

## **H**ochfeld-Magnetlabor Dresden – Hohe Magnetfelder für die Forschung // Dresden High Magnetic Field Laboratory - Fields for Science

Magnetfelder wirken auf bewegliche Ladungsträger und die magnetischen Freiheitsgrade eines Materials. Sie können somit das Verhalten von Materialien ebenso vielfältig beeinflussen wie z. B. Druck und Temperatur. Hohe Magnetfelder ermöglichen deshalb in der Physik und vielen anderen Forschungsdisziplinen grundlegende Untersuchungen der elektronischen und magnetischen Eigenschaften der Materie. Mehr als ein Dutzend Nobelpreise in Physik, Chemie und Medizin sind eng mit der Forschung in Magnetfeldern verbunden. Die mit ihrer Hilfe getätigten Entdeckungen revolutionieren unser Verständnis von der Funktionsweise von Materialien und führen immer wieder zu neuartigen technischen Anwendungen, von denen einige längst unseren Alltag durchdringen, etwa in Transport und Verkehr, oder in der ärztlichen Versorgung.

### ***Forschung in höchsten Magnetfeldern***

Weltweit existieren eine Reihe von Hochfeld-Magnetlaboratorien, die den verfügbaren Magnetfeldbereich für Materialuntersuchungen zu möglichst hohen Magnetfeldern erweitern. In Deutschland gibt es ein solches Labor: das Hochfeld-Magnetlabor Dresden (HLD) am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), in dem wir gepulste Magnetfelder für Flussdichten bis etwa 100 Tesla zerstörungsfrei erzeugen (siehe Abbildung 4). Solche Magnetfelder benutzen wir für eigene Forschungsvorhaben und stellen sie Wissenschaftlern aus der ganzen Welt zur Verfügung.

Hohe Magnetfelder erzeugt man in der Forschung und für Anwendungen wie der Magnetresonanztomografie meist durch supraleitende Spulen. Mit konventionellen Supraleitern sind Magnetfelder bis etwa 23,5 Tesla, durch die Kombination mit Hochtemperatur-Supraleitern sind erste Magnete jenseits von 30 Tesla realisiert worden. Da der supraleitende Zustand in hohen Magnetfeldern jedoch zusammenbricht, werden noch höhere Magnetfelder mit resistiven Spulen erzeugt. Deren Betrieb erfordert allerdings enorme elektrische Leistungen (einige 10 Megawatt) und verursacht hohe laufende Kosten. Mit solchen Spulen lassen sich heute Magnetfelder von über 40 Tesla erzeugen. Dabei muss die entstehende Verlustleistung durch eine leistungsfähige Wasserkühlung abgeführt werden. Durch Kombination einer äußeren supraleitenden mit einer inneren resistiven Spule sind statische Magnetfelder bis 45 Tesla erreicht worden.

Magnetic fields act on moving charge carriers and on the magnetic degrees of freedom of materials – to such an extent that they may influence the behavior of materials in just as many ways as, for example, pressure and temperature do. High magnetic fields, therefore, lay the ground for fundamental investigations of electronic and magnetic properties of matter, in physics and many other research disciplines. More than a dozen Nobel Prizes in physics, chemistry, and medicine are closely linked to research in magnetic fields. Discoveries made with their help are revolutionizing our understanding of how materials work and are constantly leading to new technical applications, some of which have long since penetrated our everyday lives, for example in transport and traffic, or in medical care.

### ***Research in the highest magnetic fields***

There are a number of high-magnetic-field laboratories worldwide that extend the available magnetic field range for material investigations to the highest possible magnetic fields. In Germany, there is one such laboratory: the Dresden High Magnetic Field Laboratory (HLD) at the Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), where we generate pulsed magnetic fields for flux densities up to about 100 tesla in a non-destructive way (Figure 4). We use such magnetic fields for our own research projects and make them available to scientists from all over the world.

High magnetic fields are usually generated by superconducting coils in research and for applications such as magnetic resonance imaging. With conventional superconductors, magnetic fields of up to 23.5 tesla have been generated, and by combining them with high-temperature superconductors, the first magnets reaching fields beyond 30 tesla have been realized. Nevertheless, since the superconducting state collapses at high magnetic fields, higher fields are generated with resistive coils. Their operation, however, requires an enormous electrical power (several 10 megawatt) and causes high running costs. Nowadays, magnetic fields of over 40 tesla can be generated with such coils. In doing so, the resulting power loss must be dissipated by an efficient water-cooling system. By combining an external superconducting coil with an inner resistive coil, static magnetic fields of up to 45 tesla have been achieved.



**Fig. 1:** Kondensatorbank HLD 2.0 // Capacitor bench HLD 2.0  
(© HZDR/ Oliver Killig)

### **Hohe Felder zur Untersuchung magnetfeldabhängiger Materialeigenschaften**

Deutlich höhere Feldstärken können nur mit gepulst betriebenen Spulen realisiert werden; nur dann sind die entstehenden thermischen Lasten beherrschbar. Bei einem Magnetpuls erwärmen sich die mit flüssigem Stickstoff bei 77 Kelvin (-196 Grad Celsius) gekühlten Spulen innerhalb weniger 10 Millisekunden bis auf Raumtemperatur. Diese Zeitspanne ist ausreichend, um mit moderner Elektronik auch sehr kleine Signale hochaufgelöst zu messen. Damit lassen sich neben dem elektrischen Widerstand und Hall-Effekt auch thermodynamische Eigenschaften wie die spezifische Wärme oder die Magnetisierung von Stoffen sowie deren Längenausdehnung und Ultraschall-Eigenschaften messen. Zur Bestimmung der magnetischen Phasendiagramme von Hochtemperatur-Supraleitern wiederum benötigen wir hohe Magnetfelder, um die Proben bei tiefen Temperaturen von der supraleitenden in die normalleitende Phase zu bringen.

Andere Messverfahren im Hochfeld bedienen sich der Elektronenspin-Resonanz (ESR) und der magnetischen Kernspinresonanz (NMR): Je höher das Magnetfeld ist, desto besser ist die Auflösung der Messung, denn mit der Stärke des Magnetfelds wächst der Abstand zwischen den im Magnetfeld aufgespaltenen Resonanzlinien der Kern- oder Elektronenspins. Auf diesem Wege lassen sich die oft nur geringfügigen Unterschiede in der Resonanzfrequenz und der Linienform von magnetischen Momenten besser voneinander trennen.

### **Facettenreiche Materialpalette**

Das Spektrum der in unserem Labor untersuchten Materialien und Systeme ist breit gefächert: Auf stofflicher Seite erstreckt es sich von Hochtemperatur-Supraleitern über neuartige magnetische Verbindungen bis hin zu Halbleitern, nanostrukturierten Materialien und exotischen Legierungen. Aus der Perspektive eines Festkörper-Physikers gilt unser besonderes Interesse vor allem stark korrelierten und topologischen Elektronensystemen. Gegenwärtig stehen niederdimensionale und frustrierte Spin-Systeme im Fokus unserer Forschungsarbeit (siehe Abbildung 3).

Bei unseren Untersuchungen in hohen Magnetfeldern stoßen wir immer wieder auf unerwartete, äußerst interessante Phänomene. Bei der halbmetallischen Verbindung NbP konnten wir beispielsweise erstmals zeigen, dass sich der elektrische Widerstand um mehr als das 80.000fache in einem Magnetfeld von 60 Tesla erhöht.

### **High fields for the investigation of materials**

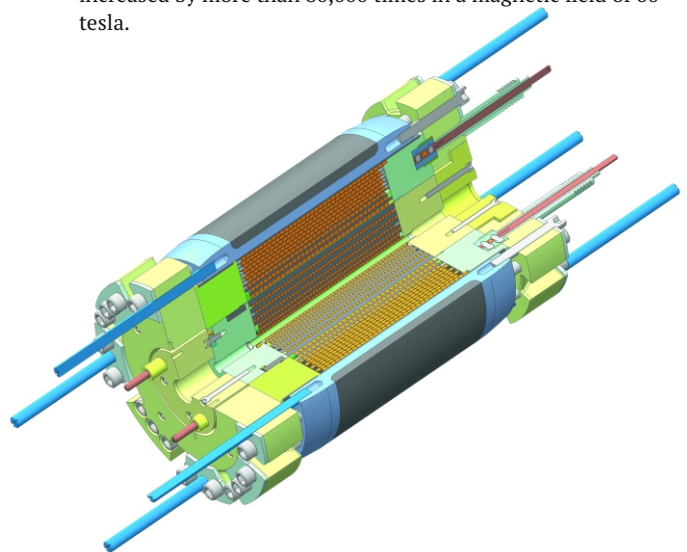
Significantly higher field strengths can only be achieved with pulsed coils; only then, the resulting thermal loads can be controlled. With a magnetic field pulse, the coils cooled with liquid nitrogen to 77 Kelvin (-321 degrees Fahrenheit) just heat up to room temperature within a few 10 milliseconds. This time span is sufficient to record even very small signals with high resolution using modern electronics. In addition to the electrical resistance and Hall effect, thermodynamic properties such as the specific heat or magnetization of materials as well as their linear expansion and ultrasonic properties can be measured. To determine the magnetic phase diagrams of high-temperature superconductors, high magnetic fields are required to transform the samples from the superconducting to the normal-conducting phase at low temperatures.

Other measurement techniques in high fields use electron spin resonance (ESR) and nuclear magnetic resonance (NMR): The higher the magnetic field, the better the resolution of the measurement, because with the strength of the magnetic field, the distance between the resonance lines of the nuclear or electron spin, that are split up in the field, increases. In this manner, the often minor differences in the resonance frequency and the line shape of magnetic moments can be better separated from each other.

### **Multifaceted range of materials**

The spectrum of materials and systems investigated in our laboratory is broad: On the material side, it ranges from high-temperature superconductors and novel magnetic compounds to semiconductors, nanostructured materials, and exotic alloys. From the perspective of a solid-state physicist, we are particularly interested in strongly correlated electron systems. Currently, low-dimensional and frustrated spin systems are the focus of our research (see figure 3).

During our investigations in high magnetic fields, we repeatedly come across unexpected, extremely interesting phenomena. In the case of the semimetallic compound NbP, for example, we were able to show for the first time that the electrical resistivity increased by more than 80,000 times in a magnetic field of 60 tesla.

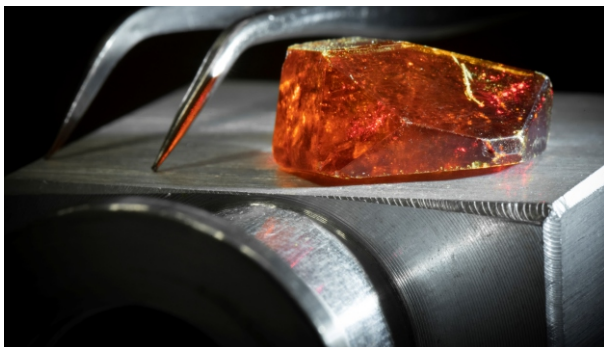


**Fig. 2:** Konstruktionskizze einer Hochfeld-Magnetspule zur Erzeugung von gepulsten Magnetfeldern. // Construction sketch of a high magnetic field coil for the generation of pulsed magnetic fields. (© HZDR)

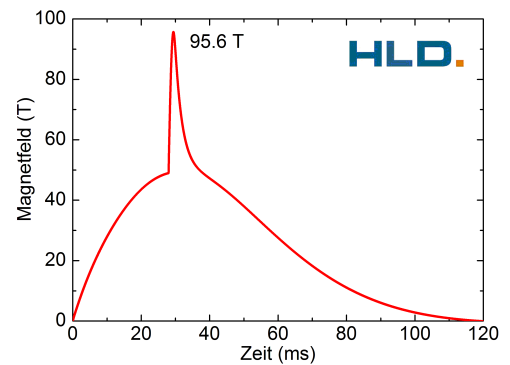
## Hintergrund: Die Beherrschung hoher Felder als technologische Herausforderung

Um innerhalb kurzer Zeit den benötigten starken Strom für die Spulen bereitzustellen, verwenden wir am HLD hierfür zwei von uns neu entwickelte und dem Stand der Technik entsprechende Hochenergie-Kondensatorbänke (siehe Abbildung 1). Die größere von beiden enthält 500 Kondensatoren mit einer Kapazität von jeweils 350  $\mu\text{F}$  und kann eine Gesamtenergie von 50 MJ aufnehmen. Vor einem Magnetfeldpuls werden die benötigten Kondensatoren mit niedriger Leistung kostengünstig aus dem Stromnetz bis auf eine maximale Spannung von 24 kV aufgeladen. Über elektronische Schalter (Thyristoren) wird die benötigte Energie dann den Spulensystemen zugeführt. Unsere Kondensatorbänke können sehr hohe Entladeströme von einigen 100 kA bei elektrischen Leistungen von bis zu 5 GW bereitstellen.

Der Bau von Spulen für Magnetfelder bis 100 T stellt aufgrund der auftretenden enormen elektrischen, magnetischen, thermischen und mechanischen Belastungen auf die Spulen eine große technische Herausforderung dar. Besonders problematisch ist die mechanische Beanspruchung, die aus dem über die Lorentz-Kraft erzeugten Druck folgt: Da das Magnetfeld,  $B$ , proportional zum Strom und die Lorentz-Kraft proportional zum Magnetfeld mal Strom ist, wachsen die Kräfte in den Spulendrähten mit  $B^2$ . In einfachster Näherung ist der Druck auf den Draht im Inneren einer Spule durch  $p = B^2/2\mu_0$  gegeben. Damit müsste das Leitermaterial im Inneren einer 100-T-Spule einem Druck von ca. 4 GPa (= 40.000 Atmosphären) standhalten. Im Hochfeld-Magnetlabor Dresden sind wir in der Lage, Spulen zu fertigen, die unter den Bedingungen dieser extremen Materialbeanspruchung zuverlässig arbeiten (siehe Abbildung 2).



**Fig. 3:** Frustrierter Magnetismus: Cäsiumkupferchlorid. // Frustrated magnetism: cesium copper chloride. (© Detlev Müller / HZDR)



**Fig. 4:** Zeitlicher Verlauf des Magnetfelds in einer HLD-Spule, die Felder jenseits von 95 T erzeugen kann. // Magnetic field as a function of time, observed in an HLD coil that can generate fields beyond 95 T. (© HLD)

## Background: Mastering high fields as a technological challenge

In order to provide the required strong current for the coils within a short time, we at the HLD use two high-energy state-of-the-art capacitor banks developed at HZDR (figure 1). The larger of the two contains 500 capacitors with a capacity of 350  $\mu\text{F}$  each and can store a total energy of 50 MJ. Prior to a magnetic field pulse, the required capacitors are cost-effectively charged from the mains to a maximum voltage of 24 kV at low power. The required energy is then supplied to the coil systems via electronic switches (thyristors). Our capacitor banks can provide very high discharge currents of several 100 kA at an electrical power of up to 5 GW.

The construction of coils for magnetic fields up to 100 T represents a major technological challenge due to the enormous electrical, magnetic, thermal, and mechanical stresses that occur on the coils. Particularly problematic is the mechanical stress resulting from the pressure generated by the Lorentz force: Since the magnetic field,  $B$ , is proportional to the current and the Lorentz force is proportional to the magnetic field times the current, the forces in the coil wires grow with  $B^2$ . In the simplest approximation, the pressure on the wire inside a coil is given by  $p = B^2/2\mu_0$ . This means that the conductor material inside a 100-T coil would have to withstand a pressure of approx. 4 GPa (= 40,000 atmospheres). At the Dresden High Magnetic Field Laboratory, we are able to manufacture coils that reliably work under the conditions of such an extreme material stress (figure 2).

## Quellen // Sources

Hochfeld-Magnetlabor Dresden // Dresden High Magnetic Field Laboratory

J. Wosnitza, Im Kontext: Magnetfelder für die Forschung, in P. A. Tipler, G. Mosca, *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, Springer Spektrum (2015) 904.

T. Herrmannsdörfer, J. Wosnitza: Das Hochfeld-Magnetlabor in Dresden - 100 Tesla für die Forschung, *Phys. Unserer Zeit* 5 (2007) 242-248.