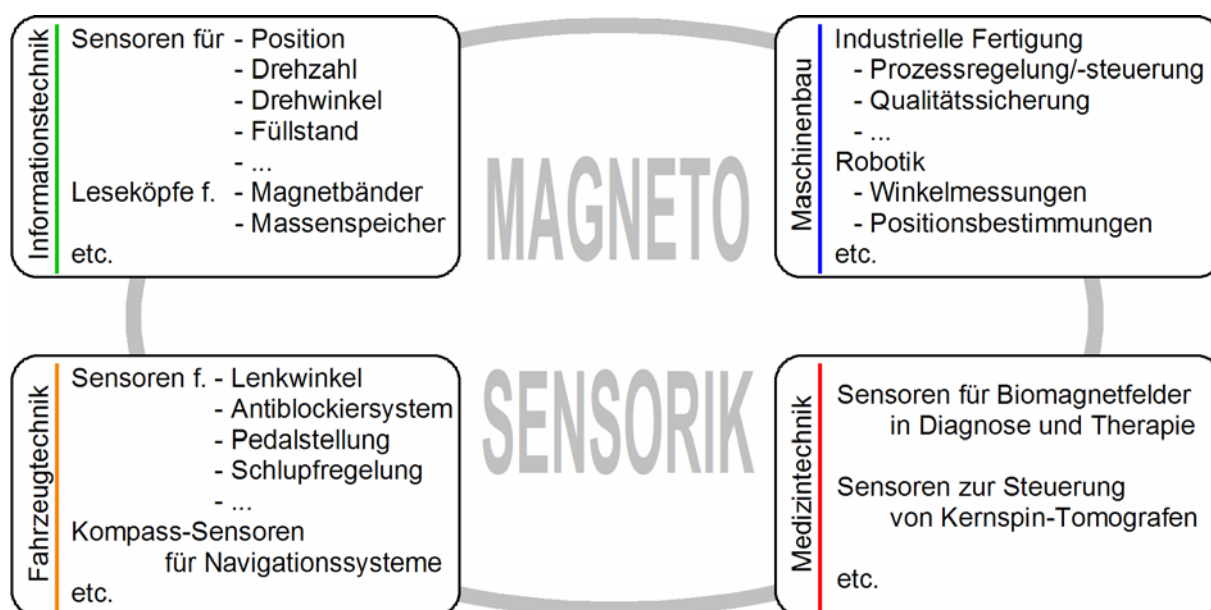


# 1 Einleitung

## 1.1 Anwendungsbereiche der Magnetosensorik

Forschung und Entwicklung in allen Bereichen der Natur- und Ingenieurwissenschaften haben gerade in den vergangenen Jahrzehnten aufgrund der sich rasant entwickelnden Computertechnologie zu einem enormen technischen Fortschritt im Vergleich zu früheren Jahrzehnten oder gar Jahrhunderten geführt. Eine Bilanzierung, ob diese Entwicklung einen positiven oder vielleicht eher einen negativen Charakter hat, ist allgemeingültig nicht möglich und muss dem Einzelnen bzw. der Politik überlassen werden. Das Ergebnis dieser Entwicklung steht andererseits jedoch fest: Es existiert eine unüberschaubare Zahl an technischen Systemen auf einem fiktiven globalen Markt. Das gemeinsame theoretische Ziel all dieser Systeme ist es, die Arbeit des Menschen zu erleichtern, zu optimieren, zu beschleunigen oder aber vollständig zu übernehmen. So ist es heutzutage selbstverständlich, dass viele Handlungsabläufe, vor allem in Dienstleistungs- und industriellen Fertigungsprozessen, statt von Menschenhand nur noch von elektronisch gesteuerten Maschinen durchgeführt, überwacht und/oder gesteuert bzw. geregelt werden. Um hier kontrollierte Ergebnisse in akzeptablen Toleranzbereichen zu erhalten, ist ein Kommunikationskanal zwischen Objekt und Maschine unbedingt notwendig. Diese so genannte Schnittstelle wird größtenteils von Sensoren gebildet, welche die zu überwachende physikalische Größe des Messobjekts möglichst unmittelbar am Ort ihres Auftretens messen und direkt oder indirekt in elektrische Signale umwandeln. Diese Signale können dann von der Steuereinheit der technischen Maschine ausgewertet und weiterverarbeitet werden. Das Wirkprinzip der Sensoren ist bei jeder Anwendung von den individuellen Umgebungsbedingungen am Ort des Messobjekts, von der Messgröße selbst und/oder von etwaigen Randbedingungen abhängig.

Aufgrund der Vielfalt der möglichen Anwendungen und der damit verbundenen Randbedingungen können zahlreiche Sensortechnologien unterschieden werden. Eine kleine, jedoch bedeutende Gruppe stellen hier die Sensoren auf Basis magnetisch hervorgerufener Effekte dar – die so genannten *Magnetfeldsensoren* oder auch *Magnetosensoren*. Sie finden heutzutage in der Praxis in den verschiedensten Einsatzbereichen Anwendung. Eine Übersicht der Hauptanwendungsgebiete der Magnetosensorik mit typischen Praxisbeispielen gibt Bild 1.1 [LEM-98, TRE-01].



**Bild 1.1:** Hauptanwendungsgebiete der Magnetosensorik

Die Darstellung der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten in Bild 1.1 lässt vermuten, dass die Magnetosensorik einen großen Marktanteil im Bereich der Sensorik innehat. Jedoch das Gegenteil ist in weiten Teilen der Anwendungsgebiete der Fall. Messwertgeber auf Basis anderer physikalischer Prinzipien werden vielfach vorgezogen, auch wenn das Prinzip oftmals nicht funktionsentscheidend für die Anwendung ist. In diesen Fällen spielen sehr häufig die anwendungstechnisch eigentlich sekundären Faktoren wie Preis, Know-how des Entwicklers oder die Zeit bis zur Verfügbarkeit der Komplettlösung die entscheidende Rolle. So stellt die Magnetosensorik im Augenblick doch eher eine Randgruppe in der Sensortechnik dar.

Doch eine Trendwende zeichnet sich ab: Nach und nach werden immer mehr elektromechanische Messwertgeber durch robustere Systeme – beispielsweise aus der Mikromechanik – abgelöst. Auch wird erkannt, dass gerade berührungslose Sensorprinzipien für die Bereiche der Systeminstallation und -wartung eine Möglichkeit zur Kostenreduktion eröffnen [GER-01]. Hier bietet sich neben optischen und faseroptischen Sensorsystemen selbstverständlich auch die Magnetosensorik an. Natürlich besitzt die Magnetosensorik hier Nachteile, vor allem in Einsatzumgebungen, in denen starke äußere magnetische Felder auftreten. Jedoch ist der Anteil solcher Applikationen eher als gering einzustufen. Somit verbleibt eine große Zahl potenzieller Anwendungen, bei denen die Eigenschaften der Magnetfeldsensoren vorteilhaft sind.

Dies sind vorwiegend

- die Möglichkeit zur einfachen Konstruktion eines preisgünstigen Sensorsystems aus handelsüblichen Komponenten,
- die Unempfindlichkeit gegenüber nicht-magnetisierbarem Schmutz,
- die Fähigkeit, auch ohne Berührung oder Sichtverbindung exakte Messergebnisse zu liefern,
- die geringe Leistungsaufnahme bei hoher Lebensdauer sowie
- die hohe mechanische und magnetische Stabilität.

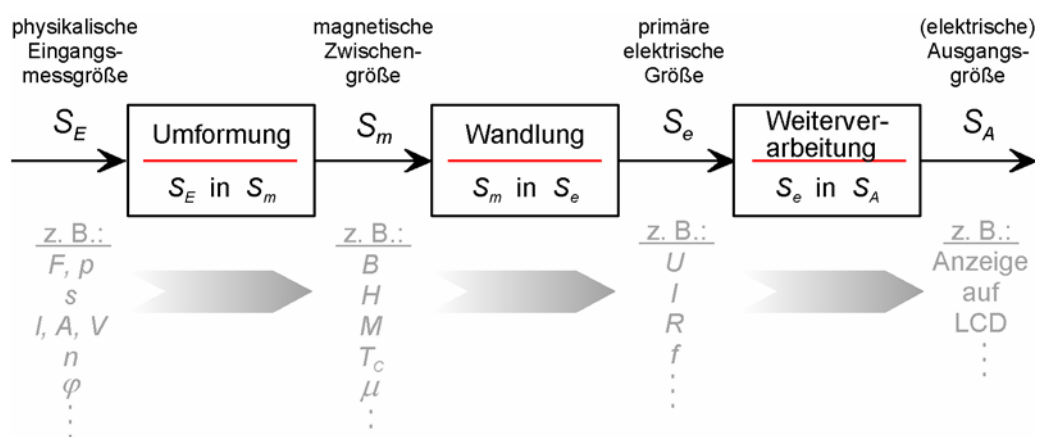
Magnetfeldsensoren eignen sich nicht nur zur direkten Messung magnetischer Feldgrößen, sondern ermöglichen durch ihren hohen Entwicklungsstand hochpräzise Messungen einer Vielzahl abgeleiteter physikalischer Größen; siehe Kapitel 1.2.

Gelingt es also, die oben genannten Vorteile auch für grundsätzlich geeignete Anwendungen, welche bislang von Sensoren auf der Basis anderer Prinzipien dominiert werden, auszunutzen und durch zusätzliche, applikationsspezifische Alleinstellungsmerkmale interessant zu machen, so könnte die Magnetosensorik den Status einer Randgruppe der Sensortechnik endgültig ablegen.

## 1.2 Messen mit Magnetfeldsensoren

Ein Sensor ist ein Wandlerelement zwischen einem überwiegend unbekanntem Wert einer Messgröße und einem für diesen Wert repräsentativen elektrischen Signal, welches zur Auswertung der Messgröße in technischen Systemen benötigt wird. Zur Charakterisierung eines Sensors ist es darüber hinaus aber unbedeutend, ob die magnetische Messgröße selbst den auszuwertenden Parameter eines Messobjekts darstellt, oder ob diese lediglich als Folge eines weiteren physikalischen oder chemischen Effektes von der eigentlich interessierenden Objekteigenschaft moduliert wird.

Magnetfeldsensoren reagieren auf eine magnetische Wechselwirkung bzw. rufen eine solche hervor. Bild 1.2 verdeutlicht die Funktionsweise magnetischer Sensorsysteme anhand einer mehrstufigen Wandlung einer beliebigen zu messenden physikalischen Eingangsgröße  $S_E$  über eine Umformung in eine magnetische Zwischengröße  $S_m$  und deren anschließende Wandlung als zentrale Operation über verschiedene physikalische Effekte in eine weiter verarbeitbare elektrische Größe  $S_e$ .



**Bild 1.2:** Mehrstufige Wandlung einer Messgröße  $S_E$  über eine magnetische Zwischengröße  $S_m$  in eine elektrische Größe  $S_e$

$F$  – Kraft;  $p$  – Druck;  $s$  – Weg;  $l$  – Länge;  $A$  – Fläche;  $V$  – Volumen;  $n$  – Drehzahl;  $\varphi$  – Winkel;  $T$  – Temperatur;  $B$  – magnetische Induktion;  $H$  – magn. Feldstärke;  $M$  – Magnetisierung;  $\mu$  – Permeabilitätszahl;  $T_C$  – Curie-Temperatur;  $U$  – elektrische Spannung;  $I$  – elektrischer Strom;  $R$  – elektrischer Widerstand;  $f$  – Frequenz

Die *Umformungskomponente*  $S_E \rightarrow S_m$  bietet die Möglichkeit, spezifische Strukturvarianten der Komponenten des Wandlerelements zu konstruieren, welche typische und neuartige Sensorsysteme ermöglichen.

Die zentrale *Wandlungskomponente*  $S_m \rightarrow S_e$  erlaubt den Einsatz verschiedener magnetischer Effekte für eine anwendungsspezifische Messtechnik.

Die *Weiterverarbeitung*  $S_e \rightarrow S_A$  wird im Allgemeinen eine Signalverstärkung, eine Analog/Digital-Wandlung und einen Mikroprozessor zur Auswertung und Aufbereitung der Messdaten enthalten.

Physikalische oder chemische Effekte in der zentralen Komponente des Sensorsystems, dem Sensorelement (Wandlerelement), hervorgerufen durch die magnetische Messgröße, verändern die elektrischen Eigenschaften und somit das elektrische Verhalten des Sensors. Diese Wandlung als Folge des auftretenden Effekts geschieht definiert und ist reproduzierbar. Das elektrische Ausgangssignal ermöglicht dann eine im Rahmen der Messgenauigkeit mehr oder weniger exakte Aussage über die Messgröße und damit über die zu analysierende Eigenschaft eines Messobjekts.

Effekte als Folge des Auftretens einer magnetischen Größe sind zahlreich bekannt [SCH-84], jedoch führen nur wenige zu einer Veränderung des elektrischen Verhaltens technischer Materialien oder Bauelemente. Diese Effekte definieren die zugrunde liegenden Prinzipien der Sensoren.

Die nach heutigem Stand der Technik wichtigsten physikalischen Effekte für Magnetfeldsensoren sind nachfolgend kurz zusammengestellt. Die gewählte Klassenbildung ist hier von einer Gruppierung ähnlicher physikalischer bzw. chemischer Effekte abgeleitet.

Andere Methoden der Klassifizierung, beispielsweise nach

- dem Sensortyp,
- dem physikalischen oder chemischen Einzeleffekt,
- dem zu messenden Parameter des Messobjekts,
- der Sensorapplikation oder
- der Technologie

sind ebenso denkbar, z. B. in [BOL-89].

*Induktive Sensoren* beruhen auf der Nutzung der magnetischen Induktion, beschrieben durch das Induktionsgesetz

$$U_{ind} = - \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

mit der induzierten Spannung  $U_{ind}$ , dem zeitabhängigen magnetischen Fluss  $\Phi(t)$  und der Zeit  $t$ . Derartige Sensoren sind nur bei Messvorgängen mit zeitlichen oder örtlichen Änderungen der Messgröße einsetzbar. Zu den induktiven Sensoren zählen Induktionsspulen, Differenzialtransformatoren bzw. *LVDTs* (**L**inear **V**ariable **D**ifferenzial **T**ransformer), Differenzialdrosseln oder binäre Schaltsensoren.

*Magnetomechanische Sensoren* lassen sich in magnetoelastische und magnetostruktive Sensoren unterteilen. *Magnetoelastische Sensoren* basieren auf dem  $\Delta E$ -Effekt ( $E$  – Elastizitätsmodul), der die Elastizitätsänderung ferri- bzw. ferromagnetischer Materialien infolge einer Magnetisierung beschreibt. *Magnetostruktive Sensoren* beruhen auf dem 1842 von J. P. JOULE entdeckten Zusammenhang zwischen der Änderung der Körpergeometrie und der Änderung der Magnetisierung (JOULE-Effekt). Spezielle magnetostruktive Effekte stellen u. a. die im Jahre 1858 von G. WIEDEMANN entdeckte Torsion ferromagnetischer Stäbe unter dem Einfluss eines zirkular orientierten Magnetfeldes oder die 1865 von E. VILLARI erkannte Permeabilitätsänderung durch elastische Ausdehnung ferromagnetischer Materialien dar [SCH-84].

*Galvanomagnetische Sensoren* basieren auf den verschiedenen galvanomagnetischen Effekten, die in einem von elektrischem Strom durchflossenen Leiter oder Halbleiter beim Zusammenwirken mit einem homogenen Magnetfeld entstehen. Es lassen sich longitudinale und transversale Effekte unterscheiden. Einzelheiten finden sich in Kapitel 2.1.1. Zu den galvanomagnetischen Sensoren auf Halbleiterbasis zählen die HALL-Elemente und die Feldplatten; siehe Kapitel 2.1.2.

Die *Magneto-resistiven Sensoren* beruhen auf Widerstandseffekten in stromdurchflossenen ferromagnetischen Leitern und könnten somit ebenfalls zur Gruppe der galvanomagnetischen Sensoren gezählt werden. Der Unterschied besteht jedoch in der Ursache der elektrischen Widerstandsänderung. Während diese bei den galvanomagnetischen Sensoren durch die LORENTZ-Kraft hervorgerufen wird, ist sie im Falle magneto-resistiver Sensoren auf quantenmechanische Effekte zurückzuführen.

Bereits 1857 entdeckte W. THOMSON, bekannt als Lord KELVIN, den **Anisotropen MagnetoResistiven Effekt (AMR-Effekt)**. Er beschreibt die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes  $R$  einer einzigen magnetfeldempfindlichen Schicht vom Winkel  $\vartheta_{SM}$  zwischen den Vektoren der elektrischen Stromdichte  $\vec{S}$  und der Magnetisierung  $\vec{M}$ , welche sich infolge eines äußeren Magnetfeldes  $\vec{H}$  in der Schichtebene einstellt. Unter Magnetfeldeinfluss sind Widerstandsänderungen bis zu  $\Delta R/R_0 = 4\%$  möglich. Geeignete Materialien zur Ausnutzung des AMR-Effektes sind die unter dem Namen Permalloy bekannten Nickel-Eisen-Legierungen. Erst 1988 entdeckte P. GRÜNBERG den als **GMR-Effekt (Giant MagnetoResistive Effect)** bekannten Riesenmagnetowiderstands-Effekt, der die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Kopplung der Magnetisierungsrichtungen benachbarter ferromagnetischer Schichten mit einer unmagnetischen Zwischenschicht beschreibt. Für die Realisierung von GMR-Sensoren eignen sich vorzugsweise Eisen-Chrom-Konstellationen, die bei einer höheren Schichtanzahl der Sandwich-Strukturen große Widerstandsänderungen im Bereich von  $\Delta R/R_0 \geq 70\%$  bei Raumtemperatur ermöglichen. Der GMR-Effekt setzt jedoch zum einen hohe Magnetfeldstärken voraus und tritt zum anderen nur in Schichten auf, deren Dicke klein gegenüber der mittleren freien Weglänge der Ladungsträger  $\lambda$  ist. Weiterführende Erläuterungen zum GMR-Effekt finden sich in der Fachliteratur, z. B. in [DIB-89, DIE-01, GIN-99, GRA-91, INF-01, SCH-84].

*Flussquantisierende Sensoren* beruhen entweder auf dem gleichnamigen Effekt oder auf dem 1962 nach seinem Entdecker benannten JOSEPHSON-Effekt. Beide Effekte kommen ausschließlich in Supraleitern vor und beschreiben das Auftreten eines Tunnel-Stromes infolge magnetischer Felder in diesen Materialien. Die Sensoren, so genannte *SQUIDS* (**S**uperconducting **Q**Uantum **I**nterference **D**evice**S**), sind die derzeit empfindlichsten Magnetfeldsensoren und eignen sich zur Messung kleinster magnetischer Flussdichten bis in den Femto-Tesla-Bereich ( $B \approx 10^{-12} T$ ). Allerdings sind SQUIDS nur bei sehr niedrigen Temperaturen von wenigen Kelvin einsetzbar und verursachen daher hohe Kosten infolge der für die Supraleitung notwendigen Kühlverfahren; weitergehende Informationen z. B. in [GIN-99, ROU-94, SCH-01].

*Magnetooptische Sensoren* beruhen auf verschiedenen Effekten, welche die Drehung der optischen Polarisationssebene (z. B. FARADAY-Effekt 1845, KUNDT-Effekt 1884, HANLE-Effekt 1925), die Änderung der optischen Brechzahl (z. B. VOIGT-Effekt 1898, MAJORANA-Effekt 1902) oder eine Spektrallinienaufspaltung (z. B. ZEEMAN-Effekt 1896) infolge eines Magnetfeldes beschreiben. Es werden transversale und longitudinale Effekte unterschieden. Sehr bekannt ist der magnetooptische KERR-Effekt, der 1876 von J. KERR entdeckt wurde. Dieser Effekt beschreibt die Polarisationsänderung von Licht, welches an magnetisierten ferromagnetischen Spiegeln reflektiert wird. Licht ist somit zur Untersuchung des Magnetisierungszustandes von Metalloberflächen geeignet. Magnetooptische Effekte lassen sich sowohl bei Licht als auch bei Mikrowellen beobachten [SCH-84].

In der Praxis spielen ferner Impulsdraht- und Wiegandsensoren – vornehmlich als magnetisch betätigte Schalter – eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Diese Sensoren lassen sich nicht einer der genannten Klassen zuordnen. Sie basieren auf einem schnellen Ummagnetisierungseffekt, dem 1919 entdeckten BARKHAUSEN-Effekt. Die magnetischen Domänen (Weiß'sche Bezirke) des ferromagnetischen Sensormaterials folgen nicht stetig einem anwachsenden externen Magnetfeld, sondern klappen gleichzeitig sprunghaft in dessen Richtung um.

Trotz der heutigen Konzentration des Marktes der Magnetosensorik auf die Sparte der magneto-resistiven Sensoren sollen in dieser Arbeit ausschließlich Sensoren der „klassischen“ galvanomagnetischen Effekte, also Hall-Sensoren und Feldplatten, für

eine Informationscodierung durch strukturierte Sensorsystem-Komponenten eingesetzt werden. Die Begründung hierfür ist vielfältig:

Den Hauptausschlag bei der Wahl der Sensoren liefert die Art der Anwendungen. Bei den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensorsystemen zur magnetischen Erfassung einer durch Strukturvariation codierten Information ist überwiegend die resultierende Amplitude einer magnetischen Feldkomponente bzw. deren Änderung an der Sensorposition zu messen. Hall-Sensoren und Feldplatten sind hierzu besonders geeignet, während die Sensoren auf Basis magnetoresistiver Effekte nur eine zuverlässige Auswertung der Richtung des magnetischen Feldes erlauben.

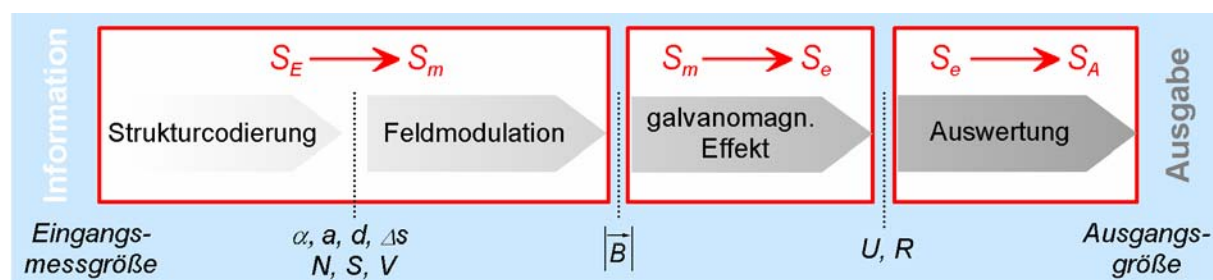
Weitere Aspekte für die Verwendung von Hall-Sensoren und Feldplatten gegenüber beispielsweise den verschiedenen magnetoresistiven Sensoren (*XMR*-Sensoren) sind gerade für den Fall der Hall-Sensoren zum einen die einfachere Verfügbarkeit der Sensorelemente, zum anderen deren deutlich geringerer Preis. Gerade dem Kostenaspekt kommt im Hinblick auf die Konkurrenzfähigkeit zu existierenden Sensorsystemen nach anderen physikalischen Prinzipien eine besondere Bedeutung neben den bekannten Vorteilen und anwendungsspezifischen Alleinstellungsmerkmalen zu.

### **1.3 Arbeitsvorhaben**

Diese Arbeit konzentriert sich auf die kleine Gruppe der auf den „klassischen“ galvanomagnetischen Effekten basierenden Sensoren und deren enormes Anwendungspotenzial für neuartige Sensorsystem-Entwicklungen mit permanentmagnetischer Felderzeugung.

Ausgehend von einem definierten Sensor-Grundsystem, bestehend aus einem Permanentmagneten, einem Sensorelement sowie gegebenenfalls einem magnetisch leitenden Bezugselement, sollen Systemanwendungen aufgezeigt werden, die sich aus einer systematischen Variation der Systemparameter ergeben. Hierbei wird konkret untersucht, wie neben den magnetischen Eigenschaften, der Anzahl oder der relativen Position der einzelnen Systemkomponenten zueinander auch die geometrische Struktur dieser Elemente prinzipiell als Informationsträger genutzt werden kann. Bild 1.3 stellt dies in Bezug auf Bild 1.2 in abstrakter Form dar.





**Bild 1.3:** Prinzipien der zu entwickelnden Sensorsysteme

$\alpha$  – Winkel;  $a$  – Abstand;  $d$  – Dicke;  $\Delta s$  – Wegänderung;  $N$  – Anzahl;  $S$  – Stelle;  $V$  – Volumen;  
 $B$  – magnetische Induktion;  $U$  – elektrische Spannung;  $R$  – elektrischer Widerstand

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung galvanomagnetischer Sensorsysteme, welche die magnetische Erfassung verschiedener, anwendungsspezifischer Informationen über eine Codierung durch Strukturvariation der Sensorsystem-Komponenten ermöglichen. Derartige Sensorsysteme sind für spezielle Praxisanwendungen, die eine direkte magnetische Erfassung der Messgröße nicht gestatten, außerordentlich gut geeignet. Ein besonderes Augenmerk wird bei der Entwicklung auf die Verwendung handelsüblicher und preisgünstiger Systemkomponenten gelegt, um eine Platzierung der Sensorsysteme am Markt neben eventuell bereits etablierten Konkurrenzprodukten auf der Basis anderer physikalischer Prinzipien zu ermöglichen.