

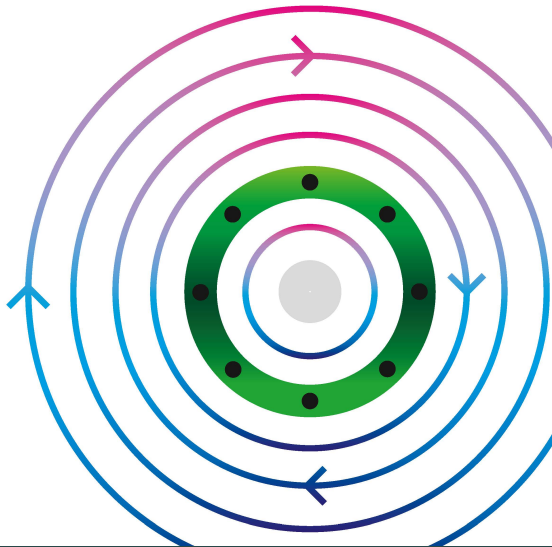


Alexander Itzke (Autor)

## **Robustes, galvanisch getrenntes, DC-fähiges Strommessprinzip auf der Basis kreisförmig angeordneter Magnetfeldsensoren**

Alexander Itzke

Robustes, galvanisch getrenntes, DC-fähiges Strommessprinzip auf der Basis kreisförmig angeordneter Magnetfeldsensoren.



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8357>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

## 1.1 Steigender Einfluss von DC-Systemen durch Wachstum der erneuerbaren Energien

Die Bundesregierung wie auch die Regierungen anderer Länder hat die unumgängliche Notwendigkeit einer Reduktion von Emissionen in der Energieerzeugung zum Schutz und Erhalt der Umwelt erkannt. Aus dieser Erkenntnis heraus hat die deutsche Regierung 2011 die Energiewende [1] initiiert. Eines der zentralen Ziele ist es dabei, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 schrittweise um 80 % bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Großteil der Energieerzeugung auf erneuerbaren Energien beruhen, was eine starke Reduktion der fossilen Brennstoffe erlaubt. Durch die gezielte Förderung von erneuerbaren Energien steigt die Bedeutung von Smart-Grids<sup>1</sup> und dezentralen Stromerzeugern. Dieser Trend zeigt sich nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Im Jahr 2017 lag der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland laut dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie bei 13,1 % [2]. Die erneuerbaren Energien unterteilen sich in die beiden Haupterzeuger Photovoltaik und Windenergie. Die Photovoltaik hatte eine installierte Leistung von 42 GW und einen Anteil von 18,3 % an den erneuerbaren Energien, die Windenergie eine installierte Leistung von 55,9 GW und einen Anteil von 48,9 % im Jahr 2017. Weltweit bestand im Jahr 2017 eine installierte Photovoltaik-Leistung von ca. 400 GW [3], wobei der Anteil neu installierter Leistung im gleichen Jahr 98 GW betrug. Ebenso zeigt eine Studie der Wind Europe [4], dass in den Jahren 2017 bis 2020 in der Windkraft eine Leistung von 50 GW an Neuinstallationen hinzukommen wird. Diese Statistiken lassen erkennen, dass Gleichstromerzeuger in den Vordergrund rücken werden und entsprechend der Bedarf an DC-Systemen zunehmen wird. Des Weiteren wird durch die dezentrale Erzeugung der Energie eine flächendeckende Messung der Leistungsflüsse immer wichtiger, damit die Energieerzeuger eine stabile Stromversorgung garantieren können. Ebenso nimmt die Speicherung von Energie einen höheren Stellenwert ein, weil Schwankungen im Energienetz, die durch die nicht stetige Erzeugung der erneuerbaren Energien entstehen, ausgeglichen werden müssen. Ein weiterer sich stark vergrößernder Markt befindet sich im Bereich der Elektromobilität. Hier lässt sich ein großes Interesse in den Bereichen der Elektroautos [5], [6], -drohnen, -flugzeuge [7] und der damit zusammenhängenden Ladeinfrastruktur erkennen. All diese Veränderungen beruhen auf DC-Systemen und benötigen zur optimalen fehlerfreien Funktion eine zuverlässige Strommessung.

---

<sup>1</sup>Intelligente Stromnetze, bei denen die Erzeugung, die Speicherung und der Verbrauch von Strom zentral gesteuert wird.

## 1.2 Erforderliche Veränderungen in der DC-Strommesstechnik

Derzeit wird der Stromfluss im industriellen DC-fähigen Bereich von ca. 100 A bis zu mehreren kA meist mit Closed-Loop-Stromwandlern gemessen. Diese weisen einen geringen Messfehler auf, besitzen jedoch schwere und sperrige Eisenkerne zur Konzentrierung des magnetischen Flusses. In dieser Arbeit wird ein neuartiges Strommessprinzip dargestellt und evaluiert, das ohne einen Eisenkern auskommt und so die damit zusammenhängenden Nachteile wie Hystereseeffekte, Fehler durch Sättigung und eine hohe Stromaufnahme zur Kompensierung des magnetischen Flusses vermeidet. Das hier dargestellte Prinzip weist einen geringen Fehlereinfluss durch Fremdfelder, keine Fehler durch Sättigung, eine geringe Stromaufnahme, eine hohe Flexibilität bei der Realisierung und ein geringes Gewicht auf. Diese und weitere Punkte führen dazu, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Strommessprinzip technisch wie ökonomisch für die eingangs genannten Anwendungen geeignet und von Vorteil ist.

## 1.3 Ziel und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein neuartiges galvanisch getrenntes Strommessprinzip, das auf der diskreten Realisierung des Ampère'schen Gesetzes basiert, darzulegen. Dafür werden im ersten Schritt die für die in dieser Arbeit behandelten Themen relevanten Grundlagen vorgestellt. Im Folgenden wird auf den Stand der Technik in der Strommesssensorik eingegangen und so das relevante Feld des hier evaluierten Strommessprinzips aufgezeigt. Der Hauptteil leitet zunächst das auf kreisförmig angeordneten Magnetfeldsensoren basierende Strommessprinzip her und geht anschließend auf die wichtigsten Fehlereinflüsse ein. Dies sind die Einflüsse auf den Strommessfehler durch ein Fremdfeld, durch die Position des Leiters und durch eine vom Rundleiter abweichende Leitergeometrie. Zu all diesen Einflüssen wurden Messungen in verschiedenen Laboraufbauten durchgeführt, welche die theoretischen Herleitungen belegen. Danach wird auf die Digitalisierung des Strommessprinzips eingegangen und eine Methode zur Bereichsumschaltung zwischen zwei verschiedenen Magnetfeldsensortechnologien dargestellt, die dazu dient, den Fehler über einen großen Strommessbereich zu reduzieren. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weitere Möglichkeiten der Strommessung mit dem hier dargestellten Strommessprinzip.

# 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die für die vorliegende Arbeit wichtigen Grundlagen knapp dargelegt. Hierzu zählen die vier Maxwell'schen Gleichungen, das Ampère'sche Gesetz als Grundlage der ersten Maxwell'schen Gleichung und das Biot-Savart-Gesetz. Des Weiteren werden die Lorentzkraft und der darauf basierende Hall-Effekt bzw. die Hall-Sonde wie auch das Fluxgate-Magnetometer erklärt.

## 2.1 Die Maxwell'schen Gleichungen

Im 19. Jahrhundert entwickelte James Clerk Maxwell<sup>1</sup> die Maxwell'schen Gleichungen [8]–[13], die zusammen mit der Lorentzkraft<sup>2</sup> (8) und der Coulomb-Kraft<sup>3</sup> die theoretische Grundlage der Elektrotechnik bilden. Die Gleichungen beschreiben das Zusammenspiel von elektrischen und magnetischen Feldern sowie deren Auswirkungen auf elektrische Ladungen. Die folgenden Gleichungen sind für den makroskopischen Bereich dargestellt und beachten die Eigenschaften von Materie in Form der Materialparameter  $\epsilon_0$  und  $\mu_0$ , die für die Permittivität und Permeabilität im Vakuum stehen.

### 2.1.1 Elektrische Ladungen als Quelle des elektrischen Feldes

Die Gleichung 2.1 beschreibt, wie in Abbildung 2.1 a dargestellt, dass die Ladung  $Q$  mit der Ladungsdichte  $\rho$  die Quelle des elektrischen Feldes ist. Mit Hilfe des Vektoroperators  $\text{div}$  lässt sich ein Skalarfeld errechnen, welches angibt, wie sehr die Vektoren in einer kleinen Umgebung auseinanderstreben (lat. *divergere*).

$$\text{div}\vec{D} = \rho \tag{2.1}$$

Alternativ kann die Gleichung mit dem Nabla-Operator dargestellt werden:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \tag{2.2}$$

Der Vektor  $\vec{D}$  ist die elektrische Flussdichte bzw. Verschiebungsdichte. Dieser Begriff wurde im 19. Jahrhundert geprägt, als noch der Äther als Eigenschaft des Raumes angenommen wurde. Heute ist bekannt, dass es keinen Äther gibt und  $\vec{D}$  über Materialeigenschaften mit der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$  zusammenhängt. Im Vakuum lässt sich  $\vec{D}$  wie folgt darstellen:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \tag{2.3}$$

---

<sup>1</sup>James Clerk Maxwell, schottischer Physiker, \*1831, †1879.

<sup>2</sup>Hendrik Antoon Lorentz, niederländischer Mathematiker und Physiker, \*1853, †1928.

<sup>3</sup>Charles Augustin de Coulomb, französischer Physiker, \*1736, †1806.

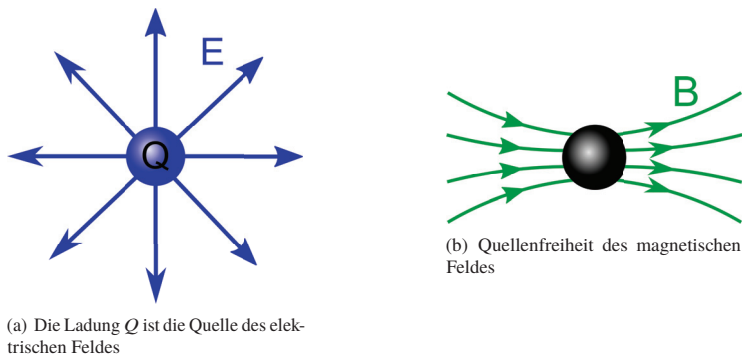


Abb. 2.1: Veranschaulichung der Maxwell'schen Gleichungen

Bei der Ausbreitung des elektrischen Feldes in Materie kommt die relative Permittivität  $\epsilon_r$  hinzu, die von der durchdrungenen Materie abhängt. Hierdurch lässt sich die Gleichung 2.3 wie folgt erweitern:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (2.4)$$

Daraufhin kann die Gleichung 2.3 in 2.1 eingesetzt werden:

$$\operatorname{div} \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \rho \quad (2.5)$$

In die integrale Form überführt, ergibt Gleichung 2.1 den Integralsatz von Gauß<sup>4</sup>, der besagt, dass der elektrische Fluss durch die geschlossene Oberfläche des Volumens direkt proportional zur elektrischen Ladung  $Q$  im Inneren des Volumens ist.

$$Q = \iiint_V \rho dV = \oiint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (2.6)$$

### 2.1.2 Quellenfreiheit des magnetischen Feldes

Die Gleichung 2.7 in differenzieller Form beschreibt, dass magnetische Feldlinien nicht von einer Quelle ausgehen, was in Abbildung 2.1 b dargestellt ist. Das magnetische Kraftfeld  $\vec{H}$  der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  ist somit frei von Quellen und kann keine magnetischen Monopole geben:

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (2.7)$$

Diese Gleichung lässt sich ebenso mit dem Nabla-Operator darstellen:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

<sup>4</sup>Johann Carl Friedrich Gauß, deutscher Mathematiker, Astronom, Geodät und Physiker, \*1777, †1855.

Mit dem Satz von Gauß in die integrale Form eines geschlossenen Hüllflächenintegrals überführt, besagt die Gleichung 2.9, dass die Anzahl der Feldlinien, die in eine geschlossene Hüllfläche eintreten, gleich der Anzahl der austretenden Feldlinien ist.

$$\oiint_A d\vec{B} = 0 \quad (2.9)$$

Mit Einbeziehung der Materialkonstanten  $\mu_0$  und  $\mu_r$ , die für die Permeabilität im Vakuum und die relative Permeabilität von Materialien stehen, lässt sich aus der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  berechnen:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \vec{B} \quad (2.10)$$

### 2.1.3 Zweite Maxwell'sche Gleichung / Induktionsgesetz

Die zweite von Maxwell veröffentlichte Gleichung 2.11 ist das Induktionsgesetz. Es besagt, dass das elektrische Feld  $\vec{E}$  an den Orten Wirbel hat, an denen sich die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  zeitlich ändert, wie in Abbildung 2.2 a dargestellt.

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.11)$$

Dargestellt mit dem Nabla-Operator, wird die Gleichung 2.11 wie folgt niedergeschrieben:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.12)$$

Durch Überführung in die integrale Form mit dem Satz von Stokes<sup>5</sup> ergibt sich die Gleichung 2.13. Der Satz von Stokes besagt mit Blick auf die zweite Maxwell'sche Gleichung, dass die elektrische Zirkulation über die geschlossene Randkurve mit der Kontur  $C$ , welche die Fläche  $A$  aufspannt, gleich der negativen zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses  $\vec{B}$  durch die Fläche  $A$  ist.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \iint_A \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{A} \quad (2.13)$$

### 2.1.4 Erste Maxwell'sche Gleichung / Durchflutungsgesetz

Die erste Maxwell'sche Gleichung ist die Erweiterung des Ampère'schen<sup>6</sup> Gesetzes oder auch Durchflutungsgesetzes um den Verschiebungsstrom  $\vec{j}_v$  bzw. die Verschiebungsstromdichte  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ . Es bildet für den Magnetismus die Analogie zum Induktionsgesetz. Die Gleichung besagt, dass die Wirbel des Magnetfeldes  $\vec{H}$  von der Stromdichte  $\vec{j}$  und der Verschiebungsstromdichte  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  abhängen. Eine grafische Veranschaulichung ist in Abbildung 2.2 b zu sehen. Die differenzielle Form ergibt sich wie folgt:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.14)$$

<sup>5</sup>George Gabriel Stokes, irischer Mathematiker und Physiker, \*1819, †1903.

<sup>6</sup>André-Marie Ampère, französischer Physiker und Mathematiker, \*1775, †1836.

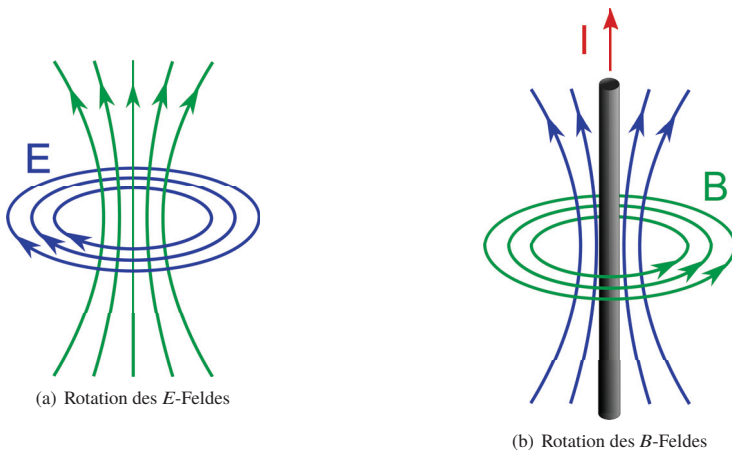


Abb. 2.2: Veranschaulichung der ersten und der zweiten Maxwell'schen Gleichung

Dargestellt mit dem Nabla-Operator ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Durch die Überführung mit dem Satz von Stokes in die integrale Form ist die Gleichung folgendermaßen darstellbar:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A \vec{j} \cdot d\vec{A} + \iint_A \frac{d\vec{D}}{dt} \cdot d\vec{A} \quad (2.16)$$

Die Gleichung 2.16 besagt, dass die magnetische Zirkulation über die geschlossene Randkurve mit der Kontur  $C$ , welche die Fläche  $A$  aufspannt, gleich der Summe aus dem Leitungsstrom  $\vec{j}$  und der zeitlichen Änderung des elektrischen Flusses  $\frac{d\vec{D}}{dt}$  durch die Fläche  $A$  ist.

## 2.2 Ampère'sches Gesetz

Die erste Maxwell'sche Gleichung ist die Erweiterung des Ampère'schen Gesetzes [12], [14], das auch Durchflutungsgesetz genannt wird. Es besagt, dass die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  entlang des geschlossenen Kurvenintegrals mit der Kontur  $C$  gleich dem gesamten Strom  $I$  ist, der durch die von der Kontur aufgespannte Fläche  $A$  fließt. Die integrale Form lautet wie folgt:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{s} = I \quad (2.17)$$

Durch Hinzufügen der Materialkonstanten  $\mu_0$  und  $\mu_r$  lässt sich die Gleichung mit der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  darstellen:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \mu_r I \quad (2.18)$$

Analog dazu ist im Folgenden die differenzielle Form für die magnetische Flussdichte 2.19 und die magnetische Feldstärke 2.20 abgebildet:

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{j} \quad (2.19)$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \quad (2.20)$$

Bezogen auf einen Leiter kann die *Korkenzieherregel* oder auch *Rechte-Hand-Regel* angewandt werden, um die Drehrichtung des magnetischen Flusses zu bestimmen. Sie besagt, dass dann, wenn der Daumen der rechten Hand in die Richtung des technischen Stromflusses zeigt, sich die Richtung des magnetischen Flusses durch die gekrümmten Finger ergibt. In Abbildung 2.3 sind das Ampère'sche Gesetz und die damit zusammenhängende Drehrichtung des magnetischen Flusses dargestellt. Hierbei ist der magnetische Fluss bzw. das Magnetfeld proportional zur Stromstärke in dem stromdurchflossenen Leiter. Um komplexere Feldverteilungen an bestimmten Punkten im Raum unter vorhandenen Kenntnissen der räumlichen Stromverteilung zu bestimmen, reicht das Ampère'sche Gesetz nicht aus. Hierzu kann das Biot-Savart-Gesetz angewandt werden.

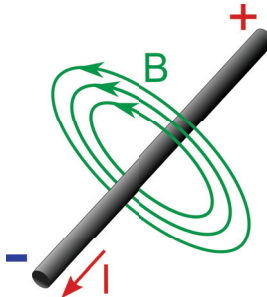


Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Ampère'schen Gesetzes

## 2.3 Biot-Savart-Gesetz

Das Biot-Savart-Gesetz [9] wurde 1820 von den beiden französischen Mathematikern Jean-Baptiste Biot<sup>7</sup> und Félix Savart<sup>8</sup> aufgestellt. Es gibt je nach Formulierung die magnetische Feldstärke  $\vec{H}$  oder die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  an, die an einem Punkt  $P$  im Raum durch den in einer Leiterschleife mit der Kontur  $C$  fließenden Strom  $I$  erzeugt wird. In Gleichung 2.21 ist das Biot-Savart-Gesetz dargestellt.

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{I}{4\pi} \oint_C \frac{d\vec{s} \times (\vec{r} - \vec{r}_C)}{|\vec{r} - \vec{r}_C|^3} \quad (2.21)$$

Eine Veranschaulichung des Biot-Savart-Gesetzes ist in Abbildung 2.4 zu sehen.

<sup>7</sup>Jean-Baptiste Biot, französischer Physiker und Mathematiker, \*1774, †1862.

<sup>8</sup>Félix Savart, französischer Arzt und Physiker, \*1791, †1841.



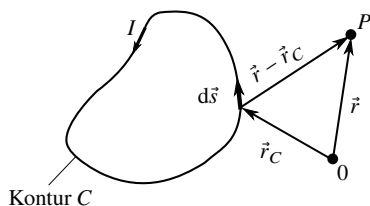


Abb. 2.4: Darstellung des Biot-Savart-Gesetzes

## 2.4 Lorentzkraft und Coulombkraft

In der älteren Literatur wird zwischen der Lorentzkraft  $\vec{F}_L$ , welche die Kraftwirkung von magnetischen Feldern auf bewegte Ladungen darstellt, und der Coulomb-Kraft  $\vec{F}_C$ , welche die Wirkung von elektrischen Feldern auf bewegte oder unbewegte Ladungen beschreibt, unterschieden. In der heutigen Literatur werden die Kräfte meist als magnetische Komponente  $\vec{F}_B$  bzw. elektrische Komponente  $\vec{F}_E$  zusammengefasst und dann als Lorentzkraft  $\vec{F}$  oder auch Lorentzkraft im erweiterten Sinne verstanden [12], [13].

$$\vec{F} = \vec{F}_B + \vec{F}_E \quad (2.22)$$

Die Lorentzkraft beschreibt die Kraftwirkung, die eine sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  in einem Magnetfeld bewegende Ladung  $Q$  erfährt. Hierbei ergeben die Geschwindigkeit  $\vec{v}$ , die Lorentzkraft  $\vec{F}$  und die aus dem Magnetfeld resultierende magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  ein Rechtssystem, das bei negativen Ladungsträgern als *Linke-Hand-Regel* und bei positiven Ladungsträgern als *Rechte-Hand-Regel* bezeichnet wird und in Abbildung 2.5 dargestellt ist:

$$\vec{F}_L = Q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.23)$$

Das Coulomb-Gesetz 2.24 beschreibt die Kraft zwischen zwei elektrischen Ladungen, die Punktladungen oder kugelsymmetrisch verteilte Ladungen sein können. Diese Kraft wird als Coulombkraft bezeichnet.

$$\vec{F}_C = Q\vec{E} \quad (2.24)$$

Somit lässt sich die Lorentzkraft 2.25 durch eine elektrische Komponente und eine magnetische Komponente darstellen:

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.25)$$

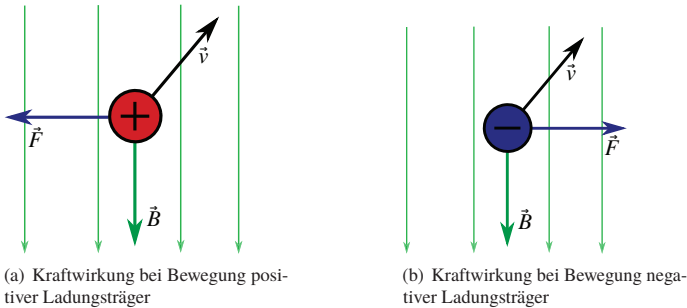


Abb. 2.5: Veranschaulichung der Lorentzkraft bei bewegten Ladungsträgern. Der Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}$  bewegt sich senkrecht in die Ebene hinein und ist zur Veranschaulichung diagonal dargestellt.

## 2.5 Hall-Effekt

Die magnetische Flussdichte  $\vec{B}$  kann mithilfe einer Hall-Sonde<sup>9</sup> [9] gemessen werden, die den später nach dem Erfinder benannten Hall-Effekt ausnutzt [15]. Der Hall-Effekt besagt, dass dann, wenn ein ausgedehnter stromdurchflossener Leiter senkrecht zur Plattenebene des Leiters von einem magnetischen Fluss  $\vec{B}$  durchdrungen wird, an den senkrecht zur Strom- und Feldrichtung liegenden Flächen die Hall-Spannung  $U_H$  entsteht. Diese Spannung ergibt sich durch die Lorentzkraft, die eine Kraft auf die Elektronen im Leiter ausübt. Der ausgedehnte Leiter besitzt die Dicke  $d$ , die Breite  $b$  und die Länge  $l$ . Abbildung 2.6 gibt eine schematische Darstellung der Hall-Sonde wieder. Gleichung 2.26 zeigt den Zusammenhang mit der Bestimmung des magnetischen Flusses und beinhaltet die spezifische Hall-Konstante  $R_H$ , die von dem verwendeten Leitermaterial abhängig ist.

$$|B| = \frac{U_H}{R_H l} d \quad (2.26)$$

Die Hall-Konstante berechnet sich hierbei aus der Leitfähigkeit  $\sigma$  und der Hall-Beweglichkeit  $\mu_H$ :

$$|R_H| = \frac{\mu_H}{\sigma} \quad (2.27)$$

Das Vorzeichen der Hall-Konstanten hängt hierbei davon ab, ob es sich bei dem verwendeten Material um eine Elektronenleitung (-) oder eine Löcherleitung (+) handelt. Tragen beide Ladungsträgersorten (Elektronen und Löcher) zur elektrischen Leitung bei, so wie es bei Halbleitern der Fall sein kann, spricht man von einem Zweiband-Modell und die Gleichung 2.27 erweitert sich wie folgt:

$$|R_H| = \frac{1}{e} \frac{p\mu_h^2 - n\mu_e^2}{(p\mu_h + n\mu_e)^2} \quad (2.28)$$

<sup>9</sup>Edwin Herbert Hall, US-amerikanischer Physiker, \*1855, †1938.

Die Gleichung 2.28 zeigt, dass die Hall-Konstante beim Zweiband-Modell von der Beweglichkeit  $\mu_h$  und der Ladungsträgerdichte  $p$  der Löcher sowie von der Beweglichkeit  $\mu_e$  und Ladungsträgerdichte  $n$  der Elektronen und der Elementarladung abhängt. Hall-Elemente können mit vielen verschiedenen Materialien aufgebaut werden, wobei eine hohe Leitfähigkeit und die minimale Höhe des Materials für eine hohe Qualität des Hall-Elements ausschlaggebend sind. Konventionelle Hall-Elemente werden heutzutage meist aus Metallen wie Gallium oder Indium hergestellt, die auf Halbleitermaterialien wie Silizium, Arsen oder Antimon aufgebracht werden [16]–[18]. Neue Forschungen zeigen Hall-Elemente, bei denen die Metallkomponente durch Graphen, das eine hohe Leitfähigkeit aufweist, ausgetauscht und auf Silizium aufgebracht wird [19], [20].

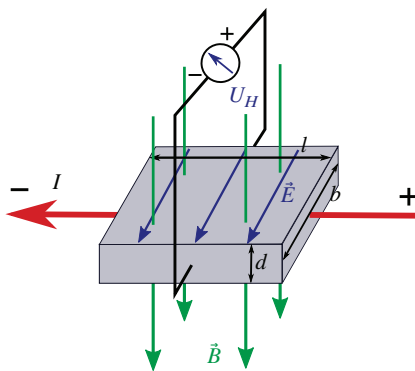


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Hall-Sonde bzw. des Hall-Effektes bei elektronenleitfähigem Material

## 2.6 Fluxgate-Magnetometer

Das Fluxgate-Magnetometer (*englisch: fluxgate*), auch als Förster-Sonde nach ihrem Erfinder Friedrich Förster<sup>10</sup> benannt, ist eine Sonde zur Messung eines vektoriellen Magnetfeldes [21]. Ihr Funktionsprinzip basiert auf der Magnetisierung von zwei sich parallel gegenüberliegenden weichmetallischen Stäben und der nichtlinearen Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke  $\vec{H}$  von der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$ . Die Stäbe sind von jeweils einer Erregerspule  $E_{AC}$  umwickelt, die entgegengesetzte Wicklungsrichtungen aufweist. An die Erregerspule ist ein Wechselstromsignal angelegt, das die beiden weichmetallischen Stäbe gleichzeitig in entgegengesetzte Sättigung treibt. An der Sekundärwicklung  $S$ , die im gleichen Wickelsinn um die beide Stäbe gewickelt ist, lässt sich nun das Gesamtfeld der Stäbe messen. Es beträgt ohne Fremdfeld null, da es sich durch die entgegengesetzte Magnetisierung der beiden Stäbe aufhebt. Wirkt nun ein äußeres Magnetfeld mit der passenden Orientierung auf diese Anordnung ein, so verzögert und beschleunigt sich die Sättigung des entsprechenden Stabes, und es lässt sich

<sup>10</sup>Friedrich Förster, deutscher Physiker, \*1908, †1999.