

Zusammenfassung der Master-Arbeit

“Time-dependent quantum dot coupled to the edges of a two-dimensional topological insulator”

von **Andreas Inhofer**

betreut von **Prof. Dr. Hermann Grabert** und **PD Dr. Dario Bercioux**

In der vorliegenden Master-Arbeit werden neue theoretische und experimentelle Errungenschaften im Bereich der zwei-dimensionalen (2D) topologischen Isolatoren (TI) sowie aus dem Bereich der so genannten Einzel-Elektronen-Quellen (EEQ) kombiniert, um ein neuartiges Bauelement der mesoskopischen Physik vorzuschlagen. Dieses wird im Folgenden Spin-Teilchen Quelle (STQ) genannt. Um die Arbeit in einen größeren Kontext zu stellen, wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich topologischer Isolatoren kurz dargestellt. Als Beispiel untersuche ich einen Graphen-Nanostreifen mit intrinsischer Spin-Bahn-Wechselwirkung (SBW), anhand dessen das Auftreten von Randzuständen offensichtlich wird. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Spin-Polarisation der Randzustände. In diesem Zusammenhang zeige ich des Weiteren, dass sich an einer Grenzfläche zwischen zwei Gebieten mit unterschiedlichem Vorzeichen der SBW Soliton-Lösungen finden lassen. Aufgrund der erhaltenen Zeitumkehr-Symmetrie treten diese Lösungen als Kramersche Paare mit entgegengerichtetem Spin auf.

Die Kernidee dieser Arbeit ist es einen QP, der selbst aus einem 2D TI geformt ist, an die Randzustände eines TI zu koppeln. Dieser Teil wird im Folgenden externer Teil genannt. Zur Beschreibung wähle ich den zeitabhängigen Streumatrix Formalismus, der auch als Floquet Streumatrix Formalismus bekannt ist, wie er heutzutage üblicherweise in der Mesoskopik verwendet wird. Dies erlaubt die Beschreibung des Systems unter der Annahme nicht-wechselwirkender Elektronen. Linearisierte, effektive Hamilton-Operatoren beschreiben die Vorgänge an einer Verjüngung in einem 2D TI. Dies ist die natürliche Realisierung eines Quantenpunktkontakts (QPK). Solch ein QPK erlaubt es den QP vom externen Teil zu trennen. Es wird dargelegt, dass im QP die Randzustände trotz der Einschränkung auf eine kleine Fläche fortbestehen. Die Streumatrizen für den QPK und den QP werden explizit hergeleitet. Die räumliche Einschränkung der Elektronen-Bewegung im QP hat eine Quantisierung der Energie-Niveaus zur Folge. Diese sind in der berechneten Zustandsdichte klar sichtbar. Diese Energieniveaus werden über ein Gatter, welches an den QP kapazitiv koppelt, mithilfe einer zeitabhängigen Wechselspannung durch das Fermi-Niveau der externen Randzustände getrieben. Somit kann eine quantisierte Emission einzelner Kramers' Paare erreicht werden. Insbesondere haben die zwei emittierten Elektronen entgegengesetzte Spin und fließen in entgegengesetzte Richtungen. Des Weiteren untersuche ich den Einfluss der Kopplungsstärke zwischen QP und externem Teil auf die Qualität der Quantisierung. Ich zeige, dass eine schwache Kopplung in gewissem Sinne ideal ist, da somit Schwankungen im Anregungssignal einen geringeren Effekt haben. In diesem Zusammenhang zeige ich eine Parallele zu (optischen) Fabry-Pérot-Kavitäten auf.

Da die Randzustände in 2D TI ohne Magnetfeld existieren, ist das vorgeschlagene System eine Erweiterung des EEQ-Konzepts auf zeitumkehr-invariante Systeme. Ich diskutiere in welchem Sinne die STQ eine Überlagerung zweier (Spin-abhängiger) EEQ ist.

In einer “Kollisions-”Anordnung bei der die zwei emittierten Elektronen wieder zusammengeführt werden, untersuche ich den Einfluss fermionischer Statistik. Strom-Korrelationen zeigen, dass die beiden Elektronen sich aufgrund ihres fermionischen Charakters abstoßen und das obwohl die beiden Teilchen vor der Kollision unterschiedliche Spin-Zustände einnehmen. Für den Fall gebrochener Zeitumkehrinvarianz verringert sich diese Abstoßung. Es handelt sich dabei also um ein Phänomen, dass in zeitumkehr-invarianten TI auftritt. Da diese häufig auch \mathbb{Z}_2 -TI genannt werden, nenne ich diesen Abstoß-Effekt elektronische \mathbb{Z}_2 -Abstoßung.

In einer Anordnung mit mehreren QPK, die effektiv als Strahlteiler wirken, untersuche ich den emittierten Zweiteilchen-Zustand auf Verschränkung. Ich zeige, dass Verschränkung in diesem System nur mithilfe einer projektiven Messung zu erreichen ist. In diesem Fall erreicht die “Concurrence” ihr Maxi-

mum von eins, was ein klares Anzeichen von Verschränkung ist. Des Weiteren kann mit der vorgeschlagenen Anordnung auch eine Bell-Ungleichung in CHSH-Form verletzt werden. Dennoch: Es stellt sich heraus, dass nicht nur eine projektive Messung nötig ist, um Verschränkung zu erzeugen. Vielmehr ist auch noch die Rate mit der verschränkte Elektronen-Paare erzeugt werden können negativ mit der Concurrence korreliert: Maximale Verschränkung wird nur im Grenzfall einer verschwindend geringen Anzahl Elektronen, die tatsächlich einen Detektor erreichen, erlangt.

Ich denke, die vorgeschlagene STQ kann quantisierte Spin-Ströme liefern und könnte sich somit zu einem nützlichen Bauteil in der Spintronik entwickeln.