

Oliver Kronenwerth

---

**Extraordinary Magnetoresistance Effekt:  
Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen in  
homogenen und inhomogenen  
Magnetfeldern**

---



Cuvillier Verlag Göttingen

Extraordinary Magnetoresistance Effekt:  
Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen in  
homogenen und inhomogenen  
Magnetfeldern

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
des Fachbereichs Physik  
der Universität Hamburg

vorgelegt von  
Oliver Kronenwerth  
aus Saarbrücken

Hamburg  
2004

## **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2005  
Zugl.: Saarbrücken, Univ., Diss., 2004  
ISBN 3-86537-327-5

Gutachter der Dissertation:	Prof. Dr. D. Heitmann Prof. Dr. W. Hansen
Gutachter der Disputation:	Prof. Dr. D. Heitmann Prof. Dr. U. Merkt
Datum der Disputation:	17. Dezember 2004
Vorsitzender des Prüfungsausschusses:	Dr. K. Petermann
Dekan des Fachbereichs Physik und Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Prof. Dr. G. Huber

⊕ CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2005  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2005  
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-327-5

# Inhaltsangabe

Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen zeigen den von S. A. Solin und Mitarbeitern entdeckten so genannten *Extraordinary Magnetoresistance* (EMR) Effekt [Science **289**, 1530, (2000)]. Dieser geometrische Magnetowiderstandseffekt wird in der vorliegenden Arbeit in Hybridstrukturen untersucht, die aus einer InAs-InGaAs-Heterostruktur mit einem integrierten zweidimensionalen Elektronensystem (2DES) und einem Goldfilm bestehen. Zur Herstellung der mikrostrukturierten Hybridstrukturen wurde ein Präparationsverfahren entwickelt, mit dem der Goldfilm auf eine frische Spaltfläche der Heterostruktur aufgebracht wird. Dies ermöglicht sehr gute Grenzflächen zwischen 2DES und Gold mit einem spezifischen Kontaktwiderstand von bis zu  $\rho_c = 1,5 \cdot 10^{-8} \Omega\text{cm}^2$  bei  $T = 4$  K, der nahe am Sharvin-Widerstand liegt, der die untere Schranke für den spezifischen Kontaktwiderstand darstellt.

Mit magnetfeldabhängigen Potenzialmessungen wird das Zustandekommen des EMR-Effektes durch die magnetfeldbedingte Stromumverteilung zwischen Metall und Halbleiter studiert und der Zusammenhang mit dem Hall-Effekt erläutert. Es wird gezeigt, dass die Transferfunktion  $dR/dB$  in der Hybridstruktur bei spezieller Anordnung von Strom- und Spannungskontakten den Hall-Effekt im homogenen Halbleiter übertreffen kann. Weiterhin wird der Einfluss der Materialparameter des 2DES, des Kontaktwiderstands und der Geometrie auf den EMR-Effekt detailliert untersucht. Für große Magnetowiderstandsänderungen ist dabei in der Regel ein geringer Kontaktwiderstand von Vorteil. Die Geometrieabhängigkeit wird durch Variation der Weite  $W$  bzw. der Länge  $L$  des 2DES untersucht. Es zeigt sich hierbei, dass der Geometrieparameter  $W/L$  für das Magnetowiderstandsverhalten der Hybridstruktur ausschlaggebend ist, und dass ein optimierter Wert existiert. Die beste Hybridstruktur wies einen relativen Magnetowiderstand von 115 000 % bei einem Magnetfeld von  $B = 1$  T auf.

Im Hinblick auf eine mögliche Anwendung der Hybridstruktur als Magnetfeldsensor ist die Untersuchung der Reaktion auf lokale Magnetfelder interessant. Dazu wird auf der Sensoroberfläche ein mikrostrukturierter Eisen-Magnet integriert, dessen Streufeld das lokale Magnetfeld erzeugt. Dabei zeigt sich eine starke Abhängigkeit der Sensitivität der Hybridstruktur von der Position des Mikromagneten, von der Anordnung der Strom- und Spannungskontakte und von der Geometrie der Hybridstruktur.

# Abstract

Metal-semiconductor hybrid structures show the so-called extraordinary magnetoresistance (EMR) effect which was discovered by S. A. Solin and co-workers [Science **289**, 1530, (2000)]. In this work this geometric magnetoresistance effect is investigated. The hybrid structures consist of an InAs-InGaAs heterostructure with an embedded two-dimensional electron system (2DES) and a gold film. For the fabrication of the microstructured hybrid structures we developed a preparation technique which allowed us to deposit the gold on a clean cleaved edge of the heterostructure. This made it possible to achieve an interface of high quality between the gold and the 2DES which showed a contact resistivity of  $\rho_c = 1,5 \cdot 10^{-8} \Omega\text{cm}^2$  at  $T = 4$  K which is close to the theoretical limit given by the Sharvin resistance.

The origin of the EMR effect is the magnetic-field-dependent redistribution of the current between the 2DES and the metal. The EMR effect and the connection with the Hall effect is studied by detailed potential measurements in magnetic fields. It is shown that depending on the current and voltage probe configuration the transfer function  $dR/dB$  of the hybrid structure exhibits higher values than a Hall device consisting of homogeneous semiconductor.

The influence of the material parameters of the 2DES, of the contact resistance and of the geometry of the hybrid structure is analyzed in detail. We show that in general a low contact resistance is essential for a high magnetoresistance effect. To study the influence of the geometry we have varied the width  $W$  and the length  $L$  of the 2DES systematically. It is shown that the parameter  $W/L$  is crucial for the magnetotransport properties of the hybrid structure and that an optimized value exists. Our best hybrid device exhibited a relative magnetoresistance of 115 000 % at a magnetic field of  $B = 1$  T.

With regard to possible applications of the hybrid structures as magnetic field sensors it is important to examine the hybrid structures in local magnetic fields. For this purpose a microstructured magnet consisting of iron is placed on the surface of the hybrid structure. The stray field of the micro magnet is used to apply a local magnetic field which is controlled by an external magnetic field. We find that in this case the sensitivity of the hybrid structure strongly depends on the position of the stray field, on the current and voltage probe configuration as well as on the geometry of the hybrid structure.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsangabe</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Transport in Magnetfeldern . . . . .	3
2.1.1 Homogene Systeme . . . . .	5
2.1.2 Hybridstrukturen . . . . .	7
2.2 Zweidimensionales Elektronensystem . . . . .	13
2.2.1 Aufbau . . . . .	13
2.2.2 Transport im 2DES . . . . .	14
2.3 Kontaktwiderstand . . . . .	15
2.4 Ferromagnetische Filme . . . . .	18
<b>3 Experimentelle Techniken</b>	<b>20</b>
3.1 Herstellung der Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen . . . . .	20
3.1.1 Strukturierung des 2DES . . . . .	22
3.1.2 Präparation des Mikromagneten . . . . .	23
3.1.3 Brechprozess und Metallisierung der Spaltfläche . . . . .	24
3.2 Messtechnik . . . . .	27
3.2.1 Transportmessungen . . . . .	27
3.2.2 Magneto-optischer Kerr-Effekt . . . . .	28
3.2.3 Magnet-Kraft-Mikroskopie . . . . .	30
<b>4 Transporteigenschaften</b>	<b>31</b>
4.1 Transporteigenschaften der Heterostruktur und des Goldfilms . . . . .	31
4.2 Bestimmung des Kontaktwiderstands der Au-2DES-Grenzfläche . . . . .	34
4.3 Eigenschaften der Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen . . . . .	39
<b>5 Hybridstrukturen in homogenen Magnetfeldern</b>	<b>42</b>
5.1 Übersicht über die Messkonfigurationen . . . . .	42
5.1.1 Strom-Spannungs-Messanordnungen . . . . .	42

5.2	Experiment und Simulation . . . . .	44
5.2.1	Simulation des EMR-Effektes . . . . .	45
5.3	IVVI-Konfiguration . . . . .	47
5.4	VIVI-Konfiguration . . . . .	54
5.4.1	Messergebnisse . . . . .	54
5.4.2	Diskussion . . . . .	56
5.5	Symmetrieeigenschaften und Einfluss der Kontaktplatzierung . . .	60
5.5.1	Symmetrie . . . . .	60
5.5.2	Reziprozität . . . . .	62
5.5.3	Einfluss der Kontaktplatzierung . . . . .	64
5.6	Winkelabhängigkeit . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Einfluss des 2DES und der Geometrie</b>	<b>70</b>
6.1	Beleuchtungsabhängigkeit . . . . .	71
6.2	Einfluss des Kontaktwiderstands . . . . .	79
6.3	Einfluss der Geometrie . . . . .	83
<b>7</b>	<b>Hybridstrukturen in lokalen, inhomogenen Magnetfeldern</b>	<b>95</b>
7.1	Messmethode . . . . .	95
7.2	Charakterisierung des Mikromagneten . . . . .	97
7.2.1	Magnetisierungsuntersuchung mittels MOKE . . . . .	97
7.2.2	MFM-Untersuchung des Mikromagneten . . . . .	97
7.2.3	Berechnung des Streufeldes am Ort des 2DES . . . . .	100
7.3	Reaktion auf lokale Streufelder . . . . .	105
7.3.1	Messungen an Hybridstruktur #11b . . . . .	108
7.3.2	Messungen an den Hybridstrukturen #9a und #11a . . . . .	114
7.3.3	Einfluss der Position des Mikromagneten und der Geometrie der Hybridstruktur . . . . .	118
7.3.4	Diskussion des Untergrunds in Struktur #11b . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>128</b>
<b>A</b>	<b>Aufbau der Heterostrukturen</b>	<b>131</b>
<b>B</b>	<b>Prozessparameter</b>	<b>132</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>
	<b>Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge</b>	<b>145</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>149</b>

# 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  $\mathbf{j}$ .

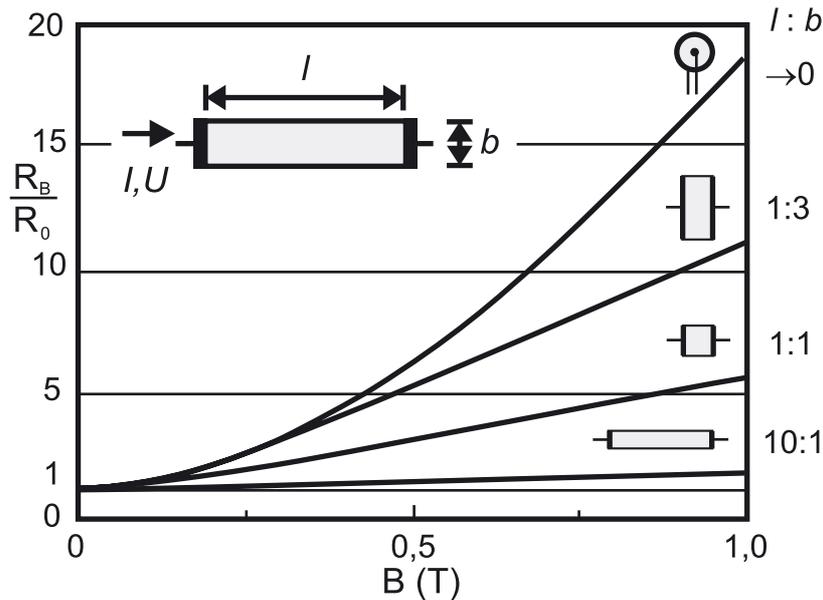
Auf mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  bewegte Ladungen  $q$  wirkt im Magnetfeld  $\mathbf{B}$  die Lorentz-Kraft  $\mathbf{F}_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ . Diese Wirkung des Magnetfeldes auf die Ladungen führt auch in einem ansonsten elektrisch isotropen Medium zu einer Anisotropie in der 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

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

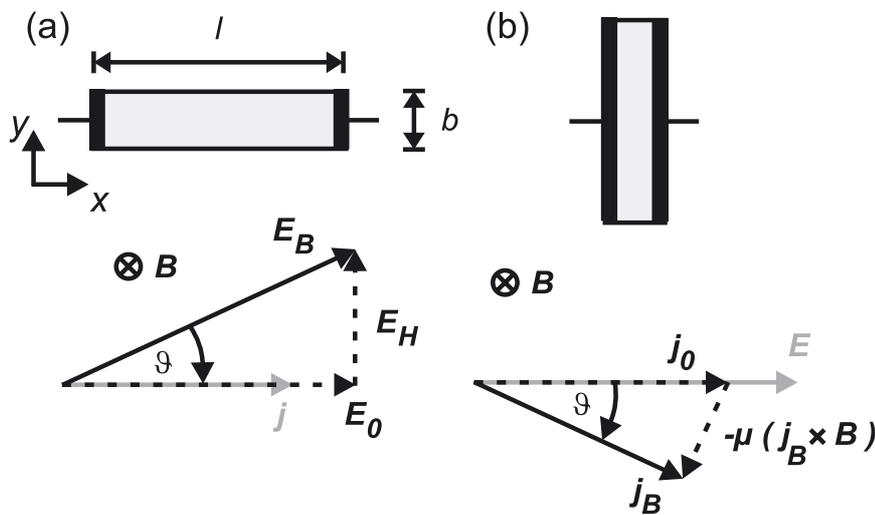
Welche Auswirkung das Auftreten des Hall-Winkels auf den Widerstand eines Leiters hat, hängt nun explizit von der äußeren Form ab.



**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

Fall in  $x$ -Richtung fließt (Abb. 2.2a). Der longitudinale Widerstand des Leiters ändert sich nicht (bei vernachlässigbarem physikalischen Widerstand). Für die Hall-Spannung  $U_H = U_{xy}$  eines dreidimensionalen Elektronensystems ergibt sich

$$U_H = \frac{I B}{e n d}, \quad (2.5)$$

wobei  $d$  die Ausdehnung des Leiters in  $z$ -Richtung ist.

In einem kurzen und sehr breiten Leiter ist der Strom in  $y$ -Richtung nicht eingeschränkt ( $l/b \rightarrow 0$ , Abb. 2.2b). Sind die Stromkontakte Äquipotenzialflächen, so steht das elektrische Feld senkrecht auf diesen und weist in  $x$ -Richtung (Gl. 2.1 und 2.3:  $E_y = 0 \Rightarrow j_y \neq 0$  für  $\beta \neq 0$ ). Dann führt im Magnetfeld die Lorentz-Kraft zu einer transversalen Stromkomponente, während das elektrische Feld dieselbe Richtung wie im Nullfeld beibehält. Der Strom ist um den Hall-Winkel gegenüber dem elektrischen Feld verdreht und fließt nicht mehr in  $x$ -Richtung. Diese Stromablenkung führt zu einer Widerstandserhöhung (geometrischer Magnetowiderstandseffekt). Im Fall der Corbino-Scheibe gilt bei vernachlässigbarem physikalischem Magnetowiderstand für den relativen Magnetowiderstand [Wie71]:

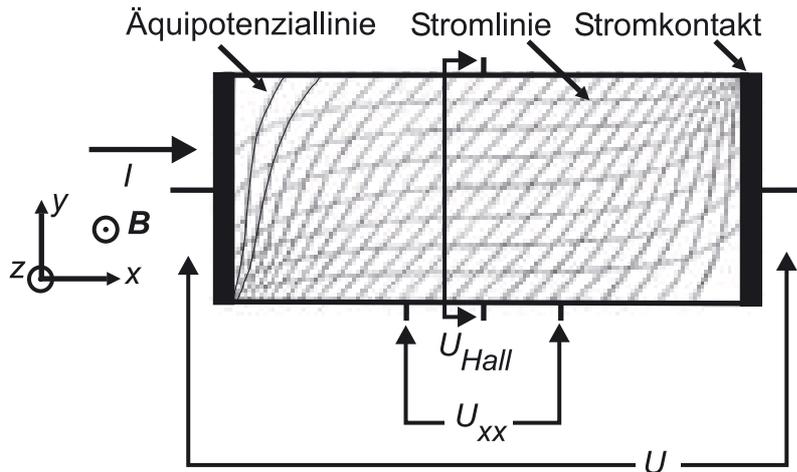
$$R_B/R_0 = 1 + (\mu B)^2. \quad (2.6)$$

In einem homogenen Leiter ist dies der größtmögliche Magnetowiderstand.

Für homogene Systeme ergibt sich zusammenfassend: Der Hall-Winkel ist unabhängig von der geometrischen Form. Die Hall-Spannung hat den höchsten und die Widerstandsänderung den kleinsten Wert, wenn die Stromlinien mit und ohne Magnetfeld dieselbe Lage haben und die Äquipotenziallinien im Magnetfeld um den vollen Hall-Winkel gedreht werden. Wird umgekehrt dafür gesorgt, dass die Äquipotenziallinien unverändert bleiben und die Strombahnen um den vollen Hall-Winkel gedreht werden, so tritt keine Hall-Spannung auf und die Widerstandsänderung erreicht ihren höchsten Wert. Hall-Effekt und Widerstandsänderung im Magnetfeld sind beide Folgen der Ablenkung bewegter Ladungen durch die Lorentz-Kraft und bezüglich der Formabhängigkeit komplementäre Effekte [Wei69]. Die Größe des Magnetowiderstandseffekts ist vom Hall-Winkel und damit insbesondere von der Beweglichkeit abhängig. Daher werden zur Nutzung des geometrischen Magnetowiderstands in Sensoren bevorzugt Halbleitermaterialien mit hoher Beweglichkeit wie InSb oder InAs verwendet [Her93].

### Bestimmung der Leitfähigkeit

Da der (Längs-)Widerstand eines Leiters mit großem  $l/b$  nahezu keinen geometrischen Magnetowiderstand aufweist, werden Hallbars, die diese geometrische Bedingung erfüllen, dazu genutzt, um den physikalischen Magnetowiderstand eines Materials zu untersuchen. Die Randbedingung auf einem (metallischen) Stromkontakt führt allerdings auch in einem solchen Leiter zu einer Ablenkung des Stroms im Bereich der Stromkontakte (Abb. 2.3). Zur Bestimmung von Längs-



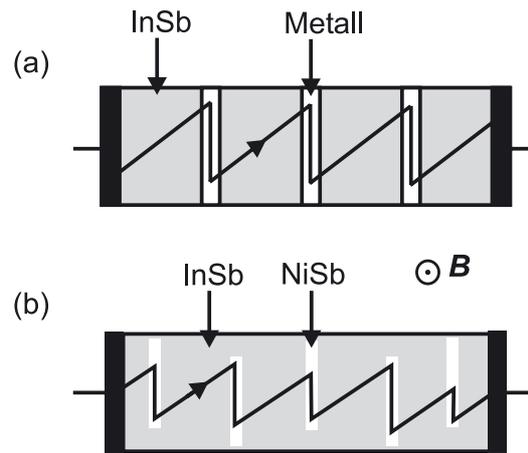
**Abbildung 2.3:** Verlauf der Strom- und Äquipotenziallinien in einem Leiter mit  $l > b$ . Die metallischen Stromkontakte (schwarz) erstrecken sich über die gesamte Breite  $b$  des Leiters und stellen Äquipotenziallinien dar. Das führt im Bereich der Stromkontakte zu einer Verdrehung der Stromdichte gegenüber den elektrischen Feldlinien um den Hall-Winkel. Um bei der Bestimmung des physikalischen Magnetowiderstands den Einfluss des geometrischen Magnetowiderstands im Bereich der Stromkontakte zu umgehen, werden Messungen der Längsspannung  $U_{xx}$  in Vier-Punkt-Geometrie durchgeführt.

( $U_{xx}/I$ ) und Hall-Widerstand ( $U_H/I = U_{xy}/I$ ) werden Vier-Punkt-Messungen durchgeführt. Dabei muss auf einen ausreichenden Abstand der Spannungsabgriffe von den Stromkontakten geachtet werden. Dies ist in Abbildung 2.3 durch die Wahl der Spannungskontakte veranschaulicht. Design-Regeln für Hallbars, die zu einer Minimierung der Randeffekte führen, sind z. B. in [But02, Loo89] zusammengefasst. Zur Bestimmung des spezifischen Widerstands in den in dieser Arbeit verwendeten Halbleiter-Heterostrukturen wurden daher nach solchen Kriterien entwickelte Hallbar- und van-der-Pauw-Strukturen [vdP58] verwendet.

## 2.1.2 Hybridstrukturen

### Raster- und Feldplatten

Bei den bisher vorgestellten Strukturen handelt es sich um homogene Systeme, die, abgesehen von den Kontakten, aus einem homogenen Halbleitermaterial bestehen. Neben diesen sind auch hybride Systeme interessant. Bei der Rasterplatte (Abb. 2.4a) handelt es sich um ein solches System [Her93, Wei69]. Neben dem halbleitenden Widerstandsmaterial und den daran angebrachten metallischen Stromkontakten besteht die Struktur aus in das Halbleitermaterial eingelassenen so genannten Kurzschlussstreifen. Diese Inhomogenitäten sind im Unterschied zu den Stromkontakten nicht von außen kontaktiert. Sie bestehen wie die Stromkontakte aus Metall und sind daher Äquipotenzialflächen, die den Auf-



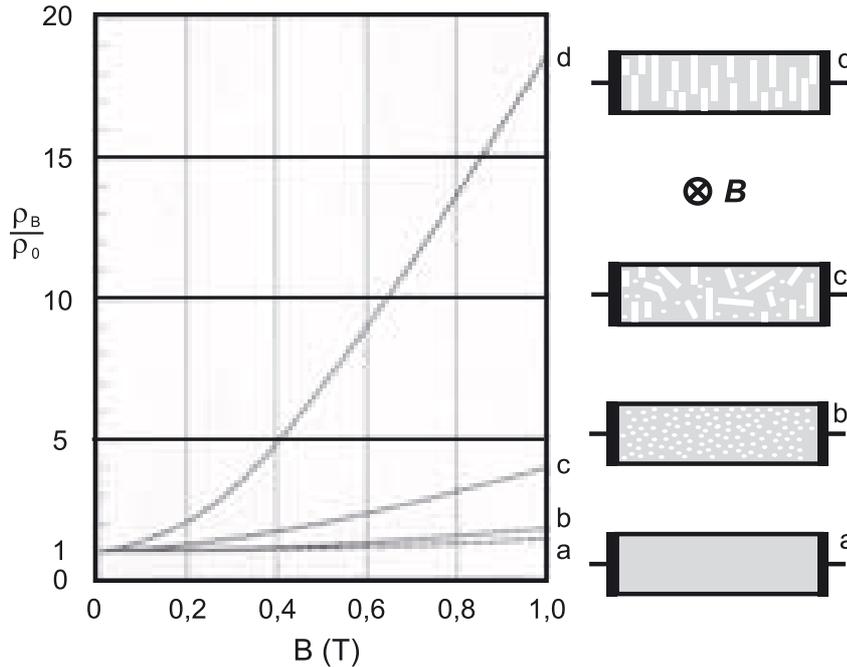
**Abbildung 2.4:** Schematischer Aufbau (a) der Rasterplatte und (b) der Feldplatte. Die weißen Bereiche kennzeichnen die metallischen, gut leitfähigen Inhomogenitäten. Im Magnetfeld führt der Kurzschluss der Hall-Spannung zu der skizzierten Verlängerung der Strombahnen im Halbleiter und damit zu einer Widerstandserhöhung.

bau einer Hall-Spannung verhindern. Dadurch kommt es im Magnetfeld zu einer Ablenkung des Stroms, die einen großen Magnetowiderstand zur Folge hat (Kap. 2.1.1).

Die abgebildete Hybridstruktur ist eine Serienschaltung von vier Widerständen mit kleinem  $l/b$ . Dieses System wird als Sensor genutzt. Der technologische Vorteil gegenüber dem Widerstand einer einzelnen homogenen Struktur liegt darin, dass der Widerstand durch die Serienschaltung erhöht wird [Her93]. Neben der Rasterplatte, bei der die Kurzschlussstreifen nachträglich aufgebracht werden, werden auch so genannte Feldplatten als Sensoren verwendet, bei denen der Halbleiter (InSb) mit parallel ausgerichteten hochleitfähigen Nadeln (NiSb) im Inneren hergestellt wird (Abb. 2.4b). Das Wirkprinzip wird wie bei der Rasterplatte auf den Kurzschluss der Hall-Spannung durch die Inhomogenitäten zurückgeführt [Wei63, Wei69]. Kurve d in Abbildung 2.5 zeigt eine Messung an einer Feldplatte, bei der die Inhomogenitäten senkrecht zum Strompfad und senkrecht zum Magnetfeld ausgerichtet waren. Dabei ergibt sich eine große Widerstandsänderung. Sind die Inhomogenitäten nicht ausgerichtet, sondern beliebig orientiert, ergibt sich Kurve c mit einem schwächeren Magnetowiderstand. Bei einer Ausrichtung der Inhomogenitäten parallel zum Magnetfeld und senkrecht zur Stromrichtung (Kurve b) zeigt sich ein gegenüber dem homogenen InSb (Kurve a) leicht erhöhter Magnetowiderstand.

## EMR-Strukturen

Eine weitere Klasse von Metall-Halbleiter-Hybridstrukturen nutzt den so genannten *Extraordinary Magnetoresistance* (EMR) Effekt [Sol00, Zho01]. Dieser über-



**Abbildung 2.5:** Relativer spezifischer Widerstand (a) in einer Struktur aus homogenem InSb und (b-d) in InSb-NiSb-Feldplatten. Das homogene InSb besitzt eine schwache Magnetowiderstandsänderung. Die Feldplatten zeigen einen stärkeren Anstieg des Magnetowiderstands. Die Stärke ist abhängig von der Orientierung der Inhomogenitäten (NiSb) relativ zum äußeren Magnetfeld. (b) Ausrichtung der Inhomogenitäten parallel zum äußeren Magnetfeld, (c) ungerichtete Inhomogenitäten, (d) Ausrichtung der Inhomogenitäten senkrecht zum äußeren Magnetfeld (vgl. Abb. 2.4). Die starke Magnetowiderstandszunahme der Kurve d wird wie bei der Rasterplatte auf den Kurzschluss der Hall-Spannung zurückgeführt [Wei69].

trifft den Magnetowiderstand der besprochenen Hybridstrukturen. Die Entstehung des magnetfeldabhängigen Widerstands wird durch Abbildung 2.6 veranschaulicht.

In der Halbleiterstruktur ist eine kreisförmige hochleitfähige Metallinhomogenität eingefügt. Der Strom fließt innerhalb des Leiters von links nach rechts. Im magnetfeldfreien Fall ( $B = 0$ ) fließt der Strom quasi vollständig durch die Inhomogenität, da sie eine größere Leitfähigkeit als das umgebende Halbleitermaterial besitzt. Die Inhomogenität wirkt dadurch wie ein innerer Kurzschluss. Da bei  $B = 0$  Stromdichte und elektrisches Feld kollinear sind, und das Metall eine Äquipotenzialfläche bildet, tritt der Strom senkrecht durch die Grenzfläche zwischen Metall und Halbleiter.

Im Magnetfeld bildet sich der Hall-Winkel (Gl. 2.4) zwischen Stromdichte und elektrischem Feld aus. Im Grenzfall sehr großer Magnetfelder ( $B \gg \mu^{-1}$ ) nähert sich der Hall-Winkel  $90^\circ$ , so dass Strom und elektrisches Feld senkrecht aufeinander stehen. Dies führt dazu, dass der Strom nicht mehr in die metal-