

# Kapitel 1

## Einleitung

Magnetfeldsensoren spielen in Forschung und Technik eine bedeutende Rolle. In der Industrie werden sie unter anderem als Bewegungssensoren oder, im Bereich der Speichertechnologie, als Leseköpfe in Festplatten eingesetzt [Her93]. In der Forschung werden Magnetfeldsensoren beispielsweise erfolgreich zur Untersuchung der Domänenstruktur von Mikromagneten genutzt. Eine wichtige Sensor-Klasse bilden die magnetoresistiven Sensoren. Darunter versteht man Sensoren, die ihren elektrischen Widerstand unter Einwirkung eines Magnetfeldes ändern. Speziell auf dem Gebiet der magnetoresistiven Magnetfeldsensoren wurden in den letzten Jahrzehnten neue physikalische Effekte entdeckt, die anschließend Eingang in die Technologie gefunden haben. Als Beispiel sei an dieser Stelle der so genannte *Giant Magnetoresistance* (GMR) Effekt genannt, der in Hybridsystemen aus ferromagnetischen und nichtferromagnetischen Metallschichten auftritt und in heute aktuellen Festplattenleseköpfen eingesetzt wird [Bai88, Bin89].

Neben Magnetowiderstandseffekten, die wie der GMR-Effekt auf dem Magnetismus der Materialien beruhen (Spin-Transport), existieren Effekte, die durch die Wirkung des Magnetfeldes auf bewegte elektrische Ladungen (Lorentz-Kraft) hervorgerufen werden. Bei diesen Effekten besitzt der geometrische Aufbau der Strukturen einen entscheidenden Einfluss auf die Widerstandsänderung im Magnetfeld. Der bekannteste Vertreter dieser Lorentz-Kraft basierten geometrischen Magnetowiderstandseffekte ist der 1879 von E. H. Hall entdeckte Hall-Effekt [Hal79].

Der von S. A. Solin und Mitarbeitern entdeckte so genannte *Extraordinary Magnetoresistance* (EMR) Effekt ist ein geometrischer Magnetowiderstandseffekt, der in Hybridsystemen aus Metall und Halbleiter auftritt. Solin *et al.* beobachteten in solchen Strukturen Widerstandsänderungen von bis zu 750 000 % bei einem Magnetfeld von  $B = 4$  T [Sol00]. Bauelemente, die auf diesem EMR-Effekt basieren, könnten in Zukunft als Sensoren speziell in Leseköpfen von Festplatten ihren Einsatz finden [Sol04, Sol02a]. Die untersuchten Bauelemente bestanden ausschließlich aus nichtmagnetischen Materialien, in denen als Metallkomponente eine Goldlegierung und als Halbleiterkomponente hochbewegliches

InSb-Volumenmaterial verwendet wurden.

In der vorliegenden Arbeit wird der EMR-Effekt in Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen untersucht. Als Halbleiter wird ein hochbewegliches zweidimensionales Elektronensystem (2DES) eingesetzt, das sich in einem InAs-Kanal einer InAs-InGaAs-Heterostruktur ausbildet. Als Metall kommt ein Goldfilm zum Einsatz, der durch ein an die *cleaved edge overgrowth* (CEO) - Methode [Pfe90] angelehntes Präparationsverfahren mit dem 2DES kontaktiert wird. Dieses Verfahren ermöglicht sehr gute Grenzflächeneigenschaften mit einem sehr geringen Kontaktwiderstand. Die Materialparameter des 2DES können durch Beleuchtung kontrolliert variiert werden. Es werden insbesondere die Abhängigkeit des EMR-Effektes von den Eigenschaften des Halbleiters, der Metall-Halbleiter-Grenzfläche, der Geometrie der Hybridstruktur und der Kontaktplatzierung untersucht. Außerdem wird die Reaktion der Hybridstrukturen auf lokale Magnetfelder studiert.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden zunächst die für diese Arbeit wichtigen physikalischen Grundlagen kurz vorgestellt. Insbesondere werden der geometrische Magnetowiderstand und der für die Transporteigenschaften relevante Kontaktwiderstand der Metall-Halbleiter-Grenzfläche eingeführt. In Kapitel 3 wird die Herstellung der Hybridstrukturen beschrieben. Außerdem wird die zur Untersuchung verwendete Messtechnik vorgestellt. In Kapitel 4 werden die experimentell ermittelten Eigenschaften der Hybridstrukturen und ihrer Komponenten vorgestellt. Insbesondere werden die Methoden zur Ermittlung des Kontaktwiderstands eingeführt. In den folgenden Kapiteln werden die Transporteigenschaften der Hybridstrukturen im Magnetfeld behandelt. Dabei liegt in Kapitel 5 der Schwerpunkt auf dem Einfluss der Platzierung von Strom- und Spannungskontakten auf den Magnetowiderstand. Außerdem wird auf die numerische Simulation des Magnetowiderstands eingegangen. Kapitel 6 behandelt den Einfluss der Materialparameter des 2DES, des spezifischen Kontaktwiderstands und der Geometrie der Hybridstruktur auf den EMR-Effekt. In Kapitel 7 wird die Reaktion der Hybridstrukturen auf lokale, inhomogene Magnetfelder untersucht, die durch zusätzlich auf die Hybridstruktur aufgebrachte ferromagnetische Filme verursacht werden. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in Kapitel 8.

# Kapitel 2

## Theoretische Grundlagen

### 2.1 Transport in Magnetfeldern

Der Widerstand eines leitfähigen Materials im Magnetfeld setzt sich aus zwei Beiträgen zusammen: dem physikalischen Widerstandsbeitrag und dem geometrischen Widerstandsbeitrag. Der physikalische Beitrag kommt durch die Magnetfeldabhängigkeit der Materialparameter zustande. Ein Beispiel dafür ist eine magnetfeldabhängige Beweglichkeit. Der geometrische Beitrag ist durch die Form des Materials, die Anordnung und Geometrie der Kontakte sowie durch die Platzierung und Geometrie von Inhomogenitäten bestimmt. Bei solchen Inhomogenitäten handelt es sich beispielsweise um Einschlüsse mit einer intrinsisch anderen Leitfähigkeit. Dabei hängt der geometrische Beitrag insbesondere von dem Verhältnis der Leitfähigkeiten von Leiter und Inhomogenität ab [Sol03]. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die Ursachen des geometrischen Beitrags und die Auswirkungen auf den Magnetowiderstand eines Leiters gegeben. Dabei wird der physikalische Beitrag vernachlässigt.

Der diffusive elektrische Transport in einem freien Elektronengas wird durch das Ohmsche Gesetz beschrieben:

$$\mathbf{j} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{E}. \quad (2.1)$$

Der Zusammenhang zwischen Stromdichte  $\mathbf{j}$  und elektrischer Feldstärke  $\mathbf{E}$  ist durch den Tensor der spezifischen Leitfähigkeit  $\boldsymbol{\sigma}$  festgelegt. In einem homogenen und elektrisch isotropen Medium kann  $\boldsymbol{\sigma}$  durch die skalare spezifische Leitfähigkeit  $\sigma_0$  ausgedrückt werden. Für sie gilt:

$$\sigma_0 = e n \mu \quad (2.2)$$

mit der Ladungsträgerdichte  $n$ , der Ladungsträgerbeweglichkeit  $\mu$  und der Elementarladung  $e$ . Die Proportionalitätskonstante  $\sigma_0$  hängt somit nur von Materialparametern ab. Sie ist mit dem spezifischen Widerstand über  $\rho_0 = \sigma_0^{-1}$  verknüpft.

Die Stromdichte  $\mathbf{j}$  und elektrische Feldstärke  $\mathbf{E}$  sind im isotropen Fall parallel zueinander. Eine Anisotropie in der spezifischen Leitfähigkeit hat eine Abweichung von der Parallelität zur Folge und führt zu einem Winkel zwischen  $\mathbf{E}$  und  $\mathbf{j}$ .

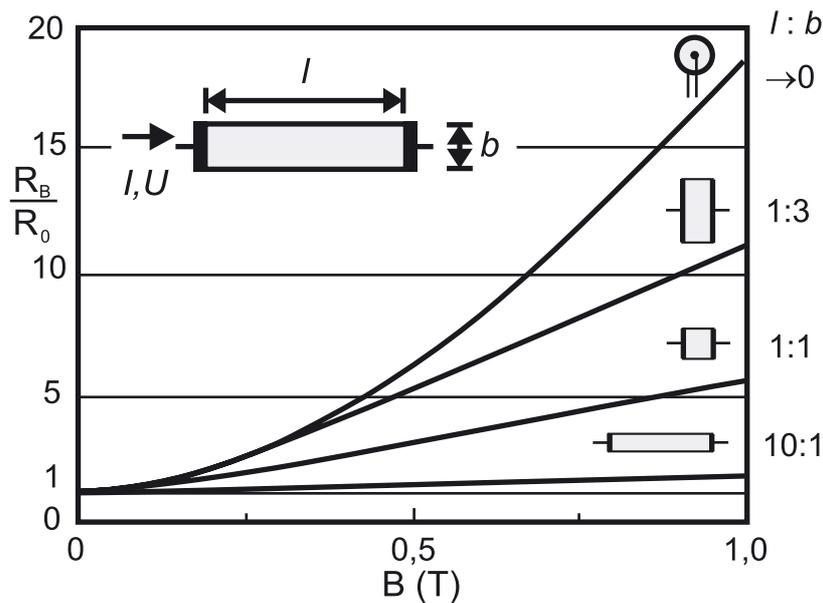
Auf mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  bewegte Ladungen  $q$  wirkt im Magnetfeld  $\mathbf{B}$  die Lorentz-Kraft  $\mathbf{F}_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Diese Wirkung des Magnetfeldes auf die Ladungen führt auch in einem ansonsten elektrisch isotropen Medium zu einer Anisotropie in der spezifischen Leitfähigkeit. Bei einem in  $z$ -Richtung anliegenden Magnetfeld ergibt sich für den Leitfähigkeitstensor in der  $x, y$ -Ebene [Kit02, Wie71]

$$\sigma(\sigma_0, \beta) = \frac{\sigma_0}{1 + \beta^2} \begin{pmatrix} 1 & -\beta \\ \beta & 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

mit dem dimensionslosen Magnetfeld  $\beta = \mu B$ . Das Magnetfeld  $B$  geht also ausschließlich als Produkt mit der Beweglichkeit  $\mu$  in die Leitfähigkeit  $\sigma$  des Systems ein. Für den Hall-Winkel  $\vartheta$  ergibt sich damit

$$\tan(\vartheta) = \mu B = \beta. \quad (2.4)$$

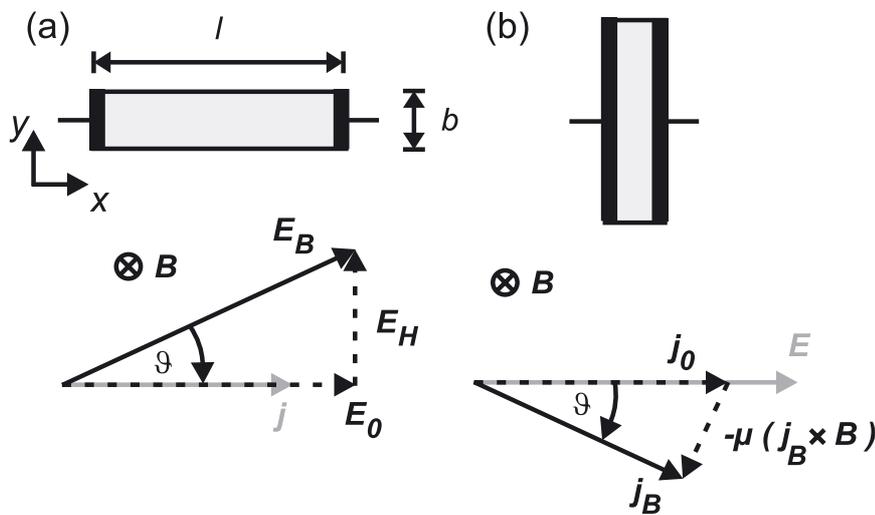
Welche Auswirkung das Auftreten des Hall-Winkels auf den Widerstand eines Leiters hat, hängt nun explizit von der äußeren Form ab.



**Abbildung 2.1:** Magnetowiderstandsmessungen von Weiß und Welker an InSb. Der in Zwei-Punkt-Konfiguration gemessene Magnetowiderstand zeigt eine starke Abhängigkeit von der Geometrie des Materials. Je geringer das Verhältnis  $l/b$  von Länge zu Breite der InSb-Struktur (Inset), desto größer wird die Widerstandsänderung im Magnetfeld. Die Corbino-Scheibe ist der Grenzfall einer rechteckigen Struktur mit  $l/b \rightarrow 0$  und zeigt die größte, nahezu quadratische Magnetfeldabhängigkeit. Nach [Wei54].

### 2.1.1 Homogene Systeme

Abbildung 2.1 zeigt Messungen von Weiß und Welker an InSb-Proben mit identischen Materialparametern aber unterschiedlicher Geometrie [Wei54]. Aufgetragen ist der Widerstand  $R_B$  im Magnetfeld  $B$  bezogen auf den Nullfeldwiderstand  $R_0$ . Variiert wurde das Verhältnis von Länge  $l$  zu Breite  $b$  des Leiters. Dabei wurde die Messkurve mit der größten Magnetowiderstandsänderung an einer Corbino-Scheibe [Cor11] gemessen. Diese ist galvanomagnetisch äquivalent zu einer rechteckigen Struktur mit  $l/b \rightarrow 0$  [Lip58]. Bei gleichem Hall-Winkel ( $\tan(\vartheta) = \mu B$ ) ist die Widerstandsänderung um so größer je kleiner  $l/b$  ist. Das durch die endliche Probengröße verursachte Ansteigen des Widerstands im Magnetfeld wird als geometrischer Magnetowiderstandseffekt bezeichnet.



**Abbildung 2.2:** (a) Ändert sich die Richtung der Stromlinien im Magnetfeld nicht ( $\mathbf{j}_B \parallel \mathbf{j}_0$ ), dreht sich das elektrische Feld  $\mathbf{E}_B$  um den Hall-Winkel  $\vartheta$ . (b) Findet im Magnetfeld keine Änderung der Richtung der elektrischen Feldlinien statt ( $\mathbf{E}_B \parallel \mathbf{E}_0$ ), dreht sich die Stromdichte  $\mathbf{j}_B$  um den Hall-Winkel  $\vartheta$ . Die Skizzen der Leiter in (a) und (b) zeigen die dem jeweiligen Fall entsprechenden Leitergeometrien. Die Metallkontakte an den Seiten sind durch schwarze Rechtecke skizziert.

Eine Erklärung für diese Abhängigkeit von der Geometrie liefern die Randbedingungen im Magnetfeld. In einem langen und schmalen Leiter ( $l/b \rightarrow \infty$ , Abb. 2.2a) ist der Strom in vertikaler  $y$ -Richtung durch den isolierenden Probenrand begrenzt. Deshalb kann die Stromdichte dort nur eine zum Leiter parallele Komponente besitzen. Dies führt dazu, dass sich im Magnetfeld das elektrische Feld gegenüber der Stromdichte um den Hall-Winkel verdreht (Gl. 2.1 und 2.3:  $j_y = 0 \Rightarrow E_y \neq 0$  für  $\beta \neq 0$ ). Es entsteht ein transversales elektrisches Feld  $E_y = E_H$ , das Hall-Feld, das über die Hall-Spannung gemessen werden kann (Hall-Effekt). Im stationären Zustand kompensiert das Hall-Feld im Inneren des Leiters die Lorentz-Kraft, so dass der Strom  $\mathbf{j}$  wie im magnetfeldfreien