

2 Grundlagen und Komponenten

2.1 Galvanomagnetische Sensorik

2.1.1 Die galvanomagnetischen Effekte

Zu den galvanomagnetischen Effekten zählen jene physikalischen Effekte, welche in stromdurchflossenen, elektrisch leitenden und halbleitenden Materialien aufgrund eines äußeren homogenen Magnetfeldes auftreten. Diese Effekte äußern sich in der Beeinflussung des elektrischen Widerstandes derartiger Materialien oder der elektrischen Spannung durch die Gleichspannungskopplung mit einem zeitlich konstanten Magnetfeld bzw. dem Momentanwert eines zeitlich variablen äußeren Feldes. Da die Ladungsträger auch Träger von Wärmeenergie sind, treten in den Materialien zudem Temperaturgefälle auf.

Galvanomagnetische Effekte treten in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfelds \vec{H} bzw. eines Magnetfeldanteils (H_x, H_y, H_z) auf, dessen Orientierung senkrecht zur Richtung des elektrischen Stromes I bzw. des elektrischen Feldes \vec{E} – *transversales Magnetfeld* – oder parallel – *longitudinales Magnetfeld* – zu dieser liegt, vgl. auch Kapitel 2.2.1. Ebenso bezeichnet man Effekte, die senkrecht zum elektrischen Strom auftreten, als *transversale Effekte* und solche, die in Richtung des elektrischen Stromes erscheinen, als *longitudinale Effekte*. Tabelle 2.1 liefert eine knappe Übersicht über die galvanomagnetischen Effekte; siehe beispielsweise in [SCH-84].

Tabelle 2.1: Galvanomagnetische Effekte – Übersicht

Art	Effekt	Beschreibung	Gesetz / Anmerkung
Transversale galvanomagnetische Effekte	HALL-Effekt entdeckt 1879 von E. H. HALL	Existiert senkrecht zu einem homogen vom elektrischen Strom durchflossenen Leiter oder Halbleiter ein Magnetfeld, so werden die Ladungsträger aufgrund der Lorentz-Kraft abgelenkt und es bildet sich eine elektrische Spannung – die so genannte Hall-Spannung U_H – senkrecht zur Strom- und zur Magnetfeldrichtung aus; siehe Kapitel 2.1.2.	$U_H \propto I_0 \cdot B_z$ <p>U_H – Hall-Spannung I_0 – Steuerstrom B_z – transversale Magnetfeldkomponente</p> <p>wichtigster galvanomagnetischer Effekt</p>

Tabelle 2.1: Galvanomagnetische Effekte – Übersicht (Fortsetzung)

Art	Effekt	Beschreibung	Gesetz / Anmerkung
Transversale galvanomagnetische Effekte	V. KLITZING-Effekt (quantisierter Hall-E.) entdeckt 1980 von K. v. KLITZING	Quantisierung der Hall-Spannung bzw. des Magnetowiderstandes in dünnen Halbleiterschichten oder -inversionsschichten bei tiefen Temperaturen. Die Ursache liegt in der Quantisierung des zweidimensionalen Elektronengases.	$R_K = \frac{h}{e^2}$ R_K – Klitzing-Konstante h – Planck'sches Wirkungsquantum e – Elementarladung
	ETTINGHAUSEN-Effekt entdeckt 1886 von A. v. ETTINGHAUSEN	Temperaturgefälle zusätzlich zum Hall-Effekt in einem vom Magnetfeld durchflossenen homogenen Leiter. Das Temperaturgefälle kann positiv oder negativ sein. Der Effekt kommt ebenfalls über die Lorentzkraft zustande.	$\Delta T \propto I_0 \cdot B_z$ ΔT – Temperaturgefälle I_0 – Steuerstrom
	DISSYMMETRIE-Effekt entdeckt 1916 von J. WOLD	Wird beim Hall-Effekt das Magnetfeld umgekehrt, so kehrt sich auch das Vorzeichen der Hallspannung um, allerdings erreicht die Hallspannung einen anderen Wert, da die longitudinale Widerstandsänderung, die beim Hall-Effekt als additive Komponente auftritt, von der Umpolung unberührt bleibt.	$U_H(+B_z) - U_H(-B_z)$ $= U_{H,Diff} \propto B_z^2$ $U_{H,Diff}$ – Differenz der Hallspannungen U_H bei Umkehr der Magnetfeldrichtung
Longitudinale galvanomagnetische Effekte	THOMSON-Effekt entdeckt 1856 von Sir W. THOMSON <i>selten auch:</i> GAUß-Effekt nach K. F. GAUß	Dieser Effekt ist direkt mit dem Hall-Effekt verbunden. Im transversalen Magnetfeld kommt es durch die Ablenkung der bewegten Ladungsträger quer zur Stromrichtung zu einer Verlängerung der Strombahnen. Dies entspricht einer Erhöhung des elektrischen Widerstands des Materials; Kapitel 2.1.2.	$R_B, \Delta R \propto I_0 \cdot B_z^2$ R_B – magnetfeldabhängiger elektrischer Widerstand ΔR – Widerstandsänderung B_z – transversale Komponente der magnetischen Induktion
	NERNST-Effekt entdeckt 1887 von W. H. NERNST	Dieser Effekt ist direkt mit dem Hall-Effekt verbunden. Im transversalen Magnetfeld kommt es zur Ausbildung einer longitudinalen Temperaturdifferenz beim Stromdurchgang.	$\Delta T \propto I_0 \cdot B_z$ ΔT – Temperaturdifferenz
	<i>ohne Namen</i>	Befindet sich ein stromdurchflossener Leiter teilweise in einem longitudinalen Magnetfeld, so bildet sich eine Temperaturdifferenz zwischen dem magnetisierten und dem unmagnetisierten Teil aus. Der Effekt entspricht dem thermoelektrischen PELTIER-Effekt.	$\Delta T \propto I_0 \cdot B_x$ B_x – longitudinale Magnetfeldkomponente

Technisch relevant im Bereich der galvanomagnetischen Sensorik sind lediglich der 1879 entdeckte HALL-Effekt und die magnetischen Widerstandseffekte, insbesondere der GAUß-Effekt, in Halbleitern.

2.1.2 Hall-Elemente und Feldplatten

Magnetfeldsensoren auf Halbleiterbasis nutzen die Ablenkung bewegter elektrischer Ladungsträger in einem homogenen Magnetfeld. Auf die Elektronen wirkt dann die LORENTZ-Kraft \vec{F}_L :

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit der elektrischen Ladung q , dem Geschwindigkeitsvektor bewegter Ladung \vec{v} und der magnetischen Flussdichte \vec{B} (magn. Induktion):

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

mit der magnetischen Feldkonstante μ_0 , der relativen Permeabilität μ_r und der magnetischen Feldstärke \vec{H} . Wird ein Steuerstrom I_0 durch ein dünnes Halbleiterplättchen geleitet, so werden die Strombahnen durch die senkrecht zur Platte wirkende Magnetfeldkomponente B_z abgelenkt. Bild 2.1 zeigt dies für die Wandler *Hall-* und *Gauß-Element (Feldplatte)*.

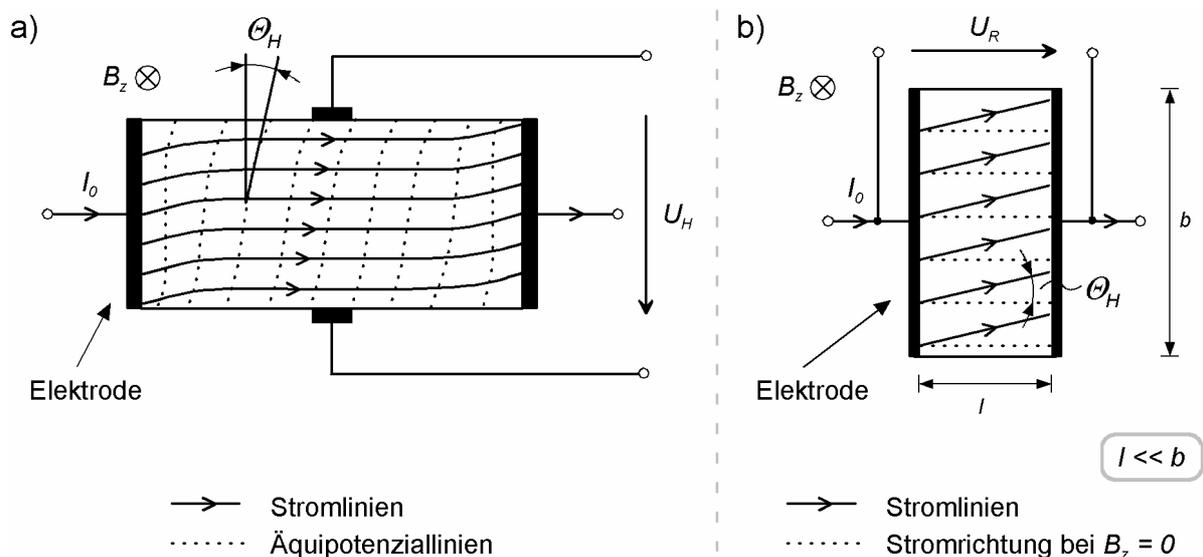


Bild 2.1: Funktion und prinzipieller Aufbau von galvanomagnetischen Wandler-elementen auf Halbleiterbasis

- a) Hall-Element
b) Feldplatte

b – Breite; l – Länge; B_z – Orthogonal-Komponente der magnetischen Flussdichte; I_0 – Steuerstrom; Θ – Hall-Winkel; U_H – Hall-Spannung; U_R – Spannungsabfall am Widerstandselement (Feldplatte)

Messtechnisch lassen sich zwei parallel auftretende Effekte nutzen:

- (1) Die Äquipotenziallinien werden um den Hallwinkel ϑ verdreht, es gilt:

$$\tan \vartheta = \xi \cdot B_z \quad (\text{Gl. 2.3})$$

mit der Ladungsträgerbeweglichkeit ξ .

An den Querseiten des Halbleiterplättchens entsteht eine Potenzialdifferenz, die hochohmig als Hall-Spannung U_H abgreifbar ist (vgl. Bild 2.1a):

$$U_H = I_0 \cdot B_z \cdot \frac{R_H}{d} ; \quad (\text{Gl. 2.4})$$

dabei ist R_H der materialspezifische Hall-Koeffizient und d die Dicke des Halbleiterplättchens. Der Hall-Koeffizient R_H hängt von der Ladungsträgerdichte n ab:

$$R_H = \frac{1}{n \cdot q} . \quad (\text{Gl. 2.5})$$

Über die elektrische Leitfähigkeit

$$\kappa = n \cdot q \cdot \xi \quad (\text{Gl. 2.6})$$

wird Gl. 2.5 zu

$$R_H = \frac{\xi}{\kappa} = \xi \cdot \rho \quad (\text{Gl. 2.7})$$

mit dem spezifischen Widerstand ρ des Materials. Die III-V-Verbindungshalbleiter Indium-Antimonid ($InSb$) und Indium-Arsenid ($InAs$) besitzen zwar eine sehr hohe Ladungsträgerbeweglichkeit ξ , jedoch werden aus Gründen der Technologie und der Integrationsfähigkeit Hall-Sensoren vorwiegend aus Gallium-Arsenid ($GaAs$) oder Silizium (Si) realisiert; weitere Informationen zu Hall-Elementen finden sich z. B. in [HEY-84, MÜN-87].

- (2) Durch die Ablenkung der bewegten Ladungsträger verlängern sich deren Strombahnen im Halbleiter, was zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes infolge des externen Magnetfeldes führt. Dieser magnetfeldabhängige Widerstand R_B kann bei Konstantstromspeisung über den Spannungsabfall U_R am Bauelement gemessen werden (vgl. Bild 2.1b). Für kleine Werte von B_z gilt dann näherungsweise

$$R_B = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot B_z^2) \quad (\text{Gl. 2.8})$$

mit R_0 als elektrischem Widerstand ohne wirksames äußeres Magnetfeld, d. h. $B_z = 0$, und dem Magnetowiderstandskoeffizienten α , einer material- und geometrieabhängigen Konstante. Solche Sensoren heißen nach dem zu Grunde liegenden Effekt GAUß-Elemente oder üblicherweise *Feldplatten*. Da die Verlängerung der Strombahnen dem Hallwinkel direkt proportional ist, wird im Sinne von Gl. 2.3 der III-V-Verbindungshalbleiter Indium-Antimonid (*InSb*) aufgrund der hohen Ladungsträgerbeweglichkeit zur Herstellung von Feldplatten eingesetzt. Um technisch relevante Widerstandswerte im Bereich von $R_0 = 10 \Omega \dots 1000 \Omega$ realisieren zu können, wird das Halbleitermaterial mäanderförmig mit niedrigem Querschnitt durch Formätzen ausgebildet. So entsteht ein langer stromführender Halbleiterstreifen, in den senkrecht zur Stromrichtung feine Kurzschlussnadeln aus hoch leitendem Nickel-Antimonid (*NiSb*) zur Erhöhung des geometrieabhängigen Widerstandseffektes durch Kristallisation beim Abkühlen nach dem Schmelzvorgang des Eutektikums aus InSb und NiSb eingebracht werden – siehe Tabelle 2.2 – [PIT-94, STE-72]. Frühe Formen der Feldplatte waren zu diesem Zweck auf der Oberfläche mit kurzschließenden, leitenden Metallstreifen versehen (*Rasterfeldplatte*). In der Praxis werden bevorzugt Differenzial-Feldplatten aus zwei in Reihe geschalteten Einzelwiderständen eingesetzt, die über eine Brückenschaltung elektronisch auswertbar sind. Dieses Verfahren ermöglicht zugleich die Kompensation der ausgeprägten Temperaturempfindlichkeit des InSb. Die Temperaturempfindlichkeit wird auch durch Dotierung des InSb mit Tellur (*Te*) reduziert, jedoch unter Reduzierung des Widerstandseffektes. Weitere Informationen zu Feldplatten finden sich z. B. in [BOR-85].

Grundsätzlich unterscheiden sich bei den Effekten die Verläufe der jeweils vom Magnetfeld beeinflussten elektrischen Größe in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion \vec{B} , siehe Bild 2.2.

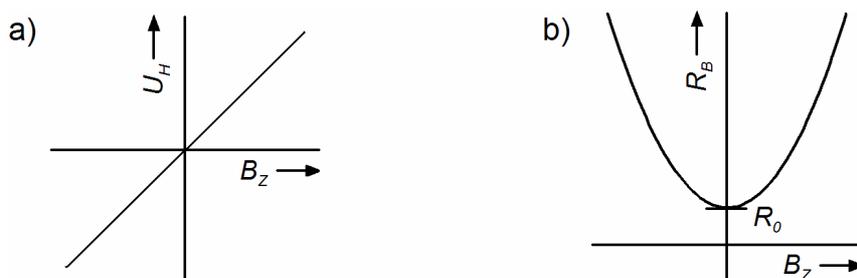


Bild 2.2: Typische Kennlinien galvanomagnetischer Sensorelemente

- a) Verlauf der Hall-Spannung $U_H(B_z)$ beim Hall-Element
 b) Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes $R_B(B_z)$ einer Feldplatte

Während die Hall-Spannung U_H in erster Näherung eine lineare Abhängigkeit von dem sie durchsetzenden homogenen Magnetfeld zeigt, ist die Widerstandsabhängigkeit bei kleinen Magnetfeldstärken quadratisch und geht erst bei höheren Feldstärken näherungsweise in die Linearität über. Die Polarität der Hall-Spannung ist von der Richtung des Magnetfeldes abhängig, während die Widerstandswerte R_B der Feldplatte stets polarisationsunabhängig sind.

Übliche Bauformen von Hallsonden und Feldplatten sind in Tabelle 2.2 kurz zusammengefasst. Seltene Sonder- und Experimental-Bauformen von Hallsonden stellt beispielsweise [ROU-94] vor.

Tabelle 2.2: Übliche Bau- und Handelsformen von Hallsonden und Feldplatten

I_0 – elektrischer Steuerstrom; U_H – Hall-Spannung; L, l – (Gesamt-)Länge; B, b – (Gesamt-)Breite; d – Dicke

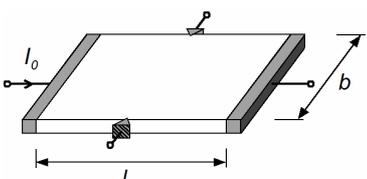
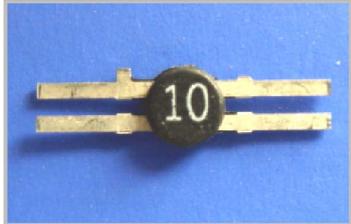
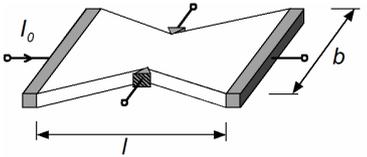
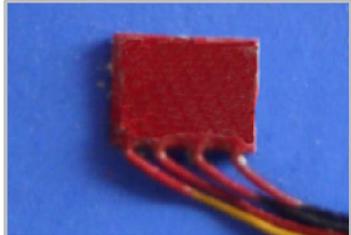
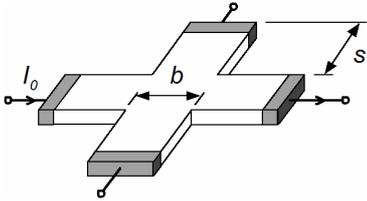
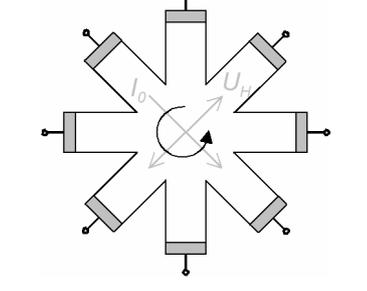
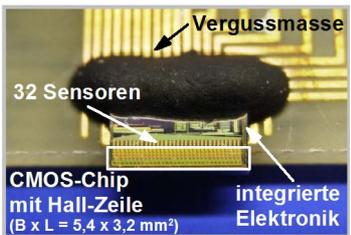
Art	(Grund-)Bauform	Beschreibung	Handelsform (Bsp.)
Hallsonden		<ul style="list-style-type: none"> - rechteckiger Hallsensor mit punktförmigen Abgriffen zur Erzielung hoher Hall-Spannungen - Längen- / Breitenverhältnis $l/b \geq 2$ 	 <p>KSY 10 (Infineon AG) aktive Fläche $\varnothing = 1 \text{ mm}$ Empfindlichkeit $\geq 850 \text{ mV/T}$</p>
		<ul style="list-style-type: none"> - Hallsensor in Schmetterlingsform, der aufgrund der Stromeinschnürung eine hohe Magnetfeldempfindlichkeit aufweist - Längen- / Breitenverhältnis $l/b \geq 2$ 	 <p>FH 301-040 (F. W. Bell) aktive Fläche $l \times b \cong 2 \times 1 \text{ mm}^2$ Empfindlichkeit $\geq 120 \text{ mV/T}$</p>
		<ul style="list-style-type: none"> - Kreuzförmiger, symmetrischer Hallsensor mit hoher Magnetfeldempfindlichkeit - Verhältnis von Schenkelhöhe zu -breite $s/b \geq 0,4$ 	
		<ul style="list-style-type: none"> - sternförmiger Spinning-Current-Hall-Sensor mit zirkulierender Stromeinspeisung zur Reduzierung einer auf Materialinhomogenitäten basierenden Offsetspannung am Ausgang [FHG-97] - Addition von je 8 Hall-Spgn. pro Messwert - Einsatz in Sensorzeilen 	 <p>Vergussmasse 32 Sensoren CMOS-Chip mit Hall-Zeile ($B \times L = 5,4 \times 3,2 \text{ mm}^2$) integrierte Elektronik Zeile mit 32 Hall-Sensoren (INS1_4Z5; FhG-IMS Dresden; Sensorabstand: $151,2 \mu\text{m}$)</p>

Tabelle 2.2: Übliche Bau- und Handelsformen von Hallsonden und Feldplatten
– Fortsetzung

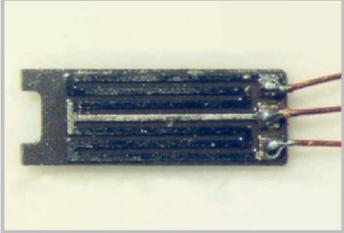
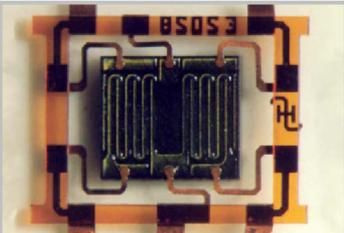
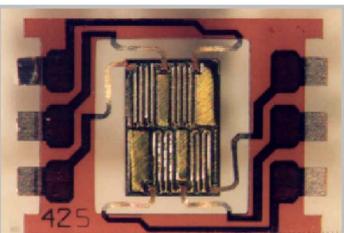
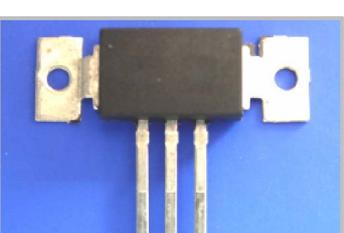
Art	(Grund-)Bauform	Beschreibung	Handelsform (Bsp.)
Feldplatten		<ul style="list-style-type: none"> - <u>Grundform:</u> Lange, durch Ätzverfahren mäanderförmig ausgebildete Halbleiterstreifen aus InSb mit geringem Querschnitt: <ul style="list-style-type: none"> • $b \approx 80 \mu\text{m}$ • $d = 10 \dots 100 \mu\text{m}$ - <u>Kurzschlussnadeln</u> aus erstarrtem, hoch leitendem NiSb zur Bewirkung des geometrieabhängigen Widerstandeffektes; Nadelausrichtung quer zur Stromflussrichtung bei zufälliger Verteilung; Abmessungen: <ul style="list-style-type: none"> • $\text{Länge} \approx 30 \mu\text{m}$ • $\text{Durchmesser} \approx 1 \mu\text{m}$ - <u>Dotierung</u> mit Te zur Anpassung an die Einsatzbedingungen (z. B. Temperatur), dabei Leitfähigkeit \sim Dotierung: <ul style="list-style-type: none"> • D-Material (undotiert) • L- und N-Material - <u>Trägermaterial:</u> Eisen (a) o. Ferrit (b) zur Führung des magnetischen Flusses, sonst Keramik o. Kunststoff (c); Isolation u. Schutz gegen mechanische Beschädigung durch Polyimid-Beschichtung - <u>Ausführungsformen</u> als Einzel-, Differenzial- (a, b, d, e) oder Doppel-Differenzial-Feldplatten (c) - <u>Handelsformen:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Träger mit Anschlussdrähten (a) • Kapton[®]-Rahmen für automatische Leiterplatten-Bestückung (b) + (c) • Kunststoffgehäuse zur Löt- (d) o. Schraubmontage (e) • teilweise mit magnetischer Vorspannung (d) + (e) - <u>Grundwiderstand</u> je Teilwiderst. $R_0 = 60 \Omega \dots 500 \Omega$ - <u>Widerstandserhöhung:</u> $R_B/R_0 \geq 12$ bei $B \approx \pm 1 \text{T}$ - <u>Aktive Fläche:</u> Maße z. B. $L \times B = 3,05 \times 2,75 \text{ mm}^2$ (b) 	<div style="text-align: center;">  <p>(a) FP 110 D 155 (Infineon AG)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(b) FP 412 D 250 (Infineon AG)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(c) FP 425 L 90 (Infineon AG)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>integrierter Permanentmagnet (magnetische Vorspannung)</p> <p>(d) FP 212 D 250 (Infineon AG)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(e) FP 201 L 100 (Infineon AG)</p> </div>

Tabelle 2.3 zeigt im Anschluss beispielhaft eine Zusammenstellung typischer Anwendungsprinzipien von Hall- und Feldplatten-Sensoren bei unterschiedlicher Anordnung der Komponenten eines galvanomagnetischen Sensorsystems.

Tabelle 2.3: Typische Anwendungsprinzipien von Hall- und Feldplattensensoren
*d – Abstand, Luftspaltbreite; s – Weg, Strecke; x_0 – Symmetrie-, Mittenposition; φ – Drehwinkel;
 Fe – ferromagnetisches Element; R_B – magnetfeldabhängiger elektr. Widerstand; U_H – Hall-Spannung*

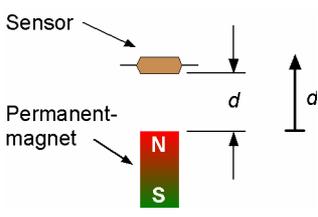
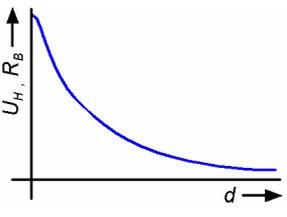
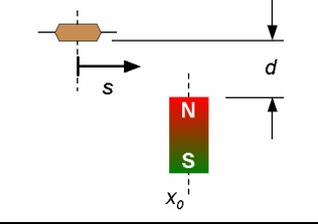
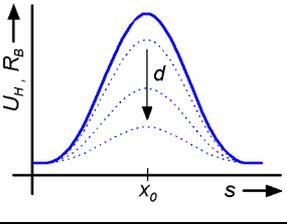
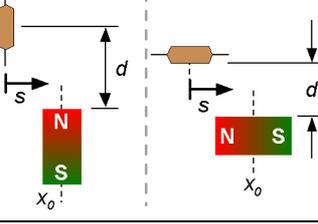
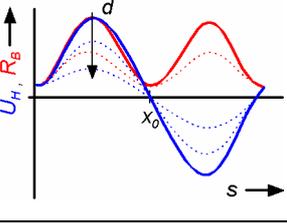
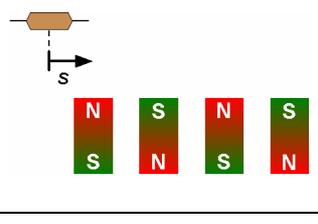
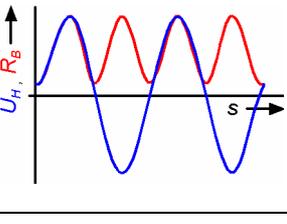
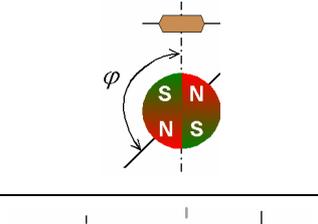
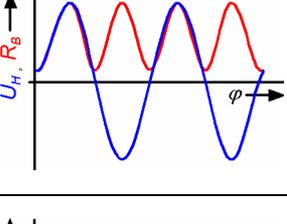
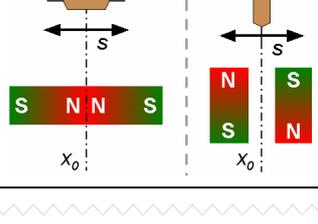
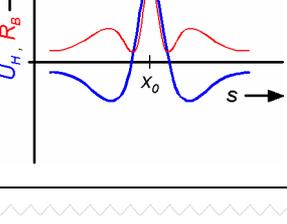
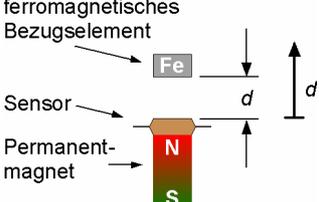
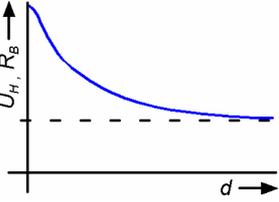
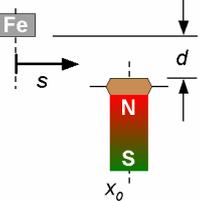
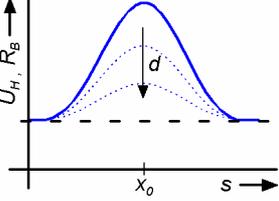
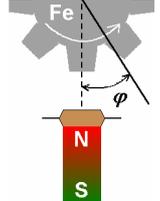
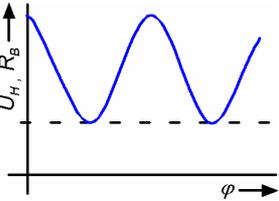
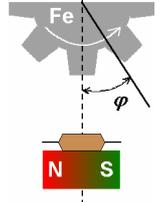
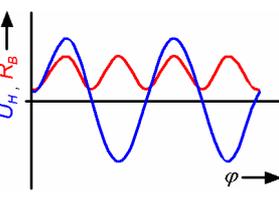
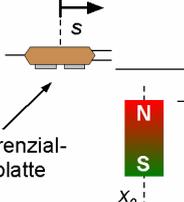
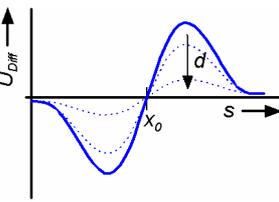
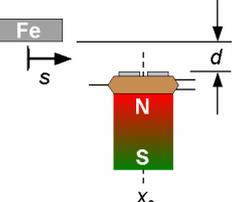
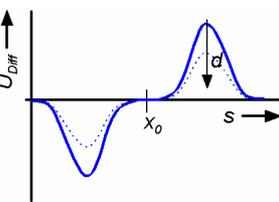
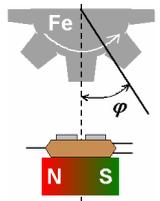
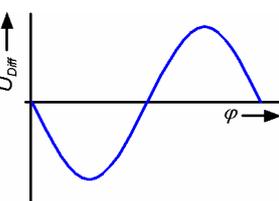
Art	Anordnung der Komponenten	Kennliniencharakteristik	Anwendungsfelder
Hall-Sensoren und Feldplatten (ohne Flussführung)	axial 		Abstandssensor, Näherungsschalter
	transversal 		Näherungsschalter, Positionssensor
	transversal 		Positionssensor
	transversal 		Lineare Positionscoder
	radial 		Drehwinkelsensor
	transversal 		Grenzwert- und Näherungsschalter

Tabelle 2.3: Typische Anwendungsprinzipien von Hall- und Feldplattensensoren – Fortsetzung

Art	Anordnung der Komponenten	Kennliniencharakteristik	Anwendungsfelder
Hall-Sensoren und Feldplatten (mit magnetischer Vorspannung)	axial 		Näherungssensor
	transversal 		Näherungsschalter, Abstandssensor
	radial 		Drehwinkel-, Drehzahlsensor
	radial 		Drehwinkel-, Drehzahlsensor
Differenzial-Feldplatten	transversal 		Positionssensor mit Richtungserkennung
	mit magnetischer Vorspannung transversal 		Positionssensor mit Detektion der Bewegungsrichtung, Objekterfassung
	mit magnetischer Vorspannung radial 		Drehwinkel-, Drehzahlsensor mit Drehrichtungserkennung

2.2 Theoretische Grundlagen galvanomagnetischer Messsysteme

2.2.1 Beeinflussung galvanomagnetischer Effekte in homogenen Halbleitern

Bei homogenen Halbleitern ergibt sich aus der Transportgleichung für die Ladungsträger die Stromdichtegleichung für Elektronen unter der Einwirkung eines Magnetfeldes allgemein zu

$$\vec{S} = m_{00} \cdot \vec{E} + m_{10} \cdot (\vec{B} \times \vec{E}) + m_{20} \cdot \vec{B} \cdot (\vec{E} \cdot \vec{B}) \quad (\text{Gl. 2.9})$$

mit den materialabhängigen Transportkoeffizienten m_{ik} , welche die effektive Masse der Ladungsträger, den Streumechanismus, die Relaxationszeit, die Verteilungsfunktion in Abhängigkeit von der Energie sowie die Lage des Fermi-niveaus beinhalten, in allgemeiner Darstellung [REI-88]. Aufgelöst nach der elektrischen Feldstärke \vec{E} folgt aus Gl. 2.9 für galvanomagnetische Effekte

$$\vec{E} = \rho_0 \cdot \vec{S} + R_H \cdot (\vec{B} \times \vec{S}) + \frac{\Delta\rho}{|\vec{B}|^2} \cdot (\vec{B} \times (\vec{B} \times \vec{S})) \quad (\text{Gl. 2.10})$$

mit der materialabhängigen Hall-Konstanten R_H , dem spezifischen Widerstand ρ_0 des Halbleitermaterials ohne magnetischen Feldeinfluss und dessen Änderung infolge eines äußeren Magnetfeldes \vec{B}

$$\Delta\rho = \rho_0 - \rho \quad (\text{Gl. 2.11})$$

mit dem spezifischen Widerstand ρ des Halbleitermaterials unter dem Einfluss eines Magnetfeldes [REI-88].

Steht ein Magnetfeld \vec{B} senkrecht auf der Richtung der Stromdichte \vec{S} , so erfahren die Ladungsträger durch die Lorentz-Kraft eine Ablenkung, deren Richtung in der Materialebene senkrecht auf der ursprünglichen Bewegungsrichtung steht. Daraus resultiert eine elektrische Feldstärke \vec{E} senkrecht zur Stromdichte \vec{S} .

Für den (transversalen) Hall-Effekt folgt hieraus die elektrische Feldstärke quer zur Stromrichtung

$$E_H = E_y = R_H \cdot (\vec{B} \times \vec{S}) \quad (\text{Gl. 2.12})$$

bzw. die Hall-Spannung

$$U_H = R_H \cdot B_z \cdot S_x \cdot b. \quad (\text{Gl. 2.13})$$

mit der Breite b des Halbleiterplättchens, Bild 2.3.

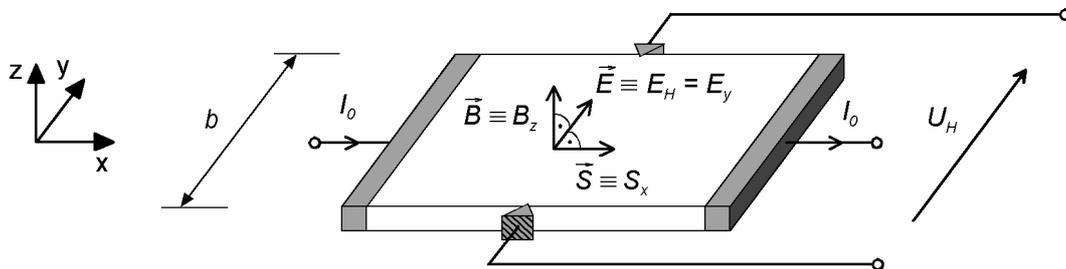


Bild 2.3: Elektrische und magnetische Feldkomponenten bei einer Hallsonde

Parallel zur Stromdichte \vec{S} ergibt sich bei einem senkrecht zu dieser stehenden Magnetfeld \vec{B} für die Feldstärke \vec{E} aus Gl. 2.10

$$\vec{E} = \rho_0 \cdot \vec{S} + \frac{\Delta\rho}{|\vec{B}|^2} \cdot \vec{B}^2 \cdot \vec{S} \quad (\text{Gl. 2.14})$$

bzw. ein vom Magnetfeld abhängiger elektrischer Widerstand R_B wegen

$$E_x = S_x \cdot \left(\rho_0 + \frac{\Delta\rho}{|\vec{B}|^2} \cdot B_z^2 \right) \quad (\text{Gl. 2.15})$$

bei nicht allzu großen Magnetfeldern zu

$$R_B = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot B_z^2), \quad (\text{Gl. 2.16})$$

mit dem materialabhängigen Magnetwiderstandskoeffizienten α und R_0 als elektrischem Widerstand ohne wirksames äußeres Magnetfeld, vgl. Gl. 2.8. Der Magnetwiderstandskoeffizient beträgt beispielsweise für das bei Feldplatten häufig eingesetzte Indium-Antimonid (InSb) $\alpha = 6,1 \cdot 10^9 \text{ (cm}^2/\text{Vs)}^2$ [REI-88].

Daraus ist ersichtlich, dass stets die senkrecht auf der Stromdichterichtung stehende Magnetfeldkomponente in der Halbleiterebene beeinflusst werden muss, um eine der Messgröße direkt proportionale Änderung einer elektrischen Größe zu bewirken. Die Art des Abgreifens der elektrischen Größe spielt hier keine Rolle.

2.2.2 Einfluss ferromagnetischer Elemente im statischen Magnetfeld

Die Beispiele typischer Anwendungen galvanomagnetischer Sensoren in Tabelle 2.3 zeigen, dass die Amplitude der senkrecht auf der Sensorebene stehenden Komponente B_z der magnetischen Flussdichte ein Maß für die Position P_1 des Halbleiters im statischen Magnetfeld eines Permanentmagneten ist, d. h. es gilt allgemein

$$B_z(P_1) = f(\vec{r}_P) \quad (\text{Gl. 2.17})$$

mit dem Abstandsvektor \vec{r}_P zwischen einem Punkt P_0 auf der Magnetoberfläche und einem Punkt P_1 in der Sensorebene. Befindet sich zusätzlich ein magnetisch leitendes Element, z. B. aus ferromagnetischem Material, in Position P_2 und damit in der Nähe des Permanentmagneten, so wird dieses den Verlauf des magnetischen Feldes beeinflussen; damit folgt aus Gl. 2.17

$$B_z(P_1) = f(\vec{r}_P, \vec{r}_E, V_E, \alpha_E, \beta_E, \gamma_E, \mu_{r,E}) \quad (\text{Gl. 2.18})$$

mit dem Abstandsvektor \vec{r}_E zwischen einem Punkt P_0 auf der Magnetoberfläche und einem Punkt P_2 im Körper eines gegebenenfalls um die Winkel α_E , β_E und γ_E im Raum geneigten, ferromagnetischen Elements mit dem Volumen V_E , Bild 2.4.

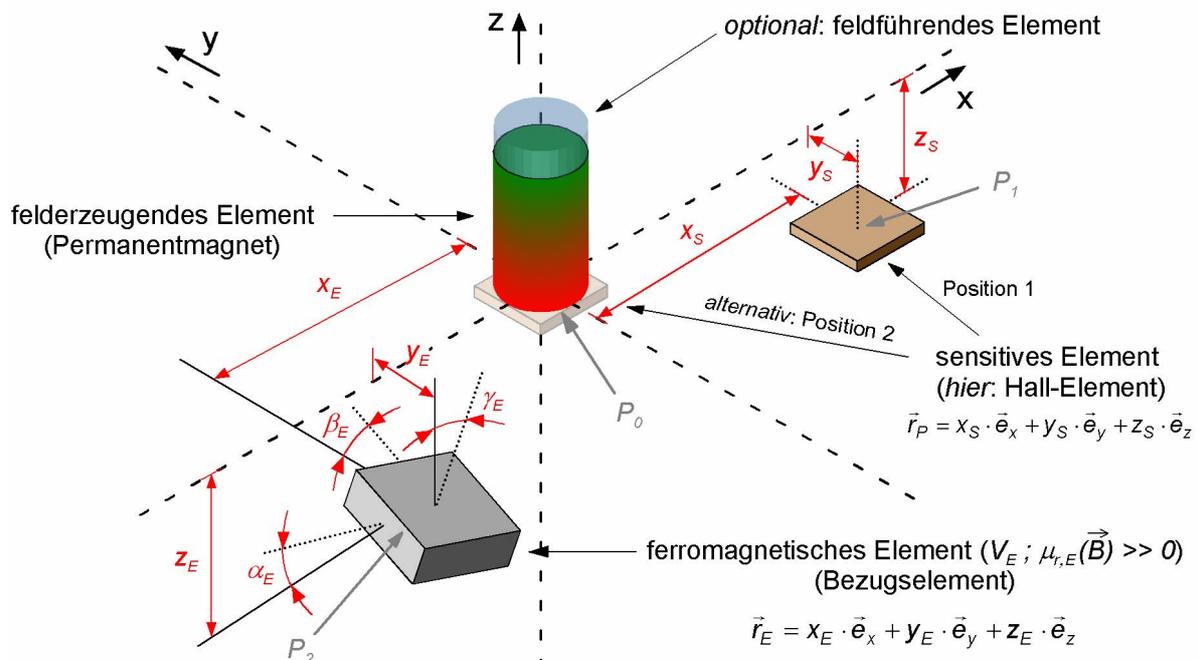


Bild 2.4: Ferromagnetisches Element im permanentmagnetischen Feld

$x_{E,S}, y_{E,S}, z_{E,S}$ – Abstände des ferromagnetischen Elements (Index E; Punkt P_2) und des sensitiven Elements (Index S; Punkt P_1) vom Mittelpunkt P_0 einer Poloberfläche des felderzeugenden Elements; $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ – Einheitsvektoren im orthogonalen Koordinatensystem; \vec{r}_P, \vec{r}_E – Ortsvektoren zum sensitiven bzw. zum ferromagnetischen Element; $\alpha_E, \beta_E, \gamma_E$ – Neigungswinkel des ferromagn. Elements relativ zur Magnetoberfläche

Mit Hilfe der MAXWELL'schen Gleichungen für statische Magnetfelder

$$\operatorname{rot} \vec{H} = 0 \quad (\text{Gl. 2.19})$$

und

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (\text{Gl. 2.20})$$

sowie des für isotrope Stoffe gültigen Zusammenhangs

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{Gl. 2.21})$$

mit der skalaren Größe

$$\mu = f(\vec{r}, \vec{H}), \quad (\text{Gl. 2.22})$$

der orts- und feldstärkeabhängigen Permeabilität nichtlinearer Stoffe (Ferromagnetika), ist eine Bestimmung des resultierenden magnetischen Feldes in jedem Punkt P_i möglich. Aufgrund der Divergenzfreiheit des magnetischen Feldes \vec{B} nach Gl. 2.20 ist ein Lösungsansatz durch Einführung eines magnetischen Vektorpotenzials \vec{A} mit

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (\text{Gl. 2.23})$$

und

$$\operatorname{div} \vec{A} = 0 \quad (\text{Gl. 2.24})$$

möglich [WOL-70, WUN-96]. Die für den allgemeinen Fall nach Bild 2.4 notwendigen Feldberechnungen im dreidimensionalen Raum führen über diesen Ansatz zu drei gekoppelten Differenzialgleichungssystemen (DGL-Systeme) für die Vektorpotenzial-Komponenten A_x , A_y und A_z , z. B. in [CAS-89]. Die analytische Lösung dieser DGL-Systeme ist nicht trivial und äußerst zeitaufwendig, so dass zum Nachweis des Einflusses ferromagnetischer Elemente auf den Feldverlauf eines statischen Magnetfeldes eine rechnergesteuerte Simulation vorzuziehen ist. Computersoftware, z. B. auf Basis der numerischen Finite-Elemente-Methode (FEM), ermöglicht für jeden Punkt P_i die Bestimmung der magnetischen Induktion mit hinreichender Genauigkeit.

Komplexe zwei- oder dreidimensionale Anordnungen elektromagnetischer Problemstellungen werden bei der FEM als Kombination einer endlichen Zahl an kleinen Bausteinen, so genannter *finiter Elemente*, betrachtet. Unter Berücksichtigung aller Nachbarelemente sowie Rand- und Nebenbedingungen werden auf jedes finite Element die Maxwellschen Gleichungen angewendet, so dass ein DGL-System mit bis

zu einigen tausend Unbekannten entsteht [KNO-92]. Verschiedene FEM-Computerprogramme ermöglichen in Abhängigkeit der gewählten Diskretisierungsfeinheit für die Problemanordnung eine mehr oder minder schnelle Berechnung. Zur Simulation der nachfolgenden Magnetfeldkonfigurationen wurde das Programm ANSYS[®] der US-amerikanischen Firma SAS IP, INC. in der MS-WINDOWS[®] Version 6.1 für Standard-PCs eingesetzt, z. B. [MÜL-01, SAS-96].

Zur Reduzierung des Rechenaufwandes werden für den allgemeinen dreidimensionalen Fall nach Bild 2.4 symmetrisch und homogen aufgebaute Komponenten vorausgesetzt. So ist die Berechnung durch eine zweidimensionale Anordnung möglich, während die Allgemeingültigkeit der Ergebnisaussage erhalten bleibt. Bild 2.5 stellt den Einfluss ferromagnetischer Elemente auf die Amplitude einer für galvanomagnetische Sensoranwendungen relevanten Feldkomponente B_z an zwei beliebigen Punkten P_1 und P_2 im statischen, permanenterzeugten Magnetfeld anhand variierender Elementpositionen und -volumina qualitativ als Ergebnis entsprechender Simulationen dar. Die Art der untersuchten Positions- bzw. Volumenänderungen wurde in Anlehnung an die Sensorsystem-Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit festgelegt.

Bild 2.5 lässt erkennen, dass ein Einfluss ferromagnetischer Elemente zwar prinzipiell an allen Punkten im Magnetfeld nachweisbar ist, in unmittelbarer Nähe zu einem Pol des Permanentmagneten aber wegen der dort höheren magnetischen Feldstärke messtechnisch einfacher und genauer auszuwerten ist.

Galvanomagnetische Sensorelemente werden häufig unmittelbar auf die Oberfläche eines Permanentmagneten montiert. Diese so genannten *magnetisch vorgespannten Sensoren* detektieren oder überwachen anhand kleinster Änderungen der orthogonal zur Sensorfläche stehenden Magnetfeldkomponente magnetisch leitende Objekte in ihrer Umgebung. Dieser Sensorposition entspricht jeweils der Punkt P_2 in Bild 2.5.

Die Positionen magnetisch leitender Elemente, die keinen Einfluss auf die senkrechte Komponente des Magnetfeldes in der Sensorebene ausüben, bilden die Grenzen des Wirkungsbereichs eines vorgespannten Sensors. Die Größe des Wirkungsbereiches ist von den Materialeigenschaften des Halbleiters und der magnetisch leitenden Elemente, von der Magnetisierung des Permanentmagneten sowie von der Geometrie aller Komponenten abhängig.

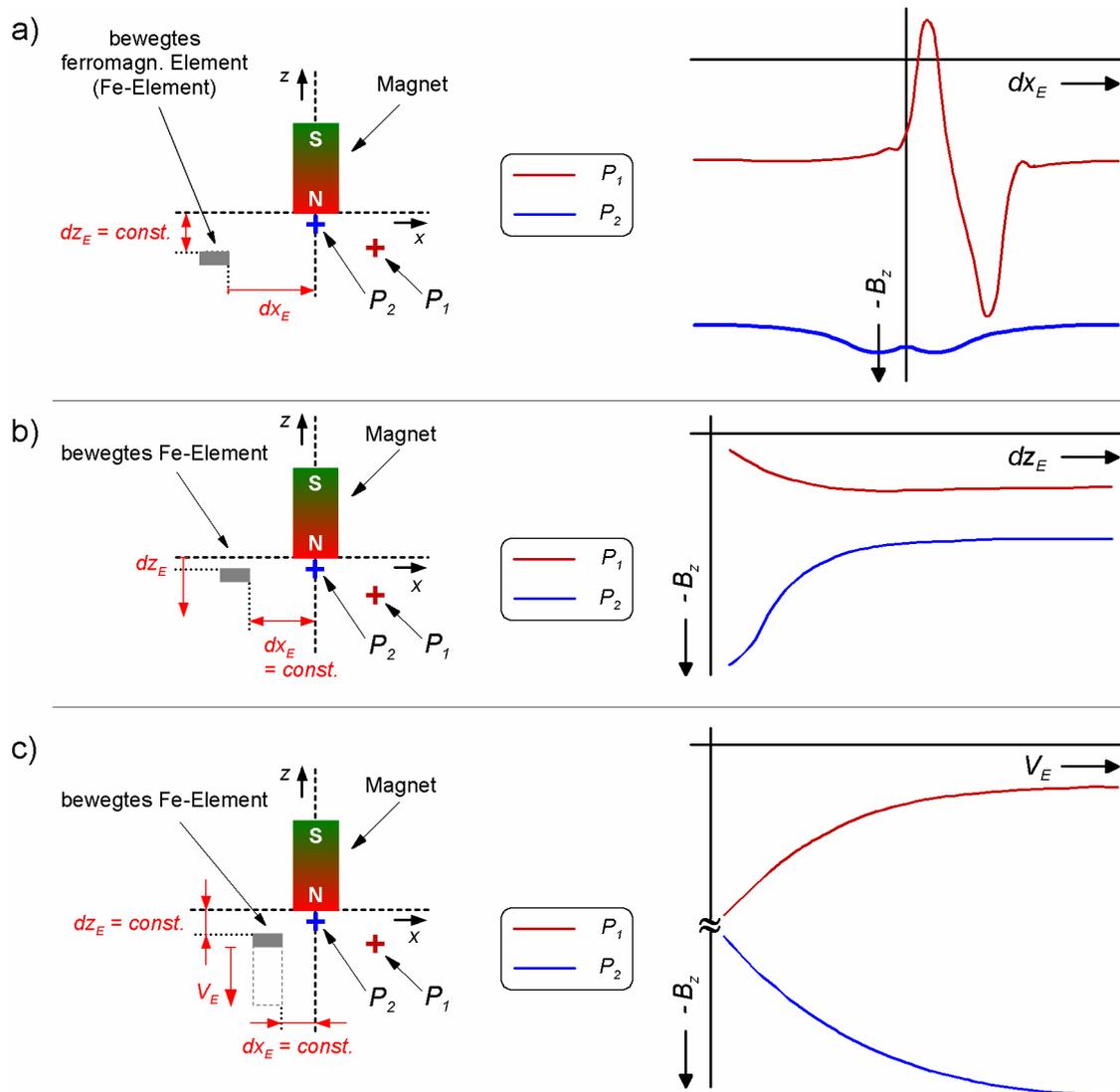


Bild 2.5: Simulierte Einflüsse eines ferromagnetischen Elements auf die magnetische Flussdichtekomponente B_z im permanentenerzeugten Magnetfeld

- a) *Simulierter Einfluss des Horizontalabstands dx_E von der Symmetrielinie des Permanentmagneten*
 b) *Simulierter Einfluss des Vertikalabstands dz_E von der Magnetoberfläche*
 c) *Simulierter Einfluss des Volumens V_E des ferromagnetischen Elements*

2.3 Aufbauvariation von Sensorsystem-Komponenten

2.3.1 Struktur, Gestalt und Material

Jedes technische System erfüllt per Definition eine ihm zugeschriebene Gesamtfunktion, den „allgemeinen Wirkzusammenhang zwischen Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen ... zum Erfüllen einer Aufgabe“ [VDI-97a]. Die Systemstruktur ist durch die Beziehungen von Systemkomponenten als Gestaltelemente, deren Material und innerer Struktur zu beschreiben. Wirkung und Komplexität eines technischen Systems sind von der Wissens-, der Organ- und der Prozessstruktur bestimmt, Bild 2.6.

Ein System enthält also durch die Beziehungen zwischen einzelnen Komponenten (Teilsystemen), deren gewählten Materialien sowie deren Gestalt eine *Struktur*. Diese ist nach VDI-Richtlinie 2221 [VDI-93] die „Darstellung von Teilen eines Ganzen und deren Beziehungen zueinander“, stellt also logisch Zusammengehöriges übersichtlich geordnet dar.

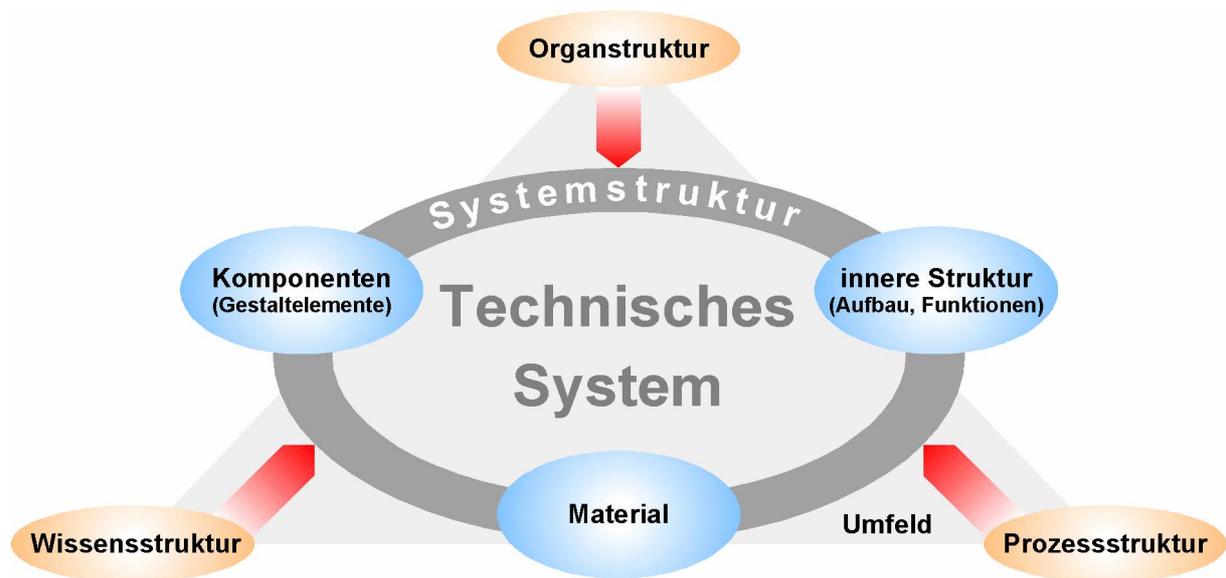


Bild 2.6: Komponenten, Struktur und Material in einem technischen System

Die Konstruktionswissenschaft und die Konstruktionspraxis verstehen unter *Gestalt* die Formgebung technischer Produkte, bei denen Baugruppen die Gestaltelemente von Maschinen, Geräten, Apparaten und Anlagen, Bauteile dann die Gestaltelemente von Baugruppen sind [HUB-92]. Dagegen gilt hier eher der Gestaltbegriff aus dem Bereich des Technischen Designs, der die (kennzeichnende) Gestalt als Informationsträger versteht und als „die Vereinigung der kennzeichnenden Gestaltelemente mit der kennzeichnenden Gestaltordnung“ [SEE-80] definiert.

Die Realisierung volumenbehaffeter Systemkomponenten erfordert die Auswahl geeigneter *Materialien*, die einerseits von der Komponentenfunktion und andererseits von den am Einsatzort des Systems bestehenden Störgrößen und Randbedingungen abhängig ist. Dies führt in der Regel zu definierten Materialien, deren spezifische Einflüsse auf das Systemverhalten grundsätzlich bekannt sind. Durch Variation der inneren Struktur der beeinflussenden Materialien, also durch Erzeugung von Inhomogenitäten kann das Systemverhalten gezielt verändert werden. Die innere Struktur der Gestaltelemente technischer Systeme ist daher prinzipiell ein Informationsträger.

In diesem Sinne bilden *strukturierte Komponenten* informationstragende Aufbauvarianten definierter technischer Systeme. Hieraus definiert sich der Begriff der Systemstruktur zu:

Systemstruktur = Topologie kennzeichnender Aufbauvarianten aus strukturierten Komponenten.

Hier gilt für strukturierte Komponenten folgende Definition:

Strukturierte Komponenten = Gestaltelemente aus definiertem Material mit informationstragender Topologie-Struktur.

2.3.2 Topologie-Strukturen als Informationsträger

Galvanomagnetische Sensorsysteme enthalten in allgemeiner Ausführung als Komponenten(-Gruppen), d. h. als Gestaltelemente, ein oder mehrere strukturierte

- *felderzeugende Elemente* (i. A. Permanentmagnet(e) mit definierten Eigenschaften: magnetische Feldstärke, Magnetisierungsart und -richtung, ...),
- *feldführende Elemente* (i. A. Element(e) zum Führen des permanent erzeugten magnetischen Flusses vom felderzeugenden Element zum Bezugselement und/oder zum sensitiven Element mit definierten Eigenschaften zur Flussführung: Sättigungsfeldstärke, Permeabilität, ...),
- *Bezugselemente (BE)* (i. A. Element(e) mit bekannten magnetischen Eigenschaften, auf das/die sich der Wert der vom sensitiven Element überwachten magnetischen Größe bezieht, d. h. Träger der physikalischen Messgröße oder reines Erkennungselemente) und
- *sensitive Elemente* (Hallsonde(n) oder Feldplatte(n) mit bekannten Eigenschaften, vgl. Kapitel 2.2.1).

Diesen Gestaltelementen aus jeweils definiertem Material lassen sich aufgabenspezifische Topologie-Strukturen zuordnen. Für den Aufbau galvanomagnetischer Sensorsysteme sind dies insbesondere die Variationsmöglichkeiten hinsichtlich

- ihrer Position bzw. Lage zu weiteren Elementen der gleichen und anderer Systemkomponenten-Gruppen (*Anordnung*),
- ihrer *Anzahl* und
- ihrer *geometrischen Gestalt* (Form, Oberfläche, innere Struktur).

Prinzipiell können die typischen resultierenden Strukturgrößen durch Variationen in ein, zwei oder drei Richtungen ausgeprägt sein bzw. realisiert werden. Bild 2.7 zeigt Beispiele für ein- und mehrdimensional strukturierte Bezugselemente.

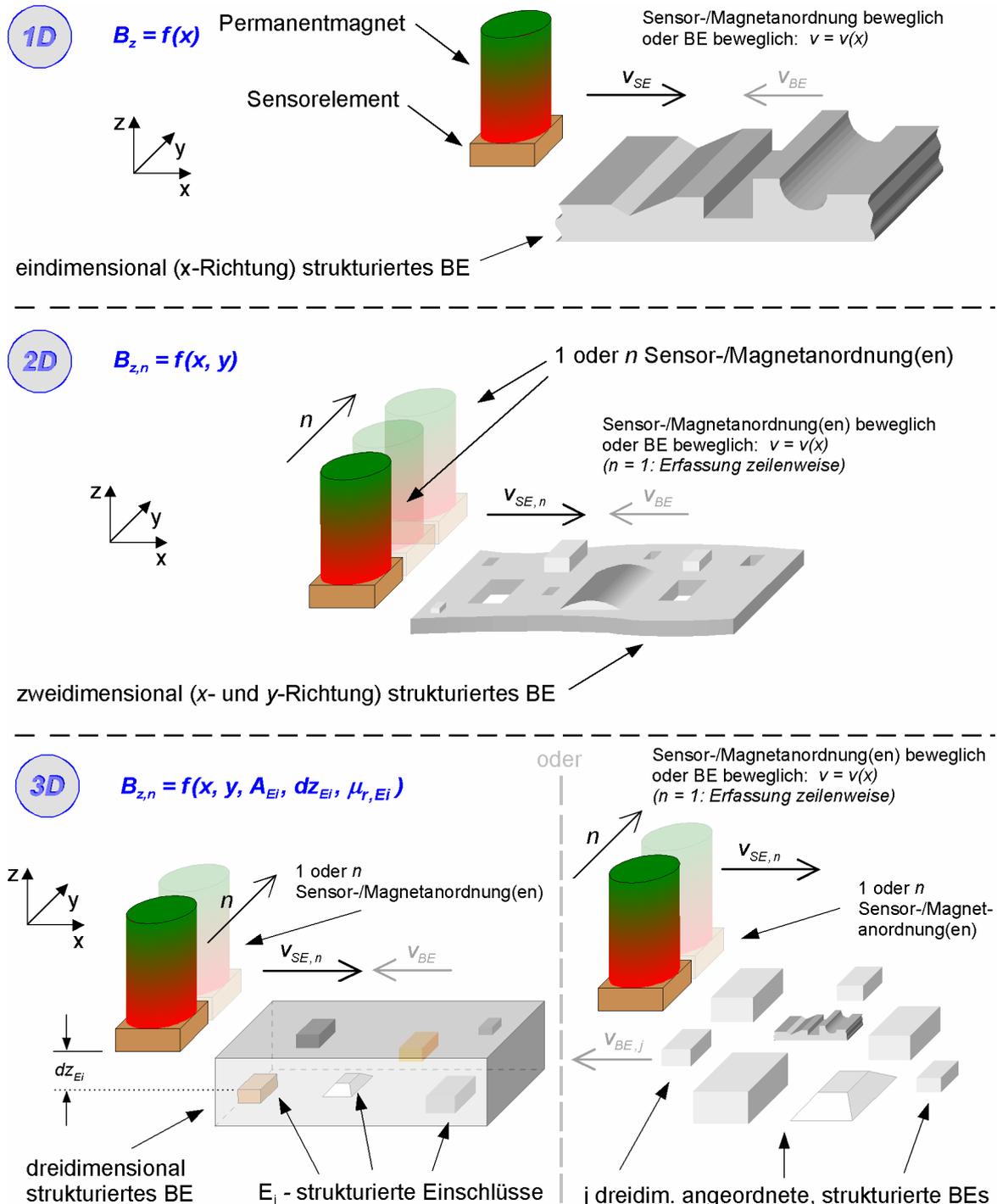


Bild 2.7: Prinzipielle ein-, zwei- und dreidimensionale „Struktur“-Variationen
 dz – Abstand in z-Richtung zwischen der Oberfläche des strukturierten Bezugselements und der Sensorebene;
 i, j, n – Anzahl; v_{BE} – Geschwindigkeit des Bezugselements (BE); v_{SE} – Geschwindigkeit des Sensorelements (SE);
 A – Oberfläche; B_z – magnetische Induktion in z-Richtung; E – Einschluss; V – Volumen;
 μ_r – relative Permeabilität

2.4 Strukturierte Systemkomponenten zur Informationscodierung

2.4.1 Information und deren Codierung

Information ist nach DIN 44300 [DIN-88a] die Kenntnis über Sachverhalte und Vorgänge, bei Messsystemen über die zu messende Größe. Ein *Code* kann nach DIN 44300 allgemeingültig als Abbildungsvorschrift definiert werden, die jedem Zeichen der Urmenge ein Zeichen oder eine Zeichenfolge der Bildmenge eindeutig zuordnet. Der entsprechende Abbildungsvorgang heißt *Codierung*.

Für eine Informationscodierung durch strukturierte Komponenten erfolgt die Codierung der Information „Messgröße“ durch deren Aufprägung auf einzelne oder mehrere Systemkomponenten, Bild 2.8.

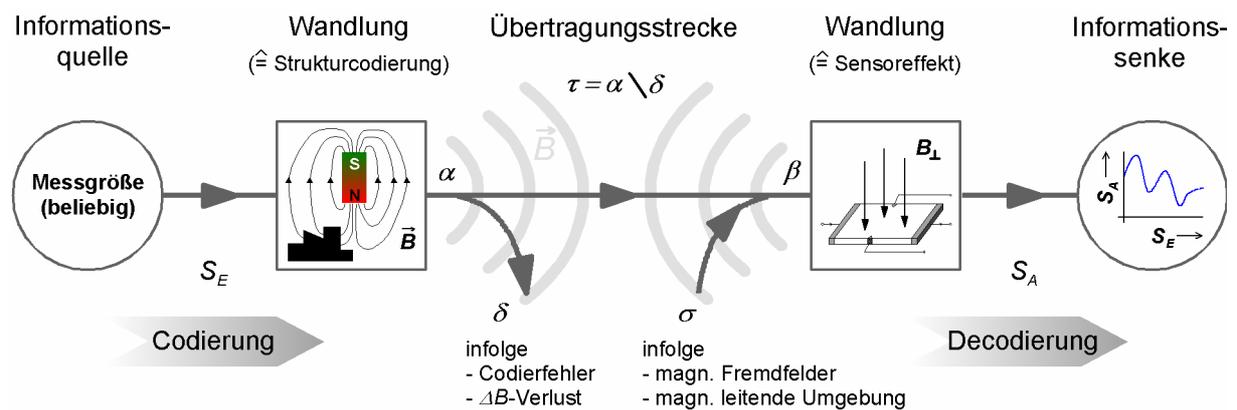


Bild 2.8: Informationstheoretisches Modell zur Informationscodierung durch strukturierte Komponenten galvanomagnetischer Sensorsysteme

α – gesendete Information (Quellenentropie); δ – Verlustinformation (Äquivokation);
 σ – Störinformation (Irrelevanz); β – empfangene Information (Senkenentropie); τ – Transinformation;
 S_E – Messgröße; S_A – elektrische Ausgangsgröße; B – magnetische Induktion; ΔB – gesamte Abnahme der magnetischen Induktion, z. B. aufgrund der Eigenschaften der Übertragungsstrecke

Die Information „Messgröße“ liegt in der Struktur einer Systemkomponente, beispielsweise in derjenigen des oder der Bezugselemente(s). Diese Codierung stellt eine eindeutige Zuordnung von Struktur und Messgröße dar und ist somit prinzipiell vom Anwendungsfall abhängig. Einzelne Strukturvarianten der Komponenten repräsentieren dann wiederum einzelne Codezeichen bzw. Codeelemente. Die Kombination mehrerer Strukturvarianten, deren messtechnische Erfassung sowohl zeitgleich als auch seriell erfolgen kann, führt zur Bildung von Codewörtern.

Aus nachrichtentechnischer Sicht ist die Übertragungsstrecke der Weg, den das informationsmodulierte Signal zwischen Sender und Empfänger zu überwinden hat. Das Signal entspricht bei galvanomagnetischen Sensorsystemen dem permanentmagnetischen Feld, dessen Modulation durch die strukturierten Komponenten (Sender) in einer Amplitudenänderung der in der Sensorebene (Empfänger) senkrecht stehenden Komponente B_z der magnetischen Flussdichte zum Ausdruck kommt. Die Übertragungsstrecke wird durch den freien Raum gebildet, kann aber zusätzliche feldführende Elemente enthalten. Sie ist also kein abgeschlossenes System. Dadurch kann das magnetische Feld auf der Übertragungsstrecke sowohl additive als auch subtraktive Veränderungen durch die Einflüsse der Umgebung erfahren, vgl. Bild 2.8, die ebenso Auswirkungen auf die Intensität der relevanten Feldkomponente in der Sensorebene – und damit im ungünstigen Fall auch auf die empfangene Information – haben. Störgrößen auf der Übertragungsstrecke führen daher zu fehlerhaften Informationen oder gar zu Informationsverlust.

2.4.2 Systemfreiheitsgrade

Als konstruktiver *Freiheitsgrad* – wichtig für die Codierung der Information durch die Systemkomponenten – wird in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2861 prinzipiell die Anzahl der unabhängigen freien Gestaltelemente der einzelnen Systemkomponenten definiert [VDI-88]. Ein hoher Systemfreiheitsgrad wäre bei theoretisch freier Gestaltung der einzelnen Komponenten mit freier innerer Strukturierung und Materialwahl gegeben.

Die Anzahl der Systemfreiheitsgrade ist bei der Konstruktion eines galvanomagnetischen Sensorsystems anwendungsabhängig beschränkt. Während einerseits die gewünschte Information, also die Messgröße, und/oder die spezifischen Umgebungsbedingungen, also die Störgrößen, sowie etwaige Randbedingungen am Einsatzort des messtechnisch zu überwachenden Objekts bereits das Sensorprinzip festlegen, wird andererseits mitunter die Baugröße des Sensorsystems durch das am Messort zur Verfügung stehende Bauvolumen, also durch eine weitere Randbedingung begrenzt. Das Zusammenwirken dieser Faktoren bei der Festlegung des Systemaufbaus lässt sich allgemein anhand einer Black-Box-Darstellung [GER-98] verdeutlichen, Bild 2.9.

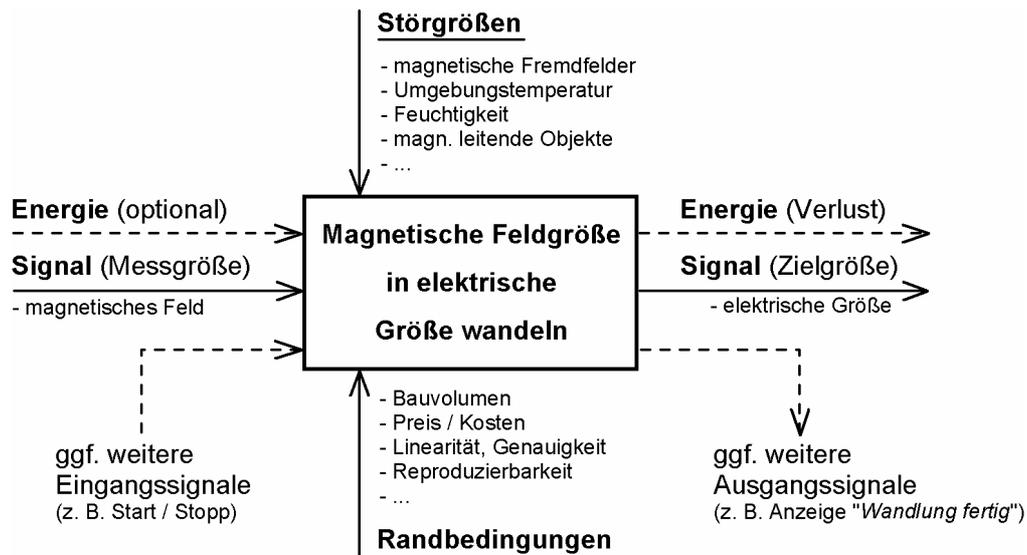


Bild 2.9: Black-Box zur Darstellung der Einschränkung der Systemfreiheitsgrade

Volumenbeanspruchende Freiheitsgrade wie Anzahl, Lage und Größe der Systemkomponenten sind für das Beispiel eines eingeschränkten Bauvolumens eher ungünstig, jedoch nicht immer vermeidbar. Es gilt somit, unter Berücksichtigung des festgelegten Messprinzips einen Kompromiss zwischen dem benötigten Bauvolumen und den ausreichenden Freiheitsgraden bei der Sensorentwicklung zu finden.

Es ist daher notwendig, vor der Neu- oder Änderungskonstruktion [GER-98] eines Sensorsystems dessen durch Strukturvariation der Komponenten erzielbare Anzahl an Freiheitsgraden, welche als potenzielle Informationsträger für die anwendungsabhängige Menge unterschiedlicher Informationen dienen können, zu ermitteln.

2.4.3 Informationsgehalt und Strukturvariation

Sensorsysteme lassen sich neben anderen Klassifizierungsarten auch hinsichtlich des übertragbaren Informationsgehaltes unterscheiden. Dabei entspricht der *mittlere Informationsgehalt* H eines Sensorsystems gemäß

$$H = - \sum_{i=1}^{U_{EI}} \Pr(EI_i) \cdot \text{Id}(\Pr(EI_i)) \quad \text{Gl. (2.25)}$$

mit dem Umfang U_{EI} der Menge aller unterscheidbaren Einzelinformationen EI , welche durch mögliche Strukturvariationen der Komponenten eines Sensorsystems erzeugbar sind, der Anzahl unterscheidbarer Einzelinformationen, die in einem festgelegten Zeitraum erzeugt bzw. empfangen werden können. Andererseits definiert der

Begriff der *Informationsmenge* die Anzahl der insgesamt in diesem Zeitraum erzeugten bzw. empfangenen Informationen. Diese Informationen müssen jedoch nicht zwangsläufig hinsichtlich ihres Inhalts unterscheidbar sein, d. h. auch wiederholt gesendete bzw. empfangene Informationen zählen zur Informationsmenge. Eine hohe Informationsmenge kann also als große Datenmenge aufgefasst werden, die nicht zu einem äquivalenten Informationszuwachs führt.

Der mittlere Informationsgehalt H galvanomagnetischer Sensorsysteme mit strukturierten Komponenten entspricht nach der genannten Definition der Anzahl verschiedener Aufbauvarianten, die als Einzelinformationen EI in einem festgelegten Zeitraum zu unterscheidbaren Sensorsignalen führen bzw. führen können. Unter Berücksichtigung der Definition der Systemstruktur in Kapitel 2.3.2 begrenzt diese die Menge unterscheidbarer Aufbauvarianten derartiger Sensorsysteme. Dabei ist die tatsächlich zu realisierende Anzahl unterscheidbarer Aufbauvarianten von der Art der anwendungsspezifisch abzubildenden Information abhängig. Grundlegend unterscheidbar sind folgende Informationsarten:

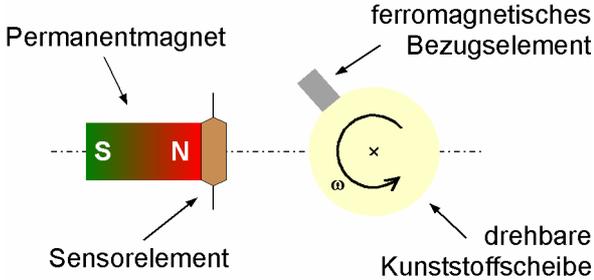
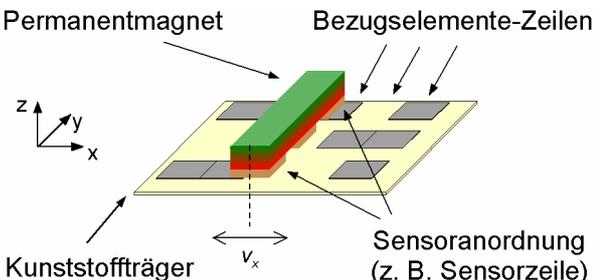
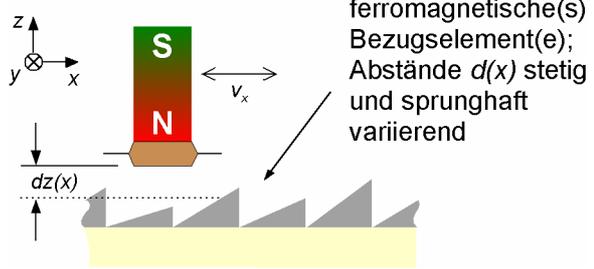
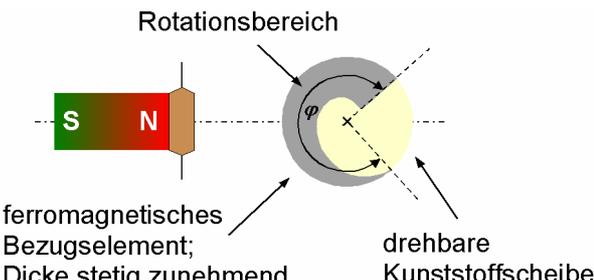
- a) digitale Information,
- b) diskrete Information,
- c) sprunghaft veränderliche Information und
- d) stetig veränderliche Information.

Jede Informationsart erfordert eine äquivalente Systemstruktur, damit der resultierende Informationsgehalt des Sensorsystems grundsätzlich der notwendigen bzw. der theoretisch möglichen Zahl unterscheidbarer Informationen im jeweiligen Anwendungsfall genügt.

Denkbare charakteristische Systemstrukturen sind in der nachfolgenden Tabelle 2.4 am Beispiel strukturierter Bezugselemente angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier nur die vier genannten Grundarten von Informationen berücksichtigt. In der Praxis sind aber darüber hinaus Mischformen von Informationen möglich, die unter Umständen entsprechend ausgelegte Kombinationen bzw. Überlagerungen derartiger Strukturen nach Tabelle 2.4 bedingen.

Tabelle 2.4: Beispiele für Systemstrukturen mit unterschiedlichem mittlerem Informationsgehalt H für verschiedene Informationsarten

dz – Abstand zwischen dem Bezugselement und der Sensorebene; v – Geschwindigkeit; φ – Drehwinkel;
 ω – Winkelgeschwindigkeit

Informationsart	mittlerer Informationsgehalt H	Systemstruktur (Beispiele)
digital	1 Bit	 <p>Permanentmagnet ferromagnetisches Bezugselement Sensorelement drehbare Kunststoffscheibe</p>
diskret	n Bit	 <p>Permanentmagnet Bezugselemente-Zeilen Kunststoffträger Sensoranordnung (z. B. Sensorzeile)</p>
sprunghaft veränderlich	$n \times \infty$ Bit	 <p>ferromagnetische(s) Bezugselement(e); Abstände $d(x)$ stetig und sprunghaft variierend</p>
analog	∞ Bit	 <p>Rotationsbereich ferromagnetisches Bezugselement; Dicke stetig zunehmend drehbare Kunststoffscheibe</p>

2.4.4 Informationsträger durch Strukturierung

Als Träger strukturcodierter Informationen kommen grundsätzlich alle in Kapitel 2.3.2 aufgeführten Systemkomponenten, also felderzeugende, feldführende, sensitive und Bezugs-Elemente in Frage, jedoch ist deren jeweilige Einsatztauglichkeit stark anwendungsabhängig:

Die Strukturierung sensitiver Elemente ist nur bei Spezialanwendungen durchführbar, da sensitive Elemente im Allgemeinen nur in handelsüblicher und damit in vorgegebener Gestalt verfügbar sind. So ist beispielsweise ein Sensor bekannt geworden, der aus zwei ineinander verschachtelten, jeweils um einen Winkel von 45° verdrehten, magnetoresistiven Vollbrücken besteht [LEM-98]. Diese besondere Sensorstruktur dient ausschließlich der Erhöhung der Messgenauigkeit. Systemstrukturen aus mehreren Einzelsensoren sind hingegen durchaus üblich, z. B. in [ZAB-96]. Bei diesen Anwendungsbeispielen aus der Automobilindustrie ist die Strukturvariation jeweils bereits zur Erfüllung der Grundfunktion notwendig; eine Codierung von Zusatzinformationen ist dabei nicht möglich. Eine „echte“ Strukturvariation von Sensorelementen stellt ein 3D-Sensor zum Einsatz in der Medizin auf der Basis von vier strukturvariierten Differenzial-Feldplatten dar [PIT-94]. Bei diesem Sensor wird durch die Strukturvariation der sensitiven Systemkomponente eine dreiaxige Bewegungserfassung des Messobjekts möglich. Bild 2.10 zeigt für dieses am Fachgebiet Elektromechanische Konstruktion der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg entwickelte Sensorsystem als Anwendungsbeispiel die Positionsüberwachung des Endoprothesenkopfes in künstlichen Hüftgelenken [VIG-94].

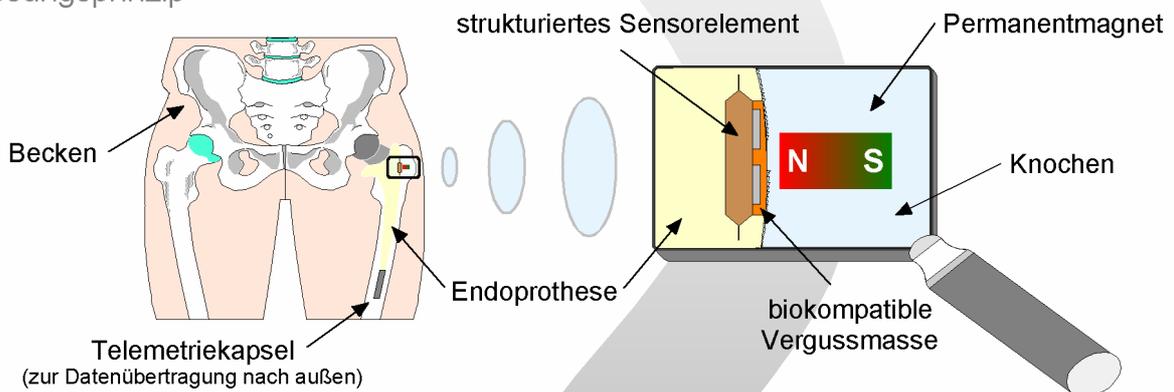
Die Strukturierung felderzeugender Elemente galvanomagnetischer Sensorsysteme, also von Permanentmagneten mit oder ohne feldführende Elemente ist für einzelne Anwendungsfälle gut geeignet und schon aus Kostengründen der zuvor genannten Strukturvariation von Sensorelementen im Hinblick auf die Attraktivität am Markt bei der Entwicklung neuartiger Sensoranwendungen vorzuziehen. Sowohl durch eine geometrische Strukturierung, durch Anordnung mehrerer felderzeugender Elemente als auch durch geeignete Werkstoffwahl bei der Konstruktion der Elemente lassen sich definierte Verläufe des magnetischen Flusses erzeugen. Bild 2.11 zeigt im Anschluss ein Anwendungsbeispiel für eine hochgenaue Positionsmessung in fluidischen Antrieben, bei dem ein möglichst steiler Induktionsverlauf in einer vorgegebenen Ebene zu realisieren ist [PIT-99b].

Problemstellung

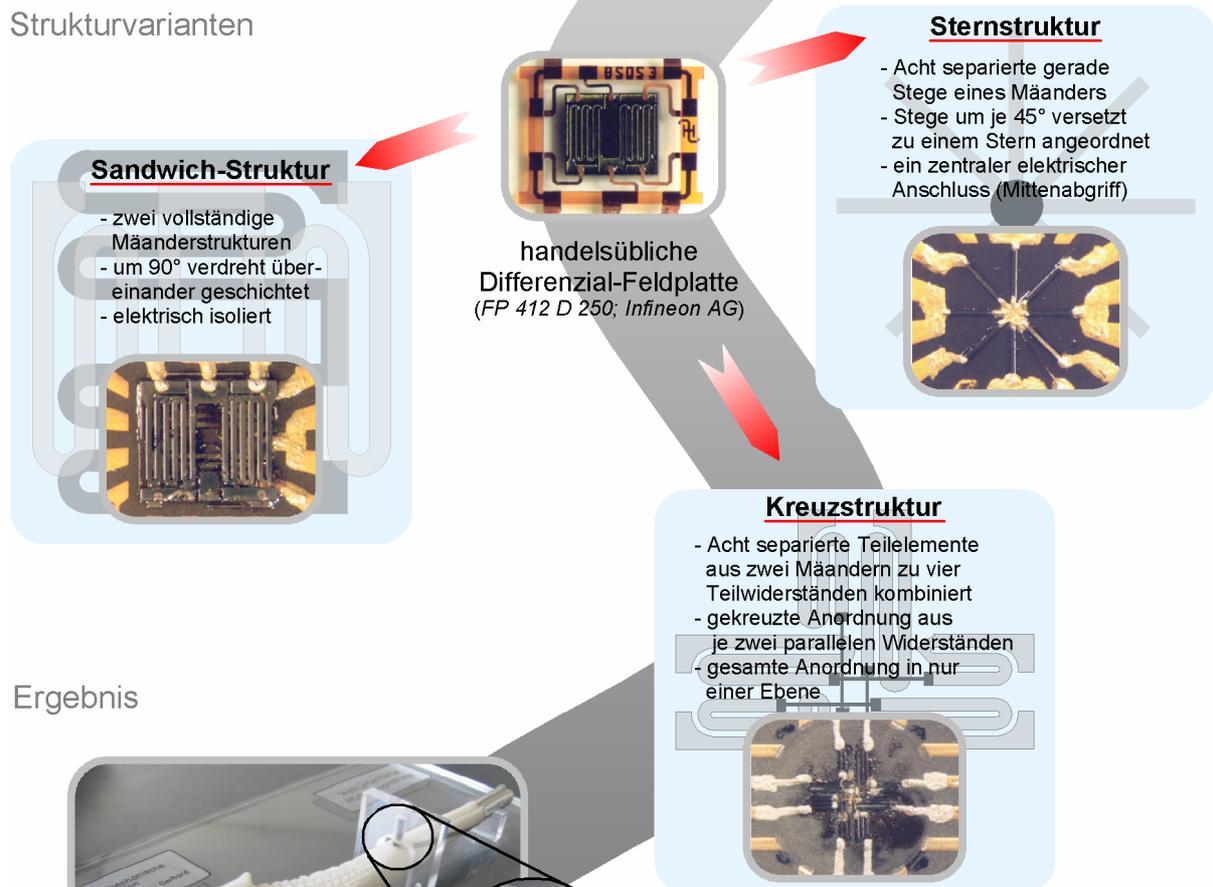
Prothesenbewegung in vivo erfassen

Träger von künstlichen Hüftgelenkendothesen klagen vielfach über postoperative Schmerzen. Diese sind auf eine Lockerung der Verbindung zwischen dem Oberschenkelknochen und der Prothese zurückzuführen. Um einer solchen Lockerung vorzubeugen, ist es notwendig, die potenziell dreidimensional auftretenden Relativbewegungen frühzeitig messtechnisch zu erfassen.

Lösungsprinzip



Strukturvarianten



Ergebnis

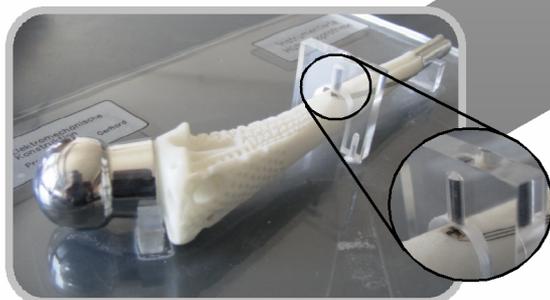


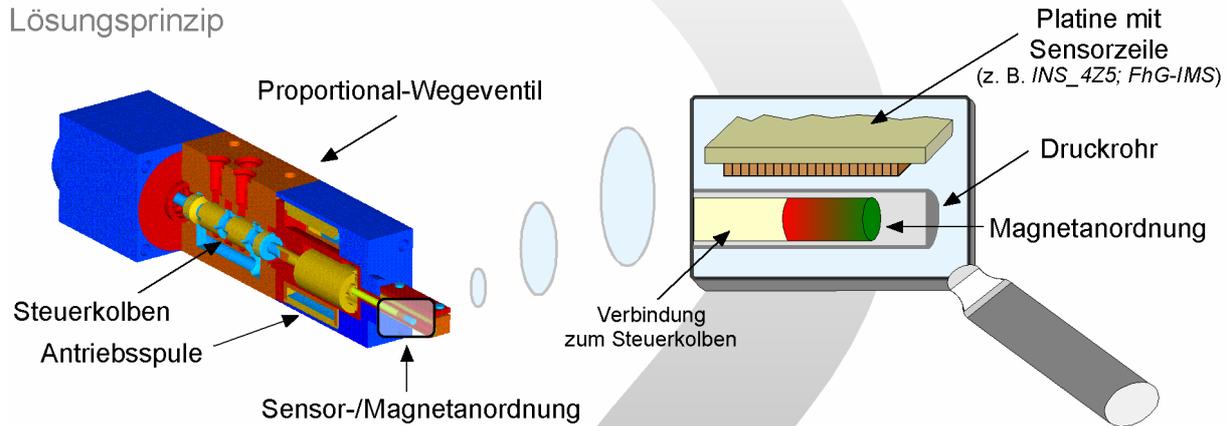
Bild 2.10: Strukturvarianten *sensitiver* Sensorsystem-Komponenten

Problemstellung

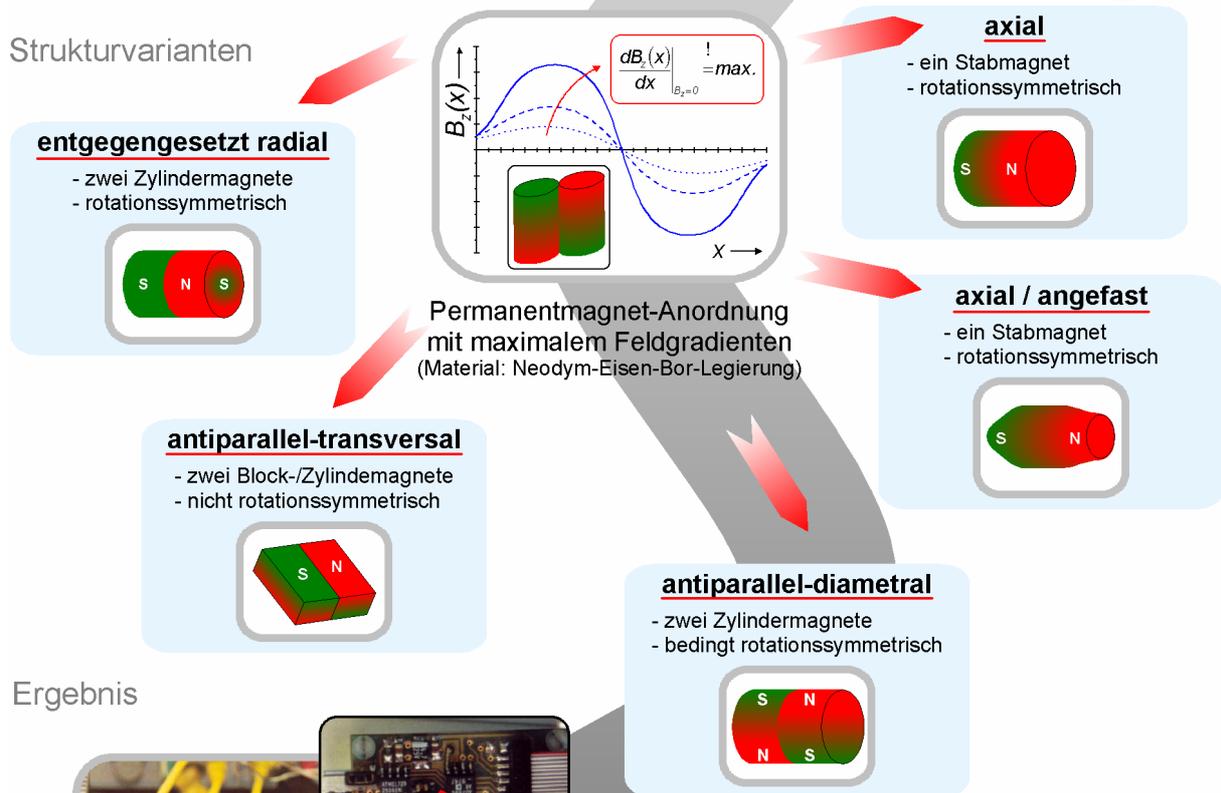
Steuerkolbenstellung in Ventilen fluidischer Antriebe erfassen

Proportional-Wegeventile steuern bzw. regeln den Fluss des Fluids zwischen den Druckbehältern und den Stellzylindern fluidischer Antriebe. Der Volumenstrom wird hier über die Position des magnetisch angetriebenen Steuerkolbens eingestellt. Die notwendige Positionskontrolle ist z. B. mit einer Sensorzeile aus galvanomagnetischen Sensoren möglich, die ständig den Nulldurchgang des Magnetfeldes detektiert. Voraussetzung für eine ausreichende Genauigkeit ist ein maximal steiler Feldgradient.

Lösungsprinzip



Strukturvarianten



Ergebnis

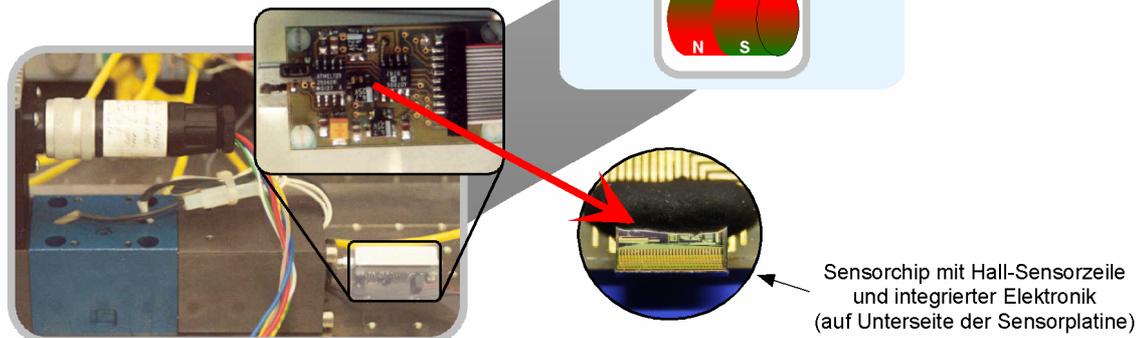


Bild 2.11: Strukturvarianten *felderzeugender* Sensorsystem-Komponenten
 B_z – Komponente in z-Richtung der magnetischen Induktion in der Sensorebene; $dB_z(x)/dx$ – Feldgradient

Eine Strukturierung der Bezugselemente, also der weichmagnetischen Komponente(n) eines galvanomagnetischen Sensorsystems, ist die aus herstellungstechnischer Sicht einfachste und zugleich kostengünstigste Methode der Informationscodierung mit strukturierten Sensorsystemen. Neben einer nahezu beliebigen geometrischen Strukturierung mittels einfacher technischer Verfahren bieten auch die durch Variation der Position, der relativen Anordnung, der Anzahl bzw. der Kombination der Bezugselemente auftretenden Systemfreiheitsgrade ein enormes Potenzial im Hinblick auf die Codierung verschiedenartiger Informationen, vgl. Kapitel 2.4.3. Die Eigenschaft weichmagnetischer Bezugselemente, die Wirkkomponente des permanentmagnetisch erzeugten Feldes am Ort des sensitiven Elementes in Abhängigkeit der Messgröße zu beeinflussen, gewährleistet eine hohe Applikationsflexibilität galvanomagnetischer Sensorsysteme. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Varianten strukturierter Systeme lassen sich handelsübliche Standardbauteile für die felderzeugende und die sensitive Systemkomponente einsetzen. Dies ermöglicht eine kostengünstige Realisierung applikationsspezifischer Sensorsysteme.

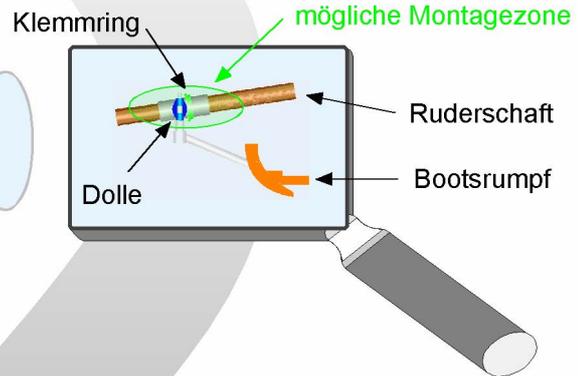
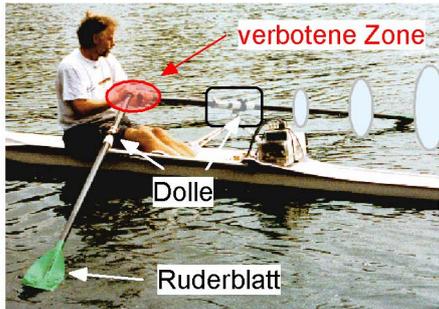
Der im Rahmen dieser Arbeit am Fachgebiet Elektromechanische Konstruktion der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg entwickelte Sensor zur Bestimmung des Ruder-Blattstellwinkels an Sportruderbooten stellt ein praxisnahes Anwendungsbeispiel für den Einsatz galvanomagnetischer Sensorsysteme mit strukturvariierten Bezugselementen im Bereich der berührungslosen Positionserfassung – hier: Winkelerfassung – dar. Dieser Sensor bildet einen Teil des komplexen Messsystems *SensoRow* zur Aufnahme aller vier potenziell während des Rudervorganges auftretenden, relativen kinematischen Größen zwischen Ruder und Dolle [BEC-98, PIT-99a], Bild 2.12.

Problemstellung

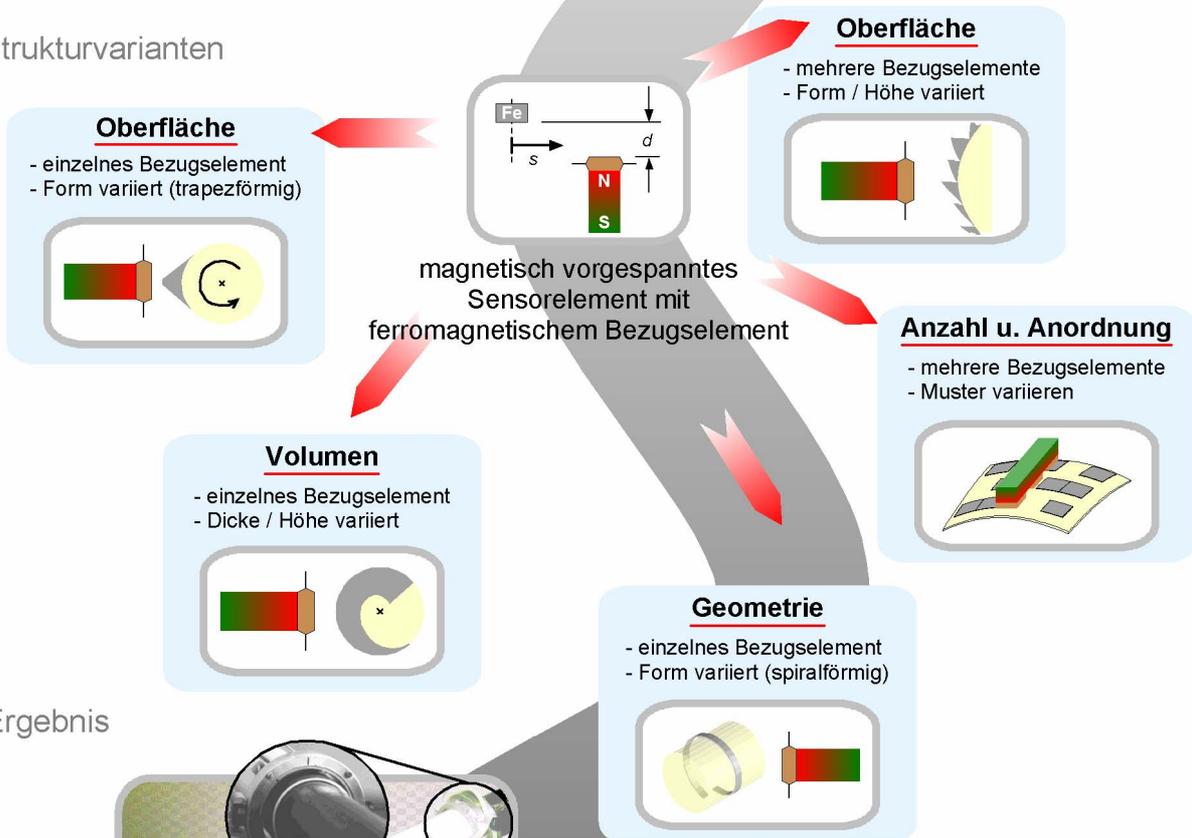
Stellwinkel des Ruderblattes an Bord erfassen

Die Optimierung der komplexen Bewegung eines Ruders in der Dolle und damit der Bewegungskoordination eines (Renn-)Ruders ist eine Voraussetzung für dessen Leistungszunahme. Eine messtechnische Analyse der Ruderbewegung muss daher u. a. den Blattstellwinkel, der den Winkel zwischen dem Ruderblatt und der Wasserlinie beschreibt, einschließen. Ein entsprechendes Sensorsystem muss unauffällig und ohne Beeinträchtigung der Bewegungsfreiheit des Ruders an das System Ruder/Boot adaptiert werden.

Lösungsprinzip



Strukturvarianten



Ergebnis



Bild 2.12: Strukturvariierte ferromagnetische Sensorsystem-Bezugselemente
d – Abstand zwischen Bezugselement und Sensorebene; *s* – Position des Bezugselements

2.5 Strukturierte Sensorsysteme für spezielle Anwendungsfälle

Die Beispiele informationsabhängiger Systemstrukturen in Kapitel 2.4.3 verdeutlichen bereits die grundsätzliche Eignung galvanomagnetischer Sensorsysteme mit strukturierten Komponenten für nahezu beliebige Aufgaben der Informationserfassung. Die Auswahl der zu strukturierenden Systemkomponente sowie des oder der informationstragenden Strukturmerkmals/-merkmale kann jedoch nur individuell für jede Applikation in Abhängigkeit

- des Messobjektes (besitzt Materialeigenschaften, Geometrie, ...),
- der Messgröße bzw. der Information (bestimmt Informationsart und Informationsgehalt) sowie
- der anwendungsspezifischen Randbedingungen und Störgrößen

erfolgen.

Die folgenden Kapitel stellen spezielle, hinsichtlich des Aufgabenschwerpunktes grundlegend unterschiedliche Anwendungsfälle vor, deren besondere Problematiken durch die Entwicklung neuartiger galvanomagnetischer Sensorsysteme mit strukturierten Komponenten gelöst werden konnten:

- Aus messtechnischer Sicht gehört die Positionsbestimmung mithilfe galvanomagnetischer Sensorsysteme zu den Standardanwendungen und bedarf eigentlich keiner genaueren Betrachtung. In den meisten Fällen reichen einfache 2-Komponenten-Systeme, bestehend aus einem Permanentmagneten und einem handelsüblichen Sensorelement, aus, um beispielsweise die Position oder den Weg eines Messobjektes anhand des Abstandes zwischen den Sensorsystem-Komponenten zu bestimmen. Besondere Randbedingungen, wie etwa ein begrenztes Bauvolumen, die Bedienung eines zu überwachenden Objektes oder die Größe des Messbereiches, bedingen ebenso wie etwaige Störgrößen am Einsatzort einen speziellen Aufbau der Messsysteme. Kapitel 3 zeigt anhand zweier Praxisbeispiele besondere Anforderungen an die Sensortopologie hinsichtlich der Linearität des Messsignals (Kapitel 3.1) sowie hinsichtlich des Verlaufes des magnetischen Erregerfeldes (Kapitel 3.2), welche durch Sensorsysteme mit strukturierten Komponenten erfüllt werden können.

- Neben dem Einfluss von Randbedingungen und Störgrößen stellen insbesondere die mechanische Fertigung der Sensorkomponenten, die Montage des Systems sowie die Adaption an das Messobjekt Problematiken bei der Realisierung von galvanomagnetischen Sensorsystemen zur Positionsbestimmung dar. Die in diesen Bereichen vorhandenen vielfältigen Fehlerquellen erfordern eine genaue Kontrolle der Sensoren vor der Inbetriebnahme sowie in regelmäßigen Abständen während der Nutzungsphase. Jedoch ist die Prüfbarkeit adaptierter Sensorsysteme auf Fertigungsfehler und/oder mechanische Veränderungen oftmals – vor allem optisch – nicht oder nicht ausreichend möglich. Kapitel 3.3 erläutert anhand des Praxisbeispiels aus Kapitel 3.2 die insbesondere unter dem Aspekt der Qualitätssicherung notwendige Detektion von Strukturfehlern bei galvanomagnetischen Sensorsystemen.
- Eine besondere Problematik stellt im Bereich der Magnetosensorik die Erfassung von Geometrieigenschaften nichtmagnetischer Objekte mit (galvano-)magnetischen Sensorsystemen dar. Ist zudem eine Montage felderzeugender oder magnetisch leitender Elemente (Bezugselemente) an dem nichtmagnetischen Messobjekt ausgeschlossen, so bieten sich Sensorsysteme mit strukturierten Komponenten zur Vermessung dieser Objekte an. Kapitel 4 erläutert allgemein die genannte Problematik sowie deren Lösung mit strukturierten Sensoren und stellt ein spezielles Praxisbeispiel ausführlich vor.
- Neben der Erfassung von Informationen über den jeweils aktuellen Zustand physikalischer Messgrößen – vgl. Bild 2.8 in Kapitel 2.4.1 –, die normalerweise einen beliebigen Wert aus dem durch die Randbedingungen der Messaufgabe festgelegten Wertebereich beinhalten können, kann ein Sensorsystem auch zur Erfassung und Übertragung definierter Informationen dienen. Diese diskreten Elemente aus einer begrenzten Menge möglicher Informationen stellen besondere Anforderungen an die Codierung, Erfassung und Auswertung durch das eingesetzte Sensorsystem. Kapitel 5 stellt ein neuartiges System auf der Basis strukturierter galvanomagnetischer Sensorsysteme vor, welches sich vor allem unter besonderen Einsatzbedingungen gegenüber den bereits am Markt etablierten Systemen auszeichnet.