. Weitere Schritte bestehen in der Optimierung des Kompromisses zwischen einer Spule mit konstanter Stromdichte bzw. einer Spule mit konstanten mechanischen Spannungen, die jeweils für Einzelgesichtspunkte optimalen Betrieb erlauben.

Darüber hinaus ist für den Aufbau einer Pulsfeldanlage die genaue Abstimmung der Energieversorgungseinheit mit dem Hochfeldmagneten notwendig. Die Energiequelle muss in kurzer Zeit eine hohe Energie an den Hochfeldmagneten übertragen, also hohe Leistungen abgeben. Dabei müssen die auftretenden Verluste minimiert werden, was zu einer möglichst kurzen Transferzeit führt. Andererseits führen zu kurze Transferzeiten zu verstärkten Wirbelstromverlusten und zu Leitern mit großen, nicht mehr wickelbaren Querschnitten. Der Entwurf von Spule und Energieversorgungsanlage muss deshalb gemeinsam erfolgen. Insbesondere muss vor Festlegung der Details der Energieversorgung der Spulenaufbau weitgehend festgelegt werden. Neben der eigentlichen Energieversorgungseinheit müssen auch Schalter, möglicherweise Energiespeicher, Transformatoren, Thyristoren etc. für die verlangten kurzzeitigen Hochspannungs- und Hochstromanwendungen berücksichtigt werden.

Auf Grund der Komplexität des Problems hat z.B. das amerikanische nationale Hochfeldlabor eine eigene Arbeitsgruppe für die angesprochenen Computersimulationen eingerichtet.

*Es wird hier davon ausgegangen, dass nicht beliebig viel elektrische Energie und Leistung zur Verfügung steht, sowie die Magnete nicht destruktiv betrieben werden. Neben den physikalischen Grenzen im Magnetbau tritt damit auch eine finanzielle auf, die unmittelbar die Leistungsfähigkeit der Energiequelle bestimmt.

B.1.3 Aufbau eines Testlabors für gepulste, hohe Magnetfelder

Das angestrebte Testlabor, das von Mitarbeitern der Projektgruppe Hochfeldlabor Dresden unter Leitung von Dr. K.–H. Müller (IFW Dresden) aufgebaut wird, soll gepulste Magnetfelder von etwa 50 Tesla für Pulsdauern von 10 bis 20 ms erzeugen. Als zentrale Bohrung sind 20 mm vorgesehen. Eine Magnetspule mit diesen Eigenschaften kann mit bekannten, kommerziell verfügbaren Leitern hergestellt werden. Ein entsprechender Magnet ist bereits mit hartgezogenem Kupferdraht unter Zuhilfenahme von Zwischenpanzerungen realisierbar (gebaut z. B. in Amsterdam, Frankfurt, Wien). Soll auf die Panzerung verzichtet werden, muss ein Draht mit höherer Zugfestigkeit zum Einsatz kommen, wie z. B. „Glidcop“ oder Kompositleiter (z. B. Kupfer mit einer Stahlummantelung). Eine solche Spule ist als „handelsüblich“ anzusehen und kann auch gekauft werden, z. B. bei den Magnetlabors in Tallahassee oder Amsterdam.

Das eigentlichen Ziel beim Bau der Pulsanlage ist es, Erfahrungen und Know-how zu sammeln. Dies betrifft z. B. die Auswahl der richtigen Leiterisolation, das Wickeln der Magnetspule und das Vergießen und Aushärten der gewickelten Spule mit Kunstharz. Weiterhin gilt es, Kenntnisse über das Gesamtsystem aus Kondensatorbank, Schaltelementen und Magnetspule zu gewinnen. Dies betrifft insbesondere das Schaltverhalten im Normalfall sowie die Wirksamkeit von Schutzmechanismen im Fehlerfall.

Die beim Aufbau des Testlabors gewonnenen Erfahrungen stellen für den späteren Ausbau auf eine 100 T–Pulsfeldanlage eine Grundvoraussetzung dar.

Im Rahmen des Aufbaus dieses Testlabors ist auch vorgesehen, ein geeignetes Konzept für die experimentelle Technik zu entwickeln und zu testen. Diese Aufgabenstellung ergibt sich zum einen aus der Notwendigkeit, das Feldprofil des Testmagneten auszumessen, zum anderen sollten auftretende Probleme bei der Messung physikalischer Parameter verschiedener Probenmaterialien (Metalle, Halbleiter, Supraleiter, organische Substanzen etc.) im Vorfeld analysiert und Wege zu Problemlösungen entwickelt werden.

Im Rahmen des Vorprojekts sind die Messungen magnetischer Eigenschaften und elektrische Transportmessungen geplant.
Bei den magnetischen Messverfahren bieten sich induktive **Magnetisierungsmessungen** an. Diese konstruktiv relativ einfache Methode stellt eine Standardmethode in gepulsten Magnetfeldern dar. Sie beruht auf der Messung der Spannung, die in einer Aufnehmerspule induziert wird. Die Magnetisierung ergibt sich im wesentlichen aus der Integration dieses Spannungssignals. Um die in gepulsten Magnetfeldern auftretenden Störungen (Induzierung von Parasitärspannungen, Rauschen etc.) zu minimieren, kommt der Entwicklung (Berechnung und Fertigungstechnologie) rauscharmer, multipolkompensierter Messsysteme eine große Bedeutung zu. Die Spulengeometrie des Aufnehmersystems ist deshalb zu optimieren. Eine gute technische Lösung stellen zwei ineinandergeschachtelte, kompensierte Aufnehmerspulen dar. Die Anordnung hat u. a. den Vorteil, dass Inhomogenitäten des Magnetfeldes keine Rolle spielen und Momente höherer Ordnung relativ einfach kompensiert werden können. Erfah-

rungen bei der Entwicklung von Spulensystemen für Magnetisierungsmessungen sind insbesondere am Institut für Festkörper– und Werkstofforschung Dresden vorhanden. Anwendungen der zu entwickelnden Verfahren ergeben sich unmittelbar auf dem Gebiet hartmagnetischer Werkstoffe sowie bei der Untersuchung niederdimensionaler Seltenerd–Übergangsmetall–Verbindungen.

Darüber hinaus sollen Testmessungen zum **Magnetowiderstand** erfolgen. Dazu wird die Strom–Spannungs–Methode in der „kleinen" Pulsfeld–Anlage realisiert. Es sind sowohl Gleichstromexperimente als auch Impendanzmessungen mit einer Frequenz von bis zu 100 kHz vorgesehen. In einer späteren Phase ist die Adaptierung eines Lock–In–Verfahrens geplant. Auch hier muss das Messsystem so gestaltet werden, dass die Einflüsse, der durch die Pulsfelder bedingten experimentellen Störungen, gering bleiben. U. a. sind eine optimale Probengeometrie sowie die schleifenfreie Führung von Messleitungen notwendig. Bei Gleichstrommessungen sind zudem Messungen mit vertauschter Stromrichtung durchzuführen.

B.2 Stand des Vorprojektes (April 1999)

Der Aufbau der Pulsfeldanlage gliedert sich in vier, nahezu voneinander unabhängige Aufgabengebiete, nämlich die Kondensatorbank, den Hochfeldmagneten, die elektrische Verschaltung und die Messwerterfassung. Diese Arbeitsschwerpunkte lassen sich weitestgehend parallel verfolgen. Soweit möglich und sinnvoll, wird auf industrielle Resourcen zurückgegriffen. Die Konzipierung der Anlage, insbesondere der modulare Aufbau der Energieversorgung und die Entwicklung der Steuerung und Beschaltung wird in Eigenregie durchgeführt, um wertvolle Erfahrungen für den Aufbau der 50 MJ–Anlage zu sammeln.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt (April 1999) sind alle wichtigen Einzelbauteile zum Aufbau der Bank vorhanden. Dies sind im Einzelnen die Kondensatoren der Kondensatorbank (Energieinhalt: 1 MJ) und die wichtigsten Komponenten der elektrischen Verschaltung, nämlich die Thyristorschalter und Dioden. Gegenwärtig werden diese Komponenten verschaltet. Die Steuersoftware der Pulsfeldanlage ist bereits erstellt, muß jedoch noch an der fertiggestellten Anlage getestet werden. Ähnlich weit fortgeschritten ist der Aufbau des Messwerterfassungssystems. Die Computersimulationen zum Entwurf der Hochfeldspulen sind dieselben wie sie in Kapitel IV.1 vorgestellt wurden, sie können als weitgehend abgeschlossen angesehen werden.

Parallel zur in Dresden vorangetriebenen Materialentwicklung, werden die ersten Hochfeldspulen mit konventionellen Verfahren am National High Magnetic Field Laboratory in Tallahassee unter unmittelbarer Mitarbeit der Dresdner Forscher hergestellt, und sollen bereits im Juni 1999 zu Verfügung stehen. Dies ermöglicht es, Komponenten und Material frühzeitig im realen Einsatz zu testen und lässt das Dresdner Hochfeldlabor auch im internationalen Rahmen in Erscheinung treten.

Anhang C

ESF Studies on Large Research Facilities in Europe — The Scientific Case for a European Laboratory for 100 Tesla Science

Im Folgenden ist ein Auszug der im November 1998 erschienenen Studie der European Science Foundation (ESF) gegeben, in der die wissenschaftliche Notwendigkeit, in Europa ein Hochfeldlabor zu errichten, eindringlich dargestellt wird [1]*. Das abgedruckte „Executive Summary“ gibt eine Zusammenfassung der in der Studie sehr ausführlich diskutierten wissenschaftlichen Themenkreise wider und faßt die Empfehlung der Studie zusammen, dass der dringendste Bedarf für ein europäisches Handeln auf dem Gebiet gepulster 100–T–Felder liegt. Eine entsprechende Anlage sollte bis 2003 in Betrieb gehen. Die hierfür notwendigen Investitionskosten werden auf 50 Mio. Euro abgeschätzt, die laufenden Kosten auf 5 Mio. Euro.

*Der Volltext der Studie ist im Internet unter der WWW–Adresse **http://www.esf.org** veröffentlicht. Gedruckte Exemplare können über die „ESF Communication and Information Unit“ bezogen werden (ISBN 2–912049–04–0).

ESF Studies on Large Research Facilities in Europe

The Scientific Case for a European Laboratory for 100 Tesla Science

Editors:
M. Springford
L.J. Challis
H.U. Karow



ESF Study Report
November 1998

2. Executive Summary

High magnetic fields are one of the most powerful tools available to scientists for the study, modification and control of matter. Ever since 1935, Europe has played a leading role in the development and application of large magnetic fields both steady and pulsed. Access to magnetic fields, significantly more intense than those currently available, would have a profound impact across a wide range of disciplines. All previous experience indicates it would lead to many new and exciting discoveries.

1. In semiconductor physics, experiments at the limit of resolution and sensitivity require steady or quasi-static fields for their realisation. However, having relatively low carrier concentrations, semiconductors are also well suited to pulsed fields. New physics is identified which can be explored in steady fields of 40-50 T, pulsed fields of 80-100 T of ~10 msec duration and pulsed fields of 100-200 T of a few microseconds duration. Such fields will permit new experiments on the electronic properties of quantum dots and superlattices, the Quantum Hall Effect in the extreme quantum limit*, new regimes of cyclotron resonance and magneto-tunnelling spectroscopy.

2. In the broad field of magnetism and metals, pulsed magnetic fields extending to 100 T are important, both for the development of new magnetic materials for applications as well as for the investigation of new physics along the field axis of the phase diagram. For many applications, a field duration of ~10 msec or longer is desirable, although for certain experiments, such as those in doped oxides, shorter time scales are feasible. Many crucial experiments on intermetallic compounds of both technological and fundamental significance have been identified. Important new science will also flow from high field studies of metallic superlattices, doped oxides, spin-liquids, magnetic quantum tunnelling and magneto-optical effects, including the localization of light.

3. High magnetic field measurements in strongly correlated electronic systems provide an opportunity to induce and to study a large variety of ground states in superconductors, heavy fermion compounds and organic molecular metals. In each group of materials, the availability of higher magnetic fields, in the region 50-100 T, is of paramount importance in order to achieve an understanding of the underlying many-body physics, including magnetic quantum critical phenomena. In heavy fermion systems, the Fermi surfaces of compounds at the point of magnetic instability and through the metal-Kondo insulator transition become possible in fields of 50-100 T; in high-T_c perovskites, the field dependence of the pseudogap, the field

* The integer Quantum Hall Effect was discovered in 1980 (by K.v.Klitzing at the HMFL Grenoble. He was subsequently awarded the 1985 Nobel Prize). The fractional Quantum Hall Effect was discovered in 1982 by the use of more powerful magnetic fields (in the U.S., by HL Störmer and DC Tsui at MIT's Francis Bitter National Magnet Laboratory, honored with the 1998 Nobel prize in physics).

restoration of the normal phase and studies of the phases of the vortex lattice become accessible; and in organic conductors, Hall measurements into the extreme quantum regime (B ~50 T) become possible.

4. A multitude of scientifically interesting and technically important non-perturbative phenomena are predicted to occur in atoms, molecules and clusters subject to intense magnetic fields in the range 50-100 T. Their investigation will profoundly influence our understanding in such areas as electron-electron correlations and the several-body problem, quantum chaos and giant dipole atoms and molecules, with applications expected to include the control of chemical reaction processes, the development of powerful laser systems in new wavelength regions, new techniques for the growth of clusters and the stabilization of microscopic matter-antimatter systems. Whilst a wide range of experimental configurations and time scales will ultimately be required to achieve all of these goals, there is no doubt that the advent of magnetic fields extending to 100 T, initially on time scales of milliseconds, will profoundly affect both the practice and perception in this field of study.

5. Intense magnetic fields, beyond those currently available, are of wide application in many areas of chemistry; molecular magnetism, magnetic resonance, spin chemistry and optical spectroscopy. In some cases, e.g. optical spectroscopy, the requirements on field homogeneity in space and constancy in time, are considerably less stringent than in magnetic resonance applications. Nevertheless, notwithstanding the interest in 100 T fields for exploring new forefront effects, for obtaining quantitative and precise data, steady fields of 50 T will be of wider application in this area than pulsed 100 T fields with a low repetition rate.

6. Simple and complex fluids respond in various ways mechanically to magnetic fields, depending on the magnetic properties of the constituent molecular and macromolecular units. Such magneto-mechanical responses include; the orientation of molecules, polymers, liquid crystals, membranes and other ordered supramolecular structures due to the anisotropy of their diamagnetic or paramagnetic susceptibilities; magnetic field induced aggregation and crystallization due to magnetic interparticle forces and molecular orientation; and magnetic separation and levitation in inhomogeneous fields due to susceptibility buoyancy. In the context of magnetic fields in the range 50-100 T, such phenomena as, the orientation of larger organized macromolecules (e.g. rod-like viruses or defects in liquid

crystals), the design of novel organic surfaces, the synthesis of new self-organizing compounds and the enhanced crystallization of proteins may be realised. For many applications, large steady fields ~50 T are required, while for others pulsed fields ~100 T on millisecond time scales are applicable.

7. Magnetic fields are of key importance in many areas of research in the life sciences; from the magnetic spectroscopic resolution of biomolecules at the atomic level, to issues involving mesoscopic structures of biological origin or to whole organisms, including humans. Large steady fields, significantly above those currently available, have foreseeable applications for the orientation and organization of bio-macromolecules and are important for the further development of biomolecular spectroscopy. Concerning the effect of magnetic fields on living cells, there is a complete lack of information on exposure effects of fields greater than approximately 4 T on humans and greater than approximately 12 T on laboratory animals.

8. Magnetic resonance spectroscopy is a powerful analytical tool in almost all areas of the natural and life sciences, particularly in chemistry, solid state physics, materials science, biology and medicine. Magnetic resonance experiments (EPR, NMR, ODMR and ENDOR etc.) benefit in general from higher magnetic fields, which influence signal quality and resolution. Bitter and hybrid magnets are of only limited application (e.g. in solid state NMR) and pulsed fields are not in general useful for these applications. For spectroscopic use, the most urgent need is for the development of high field, persistent, superconducting magnets, which meet the homogeneity and stability requirements, in the range beyond 24 T, i.e. >1 GHz proton resonance frequency. Particularly promising in spectroscopic applications is magnetic resonance force microscopy, which is technically related to the atomic force microscopy and offers a sensitivity and spatial resolution surpassing conventional magnetic resonance. Sub-micron spatial resolution may be achieved, with reduced demands on spatial homogeneity of the static field. For NMR imaging, high field, high volume superconducting magnets are needed for use in such fields as, animal research, genetic engineering, drug design and medical applications, especially the study of metabolism and brain function.

9. High field magnets are vital components of large scale facilities. In neutron scattering, employed to study fundamental aspects of magnetism, the need is identified for magnets operating up to and beyond 30 T. The next generation neutron sources will be pulsed and are therefore, in principle, well matched to pulsed magnets. At synchrotrons, high

magnetic fields are used both to produce radiation as well as in its application. Using such techniques as, magnetic X-ray scattering and X-ray magnetic dichroism to probe the magnetic properties of matter, the provision of DC fields in the range 30-40 T would create new opportunities for experiments in such areas as, dichroism in paramagnetic systems, including biomolecules, magnetic field induced structural transformations and high temperature/high magnetic field superconductors. Similarly, combining a free-electron laser, such as Felix, with a high intensity pulsed magnetic field of 60 T and beyond, would create new experimental opportunities, particularly in the field of semiconductors. Finally, it is evident that the design and efficiency of possible fusion reactors for the next century, based on the magnetic confinement system (such as the tokamak), will depend crucially on development of magnets during the coming decades.

10. A large spectrum of industrial companies will benefit from the spin-offs from fundamental science, via new and improved materials, devices and processes, as well as from the magnet technology developments needed to achieve the science. Opportunities are identified for the chemical, pharmaceutical, medical, power, mineral processing, transportation, metallurgical, electronics and aerospace industries.

11. There are strong scientific, as well as technical and financial, arguments why the major facilities and the intellectual core of a new European high magnetic field laboratory should be in one location.

12. Recent plans to extend the fields available for this area of science and technology to a European scale were initiated in 1990 by an EC Advisory Committee. Two workshops have been held to discuss respectively the science/technology and the design of a large pulsed field facility and, in 1996, a project was started to develop a 100 T long pulse (2-10msec) prototype magnet. This project is presently funded by the EC Large Scale Facilities Programme for the first two years of what is seen as a four-year programme.

13. This ESF Study reports on the access to high fields currently available in Europe and internationally and describes how a European Large Magnetic Field Facility (ELMF) would restore Europe's position to be competitive with laboratories elsewhere, particularly in the USA and Japan. It argues the case for this and assesses the risks to European science and technology if it were decided that European scientists should largely be dependent on external access. Suggestions are given for the number and specifications of the magnets needed for the ELMF plus the instrumentation required for pulsed and steady fields.

Approximate capital and running costs are included.

14. The study also describes the possible forms that an ELMF could take: single site, or a network of three or more sites. It stresses the importance to growth and exploration of this area of science and technology and of associating the ELMF with other advanced magnet laboratories within Europe and internationally.

15. Recommendations
It is recommended that:

- An ELMF should be commissioned to be in operation in 2003. The scientific case demonstrates a strong need for both static fields up to 50 T and long pulsed fields up to 100 T. The most urgent need for European action is for 100 T long pulse fields. This view is endorsed by the report of four International Experts. The likely capital and running costs of the pulsed field facility are of the order of 50 MECU and 5 MECU p.a. respectively.

- No immediate European action on static fields should be taken in view of the recent and planned major investments in Grenoble and the possibility of major investment in Nijmegen although the funding position for Grenoble is unclear beyond 2004. The position should therefore be carefully reviewed in three or four time or earlier if circumstances require. A delay would allow a clearer picture to emerge of the likely timescale for high T_c superconducting coils.

- Further work should be taken to assess the need for European action relating to high homogeneity fields for NMR/MRI.

	25 T+ supercond.	50 T+ Hybrid	100 T Pulsed (ms)	>100 T Pulsed (μs)
LDS & semiconductors	■	■	■	■
Magnetism & Metals		■	■	
Superconductors HFS, Organics	■	■	■	
Atoms, Mols. Clusters, Plasmas		■	■	
Chemistry	■	■	■	
Soft Condensed Matter		■	■	
Biology & Medical Sciences	■	■		
Magnetic Resonance	■	■		

The Table illustrates the fact that different areas of science have different high magnetic field requirements. For the four broad classes of future magnets; high field superconducting (25 T+), hybrid (50 T) millisecond pulsed (100 T) and microsecond pulsed (>100 T), the shaded regions indicate where a need has been identified by the scientific panels.

Literaturverzeichnis

Die wissenschaftliche und technische Literatur zum Gebiet der Hochfeldforschung ist recht umfangreich. Die folgende Zusammenstellung soll nur einen repräsentativen Überblick über die historische Entwicklung sowie einige ausgesuchte Übersichtsartikel geben.

Kapitel I

[1] ESF Studies on Large Research Facilities in Europe, The Scientific Case for a European Laboratory for 100 Tesla Science, M. Springford, L. J. Challis, H. U. Karow, ESF Study Report, November 1989

Kapitel III

[2] M. von Ortenberg, W. Staguhn, F. Bobel, S. Takeyama, T. Sakakibara, N. Miura, *J. of Physics E: Sc.Instr.* **22** (1989) 359

[3] G. Machel, M. von Ortenberg, *Physica B* **211** (1995) 355

[4] T. Takamasu, H. Nakagawa, N. Miura, *Physica B* **216** (1996) 362

[5] N.E. Lumpkin, B.E. Kane, A.S. Dzurak, R.G. Clark, R.P. Starrett, J.O´Brien, G.R. Facer, A.V. Skougarevsky, N. Miura, H. Nakagawa, H. Yokoi, K.D. Maranowski, A.C. Gossard, E.E. Mitchell, K. Müller, *Physica B* **246–247** (1998) 395

[6] B.E. Kane, N.E. Lumpkin, A.Z. Dzurak, R.G. Clark, *Rev.Sci.Instr.* **68** (1997) 3843

[7] R. Gersdorf, P.H. Frings, J.J.M. Franse, F.R. de Boer, *Physica B* **201** (1994) 530

[8] F. Herlach, C.C. Agosta, R. Boegarts, W. Boon, I. Deckers, A. de Kayser, N. Harrison, A. Lagutin, L. Li, L. Trappemiers, J. Vanacken, L. van Bockstal, A. van Esch, *Physica B* **216** (1996) 161

[9] A.M. Witkowski, T. Strutz, C. Kutter, P. Wyder, *Physica B* **211** (1995) 372

[10] A.H. Lacerda, C.H. Mielke, N. Harrison, W.P. Beyermann, A. Yatskar, P.C. Canfield, S.L. Budko, G.M. Schmiedeshoff, M.S. Torikachvili, *Physica B* **246–247** (1998) 97

[11] M. Motokawa in *Topics in Applied Physics* **57***: 'Strong and Ultrastrong Magnetic Fields'*, ed. F. Herlach, Springer Verlag (1985) 113

[12] P.H. Frings, Universität Amsterdam (persönliche Mitteilung)

[13] N. Miura, H. Nijiri, *Physica B* **216** (1996) 153

[14] G. Kido, *Physica B* **155** (1989) 199

[15] R.Z. Levitin, V.N. Milov, Y.F. Popov, V.V. Snegirev, *Physica B* **177** (1992) 59

[16] B. Wolf, G. Bruls, I. Kouroudis, D. Finsterbusch, M. Sieling, S. Schmidt, W. Palme, B. Lüthi, *Physica B* **246–247** (1998) 179

[17] F. Herlach, M. van der Burgt, I. Deckers, G. Heremans, G. Pitsi, L. van Bockstal, S. Askenazy, R.G. Clark, H. Jones, J. Mallett, *Physica B* **177** (1992) 63

[18] R.G. Clark, R.B. Dunford, F.F. Fang, V.A. Stadnik, E.E. Mitchell, R. Newbury, R.H. McKenzie, R.P. Starrett, A.V. Skougarevsky, J.O. Chu, K.E. Ismail, B.S. Meyerson, *Physica B* **216** (1996) 388

[19] J.S. Brooks, C. Mielke, J. Cothern, J. Simmons, *Physica B 246–247* (1998)

Kapitel IV

Magnete

[20] Bitter Francis, 'The Design of Powerful Electromagnets. Part I. The Use of Iron', *Rev. Sci. Instr.* **7** (1936) 479

[21] Montgomery D. B., 'Solenoid Magnet Design', *Wiley-Interscience* (1969)

[22] Aubert G., 'High Magnetic Fields: Physical Limits in Magnet Design', *Physica Scripta* **T 35** (1991) 168

[23] Date Yamagishi, 'A new method of high magnetic field generation and its applications', *IEEE Trans. Magn.* **12** (1976) 1024

[24] 'Proc Second European Workshop on Science in 100 T', Leuven, 1994, Ed. Challis, Franse, Herlach, Wyder

[25] James M. Gere, Steven P. Timoshenko, 'Mechanics of Materials', Pws Publications Co., Mai 1997

[26] Kapitza Peter, 'A Method of Producing Strong Magnetic Fields', *Proc. Roy. Soc. A* **105** (1924) 691

[27] S. Askenazy, *Physica B* **216** (1996) 221

[28] S. Askenazy, L. Van Bockstal, F. Herlach and H.-J. Schneider-Muntau, *Meas. Sci. and Technol.* **4** (1993) 1058

[29] J.M. Louis, P.H. Frings and R. Gersdorf, *Physica B* **211** (1995) 69

[30] F. Herlach, L.Li, N. Harrison, L. Van Bockstal, J-M. Louis, P. Frings and J. Franse, M. Van Cleemput, H. Jones, F. Dupouy, S. Askenazy, *IEEE Trans. Mag.* **32** (1996) 2507

[31] R. Gersdorf, P.H. Frings, *Physica B* **205** (1995) 133

[32] Daten zu Zylon siehe *http://www.toyobo.com.jp*

[33] *NIST Monograph* **177**, Properties of Copper and Copper Alloys at Cryogenic Temperatures

[34] Electrical, Thermal and Mechanical Modeling of Pulsed Magnets, Internal Report, NHMFL, 1995

Materialentwicklung

[35] D. Dew-Hughes, *Mat. Sci. Eng. A* **168** (1993) 35

[36] F. Heringhaus et al., *Metall* **50** (1996) 272

[37] J.T. Wood et al., *Acta mater.* **45** (1997) 1099

[38] J.D. Embury und Ke Han, *Current Opinion in Solid State & Materials Science* **3** (1998) 304

[39] P. Pernambuco-Wise, in H.J. Schneider-Muntau (Ed): Proceedings of High Magnetic Fields: Application, Generations, Materials, Singapore: World Scientific (1997) 371

[40] E. Snoeck et al., *Scripta Materialia* **38** (1998) 1643

[41] S. Askenazy, *Physika B* **246–247** (1998) 67

[42] B.J. Gao et al., *Physica B* **246–247** (1998) 341

[43] L. Van Bockstal et al., *IEEE Trans. Magn.* **32** (1996) 2518

[44] S.I. Hong und M.A. Hill, *Acta mater.* **46** (1998) 4111

[45] D. Raabe und U. Hangen, *Computational Materials Science* **5** (1996) 195

[46] R. J. Weggel et al., *IEEE Trans. Magn.* **30** (1994) 2188

[47] J. Bevk et al., *J. Appl. Phys.* **49** (1978) 6031

[48] W.A. Spitzig et al., *Materials and Manufacturing Processes* **7** (1992) 1

[49] C.V, Renaud et al., *Advances in Cryogenic Engineering* **32** (1986) 443

[50] V. Pantsyrnyi et al., in [39], 465

[51] F. Heringhaus et al., *Metall* **47** (1993) 558

[52] W.A. Spitzig und P.D. Krotz, *Scripta Metallurgia* **21** (1987) 1143

[53] H. Jones et al., *IEEE Trans. Magn.* **30** (1994) 1651

[54] F. Dupouy, Diss. Nr.367, INSA, Toulouse (1995)

[55] L. Schultz und R. Bormann, *J. Appl. Phys.* **50** (1979) 814

[56] R. Bormann et al., *Z. Metallkunde* **65** (1979) 467

[57] W.A. Spitzig et al., Copper-Refractory Metal Microcomposites, Ames Lab., U.S. Dep. of Energy Metallurgy and Ceramic Division, Iowa State University, (zitiert in [51])

[58] M.A. Morris und D.G. Morris, *Mat. Sci. Eng. A* **111** (1989) 115

[59] G. Frommeyer und G. Wassermann, *Phys. Stat. Sol. (a)* **27** (1975) 99

[60] G. Frommeyer und G. Wassermann, *Acta Metallurgica* **23** (1975) 1353

[61] Y. Sakai et al., in [39], 477

[62] Y. Sakai und H.-J. Schneider-Muntau, *Acta mater.* **45** (1997) 1017

[63] T. Hirota et al., *IEEE Trans. Magn.* **30** (1994) 1891

[64] W.A. Spitzig et al., in S.N.G. Chu et al. (Ed): Micromechanics of Advanced Materials: A Symposium in Honor of Professor James Li's 70th Birthday, The Minerals, Metals & Materials Society (1995) 341

[65] D. Raabe und D. Mattissen, *Acta mater* **46** (1998) 5973

[66] J.D. Troxell, in [39], 457

[67] T. Weißgärber, Diss. TU Dresden (1998)

[68] H. Jones und M. Van Cleemput, in [39], 499

[69] H. Jones et al., *Physica B* **246-247** (1998) 337

[70] I. Ochiai et al., *J. Iron and Steel Institute of Japan* **79** (1993) 1101

[71] R. Zhou et al., *Materials Characterization* **37** (1996) 239

[72] M. Heilmaier et al., *Mater. Sci. Eng. A* **239–240** (1997) 652

[73] U. Grundmann et al., *Mater. Sci. Eng. A* **234–236** (1997) 505

[74] K. Fischer et al., *Advances in Superconductivity* **VIII** 2 (1996) 843

[75] J. Eickemeyer et al., Berg- und Hüttenmännischer Tag, Freiberg, Heft B (1986) 69

[76] J. Eickemeyer et al., *J. Mater. Process. Techn.* **61** (1996) 250

[77] F. Herlach, *Physica B* **246-247** (1998) 152

Energieversorgung

[78] R. Kratz Dissertation, Universität Konstanz (1997)

[79] Jack R. Lippert, Battery Power Supply for the Navy Electrommagnetic Torpedo Launcher, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS* **29** 1 (1993)

[80] J.A. Pappas et al., Design of a 500 MJ, 5 MA Power Supply, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS* **29** 1 (1993)

[81] GNB Technologies, Installation and Operating Instructions for Marathon and Sprinter Batteries

[82] G. Boebinger et al., Seventy–two tesla non–destructive pulsed magnetic fields at AT&T Bell Laboratories, *Physica B* **201** (1994) 560

[83] R. Grössinger, Technik hoher Magnetfelder, Vortrag im Forschungszentrum Rossendorf

[84] M. von Ortenberg et al., The design and performance of a transportable low–cost instrument for the generation and application of megagauss fields, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **30**, (1997) 1697

[85] Prof V. G. Kuchinsky, Efremov Research Institute of Electrophysical Apparatus, St. Petersburg, Rußland, Power Supply System based on Homopolar Generator and Inductive Storage

[86] Prof. S. Askenazy, Service National des Champs Magnetiques Pulses Toulouse, Frankreich, Kondensatorbank mit Crowbardiode

[87] MicroSim Schematics Version 6.1, MicroSim Corporation