

Axel Müller-Groeling

Gleichgewichts- und Transporteigenschaften mesoskopischer Systeme



Geboren 1964 in Saarbrücken. Studium der Physik in Kiel und Bonn. Diplom 1989 am Forschungszentrum Jülich, Promotion 1992 am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg über mesoskopische Systeme. Arbeitsgebiet: theoretische Festkörperphysik. Veröffentlichungen in internationalen Fachzeitschriften, u. a. zu Leitwertschwankungen und dem Aharonov-Bohm Effekt in mesoskopischen Systemen, Spingläsem, persistent *currents*. — Adresse: University of Toronto, Department of Physics, 60 St. George Street, Toronto, M5S 1A7 Ontario, Canada.

Dem Versuch, die eigene Forschung zu planen, kann man einiges entgegenhalten. Verläßt nicht derjenige, der über eine unverbindliche Ankündigung dessen hinausgeht, was er in nächster Zeit zum Gegenstand seines spielerischen Interesses zu machen wünscht, bereits den Bereich wahrer Forschung? Das Ansinnen so manchen Stipendiengegers, den Forschungsplan für die nächsten ein bis zwei Jahre mit einem präzisen Zeitplan und einer Kurzbeschreibung der anzuwendenden Methoden zu versehen, gibt jedenfalls ebenso Anlaß zu Verwunderung wie die Tatsache, daß häufig zwar die Projektskizze, selten allerdings deren Umsetzung begutachtet wird. Am Berliner Wissenschaftskolleg ist man offenbar auch in dieser Hinsicht klüger und prüft weder den Plan noch seine Ausführung. Es bleibt zum Glück bei einer Liste unverbindlicher Ankündigungen, die in meinem Fall drei Punkte umfaßte.

An oberster Stelle stand das Problem der *persistent currents*, das ich gemeinsam mit Hans Weidenmüller in Angriff nehmen wollte. Dieses Projekt hatte in unseren Augen bereits vor der Berliner Zeit weitgehend Gestalt angenommen, so daß wir zuversichtlich waren, die Arbeit in einer etwa zweimonatigen Warmlaufphase abschließen zu können. Zweitens hatte ich mir vorgenommen, mich mit der Quantenmechanik von Spingläsern zu beschäftigen. Vorarbeiten hierzu waren in Form zweier Artikel von Reinhold Oppermann und mir bereits geleistet. Schließlich wollte ich — drittens — ein interessantes Problem aufgreifen, bei dem es um merkwür-

dige Effekte beim Durchtritt vom Laserlicht durch eine Flüssigkeit geht, in der winzige Kügelchen in der Schwebe gehalten werden.

Schneller als mir lieb sein konnte, waren diese Vorsätze Makulatur: Unser Zugang zu den *persistent currents* erwies sich als aufwendiger, interessanter und vor allem ausbaufähiger als geplant und vorausgesehen. Worum geht es nun bei diesem Projekt? Wenn man einen metallenen Ring (z. B. aus Kupfer oder aus Gold) mit einem Durchmesser von $1\mu\text{m}$ auf 0.1 K , also fast auf den absoluten Nullpunkt der Temperaturskala, abkühlt, dann herrschen in diesem Ring ganz besondere Bedingungen. Das Gitter der Gold- bzw. Kupferatome befindet sich nun praktisch in Ruhe, so daß die Elektronen nur an Gitterfehlstellen und nicht an Gitterschwingungen (Phononen) gestreut werden. Die Streuung an Gitterfehlstellen zeichnet sich dadurch aus, daß die Elektronen ihre Bewegungsrichtung, jedoch nicht ihre Geschwindigkeit ändern. Es wird nur Impuls vom Gitter auf das Elektron übertragen und keine Energie. Infolgedessen bleiben die Elektronen kohärent und können — ganz ähnlich wie beispielsweise Licht- oder Wasserwellen — miteinander interferieren, obwohl sie vielfach gestreut werden. Systeme, in denen diese besonderen Bedingungen realisiert sind, nennt man „mesoskopisch“.

Wird ein isolierter mesoskopischer Ring in ein statisches, homogenes Magnetfeld gebracht, so läßt sich ein permanenter, zeitlich nicht abklingender elektrischer Strom um die Ringöffnung nachweisen. Dieser *persistent current* ist eine Gleichgewichtseigenschaft des Rings und kein durch Einwirkung von außen induziertes Phänomen. Seit 1990 ist es zwei verschiedenen Arbeitsgruppen (bei AT&T und IBM) gelungen, den *persistent current* nachzuweisen und seine Amplitude zu bestimmen. Überraschenderweise übertreffen diese Meßwerte die theoretischen Voraussagen um bis zu drei Größenordnungen. Eine Ursache dieser höchst unbefriedigenden Diskrepanz besteht möglicherweise in der Vernachlässigung der Wechselwirkung der Elektronen untereinander. Leider erhöht die Berücksichtigung der Elektron-Elektron Wechselwirkung den Schwierigkeitsgrad des Problems beträchtlich. In Ermangelung exakter, analytischer Methoden mußten Hans Weidenmüller und ich auf eine Kombination von analytischen Argumenten und numerischen Simulationen zurückgreifen. Wir glauben, mit unseren Arbeiten zum ersten Mal überzeugend dargelegt zu haben, daß und warum die Wechselwirkung der Elektronen untereinander für das Verständnis der *persistent currents* wesentlich ist. Obwohl uns quantitative Aussagen nur in gewissen Spezialfällen möglich sind, scheint der Widerspruch zwischen Theorie und Experiment doch weitgehend aufgelöst zu sein. Dieser Fortschritt wurde nicht zuletzt durch die ansehnliche Rechenkapazität im Wissenschaftskolleg ermöglicht. Nur in wenigen physikalischen Instituten wäre die

zeitweilig erforderliche Inanspruchnahme von drei ausgewachsenen *Workstations* geduldet worden.

Auch die zweite Hälfte meines Aufenthalts im Wissenschaftskolleg verlief unprogrammgemäß. Verantwortlich hierfür zeichnete neben Alexander D. Mirlin, einem der fürwahr zahlreichen Gäste der Physikergruppe, ein anonymer Fellow. Im Verlauf einer diffizilen Passage im Kolloquium dieses Ungenannten kam Alexander Mirlin und mir die entscheidende Idee zur Lösung des folgenden Problems.

Man betrachte ein mesoskopisches System in Gestalt eines kleinen, metallischen Drahts, das an beiden Enden über zwei Kontakte an die Außenwelt (etwa das Meßgerät eines Experimentators) angeschlossen ist. Das Interesse gilt dem Leitwert, also einer Transporteigenschaft, der mesoskopischen Probe. Da die Elektronen, die den Draht durchwandern, wie geschildert an Gitterfehlstellen gestreut werden, hängt der Leitwert von der detaillierten Verteilung dieser Fehlstellen ab, so daß eine theoretische Analyse des Einzelfalles hoffnungslos erscheint. Der Ausweg besteht darin, ein ganzes Ensemble von Verteilungen zu betrachten und gezielt statistische Maße (also z. B. Mittelwert und Varianz) des entsprechenden Ensembles von Leitwerten zu berechnen. Verlängert man in Gedanken den mesoskopischen Draht über die sogenannte Lokalisierungslänge hinaus, ändert sich das Verhalten des Systems qualitativ: Die Elektronen verlieren die Fähigkeit, den Draht zu durchqueren und verharren in einem Bereich, dessen Ausdehnung durch die Lokalisierungslängen gegeben ist. Folglich erwartet man, daß der mittlere Leitwert auf Null sinkt. Martin Zirnbauer ist es gelungen, mit Hilfe aufwendiger analytischer Techniken den mittleren Leitwert als Funktion der Systemlänge zu berechnen. Unser Problem bestand darin, diesen Ansatz auf die in mancher Hinsicht interessantere Varianz des Leitwerts zu übertragen.

In einer gemeinsamen Anstrengung konnten Alexander Mirlin, Martin Zirnbauer und ich diese Aufgabe vollständig lösen. Insbesondere konnten wir ein spektakuläres Ergebnis der vorangegangenen Berechnung des mittleren Leitwerts bestätigen: Unter gewissen Umständen bleibt das mesoskopische System entgegen allen Erwartungen der Fachwelt schwach leitend.

Das gründliche Scheitern ursprünglicher Forschungspläne blieb keineswegs der einzige Rückschlag im vergangenen Jahr. Bei einigen Vorhaben hatte ich mich übernommen, ein Unternehmen erwies sich als weniger vielversprechend als erhofft, und die ein oder andere Zusammenarbeit nahm aus Zeitmangel nie wirklich Gestalt an. Das hindert mich nicht daran, ein rundum positives Fazit zu ziehen:

Vermutlich nie wieder werde ich mit so vielen Großen meines Faches über so lange Zeit so eng und unter so vorzüglichen Bedingungen zusam-

menarbeiten können. Dies und der ausgleichende Einfluß vieler außerfachlicher Diskussionen unter den Fellows führte nicht nur zu vier Publikationen zu den beschriebenen Projekten, sondern — mindestens ebenso wichtig — zu einer ganzen Reihe weiterführender Ideen. Ich bin zuversichtlich, einige davon in meiner Zeit an der Universität von Toronto umsetzen zu können.