

# Kapitel 1

## Einleitung

Quantenphasenübergänge stellen heute eines der wichtigsten Forschungsgebiete der Festkörperphysik dar. In diesen Systemen äußern sich kritisches Verhalten in vielfältiger Form. Gefunden werden unter anderem Nicht-Fermiflüssigkeitsverhalten oder unkonventionelle Supraleitung. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften vor allem durch stark korrelierte Elektronen bestimmt.

Diese Phasenübergänge, die am absoluten Nullpunkt stattfinden, sind selbst experimentell nicht zugänglich. Um diesen Übergang durchfahren zu können, ist daher ein weiterer Kontrollparameter, wie zum Beispiel eine Dotierung mit ähnlichen Fremdatomen, hydrostatischen Druck oder ein magnetisches Feld, notwendig. Zudem müssen die Untersuchungen bei den tiefsten zugänglichen Temperaturen erfolgen, um möglichst nahe dem Fall  $T = 0$  zu sein. An Stelle von thermischen Fluktuationen werden diese Phasenübergänge, wie die Namensgebung schon suggeriert, durch quantenmechanische getrieben. Ursprünglich handelte es sich bei Quantenphasenübergängen vornehmlich um Phasenübergänge zweiter Ordnung, die bei  $T = 0$  stattfinden. In neueren Untersuchungen finden auch Materialien Verwendung, die einen Phasenübergang erster Ordnung, verbunden mit einem kritischen Endpunkt aufweisen. Der kritische Endpunkt kann durch einen äußeren Parameter ebenfalls zu  $T = 0$  gedrückt werden und stellt somit einen quantenkritischen Endpunkt dar.

Als ein Vertreter der Klasse von Phasenübergängen erster Ordnung wird in dieser Arbeit das System  $\text{Sr}_3\text{Ru}_2\text{O}_7$  vorgestellt. Hierbei handelt es sich um einen itineranten Metamagneten, der im Magnetfeld einen solchen Übergang aufweist. Durch Messungen der spezifischen Wärme werden die kritischen Magnetfelder in zwei Kristallrichtungen bestimmt.

Das Schwerfermionensystem  $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$  ist eines der best untersuchten Systeme stark korrelierter Elektronen. Zahlreiche Messungen geben Einsicht

in die verschiedensten Aspekte dieser Materialklasse, ganz gleich ob es sich um Messungen der spezifischen Wärme, des elektrischen Widerstandes oder zum Beispiel Neutronenstreuexperimente handelt.

Neben Messungen des elektrischen Widerstandes werden Messungen der spezifischen Wärme an ausgewählten Kristallen von  $\text{CeCu}_{6-x}\text{Au}_x$  gezeigt. Besonderer Augenmerk wird dabei auf das Nicht-Fermiflüssigkeitsverhalten am quantenkritischen Punkt bei  $x_c = 0.1$  gelegt. Hierzu wird in dieser Arbeit eine neue Methode entwickelt, die es erlaubt erstmalig Messungen der spezifischen Wärme mit der gebräuchlichen quasi-adiabatischen Heizpulsmethode bis zu Temperaturen von 10 mK durchzuführen.

# Kapitel 2

## Experimentelles

### 2.1 Messung der spezifischen Wärme

Messungen der spezifischen Wärme erfolgten mittels der quasi-adiabatischen Heizpulsmethode [1, 2, 3, 4, 5] in einem  $^4\text{He}$ -Badkryostaten im Temperaturbereich von 1.5 K bis 30 K und Magnetfeldern bis zu 14 T sowie in einem  $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischungskryostaten von 10 mK bis 4 K und bis 7 T. Dabei wurde im Badkryostaten ein Saphirschichtträger bzw. im Mischungskryostaten ein sogenannter freier Aufbau als Probenhalter verwendet.

#### 2.1.1 Saphir-Schichtträger

Im  $^4\text{He}$ -Badkryostaten wurde in einem Temperaturbereich von 1.5 K bis 30 K ein Schichtträger mit Saphir als Trägermaterial verwendet.

Der Schichtträger bestand aus einer etwa  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  großen und 0.5 mm dicken Platte aus hochreinem Saphir. Diese Grundplatte wurde jeweils durch Bohrungen an den Ecken mit 4 Nylonfäden freistehend an Edelstahl-Schrauben in einen Montagehalter aus Kupfer, der direkt am 1 K-Topf des  $^4\text{He}$ -Badkryostaten angekoppelt war, eingespannt. Durch die Nylonfäden wurde eine sehr geringe thermische Ankopplung des Schichtträgers an den Kryostaten gewährleistet.

An der Unterseite des Schichtträgers wurden ein Heizer und ein Thermometer angebracht. Als Heizer diente ein Manganin-Draht, der an der Unterseite des Schichtträgers aufgewickelt mit GE-Varnish aufgeklebt war. Der Heizerwiderstand weist eine lineare Temperatur- und zudem eine Magnetfeldabhängigkeit auf. Diese muß daher bei der Messung besonders berücksichtigt werden. Als Thermometer wurde ein handelsüblicher SMD-Widerstand benutzt, der gegenüber einem kalibrierten Thermometer der Firma Allen-Bradley abgeglichen wurde und in gleicher Weise am Schichtträger befestigt

war. Die elektrischen Zuleitungen bestanden aus  $80\ \mu\text{m}$  dicken Drähten aus NbTi in einer CuNi-Matrix mit geringer thermischer Leitfähigkeit, um die thermische Ankopplung des Schichtträgers hierüber möglichst gering zu halten. Auf der Oberseite des Schichtträgers wurde mit sehr wenig Apiezon N-Fett (weniger als 1 mg) die Probe befestigt.

Um die spezifische Wärme der Probe bestimmen zu können, muß der Beitrag des Schichtträgers, Heizers und Thermometers in einer Leermessung, in der der gesamte Messaufbau, aber ohne eine Probe, gemessen wird, gesondert bestimmt und jeweils von der gesamten spezifischen Wärme abgezogen werden. Zusätzlich kann auch der Beitrag des zum Befestigen der Probe benutzten Apiezon-Fetts berücksichtigt werden.

### 2.1.2 Freier Aufbau

Für Messungen an Proben mit sehr großer spezifischer Wärme und Messungen bis zu sehr tiefen Temperaturen von etwa 10 mK wurde ein im Grundprinzip dem Schichtträger ähnelnder, aber viel einfacher realisierter, sogenannter freier Aufbau benutzt.

Dazu werden der Heizer, in diesem Falle ein Draht aus einer PtW-Legierung, der auf einer  $10 \times 10\ \text{mm}^2$  großen Silberfolie mit GE-Varnish aufgeklebt ist, die Probe und ein Kohle-Thermometer mittels etwas Apiezon N-Fett aufeinandergeklebt. Dazwischen befindet sich zur elektrischen Isolation jeweils eine  $20\ \mu\text{m}$  dicke Kapton-Folie.

Das Thermometer wurde aus einem Matsushita-Kohleschichtwiderstand hergestellt [6]. Dazu wurden die Zuleitungen und die Isolationsschicht entfernt und der freiliegende Kohlekörper zu einem Plättchen von  $1 \times 2 \times 0.5\ \text{mm}^3$  Größe geschliffen. Anschliessend wurden an den zwei gegenüberliegenden Rändern der größten Seitenfläche kleine Kontaktflächen, auf einer 5 nm dicken Chrom-Zwischenschicht, aus Gold (50 nm) aufgedampft. An diese wurden dann zur Kontaktierung  $40\ \mu\text{m}$  dicke Golddrähte angelötet. Diese wiederum wurden dann ebenso wie beim Schichtträger aus Saphir, mit Drähten aus NbTi in einer CuNi-Matrix bis zu den elektrischen Zuleitungen des Montagehalters verlängert. Das hier verwendete Thermometer wurde bis 10 mK gegen ein Kapazitätsthermometer abgeglichen.

Durch den schichtweisen Aufbau von Heizer, Probe und Thermometer sollte sichergestellt werden, daß die ganze im Heizer erzeugte Wärme auch die gesamte Anordnung durchflossen hat. Der Aufbau wird dann ebenso mit Nylonfäden in den Montagerahmen eingespannt, wie dies mittels des Saphir-Schichtträgers im  $^4\text{He}$ -Badkryostaten geschah. Dieser Aufbau eignet sich insbesondere für Messungen der spezifischen Wärme von Schwerfermionsystemen, da sich hier der Beitrag des Heizers und des Thermometers gegenüber

der hohen spezifischen Wärme der Probe vernachlässigen läßt. Bis zu Temperaturen von etwa 50 mK reicht die Ankopplung durch die, eigentlich gut thermisch entkoppelten, Zuleitungen dennoch aus, um die Anordnung in endlicher Zeit abzukühlen. Um tiefere Messtemperaturen zu erreichen, ist, je nach zu messender Probenmasse, eine weitere schwache Ankopplung mittels mehrerer 200  $\mu\text{m}$  dicker Kupferdrähte, die wiederum durch Kaptonfolie elektrisch isoliert zwischen der Silberfolie als Heizerträger und dem Kupfer-Montagerahmen aufgeklebt sind, notwendig.

### 2.1.3 Heizpulsmethode

Die Messung der spezifischen Wärme erfolgt mittels der quasi-adiabatischen Heizpulsmethode. Dabei wird ein Heizpuls definierter Energie  $\Delta Q$  über den Heizer mit Widerstand  $R_{\text{Heizer}}$  in die Anordnung, die thermisch vom Kryostatentkoppelt (quasi-adiabatisch) ist, eingespeist. Dadurch erhöht sich entsprechend der spezifischen Wärme  $C$  der untersuchten Probe die Temperatur um  $\Delta T$ .

Es standen zwei Heizpulsstromquellen zur Verfügung: HEPS 201A für den Temperaturbereich unterhalb 4 K und HEPS 201A HC<sup>1</sup> für den Bereich oberhalb 1.5 K mit den Strombereichen  $I_{\text{max}}$  und einer kleinsten Schrittweite  $\Delta I_{\text{min}}$ . Diese Stromquellen liefern wohldefinierte rechteckförmige Strompulse der gewünschten Höhe  $I$  und Länge  $\Delta t$  mit sehr kleinen Anstiegs- und Abfallszeiten  $\tau$  der Flanken. Die genauen technischen Daten sind in Tabelle 2.1 wiedergegeben. Zur Messung der Temperatur wird der temperaturabhängige elektrische Widerstand der benutzten Thermometer mittels einer Widerstandsmeßbrücke der Firma Barras Provence<sup>2</sup> gemessen.

Aus dem zeitlichen Verlauf der Temperatur kann der Temperatursprung  $\Delta T$  aufgrund des Heizpulses im Zeitpunkt  $t = 0$  extrapoliert werden. Dies geschieht wegen des, im Idealfall, exponentiellen Relaxationsverhaltens des Messaufbaus zur Badtemperatur durch eine logarithmische Auftragung und anschließender Ausgleichsgeradenbildung.

Daraus läßt sich schließlich die spezifische Wärme berechnen:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.1)$$

mit  $\Delta Q = R_{\text{Heizer}} I^2 \Delta t$ .

Die gesamte Heizpulssteuerung, Temperaturverlaufsaufnahme des Heizpulses und Auswertung erfolgt rechnergesteuert.

---

<sup>1</sup>Vogel-Elektronik, 20251 Hamburg

<sup>2</sup>ABB Barras Provence, detecteur multifunction, F-04100 Manosque