

3 Anwendungsbedingte Problematiken der Topologie galvanomagnetischer Sensorsysteme

3.1 Optimierung von Messsignal-Verläufen

3.1.1 Drehwinkelerfassung abseits der Rotationsachse

Eine typische Standardanwendung galvanomagnetischer Sensorsysteme ist die Positionsbestimmung beweglicher Messobjekte. Einen Teilbereich bildet hier die Winkelmessung bei Rotationsbewegungen. Aus der Literatur sind für diesen Anwendungsbereich viele Sensorsysteme mit permanentmagnetisch angesteuerten Sensoren bekannt, z. B. [JUC-89, LEM-98]. In den letzten Jahren konnte unter Ausnutzung der „neuen“ magnetoresistiven Effekte (XMR-Effekte [VDI-97b]) eine Vielzahl weiterer magnetischer Winkelsensoren entwickelt werden [POP-01, SCH-01, ZAB-96]. Diese vornehmlich auf Basis des AMR- und des GMR-Effektes (Kapitel 1.2) realisierten Systeme unterliegen jedoch wenigstens einer der folgenden Voraussetzungen:

- Felderzeugende und sensitive Sensorsystem-Komponenten sind auf bzw. in Verlängerung der Drehachse angebracht, Bild 3.1a, oder
- das Messobjekt weist winkeläquivalent magnetisierte Bereiche oder magnetisch leitende, auswertbare Strukturen auf, Bild 3.1b.

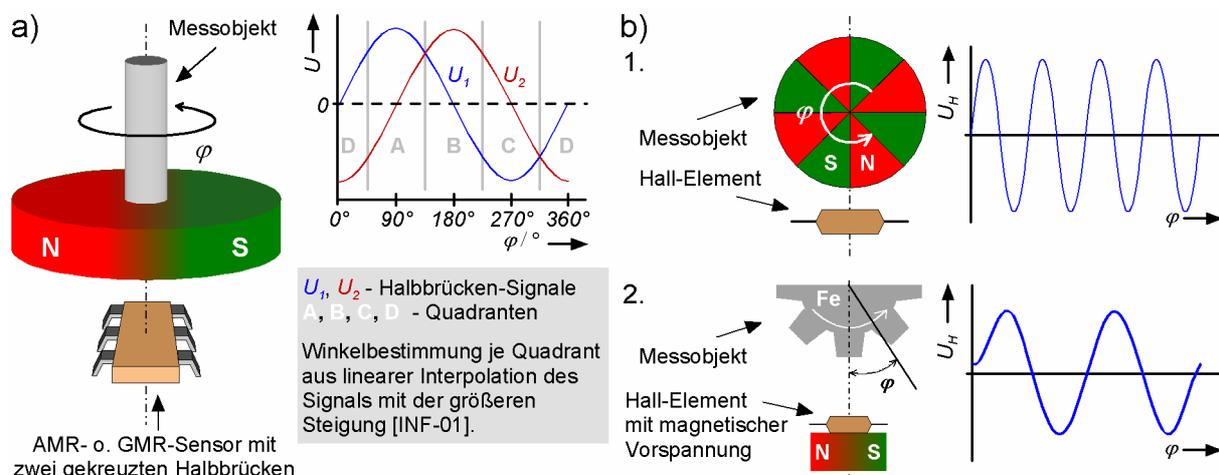


Bild 3.1: Typische magnetische Winkel- und Drehzahlsensoren

- a) Absolut-Winkelsensor mit AMR- o. GMR-Sensorelement und flächig magnetisierter Kreisscheibe [TRE-01]
 b) Inkremental-Winkel- oder Drehzahlsensoren mit Hall-Elementen:
 1. Messobjekt mit Wechselseitigmagnetisierung; 2. Sensor magnetisch vorgespannt, Messobjekt magn. leitend
 φ – Drehwinkel; Fe – Eisen (ferromagn. Bezugselement); U – elektrische Spannung; U_H – Hall-Spannung

Systemtopologien nach Bild 3.1 sind für den Großteil denkbarer Anwendungsfälle ausreichend oder sogar ideal, um eine störungs- und rückwirkungsfreie Messung der Drehzahl oder des Rotationswinkels eines Messobjekts zu ermöglichen.

Es gibt hingegen eine große Zahl von Anwendungsfällen, welche die Adaption derartig konstruierter Messsysteme nicht oder nur bedingt zulassen. Gründe dafür können einerseits ein begrenztes Platzangebot, Störgrößen wie z. B. magnetische Fremdfelder sowie die Umgebungstemperatur am notwendigen Montageort sein. Andererseits könnte die Montage in Verlängerung der Rotationsachse des Messobjektes zu einer Rückwirkung auf die Messung oder zu einer Beeinträchtigung der Handhabung bzw. der Bewegungsfreiheit führen. Eine Lösung für solche Praxisprobleme bei der Sensorentwicklung bieten strukturierte Komponenten galvanomagnetischer Sensorsysteme. Der relevante Winkelbereich wird so auf die Struktur einer Sensorkomponente projiziert, dass die ursprünglich rotatorische Bewegung eines Messobjektes in eine translatorische Relativbewegung zwischen der felderzeugenden Komponente bzw. der Bezugskomponente und der sensitiven Komponente überführt wird, Bild 3.2. Beispielsweise eignet sich das Geometriemerkmale „Form“ eines am Messobjekt adaptierten, weichmagnetischen Bezugselementes sehr gut als Informationsträger, um eine reproduzierbare Winkelbestimmung zu gewährleisten.

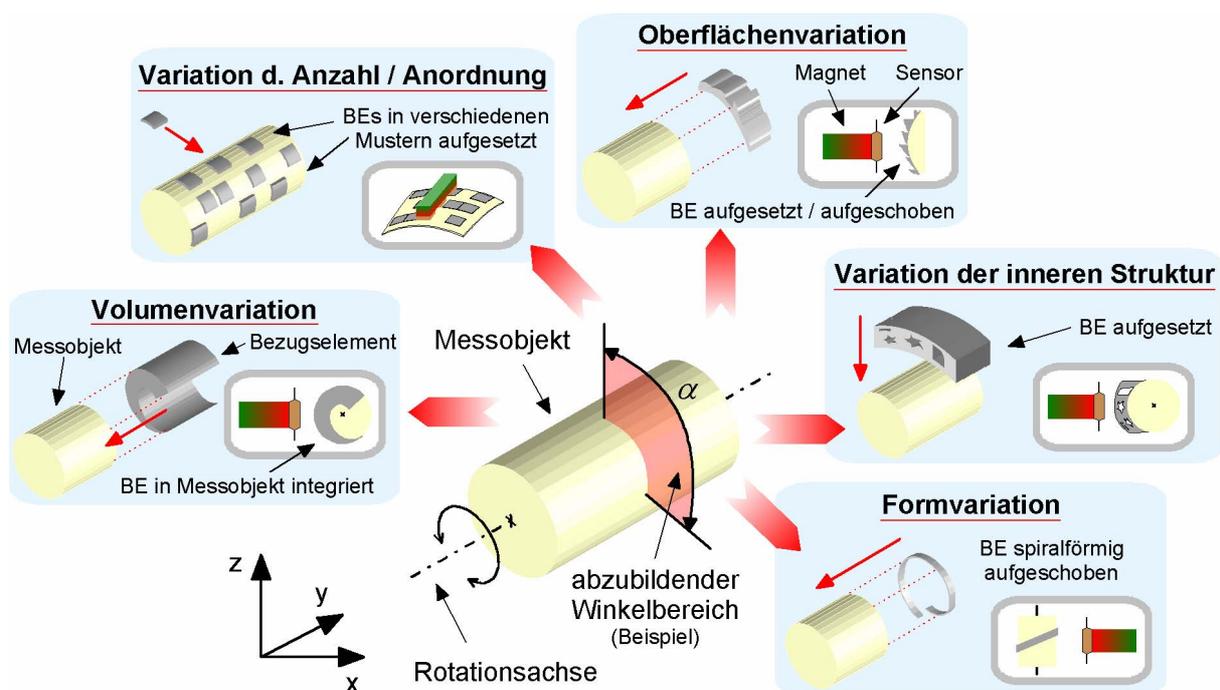


Bild 3.2: Sensorsystem-Varianten mit strukturierten Bezugselementen zur Erfassung von Rotationsbewegungen eines Messobjektes

α – abzubildender Drehwinkel(-bereich); BE – Bezugselement

Die Anordnung mit einem formvariierten Bezugselement nach Bild 3.2 mit nur einem Sensorelement ermöglicht jedoch keine bzw. nur für sehr kleine Winkelbereiche eine eindeutige Zuordnung zwischen einer Winkelstellung und einem expliziten Messwert. Ein zugehöriger Signalverlauf weist nur geringfügig lineare Bereiche auf und ermöglicht so Mehrfachzuordnungen zwischen einem Messwert und verschiedenen Winkelpositionen. Aus diesem Grund ist zumindest ein zweiter Sensor notwendig, um über eine Differenzbildung aus zwei Einzel-Signalverläufen für den gesamten relevanten Winkelbereich einen resultierenden linearen Signalverlauf zu erzeugen. Über die Differenzschaltung zweier galvanomagnetischer Einzelsensoren ist dann auch die Erfassung von Drehwinkeln bis annähernd $\varphi = 360^\circ$ möglich, sofern der Abstand a_{SE} und die Breite b_{SE} der Sensorelemente der Breite b des Bezugselements entsprechen und die geometrische Steigung ψ der Spiralform der Beziehung

$$\psi = \arctan\left(\frac{2b}{\pi r}\right) \quad (\text{Gl. 3.1})$$

mit dem Radius r genügt, Bild 3.3. Neben der Bezugselementform als Informationsträger existiert mit der definierten Sensoranordnung ein zweites Strukturmerkmal.

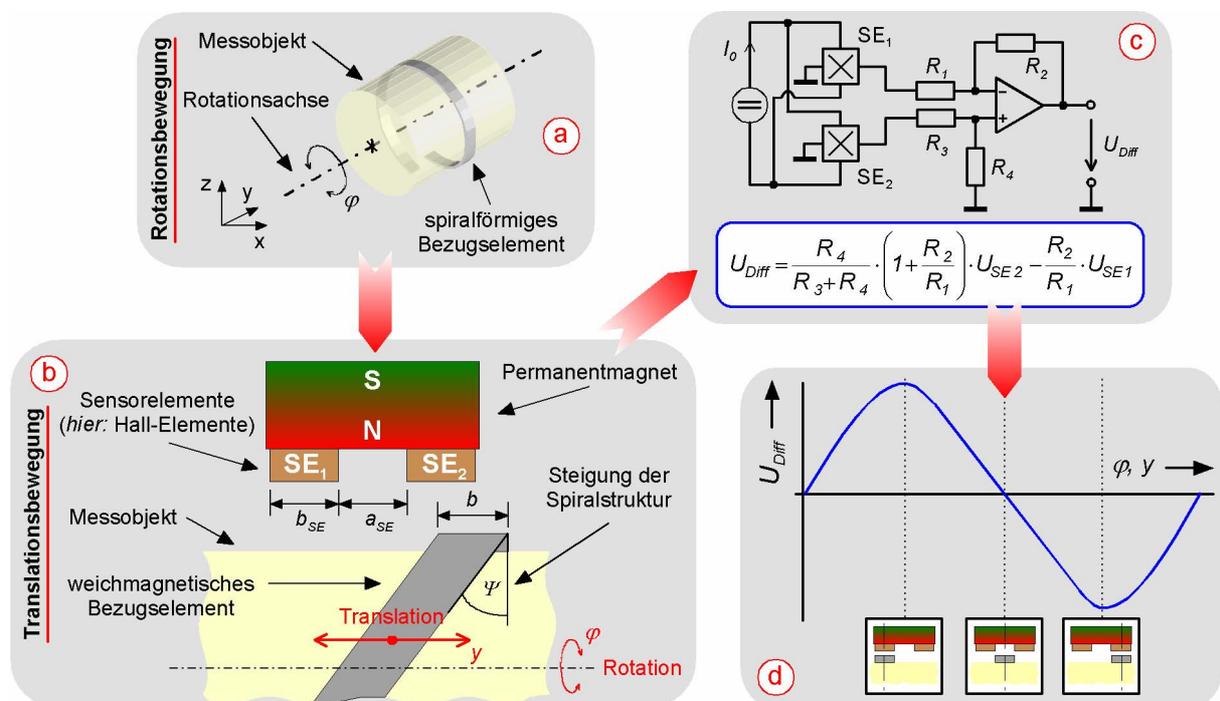


Bild 3.3: Rotationsbewegungen mit strukturierten Sensoren erfassen

- Anordnung des spiralförmig strukturierten Bezugselements auf einem rotierenden Messobjekt
- Prinzipdarstellung zur Übertragung der Rotationsbewegung auf die Translationsbewegung des BEs
- Elektronische Auswerteschaltung: Differenzverstärker, z. B. in [TIE-90]
- Resultierender Signalverlauf U_{Diff} der Sensoranordnung nach b) in Abhängigkeit des Drehwinkels φ

a_{SE} – Abstand der Sensorelemente ($SE_{1,2}$); b_{SE} – Breite der Sensorelemente; b – Breite des Bezugselements; y – Position des Bezugselements; R – elektrischer Widerstand; ψ – Steigung der Spiralstruktur

3.1.2 Praxisbeispiel: Blattstellwinkel-Sensor für Ruder-Messsystem

Ein Praxisbeispiel für ein Winkelmesssystem nach Kapitel 3.1.1 ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Blattstellwinkel-Sensor, ein Teilsystem des „*Mobilen Sensorsystems zur Erfassung der komplexen Ruder-Bewegung – SensoRow*“, welches bereits in Kapitel 2.4.4 als einfaches Beispiel für eine Strukturierung der Sensorsystem-Komponente *Bezugselement* vorgestellt wurde.

Das Messsystem *SensoRow* dient durch Erfassung der individuellen Rudertechnik ebenso zur Kontrolle des Trainingsfortschritts bei Leistungssportlern wie auch zur Unterstützung des Kompetenzerwerbs bei Ruderanfängern. Der Lerneffekt im Hinblick auf eine Optimierung der Koordination der einzelnen Bewegungsabläufe beim Rudern wird durch die Möglichkeit der Visualisierung der Bewegungsdaten erzielt. Ein systemeigener Datenspeicher ermöglicht zudem eine spätere, betreute Fehlerdiskussion mit dem Trainingspersonal. Weiterführende Informationen zur Intention bei der sensorischen Überwachung der Ruder-Bewegung finden sich in [LIP-98a, LIP-98b], zu allen Komponenten des Messsystems *SensoRow* in [BEC-98, MÜL-00].

Die Trainingsunterstützung setzt eine rückwirkungsfreie und optisch unauffällige Datenerfassung direkt an der Aufnahme des Ruders am Boot, der so genannten Dolle, voraus. Die Dolle bildet in Verbindung mit dem Bootsrumf das Bezugssystem für die aufgenommenen Bewegungsdaten. Dadurch bedingt ist zur zeitkontinuierlichen Messung des Blattstellwinkels, der die Winkelstellung des Ruderblattes relativ zur Wasserlinie angibt, ein Sensorsystem erforderlich, welches abseits der Ruderlängsachse – entspricht der Rotationsachse – eingesetzt werden kann, um zudem die Bedienung durch den Ruderer nicht zu behindern [PIT-99a]. Die Realisierung eines solchen Messsystems wird durch Strukturvariation eines weichmagnetischen Ringes nach dem in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Prinzip möglich.

Bild 3.4 stellt abschließend kurz das mobile Sensorsystem zur Erfassung der komplexen Ruder-Bewegung (*SensoRow*) vor und zeigt die Integration des strukturvariierten Bezugselements in die mechanischen System-Komponenten. Neben der Definition der aus sportwissenschaftlicher Sicht relevanten Messgrößen am Boot ist ein Ausschnitt aus einem mit *SensoRow* aufgenommenen Messprotokoll einer idealen Ruder-Bewegung dargestellt, der das Zusammenspiel der Größen erkennen lässt.

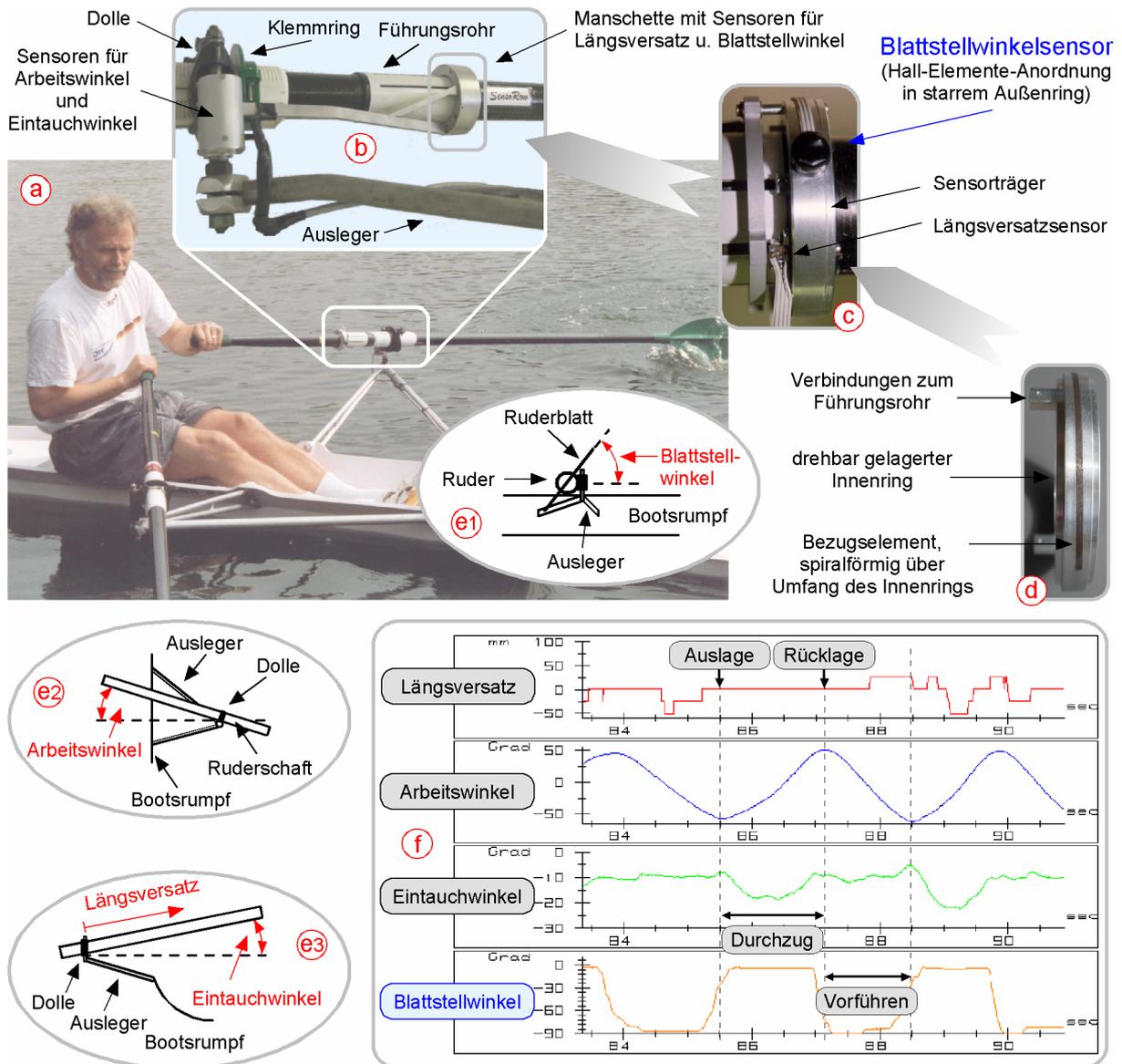


Bild 3.4: Mobiles Sensorsystem zur Erfassung der komplexen Ruder-Bewegung

- a) Mobiles Sensorsystem SensoRow im Einsatz an einem Renn-Ruderboot
- b) Adaptiertes Sensorsystem SensoRow mit Ausleger, Dolle und Ruderschaft
- c) Montierter Blattstellwinkelsensor mit starrem Außenring des Sensorträgers
- d) Spiralförmig in drehbar gelagerten Innenring eingelassenes, weichmagnetisches Bezugselement
- e) Zur Definition der Messgrößen (1) Blattstell-, (2) Arbeits- u. (3) Eintauchwinkel sowie Längsversatz
- f) Zeitparallele Darstellung aller vier Messgrößen; Auszug eines Messprotokolls [GER-99]

3.2 Optimierung der Messgenauigkeit

3.2.1 „Große“ Wege galvanomagnetisch messen

Eine hochauflösende Erfassung von in Bezug auf die Abmessungen der Sensoren-Komponenten „großen“ Wegen beweglicher Objekte ist mit den in Bild 3.5 dargestellten Standardkonfigurationen für Positionssensoren auf Basis galvanomagnetischer Effekte – vgl. Tabelle 2.3 – üblicherweise nicht oder nur bedingt möglich.

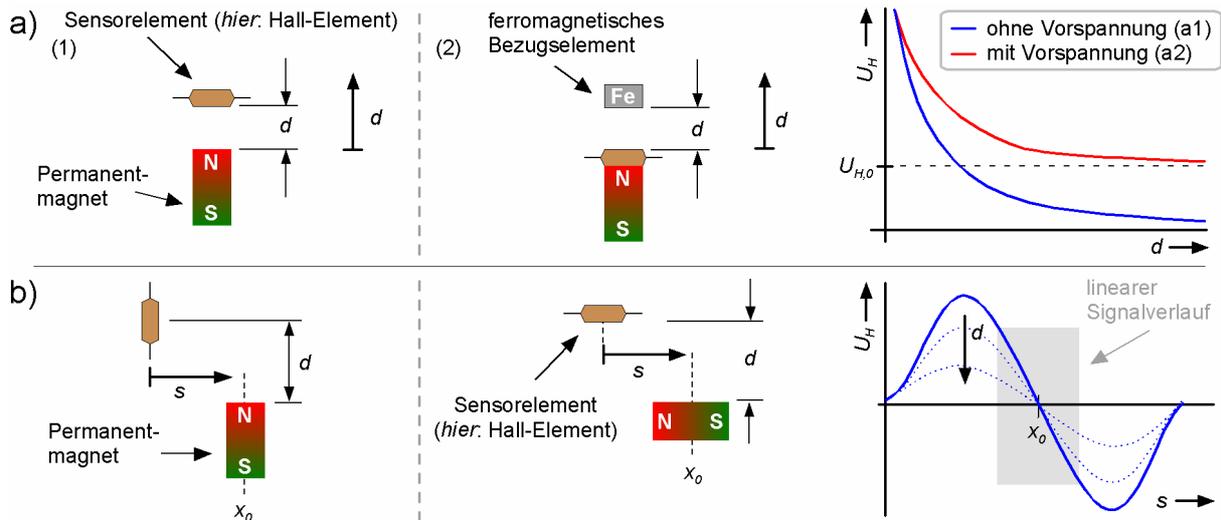


Bild 3.5: Beispiele galvanomagnetischer Standard-Positionssensoren
 a) Axialanordnungen (1: Abstandsmessung zw. Sensor u. Magnet; 2: Abstandsm. zum Bezugsэлемент)
 b) Transversalanordnungen (Position des Magneten nur im linearen Bereich eindeutig zu bestimmen)
 d – Abstand (Position); s – Strecke (Position); x_0 – Mittelstellung (Nullposition); $U_{H,0}$ – Hall-(Vor-)Spannung

Die Mängel der dargestellten Systeme sind neben der eingeschränkten Reichweite insbesondere in den nur sehr kleinen Messbereichen zu sehen, in denen ein (annähernd) linearer Messsignalverlauf zur eindeutigen Positionsbestimmung erzielt wird, Bild 3.5b. Diese Unzulänglichkeit wird umso deutlicher, je genauer die Position des Messobjektes erfasst werden muss. Gerade zur Bestimmung „großer“ Wege bieten sich daher Systeme mit einer Zeilenanordnung aus einzelnen galvanomagnetischen Sensoren parallel zur Bewegungsrichtung des Messobjektes an, Bild 3.6.

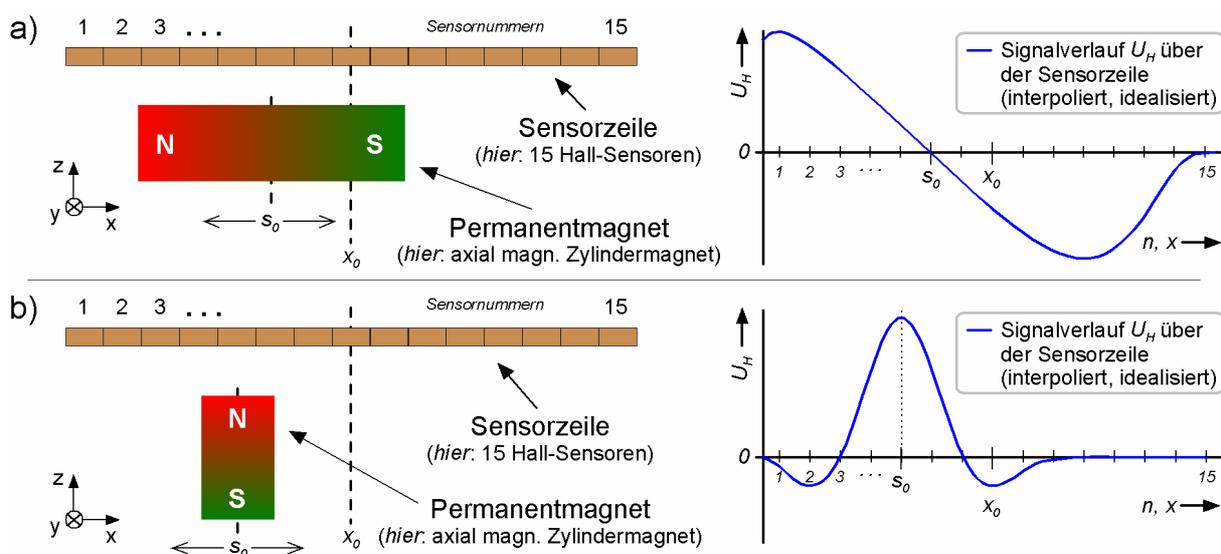


Bild 3.6: Positionssensoren aus mehreren Hall-Elementen in Zeilenanordnung
 a) Positionserfassung über Nulldurchgangsbestimmung des interpolierten Signalverlaufs, $U_H(s_0) = 0$
 b) Positionserfassung über Detektion des Maximums des interpolierten Signalverlaufs, $U_H(s_0) = U_{H,max}$
 n – Sensornummer; s_0 – Mitte des Permanentmagneten; x_0 – Mitte der Sensorzeile; U_H – Hall-Spannung

Die Positionsbestimmung des Messobjektes erfolgt bei beiden in Bild 3.6 dargestellten Systemen über Interpolation der Zwischenwerte aus den gemessenen Hall-Spannungen $U_{H,n}$ der n Einzelsensoren. Wie aus den gezeigten resultierenden Signalverläufen U_H ersichtlich, weist hier die Methode der Maximalwertbestimmung aufgrund des relativ flachen Signalverlaufes um den Scheitelwert deutliche Nachteile bezüglich der Messgenauigkeit gegenüber der Methode der Nullpunktbestimmung auf. Jedoch gilt auch für die Methode der Nullpunktbestimmung, dass der berechnete Nulldurchgang der Magnetfeldkomponente B_z , die senkrecht auf der Sensorebene steht, umso genauer und eindeutiger ist, je steiler der Gradient des Verlaufes dieser Feldkomponente im Bereich des Nulldurchgangs ist. Je genauer der Nulldurchgang der Magnetfeldkomponente bestimmt werden kann, umso genauer lässt sich die Position des Messobjektes ermitteln. Die Bedingungen für die Eindeutigkeit der ermittelten Objektposition lauten für diese Methode

$$B_z = f(x, dz) \quad (\text{Gl. 3.2})$$

und

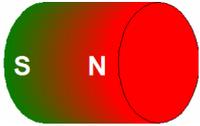
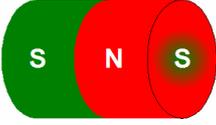
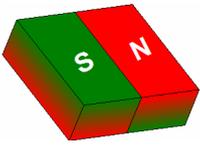
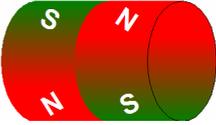
$$\left. \frac{dB_z(x)}{dx} \right|_{B_z=0} \stackrel{!}{=} \max. \quad \text{für } dz = \text{const.} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

mit dem Abstand dz zwischen der Oberfläche des Messobjektes bzw. der felderzeugenden Komponente und der Sensorebene (vgl. Bild 3.6).

Tabelle 3.1 stellt nachfolgend vier typische Permanentmagnet-Anordnungen vor, die prinzipiell zur Erfüllung der Bedingungen entsprechend Gl. 3.2 und Gl. 3.3 geeignet sind. Die Auswahl der optimal geeigneten Magnetanordnung ist allerdings von den speziellen Anforderungen eines jeweiligen Anwendungsfalles abhängig. Ein Beispiel hierzu ist in Kapitel 3.2.2 gegeben.

Neben der Anordnung der Magnete als informationstragendes Strukturmerkmal ist der Abstand dz zwischen der Magnetoberfläche und der aktiven Fläche der Sensorelemente von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der ermittelten Objektposition. Bild 3.7 demonstriert den starken Einfluss des Abstandes dz auf den Verlauf der magnetischen Feldkomponente B_z in der Sensorebene am Beispiel einer Anordnung aus zwei antiparallel diametral magnetisierten Stabmagneten. Die Messgenauigkeit derartiger Sensorsysteme lässt sich entsprechend durch die konstruktive Minimierung des Abstandes dz optimieren.

Tabelle 3.1: Magnetanordnungen für Positionssensoren aus Sensorzeilen

Magnetanordnung	Magnetisierungsrichtung	Eigenschaften / Einschränkungen
	axial	<ul style="list-style-type: none"> • miniaturisierbar • sehr kostengünstig • aus allen Magnetwerkstoffen herstellbar • rotationssymmetrisch
	entgegengesetzt radial	<ul style="list-style-type: none"> • nur bedingt miniaturisierbar • aufwendige Herstellung → hohe Kosten • nicht mit höchsten Energiedichten verfügbar • rotationssymmetrisch
	antiparallel transversal	<ul style="list-style-type: none"> • miniaturisierbar • kostengünstig • aus allen Magnetwerkstoffen herstellbar • nicht rotationssymmetrisch
	antiparallel diametral	<ul style="list-style-type: none"> • miniaturisierbar • seltene Bauform → erhöhte Kosten • aus allen Magnetwerkstoffen herstellbar • eingeschränkt rotationssymmetrisch

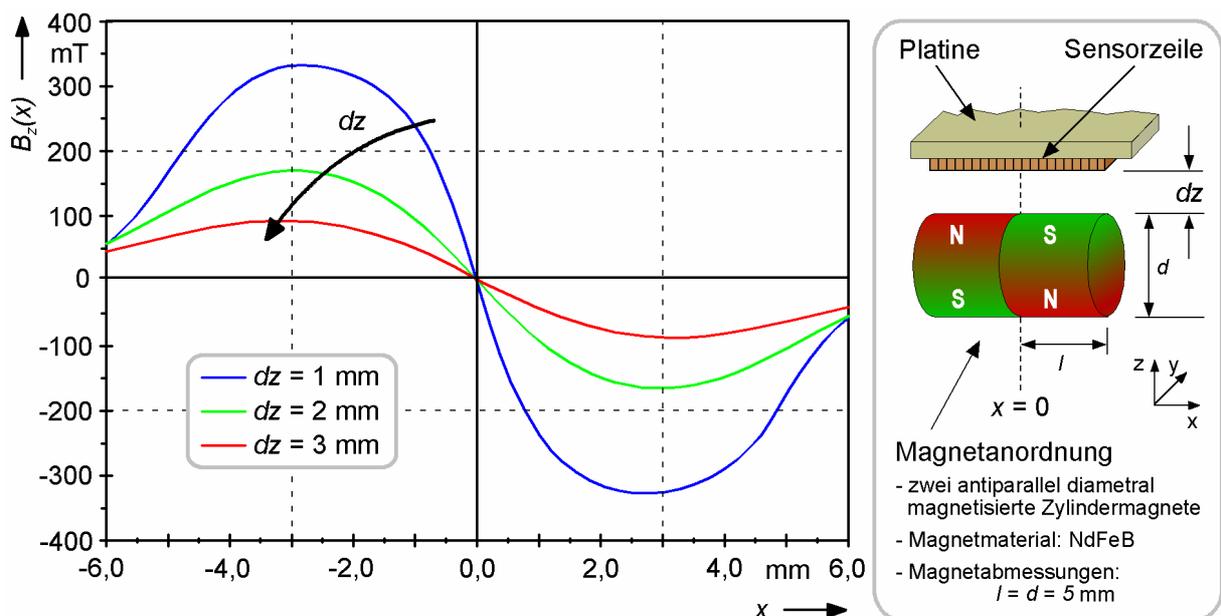


Bild 3.7: Einfluss des Abstandes dz auf den Feldverlauf in der Sensorebene

- a) Verlauf der magnetischen Feldkomponente B_z über der Sensorzeile für verschiedene Abstände dz
 b) Darstellung zur Definition des Abstandes dz zwischen der Magnetoberfläche und der Sensorzeile
 l – Länge eines Zylindermagneten; d – Durchmesser der Magnetanordnung; x – Position auf der Sensorzeile

3.2.2 Praxisbeispiel: Digitales Wegmesssystem für fluidische Antriebe

Technische Maschinen und Anlagen verfügen in der Regel über eine Vielzahl mechanischer Elemente. Die Art des Antriebs dieser Elemente ist u. a. von der im Betrieb geforderten Verstellgeschwindigkeit, Kraft oder des zu überwindenden Weges, jeweils in Verbindung mit der Wirkrichtung, abhängig. So finden gerade bei Maschinenelementen, wie etwa Stempeln von Pressen, die mit hoher Kraft und/oder Geschwindigkeit über zumeist kleine Distanzen bewegt werden müssen, anstelle von Elektromotoren eher hydraulische oder pneumatische Antriebe Verwendung. Diese so genannten fluidischen Antriebe benötigen neben weiteren Komponenten Ventile zur Steuerung oder Regelung des in die bzw. aus den Druckzylindern des Antriebs strömenden Mediums. Proportionalventile setzen elektrische Eingangssignale proportional über die Position des stufenlos elektromagnetisch verstellbaren Steuerkolbens in hydraulische Signale, d. h. in Zu- und Ablauf des Fluids, um, Bild 3.8.

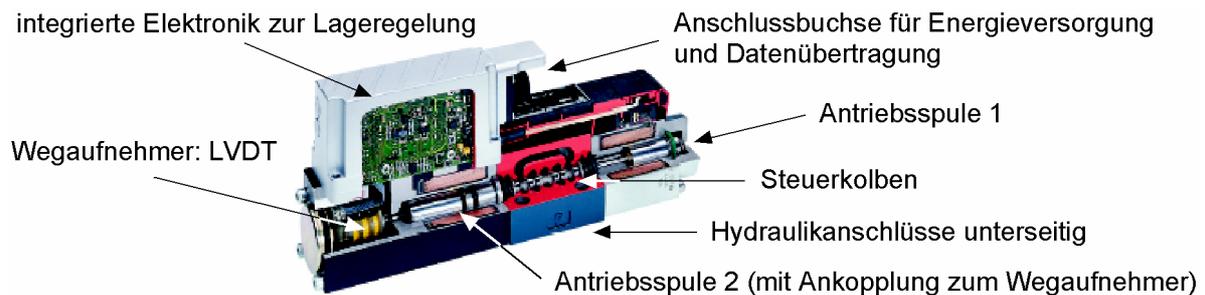


Bild 3.8: Querschnitt eines hydraulischen Proportional-Wegeventils mit Lageregelung und eingebauter Elektronik, Nenngröße 6 (NG6) [BOS-98]

Zur Positionsregelung des Steuerkolbens werden Wegaufnehmer benötigt. Hier finden üblicherweise analoge Differenzialtransformatorsysteme (LVDTs) Verwendung. Der an den Steuerkolben gekoppelte, verschiebbare ferromagnetische Kern eines LVDTs – vgl. Bild 3.8 – ruft positionsabhängig differenzielle Induktionsänderungen im Doppelspulsystem hervor, siehe z. B. [CAS-89]. Derartige Systeme sind robust und lassen eine messtechnische Erfassung geringster Bewegungen bis in den Mikrometerbereich zu. Ein wesentlicher Nachteil dieser analogen Wegaufnehmer ist neben ihrem relativ großen Bauvolumen jedoch, dass sie für eine computergesteuerte, automatisierte Inbetriebnahme großer Maschinen mit einer hohen Anzahl fluidischer Antriebe ungeeignet sind. Die Hersteller derartiger Antriebe sind daher bestrebt, künftig digitale Wegmesssysteme zur Regelung der Ventilstellung einzusetzen, die eine Anbindung an den Systembus einer computergesteuerten Großanlage erlauben.

Neben einer automatischen Inbetriebnahme ist auch eine zentrale Steuerung oder Regelung der Anlagen von Interesse. Auch dies bedingt den Ersatz der sensitiven Antriebskomponenten durch busfähige Sensorsysteme. Voraussetzung ist aber, dass künftig eingesetzte Sensorsysteme denselben Anforderungen wie die bewährten LVDTs genügen, dabei jedoch zusätzliche oder verschärfte Randbedingungen erfüllen. Bild 3.9 stellt anhand einer Black-Box die wichtigsten Restriktionen und Störgrößen, für welche die einwandfreie Funktion eines Messsystems zur Bestimmung der Steuerkolbenposition gewährleistet sein muss, zusammen.

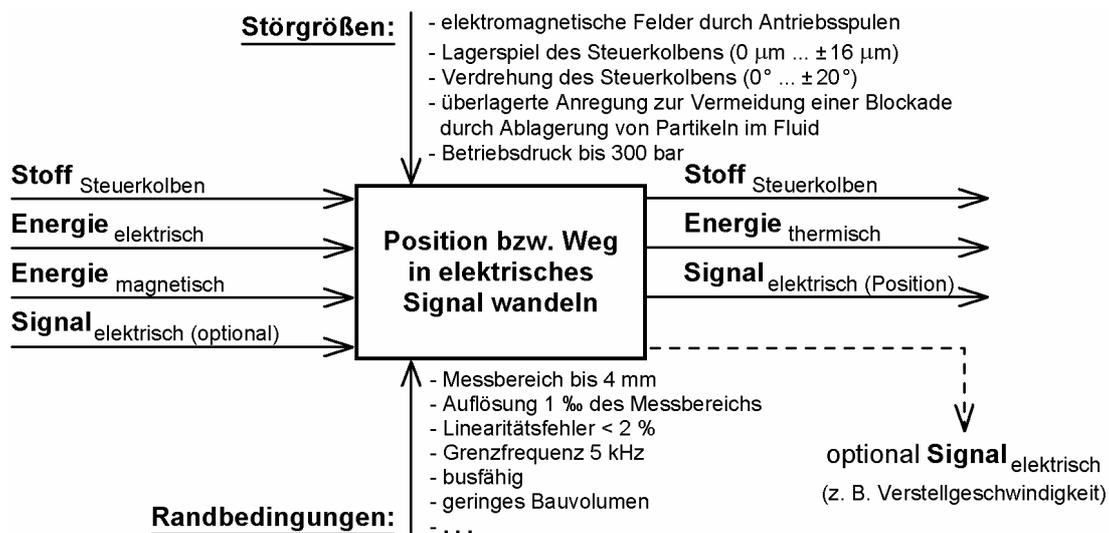


Bild 3.9: Black-Box-Darstellung für ein magnetisches Messsystem zur Positionserfassung des Steuerkolbens hydraulischer Proportional-Wegeventile

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsverbundprojektes „**IN**formationsintegrierte **S**ensor-/**A**ktorsysteme für **F**luidische **A**ntriebe — *INSAFA*“ wurden in verschiedenen Arbeitsgruppen neue sensitive und aktive Komponenten für hydraulische und pneumatische Proportional-Wegeventile mit dem Ziel einer zentralen und automatischen Inbetriebnahme von Industrieanlagen entwickelt. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in der Arbeitsgruppe „Wegmesssystem“ – dem ehemaligen Institut für Mechatronik, Imech GmbH, in Moers sowie dem Institut Mikroelektronische Schaltungen und Systeme der Fraunhofer-Gesellschaft e. V. in Dresden – entstand am Fachgebiet Elektromechanische Konstruktion der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg ein permanentmagnetisch angesteuertes Wegmesssystem auf Basis einer Sensorzeile aus 32 auf einem Chip integrierten Spinning-Current-Hall-Elementen, Bild 3.10, [FHG-99]. Das Spinning-Current-Prinzip ermöglicht die Reduzierung des Offsetspannungsanteils im

Ausgangssignal eines Sensorsystems, vgl. z. B. [FHG-97]. Die aktive Fläche – hier: $A = 128 \cdot 128 \mu\text{m}^2$ – derartiger Sensorelemente wird von einem elektrischen Strom I_0 durchflossen, dessen Richtung in Schritten von 45° um den Mittelpunkt des Elements rotiert. Für die resultierende Hall-Spannung U_H gilt dann

$$U_H = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (U_{H,i} + U_{\text{Off},i}) \quad (\text{Gl. 3.4})$$

mit den Hall-Spannungen $U_{H,i}$ und den Offsetspannungen $U_{\text{Off},i}$ der Einzelschritte i . Betrag und Richtung der den einzelnen Hall-Spannungen überlagerten Offsetspannungen sind material-, nicht jedoch stromrichtungs- oder magnetfeldabhängig. Der Einfluss auf die jeweils gemessene Hall-Spannung ist damit bei jedem Richtungswechsel des Steuerstromes unterschiedlich. In der Praxis kompensieren sich die Offsetanteile der Messsignale je vollständigem Stromumlauf auf einen Restwert von $U_{\text{Off}} = 10 \mu\text{V} \dots 100 \mu\text{V}$. Die ebenfalls auf der Sensorplatte integrierte elektronische Schaltung übernimmt die Aufbereitung und Analog-Digital-Wandlung aller 32 Signale, der nur jeweils um $151,2 \mu\text{m}$ versetzt angeordneten Sensorelemente, bevor diese zur Bestimmung der Steuerkolbenposition an eine externe, mikroprozessorgesteuerte Controllereinheit weitergeleitet werden [GOT-99, GOT-00].

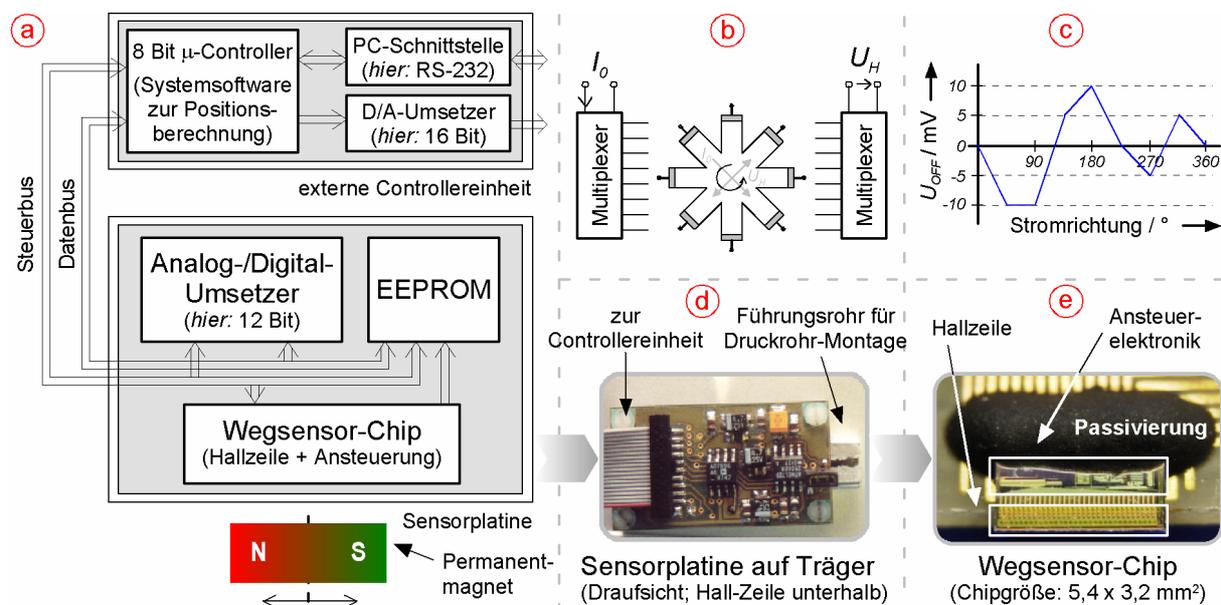


Bild 3.10: Wegmesssystem mit Spinning-Current-Hall-Sensoren

- Blockschaltbild des gesamten INSAFA-Wegmesssystems inkl. externer Controllereinheit [FHG-00]
- Prinzip der Spinning-Current-Hall-Sensoren [FHG-00]
- Abhängigkeit der Offset-Spannung U_{Off} eines Hall-Sensors von der Stromrichtung [FHG-00]
- Foto einer Sensorplatte inkl. Träger für die Montage auf dem Druckrohr eines Proportionalventils
- Foto des Wegsensor-Chips mit 32 Hall-Sensoren in Zeilenanordnung

Das Wegmesssystem nach Bild 3.10 erfüllt sämtliche Anforderungen, die aus der Black-Box in Bild 3.9 hervorgehen, und kann am ursprünglichen Montageort des LVDTs an das Proportional-Wegeventil adaptiert werden. Dadurch entfallen kostenintensive konstruktive Änderungen dieser Antriebskomponente. Die Platine mit dem Sensorchip wird außerhalb des nicht-magnetischen Druckrohres in einer festen Position montiert, während die felderzeugende Magnetanordnung über eine starre Verbindung zum Magnetanker einer der Antriebsspulen im Druckrohr unterhalb der Sensorplatine geführt wird, Bild 3.11. Die Hall-Spannungen der 32 Sensorelemente sind jeweils proportional zur ortsabhängigen Orthogonal-Komponente der magnetischen Induktion B_z in der Sensorebene.

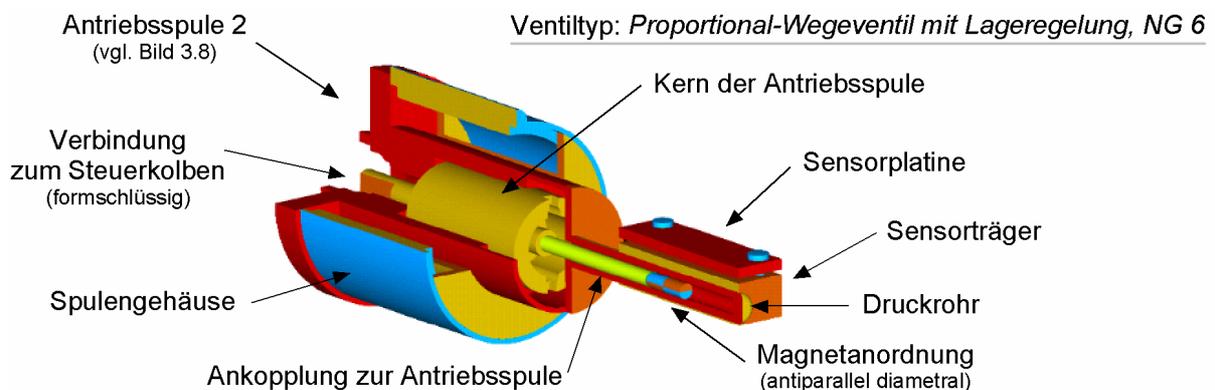


Bild 3.11: Simulationsbild einer Antriebsspule eines Proportional-Wegeventils mit adaptiertem Sensorsystem (Querschnitt) [KRE-98, PIT-99b]

Über den aus den Messwerten interpolierten Verlauf der Hall-Spannung U_H kann die Position x des Nulldurchgangs der relevanten Magnetfeld-Komponente B_z entlang der Sensorzeile bestimmt werden. Es gilt:

$$B_z(x) = 0 \text{ für } U_H(x) = 0. \quad (\text{Gl. 3.5})$$

Die Steuerkolbenposition ist genau dann eindeutig zu bestimmen, wenn die Bedingungen nach Gl. 3.2 und Gl. 3.3 aus Kapitel 3.2.1 für die Ruhelage des Steuerkolbens erfüllt sind. Da der Steuerkolben eines Proportional-Wegeventils, und damit auch der mit diesem formschlüssig verbundene Stößel des Magnetankers, eingeschränkt drehbar gelagert ist, sind Winkelbewegungen in der Größenordnung $\varphi = \pm 20^\circ$ um dessen Längsachse möglich. Das Feld der felderzeugenden, permanentmagnetischen Sensorsystem-Komponente muss für diesen Winkelbereich entsprechend rotationssymmetrisch ausgelegt sein, um Einflüsse einer Verdrehung auf das Messergebnis auszuschließen. Daraus lässt sich eine Zusatzbedingung ableiten:

$$B_z(x) \neq f(\varphi) \quad (\text{Gl. 3.6})$$

mit dem Winkel φ der Verdrehung um die Längsachse. Bild 3.12 stellt die maximalen Feldgradienten in der Sensorebene an der Stelle des Nulldurchgangs des magnetischen Feldes in Abhängigkeit des Abstandes zwischen der Magnetoberfläche und der Sensorebene für verschiedene rotationssymmetrische Anordnungen aus Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten (*NdFeB*) dar. Zudem ist ein Vergleich zu einer nicht-rotationssymmetrischen Anordnung aus zwei antiparallel transversal magnetisierten Blockmagneten gegeben. Diese Anordnung gilt unter Verwendung gleichen Magnetmaterials und vergleichbarer Dimensionen als ideale Konstellation zur Erzeugung eines maximalen Feldgradienten in der Sensorebene.

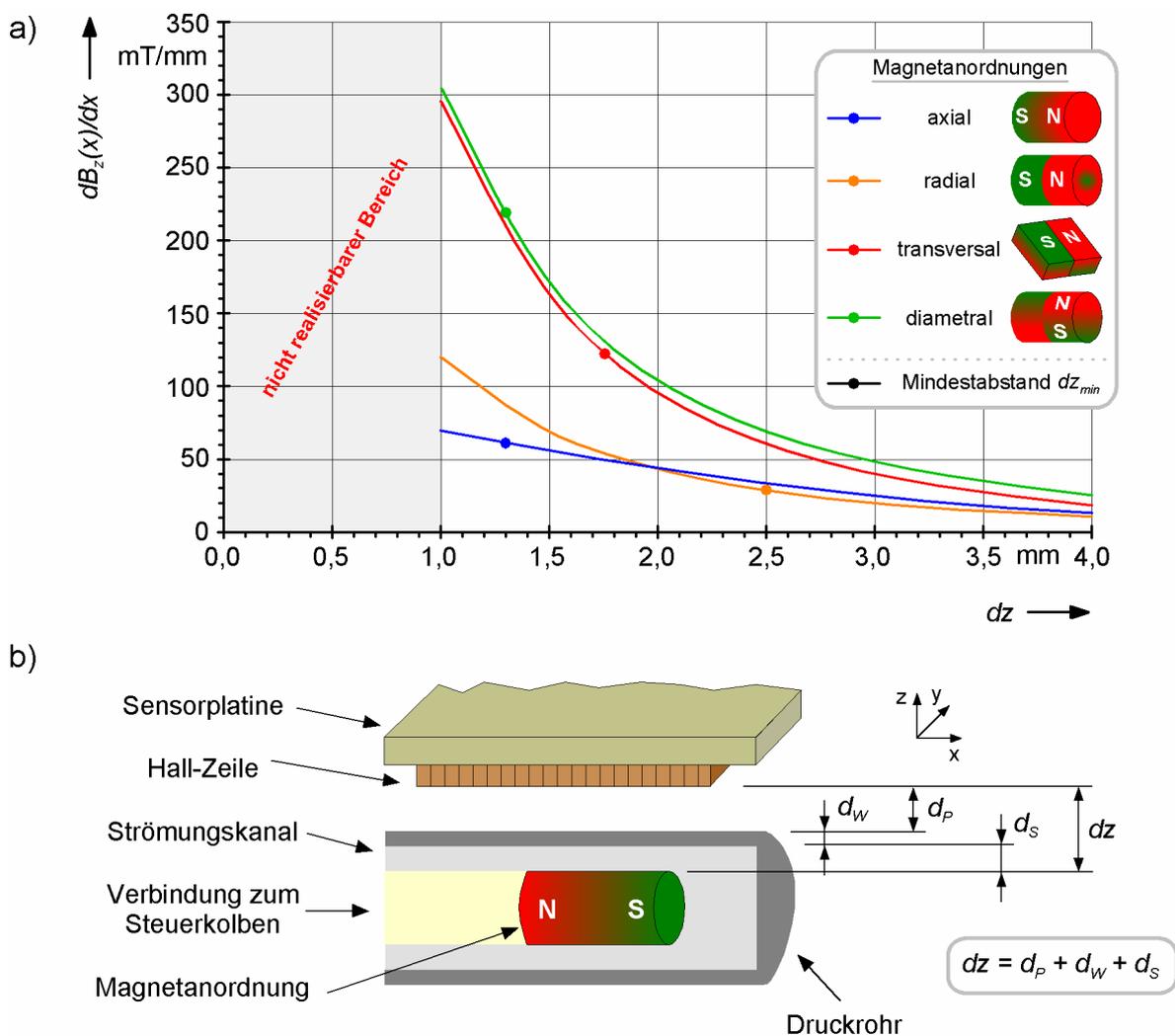


Bild 3.12: Feldgradient $dB_z(x)/dx$ an der Stelle $B_z = 0$ für verschiedene Magnetanordnungen in Abhängigkeit des Abstandes dz

- a) Feldgradienten als Funktionen des Abstandes dz mit Darstellung des jeweils fertigungsbedingten Mindestabstandes dz_{min} ; alle Magnetanordnungen aus NdFeB gleicher Qualität
 b) Definition des Abstandes dz zwischen der Magnetoberfläche und der Sensorebene
 d_p – Dicke der Passivierungsschicht; d_s – Höhe des Strömungskanals; d_w – Wandstärke des Druckrohrs

Unter Berücksichtigung eines Mindestabstandes dz_{min} , der durch die Wandstärke d_W des Druckrohres, die Höhe d_S des Strömungskanals im Druckrohr sowie die Dicke d_P der Passivierungsschicht der Sensorzeile gegeben ist, erweist sich eine Anordnung aus zwei antiparallel diametral magnetisierten Stabmagneten als bestgeeignet, um alle vorgestellten Bedingungen optimal zu erfüllen. Zudem sind die Mindestwandstärke des Druckrohres sowie die Mindesthöhe des Strömungskanals von den Abmessungen der verwendeten Magnetanordnung abhängig, da der Druck bzw. der Durchfluss des Fluids mit steigendem Durchmesser des Druckrohrs zunimmt. Die Markierungen in Bild 3.12 zeigen den herstellungsbedingten Mindestabstand $d_{z,min}$ an, der sich jeweils durch die kleinsten realisierbaren Magnetabmessungen ergibt, damit gilt:

$$B_{z, radial}(x) = B_{z, axial}(x) = B_{z, diametral}(x) = B_{z, transversal}(x) \quad (\text{Gl. 3.7})$$

für alle Steuerkolbenpositionen x . Bild 3.13a zeigt abschließend ein Proportional-Wegeventil der Firma Bosch-Rexroth AG vom Typ 4WRSE NG 6 mit einem adaptierten galvanomagnetischen Wegmesssystem, das im Rahmen des Forschungsverbundprojektes INSAFA entwickelt wurde. Testmessungen mit diesem Funktionsmuster ergaben eine sehr gute Übereinstimmung der Messwerte im Vergleich zu einem parallel am Ventil betriebenen herkömmlichen LVDT-System, Bild 3.13b.

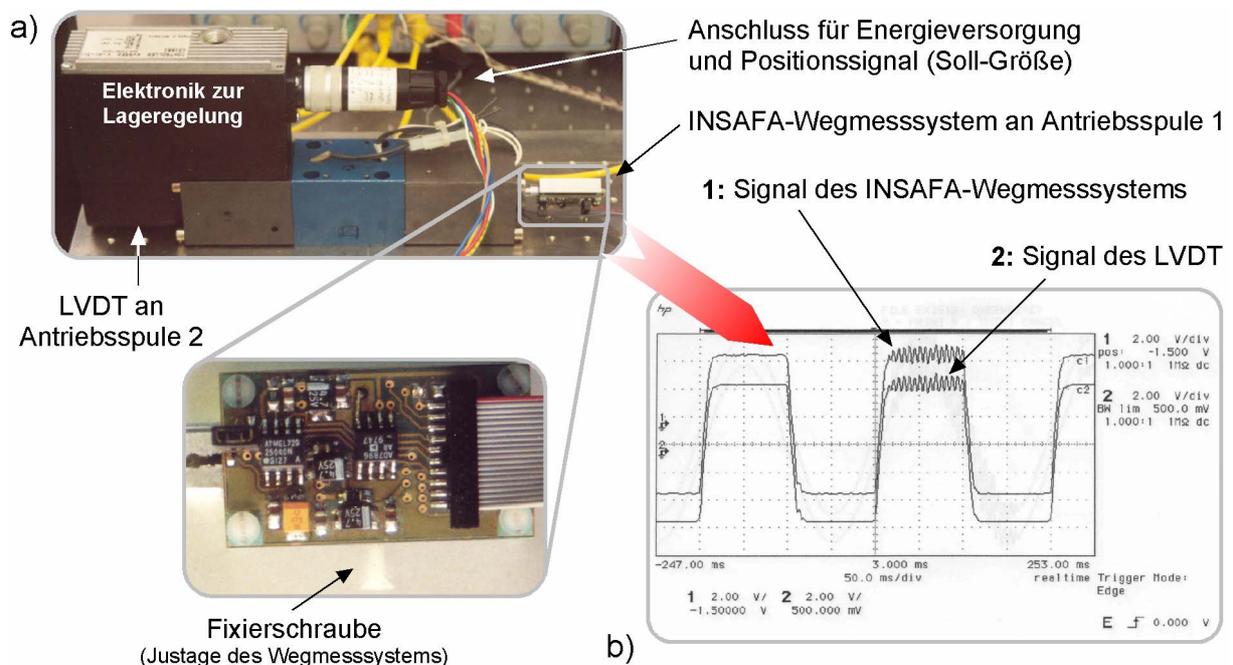


Bild 3.13: Proportional-Wegeventil 4WRSE NG 6 mit adaptiertem INSAFA-Sensor

- Proportional-Wegeventil mit Parallelbetrieb eines LVDT- und eines INSAFA-Wegmesssystems
- Vergleich der Ausgangssignale bei Anregung mit niederfrequentem Rechtecksignal und Regelung der Ventilkolbenstellung über INSAFA-Sensor (Screenshot Digital-Oszilloskop)

3.3 Einsatz strukturierter Sensorsystem-Komponenten im Bereich des Qualitätsmanagements

3.3.1 Qualitätsmanagement in Beschaffung und Fertigung

Die Qualität eines Produkts, d. h. dessen Konformität mit den in der Anforderungsliste bzw. dem Pflichtenheft fixierten Kundenanforderungen, wird über Prüfungen festgestellt. Hier kann zwischen Endprüfungen und fertigungsbegleitenden Prüfungen unterschieden werden. Unternehmen, welche ein zertifiziertes Qualitätsmanagementsystem entsprechend den Normen DIN EN ISO 9000:2000 bzw. 9001:2000 eingeführt haben, sind zur Durchführung von qualitätssichernden Prüfungen bereits während des Fertigungsprozesses sowie zu Konformitätsprüfungen an Zukaufteilen beim Wareneingang verpflichtet [DIN-00a, DIN-00b]. Dabei sind Art und Komplexität der Anforderungen vielfältig und bedürfen entsprechend speziell ausgerichteter Prüfverfahren. Die auf die Produktmerkmale abgestimmten Prüfverfahren basieren sowohl auf nationalen und internationalen als auch auf branchenspezifischen oder gar firmeneigenen Richtlinien und Normen. Die Verfahren beinhalten detaillierte Prüfanweisungen, welche ebenso wie die einzusetzenden Prüfmittel verbindlich im Qualitätsmanagement-Handbuch für das zu realisierende Produkt festgeschrieben werden. Diese Prüfvorbereitungen sind Aufgabe der Prüfplanung, welche bereits konstruktionsbegleitend unter Anwendung präventiver Maßnahmen, z. B. der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (*FMEA*), potenziell in der Produktfertigung auftretende Fehler und deren Ursachen ermittelt. Darüber hinaus werden von der Prüfplanung geeignete Prüfzeitpunkte, -verfahren und -mittel ebenso wie die im Fehlerfall zu ergreifenden Maßnahmen verbindlich festgelegt [PIT-00]. Für die Definition der Prüfzeitpunkte sind vor allem die folgenden Faktoren maßgeblich:

- Zugänglichkeit der Messgröße,
- Ausschluss einer Beeinflussung des Prozesses und/oder des Messobjekts,
- Verfügbarkeit des/der Prüfmittel und des Prüfpersonals sowie
- Kosten der Prüfung.

Ziel frühzeitiger qualitätssichernder Prüfungen ist die Vermeidung von Fehlern beim Endprodukt, welche zum Teil kostenintensive Fehlerfolgen nach sich ziehen. So können erhöhte Fehlerkosten, beispielsweise hervorgerufen durch Reklamationen,

Nacharbeit in Garantiefällen bis hin zum Verlust der Marktposition durch Imageverlust, weitgehend vermieden werden. Weitere, detailliertere Ausführungen zu Prüfungen im Rahmen des Qualitätsmanagements sind in der Literatur zahlreich vorhanden. Eine ausführliche Darstellung der Aufgaben und Werkzeuge der Prüfplanung sowie der Durchführung von Prüfungen in der Fertigung liefert z. B. [PFE-96].

3.3.2 Strukturvariationen als Fehlermerkmale in der Qualitätssicherung

Die geometrische Struktur technischer Komponenten und Systeme ist in vielen Fällen bestimmend für deren ordnungsgemäße Funktion. Demzufolge werden bei der Geräteentwicklung in der Entwurfsphase alle kritischen geometrischen Parameter unter Angabe eines individuellen Toleranzfeldes verbindlich für den Fertigungsprozess festgeschrieben. Etwaige Abweichungen der Parameter über die Grenzen δ_{tol} des Toleranzfeldes hinaus gelten als geometrische Fehler, d. h.

$$\Delta y = |y_{ist} - y_{soll}| > \delta_{tol}.$$

beschreibt eine unzulässige Abweichung Δy des Geometrieparameters y . Ein derartiger Fehler kann ein Fehlverhalten oder den Ausfall der betroffenen Komponente und gegebenenfalls des gesamten technischen Systems verursachen. Die Ist-Werte kritischer Geometrieparameter sind durch fertigungsbegleitende Prüfverfahren in allen Phasen des Fertigungsprozesses zu erfassen, um beim Auftreten von Fehlern sofort regulierend in den laufenden Prozess eingreifen zu können. Ein solcher Eingriff reicht von der Nachbearbeitung des fehlerbehafteten Systemelements bis hin zu dessen Austausch.

Entscheidend für die Detektion von Toleranzüberschreitungen ist die Definition geeigneter Prüfzeitpunkte und Prüfverfahren, vgl. Kapitel 3.3.1. Um eine Rückwirkung des Prüfverfahrens auf den Fertigungsprozess auszuschließen, empfehlen sich berührungslose Messverfahren nach beispielsweise optischen oder magnetischen Prinzipien. Gerade zur Erfassung nicht direkt zugänglicher geometrischer Objektparameter sind magnetische Messverfahren, z. B. auf Basis galvanomagnetischer Effekte, besonders geeignet. Voraussetzung ist natürlich, dass das Messobjekt magnetisch auswertbare Eigenschaften aufweist oder temporär und rückwirkungsfrei mit einem magnetisch leitenden Bezugselement zur Prüfung des jeweiligen geometrischen Parameters ausgestattet werden kann. So lassen sich magnetische Messverfahren

vorzugsweise im Bereich der nach DIN EN ISO 9000 ff vorgeschriebenen Eingangs- und Fertigungskontrolle zur Prüfung hart- und weichmagnetischer Bauteile und Halbzzeuge einsetzen. Je nach Komplexität bzw. Fertigungsstatus der Komponenten oder Systeme ist eine Prüfung der Geometrie, der inneren Struktur und/oder der Anordnung möglich. Die bereits während der Prüfplanung definierten Eingriffsgrenzen zeigen die zu ergreifenden Maßnahmen bei Überschreitung der fixierten Toleranzbereiche für die geometrischen Objekteigenschaften auf.

Informationstragende Strukturmerkmale strukturierter Komponenten können hier als Fehlerindikator dienen. Eine Strukturvariation der Komponenten ist aus prüftechnischer Sicht also gleichzusetzen mit einem geometrischen Fehler, hervorgerufen durch eine oder mehrere Abweichungen im Fertigungsprozess. Die Variation der Merkmale *Anordnung* und *Geometrische Gestalt* stellt die Codierung der Information *Prozessfehler* dar. Kapitel 3.3.3 und Kapitel 3.3.4 verdeutlichen dies im Folgenden am Beispiel des Wegmesssystems für fluidische Antriebe nach Kapitel 3.2.2.

3.3.3 Geometrische Fehler an Komponenten galvanomagnetischer Wegmesssysteme für fluidische Antriebe

Die ordnungsgemäße Funktion galvanomagnetischer Wegmesssysteme zur Erfassung der Ventilkolbenstellung ist u. a. direkt abhängig von der geometrischen Gestalt der einzelnen Systemkomponenten sowie von der Anordnung der Funktionsgruppen. Entsprechend können Abweichungen von den Nennmaßen der Abmessungen und/oder Positionen als geometrische Fehler definiert werden.

Fehlermöglichkeiten aus dem Bereich der Geometrie lassen sich auf Abweichungen in den Fertigungsprozessen einzelner Sensorkomponenten sowie auf Überschreitung der Fertigungstoleranzen in der Aufbau- und Verbindungstechnik, d. h. auf Fehler bei der Montage oder bei der Adaption des Wegmesssystems an das Wegeventil, zurückführen. Ebenso begünstigen mechanische Störungen während des Ventilbetriebs Fehler in der Sensortopologie. Hierzu zählen neben der drehbaren Lagerung des Steuerkolbens auch Vibrationen und Stöße sowie der einsatzbedingte Verschleiß. Tabelle 3.2 gibt eine Übersicht möglicher geometrischer Fehlerarten beim Wegmesssystem und kennzeichnet die jeweiligen Fehlerorte, d. h. die Funktionsgruppen bzw. Einzelelemente, bei denen die Fehler in Erscheinung treten können.

Tabelle 3.2: Zuordnung möglicher geometrischer Fehlerarten zu den Fehlerorten am Wegmesssystem

<i>Fehlerart</i> \ <i>Fehlerort</i>	Gestalt	Translation	Rotation
Einzelmagnet	×	×	×
Magnetanordnung		×	×
Sensorzeile		×	×

Jede Fehlerart kann prinzipiell in allen drei Raumrichtungen bzw. auf allen drei Rotationsachsen auftreten. Die Zahl der möglichen geometrischen Einzelfehler $F_{mögl}$ bestimmt sich daher ohne Berücksichtigung der Fehlerausprägung oder charakteristischer Parameter, wie etwa der Lage der Rotationsachsen, aus

$$F_{mögl.} = 3 \cdot \sum_{o=1}^3 n(o) \cdot a(o) \tag{Gl. 3.8}$$

mit der Fehlerart a , dem Fehlerort o und der Anzahl der Elemente n je Fehlerort. Tabelle 3.3 definiert eine Auswahl der möglichen geometrischen Fehler (Strukturvariationen) beim Wegmesssystem auf Basis der Darstellung einer fehlerfreien Systemkomponenten-Anordnung für die Ruheposition des Steuerkolbens nach Bild 3.14. Zur Bestimmung der Fehlerauswirkungen auf die Systemfunktion sind wegen der hohen Zahl der Fehlermöglichkeiten Simulationen im Rahmen der Prüfplanung notwendig, Kapitel 3.3.4. Diese erlauben die Bestimmung der Fertigungstoleranzen, welche Voraussetzung zur Festlegung der Eingriffsgrenzen sind.

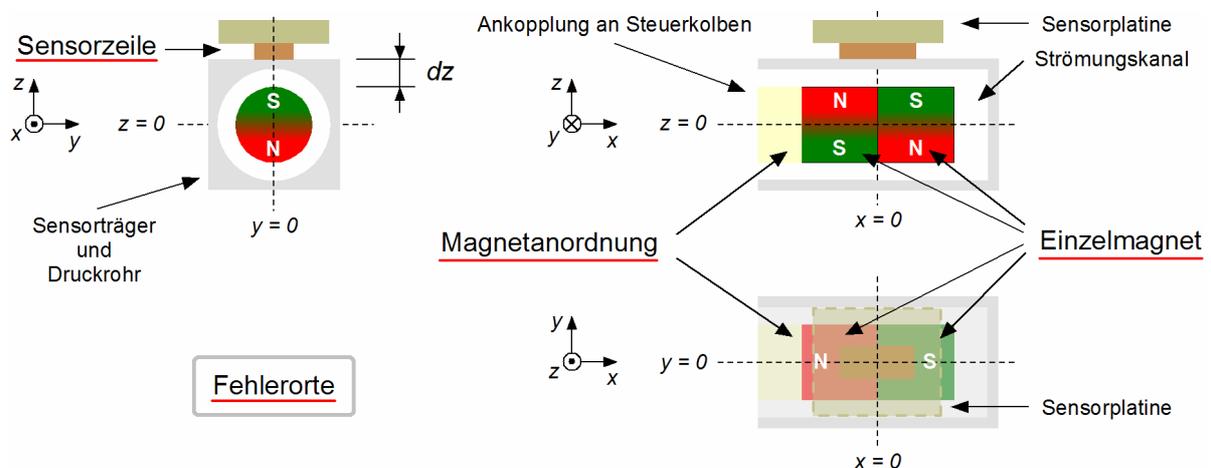
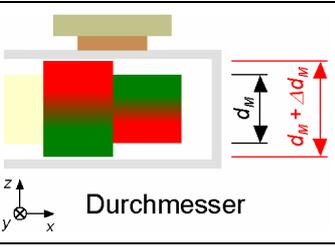
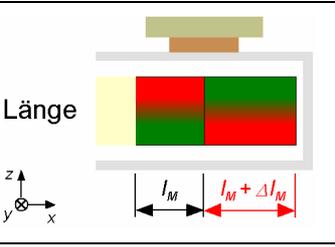
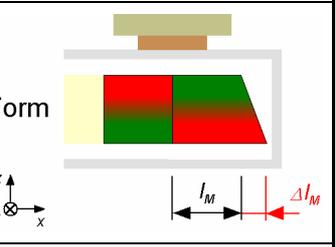
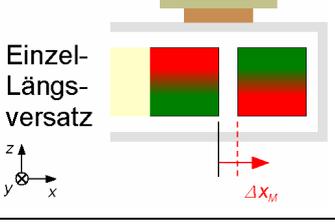
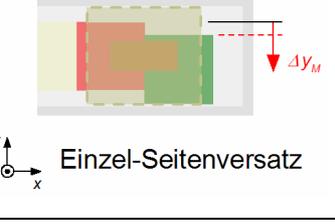
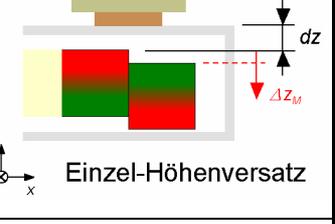
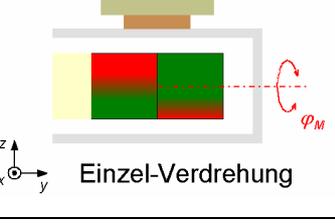
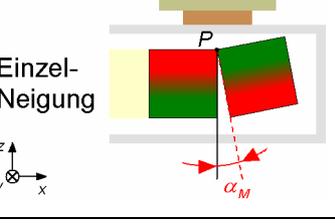
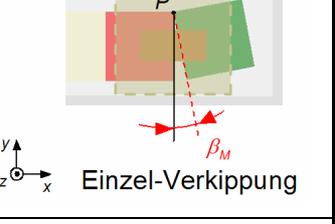
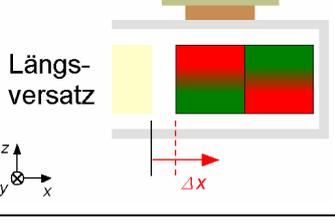
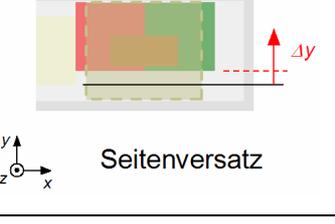
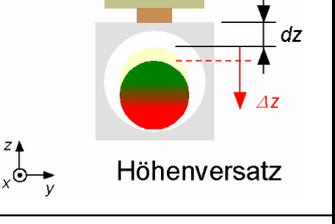
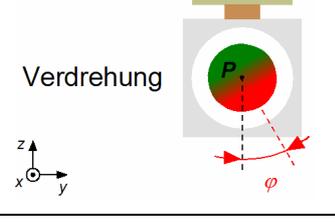
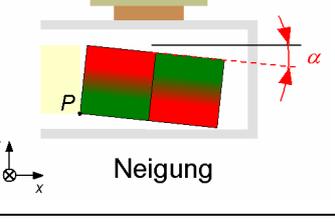
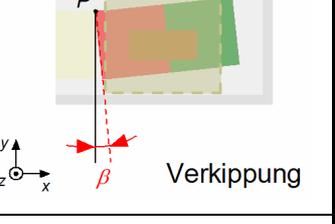
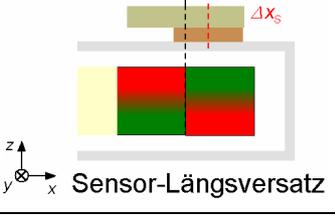
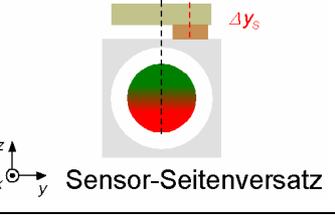
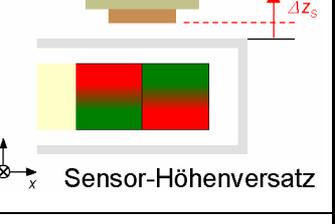
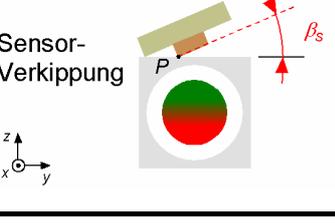
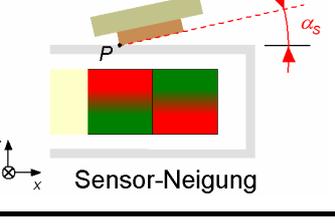
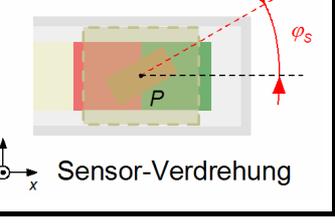


Bild 3.14: Fehlerfreie Anordnung der Komponenten des Wegmesssystems in drei Ansichten für die Ruheposition (Mittelstellung) des Steuerkolbens
dz – Abstand zwischen der Magnetoberfläche und der Sensorebene

Tabelle 3.3: Definition geometrischer Einzelfehler (Strukturvariationen) – Auswahl
l – Länge; *d* – Durchmesser; *P* – Drehpunkt; *dz* – Abstand Magnetoberfläche / Sensorebene; Δx – Längsversatz; Δy – Seitenversatz; Δz – Höhenversatz; α – Neigungswinkel; β – Kippwinkel; φ – Drehwinkel

Ort	Art	Geometrische Einzelfehler (Strukturvariationen) (Beispiele)		
Einzelmagnet	Gestalt	 Durchmesser	 Länge	 Form
	Translation	 Einzel-Längsversatz	 Einzel-Seitenversatz	 Einzel-Höhenversatz
	Rotation	 Einzel-Verdrehung	 Einzel-Neigung	 Einzel-Verkippung
Magnetanordnung	Translation	 Längsversatz	 Seitenversatz	 Höhenversatz
	Rotation	 Verdrehung	 Neigung	 Verkippung
Sensorzeile	Translation	 Sensor-Längsversatz	 Sensor-Seitenversatz	 Sensor-Höhenversatz
	Rotation	 Sensor-Verkippung	 Sensor-Neigung	 Sensor-Verdrehung

3.3.4 Einfluss geometrischer Fehler auf die Funktion von Wegmesssystemen

Die in Kapitel 3.3.3 vorgestellten geometrischen Fehler lassen sich innerhalb vorgeählter, realistischer Toleranzbereiche simulieren. So werden jeweils mögliche Auswirkungen auf den Magnetfeldverlauf, und damit auf die Funktion des Sensorsystems, vor der Fertigung transparent. Die Simulationsergebnisse führen zur Festlegung von Toleranzfeldern für die Fertigung der Komponenten sowie für die Montage des Gesamtsystems. Bei Einhaltung der Toleranzen ist dann eine ordnungsgemäße Funktion des galvanomagnetischen Wegmesssystems zur Erfassung der Steuerkolbenposition von Proportional-Wegeventilen gewährleistet.

Ein Ergebnis der im Rahmen des zuvor genannten BMBF-Forschungsverbundprojektes durchgeführten Simulationen ist, dass ein Großteil der in Kapitel 3.3.3 definierten geometrischen Fehler primär zu einer Nullpunktverschiebung des Verlaufes der auf der Sensorebene senkrecht stehenden Magnetfeldkomponente führt. Der Betrag der Verschiebung ist jeweils – bezogen auf ein fehlerfreies Wegmesssystem – über dem gesamten Verstellweg des Steuerkolbens konstant. Derartige Fehler haben nur eine geringe Auswirkung auf die Funktionsgenauigkeit des Wegmesssystems, sofern der durch die Länge der Sensorzeile vorgegebene Messbereich von $s = 4,84$ mm nicht überschritten wird. Eine einmalige Justage vor der Inbetriebnahme des Wegeventils kann in diesen Fällen die Funktion des Systems mit der geforderten Messgenauigkeit von $\Delta s = \pm 2 \mu\text{m}$ sicherstellen.

Nur wenige geometrische Fehler ergeben bei einer spezifischen Konstellation der Parameter einen Verlauf des magnetischen Feldes, der zu einer nicht korrigierbaren Fehlfunktion des Messsystems führt. Ein derartiger Verlauf der relevanten Magnetfeldkomponente liegt beispielsweise vor, wenn ein zweiter Nulldurchgang im Bereich der Sensorzeile aufgrund eines stark geschwächten Gradienten zu Stande kommt. In diesem Fall ist eine eindeutige Detektion der zugehörigen Steuerkolbenposition unmöglich. Die Folge ist ein unkontrolliertes Verhalten eines Ventils, das mit einem entsprechend fehlerbehafteten Wegsensor geregelt wird. Bild 3.15 zeigt hierzu als Beispiel die resultierenden Magnetfeldverläufe in der Sensorebene für den Fall, dass die Magnetanordnung aus Einzelmagneten mit einem Höhenversatz gebildet wird, vgl. Tabelle 3.3. Aus der Darstellung in Bild 3.16 ist zu entnehmen, dass durch einen solchen Fehler zusätzlich eine Variation der zugehörigen Feldgradienten im Nulldurchgang hervorgerufen wird. Mit der Schwächung des Gradienten ist eine starke

Beeinträchtigung der Genauigkeit der Positionsbestimmung verbunden. Derartige Strukturvariationen können beim Zusammenfügen der Einzelmagnete zur felderzeugenden Komponente des Wegmesssystems entstehen. Die Darstellungen in beiden Bildern lassen erkennen, dass der Toleranzbereich für den Höhenversatz der Einzelmagnete sehr klein gewählt werden muss; siehe hierzu auch Kapitel 3.3.5.

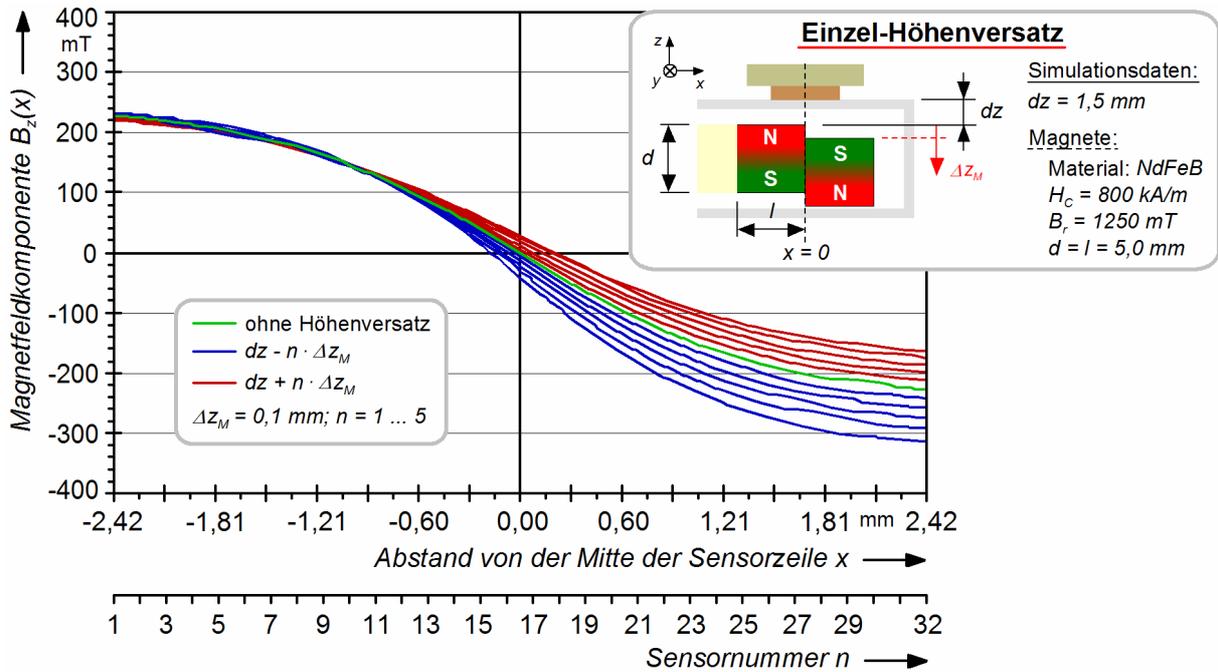


Bild 3.15: Einfluss des geometrischen Fehlers Höhenversatz eines Einzelmagneten
 d – Durchmesser; l – Länge; Δz_M – Höhenversatz; B_r – Remanenzinduktion; H_c – Koerzitivfeldstärke

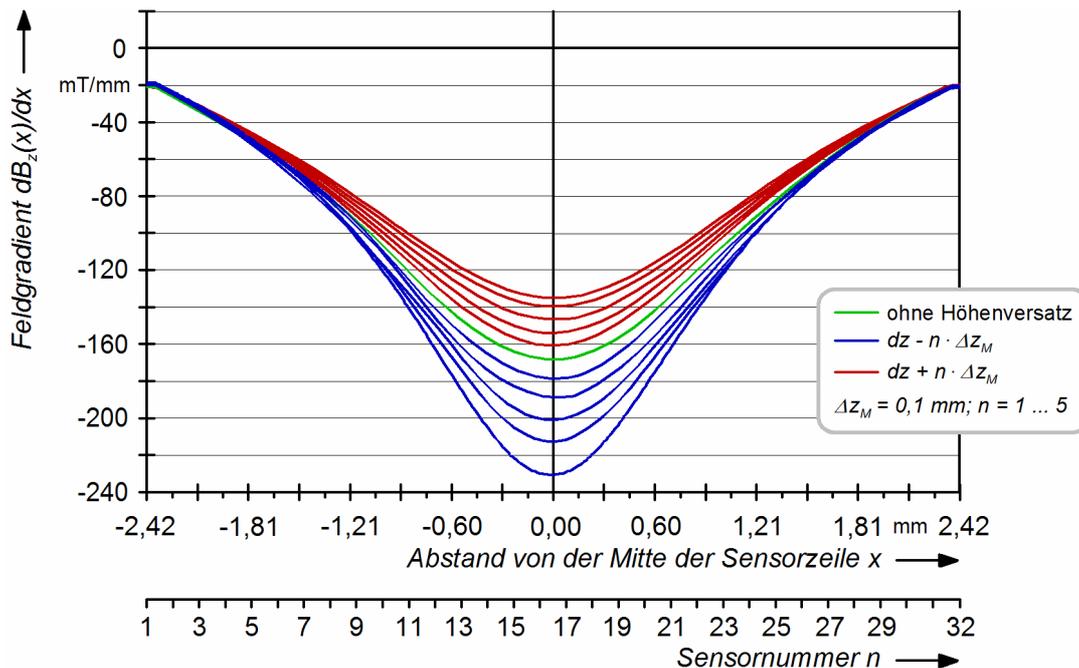


Bild 3.16: Verlauf des Feldgradienten bei Höhenversatz eines Einzelmagneten

Ohne Auswirkung auf die ordnungsgemäße Funktion des Wegmesssystems bleiben hingegen solche geometrischen Fehler, welche innerhalb der technisch möglichen Fehlergrenzen lediglich zu einer geringen Schwächung des Feldgradienten führen. Bild 3.17 zeigt hierzu die Verdrehung der Magnetanordnung um deren Längsachse. Diese Variation der Anordnung der Sensorsystem-Komponenten führt innerhalb des durch die drehbare Lagerung des Steuerkolbens festgelegten Winkelbereichs von $\varphi = \pm 20^\circ$ zu keiner Beeinträchtigung der Positionserkennung. Die Amplituden des magnetischen Feldes werden im Messbereich der Sensorzeile lediglich geringfügig geschwächt, so dass eine präzise Bestimmung der Position x des Nulldurchgangs der auf der Sensorebene senkrecht stehenden Feldkomponente, $B_z(x) = 0$, nicht beeinträchtigt wird. Aufgrund der nur geringen Schwächung des Magnetfeldes in der Sensorebene tritt zudem keine Verschiebung dieses Nulldurchgangs auf.

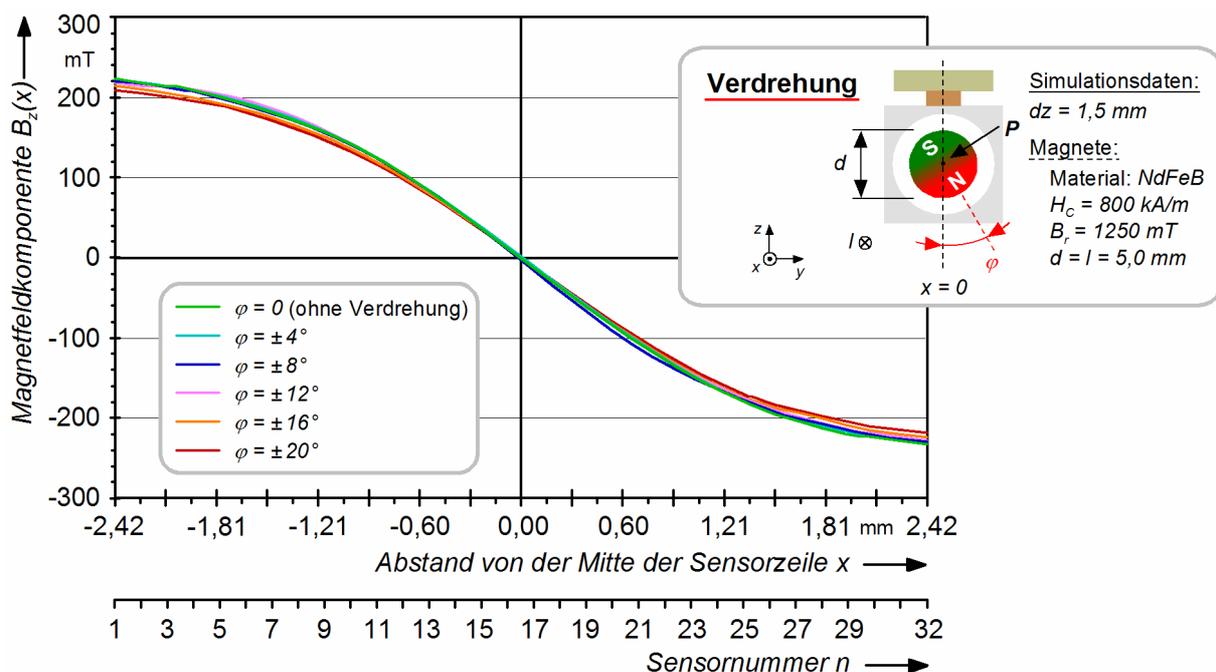


Bild 3.17: Einfluss des geometrischen Fehlers *Verdrehung um die Längsachse*
 d – Durchmesser; l – Länge; B_r – Remanenzind.; H_c – Koerzitivfeldstärke; P – Drehpunkt; φ – Drehwinkel

Bild 3.18 stellt abschließend für die Verdrehung der Magnetanordnung nach Bild 3.17 die Abnahme des Feldgradienten im Nulldurchgang $\left. \frac{dB_z(x)}{dx} \right|_{B_z=0}$ für die Mittelstellung des Steuerkolbens, also $x = 0$, dar. Es wird deutlich, dass bei einer maximalen Reduzierung des Feldgradienten um 6% der Fehlereinfluss im technisch möglichen Verdrehbereich des Steuerkolbens vernachlässigbar ist [PIT-99b].

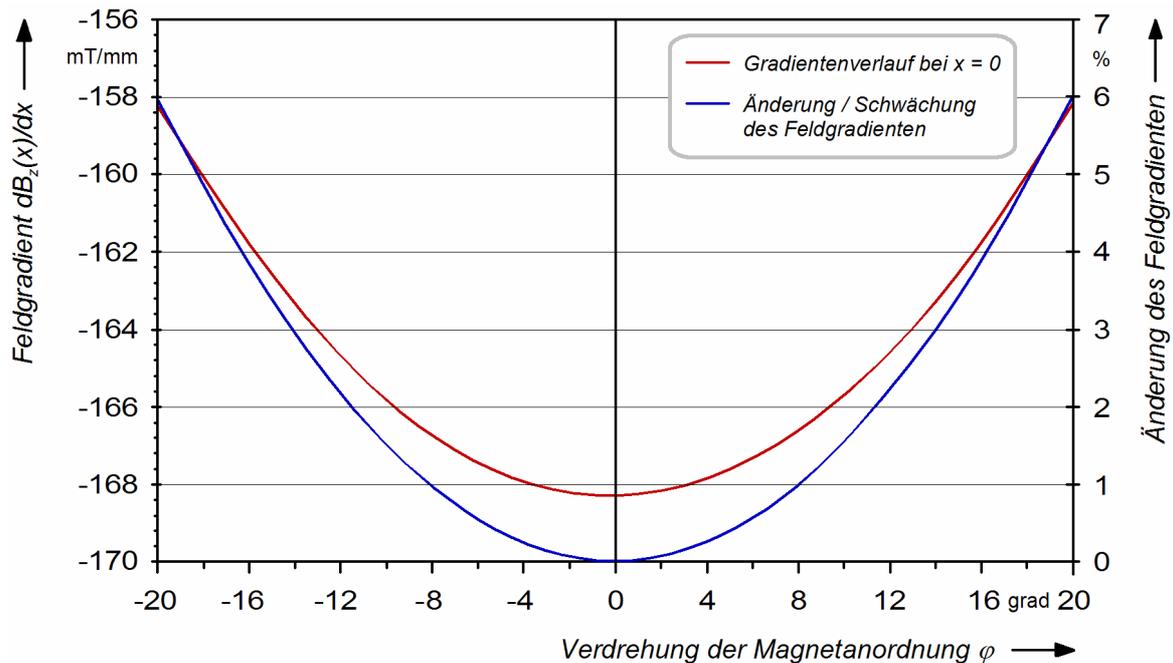


Bild 3.18: Änderung des Feldgradienten unter dem Einfluss einer *Verdrehung* der Magnetanordnung um deren Längsachse für die Mittelstellung des Ventil-Steuerkolbens ($x = 0$)

3.3.5 Positionserfassung mit fehlertolerierten Wegmesssystemen

Eine Positionserfassung mit Wegmesssystemen, die unter dem Einfluss fertigungsbedingter geometrischer Fehler stehen, ist dann möglich, wenn bereits während des Konstruktionsprozesses, z. B. im Rahmen einer FMEA, Simulationen zur Ermittlung der Fehlerauswirkungen durchgeführt werden, vgl. Kapitel 3.3.4. Grundlage hierfür bilden Abschätzungen bzw. Erfahrungen bezüglich der maximalen Ausprägungen möglicher geometrischer Fehler. Anhand der Simulationsergebnisse lassen sich die Toleranzbereiche, welche die Eingriffsgrenzen für qualitätssichernde Prüfungen während des Fertigungsprozesses angeben, für alle Geometriedaten, d. h. Abmessungen und Positionsangaben, der Sensorsystem-Komponenten festlegen.

Tabelle 3.4 gibt für verschiedene Strukturvariationen des galvanomagnetischen Wegmesssystems zur Erfassung der Steuerkolbenposition die simulativ ermittelten Toleranzbereiche an, in denen ein fehlerfreier Betrieb des Messsystems möglich ist [WIL-98]. Zur Verdeutlichung des Fehlereinflusses sind zusätzlich die unter Annahme einer maximalen Ausprägung des Fehlermerkmals resultierenden Feldverläufe in der Sensorebene dargestellt. Eine Neigung der Sensorzeile etwa erlaubt nur einen sehr kleinen Toleranzbereich, um ohne Nacharbeit am System Messfehler zu vermeiden. Der demonstrierte Verlauf kennzeichnet ein Sensorsystem, das funktionsuntauglich

ist, da im Bereich der Kolbenendpositionen zwei Nulldurchgänge der zur Sensorebene senkrechten Feldkomponente auftreten werden. In diesen Fällen ist die eindeutige Positionsermittlung des Steuerkolbens ausgeschlossen [PIT-99b].

Tabelle 3.4: Toleranzbereiche für Fehlermerkmale ausgewählter Strukturvariationen
 x – Abstand von der Sensormitte; B_n – Normalkomponente des Magnetfeldes in der Sensorebene;
 B_z – Feldkomponente senkrecht zur Sensorebene; α_s – Neigungswinkel (Sensor); β_s – Kippwinkel (Sensor);
 φ – Drehwinkel (Magnetanordnung); Δz_M – Höhenversatz (Einzelmagnet)

Fehler (Strukturvariation)	Anordnung (strukturvariiertes System)	Feldverlauf (Fehlereinfluss maximal)	Toleranzbereich
a) Verdrehung der Magnetanordnung b) Verkipfung der Sensorzeile			zulässige Winkelbereiche für eine Verdrehung: a) $-20^\circ \leq \varphi \leq 20^\circ$ b) $0^\circ \leq \beta_s \leq 20^\circ$
Einzel-Höhenversatz			zulässiger Höhenversatz für einen Einzel-Magneten: a) $\Delta z_M \geq -5,3 \mu\text{m}$ b) $\Delta z_M \leq 5,3 \mu\text{m}$
Sensor-Neigung			zulässiger Neigungswinkelbereich für die Sensorzeile: a) + b) $0^\circ \leq \alpha_s \leq 0,11^\circ$

Die Information, ob ein geometrischer Fehler, d. h. ob eine Strukturvariation während der Fertigung des Sensorsystems bzw. einer der Systemkomponenten entstanden ist, lässt sich im Rahmen qualitätssichernder Prüfmaßnahmen gewinnen. Ein Vergleich des simulativ bestimmten Idealverlaufs des Magnetfelds mit dem Ist-Verlauf der dem Magnetfeld proportionalen Hall-Spannung über der Sensorzeile liefert direkt Art und Ausprägung der Strukturvariation. Die in der Prüfplanung festgelegten Eingriffsgrenzen bestimmen letztlich die durchzuführenden Korrekturmaßnahmen am Messsystem bzw. Regulierungsmaßnahmen im Fertigungsprozess.