

Forschungsschwerpunkte – Prof. Dr. Wolfgang Wernsdorfer

Prof. Dr. Wolfgang Wernsdorfer ist einer der Pioniere in den Bereichen Nanomagnetismus und Einzelmolekülmagnete. Er geht sehr innovative und vielversprechende Wege, die zu neuen Entwicklungen der Mikroelektronik der Zukunft führen werden. Das Gebiet der molekularen Quantenspintronik beinhaltet die Untersuchung von Methoden, die erlauben, den Spin und die Ladung in molekularen Strukturen auf der Nanoskala zu manipulieren. Seine Forschergruppe konnte erstmals die Quantenspinzustände in einem Molekül messen und kontrollieren und dadurch einfache Quantenalgorithmen implementieren.

Während seiner Doktorarbeit entwickelte Wolfgang Wernsdorfer ein weltweit einzigartiges Gerät, den sogenannten micro-SQUID, zur Messung magnetischer Eigenschaften von Nanostrukturen mit einer 1 Milliarde Mal höheren Empfindlichkeit als kommerzielle Magnetometer. Sein Instrument erlaubt die Untersuchung des magnetischen Verhaltens von Nanomagneten mit weniger als Tausend Magnetzentren, was für mehr als ein Jahrzehnt einen Weltrekord darstellte. Mit den einzigartigen Vorteilen dieses Geräts hat er eine Vielzahl neuer Phänomene untersucht, die im Folgenden zusammenfasst sind.

Magnetisierungsumkehr in Nanopartikeln, Nanodrähten und Ringen (1993–2000)

Um die Komplikationen bei der Interpretation der Daten aufgrund der Verteilung von Teilchengröße, Form usw. zu vermeiden, untersuchte Wernsdorfer erstmals die Temperatur- und Feldabhängigkeit der Magnetisierungsumkehr einzelner magnetischer Nanopartikel, Drähte und Ringe unter Anwendung der micro-SQUID-Technik. Seine Studie der Winkelabhängigkeit magnetischer Hystereseschleifen erlaubte den Modus der Magnetisierungsumkehr zu finden. Wartezeit-, Schaltfeld- und Telegraphenrauschmessungen zeigten, dass die Magnetisierungsumkehr eines gut definierten ferromagnetischen Nanopartikels durch thermische Aktivierung über eine Energiebarriere beschrieben werden kann, wie es ursprünglich von Néel und Brown vorgeschlagen wurde. Unterhalb einer Übergangstemperatur fand er starke Abweichungen von diesem Modell, die aber quantitativ in Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Theorie des makroskopischen Quantentunnels der Magnetisierung stehen. Für einzelne, 1000-Atome große Kobalt-Nanopartikel zeigte Wernsdorfer, dass die magnetische Anisotropie von Oberflächenatomen dominiert wird. Er erfand und demonstrierte auch eine neue Methode zur Überwindung hoher Schaltfelder. Ein konstant angelegtes Feld, weit unter dem Schaltfeld, kombiniert mit einem hochfrequenten Magnetfeldpuls kann die Mag-

netisierung eines Nanopartikels umkehren. Alle diese Ergebnisse sind wichtig für Anwendungen der Datenspeicherung, um die Stabilität der gespeicherten Daten zu verstehen, effizient zu lesen und zu schreiben.

Molekulare Magnete (2000–2008)

Anfangs wurden Moleküle als nicht magnetisch betrachtet. Wolfgang Wernsdorfer und andere konnten aber zeigen, dass dies nicht immer der Fall sein muss. Moleküle können tatsächlich ein signifikantes magnetisches Moment tragen, das auch eine stabile Orientierung ähnlich zu herkömmlichen Magneten aufweist. Solche Moleküle werden als „Einzelmolekülmagneten“ bezeichnet, wobei ein einzelnes Molekül aus wenigen Atomen als die kleinstmögliche Einheit für die Datenspeicherung angesehen werden kann. Diese Moleküle haben nicht nur die klassischen Eigenschaften von Magneten, sondern zeigen auch Quanteneigenschaften, die wichtig sind für neue Herausforderungen, wie die Entwicklung eines Quantencomputers.

Wernsdorfers wichtigste Ergebnisse auf diesem Gebiet betreffen Quantenphaseninterferenzen, spinparitätsabhängiges Tunneln, Spin-Spin-Kreuzrelaxation, Effekte von Kernspins auf die Quantenrelaxation, Phonon-Engpass-Effekte, austauschgekoppeltes Quantentunneln, Tunneln eines gigantischen Mn_{84} -Molekularmagneten und Quantennukleation in Spinketten. Seine innovativen Ansätze führten zu zahlreichen Kooperationen mit Chemikern, die sich mit der Synthese molekularer Magneten beschäftigen. Die Forschungsarbeit von Wolfgang Wernsdorfer trug damit wesentlich zu unserem heutigen Verständnis des molekularen Magnetismus bei.

Molecular Quantum Spintronics (2008–2018)

Die Forschungsaktivitäten werden durch eines der ehrgeizigsten technologischen Ziele der heutigen Wissenschaft getrieben: die Realisierung eines Quantencomputers oder allgemeiner die Entwicklung von Geräten, die nach den Prinzipien der Quantenmechanik arbeiten. Der Grundbaustein besteht dabei in der Regel aus einem Quantensystem, Quantenbit (oder „Qubit“) genannt, das vollständig kontrollierbar und messbar sein muss. Daher sind Techniken, die elektrische Verbindungen von der makroskopischen Welt zum Qubit herstellen, von hohem Interesse, vor allem aufgrund der Vielfalt komplexer und skalierbarer Architekturen und der zur Verfügung stehenden Methoden (<http://qurope.eu>).

In diesem Zusammenhang legte Wernsdorfers Advanced ERC Grant (2008) die Grundlage für das neue Forschungsfeld der molekularen Quantenspintronik, das die Disziplinen Spintronik, Molekularelektronik und Quantencomputer kombiniert. Insbesondere konnte Werns-

dorfers Forschungsgruppe die ersten molekularen Schaltkreise (molekulare Spin-Transistoren, Spin-Ventile und Spin-Filter usw.) herstellen, charakterisieren und untersuchen, um Quantenspinzustände zu lesen und zu manipulieren und um elementare Quantenoperationen durchzuführen. Zum Beispiel hat sie einen neuartigen Spin-Ventil-Schaltkreis aufgebaut, bei der ein nicht magnetischer molekularer Quantenpunkt, der aus einem Kohlenstoff-Nanoröhrchen besteht, über supramolekulare Wechselwirkungen mit einem TbPc₂-Molekülmagneten verbunden ist. Das lokalisierte magnetische Moment des TbPc₂ führte zu einer magnetfeldabhängigen Modulation der Leitfähigkeit in der Nanoröhre mit Magnetowiderstandsverhältnissen von bis zu 300 Prozent. Wernsdorfers Gruppe lieferte auch den ersten experimentellen Beweis für eine starke Spin-Phonon-Kopplung zwischen einem Einzelmolekülspin und einem Kohlenstoff-Nanoröhren-Resonator. Mithilfe eines molekularen Spintransistors realisierte sie das elektronische Auslesen eines einzelnen Kernspins eines einzelnen Metallatoms, eingebettet in einen Molekülmagneten. Sie konnte sehr lange Spinlebenszeiten von mehreren Dutzend Sekunden demonstrieren. Vor Kurzem gelang es der Gruppe, die Spinzustände einzelner Moleküle zu manipulieren und auszulesen und grundlegende Quantenoperationen durchzuführen (z. B. Implementierung des Grover-Algorithmus). Diese erfolgreich durchgeführten Experimente zeigen deutlich die Vorreiterrolle, die die Forschungsgruppe um Wolfgang Wernsdorfer auf dem Gebiet der molekularen Quantenspintronik einnimmt.

Kryotechnik

Wolfgang Wernsdorfer war auch stark an der Entwicklung von sehr kompakten Mischungskryostaten am Néel-Institut in Grenoble beteiligt. Diese attraktiven Tisch-Kryostate erlauben es, Temperaturen von etwa 20 mK in nur drei Stunden zu erreichen und ermöglichen jungen Forschungsgruppen, Spitzenforschung am Néel-Institut zu betreiben. Diese Tisch-Kryostaten bilden nun die Basis seiner neuen Arbeitsgruppe am KIT.

Perspektiven

Wolfgang Wernsdorfer möchte mit seiner neuen Arbeitsgruppe am KIT eine einzigartige Plattform für die Tieftemperaturforschung aufbauen, die den Schwerpunkt auf molekulare Quantenspintronik und supraleitende Hybridstrukturen legt. Nach einem neuen theoretischen Vorschlag wird er elektrisch einstellbare Formen topologischer Materie generieren. Die Eigenschaften supraleitender Josephson-Kontakte sollen ausgenutzt werden, um effizient topologische Weyl-Singularitäten im Spektrum von Andreev-gebundenen Zuständen zu erzeugen, wofür herkömmliche (topologisch triviale) Supraleiter verwendet werden können.

Insbesondere will er quantenoptische Verfahren in molekulare quantenspintronische Bauteile integrieren, um neue Funktionalitäten und Phänomene zu finden. Die ersten molekularen Schaltkreise haben das Auslesen und Manipulieren der Spinzustände ermöglicht. Für Einzelkernspins wurden single-shot-Auslesezeiten von einer Sekunde erreicht, was jedoch für Anwendungen zu langsam ist. Er will diesen Engpass beseitigen, indem er zuverlässige, schnelle und skalierbare optische Verfahren für die Auslesung von Elektronen- und Kernspinzuständen entwickelt, die es ihm ermöglichen, grundlegende Quanteninformationsverarbeitungsprotokolle durchzuführen.

Sein wissenschaftlicher Ansatz besteht darin, qualitativ hochwertige Quantenemitter (NV-Zentren in Diamanten, Ligandenquanten-Emitter oder andere optisch aktive Ionen) zu verwenden, um die Spinzustände der magnetischen Moleküle effizient auszulesen. Dabei wird er besonderes Augenmerk darauf legen, die Rückwirkung des ausgelesenen Emitters auf das Spinsystem zu minimieren und dadurch die Quantenzustände zu bewahren. Verschiedene optische Techniken (oberflächenverstärkte Fluoreszenz, oberflächenverstärkte Raman-Streuung und optische Faserrasterkavitäten) sollen verwendet werden, um die Wechselwirkung zwischen Licht und Material zu verbessern und damit eine zuverlässige und schnelle optische Auslesung zu ermöglichen. Aufgrund der Rastermöglichkeiten des Lasers und der Verwendung unterschiedlicher Fluoreszenzenergien ist die optische Auslesung auf größeren Systemen und 2-D-Netzwerken von Molekülen skalierbar.