

Hall Sonden – unverzichtbar in vielen Alltagsgeräten

Hall Sonden dienen in Smartphones als Kompass, in Autos messen sie die Drehzahl der Räder für das ABS-System und in der Kaffeemaschine die Wassermenge. Mit Hall Sonden lässt sich die Stromstärke in Kabeln berührungslos messen oder die Stärke und die Richtung von Magnetfeldern bestimmen. Bei der Entwicklung der Halbleitertechnologie spielte der durch Edwin Hall 1879 entdeckte Effekt eine entscheidende Rolle.

Hall Sonden – genial einfach

Das Herz einer Hall Sonde ist eine elektrisch leitende Platte mit vier Anschlüssen wie in Abb. 1 dargestellt. In Längsrichtung fliesst ein Strom J und

quer dazu sind zwei Anschlüsse angebracht, zwischen denen die sog. Hallspannung U_{Hall} gemessen wird.

Die Platte befindet sich in einem Magnetfeld B , dessen Feldlinien senkrecht zu ihr verlaufen. Die Hallspannung ist proportional zur Stromstärke, zur Magnetfeldstärke und zum Kehrwert der Plattendicke d . Der Hall Koeffizient R_{Hall} hat für jedes Plattenmaterial einen bestimmten Wert, der teilweise in Tabellen gefunden werden kann (z.B. Koon 2000). Sein Vorzeichen ist dasjenige der Ladungsträger; für Elektronen ist er also negativ.

Auch die Entstehung der Hallspannung, der Hall Effekt, ist einfach zu verstehen. Bewegte Ladungen werden durch Magnetfelder abgelenkt, was in bestimmten Teilchenbeschleunigern (Synchrotrons) ausgenutzt wird, um Elektronen auf Kreisbahnen zu halten. Die sogenannte Lorentzkraft, die auf Ladungen wirkt, die sich in einem Magnetfeld bewegen, ist proportional zur Ladung, zur Geschwindigkeit und zur Magnetfeldstärke.

Bei einer Hall Sonde bewegen sich Elektronen in Längsrichtung durch die Platte und werden durch die Lorentzkraft quer dazu abgelenkt. Dadurch wird die Elektronendichte auf der einen Seite der Platte grösser als auf der anderen, wodurch quer zur Platte ein elektrisches Feld und damit eine Spannung zwischen gegenüberliegenden Kanten entsteht. Die Lorentzkraft wird so durch die entgegengesetzt wirkende Kraft des elektrischen Feldes aufgehoben.

Sobald sich dieses Gleichgewicht nach kurzer Zeit eingestellt hat, fließen die Elektronen geradlinig durch die Platte. Man muss nun nur noch die Stromstärke durch die Ladung und Geschwindigkeit der Elektronen sowie die Querschnittsfläche der Platte ausdrücken, um die in Abb. 1 wiedergegebenen Formeln für die Hallspannung zu erhalten.

Der Hall Koeffizient für Germanium (Halbleiter) ist rund eine Milliarde mal grösser als derjenige von Aluminium (Metall). Dies gilt ganz allgemein für alle Halbleiter und Metalle, weshalb in der Technik vorwiegend Halbleiter für Hall Sonden verwendet werden, da deren viel grössere Hallspannungen praktischer sind.

Lorentzkraft $L = e v B$ (Newton)
 $e =$ Ladung, $v =$ Geschwindigkeit der Elektronen
 $B =$ Magnetfeldstärke (Tesla)

Kraft des elektrischen Feldes $E = e U_{\text{Hall}} / b$

Stromstärke $J = e N v b d$ (Ampère)
 $N =$ Dichte der Leitungselektronen (m^{-3})

Aus $E = L$ folgt:
Hallspannung $U_{\text{Hall}} = R_{\text{Hall}} J B / d$ (Volt)
Hall Koeffizient $R_{\text{Hall}} = 1 / (e N)$ (m^3/C)
 Elektronenladung $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb (C)

Beispiele für Metall und Halbleiter:

Element	R_{Hall} (m^3/C)	N (m^{-3})
Aluminium	$-0,35 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{29}$
Germanium n-dotiert	$-0,02$	$4 \cdot 10^{20}$

© F. Gassmann

Abb. 1: Aufbau einer Hall Sonde und physikalische Zusammenhänge. Erklärungen im Text.

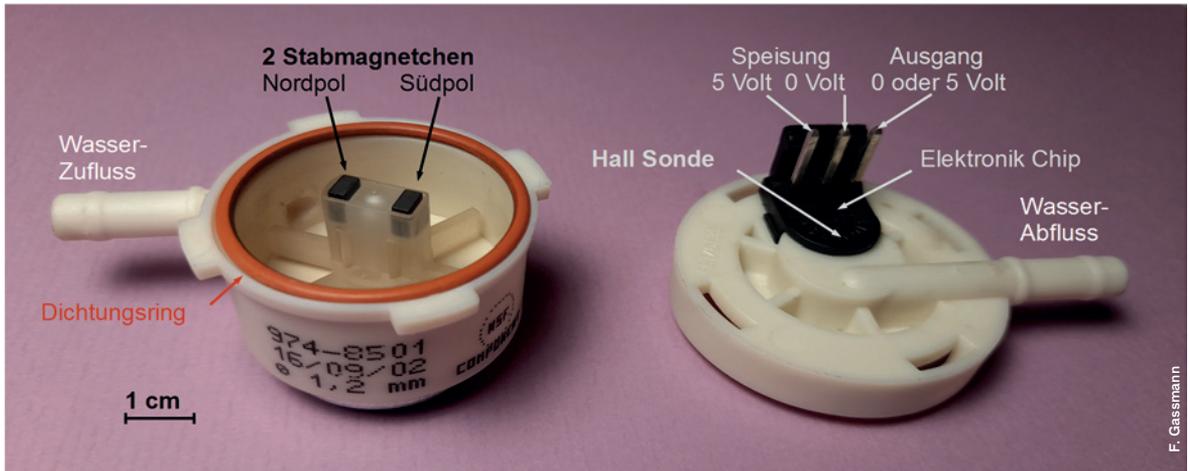


Abb. 2: Das Schaufelrad dreht sich proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Wassers. Zwei kleine umgekehrt gepolte Stabmagnetchen verursachen bei jedem Durchgang unterhalb der Hall Sonde eine abwechselnd positive und negative Hallspannung. Ein in die schwarze Komponente eingeschmolzener Elektronik Chip verstärkt die Hallspannung und legt den Ausgang auf 0 oder 5 Volt, je nachdem, ob das zuletzt gemessene Magnetfeld von einem Nordpol oder Südpol ausging. Der Steuercomputer der Kaffeemaschine zählt die Spannungswechsel und stoppt die Pumpe bei einer zuvor bestimmten Zahl.

Anwendung von Hall Sonden

In vielen Alltags- und Haushaltgeräten werden Hall Sonden für drei Einsatzgebiete verwendet. Diese werden im Folgenden je durch ein konkretes Beispiel näher vorgestellt.

1. Hall Sonden als Schalter

Mit Hall Schaltern kann die Position von Hebeln und Türen (im Auto: Pedalpositionen, Türschliesssystem, Gurtschloss, Bestimmung des Zündzeitpunktes), aber auch die Drehgeschwindigkeit von Rädern gemessen werden. Letzteres wird im ABS-System und in der automatischen Getriebe- schaltung von Autos eingesetzt, um präzise Drehgeschwindigkeiten von Rädern oder Zahnrädern in Echtzeit erfassen zu können. Ein sehr einfaches Beispiel ist die Wasser-Durchflussmessung in einer Kaffeemaschine. Um für jede Kaffeesorte und unabhängig vom Verkalkungsgrad der Maschine immer dieselbe Wassermenge in eine Tasse zu geben, wird der Wasserfluss mit Hilfe von Hall Sonden kontinuierlich gemessen (Abb. 2).

2. Hall Sonden zur Messung von Magnetfeldern

Schickt man einen bekannten konstanten Strom durch eine Hall Sonde, ist die Hallspannung proportional zur Magnetfeldstärke senkrecht zur Hallplatte. Mit drei in einem Smartphone eingebauten

Hallplatten lassen sich die drei Komponenten eines Magnetfeldes bestimmen. Die Software rechnet die Vektorkomponenten in der Geräteebene in eine entsprechende Richtungsanzeige einer Kompassnadel um (Abb. 3). Ebenfalls eingebaute Beschleunigungsmesser simulieren eine Wasserwaage, die dazu dient, das Gerät horizontal zu halten. Im Erdmagnetfeld zeigt das Gerät in der Schweiz eine Feldstärke von etwa 48 Mikrottesla (μT) als Vektorsumme der Vertikal- ($44 \mu\text{T}$) und der Horizontal- ($20 \mu\text{T}$) Komponente.

3. Hall Sonden zur Messung von Strömen

Ein mit Gleichstrom durchflossener Draht erzeugt kreisförmige Magnetfeldlinien um den Draht herum. Ein Ampère ergibt im Abstand von einem Zentimeter vom Draht eine Feldstärke von $20 \mu\text{T}$. So können mit dem Smartphone auch Stromstärken gemessen werden. Praktischer sind jedoch Stromzangen, die durch einen den Draht umschliessenden Ringkern das Erdmagnetfeld abschirmen und so etwa 0,1 bis 1000 Ampère messen können. Gegenüber der Strommessung mit einem Ampèremeter hat eine solche Stromzange den grossen Vorteil, dass der Draht für die Messung nicht entzweigeschnitten werden muss. Man braucht nicht einmal die Isolationschicht zu entfernen oder den Draht zu berühren (Abb. 4).



Abb. 3: Messung von Magnetfeldern mit dem Smartphone. Das rote Quadrat zeigt die Platzierung von drei Hall Sonden zur Messung der drei Komponenten eines Magnetfeldes. Ein kleines Stabmagnetchen zeigt, wie sich der Kompass in seinem Magnetfeld ausrichtet. Die Magnetfeldstärke wird mit 112 Mikrottesla angegeben (numerisch und roter Balken), was dem 2,3-fachen des Erdmagnetfeldes entspricht. Um die genaue Feldstärke des Stabmagnetchens beim roten Quadrat zu erhalten, müsste der Erdfeldvektor subtrahiert werden.

Der Hall Effekt in Physik und Chemie

Der Hall Koeffizient von Aluminium beträgt $-0,35 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{C}$ (C steht für Coulomb, die Masseneinheit der elektrischen Ladung), woraus die Dichte der für die Stromleitung zur Verfügung stehenden Ladungsträger zu $1,8 \times 10^{29}$ Elektronen pro Kubikmeter bestimmt werden kann.

Aluminium enthält $0,60 \times 10^{29}$ Atome pro Kubikmeter; jedes Aluminiumatom steuert also genau 3 Elektronen bei zur Leitung von elektrischem Strom. Dies bedeutet, dass Aluminium drei nur leicht gebundene Elektronen in der äussersten Energieschale hat. Tatsächlich liegt Aluminium im Periodischen System drei Plätze nach dem Edelgas Neon mit 10 Elektronen in zwei sehr stabilen abgeschlossenen Energieschalen. Bei den Leitungselektronen von Aluminium muss es sich also um drei Elektronen der dritten Energieschale handeln, die nur lose an den Atomkern gebunden sind.

Die Geschwindigkeit der Leitungselektronen in einem Aluminiumdraht wird analog zur Geschwindigkeit von Wasser in einer Leitung berechnet. Bei einer Stromstärke von 1 Ampère (entsprechend 1 Coulomb pro Sekunde) ergibt sich für eine Querschnittsfläche von 1 Quadratmillimeter eine Geschwindigkeit von 0,035 Millimetern pro Sekunde; eine Schnecke wäre wesentlich schneller! Bei sehr dünnen Hallplatten werden die Geschwindigkeiten und damit die Hallspannungen grösser. Edwin Hall hat deswegen für seine Messungen hauchdünne Goldfolien verwendet.

Überraschendes Verhalten

Die Überraschung war gross, als man bei vielen Metallen (z.B. Eisen, Zink) «verkehrte» positive Hall Koeffizienten mass und daraus folgerte, dass positive Ladungsträger dafür verantwortlich sein mussten. Da Protonen dafür nicht in Frage kamen, erkannte man, dass positiv geladene Fehlstellen mit fehlenden Elektronen sich entgegengesetzt zu den Elektronen bewegen mussten und nannte diese Fehlstellen «positive Löcher». Wenn schnelle Löcher die langsamen Elektronen punkto Hall Effekt überbieten, wird der Hall Koeffizient positiv.

Halbleiter wie Silizium und Germanium sind in reiner Form bei Raumtemperatur schlechte Leiter, weil sie nur wenige leicht bewegliche Elektronen oder Löcher zur Verfügung stellen. Durch gezielte kleine «Verunreinigungen» mit Elementen, die Elektronen abgeben (Donoren) oder aufnehmen (Akzeptoren), werden zusätzliche Elektronen oder Löcher für die Stromleitung zur Verfügung gestellt. Derart «verunreinigte» Halbleiter werden als n- oder p-dotiert bezeichnet und enthalten normalerweise etwa ein Fremdatom auf zehn Millionen Atome.

Die Hall Koeffizienten dotierter Halbleiter sind rund eine Milliarde mal grösser als bei Metallen, weil die zur Stromleitung beitragenden Dichten von Elektronen oder Löchern eine Milliarde mal kleiner sind und sich die Ladungsträger entsprechend schneller bewegen müssen. Ihre Geschwindigkeiten betragen selbst bei kleinen Strom-



Abb. 4: Stromzange zur berührungslosen Messung der Stromstärke in einem Draht.

stärken von Milliampères über 10 Meter pro Sekunde und ergeben grosse Hallspannungen von Millivolts, die einfach zu messen sind.

Grundlagen für Halbleiterelemente

Der in Zürich geborene Felix Bloch (1905-1983) studierte Physik an der ETH Zürich und schrieb 1928 bei Werner Heisenberg in Leipzig eine Dissertation *Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern*. Die später als Bloch-Zustände bezeichneten Elektronen- und Löcherwellen in Halbleiter-Kristallen bildeten die Basis für das Verständnis ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit.

Vorher war es unverständlich, dass sich Ladungsträger wie im Vakuum durch ein Kristallgitter bewegen konnten, ohne dauernd mit Gitteratomen zusammenzustossen. Daraus wurde das Bändermodell entwickelt, wonach sich Ladungsträger vom energetisch tiefer liegenden Valenzband durch thermische Fluktuationen, durch Photonen oder durch Dotierung ins höher gelegene Leitungsband befördern lassen.

Dioden ersetzen Röhrengleichrichter

In den 1930er-Jahren wurden Experimente durchgeführt, bei denen man n- und p-dotierte Halbleiter miteinander in Kontakt brachte, um die Verzerrung der Energiebänder an der Kontaktstelle (np-Übergang oder engl. np-junction) zu untersuchen. Im Zuge dieser Experimente wurden Kristalldioden erfunden, die als Gleichrichterelemente eingesetzt werden können, da sie Strom nur in einer Richtung leiten. Später wurden dann spezielle Silizium-Dioden entwickelt, die als Solarzellen (Photovoltaik), als Lampen (Leuchtdioden, LED) und für viele weitere Verwendungszwecke eingesetzt werden können.

Mit den Transistoren beginnt die Computerepoche

Verbindet man einen pn- mit einem np-Übergang auf einem einzigen Kristall, entsteht ein pnp-Element, das man mit drei Anschlüssen versehen kann. Da es sich um eine Serieschaltung von zwei entgegengesetzt gepolten Dioden handelt, von denen bei beiden Stromrichtungen die eine sperrt, sollte eigentlich nie Strom fließen.

Das Geheimnis des 1948 in den Bell Telephone Laboratories in New York erfunden Transistors liegt darin, dass die mittlere zwischen zwei p-Schichten liegende n-Schicht sehr dünn ist. Man stelle sich den Transistor als Sandwich mit einer dünnen Schinken-Schicht (sog. Basis, n-dotiert) vor, die zwischen zwei Brotschichten (sog. Emitter und Collector, beide unterschiedlich stark p-dotiert) eingeklemmt ist.

Durch Anlegen einer negativen Spannung an die Basis gegenüber dem Emitter wird die Basis-Emitter-Strecke leitend, es fließt aber nur ein sehr kleiner Strom (um 1 Milliampère), weil nur wenige Ladungsträger den Weg quer durch die Basisscheibe an den seitlichen Anschluss finden. Bis 1000 mal mehr Ladungsträger fallen direkt durch die Scheibe hindurch und erreichen den stark negativen Collector: Es fließt ein grosser Strom (um 1 Ampère) vom Emitter zum Collector, der durch den kleinen Basisstrom gesteuert wird (bei npn-Transistoren wechseln alle Spannungen das Vorzeichen). Der 1 Gigabyte Arbeitsspeicher eines heutigen Computers beherbergt gegen 20 Milliarden integrierte Transistoren.

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.

Literatur

Bloch F. 1928. *Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern*. Diss. Univ. Leipzig, Berlin. <https://dds.crl.edu/crldelivery/5762>

Hall E. H. 1879. On a New Action of the Magnet on Electric Currents. *Am. J. Mathem.* 2 (3): 287-292. http://cc.ee.ntu.edu.tw/~thlin/E_Hall_paper_1879.pdf

Koon D. W. 2000. Room temperature Hall coefficient and resistivity for selected chemical elements. <http://it.stlawu.edu/~koon/HallTable.html>