

Die Vermessung der Wolke

Transportmessungen durch einen magnetischen Quantenpunkt beenden das mehr als fünfzigjährige Rätselraten um eine universelle Längenskala in Kondo-Systemen.

Thore Posske und Björn Trauzettel

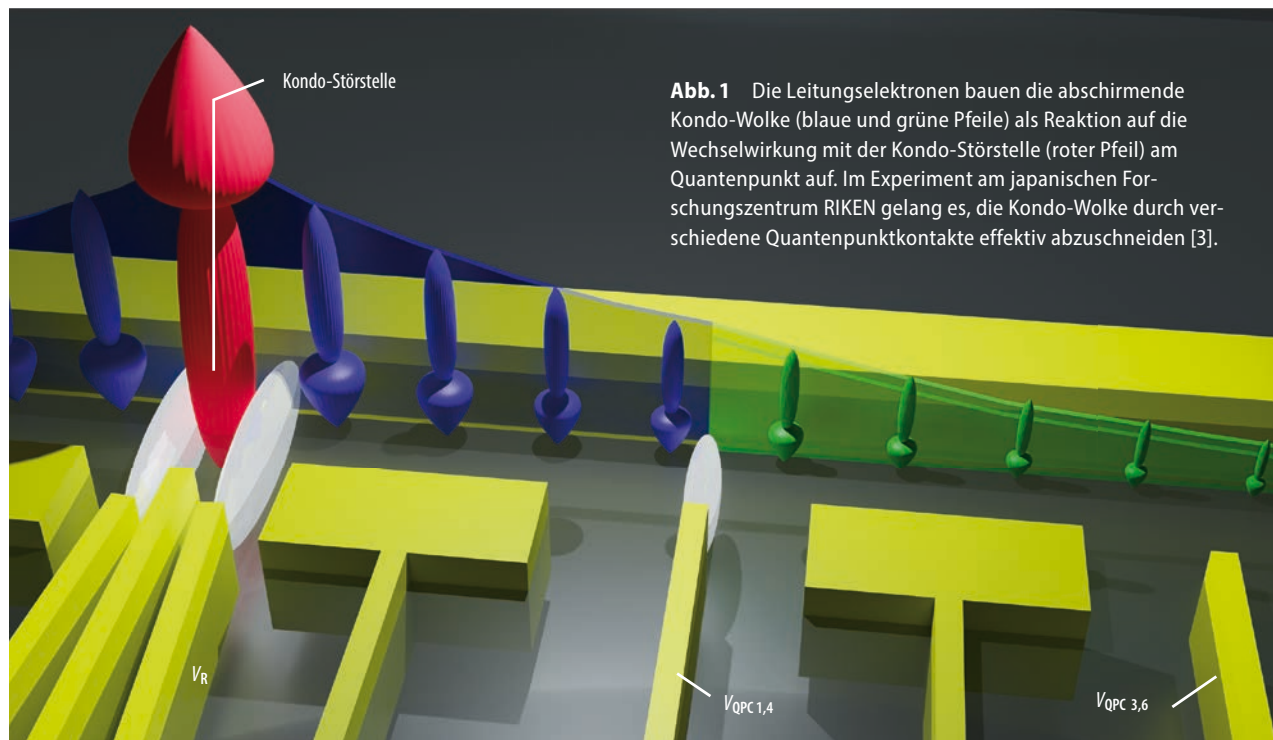


Abb. 1 Die Leitungselektronen bauen die abschirmende Kondo-Wolke (blaue und grüne Pfeile) als Reaktion auf die Wechselwirkung mit der Kondo-Störstelle (roter Pfeil) am Quantenpunkt auf. Im Experiment am japanischen Forschungszentrum RIKEN gelang es, die Kondo-Wolke durch verschiedene Quantenpunktkontakte effektiv abzuschneiden [3].

Seit 1934 ist bekannt, dass die Leitfähigkeit magnetisch dotierter Leiter unter einer bestimmten Temperatur T_K sprunghaft abnimmt [1]. 1964 konnte Jun Kondo diesen nach ihm benannten Effekt theoretisch erklären [2]. Demzufolge schirmen die Leitungselektronen die Quantenspins von (magnetischen) Störstellen ab. Diese abschirmende Elektronenwolke um die Störstellen ist als Kondo-Wolke bekannt. Sie dehnt sich über die Kondo-Längenskala ξ_K aus und kann mehrere Mikrometer betragen. Die Leitungselektronen partizipieren im Kollektiv an der Kondo-Wolke und bilden mit der Kondo-Störstelle ein Spin-Singulett. Diese zusätzliche Aufgabe der Leitungselektronen verringert ihre Beweglichkeit, wodurch die Leitfähigkeit des Materials abnimmt.

In mesoskopischen Systemen wie Quantenpunkten und Quantendrähten zeigt der Kondo-Effekt eine entgegengesetzte Signatur: Verbindet eine magnetische Kondo-Störstelle zwei Ladungsträgerreservoirs, er-

höht sich der Leitwert unterhalb von T_K statt zu sinken. Die Störstelle generiert dabei ein resonantes Niveau, was die lokale Zustandsdichte an der Fermi-Kante erhöht. Das erleichtert wiederum den Transport zwischen den Reservoiren. Obwohl die charakteristische Ausdehnung der Kondo-Wolke zentral in die Theorie des Kondo-Effekts eingeht, war es bisher nicht gelungen, sie zufriedenstellend zu messen.

Dies änderte nun die Gruppe von Michihisa Yamamoto und Seigo Tarucha am Forschungsinstitut RIKEN in Japan [3]. Die Grundidee ihrer Messung stammt aus der Gruppe von Heung-Sun Sim am Forschungsinstitut KAIST in Südkorea [4], wobei die Kondo-Störstelle durch eine ungerade Anzahl von Elektronen in einem Quantenpunkt realisiert wird. Die ungerade Anzahl der Elektronen bedingt, dass ein ungepaarter Spin am Quantenpunkt lokalisiert ist. Das ist eine essenzielle Voraussetzung für den Kondo-Effekt. Im Experiment koppelt

die Kondo-Störstelle an einen eindimensionalen Elektronenkanal, der sich durch Quantenpunktkontakte (Quantum Point Contacts, QPCs) an bestimmten Stellen einschränken lässt (**Abb. 1**). Dies ermöglicht es, die Längenabhängigkeit des Effekts anschaulich zu untersuchen.

Die Elektronen, welche die Kondo-Störstelle passieren, streuen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit am Quantenpunktkontakt und können danach zur Störstelle zurückkehren. Das geschieht im RIKEN-Experiment mit einem so reinen Ausgangsmaterial aus GaAs/AlGaAs – gewachsen in der Gruppe von Andreas Wieck an der Universität Bochum –, dass andere Streueffekte vernachlässigbar sind.

Da die Kondo-Wolke ein räumliches Phänomen ist, galt es im Experiment sicherzustellen, dass sich eine räumliche Information ablesen ließ. Dafür haben sich Ivan Borzenets und Ko-Autoren zweier Parameter bedient. Zum einen konnten sie die Kopplung des Quantenpunkts

an den 1D-Kanal durch eine Variation der Spannung V_R verändern (Abb. 1). Dadurch modifizierten sie die Kondo-Längenskala ξ_K . Zum anderen enthielt der 1D-Kanal drei Quantenpunktkontakte an verschiedenen Positionen im Abstand von 1,4; 3,6 beziehungsweise 6,1 Mikrometer zur Kondo-Störstelle. Dadurch variierte die Distanz L der Störstelle zu einem der Quantenpunktkontakte.

Der Clou des Experiments besteht darin, dass gleichzeitig zur Modulation des elektrischen Transports der Elektronen die entsprechende Kondo-Temperatur T_K gemessen wurde. Diese leitet sich aus der Temperaturabhängigkeit des Leitwerts der Elektronen ab. Die Experimentatoren konnten zeigen, dass die Kondo-Temperatur als Funktion der angelegten Spannung an einem der Quantenpunktkontakte ($V_{QPC\ 1,4}$ und $V_{QPC\ 3,6}$ in Abb. 1) oszillierte. Dass der Leitwert der Elektronen mit der gleichen Periode oszillierte, bedeutete einen wichtigen Konsistenzcheck des Experiments (im Vergleich zur Theorie).

Die Kombination der Messung der Kondo-Temperatur T_K für verschiedene Kondo-Längenskalen ξ_K und verschiedene Längen L ermöglichte es, den qualitativen Verlauf der Kondo-Wolke zu bestimmen (Abb. 2). Die experimentellen Daten stimmen gut mit einer theoretischen Modellierung überein, trotz der experimentellen Unsicherheit von 20 Prozent bei der Bestimmung der Kondo-Temperatur. Ein universelles Skalenverhalten ist deutlich durch den Kollaps aller Datenpunkte auf eine Kurve erkennbar.

Was diese Messung nicht zeigt, ist die magnetische Struktur der Kondo-Wolke. Damit ist die Vorhersage gemeint, dass sich ein Spin-Singulett bildet. Für den experimentellen Nachweis bedarf es direkter Messungen magnetischer Observablen oder der Umwandlung magnetischer Information in Ladungseigenschaften. Letzteres könnte durch die perfekte Spin-Ladungs-Konversion in den 1D-Randzuständen von 2D-topologischen Isolatoren gelingen. Daher wäre es erstrebenswert, eine Kondo-Störstelle an diese Randzustände zu

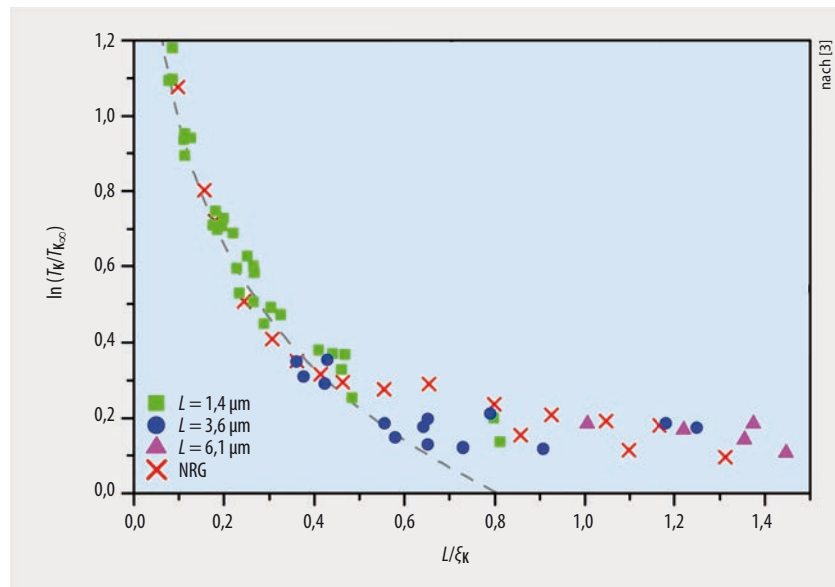


Abb. 2 Mit den Messungen der Kondo-Temperatur T_K für verschiedene Abstände L der Quantenpunktkontakte von der Kondo-Störstelle lässt sich der räumliche Verlauf der Kondo-Wolke bestimmen. Die Werte stimmen gut mit einem theoretischen Modell (rote Kreuze) überein. Das Modell basiert auf der numerischen Theorie der Renormierungsgruppen (NRG). Unterhalb der Kondo-Länge ξ_K verändert sich die gemessene Kondo-Temperatur T_K im Vergleich zum Wert ohne Quantenpunktkontakt ($T_{K=0}$) erheblich.

koppeln, um den Spin-Eigenschaften der Kondo-Wolke experimentell auf die Spur zu kommen [5].

Kondo-Systeme sind eine Inspirationsquelle für Vielteilchenmethoden wie die Theorie der Renormierungsgruppen, dynamische Molekularfeldtheorie, Quanten-Monte-Carlo-Methoden, den Bethe-Ansatz oder die Methode des Toulouse-Punkts [6–9]. Besonders interessant sind dabei universelle Eigenschaften und Skaleninvarianz, die Kondo-Effekte auf andere Systeme abbilden, beispielsweise bosonische Bäder [10] und Modelle resonanter Niveaus [11]. Sogar die Entropie von topologischen niedrigdimensionalen Schwarzen Löchern ist über die AdS-CFT-Korrespondenz mit dem Kondo-Problem verbunden [12].

- [8] N. Andrei, Phys. Rev. Lett. **45**, 379 (1980)
- [9] A. Georges et al., Rev. Mod. Phys. **68**, 13 (1996)
- [10] A. J. Leggett et al., Rev. Mod. Phys. **59**, 1 (1987)
- [11] V. J. Emery und S. Kivelson, Phys. Rev. B **46**, 10812 (1992)
- [12] J. Erdmenger et al., Fortsch. Phys. **64**, 109 (2016)

Die Autoren

Dr. Thore Posske, I. Institut für Theoretische Physik, Universität Hamburg, Jungiusstraße 9, 20355 Hamburg und **Prof. Dr. Björn Trauzettel**, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg

- [1] W. J. de Haas et al., Physica **1**, 1115 (1934)
- [2] J. Kondo, Prog. Theo. Phys. **32**, 37 (1964)
- [3] I. V. Borzenets et al., Nature **579**, 210 (2020)
- [4] J. Park et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 246603 (2013)
- [5] T. Posske et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 016602 (2013)
- [6] G. Toulouse, C. R. Acad. Sci. Ser. B **268**, 1200 (1969)
- [7] K. G. Wilson, Rev. Mod. Phys. **47**, 773 (1975)