

Aufbau von Apparaturen zur Messung der spezifischen Wärme, thermischen Leitfähigkeit und Magnetostriktion für gepulste Magnetfelder am Hochfeldlabor Dresden (HLD)

M. Nicklas, A. D. Bianchi¹, P. Gegenwart, S. Wirth, J. Wosnitza¹ und F. Steglich

Der Wissenschaftsrat hat den Projektvorschlag zur Errichtung des Dresdner Hochfeldlabors (HLD) im November 2002 uneingeschränkt zur Förderung empfohlen. Darauf folgte im Februar 2003 die Entscheidung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des sächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK), den Aufbau des HLD als Großgerät zu finanzieren. Mit dieser Entscheidung hat das HLD für vier Jahre die Zusage der Mittel zum Aufbau eines 100 T Nutzerlabors erhalten. Von Beginn an war das Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe (MPI-CPfS) aktiv an Projekten am HLD beteiligt [1]. Momentan im Aufbau, wird das HLD 2007 als eine der weltweit führenden Nutzereinrichtungen für gepulste Magnetfelder öffnen. Zu diesem Zeitpunkt werden fünf verschiedene gepulste Magnete mit verschiedenen Pulsprofilen einsatzbereit sein. Dazu gehören ein 100 T/10 ms und ein 60 T/1000 ms Langpulsomagnet. Eine ausführliche Übersicht der geplanten Magnete und ihrer ungefähren Parameter wird in Tabelle 1 gegeben [2].

Wie Temperatur und Druck ist auch das magnetische Feld ein wichtiger Parameter zum Studium der physikalischen Eigenschaften eines Systems. Dies ist insbesondere zutreffend für die so genannten „stark korrelierten“ Systeme, bei denen die elektronischen und magnetischen Freiheitsgrade auf eine komplexe Art und Weise miteinander verbunden sind. Für diese Systeme haben sich Experimente in magnetischen Feldern als besonders fruchtbar erwiesen. Dabei ist die Kenntnis der thermodynamischen- und der Transporteigenschaften in hohen Magnetfeldern essenziell für das Verständnis der grundlegenden physikalischen Prinzipien, wie z.B. die zur Hochtemperatursupraleitung in perowskitischen Kupratverbindungen oder zur Ausbildung extrem schwerer Massen in bestimmten *f*-Elektron-Verbindungen führen.

Die am HLD zur Verfügung stehenden hohen Felder in Verbindung mit den langen Pulsdauern sind in idealer Weise für den Aufbau von Messplätzen für spezifische Wärme, thermische Leitfähigkeit und Magnetostriktion geeignet. Es ist



Abb. 1: Große Kondensatorbank am Hochfeldlabor am Forschungszentrum in Rossendorf (im Aufbau). Sie versorgt die Magnete mit der nötigen Energie. Um 100 T zu erreichen ist eine Energie von 50 MJ nötig.

Fig. 1: Large capacitor bank at the Dresden High-Magnetic Field Laboratory at the Research Center Rossendorf (in construction). It supplies the magnets with the necessary energy. To reach 100 T, an energy of 50 MJ is needed.

geplant diese drei neuen Möglichkeiten in gepulsten Feldern am HLD durch MPI-CPfS Wissenschaftler zu etablieren und damit einen privilegierten Zugang für Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft zu erreichen. Aus diesem Grund haben wir einen Antrag zu Finanzierung des Aufbaus von entsprechenden Instrumenten an der Großforschungsanlage HLD an den Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft gestellt. Der Antrag ist kürzlich genehmigt worden, und damit können wir nun auf die ausgezeichneten Möglichkeiten und langen Erfahrungen in der Entwicklung und in der Durchführung von Experimenten bei tiefen Temperaturen und hohen Magnetfeldern am MPI-CPfS zurückgreifen, um neue experimentelle Aufbauten für spezifische Wärme, thermischen Leitfähigkeit und Magnetostriktion in gepulsten Feldern zu entwickeln. Um eine hohe Flexibilität zu erreichen und von den unterschiedlichen Stärken der einzelnen Messmethoden zur Beantwortung unterschiedlicher physikalischer Frage-

Setups of Specific-Heat, Thermal-Conductivity and Magnetostriction Experiments in Pulsed Magnetic Fields at the Dresden High Magnetic Field Laboratory (HLD)

M. Nicklas, A. D. Bianchi¹, P. Gegenwart, S. Wirth, J. Wosnitza¹, and F. Steglich

The German Science Council gave the Dresden High Magnetic Field Laboratory (HLD) project a strong endorsement in November 2002, which was followed in February 2003 by the decision to fund the construction of the HLD as a large scale facility. With this decision, the HLD received funding for the construction of a national 100 T user facility from the Science Ministries of Germany and Saxony for four years. Since the inception of the idea for the HLD, the Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids (MPI-CPfS) has been actively involved in some of the projects of the HLD [1]. Currently under development, the HLD will open as one of the world-leading pulsed magnetic field user facilities in 2007. By this date, five pulsed magnets with different pulse shapes and length will be operational, including a 100 T/10 ms and a 60 T/1000 ms long-pulse magnet. A complete list of the approximate parameters of the magnets planned at the HLD can be found in Table 1 [2].

Like temperature and pressure, the magnetic field is an important tuning parameter for studying the physical properties of a system. This holds particularly true for so-called “strongly correlated” materials, where electronic and magnetic degrees of freedom are intricately linked. For these systems magnetic-field studies have proven highly fruitful. Knowledge of thermodynamic and transport properties in high magnetic fields is essential for the understanding of the basic physical principals leading to, e.g., high-temperature superconductivity in perovskite type cuprates or extremely heavy charge-carrier masses in certain f -electron materials.

The high magnetic fields, in combination with the long pulse duration available at HLD, are ide-

ally suited to set up experimental stations for specific-heat, thermal-conductivity, and magnetostriction measurements. It is planned to establish these new facilities in pulsed magnetic fields at the HLD by MPI-CPfS scientists, also in order to gain privileged access for users of the Max Planck Society. For this, we have submitted a proposal to the Max Planck Society for building MPI instruments at the large scale facility HLD. Since this proposal has recently been approved, we can take advantage of the expertise available in our institute in developing and conducting low-temperature experiments in high magnetic fields to develop new and advanced designs for the use in pulsed fields, especially, designs for specific-heat, thermal-conductivity and magnetostriction measurements. To achieve high flexibility and to take advantage of the strengths of different methods for answering various physical questions, we are planning to set up three different methods for measuring the specific heat: the heat-pulse technique, the AC method and the so called ‘ 3ω -method’. Each of these techniques has its own advantages and disadvantages in general, and for the use in pulsed fields in particular. We will place special emphasis on the 3ω -method which has the greatest potential for measurements in pulsed fields due to the fast relaxation times and which also allows measurements of the thermal conductivity. To measure the magnetostriction we plan to use strain gauges and also adapt capacitive methods. Of particular importance will be our abilities to prepare high-quality microstructures by photolithographic techniques (Fig. 2), especially for preparing heaters/thermometers for the 3ω -method to measure the heat capacity/ther-

	Cell #1	Cell #2	Cell #3	Cell #4	Cell #5
Field (T)	100	70	60	60	50
Pulse time (ms)	10	100	1000	20	40
Bore (mm)	20	24	40	24	24
Energy (MJ)	43.2+4.3	12	43.2	1.44	1.44

*Table 1. User magnets planned at the HLD. For each of the proposed magnets, also the required energy is listed.
Tabelle 1. Geplante Pulsmagnete am HLD. Für jeden Magnet ist die benötigte Energie angegeben.*

stellungen zu profitieren, planen wir den Aufbau von drei verschiedenen Experimenten zur Messung der spezifischen Wärme: diese nutzen die Wärmepulstechnik, die AC-Methode und die so genannte 3ω -Methode. Jede dieser Techniken hat ihre Vor- und Nachteile, insbesondere beim Einsatz in gepulsten Magnetfeldern. Wir werden einen besonderen Schwerpunkt auf die 3ω -Methode legen, da sie aufgrund der sehr kurzen Relaxationszeiten das größte Potenzial für den Einsatz in gepulsten Feldern bietet und zugleich Messungen der thermischen Leitfähigkeit gestattet. Um die Magnetostriktion zu ermitteln, planen wir den Einsatz von Dehnungsmessstreifen, darüber hinaus aber auch die Adaption der im Institut bewährten Kapazitätsmethode. Von besonderer Bedeutung sind dabei die im MPI-CPFS vorhandenen Möglichkeiten, Mikrostrukturen mit Hilfe von photolithographischen Methoden (Abb. 2) auch direkt auf die zu untersuchenden Proben aufzubringen. Dies ist besonders nützlich um Heizer und Thermometer für die 3ω -Methode zu präparieren und hilft außerdem Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen zur Messung der Magnetostriktion direkt auf die Proben aufzubringen. Erste Testmessungen der thermischen Leitfähigkeit mit Hilfe der 3ω -Methode bei hohen Temperaturen erbrachten viel versprechende Ergebnisse [3].

Die Kombination aus hohen Magnetfeldern in Verbindung mit den langen Pulsdauern am HLD wird es MPI Wissenschaftlern erlauben, interessante Materialklassen, wie z. B. Kondoisolatoren [4] oder Quantenspinsysteme [5] zu untersuchen. Kondoisolatoren sind ideal für die Untersuchung mit Hilfe von spezifischer Wärme und Magneto-

striktion in sehr hohen Magnetfeldern geeignet, da ihre charakteristische Korrelationslücke durch das angelegte Feld geschlossen werden kann. Hierdurch kommt es zum Auftreten eines großen zusätzlichen Beitrags zur elektronischen spezifischen Wärme wie auch zu einem starken Magnetostriktionseffekt als Folge des großen elektronischen Grüneisenparameters. Kondoisolatoren sind intermetallische Verbindungen wie FeSi [6], $\text{Ce}_3\text{Bi}_4\text{Pt}_3$ [7] oder $\text{U}_2\text{Ru}_2\text{Sn}$ [8], die $3d$ -, $4f$ - oder $5f$ -Elemente enthalten. Sie verhalten sich bei hohen Temperaturen wie ein „schmutziges“ Schwere-Fermionen-Metall. Mit abnehmender Temperatur nehmen die elektronischen Korrelationen zu und induzieren einen Metall-Isolator Übergang. Jüngste Ergebnisse einer Dotierungsuntersuchung an FeSi ergaben für 25% Ge (substituiert auf dem Si Platz) einen Phasenübergang erster Ordnung vom Kondoisolator zu einem ferromagnetischen Metall [9]. Diese Interpretation lässt sich nach Auskunft von Bandstrukturechnungen [10] mittels kalorimetrischer und magnetostriktiver Messungen in gepulsten Magnetfeldern am HLD überprüfen (siehe auch den Beitrag „*Unusual Metallic Properties in Cubic FeGe at High Pressure*“ von H. Wilhelm *et al.* in diesem wissenschaftlichen Report).

Die von uns zu entwickelnden neuen Techniken werden die „üblichen“ Magnetisierungs- und elektrischen Transportmethoden, die in gepulsten Feldern eine lange Tradition haben, ideal ergänzen.

¹ Hochfeld-Magnetlabor Dresden, Forschungszentrum Rossendorf, Dresden, Deutschland

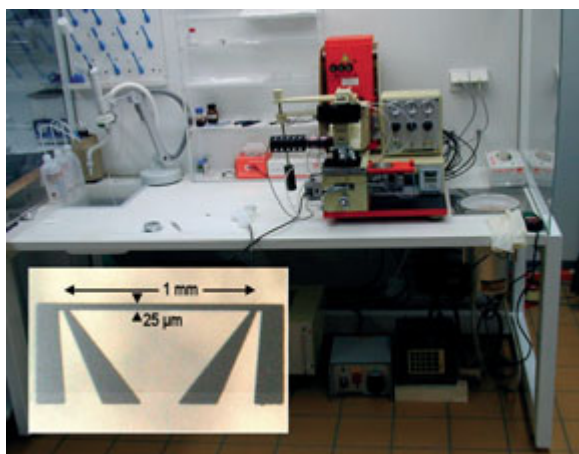


Fig. 2: Laminar-flow hood with mask aligner for preparation of micro-structured films. Inset: Thin film of 100 nm Ag on SiO_2 used as heater/thermometer for 3ω -method [3].

Abb. 2: Aufbau zur Präparation von mikrostrukturierten Filmen. Einschub: 100 nm dünner Silberfilm auf SiO_2 benutzt als/Heizer/Thermometer für die 3ω -Methode [3].

mal conductivity. This way thin-film strain gauges for magnetostriction experiments can be deposited directly onto the sample. We expect to achieve a significant increase in resolution by depositing the microstructures directly on the sample compared to the current state-of-the-art experiments. First test measurements of the thermal conductivity by means of the 3ω -method at high temperatures showed promising results [3].

These new set ups at HLD will allow MPI scientists to study interesting materials such as correlation-gap (Kondo-) insulators [4] and quantum-spin systems [5]. The class of compounds called Kondo insulators is ideally suited for a high-magnetic-field study employing specific heat and magnetostriction, as the closing of the correlation gap by applying a magnetic field leads to the appearance of a large electronic contribution to the specific heat, as well as to a large magnetostriction effect due to the giant electronic Grüneisen parameter of these compounds. Kondo insulators are intermetallic compounds like FeSi [6], $\text{Ce}_3\text{Bi}_4\text{Pt}_3$ [7], or $\text{U}_2\text{Ru}_2\text{Sn}$ [8] containing 3d, 4f, or 5f elements. At high temperatures they behave like metals. Lowering the temperature increases the electronic correlations which induces a metal to insulator transition. A recent doping study in FeSi suggests a first-order transition from a Kondo insulator to a ferromagnetic metal at a substitution level of 25%

of Si by Ge [9]. Band-structure calculations [10] suggest that, by alloying FeSi with Ge, the transition becomes accessible to the magnets planned at the HLD in Rossendorf, thus making it possible to test the hypothesis by measuring specific heat and magnetostriction in pulsed fields (see also the contribution on “Unusual Metallic Properties in Cubic FeGe at High Pressure” by H. Wilhelm *et al.* in this scientific report).

This set for specific-heat, thermal-conductivity and magnetostriction rigs for experiments in pulsed magnetic fields at the HLD will significantly broaden the scope and range of problems that can be studied at the HLD by users from the Max Planck Society and give them a privileged access. And, of course, these techniques will ideally supplement the ‘standard’ magnetization and electrical transport techniques which have a long tradition in pulsed magnetic fields.

References

- [1] Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids, Scientific Report 2001/2002 (2003).
- [2] T. Herrmannsdörfer, H. Krug, F. Pobell, S. Zherlitsyn, H. Eschrig, J. Freudenberger, K. H. Müller, and L. Schultz, *J. Low Temp. Phys.* **133** (2003) 41.
- [3] A. Bentien, PhD thesis, Dresden University of Technology, Shaker Verlag (2004).
- [4] G. Aeppli and Z. Fisk, *Comm. Condensed Matter Phys.* **16** (1992) 155.
- [5] G. Jackeli and M. E. Zhitomirsky, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 017201.
- [6] D. Mandrus, J. L. Sarrao, A. Migliori, J. D. Thompson, and Z. Fisk, *Phys. Rev. B* **51** (1995) 4763.
- [7] M. F. Hundley, P. C. Canfield, J. D. Thompson, and J. M. Lawrence, *Phys. Rev. B* **42** (1990) 6842.
- [8] V. H. Tran, S. Paschen, A. Rabis, N. Senthil-kumaran, M. Baenitz, F. Steglich, P. de V. du Plessis, A. M. Strydom, *Phys. Rev. B* **67**, (2003) 75111; M. Baenitz, A. Rabis, S. Paschen, N. Senthilkumaran, F. Steglich, V. H. Tran, P. de V. du Plessis, A. M. Strydom, *Physica B*, **329**, (2003) 545.
- [9] S. Yeo, S. Nakatsuji, A. D. Bianchi, P. Schlottmann, Z. Fisk, L. Balicas, P. A. Stampe, and R. J. Kennedy, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 046401.
- [10] V. I. Anisimov, R. Hlubina, M. A. Korotin, V. V. Mazurenko, T. M. Rice, A. O. Shorikov, and M. Sgrist, *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 046401.

¹ Dresden High Magnetic Field Laboratory, Forschungszentrum Rossendorf, Dresden, Germany