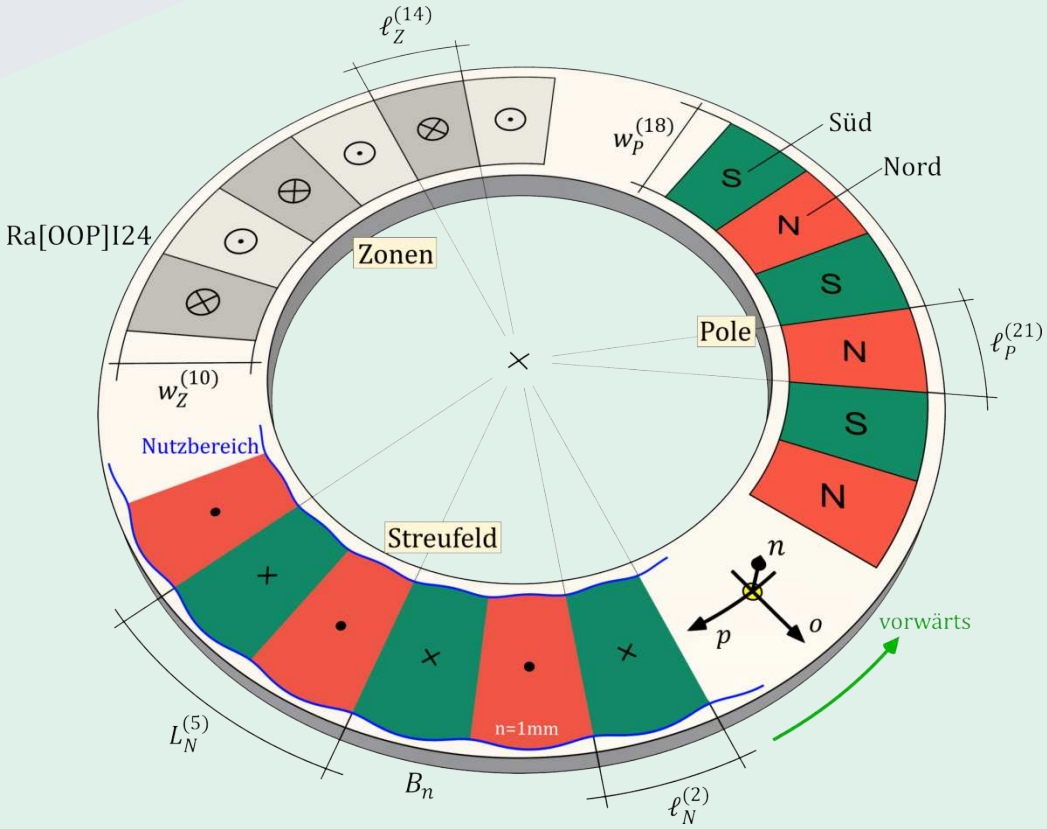
INNOMAG

RICHTLINIE

Magnetische Maßverkörperungen für Weg- und Winkelmesssysteme

Terminologie, technische Darstellung, Einteilung,
Messaufbau, Vermessung und Bewertung

Version 1.1



Magnetische Maßverkörperungen für Weg- und Winkelmesssysteme

Version: 1.1

Publikationsdatum: 2026-11-01

DOI: 10.5281/zenodo.23735084

Autoren: Michael Ortner, Rolf Slatter

Herausgeber: INNOMAG e. V., Ruhe Almend 8, 67655 Kaiserslautern

Dieses Werk ist unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0) lizenziert. Ausgenommen sind Inhalte Dritter, sofern diese nicht ausdrücklich anders gekennzeichnet sind.

Das Werk darf vervielfältigt, verbreitet, bearbeitet und für beliebige Zwecke, einschließlich kommerzieller Zwecke, verwendet werden, sofern eine angemessene Namensnennung erfolgt, auf die Lizenz verwiesen wird und Änderungen kenntlich gemacht werden.

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Inhaltsverzeichnis

Mitwirkung und Autorschaft 1

Vorwort 3

Abkürzungen und Formelzeichen 5

1 Einleitung 7
1.1 Hintergrund und Zielsetzung . . . 7
1.2 Geltungsbereich . . . 8

2 Beispiele magnetischer Messsysteme 9
2.1 Wegmesssystem in einer Hinterachslenkung . . . 9
2.2 Winkelmesssystem in einem Elektromotor . . . 10

3 Grundlagen des Messsystems 13
3.1 Magnet und Magnetfeld . . . 13
3.2 Anordnung des Messsystems . . . 14
3.3 Koordinatensystem der Maßverkörperung . . . 15
3.4 Orientierung magnetischer Größen . . . 16
3.5 Indexkonventionen . . . 17

4 Magnetische Struktur der Maßverkörperung 19
4.1 Magnetisierte Zonen . . . 19
4.2 Magnetpole . . . 21
4.3 Zonenmuster und Polmuster . . . 22
4.4 Magnetische Spuren . . . 23
4.5 Darstellungskonventionen . . . 25
4.6 Magnetische Struktur . . . 28

5 Streufeld der Maßverkörperung 35
5.1 Ermittlungsbereich und Feldverläufe . . . 35
5.2 Streufeld einer Maßverkörperung . . . 36
5.3 Feldmerkmale auf Messpfaden . . . 37
5.4 Feldmerkmale auf Messflächen und im Raum . . . 39
5.5 Felddarstellung . . . 42
5.6 Spurfelder . . . 45

6 Grundlagen der Vermessung 47
6.1 Messgegenstand . . . 47
6.2 Mechanischer Bezug . . . 47
6.3 Magneto-mechanischer Bezug und Feld-KS . . . 48
6.4 Spurfeldlage und -abmessungen . . . 50
6.5 Strukturbegriffe und Feldgrößen . . . 52

7 Einteilung magnetischer Maßverkörperungen 55
7.1 Grundlegende Einteilung und Kurznotation . . . 55

7.2 Dipolmagnete 56
7.3 Multipolmagnete 56
7.4 Magnetische Maßstäbe 57
7.5 Taxonomie magnetischer Maßverkörperungen 61

8 Schnittstelle zur Sensorik **63**
8.1 Sensorart und -funktion 63
8.2 Aufbau des Sensormoduls 63
8.3 Lagebeziehung des Sensors 64

Literatur **67**

Abbildungsverzeichnis

1.1 Wertschöpfungskette „Vom Rohstoff bis zur Anwendung“ 7

2.1 Beispiel Wegmessung bei einer Hinterachslenkung 9
2.2 Positionsermittlung bei linearen Wegmesssystemen 10
2.3 Beispiel Winkelmessung in einem Elektromotor 10
2.4 Ausgangssignale und Winkelfehler des magnetischen Drehgebers 11

3.1 Physikalische Grundbegriffe 14
3.2 Geometrische Anordnungen eines Messsystems 15
3.3 Wahl der Koordinatenrichtungen 16

4.1 Magnetische Polarisation und magnetisierte Zonen 19
4.2 IP-Zonen und OOP-Zonen 20
4.3 Wahl der Zoneneinteilung 20
4.4 Streufeld und Normalkomponente bei gegebener Polarisation 21
4.5 Magnetische Struktur und physikalische Grundlage 22
4.6 Zusammenhang der magnetischen Größen 23
4.7 Spurenausrichtung 24
4.8 Beschreibungsgrad einer Spur 24
4.9 Konvention für die Zonendarstellung 25
4.10 Konvention für die Poldarstellung 25
4.11 Darstellungsbeispiele Zonen- und Poldarstellung 26
4.12 Darstellungsbeispiele kombinierte Darstellung 26
4.13 Darstellungsbeispiele farbcodierte Zonendarstellung 27
4.14 Darstellungsbeispiele Spuren 27
4.15 Struktur-KS am Beispiel einer magnetischen Spur 28
4.16 Strukturbeschreibung des Zonenmusters eines Multipolquaders 29
4.17 Strukturbeschreibung des Zonenmusters eines axialen Multipolrings 30
4.18 Strukturbeschreibung des Polmusters 31
4.19 Strukturbeschreibung von magnetischen Spuren 32
4.20 Strukturbeschreibung eines Rotationsmaßstabs mit mehreren Spuren 33

5.1 Ermittlungsbereiche 35
5.2 Streufeldcharakteristik einer magnetischen Maßverkörperung 36
5.3 Feldverlauf entlang eines p-Pfades 38
5.4 Feldverlauf entlang eines o-Pfades 39
5.5 Feldverlauf auf p-o-Messfläche 40
5.6 Feldverlauf auf p-o-Messfläche in binärer Form 40
5.7 Feldverlauf im Raum 42
5.8 Konvention für binäre Felddarstellung 43
5.9 Felddarstellung von IP- und OOP-Komponenten 43
5.10 Felddarstellung in Projektion auf die Maßverkörperung 44
5.11 Felddarstellung Soll und Ist 44
5.12 Spurfelder und Nutzbereiche mehrspuriger Maßstäbe 45

6.1 Mechanischer Bezug 48
6.2 Magneto-mechanischer Bezug und Feld-KS 49
6.3 Spurfeldlage 50
6.4 Spurbreite und Spurfeldbreite 51

7.1 Kurznotation zur Einteilung 55
7.2 Beispielhafte Dipolmagnete 56
7.3 Beispielhafte Multipolmagnete 57
7.4 Spurtypen – Inkrementalspur I24 58
7.5 Spurtypen – Referenzspur R1 58
7.6 Spurtypen – Abstandscodierte Referenzspur RC3 58
7.7 Spurtypen – Pseudorandomcode P 58
7.8 Spurtypen – Gedrehte Grenzen V 59
7.9 Spurtypen – Inkrementalspur mit Referenzspur I24:R1 59
7.10 Spurtypen – Inkrementalspur mit abstandscodierter Referenzspur I24:RC3 59
7.11 Spurtypen – Noniusmuster I23:I24 59
7.12 Spurtypen – Inkrementalspur mit Pseudorandomcode I24:P 60
7.13 Beispielhafte magnetische Maßstäbe 60
7.14 Taxonomie magnetischer Maßverkörperungen 61

8.1 Beispielhafter Aufbau eines Sensormoduls 64
8.2 Lagebeziehung des Sensors 65

Tabellenverzeichnis

3.1 Kürzel für Bezugsindizes 17

4.1 Begriffe Zonen 30
4.2 Begriffe Pole 31
4.3 Begriffe Spuren 33

5.1 Begriffe Feldmerkmale 39

6.1 Begriffe Spurfeld 52
6.2 Begriffsklärung zu Magnetpol 52
6.3 Begriffsklärung zu Spur 53

8.1 Begriffe Sensorlage 66

Mitwirkung und Autorschaft

Mitwirkung

Diese Richtlinie bildet einen **gemeinsamen Rahmen** für die Beschreibung, Darstellung und Bewertung magnetischer Maßverkörperungen und soll unter Einbeziehung von Anwendern, Entwicklern und Fachleuten kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Hinweise auf Unklarheiten, Korrekturvorschläge, Ergänzungen und Vorschläge zur Weiterentwicklung sind ausdrücklich willkommen. Rückmeldungen können per E-Mail an **guideline@innomag.org** gesendet oder über die Diskussionsmöglichkeiten im GitHub-Repository github.com/innomag-ev/Innomag-Guideline eingebracht werden.

Autoren

Verantwortung für die jeweiligen Kapitel; Entwicklung und Ausarbeitung von Konzept, Struktur und Inhalten.

Name	Organisation	Beitrag
Michael Ortner	Silicon Austria Labs GmbH	Kapitel 2–8; Editor
Rolf Slatter	INNOMAG e. V.	Kapitel 1; Übersetzung ins Englische

Fachliche Mitwirkung

Fachlicher Austausch und Diskussion; fachliche Beiträge zu einzelnen Kapiteln; Rückmeldungen zu Inhalten; Review ausgewählter Abschnitte; Begleitung der konzeptionellen Weiterentwicklung.

Name	Organisation	Beitrag
Armin Pfeffer	Bogen Magnetics GmbH	Fachliche Mitwirkung
Axel Bartos	TE Connectivity	Fachliche Mitwirkung
Benjamin Wenzel	Matesy GmbH	Fachliche Mitwirkung
Bernd Böhle	ELSOMA GmbH	Fachliche Mitwirkung
Florian Slanovc	Silicon Austria Labs GmbH	Fachliche Mitwirkung
Heiko Knoll	ITK Precisioning GmbH	Fachliche Mitwirkung
Jürgen Gerber	INNOMAG e. V.	Fachliche Mitwirkung; Koordination; Buchdruck
Magnus Meier	IC-Haus GmbH	Fachliche Mitwirkung
Mattias Pelkner	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	Fachliche Mitwirkung

Name	Organisation	Beitrag
Michael Melzer	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung	Fachliche Mitwirkung
Michal Pham	Baumer Group	Fachliche Mitwirkung
Pascal Hille	Sensitec GmbH	Fachliche Mitwirkung; Beitrag zu Kapitel 2
Phillip Beran	Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen IIS	Fachliche Mitwirkung
Ralph Bauer	Balluff GmbH	Fachliche Mitwirkung
René Buß	Sensitec GmbH	Fachliche Mitwirkung
Rocco Holzhey	Innovent GmbH	Fachliche Mitwirkung
Sebastian Rivera	ITK Precisioning GmbH	Fachliche Mitwirkung
Sibylle Sievers	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Fachliche Mitwirkung
Stefan Herzog	ZF Friedrichshafen AG	Fachliche Mitwirkung; Beitrag zu Kapitel 2
Thomas Schliesch	Max Baermann GmbH	Fachliche Mitwirkung
Werner Pessenhofer	Nanomag GmbH	Fachliche Mitwirkung

Vorwort

Magnetische Weg- und Winkelmesssysteme sind aus der modernen Automatisierungs-, Antriebs- und Fahrzeugtechnik nicht mehr wegzudenken. Ihr Herzstück – die magnetische Maßverkörperung – wird jedoch über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg von sehr unterschiedlichen Akteuren entwickelt, gefertigt, magnetisiert und geprüft. Gerade an diesen Schnittstellen zeigt sich immer wieder, wie sehr eine gemeinsame, eindeutige Sprache fehlt.

Einen ersten wichtigen Schritt zur Abhilfe stellte die DIN SPEC 91411 (Innomag 2022) dar. Die praktische Arbeit mit dieser Spezifikation in den vergangenen Jahren hat den Wert einer einheitlichen Beschreibung eindrücklich bestätigt – zugleich aber gezeigt, dass einige zentrale Begriffe in der täglichen Anwendung unterschiedlich verstanden und ausgelegt wurden. Aus diesem Erfahrungsschatz heraus entstand der Wunsch, bestehende Definitionen zu schärfen, Lücken zu schließen und die Darstellungsregeln konsistent auf physikalische Grundlagen zurückzuführen.

Die vorliegende Richtlinie ist das Ergebnis dieser Weiterentwicklung. Sie wurde von einem Konsortium aus Mitgliedsfirmen und -instituten des INNOMAG e. V. erarbeitet, das Hersteller, Anwender und Forschungseinrichtungen an einen Tisch gebracht hat. In dieser Zusammensetzung spiegelt das Dokument die geballte Praxiserfahrung der Fachgemeinschaft wider und verfolgt ein klares Ziel: eine gemeinsame, allgemein verständliche Terminologie für magnetische Maßverkörperungen zu etablieren, die Missverständnisse vermeidet und den fachlichen Austausch über Unternehmens- und Ländergrenzen hinweg erleichtert.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Michael Ortner von den Silicon Austria Labs, der sich in maßgeblicher Weise an der Erstellung dieser Richtlinie beteiligt hat. Ebenso danken wir allen mitwirkenden Autorinnen und Autoren sowie den beteiligten Unternehmen und Instituten, ohne deren Engagement dieses Dokument nicht möglich gewesen wäre.

Wir wünschen allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre und hoffen, dass diese Richtlinie in der Praxis ebenso breite Anwendung findet wie ihre Vorgängerin.

Dr. Rolf Slatter, Vorstandsvorsitzender, INNOMAG e. V.

Dr. Jürgen Gerber, Geschäftsführer, INNOMAG e. V.

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
KS	Koordinatensystem
IP	in-plane
OOP	out-of-plane

Symbolverzeichnis grundlegender Größen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\vec{B}$	magnetische Flussdichte, B-Feld	T
$\vec{H}$	magnetische Feldstärke, H-Feld	A/m
$\vec{M}$	Magnetisierung	A/m
$\vec{J}$	magnetische Polarisation	T
μ_0	Vakuumpermeabilität	T m/A
p	Koordinate in Längsrichtung	m bzw. °
o	Koordinate in Querrichtung	m
n	Koordinate in Abstandsrichtung; Messhöhe bei entsprechender Verwendung	m
O	Ursprung eines Koordinatensystems	–
$\vec{e}_p$	Einheitsvektor in p-Richtung	–
$\vec{e}_o$	Einheitsvektor in o-Richtung	–
$\vec{e}_n$	Einheitsvektor in n-Richtung	–
$\vec{r}$	Orts- bzw. Lagevektor	m

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Magnetische Weg- und Winkelmesssysteme erfassen die Relativposition zweier Bauteile entlang einer festgelegten Bewegungskoordinate. Bei Wegmesssystemen wird diese als Weg entlang eines Pfads, bei Winkelmesssystemen als Drehwinkel um eine mechanische Achse angegeben. Sie machen einen großen Teil der magnetischen Positionsmesssysteme in industriellen Anwendungen aus.

Typischerweise bestehen magnetische Weg- und Winkelmesssysteme aus einem felderzeugenden Dauermagneten – der **magnetischen Maßverkörperung** – und einem **magnetischen Sensor**. Der Sensor erfasst das von der Maßverkörperung erzeugte Magnetfeld und wandelt es in elektrische Ausgangssignale um. Aus diesen Signalen bestimmt das Messsystem die darin enthaltene relative Positionsinformation.

> **Hinweis 1.1**
>
> *Der Begriff **Sensor** wird in der Praxis uneinheitlich für Sensorelemente als Wandlerelemente und für Sensormodule als funktionale Gesamteinheiten verwendet. In dieser Richtlinie wird er eingesetzt, wenn eine genaue Unterscheidung nicht erforderlich ist.*

Das berührungslose magnetische Messprinzip bietet **Vorteile** hinsichtlich Robustheit, Verschleißfreiheit, Verschmutzungsunempfindlichkeit, Integrationsfähigkeit und Kosten und hat sich daher in zahlreichen industriellen Anwendungen etabliert. (Cassing u. a. 2018; Michalowsky und Schneider 2006; Schwegler und Rapp 2016; Hilzinger und Rodewald 2013; Coey 2010; Cullity und Graham 2008)

Zur **Herstellung** magnetischer Maßverkörperungen werden Rohlinge in einem Magnetisierungsprozess magnetisch codiert. Die Auswahl von Material und Geometrie der Rohlinge richtet sich nach den Anforderungen der späteren Anwendung sowie nach der Komplexität der erforderlichen magnetischen Codierung. Diese reicht von einfachen homogenen Magnetisierungen bis hin zu komplexen Mustern. Materialinhomogenitäten sowie mechanische Toleranzen bei Formgebung, Magnetisierung und Montage zählen dabei zu den **qualitätsrelevanten Fehlerquellen** (Schliesch 2022) und können die Güte des gesamten Messsystems in der Endanwendung maßgeblich beeinflussen (Kolb u. a. 2019).

Herstellung und Prüfung magnetischer Maßverkörperungen bilden einen wesentlichen Abschnitt der Wertschöpfungskette „Vom Rohstoff bis zur Anwendung“, die in Abbildung 1.1 dargestellt ist.

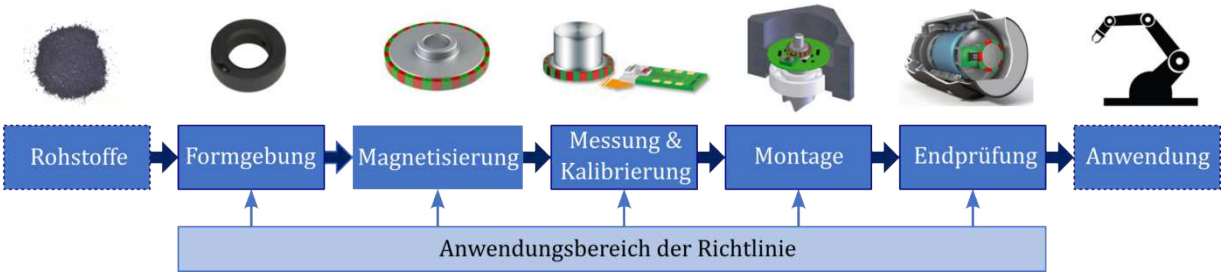


Abbildung 1.1: Wertschöpfungskette „Vom Rohstoff bis zur Anwendung“

Da die einzelnen Prozessschritte häufig von unterschiedlichen Akteuren durchgeführt werden, entstehen an den Übergängen Schnittstellen hinsichtlich der mechanischen und magnetischen Eigenschaften der Maßverkörperung sowie ihrer Prüfung. Für diese Schnittstellen fehlen bislang eine einheitliche **Terminologie** zur Beschreibung magnetischer Maßverkörperungen, standardisierte **Darstellungsregeln** sowie abgestimmte Verfahren zu ihrer **Vermessung** und **Bewertung**. Eine zuverlässige Qualitätsbewertung setzt insbesondere voraus, dass die verwendeten Prüfverfahren eindeutig beschrieben und vergleichbar angewendet werden können.

Unvollständige Informationen und uneinheitliche Bezeichnungen können an den Schnittstellen zu **Missverständnissen und Fehlern** führen und dadurch zusätzlichen Entwicklungsaufwand und Kosten verursachen. Werden Anforderungen an magnetische Maßverkörperungen nicht eindeutig beschrieben, erschwert dies zudem den Vergleich von Komponenten unterschiedlicher Hersteller sowie die Auswahl geeigneter Alternativprodukte oder Ersatzteile (Second Source).

Ziel dieser Richtlinie ist es, eine einheitliche Terminologie sowie Regeln zur Beschreibung, Darstellung, Vermessung und Bewertung magnetischer Maßverkörperungen zu schaffen. Die Richtlinie stellt eine Weiterentwicklung der DIN SPEC 91411 (Innomag 2022) dar und richtet sich an Komponentenlieferanten, Hersteller und Anwender magnetischer Weg- und Winkelmesssysteme.

Hinweis 1.2

*Diese Richtlinie ist als **lebendes Dokument** angelegt. In der vorliegenden Fassung 1.x liegt der Schwerpunkt auf Terminologie, Beschreibung, Darstellung, Einteilung und Grundlagen der Vermessung magnetischer Maßverkörperungen. Weiterführende Inhalte, insbesondere zu Prüfaufbau und Bewertung, werden in späteren Fassungen ergänzt.*

1.2 Geltungsbereich

Diese Richtlinie behandelt magnetische Maßverkörperungen als Komponenten magnetischer Weg- und Winkelmesssysteme. Im Mittelpunkt stehen ihre magnetische und geometrische Beschreibung, die Darstellung und Spezifikation ihrer Eigenschaften sowie deren Vermessung und Bewertung.

Die eingeführte Terminologie und Beschreibungssystematik ist speziell für magnetische Weg- und Winkelmesssysteme ausgelegt. Sie kann jedoch in weiten Teilen auch auf mehrdimensionale magnetische Positionsmesssysteme sowie allgemein auf die technische Beschreibung und Darstellung von Dauermagneten übertragen werden.

Das Messsystem, der magnetische Sensor und der Herstellungsprozess der Maßverkörperung werden nur insoweit betrachtet, wie dies für die Beschreibung, Vermessung oder Bewertung der Maßverkörperung erforderlich ist. Die Bewertung des vollständigen Messsystems bzw. der Endanwendung, insbesondere seiner Positionsgenauigkeit, ist nicht Gegenstand dieser Richtlinie.

Die Maßverkörperung wird damit grundsätzlich unabhängig von einem bestimmten Herstellungsverfahren, Sensortyp oder einer konkreten Anwendung beschrieben. Anforderungen an ihre Eigenschaften können sich jedoch aus Herstellung, Sensorik und Anwendung ergeben.

2 Beispiele magnetischer Messsysteme

Dieses Kapitel zeigt industrielle Beispiele magnetischer Weg- und Winkelmesssysteme. Die Beispiele verdeutlichen, wie magnetische Maßverkörperungen zusammen mit magnetischen Sensoren zur Positionserfassung in realen Anwendungen eingesetzt werden. Sie dienen als anschauliche Motivation für die in diesem Dokument eingeführten Begriffe, Beschreibungsformen und Modellvorstellungen.

2.1 Wegmesssystem in einer Hinterachslenkung

Die Hinterachslenkung in einem Automobil bezeichnet das zusätzliche Mitlenken der Hinterräder durch gezieltes Verstellen ihres Spurwinkels. Moderne Systeme erreichen dabei je nach Ausführung Spurwinkel von bis zu 10°. Dadurch kann bei niedrigen Geschwindigkeiten der Wendekreis des Fahrzeugs verkleinert und bei höheren Geschwindigkeiten die Fahrstabilität erhöht werden. Eingesetzt wird diese Technologie insbesondere in größeren Pkw, etwa in Limousinen, SUVs, Sportwagen und Elektrofahrzeugen (Hägele 2014).

Für die Regelung der Hinterachslenkung ist eine robuste und berührungslose Wegerfassung der Aktuatorposition erforderlich. Ein magnetisches Messsystem kann hierfür die Verstellung auch unter fahrzeugtypischen Umgebungsbedingungen wie Vibration, Temperaturänderung, Verschmutzung und begrenztem Bauraum zuverlässig erfassen.

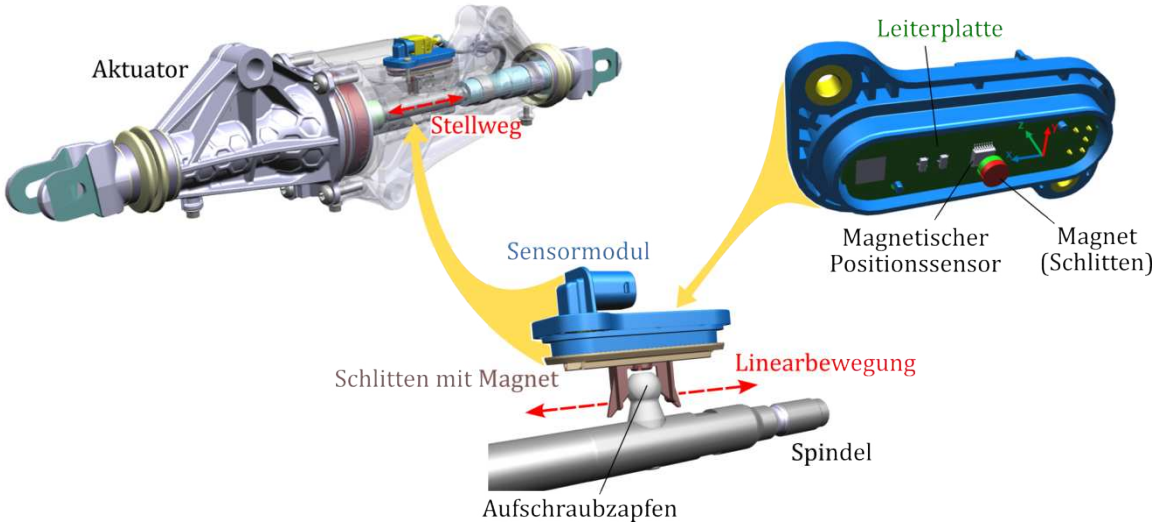


Abbildung 2.1: Beispiel Wegmessung bei einer Hinterachslenkung[1]

Abbildung 2.1 zeigt ein magnetisches Wegmesssystem, das zur Erfassung des Spurwinkels der Hinterachse eingesetzt wird (ZF Friedrichshafen AG 2026). Der Spurwinkel wird dabei mechanisch auf einen linearen Stellweg übersetzt. Je nach Ausführung werden Stellwege bis 40 mm durch einen elektromechanischen Aktuator eingestellt.

[1] Quelle: ZF Friedrichshafen AG (ZF Friedrichshafen AG 2026); redaktionelle Bearbeitung durch die Autoren.

Zur Positionserfassung, insbesondere zur Erfassung der Neutralstellung, ist an der Spindel ein Aufschraubzapfen montiert. Auf diesem befindet sich ein Schlitten mit einem axial magnetisierten NdFeB-Zylindermagneten, der als einfacher Dipolmagnet die magnetische Maßverkörperung bildet. Der Magnet weist einen Durchmesser von 6 mm und eine Höhe von 3 mm auf. Das blaue Sensormodul mit dem auf der Leiterplatte montierten magnetischen Sensor ist oberhalb des Magneten fest positioniert. Der Abstand zwischen Magnet und Sensor beträgt etwa 3 mm. Bei einer Veränderung des Spurwinkels bewegt sich der Magnet entlang des linearen Stellwegs relativ zum fest montierten Sensor.

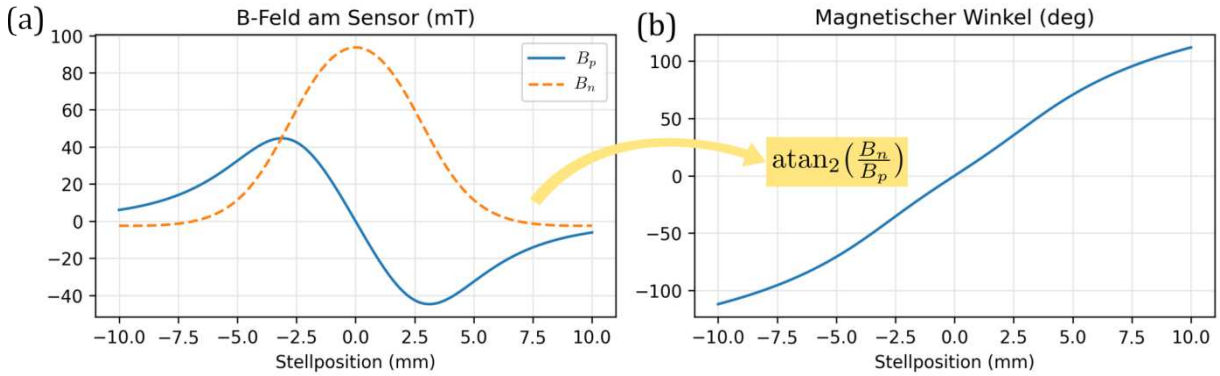


Abbildung 2.2: Positionsermittlung bei linearen Wegmesssystemen

Abbildung 2.2 (a) zeigt die positionsabhängige Änderung der vom Sensor erfassten Streufeldkomponenten für einen linearen Stellweg von 20 mm in diesem System. Aus den beiden Feldkomponenten wird mit einem üblichen Berechnungsschema ein magnetischer Winkel ermittelt (b). Im betrachteten Stellbereich ist dieser streng monoton und ermöglicht dadurch eine eindeutige Zuordnung der linearen Stellposition zum magnetischen Winkel.

Das Beispiel steht für einfach aufgebaute magnetische Wegmesssysteme, die aufgrund ihrer Robustheit und Kosteneffizienz weit verbreitet sind. Trotz des einfachen Grundprinzips kann die konkrete Einbausituation komplex sein und erfordert eine sorgfältige Systemauslegung sowie eine präzise und robuste Erfassung des Streufeldes.

2.2 Winkelmesssystem in einem Elektromotor

Die Bestimmung von Drehwinkel und Drehzahl ist eine zentrale Voraussetzung für den geregelten Betrieb elektrischer Motoren. Insbesondere bei geschlossenen Regelkreisen werden diese Größen benötigt, um die Rotorlage zu bestimmen, die Ansteuerung der Phasenströme darauf abzustimmen und Drehmoment sowie Drehzahl präzise zu regeln. Hierfür können unterschiedliche Arten von Drehgebern eingesetzt werden.

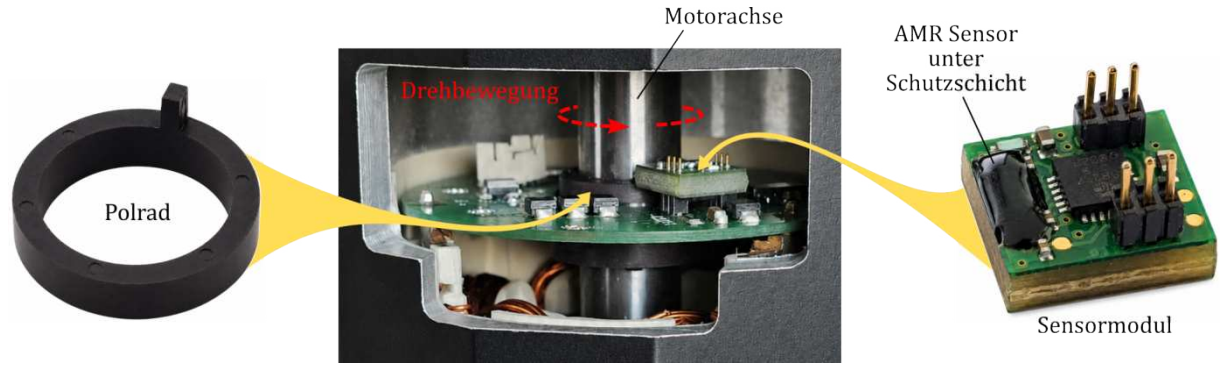


Abbildung 2.3: Beispiel Winkelmessung in einem Elektromotor[2]

Abbildung 2.3 zeigt eine typische Einbausituation eines magnetischen Drehgebers. Das Messsystem besteht aus einem als Polrad ausgeführten magnetischen Maßstab aus kunststoffgebundenem Hartferrit und einem darauf abgestimmten Sensormodul. Der Maßstab weist zwei magnetische Spuren auf: eine Inkrementalspur mit $N_P = 32$ Polen sowie eine Referenzspur mit einem einzelnen Referenzpol. Eine Besonderheit des Maßstabs besteht darin, dass die Referenzspur durch eine kleine, am Spritzgussteil ausgeformte Erhebung („Nase“) realisiert wird, deren Bogenlänge der Pollänge der Referenzspur entspricht.

Das Sensormodul besitzt auf seiner Oberseite einen GMR-Sensor zur Erfassung der Referenzspur und auf seiner Unterseite einen AMR-Sensor zur Erfassung der Inkrementalspur. Es gibt nach interner Signalaufbereitung und Interpolation ein quadraturcodiertes A/B-Signal mit 4096 Flanken pro Umdrehung sowie einen Referenzpuls Z pro Umdrehung aus, siehe Abbildung 2.4 (a). Eine typische Fehlerkurve des vollständigen Messsystems ist in Teilbild (b) gezeigt.

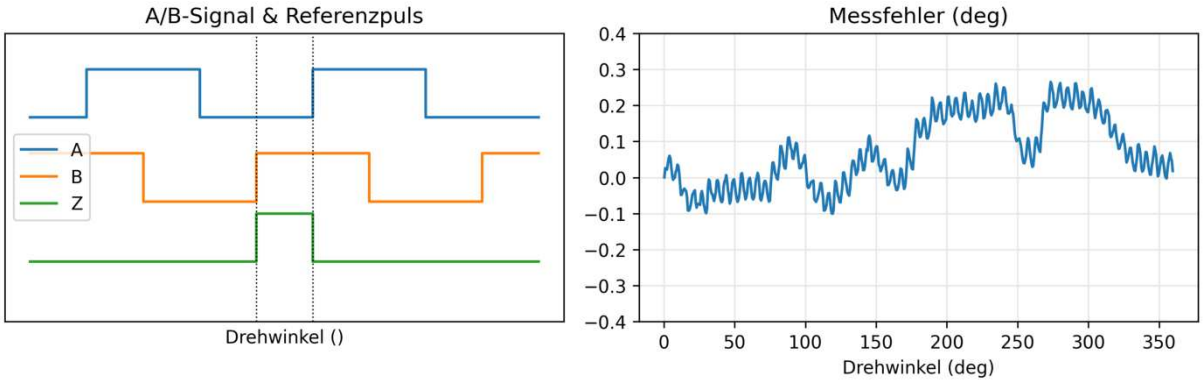


Abbildung 2.4: Ausgangssignale und Winkelfehler des magnetischen Drehgebers[3]

Das Beispiel veranschaulicht die reale Einbausituation und das Zusammenwirken mehrerer magnetischer Spuren mit unterschiedlichen Funktionen für die Realisierung eines magnetischen Winkelmesssystems.

[2]Quelle der Abbildung: Sensitec GmbH; redaktionelle Aufbereitung durch die Autoren.
[3]Quelle der Abbildung: Sensitec GmbH; redaktionelle Aufbereitung durch die Autoren.

3 Grundlagen des Messsystems

In diesem Kapitel werden wichtige Grundlagen magnetischer Weg- und Winkelmesssysteme beschrieben. Insbesondere werden Komponenten wie Sensor und magnetische Maßverkörperung eingeführt und ihre Anordnung im Messsystem beschrieben.

3.1 Magnet und Magnetfeld

Die **Magnetisierung** $\vec{M}$ (Einheit A/m) beschreibt den magnetischen Zustand eines Materials infolge der Ausrichtung seiner mikroskopischen magnetischen Dipolmomente und entspricht dem magnetischen Moment pro Volumeneinheit. Die **magnetische Polarisation** $\vec{J}$ (Einheit T) ist eine dazu proportionale Größe, $\vec{J} = \mu_0 \vec{M}$. Ein Körper mit permanenter Magnetisierung wird als **Dauermagnet** bezeichnet (Jackson 1998; Petrascheck und Schwabl 2023).

Hinweis 3.1

*Für den in diesem Dokument bevorzugt verwendeten Begriff **Polarisation** wird in der Fachliteratur und Praxis meist der proportionale Begriff **Magnetisierung** verwendet. Der Begriff Polarisation wird in dieser Richtlinie bevorzugt, weil er eine eindeutige Abgrenzung gegenüber dem Prozess der Magnetisierung sicherstellt. Darüber hinaus entspricht diese Wahl der in der Praxis verbreiteten Angabe der magnetischen Stärke von Dauermagneten in Tesla.*

Das **Magnetfeld** ist ein physikalisches Feld, das von bewegten elektrischen Ladungen oder magnetisierten Körpern erzeugt wird. Es beschreibt den Zustand des Raums, in dem magnetische Kräfte wirken, und wird durch die magnetische Feldstärke $\vec{H}$ und die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ charakterisiert. Um den häufig auftretenden terminologischen Verwirrungen vorzubeugen, werden diese fundamentalen physikalischen Größen in diesem Dokument vereinfachend als **B-Feld** und **H-Feld** bezeichnet.

Die Felder $\vec{B}$ und $\vec{H}$ unterscheiden sich durch ihre Einheiten und durch die Berücksichtigung der Magnetisierung. Sie stehen in folgender Beziehung: $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$. Da im Kontext dieser Richtlinie das Magnetfeld ausschließlich außerhalb einer magnetischen Maßverkörperung betrachtet wird, also in einem Bereich, in dem $\vec{M} = 0$ gilt, sind B- und H-Feld proportional und werden daher synonym behandelt. Das Magnetfeld im Außenraum eines Dauermagneten wird auch oft als **Streufeld** bezeichnet.

Die Größen $\vec{M}, \vec{J}, \vec{H}$ und $\vec{B}$ entsprechen den gleichnamigen fundamentalen Feldgrößen aus den Maxwellschen Gleichungen in der Materie (Jackson 1998; Petrascheck und Schwabl 2023).

Das Magnetfeld eines Körpers ergibt sich aus der Überlagerung der Magnetfelder seiner mikroskopischen Dipolmomente, die seine Polarisation ausmachen. Bei homogener Polarisation weist insbesondere das Streufeld des Körpers eine hohe Ähnlichkeit mit dem Feld eines elementaren Dipols auf und wird im allgemeinen Sprachgebrauch dann häufig vereinfachend als **Dipolfeld** bezeichnet.

Abbildung 3.1 (a) zeigt das Feld eines Punktdipols. Teilbild (b) zeigt das Streufeld und die Polarisation eines würfelförmigen Dauermagneten im Querschnitt; die homogene magnetische Polarisation ist durch schwarze Pfeile dargestellt. Die dargestellten Feldlinien basieren auf einer numerischen Simulation. Es wird deutlich, dass das Streufeld eines endlichen Magneten in großem Abstand eine hohe Ähnlichkeit mit dem Dipolfeld aufweist, im Nahbereich jedoch deutliche Abweichungen zeigt.

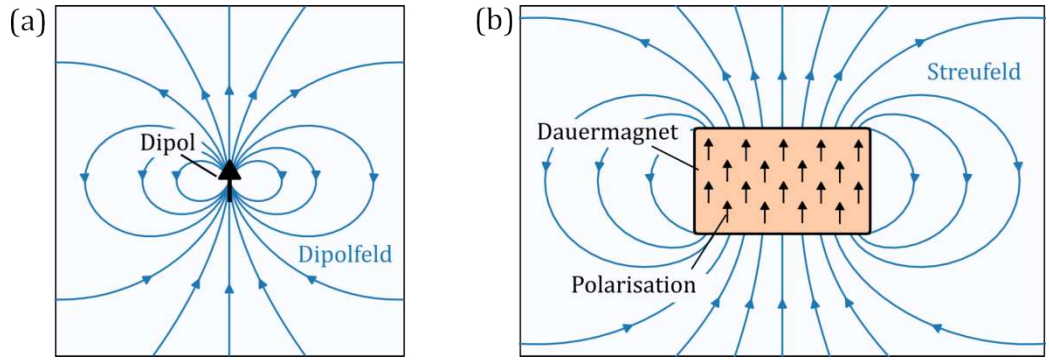


Abbildung 3.1: Physikalische Grundbegriffe

Dauermagnete können komplexe Polarisation aufweisen. **Dipolmagnete** sind Dauermagnete, deren Magnetfeld im betrachteten Bereich meist vom Dipolanteil dominiert wird, siehe auch Abbildung 3.1 (b). Typischerweise handelt es sich dabei um Körper mit quasi-homogener Polarisation. **Multipolmagnete** weisen mehrere Polarisationsbereiche auf. Sie können beispielsweise aus mehreren Dipolmagneten zusammengesetzt sein. **Magnetische Maßstäbe** sind hingegen Dauermagnete mit einem typischerweise entlang der Oberfläche verlaufenden streifenförmigen Polarisationsmuster. Diese Einteilung dient vorwiegend der groben Unterscheidung des Komplexitätsgrades eines Dauermagneten und wird in Kapitel 7 näher ausgeführt.

3.2 Anordnung des Messsystems

Magnetische Weg- und Winkelmesssysteme bestimmen die Relativposition zweier mechanischer Bauteile entlang einer festgelegten Bewegungskoordinate. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Dauermagneten und einem magnetischen Sensor, die jeweils einem der relativ zueinander bewegten Bauteile zugeordnet sind. Der Dauermagnet stellt die für die Positionsbestimmung erforderliche Ortsinformation durch die räumliche Struktur seines Streufeldes bereit und wird in diesem Zusammenhang als **magnetische Maßverkörperung** bezeichnet. Der Sensor erfasst das von der Maßverkörperung erzeugte Magnetfeld.

Ausgehend von der Messaufgabe und den damit verbundenen geometrischen Randbedingungen wird eine geeignete **geometrische Anordnung** von Sensor und Maßverkörperung gewählt. Dabei lassen sich magnetische Weg- und Winkelmesssysteme trotz zahlreicher konstruktiver Realisierungsmöglichkeiten zweckmäßig in vier Gruppen einteilen:

1. **Lineare Anordnung**: Sensor und Maßverkörperung bewegen sich entlang einer geradlinigen Bahn bei unveränderter relativer Orientierung zueinander. Die Bewegung erfolgt meist parallel zu einer Oberfläche der Maßverkörperung. Ein Beispiel hierfür ist die Anwendung nach Kapitel 2.1.
2. **Radiale Anordnung**: Eine rotationssymmetrische Maßverkörperung rotiert um ihre Rotationsachse. Der Sensor ist seitlich zur Rotationsachse an einer Mantelfläche der Maßverkörperung angeordnet. Ein Beispiel hierfür ist die Anwendung nach Kapitel 2.2.
3. **Axiale Anordnung**: Eine rotationssymmetrische Maßverkörperung rotiert um ihre Rotationsachse. Der Sensor ist stirnseitig zur Rotationsachse an einer Stirnfläche der Maßverkörperung angeordnet.
4. **Allgemeine Anordnung**: Geometrische Anordnungen, die keiner der drei zuvor genannten Gruppen zweckmäßig zugeordnet werden.

Abbildung 3.2 veranschaulicht die vier geometrischen Anordnungstypen: (a) eine lineare, (b) eine radiale, (c) eine axiale und (d) eine allgemeine Anordnung. Die allgemeine Anordnung ist hier anhand einer typischen eindimensionalen „Joystick-Realisierung“ dargestellt, bei der sich während der Bewegung sowohl die relative Orientierung als auch der Abstand zwischen Maßverkörperung und Sensor verändern.

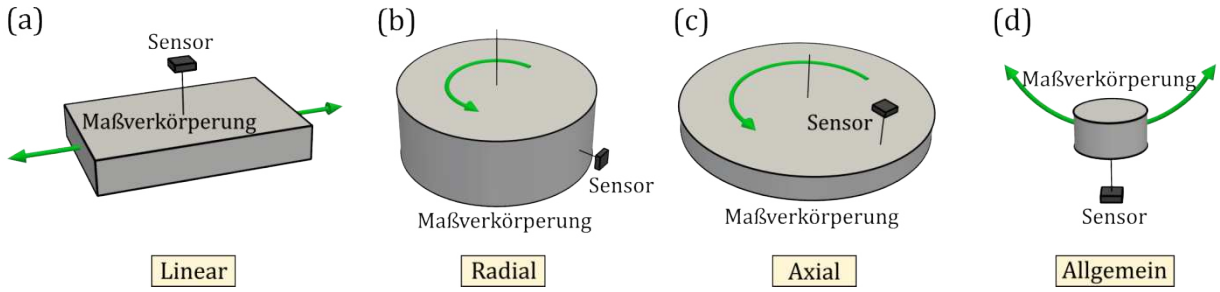


Abbildung 3.2: Geometrische Anordnungen eines Messsystems

Hinweis 3.2

*Der **Fokus der Richtlinie** liegt auf linearen, radialen und axialen Anordnungen, die einen großen Teil magnetischer Weg- und Winkelmesssysteme abdecken. Die in dieser Richtlinie eingeführte Terminologie ist in weiten Teilen auf allgemeine Anordnungen übertragbar. Die nachfolgend eingeführte Koordinatenwahl ist jedoch insbesondere für lineare, radiale und axiale Anordnungen zweckmäßig.*

3.3 Koordinatensystem der Maßverkörperung

Aus der geometrischen Anordnung ergibt sich eine **zweckmäßige Koordinatenwahl** zur Beschreibung des Messsystems.

Für die Beschreibung des Messsystems wird eine Bewegungsrichtung des Sensors oder der Maßverkörperung als **Vorwärtsbewegung** festgelegt. Die $\boldsymbol{p}$**-Richtung** mit dem Richtungsvektor $\vec{e}_p$ zeigt in Richtung der daraus resultierenden relativen Bewegung des Sensors und wird als **Längsrichtung** bezeichnet.

Die **funktionale Oberfläche** der Maßverkörperung ist die dem Sensor zugewandte, für die magnetische Abtastung maßgebende Bezugsfläche. Bei linearen Anordnungen verläuft sie parallel zur Relativbewegung von Sensor und Maßverkörperung; bei radialen und axialen Anordnungen entspricht sie der dem Sensor zugewandten Mantel- beziehungsweise Stirnfläche. Sie fällt mit einer physischen Oberfläche der Maßverkörperung zusammen und kann darüber hinaus als gedachte Bezugsfläche fortgesetzt werden. Die $\boldsymbol{n}$**-Richtung** mit dem Richtungsvektor $\vec{e}_n$ steht senkrecht zur funktionalen Oberfläche und zeigt zum Sensor.

Bei linearen, radialen und axialen Anordnungen stehen die Richtungsvektoren $\vec{e}_p$ und $\vec{e}_n$ damit immer senkrecht zueinander. Die $\boldsymbol{o}$**-Richtung** mit dem Richtungsvektor $\vec{e}_o$ wird als dritte rechtshändige Koordinatenrichtung festgelegt. Sie verläuft parallel zur funktionalen Oberfläche und wird als **Querrichtung** bezeichnet.

Mit einem festgelegten **Ursprung** O_M, der auf der funktionalen Oberfläche liegt, bilden die Richtungen p, o und n ein rechtshändiges Koordinatensystem (KS), das als **Maßverkörperungs-KS** bezeichnet wird. Es bildet den Bezug für die Beschreibung von Geometrie und magnetischer Struktur der Maßverkörperung, ihres Streufeldes sowie der Positionierung des Sensors.

Die funktionale Oberfläche der Maßverkörperung entspricht dann $n = 0$; die n-Koordinate gibt den Abstand von ihr an und wird als Messhöhe bezeichnet. Die **Messhöhe** des Sensors ist in linearen, radialen und axialen Anwendungen typischerweise konstant.

Bei linearen Anordnungen wird eine kartesische, bei radialen und axialen Anordnungen eine zylindrische Koordinatendarstellung verwendet. In den zylindrischen Fällen beschreibt die p-Koordinate die Winkelposition. Da diese in der Praxis häufig als zugehörige Bogenlänge angegeben wird, ist auf die **verwendeten Einheiten** entsprechend zu achten.

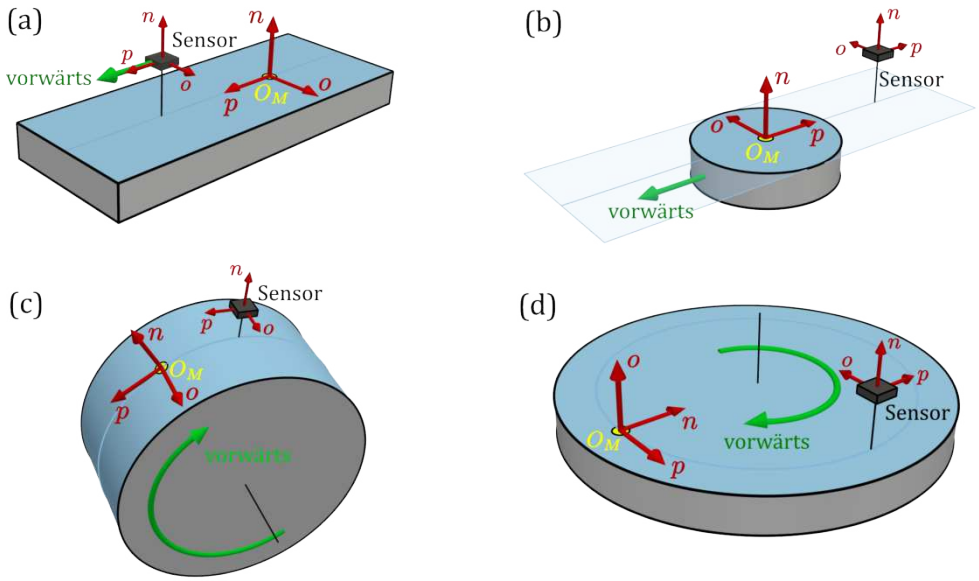


Abbildung 3.3: Wahl der Koordinatenrichtungen

Abbildung 3.3 zeigt verschiedene Anordnungen von Sensor und Maßverkörperung sowie eine jeweils zweckmäßige Wahl des Maßverkörperungs-KS. Die Teilbilder (a) und (b) zeigen lineare Anordnungen, Teilbild (c) eine radiale und Teilbild (d) eine axiale Anordnung.

Die funktionale Oberfläche der Maßverkörperung ist in der Abbildung blau hervorgehoben. In Teilbild (b) ist sie als gedachte Fortsetzung über die Seitenfläche der Maßverkörperung hinaus dargestellt. Die Vorwärtsbewegung ist grün eingezeichnet. Sie bezieht sich in Teilbild (a) auf die Bewegung des Sensors und in den übrigen Teilbildern auf die Bewegung der Maßverkörperung.

Aus der funktionalen Oberfläche und der Vorwärtsbewegung werden die Koordinatenrichtungen p, o und n wie beschrieben festgelegt. Das daraus resultierende Maßverkörperungs-KS ist rot dargestellt; sein beispielhaft gewählter Ursprung O_M ist gelb markiert. Zusätzlich sind die Koordinatenrichtungen an der jeweiligen Sensorlage eingezeichnet.

Hinweis 3.3

*Im allgemeinen Sprachgebrauch wird häufig von **Achsen** anstelle von Koordinatenrichtungen gesprochen. Davon wird hier abgeraten, da bei radialen und axialen Anordnungen einzelne Koordinatenrichtungen ortsabhängig sind und sich ihre Orientierung ändern kann. Der Begriff Achse kann daher fälschlich eine feste Raumrichtung suggerieren.*

3.4 Orientierung magnetischer Größen

Zur Beschreibung der Orientierung magnetischer Größen relativ zur funktionalen Oberfläche werden häufig die Bezeichnungen **in-plane (IP)** und **out-of-plane (OOP)** verwendet. Eine magnetische Größe ist IP-orientiert, wenn sie parallel zur funktionalen Oberfläche liegt, und OOP-orientiert, wenn sie senkrecht dazu steht. Das bedeutet, dass sowohl die p- als auch die o-Richtung in-plane liegen, während die n-Richtung out-of-plane orientiert ist. Entsprechend sind beispielsweise die Polarisationskomponenten J_p und J_o IP-Komponenten und J_n eine OOP-Komponente.

Bei den in dieser Richtlinie betrachteten linearen, radialen und axialen Anordnungen werden für die

Positionsmessung jedoch **überwiegend magnetische Größen in p- und n-Richtung** genutzt. Die o-Komponente der Polarisation beziehungsweise des Magnetfeldes spielt für die betrachteten Messprinzipien in der Regel keine unmittelbare Rolle. Die Bezeichnung IP wird daher in dieser Richtlinie überwiegend für in p-Richtung orientierte Polarisationen beziehungsweise für die p-Komponente des Magnetfeldes verwendet. Die Bezeichnung OOP bezieht sich entsprechend auf die n-Richtung.

3.5 Indexkonventionen

Viele der in diesem Dokument verwendeten Größen beziehen sich auf bestimmte Elemente magnetischer Messsysteme oder auf charakteristische Merkmale des Magnetfeldes. Zur Kennzeichnung dieses Bezugs werden die Kürzel in Tabelle 3.1 als untere Bezugsindizes verwendet.

Tabelle 3.1: Kürzel für Bezugsindizes

Kürzel	Bezug	Kürzel	Bezug
M	Maßverkörperung	**F**	Feld
S	Sensor	**P**	Pol
T	Struktur / Spur	**N**	Nullstelle
Z	Zone	**A**	Peak (Apex)
		G	Grenzwert

Darüber hinaus werden **Ordnungsindizes** verwendet, um einzelne Objekte oder Merkmale zu nummerieren und eindeutig zu kennzeichnen. Sie werden als obere Indizes in runden Klammern geführt.

Der Ordnungsindex i wird für Spuren und Spurfelder verwendet. Für weitere Struktur- und Feldmerkmale wird der Ordnungsindex j eingesetzt. Gleiche Ordnungsindizes stellen dabei nicht grundsätzlich eine Zuordnung zwischen unterschiedlichen Objekttypen dar. Beispielsweise muss Pol 3 nicht notwendigerweise Zone 3 zugeordnet sein.

Sind zur Beschreibung eines Objekts innerhalb einer Spur mehrere Ordnungsindizes erforderlich, werden diese durch ein Komma getrennt. Der erste Ordnungsindex gibt dabei die Spur an. Beispielsweise bezeichnet $l_P^{(2,5)}$ die Länge von Pol 5 der Spur 2.

Bei Größen, die sich auf zwei Spuren oder Spurfelder beziehen, wird der jeweilige Bezugsindex doppelt geführt. So kennzeichnet „TT“ eine Beziehung zwischen zwei Spuren und „FF“ eine Beziehung zwischen zwei Spurfeldern. Beispielsweise bezeichnet $w_{TT}^{(3,4)}$ den Spurabstand zwischen Spur 3 und Spur 4. Bei gerichteten Größen wie dem Versatz ist die Reihenfolge der Ordnungsindizes zu beachten.

Hinweis 3.4

*Zur Verbesserung der **Lesbarkeit** sollen Ordnungsindizes weggelassen werden, sofern die Zuordnung aus dem Kontext eindeutig hervorgeht. Besitzt ein magnetischer Maßstab beispielsweise nur eine Spur, soll anstelle von $w_T^{(1)}$ die verkürzte Schreibweise w_T verwendet werden.*

4 Magnetische Struktur der Maßverkörperung

Kapitel 3 führt die magnetische Maßverkörperung und ein ihr zugeordnetes Koordinatensystem ein. Im Folgenden werden ihre geometrische und magnetische Struktur beschrieben sowie Darstellungsregeln und Begriffe für eine technisch detaillierte Strukturbeschreibung festgelegt.

4.1 Magnetisierte Zonen

Magnetische Maßverkörperungen weisen häufig **periodisch strukturierte** oder aufeinander folgende Bereiche alternierend ausgerichteter Polarisation auf. In solchen Fällen lassen sich klar abgegrenzte Bereiche identifizieren, die voneinander getrennten, jedoch meist identisch oder ähnlich aufgebauten Abschnitten entsprechen, die gemeinsam das Gesamtsystem bilden.

Um diese strukturellen Einheiten präzise beschreiben und individuell referenzieren zu können, wird der Begriff der **magnetisierten Zone** eingeführt. Eine magnetisierte Zone ist ein zusammenhängendes, geometrisch einfaches magnetisiertes Volumen, in dem die magnetische Polarisation in ihrer räumlichen Verteilung bekannt ist und einen von null verschiedenen Mittelwert aufweist. Zonen dienen der systematischen Zerlegung der Polarisation einer Maßverkörperung in klar definierte Abschnitte, die einzeln analysiert, nummeriert und im Zuge einer Vermessung oder Modellbildung charakterisiert werden. Die Zerlegung einer Polarisationsverteilung in Zonen kann als räumliche Diskretisierung aufgefasst werden.

Hinweis 4.1

*Die **magnetisierte Zone** ist begrifflich klar von der **magnetischen Domäne** (Weißsche Bezirke) abzugrenzen. Domänen sind meist kleine Bereiche einheitlicher Polarisation, die infolge mikromagnetischer Wechselwirkungen entstehen, während Zonen im Sinne dieses Dokuments strukturelle Einheiten zur Beschreibung der Polarisationsverteilung darstellen. Eine Übereinstimmung ist im Einzelfall möglich, im Allgemeinen jedoch nicht gegeben.*

Besonders anschaulich wird diese Einteilung, wenn eine Maßverkörperung aus mehreren homogenen Dipolmagneten aufgebaut ist – in diesem Fall entspricht jeder einzelne Dipolmagnet einer eigenen Zone. Ebenso entsteht bei magnetischen Maßstäben, deren Polarisationsmuster durch schrittweises Einschreiben magnetisierter Bereiche erzeugt wird, bei jedem Schreibvorgang eine Zone in der unmittelbaren Umgebung des Schreibkopfes.

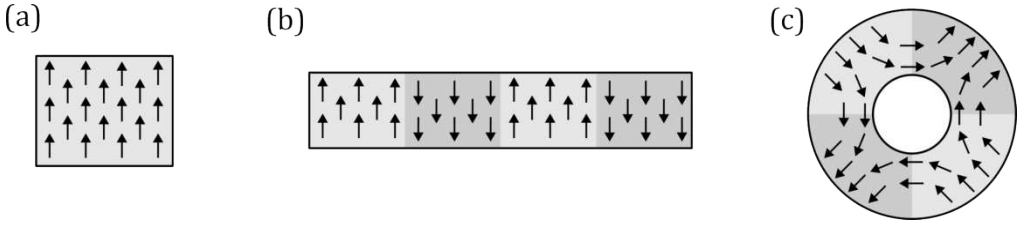


Abbildung 4.1: Magnetische Polarisation und magnetisierte Zonen

In Abbildung 4.1 sind Beispiele für typische magnetisierte Strukturen skizziert. Teilbild (a) zeigt einen homogen magnetisierten Dipolmagneten, der eine einzige Zone bildet. Teilbild (b) zeigt einen Multipolmagneten mit alternierender Polarisation entlang der Längsachse. Die unterschiedlich polarisierten Bereiche sind durch Schattierung hervorgehoben und veranschaulichen eine sinnvolle Zoneneinteilung. (c) zeigt einen Quadrupolring mit stark inhomogener Polarisation. Aufgrund seiner periodischen Struktur kann dennoch eine sinnvolle Zoneneinteilung vorgenommen werden.

Die mittlere **Polarisation einer Zone** $\vec{J}_Z$ ergibt sich aus dem Integralmittel des Polarisationsvektorfeldes über das Zonenvolumen. Verläuft $\vec{J}_Z$ in p-Richtung, spricht man nach Kapitel 3.4 von einer IP-Zone; verläuft sie hingegen in n-Richtung, von einer OOP-Zone. Eine symmetrische IP-Zone erzeugt demnach mittig über ihrer Oberfläche ein Magnetfeld, das in p-Richtung orientiert ist; symmetrische OOP-Zonen ein Magnetfeld in n-Richtung.

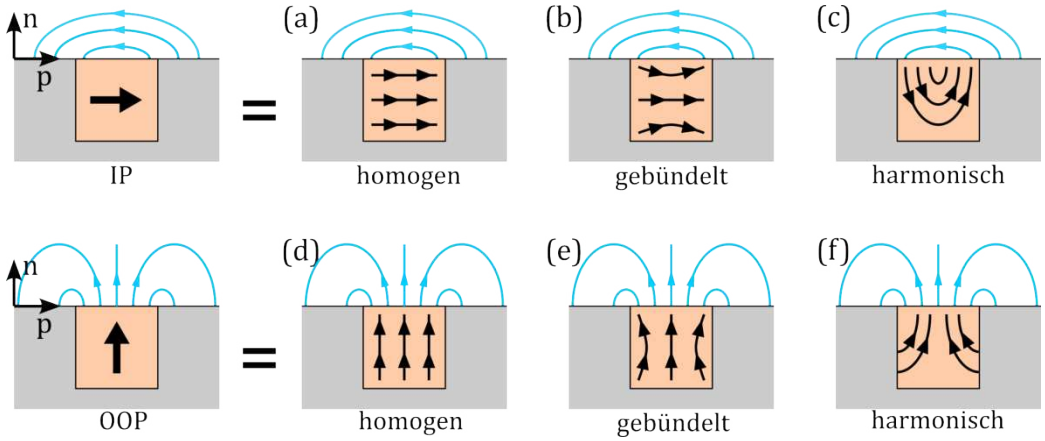


Abbildung 4.2: IP-Zonen und OOP-Zonen

Abbildung 4.2 zeigt schematische Beispiele für das Magnetfeld (Blau) und die Polarisation (Schwarz) verschiedener symmetrischer IP- und OOP-Zonen (Orange). Teilbilder (a) und (d) zeigen homogene Zonen mit gleichmäßiger Polarisation. In der Praxis tritt jedoch häufig eine „bündelförmige“ (bundle-shaped) Verteilung auf, die beispielsweise durch magnetostatische Selbstwechselwirkungen entsteht, siehe (b) und (e). Wird die Polarisation hingegen mit einem Schreibkopf schrittweise in ein dickes isotropes Material eingeschrieben, entstehen typischerweise harmonisch verlaufende Muster, wie in (c) und (f) skizziert. Die dargestellten Fälle verdeutlichen, dass Zonen auch dann sinnvoll als IP- oder OOP-Zone klassifiziert werden können, wenn die tatsächliche Polarisation nicht homogen ist.

In vielen Fällen ist die **Zoneneinteilung nicht eindeutig**; häufig existieren mehrere plausible Möglichkeiten, eine gegebene Polarisation sinnvoll zu zerlegen. Die gewählte Einteilung sollte daher stets der praktischen Anwendung, dem Verständnis und der eindeutigen Kommunikation dienen. In der Praxis ist dies meist bei einer Zerlegung in IP- oder OOP-Zonen gegeben.

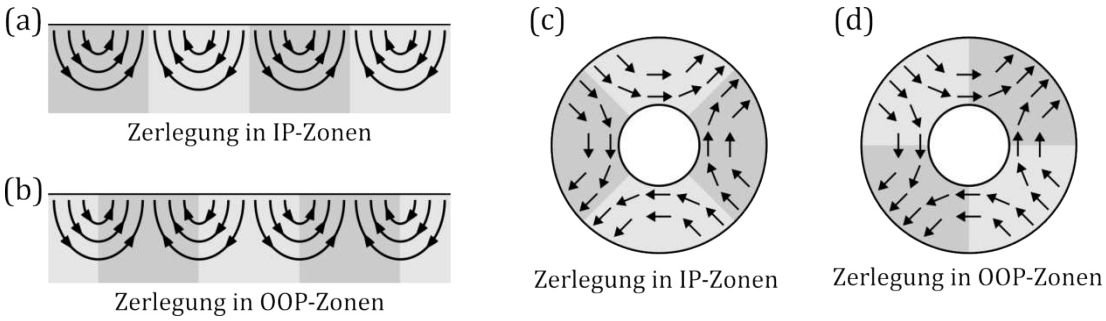


Abbildung 4.3: Wahl der Zoneneinteilung

In Abbildung 4.3 sind Beispiele für verschiedene sinnvolle Zerlegungen derselben Polarisation skizziert. In (a) und (b) wird eine harmonische Polarisation einmal in IP-Zonen und einmal in OOP-Zonen unterteilt. Die Teilbilder (c) und (d) zeigen, dass auch die Polarisation eines Quadrupolrings bezüglich der Mantelfläche sinnvoll sowohl in IP-Zonen als auch in OOP-Zonen zerlegt werden kann.

4.2 Magnetpole

Als **Magnetpol** wird im allgemeinen Sprachgebrauch ein Teilbereich der Oberfläche eines magnetisierten Körpers bezeichnet, an dem das Magnetfeld aus dem Körper austritt oder in ihn eintritt. Bereiche, an denen das Feld austritt, werden als **Nordpole** bezeichnet; Bereiche, an denen es eintritt, als **Südpole**.

Formal wird hierfür die **Normalkomponente** des Magnetfeldes an der Oberfläche des Körpers betrachtet. Ihr Vorzeichen unterscheidet Oberflächenbereiche, an denen das Feld austritt (Nord), von solchen, an denen es eintritt (Süd). Als Pole gelten jedoch nur jene Bereiche, in denen auch die Feldamplitude einen festgelegten Amplitudengrenzwert überschreitet. Bereiche unterhalb des Grenzwerts gelten als polneutral. Die Grenzen der Pole ergeben sich somit aus dem Vorzeichenwechsel der Normalkomponente (zwischen Nord- und Südpolen) sowie den Amplitudengrenzen (zwischen Polen und polneutralen Bereichen). Diese Formalisierung wird in Kapitel 5.4 im Detail ausgeführt.

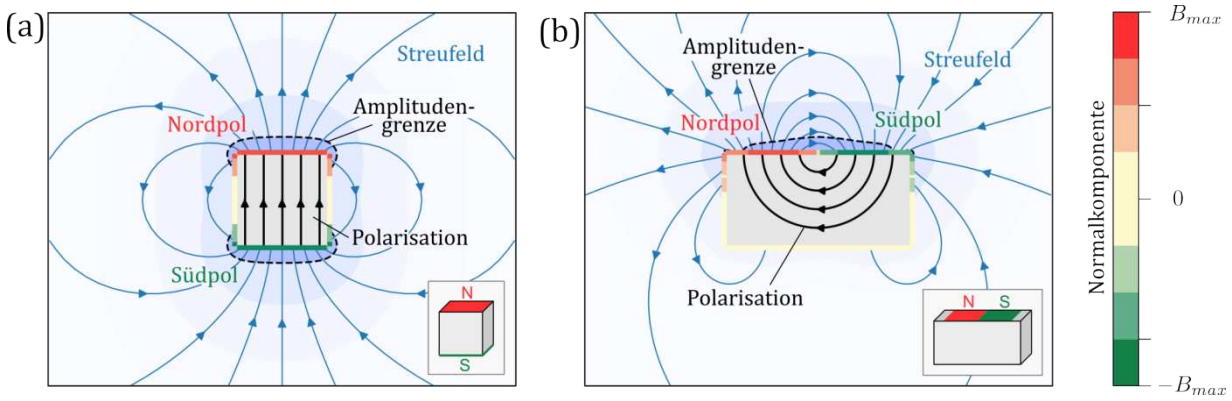


Abbildung 4.4: Streufeld und Normalkomponente bei gegebener Polarisation

In Abbildung 4.4 werden das mittels Simulation ermittelte Streufeld und die Normalkomponente zweier Magnete im Querschnitt dargestellt. Die Polarisation der Magnete ist schwarz eingezeichnet. Die Normalkomponente an der Körperoberfläche ist mittels einer Rot-Gelb-Grün-Farbskala dargestellt, das Streufeld durch Feldlinien sowie seine Amplitude durch blaue Farbkonturen. Die schwarz gestrichelte Konturlinie kennzeichnet einen festgelegten Amplitudengrenzwert, anhand dessen die Polbereiche von den polneutralen Bereichen abgegrenzt werden.

Teilbild (a) zeigt einen Würfel mit homogener Polarisation. An seinen Enden bilden sich die klassischen Polflächen aus. Teilbild (b) zeigt einen Quader mit inhomogener Polarisation, bei dem sich die Pole einseitig ausprägen. In beiden Teilbildern ist rechts unten zusätzlich eine abstrakte Poldarstellung der Magnete gezeigt.

Die **Poldarstellung** kennzeichnet die Nord- und Südpolbereiche auf der Oberfläche der Maßverkörperung. Aus ihrer räumlichen Anordnung lassen sich qualitative Rückschlüsse auf die Streufeldverteilung ziehen. Diese einfache und anschauliche Darstellung eignet sich besonders für Kommunikationszwecke.

Die in diesem Dokument formalisierte **feldbezogene Poldefinition** beruht auf dem Magnetfeld an der Körperoberfläche. Die besondere Bedeutung der Normalkomponente ergibt sich aus dem Eindeutigkeitssatz der Potentialtheorie, nach dem das Streufeld eines Körpers eindeutig bestimmt ist, wenn die Normalkomponente auf seiner gesamten Oberfläche bekannt ist (Jackson 1998).

Diese Poldefinition ist von der feldtheoretischen Beschreibung über **magnetische Ersatzladungen** zu unterscheiden (Cullity und Graham 2008; Saslow 2022). Bei einfachen Magneten, insbesondere bei homogen und normal zur Oberfläche polarisierten Körpern, stimmen beide Beschreibungen häufig näherungsweise überein. Bei komplexeren Polarisationsverteilungen, beispielsweise bei IP-Zonenanordnungen, ist diese Übereinstimmung im Allgemeinen nicht gegeben. Gleiches gilt, wenn die betrachtete Oberfläche der Maßverkörperung, etwa aufgrund einer Schutzschicht, nicht mit den Oberflächen der magnetisierten Zonen zusammenfällt. Für magnetische Maßverkörperungen ist die feldbezogene Definition besonders zweckmäßig, da sie sich unmittelbar auf die anwendungsrelevante Streufeldverteilung bezieht.

Eine wichtige Folge der feldbezogenen Poldefinition ist, dass alle Zonen der Maßverkörperung zur Ausbildung der Pole beitragen. Pole müssen daher nicht zwingend an den Grenzen einzelner Zonen liegen. Benachbarte **Zonen können Polbereiche verschieben**, verstärken, abschwächen oder sogar auflösen. Ein anschauliches Beispiel sind Halbach-Anordnungen, bei denen benachbarte Zonen so ausgerichtet sind, dass die Polausprägung auf einer Seite der Anordnung verstärkt und auf der gegenüberliegenden Seite weitgehend unterdrückt wird.

4.3 Zonenmuster und Polmuster

Die Gesamtheit aller Zonen einer Maßverkörperung wird als **Zonenmuster** bezeichnet. Es stellt eine für Kommunikations- und Referenzierungszwecke geeignete abstrahierte und häufig vereinfachte Darstellung der Polarisationsstruktur dar.

Die Gesamtheit aller Pole einer Maßverkörperung wird als **Polmuster** bezeichnet. Es dient der qualitativen Beschreibung der Streufeldverteilung. Obwohl das Polmuster aus dem Magnetfeld abgeleitet wird, wird es in dieser Richtlinie aus praktischen Gründen als **strukturbezogenes Oberflächenmerkmal** der Maßverkörperung behandelt und in Kapitel 4.6.3 geometrisch beschrieben, dimensioniert und indiziert.

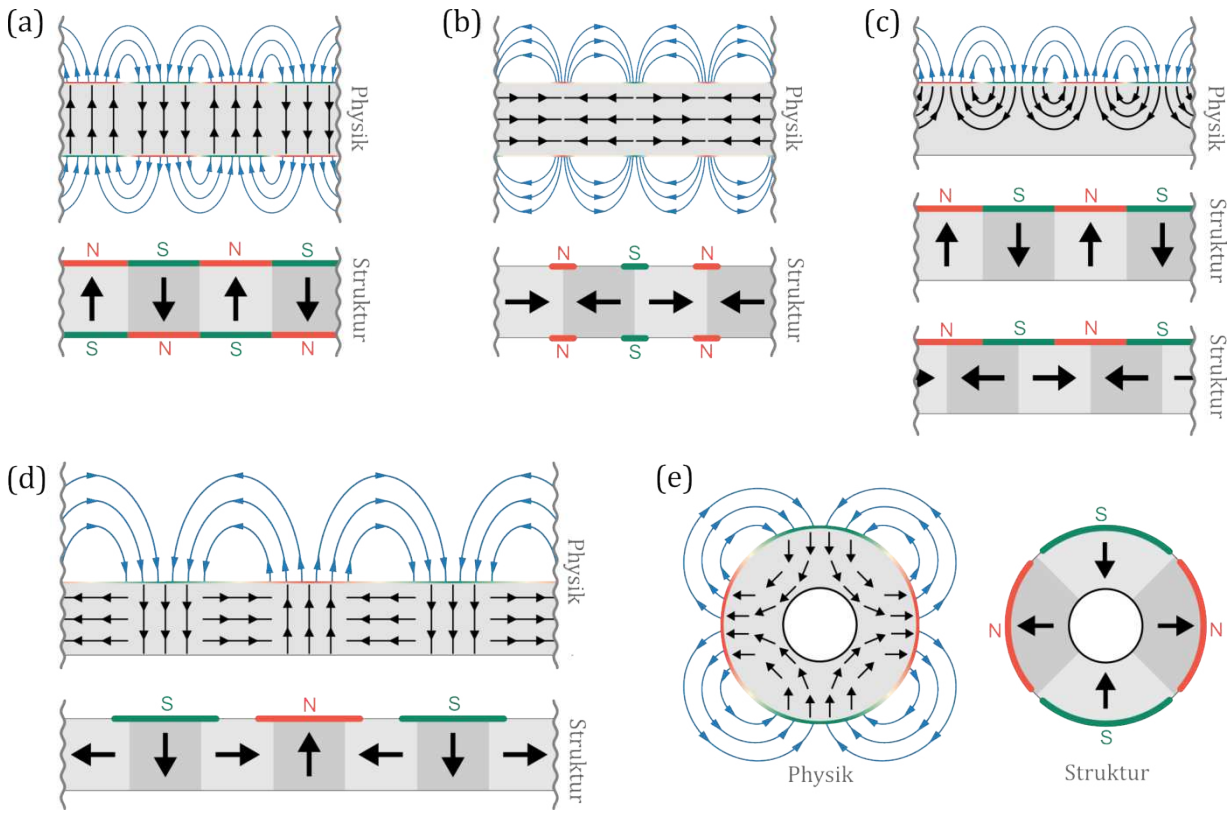


Abbildung 4.5: Magnetische Struktur und physikalische Grundlage

Abbildung 4.5 stellt die vollständige physikalische Beschreibung den daraus abgeleiteten Zonen- und Polmustern gegenüber. Dargestellt sind (a) lineare Anordnung mit OOP-Polarisationsmuster, (b) lineare Anordnung mit IP-Polarisationsmuster, (c) lineare Anordnung mit inhomogener Polarisation, (d) lineare Halbach-Anordnung und (e) ein zylindrischer Quadrupolmagnet. In Unterbild (c) ist die Zerlegung in Zonen nicht eindeutig; daher sind beide Möglichkeiten dargestellt. Die Pole befinden sich jedoch an derselben Stelle.

Polmuster und Zonenmuster sind hier in **Kombination dargestellt**. Während das Zonenmuster die Polarisation anschaulich beschreibt, dient das Polmuster der Veranschaulichung der Streufeldverteilung. Je nach Zweck kann daher die eine oder die andere Darstellung günstiger sein. So kann eine Zonenbeschreibung bei komplexer oder in der Tiefe unbekannter Polarisation schwierig sein, während das Polmuster die wesentliche Feldverteilung dennoch gut vermittelt.

Ein wichtiges Beispiel stellen **einseitig ausgeprägte Pole** dar. Diese können sowohl infolge inhomogener Polarisation wie in (c) und (e), als auch infolge spezieller Anordnungen, wie in (d), entstehen. Das Polmuster macht diese einseitige oder zweiseitige Ausprägung unmittelbar sichtbar, während sie aus dem Zonenmuster häufig nicht direkt ablesbar ist.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Polarisation die vollständige magnetische Beschreibung der Maßverkörperung bildet. Aus ihr lassen sich alle anderen Größen ableiten. Umgekehrt lässt sich die zugrunde liegende Polarisation und damit auch das Zonenmuster aus dem bekannten Magnetfeld nicht eindeutig rekonstruieren. Dies ist eine Folge des magnetostatischen inversen Problems (Bruckner u. a. 2017). In der Praxis ist die Polarisation jedoch häufig nicht als experimentelle Größe zugänglich.

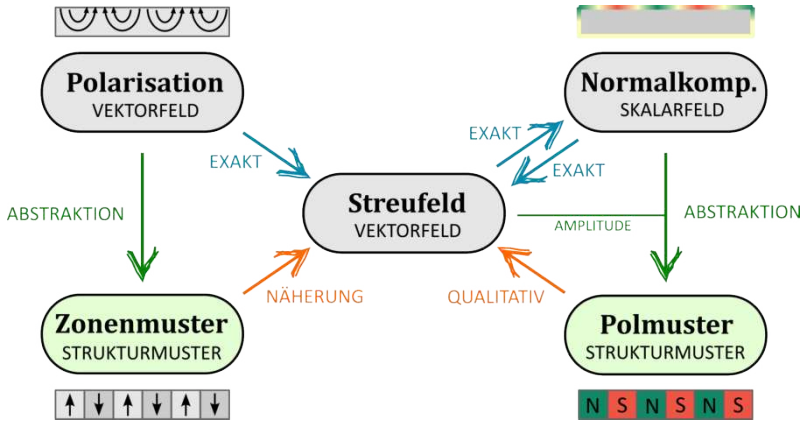


Abbildung 4.6: Zusammenhang der magnetischen Größen

Der Zusammenhang zwischen Polarisation, Magnetfeld, Normalkomponente sowie den daraus abgeleiteten Zonen- und Polmustern ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Pfeile geben an, welche Größen jeweils aus welchen anderen Größen abgeleitet werden können.

4.4 Magnetische Spuren

Die magnetische Struktur magnetischer Maßstäbe ist in einem oder mehreren streifenförmigen Bereichen entlang der funktionalen Oberfläche angeordnet. Ein solcher Bereich wird als **magnetische Spur** bezeichnet. Eine Spur erstreckt sich in p-Richtung über einen festgelegten Abschnitt der Maßverkörperung und besitzt eine begrenzte Ausdehnung in o-Richtung. Ihr sind alle Zonen und Pole zugeordnet, die innerhalb ihres Bereichs liegen. Das von einer Spur erzeugte Magnetfeld wird als **Spurfeld** bezeichnet.

Die **Spurausrichtung** richtet sich nach der geometrischen Anordnung des Messsystems nach Kapitel 3.2. Entsprechend werden **Linearspuren**, **Radialspuren** und **Axialspuren** unterschieden. Linearspuren verlaufen geradlinig entlang der funktionalen Oberfläche. Radialspuren liegen an einer Innen- oder Außenmantelfläche einer rotationssymmetrischen Maßverkörperung. Axialspuren liegen an einer Stirnfläche einer rotationssymmetrischen Maßverkörperung. Beispielhafte Ausführungen sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

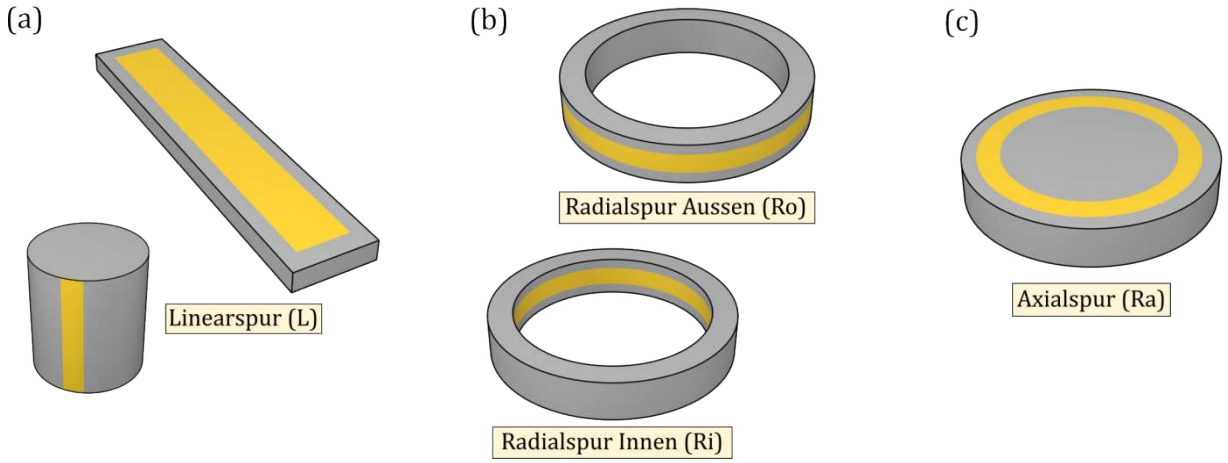


Abbildung 4.7: Spurenausrichtung

Der **Beschreibungsgrad** einer Spur kennzeichnet, in welchem Maß sie entlang der p-Richtung magnetisch wirksam beschrieben ist. Eine Spur ist **vollbeschrieben**, wenn sie entlang ihrer gesamten Länge magnetische Zonen aufweist. Eine **teilbeschriebene** Spur liegt vor, wenn nur ein begrenzter Abschnitt magnetisch wirksam beschrieben ist. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine Spur mit einem Referenzbereich. Eine weitere Ausprägung ist die **segmentiert** beschriebene Spur, bei der mehrere voneinander getrennte, aufeinanderfolgende Bereiche magnetisch wirksam beschrieben sind. Beispielhafte Ausführungen sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

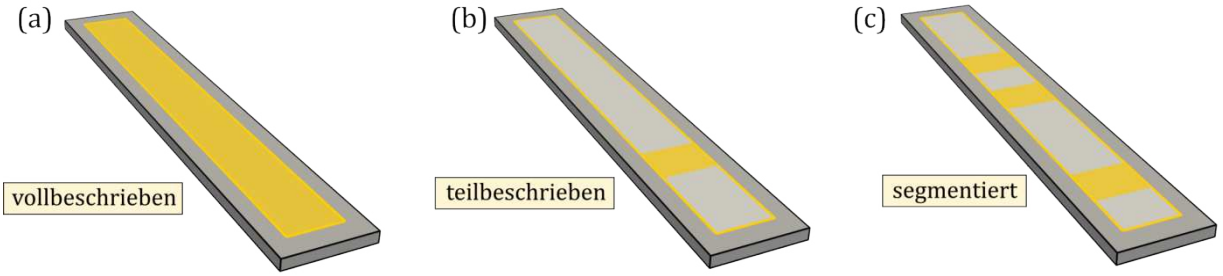


Abbildung 4.8: Beschreibungsgrad einer Spur

Die **Polarisationsart einer Spur** ergibt sich aus der Polarisationsrichtung ihrer Zonen. Besteht die Spur ausschließlich aus IP-Zonen, spricht man von einer IP-polarisierten Spur oder **IP-Spur**. Ist sie ausschließlich aus OOP-Zonen zusammengesetzt, spricht man von einer OOP-polarisierten Spur oder **OOP-Spur**.

Einen wichtigen Sonderfall stellt dabei die **Halbach-Polarisation** dar. Hier rotiert die Polarisationsrichtung von Zone zu Zone in der p-n-Ebene. Dadurch entsteht eine asymmetrische Feldverteilung, bei der das Streufeld auf einer bevorzugten Seite der Maßverkörperung verstärkt wird, während es auf der gegenüberliegenden Seite weitgehend unterdrückt ist. Entsprechend spricht man von einer **Halbach-Spur**.

4.5 Darstellungskonventionen

Dieses Unterkapitel legt **Empfehlungen zur Zonendarstellung** und **Poldarstellung** magnetischer Maßverkörperungen fest. Die Zonendarstellung dient der Veranschaulichung der Polarisationsstruktur, während die Poldarstellung die räumliche Anordnung der Magnetpole auf der Oberfläche der Maßverkörperung beschreibt. Die farbcodierte Darstellung des Streufeldes auf definierten Messflächen wird als **Felddarstellung** bezeichnet und in Kapitel 5.5 behandelt.

Wenn erforderlich, sollte zunächst sichergestellt werden, dass die **geometrische Form** einer Maßverkörperung sowie die ihrer Elemente vollständig erkennbar sind. Hierbei sollten normative Vorgaben, beispielsweise nach ISO 5456-2 (International Organization for Standardization 1996), berücksichtigt werden, in denen zulässige Projektionsmethoden geometrischer Körper festgelegt sind.

Für die **Zonendarstellung** sollten benachbarte Zonen eindeutig unterscheidbar sein. Dies kann beispielsweise durch Trennlinien, unterschiedliche, nicht feldbezogene Füllfarben oder Schraffuren erreicht werden. Die mittlere Polarisationsrichtung jeder Zone sollte durch Richtungspfeile gekennzeichnet werden. Vorzugsweise wird eine Ansicht gewählt, in der die Richtungspfeile unmittelbar auf den dargestellten Zonenflächen eingetragen und eindeutig räumlich zugeordnet werden können. Dabei kennzeichnen Pfeile Richtungen parallel zur Darstellungsebene und die Symbole „⊙“ (heraus) und „⊗“ (hinein) Richtungen senkrecht zur Darstellungsebene. Kann die Polarisationsrichtung in der gewählten Ansicht so nicht eindeutig vermittelt werden, können ihre Komponenten in einer geeigneten orthogonalen Projektion eingezeichnet werden.

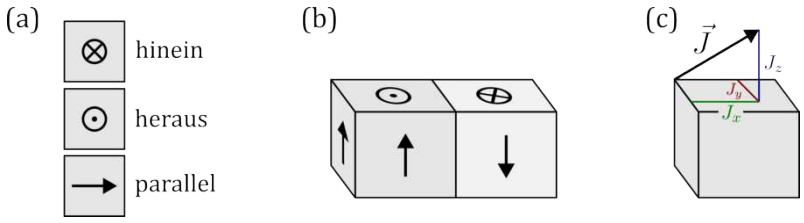


Abbildung 4.9: Konvention für die Zonendarstellung

Abbildung 4.9 (a) zeigt die in diesem Dokument verwendeten Pfeilsymbole zur Darstellung der Polarisationsrichtung an Seitenflächen von Zonen. Teilbild (b) zeigt eine skizzenhafte Maßverkörperung bestehend aus zwei klar abgegrenzten Zonen alternierender Polarisation. Teilbild (c) zeigt eine Zone mit nicht flächenparalleler Polarisation, dargestellt durch Komponenten einer orthogonalen Projektion auf die Deckfläche.

Für die **Poldarstellung** werden Polbereiche auf der Oberfläche einer Maßverkörperung farblich gekennzeichnet. Nordpole werden rot eingefärbt und mit dem Symbol „N“ versehen, Südpole grün und mit dem Symbol „S“. In der Schwarzweißdarstellung werden entsprechende Graustufen verwendet, wobei Nordpole weiß oder hell und Südpole schwarz oder dunkel dargestellt werden. Polneutrale Bereiche werden nicht gesondert gekennzeichnet.

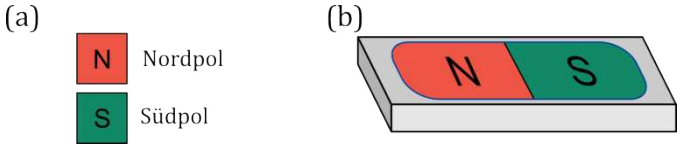


Abbildung 4.10: Konvention für die Poldarstellung

Abbildung 4.10 veranschaulicht die Konventionen zur Poldarstellung. Teilbild (a) zeigt die in diesem Dokument verwendeten Farbskalen sowie die Symbole „N“ und „S“. Die eingesetzten Farbcodes sind #EE5544 für Rot und #118866 für Grün. Teilbild (b) zeigt die beispielhafte Poldarstellung einer Maßverkörperung mit zwei Polbereichen auf ihrer Deckfläche.

Hinweis 4.2

*Die Poldarstellung ist ein **Spezialfall der Felddarstellung** nach Kapitel 5.5. Wird die OOP-Komponente des Magnetfeldes auf der Oberfläche der Maßverkörperung (n=0) dargestellt, stimmen beide Darstellungen bei gleicher Wahl der Amplitudengrenzwerte hinsichtlich der farbcodierten Bereiche überein.*

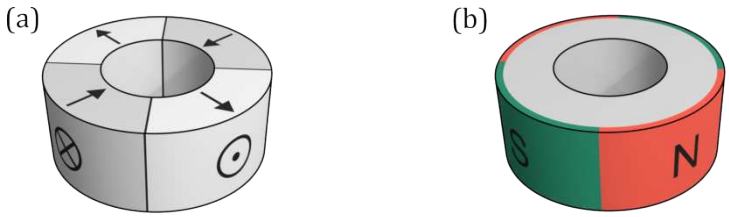


Abbildung 4.11: Darstellungsbeispiele Zonen- und Poldarstellung

Abbildung 4.11 demonstriert die beiden Darstellungsformen am Beispiel eines Quadrupolrings, wie er typischerweise als magnetische Maßverkörperung in radial angeordneten Winkelmesssystemen mit außen liegenden Sensoren verwendet wird. Die zugehörige inhomogene Polarisation ist in Abbildung 4.1 (c) skizziert.

Teilbild (a) zeigt den Quadrupolring in Zonendarstellung. Im Vordergrund steht der strukturelle Aufbau des Magneten, also Anordnung, Form und Zusammensetzung seiner magnetisierten Zonen.

Teilbild (b) zeigt den Quadrupolring in Poldarstellung. Der Fokus liegt am nach außen wirksamen Streufeld, ohne dabei Information über die innere magnetische Struktur zu enthalten. Zur besseren Anschaulichkeit wurde die Farbcodierung **über die sichtbare Kante hinweg** auf die angrenzende Deckfläche fortgeführt. Dadurch kann das Polmuster entlang des gesamten Ringumfangs leichter nachvollzogen werden.

Eine **kombinierte Darstellung** von Zonen- und Polmuster ermöglicht es sowohl Polarisationsstruktur als auch Feldwirkung einer Maßverkörperung zu vermitteln. Das ist besonders bei komplexen Anordnungen, bei denen sich die Lage der Pole nicht offensichtlich aus dem Zonenmuster erschließt, hilfreich. Dabei können Pole gegenüber Zonengrenzen verschoben sein, sich über mehrere Zonen erstrecken oder sich einseitig ausprägen.

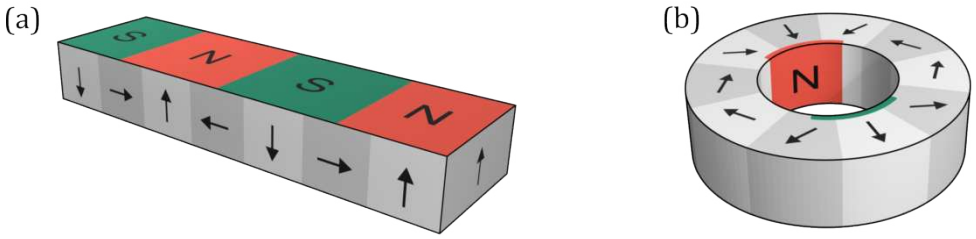


Abbildung 4.12: Darstellungsbeispiele kombinierte Darstellung

Abbildung 4.12 zeigt zwei Beispiele solcher kombinierter Darstellungen. Teilbild (a) zeigt einen Linearmaßstab mit Halbach-Polarisation. Die Pfeile an den Seitenflächen kennzeichnen das Zonenmuster, während das auf der Oberseite binär dargestellte Polmuster die daraus resultierende Feldwirkung veranschaulicht. Teilbild (b) zeigt einen Halbach-Ring. Die Überlagerung von Zonen- und Polmuster macht die Ausrichtung des Magnetfeldes im Inneren des Rings unmittelbar erkennbar.

Eine häufig verwendete kombinierte Darstellungsform ist die **farbcodierte Zonendarstellung**. Dabei werden die Zonen entlang ihrer Polarisationsrichtung mit einer Magnetfeld-Farbskala eingefärbt. Diese Einfärbung entspricht näherungsweise der Normalkomponente des Magnetfeldes, die eine isoliert betrachtete

Zone auf ihren Seiten erzeugen würde, wie in Kapitel 4.2 ausgeführt. Bei Zusammensetzung der so eingefärbten Zonen ergibt sich in vielen Fällen eine anschauliche Näherung des Polmusters. Voraussetzung ist, dass sich dessen Ausprägung durch die Überlagerung der Feldbeiträge benachbarter Zonen nicht wesentlich verändert.

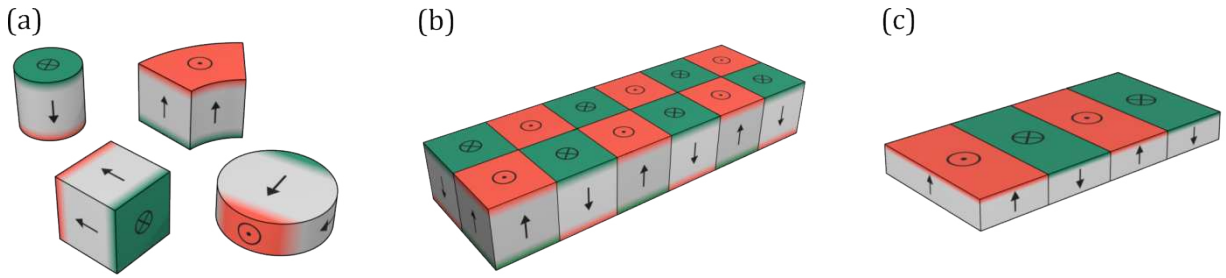


Abbildung 4.13: Darstellungsbeispiele farbcodierte Zonendarstellung

Abbildung 4.13 demonstriert die farbcodierte Zonendarstellung anhand verschiedener Beispiele. Teilbild (a) zeigt unterschiedliche Dipolmagnete, deren erwartete Feldwirkung durch die Einfärbung der Körperflächen hervorgehoben wird. Teilbild (b) zeigt zweireihig axial gestapelte Würfelmagnete. Die einzelnen Zonen sind klar voneinander abgegrenzt; ihre Einfärbung veranschaulicht das auf Ober- und Unterseite erwartete Polmuster. Teilbild (c) zeigt, wie mit der farbcodierten Zonendarstellung eine einseitige Ausprägung der Pole vermittelt werden kann. Die mögliche zugrunde liegende inhomogene Polarisationsverteilung wird in Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2 näher beschrieben.

Hinweis 4.3

Weicht das resultierende Polmuster deutlich von der Zonenstruktur ab, wie bei den Beispielen in Abbildung 4.12, ist die farbcodierte Zonendarstellung ungeeignet und kann zu ***irreführenden Farbzuordnungen*** *führen.*

Aufgrund ihrer großen optischen Ähnlichkeit kann die farbcodierte Zonendarstellung leicht mit einer Felddarstellung nach Kapitel 5.5 ***verwechselt*** *werden. Da beide Darstellungsformen unterschiedliche Informationen vermitteln, sollte stets eindeutig angegeben werden, welche Darstellungsform verwendet wird.*

Spuren können bei Bedarf durch eine **Umrahmung** und durch die Hervorhebung nichtmagnetisierter Bereiche gekennzeichnet werden. Die Kennzeichnung ermöglicht die eindeutige Zuordnung der zugehörigen Zonen und Pole und verdeutlicht, ob sich eine Spur auch über nichtmagnetisierte Abschnitte erstreckt.

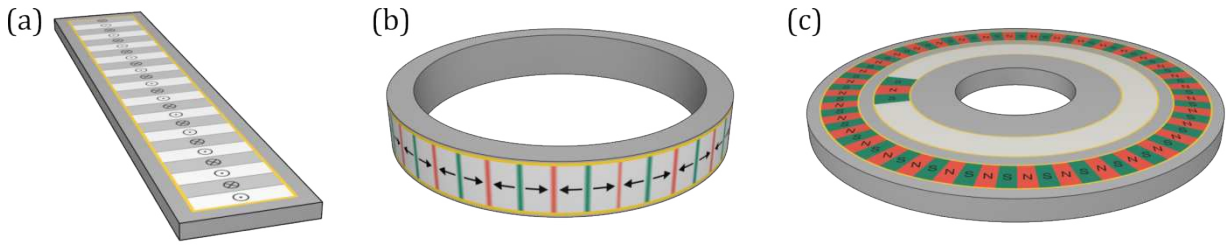


Abbildung 4.14: Darstellungsbeispiele Spuren

Abbildung 4.14 zeigt drei exemplarische Darstellungen magnetischer Maßstäbe. Teilbild (a) zeigt einen typischen Linearmaßstab zur Positionserfassung von Linearachsen. Er weist eine inkrementelle OOP-Spur auf, die in reiner Zonendarstellung gezeigt ist. Teilbild (b) zeigt einen Rotationsmaßstab mit einer radial außen liegenden inkrementellen IP-Spur in farbcodierter Zonendarstellung. Derartige Maßverkörperungen werden häufig in Drehgebern eingesetzt. Teilbild (c) zeigt einen Rotationsmaßstab mit zwei axial angeordneten Spuren in Poldarstellung. Die äußere Spur ist eine vollbeschriebene Inkrementalspur; die innere

eine teilbeschriebene Referenzspur. Eine solche Kombination wird oft zur absoluten Positionserfassung eingesetzt.

Hinweis 4.4

In wissenschaftlich-technischen Darstellungen wird die Farbkombination Rot–Grün üblicherweise vermieden, da sie für viele Personen mit einer häufig auftretenden Rot-Grün-Sehschwäche nur eingeschränkt unterscheidbar ist (Crameri u. a. 2020). In dieser Richtlinie wird diese Farbwahl jedoch aus historischen Gründen beibehalten. Die hier gewählten Farben unterscheiden sich deutlich in Helligkeit und Sättigung, um eine zuverlässige visuelle Unterscheidbarkeit sicherzustellen.

4.6 Magnetische Struktur

Bisher wurde die magnetische Struktur einer Maßverkörperung anhand von Zonen, Polen und Spuren qualitativ beschrieben. Im Folgenden werden Strukturbegriffe festgelegt, die eine eindeutige geometrische und technisch detaillierte Beschreibung dieser Strukturelemente ermöglichen.

4.6.1 Struktur-KS und Begrenzungsbox-Geometrie

Die Beschreibung der magnetischen Struktur erfolgt in einem zweckmäßig gewählten **Struktur-KS** mit Ursprung O_T. Seine Koordinatenrichtungen sind in der Regel an den p-, o- und n-Richtungen des Maßverkörperungs-KS ausgerichtet.

Ist das Struktur-KS einer magnetischen Spur zugeordnet, wird es als **Spur-KS** bezeichnet; der Ursprung wird weiterhin mit O_T bezeichnet. Besitzt ein magnetischer Maßstab mehrere Spuren, sollte jeder Spur ein eigenes Spur-KS zugeordnet werden.

Als zweckmäßige **Konvention** wird empfohlen, den Ursprung O_T in o-Richtung mittig zur beschriebenen magnetischen Struktur und in n-Richtung auf der funktionalen Oberfläche der Maßverkörperung anzuordnen. Die p-Lage wird anhand eines eindeutig festgelegten Strukturbezugs gewählt, typischerweise am Beginn der ersten genutzten Zone oder des ersten genutzten Pols. Bei einem Spur-KS wird hierfür vorzugsweise der Beginn der Spur verwendet.

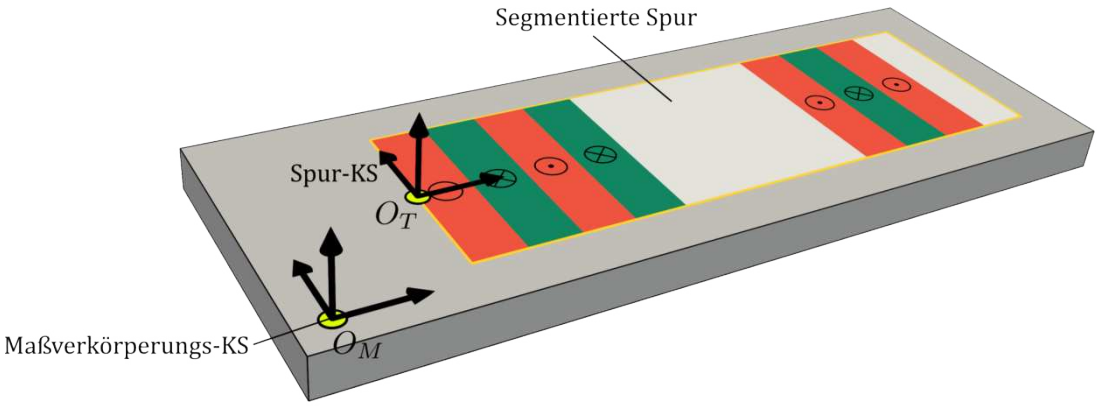


Abbildung 4.15: Struktur-KS am Beispiel einer magnetischen Spur

Abbildung 4.15 veranschaulicht die Festlegung eines Struktur-KS. Entsprechend der Konvention liegt dessen Ursprung in o-Richtung mittig zur magnetischen Struktur, in p-Richtung am Beginn der magnetischen Struktur und in n-Richtung auf der funktionalen Oberfläche der Maßverkörperung.

Lage und Abmessungen magnetisierter Zonen, von Magnetpolen und magnetischen Spuren können in vielen Fällen näherungsweise durch **Begrenzungsboxkörper** erfasst werden. In kartesischen Koordinaten sind dies achsenparallele Quader, bei zylindrischer Koordinatendarstellung Zylinder- oder Ringsegmente. Angaben in p-Richtung können dabei nach Kapitel 3 als Länge oder Winkel angegeben werden.

Hinweis 4.5

Die nachfolgenden Strukturbegriffe werden verwendet, soweit sich die magnetische Struktur mit der zugrunde liegenden Begrenzungsbox-Geometrie zweckmäßig beschreiben lässt. Für andere Geometrien sind geeignete alternative Größen zu verwenden, wie beispielhaft in Abbildung 4.17 gezeigt.

4.6.2 Strukturbegriffe magnetisierter Zonen

In Begrenzungsbox-Geometrien werden die Abmessungen magnetisierter Zonen in p-Richtung durch die **Zonenlänge** ℓ_Z, in o-Richtung durch die **Zonenbreite** w_Z und in n-Richtung durch die **Zonentiefe** d_Z beschrieben.

Zonen werden zu Referenzierungszwecken aufsteigend in positiver p-Richtung mit dem Ordnungsindex $j = 1, ..., N_Z$ nummeriert. Die **Zonenanzahl** N_Z bezeichnet die Gesamtzahl der nummerierten Zonen. Eine vollständige Indizierung aller vorhandenen Zonen ist nicht erforderlich.

Auf eine Zone kann in p-Richtung ein Zwischenraum folgen, der keiner Zone zugeordnet ist. Solch ein Zwischenraum entsteht beispielsweise bei aus einzelnen Dipolmagneten zusammengesetzten Maßverkörperungen. Die Ausdehnung des Zwischenraums in p-Richtung wird als **Zonenspalt** $\bar{\ell}_Z^{(j)}$ bezeichnet. Er trägt den gleichen Index wie die vorangehende Zone.

Die **Zonenlage** $\vec{r}_Z$ bezeichnet die Position des geometrischen Mittelpunkts des Begrenzungsboxkörpers. Ihre Koordinaten sind p_Z, o_Z und n_Z.

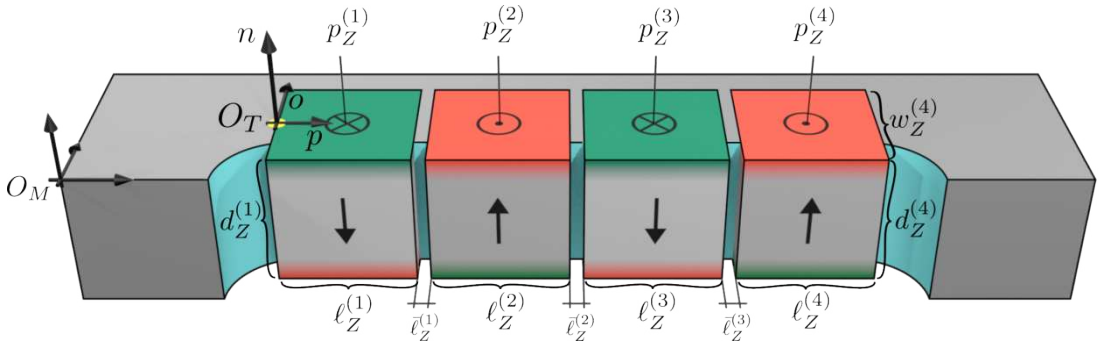


Abbildung 4.16: Strukturbeschreibung des Zonenmusters eines Multipolquaders

Abbildung 4.16 zeigt eine beispielhafte Strukturbeschreibung einer magnetischen Maßverkörperung mittels Zonen in kartesischen Koordinaten. Die Maßverkörperung besteht aus einer Halterung mit vier eingesetzten würfelförmigen Dipolmagneten, die in einem OOP-Muster angeordnet sind. Die Halterung ist zur besseren Sichtbarkeit teilweise aufgeschnitten dargestellt. Jeder Dipolmagnet wird dabei als eine Zone aufgefasst. Die Zonen sind in positiver p-Richtung nummeriert und zugeordnete Größen mit einem entsprechenden Ordnungsindex versehen. Der Ursprung des Struktur-KS O_T liegt entsprechend der Konvention in o-Richtung mittig zur Zonenstruktur, in n-Richtung auf der funktionalen Oberfläche der Maßverkörperung und in p-Richtung am Beginn der ersten Zone.

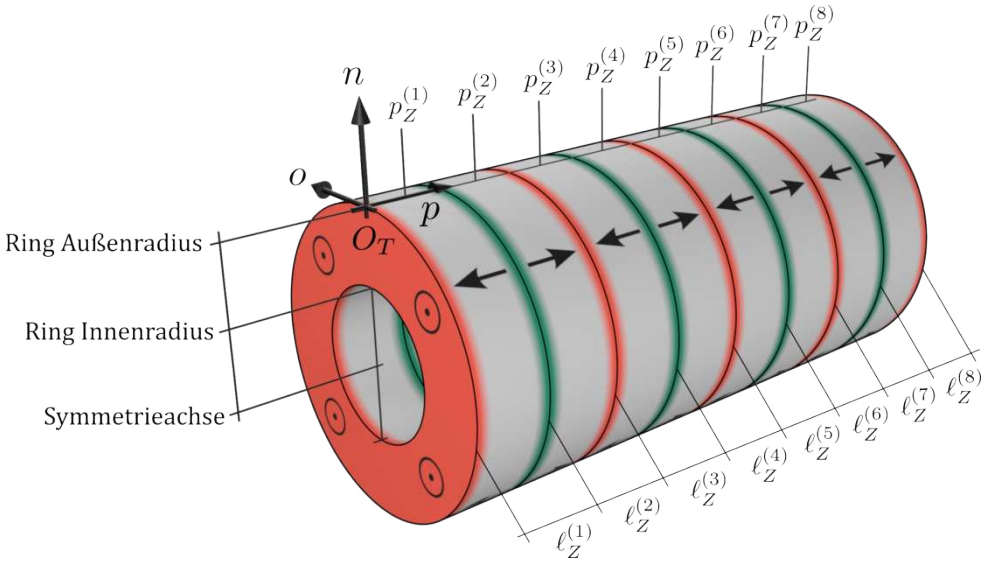


Abbildung 4.17: Strukturbeschreibung des Zonenmusters eines axialen Multipolrings

In Abbildung 4.17 ist ein axial gestapelter Multipolring mit $N_Z = 8$ in farbcodierter Zonendarstellung gezeigt. Derartige Maßverkörperungen können zur Detektion axialer Verschiebungen entlang der Systemachse eingesetzt werden. Der Ursprung des Struktur-KS ist auf der Mantelfläche in o-Richtung mittig und in p-Richtung am Beginn der ersten Zone festgelegt.

Obwohl die Maßverkörperung ringförmig ist, handelt es sich dabei um eine lineare Anordnung. In diesem Beispiel ist der Begriff der Zonenlänge sinnvoll anwendbar, da die Zonen entlang der p-Richtung gestapelt sind. Die Begriffe Zonenbreite und Zonentiefe sind aufgrund der ringförmigen Geometrie hingegen nicht zweckmäßig. Zur Beschreibung der Geometrie der Maßverkörperung werden stattdessen Innen- und Außenradius des Rings genutzt.

Tabelle 4.1: Begriffe Zonen

Begriff	Symbol	Beschreibung
Zonenanzahl	N_Z	Gesamtzahl der nummerierten Zonen
Zonenlänge	$\ell_Z^{(j)}$	Ausdehnung der Zone j in p-Richtung
Zonenbreite	$w_Z^{(j)}$	Ausdehnung der Zone j in o-Richtung
Zonentiefe	$d_Z^{(j)}$	Ausdehnung der Zone j in n-Richtung
Zonenspalt	$\bar{\ell}_Z^{(j)}$	Ausdehnung des einer Zone j folgenden, keiner Zone zugeordneten Zwischenraums in p-Richtung
Zonenlage	$\vec{r}_Z^{(j)}$	Position des geometrischen Mittelpunkts des Begrenzungsboxkörpers der Zone j; Koordinaten $p_Z^{(j)}$, $o_Z^{(j)}$ und $n_Z^{(j)}$

4.6.3 Strukturbegriffe magnetischer Pole

In Begrenzungsbox-Geometrien werden die Abmessungen von Magnetpolen in p-Richtung durch die **Pollänge** ℓ_P und in o-Richtung durch die **Polbreite** w_P beschrieben.

Pole werden zu Referenzierungszwecken aufsteigend in positiver p-Richtung mit dem Ordnungsindex $j = 1, \ldots, N_P$ nummeriert. Die **Polanzahl** N_P bezeichnet die Gesamtzahl der nummerierten Pole. Eine vollständige Indizierung aller vorhandenen Pole ist nicht erforderlich.

Die **Pollage** $\vec{r}_P$ bezeichnet die Position des geometrischen Mittelpunkts der Begrenzungsbox. Ihre Koordinaten sind p_P und o_P.

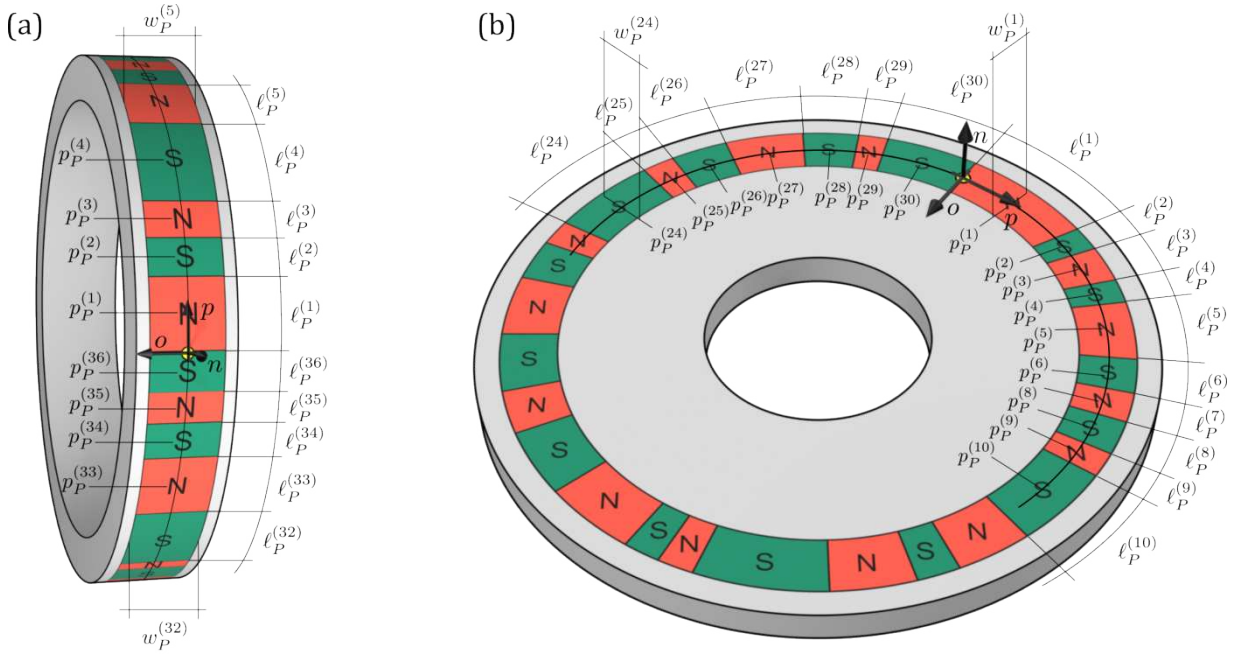


Abbildung 4.18: Strukturbeschreibung des Polmusters

Abbildung 4.18 zeigt eine beispielhafte Strukturbeschreibung von Polmustern in zylindrischen Begrenzungsbox-Geometrien. Dargestellt sind zwei Polräder mit Pseudo-Random-Codierung. In Teilbild (a) ist eine außenliegende Radialspur mit $N_P = 36$ nummerierten Polen gezeigt; in Teilbild (b) eine Axialspur mit $N_P = 30$ nummerierten Polen. Bei radial außenliegenden Spuren wie in Teilbild (a) ist es zweckmäßig, p_P und ℓ_P als Bogenlängen anzugeben. Bei der Axialspur in Teilbild (b) ist dies aufgrund des über die Spurbreite veränderlichen Radius hingegen nicht zweckmäßig.

Tabelle 4.2: Begriffe Pole

Begriff	Symbol	Beschreibung
Polanzahl	N_P	Gesamtzahl der nummerierten Pole
Pollänge	$\ell_P^{(j)}$	Ausdehnung des Pols j in p-Richtung
Polbreite	$w_P^{(j)}$	Ausdehnung des Pols j in o-Richtung
Pollage	$\vec{r}_P^{(j)}$	Position des geometrischen Mittelpunkts der Begrenzungsbox des Pols j; Koordinaten $p_P^{(j)}$ und $o_P^{(j)}$

4.6.4 Strukturbegriffe magnetischer Spuren

In Begrenzungsbox-Geometrien werden die Abmessungen magnetischer Spuren in p-Richtung durch die **Spurlänge** ℓ_T, in o-Richtung durch die **Spurbreite** w_T und in n-Richtung durch die **Spurtiefe** d_T beschrieben.

Spuren werden zu Referenzierungszwecken mit dem Ordnungsindex $i = 1, \ldots, N_T$ nummeriert. Bei parallel angeordneten Spuren erfolgt die Nummerierung aufsteigend in positiver o-Richtung. Die **Spuranzahl** N_T bezeichnet die Gesamtzahl der nummerierten Spuren.

Die **Spurlage** $\vec{r}_T$ bezeichnet die Position des Spur-KS-Ursprungs O_T im Maßverkörperungs-KS. Ihre Koordinaten sind p_T, o_T und n_T. Mit der üblichen Festlegung von O_T auf der funktionalen Oberfläche der Maßverkörperung gilt $n_T = 0$.

Die relative Lage zweier Spuren wird durch ihre Versätze beschrieben. Der **Spur-Längsversatz** p_{TT}, auch **Spur-*p*-Versatz**, bezeichnet den Versatz in p-Richtung. Für die Spuren mit den Ordnungsindizes i_1 und i_2 gilt:

$$p_{TT}^{(i_1,i_2)} = p_T^{(i_2)} - p_T^{(i_1)}.$$

Der **Spur-Querversatz** o_{TT}, auch **Spur-*o*-Versatz**, bezeichnet entsprechend den Versatz in o-Richtung:

$$o_{TT}^{(i_1,i_2)} = o_T^{(i_2)} - o_T^{(i_1)}.$$

Für Größen, die sich auf zwei Spuren beziehen, wird nach Kapitel 3.5 der Bezugsindex „TT“ verwendet. Der **Spurabstand** w_{TT} bezeichnet den Abstand in o-Richtung zwischen zwei benachbarten Spuren.

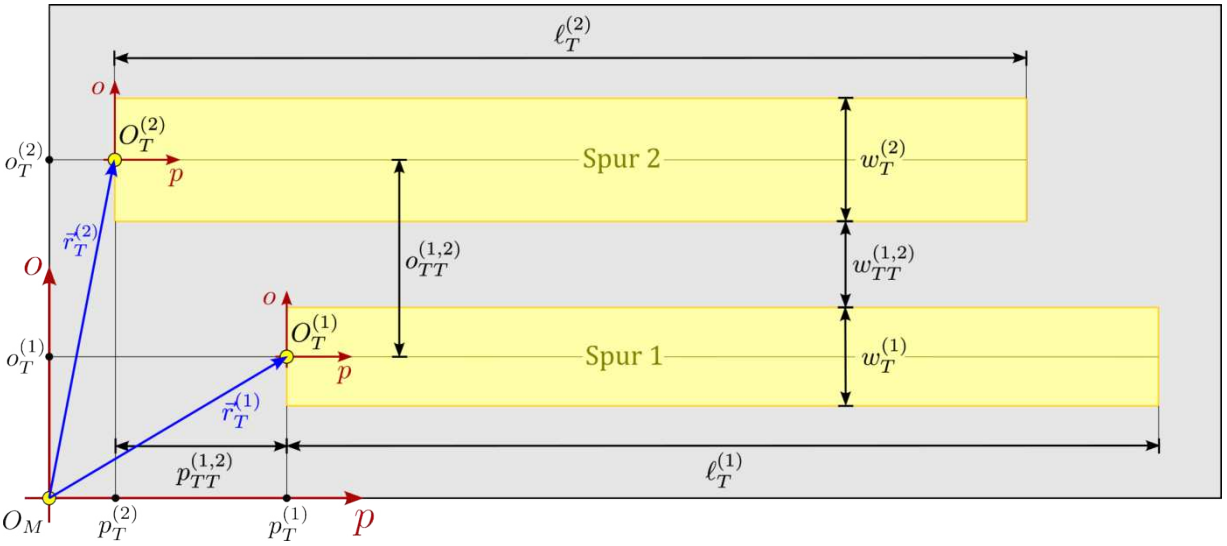


Abbildung 4.19: Strukturbeschreibung von magnetischen Spuren

Abbildung 4.19 veranschaulicht die eingeführten Spurbegriffe anhand einer schematischen Darstellung eines magnetischen Maßstabs mit zwei parallelen Linearspuren, die gelb hervorgehoben sind. Die Ursprünge der Spur-KS sind entsprechend der eingeführten Konvention in p-Richtung am Beginn der jeweiligen Spur und mittig in o-Richtung festgelegt. Die relevanten Spurgrößen, insbesondere Spurlage, Spurabmessungen, Spurversätze und Spurabstand, sind in der Abbildung eingezeichnet.

Abbildung 4.20 zeigt einen magnetischen Rotationsmaßstab mit drei axialen Spuren in Poldarstellung. Spur 1 ist als inkrementelle Spur mit $N_P^{(1)} = 72$ Polen ausgeführt, Spur 2 als inkrementelle Spur mit $N_P^{(2)} = 30$ Polen. Spur 3 dient als Referenzspur und enthält ein einzelnes Referenz-Polpaar.

Die Vorwärtsbewegung ist in der Abbildung grün eingezeichnet, woraus sich mit der funktionalen Oberfläche die p- und o-Richtungen ergeben. Die Ordnungsindizes der Spuren sind entsprechend aufsteigend in positiver o-Richtung von außen nach innen vergeben.

Der Beginn des ersten Pols der Spur 1 ist blau hervorgehoben und dient hier als gemeinsamer Strukturbezug für die p-Lage der drei Spur-KS. Die dort festgelegte Lage $p = 0$ wird in o-Richtung auf die übrigen Spuren übertragen und ist durch eine gepunktete blaue Linie gekennzeichnet. Bei Spur 2 fällt der Ursprung ebenfalls mit dem Beginn des ersten Pols zusammen, während er bei Spur 3 in einem Bereich außerhalb

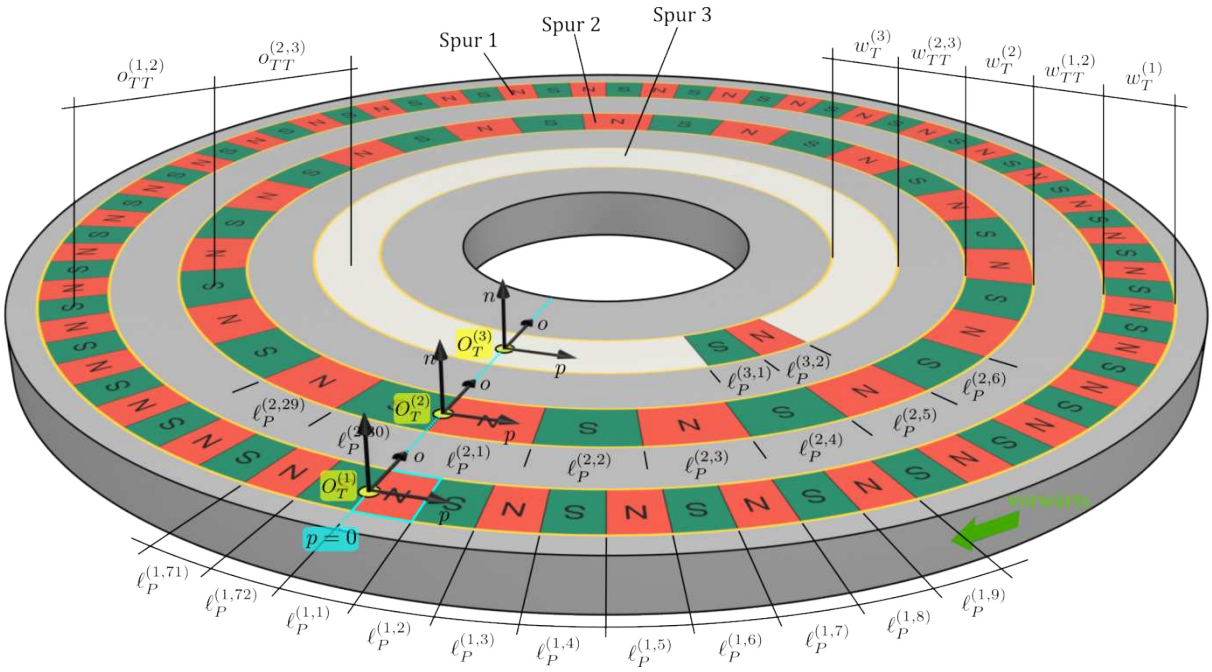


Abbildung 4.20: Strukturbeschreibung eines Rotationsmaßstabs mit mehreren Spuren

des Referenz-Polpaares liegt. In o-Richtung liegen die Ursprünge jeweils mittig auf der zugehörigen Spur. Die Ursprünge und lokalen Koordinatenrichtungen der Spur-KS sind entsprechend eingezeichnet.

Die Ordnungsindizes der Pole steigen in positiver p-Richtung an. Exemplarisch dargestellte Pollängen tragen sowohl den Ordnungsindex der Spur als auch den des jeweiligen Pols und veranschaulichen damit die Verwendung mehrerer Ordnungsindizes für spurbezogene Polgrößen.

Tabelle 4.3: Begriffe Spuren

Begriff	Symbol	Beschreibung
Spuranzahl	N_T	Gesamtzahl der nummerierten Spuren
Spurlänge	$\ell_T^{(i)}$	Ausdehnung der Spur i in p-Richtung
Spurbreite	$w_T^{(i)}$	Ausdehnung der Spur i in o-Richtung
Spurtiefe	$d_T^{(i)}$	Ausdehnung der Spur i in n-Richtung
Spurlage	$\vec{r}_T^{(i)}$	Position des Spur-KS-Ursprungs $O_T^{(i)}$ der Spur i im Maßverkörperungs-KS; Koordinaten $p_T^{(i)}$, $o_T^{(i)}$ und $n_T^{(i)}$
Spur-Längsversatz, **Spur-p-Versatz**	$p_{TT}^{(i_1,i_2)}$	Versatz in p-Richtung von Spur i_1 zu Spur i_2
Spur-Querversatz, **Spur-o-Versatz**	$o_{TT}^{(i_1,i_2)}$	Versatz in o-Richtung von Spur i_1 zu Spur i_2
Spurabstand	$w_{TT}^{(i,i+1)}$	Abstand in o-Richtung zwischen benachbarten Spuren

5 Streufeld der Maßverkörperung

Das Streufeld einer Maßverkörperung ergibt sich aus ihrer Polarisation und Geometrie. Im Folgenden werden das Streufeld und charakteristische Feldmerkmale beschrieben, die für die magnetische Vermessung und Bewertung von magnetischen Maßverkörperungen relevant sind.

5.1 Ermittlungsbereich und Feldverläufe

Zur Beschreibung und Charakterisierung des Streufeldes wird dieses an räumlichen Lagen relativ zur Maßverkörperung betrachtet. Die Gesamtheit der dabei berücksichtigten Lagen wird als **Ermittlungsbereich** bezeichnet. Ein Ermittlungsbereich kann sich unmittelbar aus der Messaufgabe und der vorgesehenen Relativbewegung nach Kapitel 3 ergeben oder gezielt für die Vermessung und Charakterisierung der Maßverkörperung festgelegt werden. Seine Lage und Orientierung werden im Maßverkörperungs-KS oder in einem zugeordneten Struktur-KS angegeben.

Ein eindimensionaler Ermittlungsbereich wird als **Messpfad** bezeichnet. Verläuft ein Messpfad entlang einer einzelnen Koordinatenrichtung, wird entsprechend von einem $\boldsymbol{p}$**-Pfad**, $\boldsymbol{o}$**-Pfad** oder $\boldsymbol{n}$**-Pfad** gesprochen. Ein p-Pfad folgt damit der p-Richtung und kann bei zylindrischen Anordnungen gekrümmt verlaufen.

Beispielsweise beschreibt die Parametrisierung $(p, o, n) = (t, 0{,}1\,\text{mm})$ mit $t \in [0\,\text{mm}, 5\,\text{mm}]$ einen geradlinigen, $5\,\text{mm}$ langen p-Pfad bei einer Messhöhe von $1\,\text{mm}$. Ein entsprechender Messpfad ist in Abbildung 5.1 (a) dargestellt.

Ein zweidimensionaler Ermittlungsbereich wird als **Messfläche**, ein dreidimensionaler Ermittlungsbereich als **Messvolumen** bezeichnet. Analog zu Messpfaden können Messflächen anhand der variierten Koordinatenrichtungen bezeichnet werden. Eine p-o-Messfläche wird beispielsweise durch Variation von p und o bei konstantem n gebildet.

Die Parametrisierung $(p, o, n) = (t, u, 1\,\text{mm})$ mit $t \in [0°, 360°]$ und $u \in [-1\,\text{mm}, 1\,\text{mm}]$ beschreibt beispielsweise eine $2\,\text{mm}$ breite p-o-Messfläche bei einer Messhöhe von $1\,\text{mm}$. Diese Messfläche ist in Abbildung 5.1 (e) in einer radialen Anordnung und in Teilbild (f) in einer axialen Anordnung dargestellt.

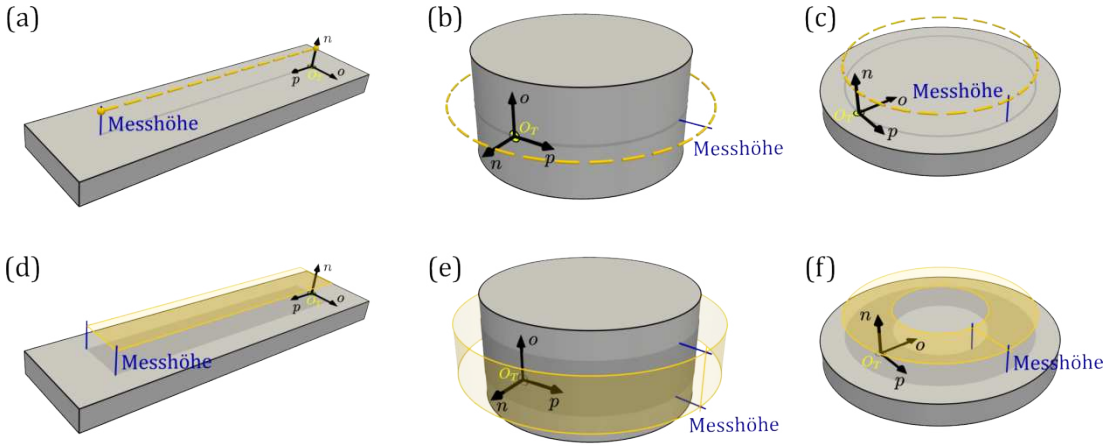


Abbildung 5.1: Ermittlungsbereiche

Abbildung 5.1 zeigt beispielhafte Ermittlungsbereiche für lineare, radiale und axiale Anordnungen. In den Teilbildern (a) bis (c) sind p-Pfade bei konstanten o und n, in den Teilbildern (d) bis (f) p-o-Messflächen bei konstanten Messhöhen n dargestellt.

5.2 Streufeld einer Maßverkörperung

Wie in Kapitel 4.2 erläutert, lässt sich die Streufeldcharakteristik einer magnetischen Maßverkörperung qualitativ durch den Austritt der magnetischen Feldlinien an den Nordpolen und ihren Eintritt an den Südpolen beschreiben. Die einzelnen Komponenten B_p und B_n weisen dabei in p-Richtung typischerweise einen wellenförmigen Verlauf mit Maxima, Minima und Nullstellen auf. Mit zunehmendem Abstand von der magnetischen Struktur nimmt die Amplitude des Streufeldes ab. Dieser Abfall erfolgt im Fernfeld einzelner Zonen näherungsweise kubisch und bei der Überlagerung der Streufelder mehrerer alternierender Zonen näherungsweise exponentiell (Ausserlechner 2012).

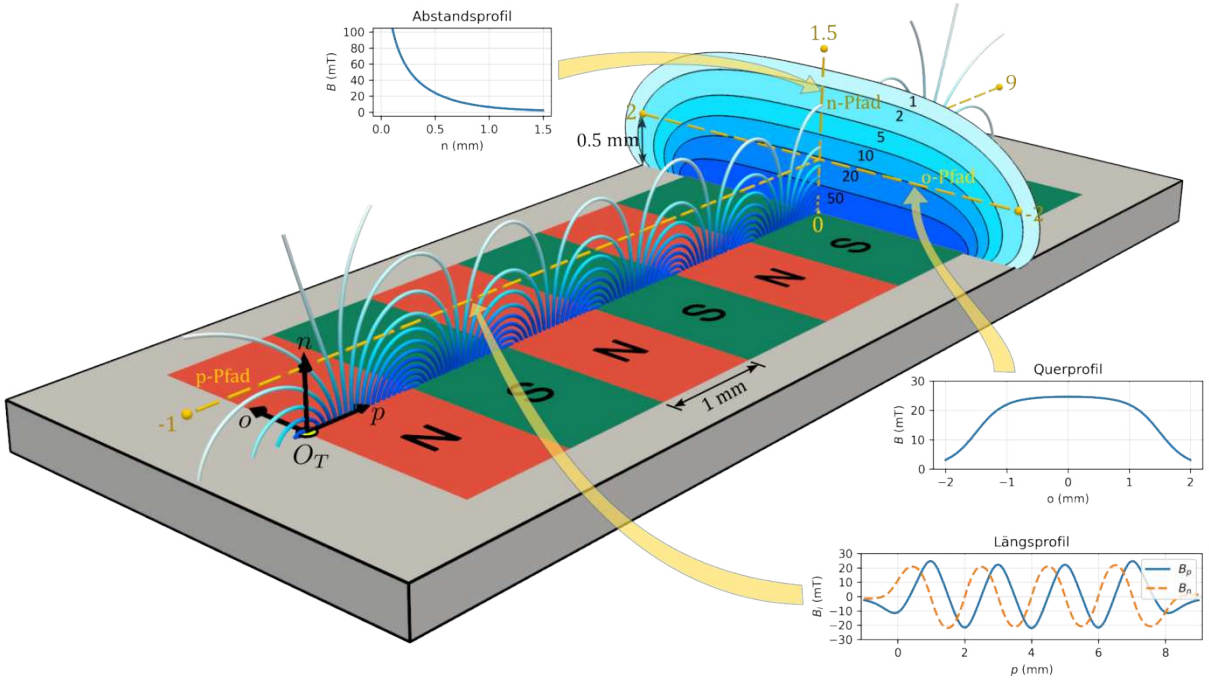


Abbildung 5.2: Streufeldcharakteristik einer magnetischen Maßverkörperung

Abbildung 5.2 zeigt das **Simulationsergebnis** eines Multipolmagneten aus acht homogenen, alternierend OOP-polarisierten Zonen mit Polarisationsamplituden $J_Z = 300\,\mathrm{mT}$, Längen $\ell_Z = 1\,\mathrm{mm}$, Breiten $w_Z = 3\,\mathrm{mm}$ und Tiefen $d_Z = 200\,\mu\mathrm{m}$. Die Maßverkörperung ist in Poldarstellung gezeigt. Das resultierende Streufeld ist in Form von Feldlinien mittig über der Maßverkörperung sowie einer blauen Konturdarstellung der Streufeldamplitude in einer o-n-Ebene dargestellt. In beiden Darstellungen codiert die blaue Farbskala den Wert der Streufeldamplitude in Millitesla. Zur Veranschaulichung der Streufeldcharakteristik sind zusätzlich Feldverläufe entlang der eingezeichneten Messpfade in den Teilbildern abgebildet.

In p-Richtung spiegelt das Streufeld die periodische Struktur des Polmusters wider. Die charakteristische Oszillation der Komponenten B_p und B_n des Streufeldes entlang des eingezeichneten p-Pfades ist im Längsprofil erkennbar. Die Komponenten sind gegeneinander typischerweise um etwa $90°$ phasenverschoben, eine Eigenschaft, die in vielen Anwendungen zur Positionsbestimmung genutzt wird.

In o-Richtung ist die Streufeldcharakteristik durch einen raschen Abfall der Feldamplitude über die seitliche Begrenzung der magnetischen Struktur hinaus gekennzeichnet. Dies ist auch aus dem typischen Querprofil ersichtlich, in dem die Feldamplitude entlang des eingezeichneten o-Pfades abgebildet ist.

Das Querprofil verdeutlicht, dass sich das Streufeld bei komplexen Anordnungen in der Regel auf einen begrenzten Bereich oberhalb der magnetischen Struktur konzentriert.

In n-Richtung ist die starke Abschwächung der Feldamplitude mit wachsendem Abstand von der magnetischen Struktur sowohl an der Konturdarstellung als auch am Abstandsprofil ersichtlich. Der rasche Zerfall der Feldamplitude begrenzt den nutzbaren Messabstand und erfordert eine präzise Positionierung der Sensorik nahe der funktionalen Oberfläche der Maßverkörperung, was mit erheblichen technischen Herausforderungen verbunden sein kann.

In o- und n-Richtung ist die Streufeldcharakteristik insbesondere durch die Abnahme der Feldamplitude mit zunehmendem Abstand von der magnetischen Struktur geprägt. Für die Anwendung ist dabei entscheidend, dass die **Feldamplitude** innerhalb eines festgelegten Wertebereichs liegt, da unterschiedliche Sensortechnologien und Sensorausführungen nur innerhalb bestimmter Feldamplitudenbereiche spezifizierte Messeigenschaften aufweisen.

Ein unterer **Amplitudengrenzwert** kann sich beispielsweise aus dem erforderlichen Signal-Rausch-Verhältnis eines Sensors ergeben, während ein oberer Amplitudengrenzwert durch den zulässigen Mess- oder Linearitätsbereich bestimmt sein kann. Ein **Nutzbereich** wird durch eine oder mehrere für die Anwendung festgelegte Amplitudenbedingungen definiert.

5.3 Feldmerkmale auf Messpfaden

Zur Beschreibung des Streufeldes wird in der Praxis auf bestimmte Merkmale von Feldverläufen Bezug genommen. Im Folgenden werden hierzu zunächst eindimensionale Feldverläufe entlang ausgewählter Messpfade betrachtet.

Entlang eines p-Pfades stellen insbesondere die lokalen Maxima und Minima einer betrachteten Feldkomponente B_α, insbesondere B_p und B_n, die im Folgenden zusammenfassend als **Peaks** (Bezugsindex „A“) bezeichnet werden, sowie die **Nullstellen** (Bezugsindex „N“) charakteristische Merkmale eines Feldverlaufs dar. Sie werden in vielen Anwendungen für die Positionserkennung genutzt.

Die p-Position eines Peaks wird als **Peaklage** p_A, die einer Nullstelle als **Nullstellenlage** p_N bezeichnet. Der Wert der betrachteten Feldkomponente an einem Peak wird als **Peakwert** B_A bezeichnet. Zur eindeutigen Kennzeichnung werden Peaks und Nullstellen beginnend mit 1, entlang der positiven p-Richtung fortlaufend nummeriert. Die Indizierung wird im Normalfall so gewählt, dass auf die Nullstelle j der Peak j folgt. Die **Peakanzahl** N_A und die **Nullstellenanzahl** N_N geben die Gesamtzahl der jeweils indizierten Merkmale an. Eine vollständige Indizierung aller Peaks und Nullstellen ist nicht erforderlich.

Ein weiteres wichtiges Merkmal eines Feldverlaufs entlang eines p-Pfades ist die Länge seiner Schwingungen. Die **magnetische Halbperiode** bezeichnet den Abstand in p-Richtung zwischen zwei benachbarten Merkmalen gleicher Art. Dabei bezeichnet ℓ_A den Abstand zwischen zwei benachbarten Peaks entgegengesetzten Vorzeichens und ℓ_N den Abstand zwischen zwei benachbarten Nullstellen:

$$\ell_A^{(j)} = p_A^{(j+1)} - p_A^{(j)},$$

$$\ell_N^{(j)} = p_N^{(j+1)} - p_N^{(j)}.$$

Die **magnetische Periode** beschreibt entsprechend die lokale Länge einer vollständigen Schwingung. Sie wird aus dem Abstand jedes zweiten Merkmals gleicher Art bestimmt:

$$L_A^{(j)} = p_A^{(j+2)} - p_A^{(j)} = \ell_A^{(j)} + \ell_A^{(j+1)},$$

$$L_N^{(j)} = p_N^{(j+2)} - p_N^{(j)} = \ell_N^{(j)} + \ell_N^{(j+1)}.$$

Da die Feldverläufe im Allgemeinen nicht streng periodisch sind, handelt es sich bei der magnetischen Halbperiode und der magnetischen Periode um lokale Größen, deren Werte entlang des Feldverlaufs variieren können.

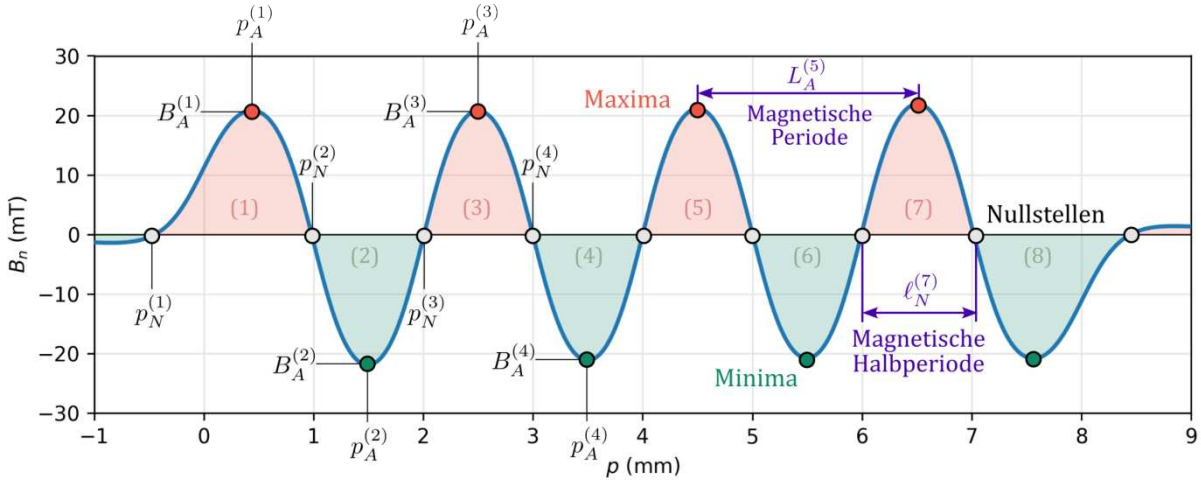


Abbildung 5.3: Feldverlauf entlang eines p-Pfades

Abbildung 5.3 zeigt das Längsprofil $B_n(p)$ entlang des in Abbildung 5.2 dargestellten p-Pfades in detaillierter Form. Peaklagen, Nullstellenlagen, magnetische Halbperioden und magnetische Perioden sind eingezeichnet. Positive und negative Halbwellen sind zur Veranschaulichung rot beziehungsweise grün hervorgehoben.

Die **Halbwelle** benennt den Abschnitt eines Feldverlaufs, der zwischen zwei benachbarten Nullstellen liegt. Innerhalb einer Halbwelle weist die betrachtete Feldkomponente ein einheitliches Vorzeichen auf. Der Begriff ermöglicht eine eindeutige Bezugnahme auf einzelne Abschnitte des Feldverlaufs und wird für deren Beschreibung und Vermessung verwendet.

Halbwellen werden, beginnend mit 1, entlang der positiven p-Richtung fortlaufend nummeriert. Die Halbwelle j liegt zwischen den Nullstellen mit den Indizes j und $j+1$ und enthält den Peak j. Ihre Ausdehnung in p-Richtung entspricht der nullstellenbezogenen Halbperiode $\ell_N^{(j)}$.

Entlang eines *o*-Pfades ist insbesondere der seitliche Verlauf der Feldamplitude von Bedeutung. Charakteristische Merkmale eines Feldverlaufs $B(o)$ sind die **Amplitudengrenzpunkte**. Sie kennzeichnen die **Amplitudengrenzlagen** o_G, an denen die Feldamplitude einen vorgegebenen **Amplitudengrenzwert** B_G annimmt, und werden, beginnend mit 1, entlang der positiven Pfadrichtung fortlaufend nummeriert.

Die Amplitudengrenzpunkte begrenzen den Nutzbereich entlang des betrachteten Messpfades. Die **Nutzbereichsbreite** $w_G(p)$ entspricht dessen Ausdehnung in o-Richtung an der Position p. Wird die Nutzbereichsbreite innerhalb einer Halbwelle j bestimmt, wird sie als **Nutzbreite der Halbwelle** $w_G^{(j)}(p)$ bezeichnet.

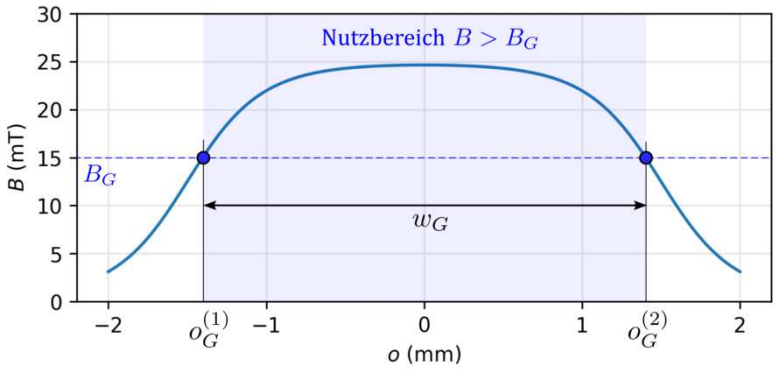


Abbildung 5.4: Feldverlauf entlang eines o-Pfades

Abbildung 5.4 zeigt das Querprofil $B(o)$ entlang des in Abbildung 5.2 dargestellten o-Pfades in detaillierter Form. Ein unterer Amplitudengrenzwert B_G definiert einen Nutzbereich. Die beiden resultierenden Amplitudengrenzpunkte sind blau eingezeichnet. Ihre o-Lagen entsprechen den Amplitudengrenzlagen $o_G^{(1)}$ und $o_G^{(2)}$, die den Nutzbereich begrenzen.

Hinweis 5.1

Die in diesem Kapitel dargestellten Feldverläufe zeigen idealisierte beziehungsweise für viele Anwendungen angestrebte Kurven mit eindeutig ausgeprägten und gut auswertbaren Feldmerkmalen. Reale Feldverläufe können hiervon infolge von Fertigungsabweichungen, Materialinhomogenitäten und Randeffekten abweichen. Insbesondere bei sehr kleinen Messhöhen, $n \ll \ell_P$, treten höhere räumliche Harmonische deutlicher hervor, wodurch beispielsweise zusätzliche Peaks und Nullstellen, ***Doppelpeaks*** *oder komplexere Feldverläufe auftreten können.*

Tabelle 5.1: Begriffe Feldmerkmale

Begriff	Symbol	Beschreibung
Peaklage	$p_A^{(j)}$	p-Position des Peaks j
Peakwert	$B_A^{(j)}$	Wert der betrachteten Feldkomponente am Peak j
Nullstellenlage	$p_N^{(j)}$	p-Position der Nullstelle j
Magnetische Halbperiode	$\ell_A^{(j)}$, $\ell_N^{(j)}$	Lokale Länge einer halben Schwingung, bestimmt aus Peaks bzw. Nullstellen mit Indizes j und $j+1$
Magnetische Periode	$L_A^{(j)}$, $L_N^{(j)}$	Lokale Länge einer vollständigen Schwingung, bestimmt aus Peaks bzw. Nullstellen mit Indizes j und $j+2$
Amplitudengrenzwert	B_G	Für die Anwendung festgelegter Grenzwert der Feldamplitude
Amplitudengrenzlage	$o_G^{(j)}$	o-Lage des Amplitudengrenzpunkts j
Nutzbereichsbreite	$w_G(p)$	Ausdehnung des Nutzbereichs in o-Richtung an der Position p
Nutzbreite der Halbwelle	$w_G^{(j)}(p)$	Nutzbereichsbreite innerhalb der Halbwelle j

5.4 Feldmerkmale auf Messflächen und im Raum

Messflächen geben einen zweidimensionalen Einblick in die Streufeldcharakteristik. Besonders zweckmäßig ist dafür die Darstellung einer anwendungsrelevanten Streufeldkomponente auf einer p-o-Messfläche

bei konstanter Messhöhe n. Amplitudengrenzen, die den Nutzbereich eingrenzen, erscheinen auf einer solchen Messfläche als Konturlinien der Feldamplitude und werden dem Feldverlauf häufig ergänzend überlagert.

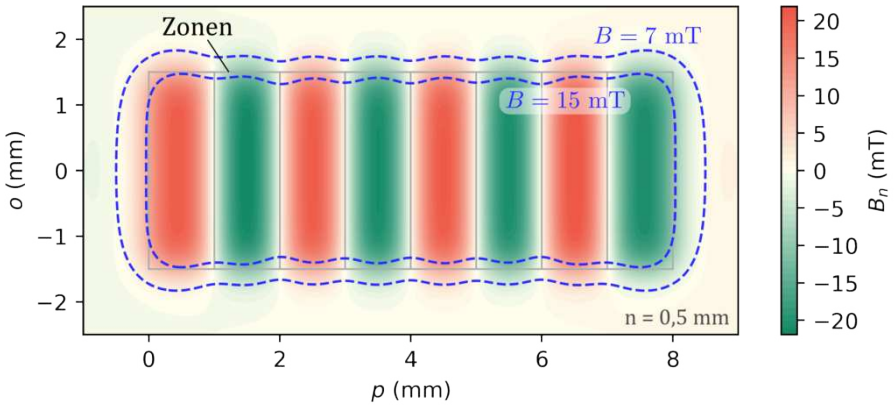


Abbildung 5.5: Feldverlauf auf p-o-Messfläche

Abbildung 5.5 zeigt den Feldverlauf $B_n(p, o)$ der in Kapitel 5.2 beschriebenen Maßverkörperung bei der Messhöhe $n = 0{,}5\,\text{mm}$. Die Projektion der darunterliegenden Zonen, die das Streufeld erzeugen, ist grau umrandet. Zusätzlich sind die Konturlinien der Feldamplitude für die Amplitudengrenzwerte $B_G = 7\,\text{mT}$ und $B_G = 15\,\text{mT}$ eingezeichnet. Sie veranschaulichen die Abgrenzung möglicher Nutzbereiche auf der Messfläche. Die Farbgebung des Feldverlaufs folgt bewusst der in Kapitel 4.2 verwendeten Rot-Gelb-Grün-Farbskala zur Darstellung der Normalkomponente.

Abbildung 5.5 veranschaulicht zwei **grundlegende Eigenschaften** des Feldverlaufs. In p-Richtung oszilliert die dargestellte Feldkomponente, wobei positive Halbwellen rot und negative Halbwellen grün dargestellt sind. Über die seitliche Begrenzung der magnetischen Struktur hinaus nimmt die Amplitude des Feldes rasch ab.

Für Kommunikationszwecke wird der zweidimensionale Feldverlauf häufig auf ein binäres Farbmuster reduziert, was eine kompakte und anschauliche Darstellung der wesentlichen Feldmerkmale ermöglicht. Bei den Amplitudengrenzen handelt es sich um zweidimensionale Fortsetzungen der auf Messpfaden auftretenden Grenzpunkte. Gleichermaßen setzen sich die Nullstellen auf der Messfläche zu **Nulllinien** fort. Sie bilden die Grenzen benachbarter Halbwellen. Peaklagen setzen sich zu **Peaklinien** fort, bei denen es sich mathematisch um Extremwertlinien in p-Richtung handelt.

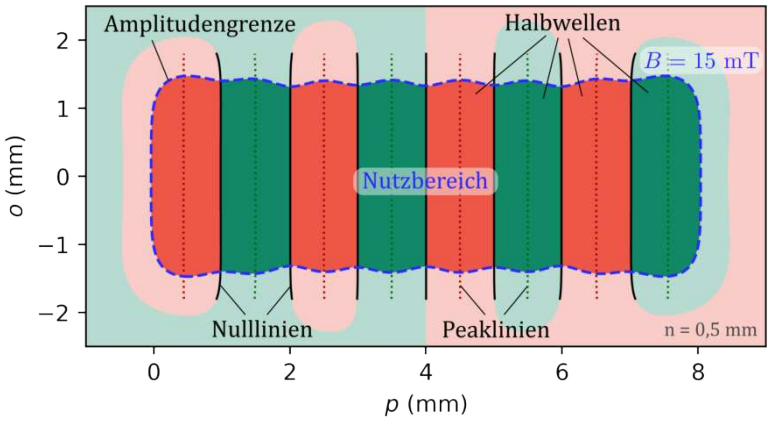


Abbildung 5.6: Feldverlauf auf p-o-Messfläche in binärer Form

Abbildung 5.6 zeigt den Feldverlauf $B_n(p, o)$ aus Abbildung 5.5 in binärer Farbdarstellung. Dem Farbmuster sind die Feldmerkmale in Form von Nulllinien und Peaklinien sowie die Amplitudengrenzlinie für $B_G = 15\,\mathrm{mT}$ überlagert. Der durch diesen Amplitudengrenzwert festgelegte Nutzbereich ist farblich hervorgehoben. Die Nulllinien gliedern ihn sichtbar in positive und negative Halbwellen.

Innerhalb des Nutzbereichs weisen die Komponenten B_p und B_n typischerweise eine geordnete, **wellenförmige Struktur** auf, die eine eindeutige Abgrenzung und Zuordnung der Halbwellen ermöglicht. Außerhalb des Nutzbereichs ist diese geordnete Struktur nicht notwendigerweise erhalten, wie auch in der Abbildung erkennbar. Nulllinien können dort zusammenlaufen oder sich so verändern, dass einzelne Halbwellen nicht mehr eindeutig abgegrenzt und fortlaufend zugeordnet werden können. Für die anwendungsbezogene Referenzierung nach Kapitel 5.3 werden auf Messflächen daher vorrangig die innerhalb des Nutzbereichs liegenden Halbwellen betrachtet.

Feldverläufe auf Messpfaden und Messflächen zeigen jeweils nur Ausschnitte des **räumlichen Streufeldes** einer Maßverkörperung. Seine Struktur in ihrer Gesamtheit zu verstehen, ist für die Auslegung magnetischer Messsysteme von wesentlicher Bedeutung.

Die räumlichen Fortsetzungen der Nullstellen werden als **Nullstellenflächen** bezeichnet. Mathematisch handelt es sich um Isoflächen einer betrachteten Feldkomponente zum Feldwert null. Sie werden durch folgende Gleichung beschrieben:

$$B_\alpha(p, o, n) = 0.$$

Die räumlichen Fortsetzungen der Peaklagen werden als **Peakflächen** bezeichnet. Dabei handelt es sich um Extremwertflächen der betrachteten Feldkomponente in p-Richtung, für die notwendigerweise gilt:

$$\frac{\partial}{\partial p} B_\alpha(p, o, n) = 0.$$

Amplitudengrenzen sind räumlich durch **Amplitudengrenzflächen** definiert. Sie sind Isoflächen der Streufeldamplitude zu einem festgelegten Amplitudengrenzwert B_G:

$$B(p, o, n) = B_G.$$

Wenn Messpfade und Messflächen diese räumlichen Flächen schneiden, entstehen **Schnittpunkte** beziehungsweise **Schnittlinien**. Der Schnitt einer Nullstellenfläche mit einem Messpfad ergibt eine Nullstelle, der Schnitt mit einer Messfläche eine Nulllinie. Entsprechend ergeben sich aus dem Schnitt mit Peakflächen Peaklagen beziehungsweise Peaklinien und aus den Schnitten mit Amplitudengrenzflächen Amplitudengrenzpunkte beziehungsweise Amplitudengrenzlinien.

Im dreidimensionalen Raum wird der **Nutzbereich** durch Amplitudengrenzflächen begrenzt und durch Nullstellenflächen in Halbwellen unterteilt.

Abbildung 5.7 veranschaulicht die räumliche Anordnung ausgewählter Merkmale der OOP-Komponente des Streufeldes über der in Kapitel 5.2 beschriebenen Maßverkörperung. Die Amplitudengrenzfläche des durch $B_G = 15\,\mathrm{mT}$ festgelegten Nutzbereichs ist blau dargestellt. Sie bildet eine blasenförmige Hüllfläche über der Maßverkörperung, die in der Abbildung zur besseren Sichtbarkeit nach vorne hin aufgeschnitten dargestellt ist. In der Abbildung ist die n-Koordinate um einen Faktor 2 gestreckt, damit die Feldverteilung besser erkennbar ist.

Innerhalb des Nutzbereichs ist die Feldkomponente B_n auf den p-o-Messflächen bei $n = 0{,}4\,\mathrm{mm}$, $n = 0{,}5\,\mathrm{mm}$ und $n = 0{,}6\,\mathrm{mm}$ in binärer Farbdarstellung gezeigt. Die Schnittlinien dieser Messflächen mit der Amplitudengrenzfläche bilden die zugehörigen Amplitudengrenzlinien und sind hellblau hervorgehoben.

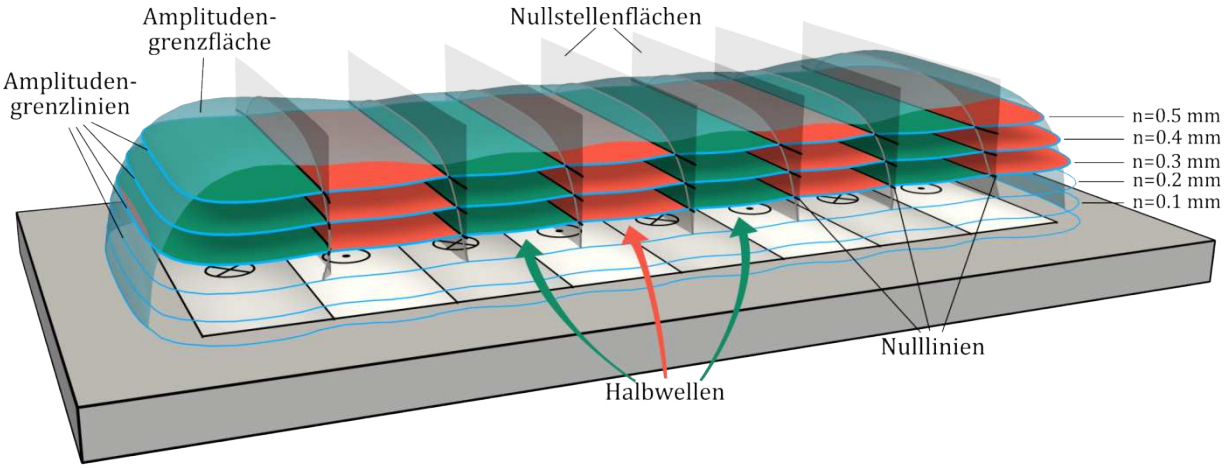


Abbildung 5.7: Feldverlauf im Raum

Die Nullstellenflächen unterteilen den Nutzbereich in Halbwellen. Die Schnittlinien der Nullstellenflächen mit den Messflächen erscheinen als schwarz hervorgehobene Nulllinien, welche die Halbwellen auf den jeweiligen Messflächen voneinander trennen. Die Schnittlinien der Nullstellenflächen mit der Amplitudengrenzfläche sind grau hervorgehoben. Sie besitzen in diesem Beispiel keine eigenständige technische Bedeutung und dienen ausschließlich der besseren Erkennbarkeit der räumlichen Anordnung.

Hinweis 5.2

*Die vorangehenden Unterkapitel verdeutlichen, dass Feldverläufe und die daraus abgeleiteten Feldmerkmale wesentlich von den jeweiligen **Ermittlungsbedingungen** abhängen. Hierzu zählen insbesondere die Feldkomponente sowie Lage, Orientierung und Abmessungen des Ermittlungsbereichs und gegebenenfalls die verwendeten Amplitudengrenzwerte. Eine korrekte Interpretation eines Feldverlaufs ist nur bei Angabe der Ermittlungsbedingungen möglich.*

5.5 Felddarstellung

Im Sinne dieses Dokuments bezeichnet eine **Felddarstellung** ausschließlich eine farbcodierte Darstellung einer ausgewählten Feldkomponente auf einer Messfläche.

Diese Form der Felddarstellung dient der Kommunikation der Feldverläufe und Feldmerkmale magnetischer Maßverkörperungen. Sie ist insbesondere an der **Schnittstelle** zwischen Maßverkörperungshersteller und Systemhersteller von Bedeutung. Einerseits lassen sich damit die für die Systemauslegung erforderlichen Feldverläufe spezifizieren. Andererseits lassen sich die von einer konkreten Maßverkörperung tatsächlich erzeugten Feldverläufe beschreiben. In beiden Fällen wird das Magnetfeld als Eigenschaft der Maßverkörperung und unabhängig von den Eigenschaften eines bestimmten Sensors betrachtet.

In Anlehnung an die Darstellungskonventionen in Kapitel 4.5 werden in der **binären Felddarstellung** positive Halbwellen rot und negative Halbwellen grün eingefärbt. Die verwendeten Farbcodes sind #EE5544 für Rot und #118866 für Grün. In Schwarzweißdarstellungen werden entsprechende Graustufen verwendet, wobei positive Halbwellen hell und negative Halbwellen dunkel dargestellt werden.

Zur eindeutigen Kennzeichnung der dargestellten Streufeldkomponente werden **Richtungssymbole** verwendet, welche die Ausrichtung der Feldkomponente (IP oder OOP) sowie das Vorzeichen der dargestellten Halbwellen vermitteln. Um Verwechslungen zu vermeiden, unterscheiden sich diese Symbole bewusst von den Richtungssymbolen der Zonendarstellung nach Kapitel 4.5.

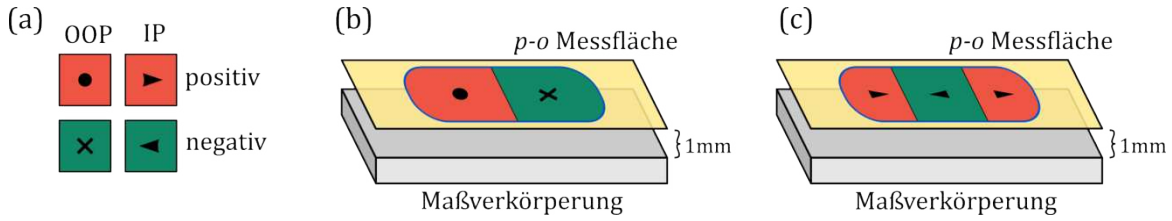


Abbildung 5.8: Konvention für binäre Felddarstellung

Abbildung 5.8 veranschaulicht die Konventionen der binären Felddarstellung. Teilbild (a) zeigt die verwendeten Farben und Richtungssymbole für positive und negative IP- und OOP-Komponenten. Insbesondere unterscheiden sich die OOP-Symbole durch das Fehlen der Kreisumrandung von den entsprechenden Polarisationssymbolen der Zonendarstellung. Die Teilbilder (b) und (c) zeigen schematische Felddarstellungen der OOP-Komponente B_n beziehungsweise der IP-Komponente B_p auf p-o-Messflächen oberhalb einer Maßverkörperung.

Hinweis 5.3

*Die Poldarstellung nach Kapitel 4.5 ist ein **Spezialfall der Felddarstellung**, in der die OOP-Komponente des Streufeldes binär auf der Oberfläche der Maßverkörperung ($n = 0$) gezeigt ist. Bei gleicher Wahl der Amplitudengrenzwerte entsprechen die innerhalb des Nutzbereichs liegenden positiven und negativen Halbwellen den Nord- und Südpolbereichen.*

Die binäre Felddarstellung auf einer p-o-Messfläche ist besonders **zweckmäßig** für die Kommunikation von Feldverläufen, da sie die wesentlichen Feldmerkmale kompakt und anschaulich vermittelt. In dieser Darstellung nimmt die Messhöhe n eine zentrale Stellung ein, da sie Lage und Form der dargestellten Feldmerkmale wesentlich beeinflusst. Felddarstellungen werden aber häufig in Aufsicht gezeigt, sodass sich der Abstand der Messfläche von der Maßverkörperung aus der Darstellung nicht unmittelbar erschließen lässt. Es wird daher empfohlen, die **Messhöhe unmittelbar in der Felddarstellung anzugeben**, wie in Abbildung 5.9 gezeigt.

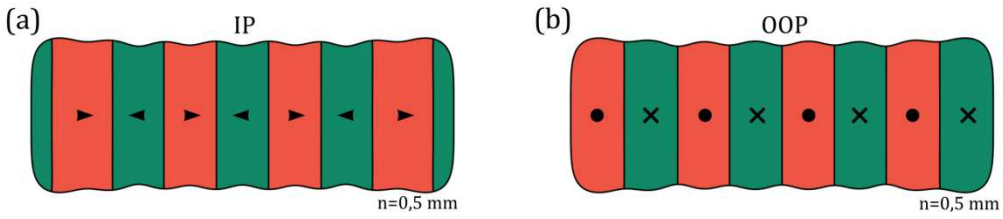


Abbildung 5.9: Felddarstellung von IP- und OOP-Komponenten

Abbildung 5.9 zeigt binäre Felddarstellungen der in Kapitel 5.2 beschriebenen Maßverkörperung auf einer p-o-Messfläche bei der Messhöhe $n = 0{,}5\,\text{mm}$. Die Felddarstellungen sind jeweils auf den durch den Amplitudengrenzwert $B_G = 15\,\text{mT}$ festgelegten Nutzbereich beschränkt. Teilbild (a) zeigt die IP-Komponente B_p, Teilbild (b) die OOP-Komponente B_n. Die Richtungssymbole sind entsprechend der Darstellungskonvention ausgeführt und die Messhöhe ist rechts unten angegeben.

Eine Felddarstellung wird häufig auf die funktionale Oberfläche der Maßverkörperung **projiziert**, um einen unmittelbaren örtlichen Bezug zwischen Feldmerkmalen und Bauteilgeometrie herzustellen. Je nach Bedarf kann sie dabei unabhängig von Amplitudengrenzen auf einen **relevanten Ausschnitt** beschränkt werden.

Abbildung 5.10 veranschaulicht die Projektion einer Felddarstellung auf die funktionale Oberfläche der Maßverkörperung. Teilbild (a) zeigt die in Kapitel 5.2 beschriebene Maßverkörperung in Zonendarstellung. Darüber ist die aus einer Simulation ermittelte Feldkomponente B_n auf mehreren, parallel zur funktionalen

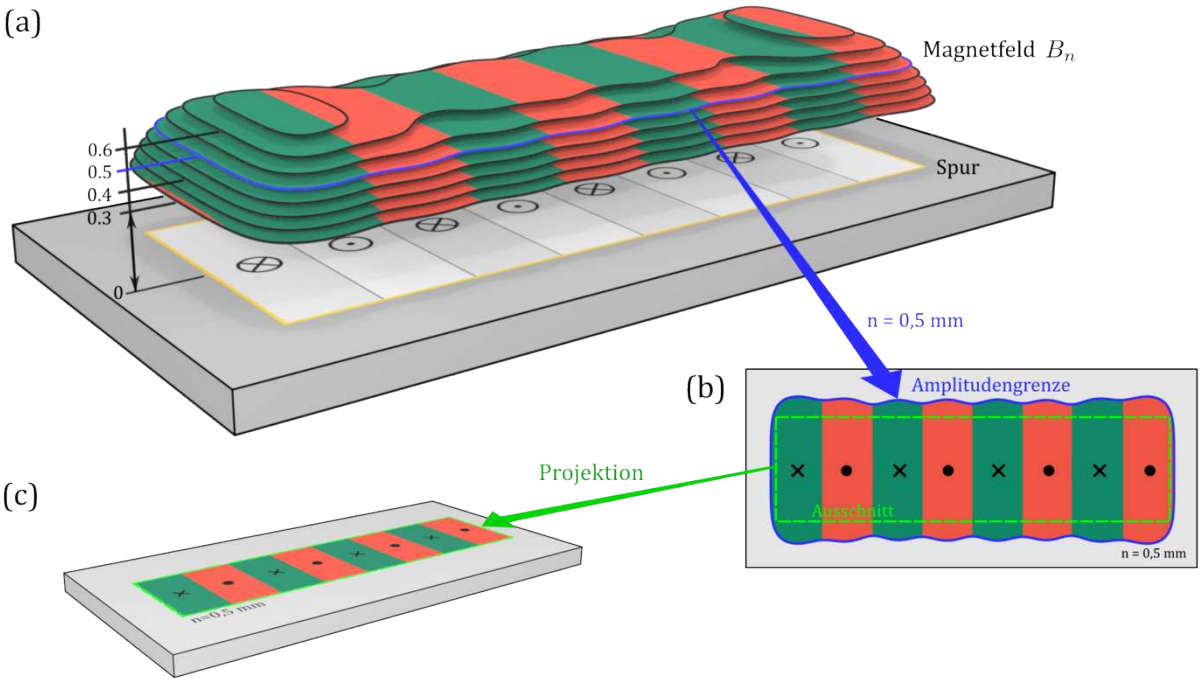


Abbildung 5.10: Felddarstellung in Projektion auf die Maßverkörperung

Oberfläche angeordneten Messflächen binär dargestellt. Jede Fläche ist dabei auf den Nutzbereich $B > 15\,\mathrm{mT}$ beschränkt. Der Abstand zwischen der Maßverkörperung und der untersten Messfläche ist zur besseren Sichtbarkeit künstlich vergrößert.

Teilbild (b) zeigt die Messfläche bei $n = 0{,}5\,\mathrm{mm}$ in Aufsicht. Ein für die Anwendung relevanter Ausschnitt, beispielsweise der Bereich der vorgesehenen Sensorpositionierung, ist hellgrün strichliert umrahmt. Teilbild (c) zeigt die Maßverkörperung mit der auf ihre funktionale Oberfläche projizierten Felddarstellung. Die Projektion ist auf den in Teilbild (b) gekennzeichneten Ausschnitt beschränkt.

Die bisher gezeigten Felddarstellungen geben ermittelte Feldverläufe konkreter Maßverkörperungen wieder und sind daher als **Ist-Darstellungen** zu verstehen. Die Ermittlung kann durch Messung oder durch Simulation erfolgen. An der Schnittstelle zwischen Systemhersteller und Maßverkörperungshersteller werden Felddarstellungen dagegen häufig als **Soll-Darstellungen** eingesetzt. Sie beschreiben geforderte Feldverläufe und dienen der Spezifikation und Kommunikation, ohne eine konkrete Realisierung vorauszusetzen.

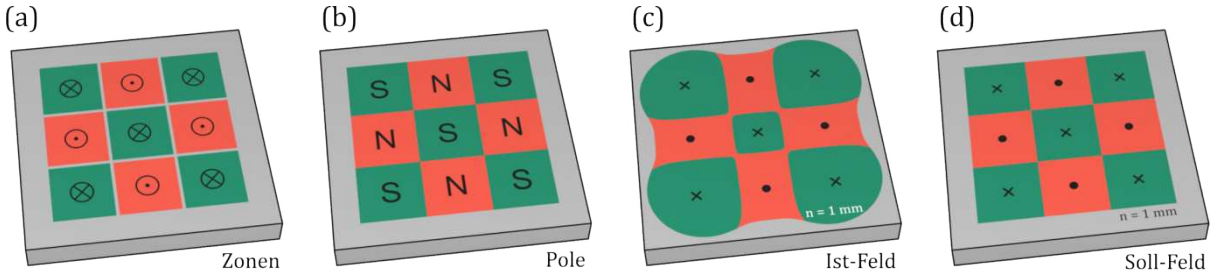


Abbildung 5.11: Felddarstellung Soll und Ist

Abbildung 5.11 zeigt ein magnetisches Schachbrettmuster in verschiedenen Darstellungsformen. Teilbild (a) zeigt die Maßverkörperung in farbcodierter Zonendarstellung. Zu sehen ist eine graue Halterung mit eingepressten kubischen Magneten, zwischen denen schmale Spalte erkennbar sind. Teilbild (b) zeigt die gleiche Maßverkörperung in Poldarstellung. Beide Darstellungen sind nach Kapitel 4 strukturbezogen.

Teilbild (c) zeigt eine Ist-Felddarstellung die auf einen amplitudenbezogenen Nutzbereich beschränkt und

auf die Maßverkörperung projiziert ist. Der Feldverlauf wurde durch Simulation des Magnetfeldes der in Teilbild (a) gezeigten Maßverkörperung auf einer p-o-Messfläche bei der Messhöhe $n = 1$ mm ermittelt.

Teilbild (d) zeigt eine Soll-Felddarstellung in binärer Form. Sie stellt weder einen Ausschnitt des in Teilbild (c) dargestellten Feldverlaufs noch das Ergebnis einer Messung oder Simulation dar. Vielmehr dient sie der Beschreibung gewünschter Feldmerkmale und könnte beispielsweise eine Bedarfsanforderung oder Zielvorgabe für die Auslegung einer Maßverkörperung repräsentieren.

Hinweis 5.4

*Die vorgestellten **Darstellungsformen** können sich in ihrer grafischen Erscheinung stark ähneln, unterscheiden sich jedoch grundlegend hinsichtlich ihrer Bedeutung und ihres Informationsgehalts. Bei der **Interpretation** ist besonders darauf zu achten, welche Darstellungsform vorliegt.*

*Die in Kapitel 4.6 mittels Begrenzungsbox-Geometrien beschriebenen **Zonen- und Polmuster** stellen häufig idealisierte Soll-Beschreibungen dar. Ihnen können entsprechend ermittelte Ist-Beschreibungen gegenübergestellt werden.*

5.6 Spurfelder

Die bisherigen Unterkapitel beschreiben das Streufeld einer Maßverkörperung unabhängig von einer Gliederung der magnetischen Struktur in Spuren. Bei magnetischen Maßstäben mit mehreren Spuren wird das von einer einzelnen Spur erzeugte Magnetfeld als **Spurfeld** bezeichnet. Das gesamte Streufeld des Maßstabs ergibt sich aus der Überlagerung der einzelnen Spurfelder.

Bei der Vermessung einer Spur ist auf den **Einfluss benachbarter Spurfelder** zu achten, da experimentell grundsätzlich das Gesamtfeld erfasst wird. In vielen praktischen Anwendungen wird deshalb der Spurabstand so gewählt, dass dieser Einfluss gering bleibt. Dies wird durch den raschen Abfall der Spurfelder über die seitlichen Begrenzungen der jeweiligen Spur hinaus begünstigt. Bei geeignet gewähltem Spurabstand können die Nutzbereiche, die aus dem Gesamtfeld ermittelt werden, räumlich voneinander getrennt sein und den darunterliegenden Spuren eindeutig zugeordnet werden.

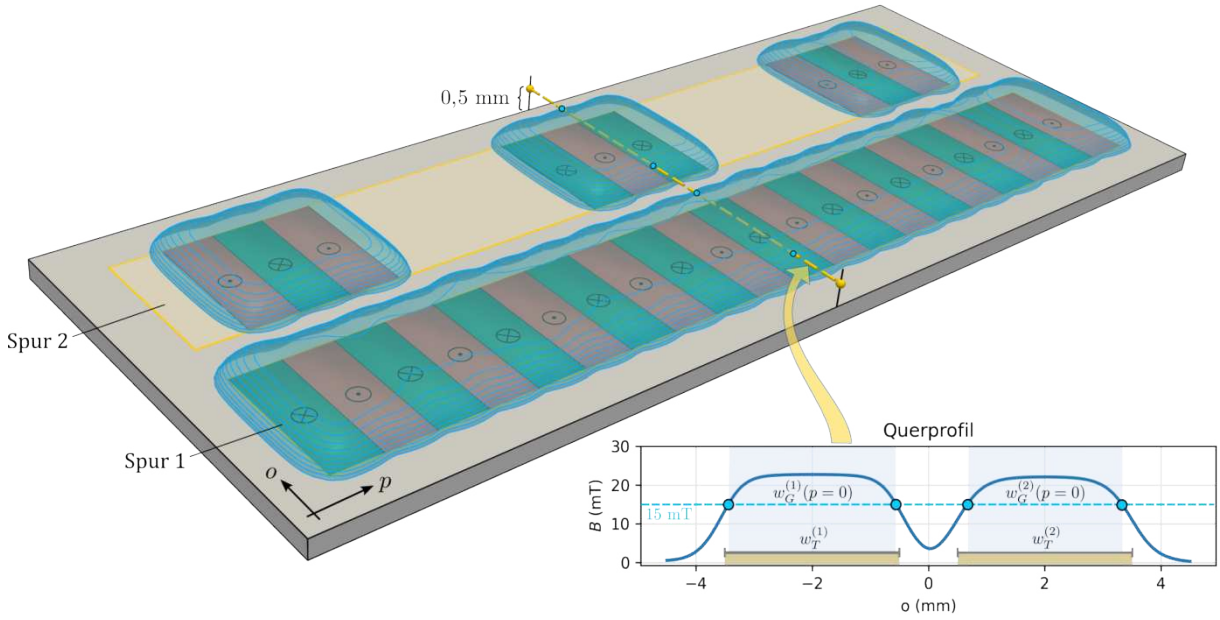


Abbildung 5.12: Spurfelder und Nutzbereiche mehrspuriger Maßstäbe

Abbildung 5.12 zeigt die Simulation eines magnetischen Maßstabs mit zwei parallelen OOP-polarisierten Linearspuren: einer vollbeschriebenen Inkrementalspur und einer segmentierten Spur mit drei Referenzbereichen. In der Simulation wurden die Zonen als homogen, mit einer Polarisation von $J_Z = 350\,\mathrm{mT}$ modelliert. Die Spurbreiten betragen $w_T = 3\,\mathrm{mm}$, der Spurabstand $w_{TT} = 1\,\mathrm{mm}$. Die Zonenlängen betragen $\ell_Z = 1\,\mathrm{mm}$ und die Zonentiefe $d_Z = 200\,\mu\mathrm{m}$. Die für den Amplitudengrenzwert $B_G = 15\,\mathrm{mT}$ ermittelten Nutzbereiche sind durch ihre Amplitudengrenzflächen als blaue, blasenförmige Hüllflächen über dem Maßstab dargestellt.

Das Querprofil der Feldamplitude B entlang des eingezeichneten o-Pfades bei einer Messhöhe von $0{,}5\,\mathrm{mm}$ ist in einem Teilbild gezeigt. Aufgrund des starken seitlichen Abfalls der Feldamplitude über die Spuren hinaus ergeben sich unter den gewählten Ermittlungsbedingungen voneinander **getrennte Nutzbereiche**. Das Querprofil zeigt, dass die Nutzbereichsbreiten w_G bei dieser Messhöhe für beide Spuren etwas geringer sind als die jeweiligen Spurbreiten w_T.

Wie in der Abbildung erkennbar, hängen Lage und Abmessungen der Nutzbereiche wesentlich von den zugrunde liegenden Zonenmustern ab. Der vollbeschriebenen Inkrementalspur ist ein langer, zusammenhängender Nutzbereich zugeordnet. Der segmentierten Spur sind dagegen drei voneinander getrennte Nutzbereiche zugeordnet, die über den drei Referenzbereichen liegen. Besitzt eine Spur **mehrere Nutzbereiche**, werden diese, beginnend mit 1, entlang der positiven p-Richtung fortlaufend nummeriert.

6 Grundlagen der Vermessung

Aufbauend auf der Beschreibung von Geometrie und Anordnung des Messsystems in Kapitel 3, der magnetischen Struktur in Kapitel 4 sowie des Streufeldes in Kapitel 5 behandelt dieses Kapitel Grundlagen der Vermessung magnetischer Maßverkörperungen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Messgrößen, Bezugssysteme und sensorunabhängigen Größen der Ermittlung und Auswertung.

6.1 Messgegenstand

Die **magnetische Struktur** nach Kapitel 4 wird in der Praxis typischerweise **nicht vermessen**. Die experimentelle Ermittlung des Zonenmusters ist nur mit speziellen Verfahren und hohem messtechnischen Aufwand möglich. Auch das Polmuster ist nicht unmittelbar zugänglich, da es die Normalkomponente des Streufeldes direkt an der physischen Oberfläche der Maßverkörperung bei $n = 0$ beschreibt, was den Einsatz realer Magnetfeldsensoren mit endlichen Abmessungen verhindert.

Die magnetische Vermessung von Maßverkörperungen beschränkt sich im Allgemeinen auf die **Erfassung und Auswertung ihres Streufeldes** in einer endlichen Messhöhe. Dazu werden Magnetfeldsensoren in entsprechenden Ermittlungsbereichen bewegt. Für Weg- und Winkelmesssysteme handelt es sich dabei meist um p-Messpfade und p-o-Messflächen bei Messhöhen, die in der Größenordnung einer halben bis wenigen Pollängen liegen. Bei diesen Messhöhen ist die Feldamplitude typischerweise noch ausreichend groß für die Sensorik, während höhere räumliche Harmonische der betrachteten Feldkomponente bereits weniger ausgeprägt sind.

Unmittelbar **experimentell erfasst** werden die Komponenten des Magnetfeldes. Aus den resultierenden Feldverläufen können Feldmerkmale wie Nullstellen, Peaks, Amplituden- und Nutzbereichsgrenzen, Halbwellen, magnetische Perioden sowie weitere Eigenschaften des Streufeldes abgeleitet werden.

Die ermittelten Feldgrößen sind stets gemeinsam mit den zugehörigen **Ermittlungsbedingungen** anzugeben. Dazu zählen insbesondere die betrachtete Feldkomponente oder Feldamplitude, die Messhöhe, Lage und Orientierung des Ermittlungsbereichs sowie gegebenenfalls der verwendete Amplitudengrenzwert. Eigenschaften des eingesetzten Prüfsystems können das Messergebnis zusätzlich beeinflussen, sind jedoch nicht Gegenstand der in diesem Kapitel diskutierten sensorunabhängigen Ermittlungs- und Auswerteprozeduren.

> **Hinweis 6.1**
>
> *Die experimentell ermittelten Größen beziehen sich auf das Streufeld nach Kapitel 5 und sind von den Strukturgrößen nach Kapitel 4 zu unterscheiden. Eine **begriffliche Zuordnung** wird in Kapitel 6.5 behandelt.*

6.2 Mechanischer Bezug

Für die eindeutige Beschreibung der Lage magnetischer Strukturen und Feldmerkmale gegenüber der Bauteilgeometrie ist ein reproduzierbarer **mechanischer Bezug** erforderlich. Dieser wird durch ein mechanisches Datumssystem der Maßverkörperung festgelegt.

Das **Datumssystem** wird nach ISO 5459 (International Organization for Standardization 2024) aus geometrischen Merkmalen der Maßverkörperung abgeleitet, beispielsweise aus Flächen oder anderen geeigneten geometrischen Elementen. Es beschreibt damit die mechanische Lage und Orientierung der Maßverkörperung unabhängig von ihren magnetischen Eigenschaften. Die Wahl des Datumssystems sollte sich nach den für Herstellung, Montage und Vermessung relevanten geometrischen Bezugsmerkmalen richten.

Der **Koordinatenursprung** der Maßverkörperung O_M wird aus diesem Datumssystem abgeleitet. Gemeinsam mit der Orientierung der Koordinatenrichtungen nach Kapitel 3.3 können damit die magnetische Struktur und das Streufeld auf die experimentell ermittelte Bauteilgeometrie bezogen werden.

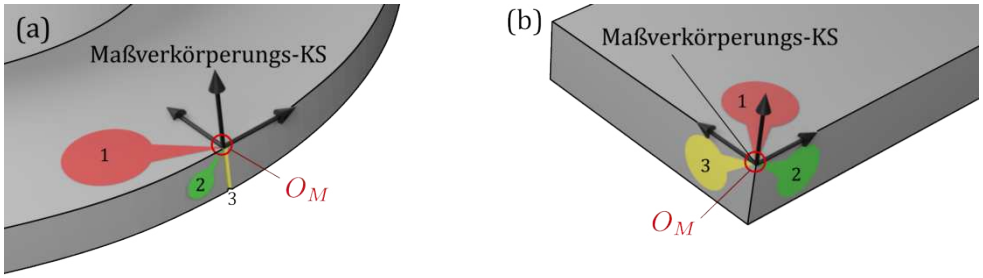


Abbildung 6.1: Mechanischer Bezug

Abbildung 6.1 zeigt zwei Beispiele zur Ableitung des Koordinatenursprungs O_M aus geometrischen Datumssystemen. Teilbild (a) zeigt eine rotationssymmetrische Maßverkörperung, deren Datumssystem durch die Oberseite (rot), die Mantelfläche (grün) und eine Markierung auf der Mantelfläche (gelb) festgelegt ist. Teilbild (b) zeigt eine quaderförmige Maßverkörperung, bei der das Datumssystem aus drei orthogonalen Seitenflächen abgeleitet wird. Die Datumselemente können beispielsweise mit taktilen oder optischen Messverfahren ermittelt werden. Die farbliche Hervorhebung in der Abbildung dient ausschließlich ihrer besseren Unterscheidbarkeit.

6.3 Magneto-mechanischer Bezug und Feld-KS

Die **Vermessung des Streufeldes** erfolgt grundsätzlich in Bezug auf die Geometrie und Lage der Maßverkörperung. Die Beschreibung der Ermittlungsbereiche für die Vermessung kann auf das Maßverkörperungs-KS bezogen werden, für das ein mechanischer Bezug nach Kapitel 6.2 besteht. Ein Struktur-KS ist hierfür nicht geeignet, da dessen Lage aus Strukturgrößen abgeleitet wird, die nicht unmittelbar vermessen werden können.

Die genaue Herstellung des mechanischen Bezugs sowie die präzise Sensorpositionierung relativ zur Maßverkörperung können jedoch mit hohem Aufwand verbunden sein. Gleichzeitig ist für viele Anwendungen die absolute Lage der Feldmerkmale gegenüber der Bauteilgeometrie von geringerer Bedeutung als ihre **präzise relative Lage** zueinander.

Für die Vermessung empfiehlt es sich deshalb, ein **Feld-KS** zu verwenden, dessen Ursprung O_F anhand ausgewählter Feldmerkmale festgelegt wird. Die Koordinatenrichtungen des Feld-KS entsprechen den lokalen p-, o- und n-Richtungen des Maßverkörperungs-KS. Gemeinsam mit den Richtungsvektoren $\vec{e}_p$, $\vec{e}_o$ und $\vec{e}_n$ definiert O_F das Feld-KS.

Das Feld-KS ermöglicht eine Beschreibung der Feldmerkmale, die unmittelbar **aus der Vermessung ableitbar** ist. Es berücksichtigt besonders die anwendungsrelevanten relativen Lagen der Feldmerkmale und erleichtert den Vergleich gleichartiger Maßverkörperungen.

Ist das Feld-KS einem Spurfeld zugeordnet, wird es als **Spurfeld-KS** bezeichnet. Besitzt ein magnetischer Maßstab mehrere Spuren, sollte jedem Spurfeld ein eigenes Spurfeld-KS zugeordnet werden. Besitzt eine

Spur mehrere voneinander getrennte Nutzbereiche, werden diese in einem gemeinsamen Spurfeld-KS beschrieben.

Als **Referenzlagen für den Ursprung** O_F werden typischerweise in p-Richtung die Nullstelle 1 und in o-Richtung die Mitte des zugehörigen Nutzbereichs verwendet. In n-Richtung wird O_F üblicherweise auf die funktionale Oberfläche der Maßverkörperung gelegt.

Die Lage von O_F im Maßverkörperungs-KS bildet den **magneto-mechanischen Bezug**, der das vermessene Streufeld mit der Bauteilgeometrie in Bezug setzt. Für die praktische Ermittlung sollte die ungefähre Lage von O_F durch mechanische Merkmale, beispielsweise Bauteilkanten oder Markierungen, bekannt sein. Die genaue Lage kann anschließend durch Vermessung des Streufeldes in deren Umgebung bestimmt werden.

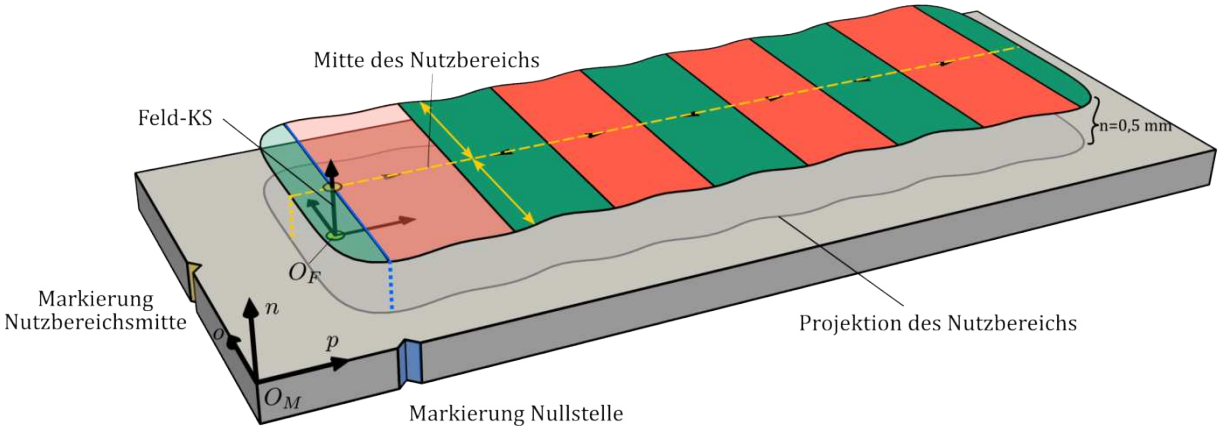


Abbildung 6.2: Magneto-mechanischer Bezug und Feld-KS

Abbildung 6.2 veranschaulicht den magneto-mechanischen Bezug und die Ermittlung eines Feld-KS. Dargestellt sind die Maßverkörperung aus Kapitel 5.2 und darüber liegend eine binäre Felddarstellung der IP-Komponente des Streufeldes, das auf einer p-o-Messfläche bei einer Messhöhe von $n = 0{,}5\,\text{mm}$ ermittelt wurde. Die Felddarstellung ist dabei auf den durch den Amplitudengrenzwert $B_G = 15\,\text{mT}$ festgelegten Nutzbereich beschränkt.

In der Abbildung ist der Ursprung des Feld-KS in p-Richtung durch die erste Nullstelle (blau), in o-Richtung durch die Mitte des Nutzbereichs (gelb) und in n-Richtung durch die funktionale Oberfläche der Maßverkörperung festgelegt. Markierungen an der Seite der Maßverkörperung zeigen die ungefähre Lage der ersten Nullstelle und der Mitte des Nutzbereichs an. Zur besseren Sichtbarkeit des Koordinatenkreuzes des Feld-KS, das auf der funktionalen Oberfläche der Maßverkörperung liegt, sind die ersten beiden Halbwellen der Felddarstellung transparent ausgeführt.

Hinweis 6.2

*Das **Feld-KS** ist grundsätzlich gleich aufgebaut wie das **Struktur-KS** nach Kapitel 4.6. Sie unterscheiden sich in der Festlegung des Ursprungs und in ihrem Verwendungszweck. Der Ursprung O_T wird anhand der magnetischen Strukturmerkmale festgelegt. Das Struktur-KS dient der Beschreibung der magnetischen Struktur einer Maßverkörperung. Der Ursprung O_F wird dagegen anhand von Feldmerkmalen festgelegt. Das Feld-KS dient der Vermessung des Streufeldes.*

6.4 Spurfeldlage und -abmessungen

Bei mehrspurigen Maßstäben werden die nachfolgend beschriebenen Spurfeldgrößen aus den dem jeweiligen Spurfeld zugeordneten Bereichen des gemessenen Gesamtfeldes bestimmt.

Um mehrere Spurfelder räumlich zueinander in Bezug zu setzen, wird die **Spurfeldlage** $\vec{r}_F^{(i)}$ als Lage des Ursprungs $O_F^{(i)}$ des i-ten Spurfeld-KS im Maßverkörperungs-KS festgelegt. Ihre Koordinaten sind $p_F^{(i)}$, $o_F^{(i)}$ und $n_F^{(i)}$. Da $O_F^{(i)}$ auf der funktionalen Oberfläche liegt, gilt $n_F^{(i)} = 0$.

Die relative Lage zweier Spurfelder wird durch ihre Versätze beschrieben. Als **Spurfeld-Längsversatz** p_{FF}, auch **Spurfeld-*p*-Versatz**, wird der Versatz in p-Richtung bezeichnet. Es gilt

$$p_{FF}^{(i_1,i_2)} = p_F^{(i_2)} - p_F^{(i_1)}.$$

Der **Spurfeld-Querversatz** o_{FF}, auch **Spurfeld-*o*-Versatz**, bezeichnet entsprechend den Versatz in o-Richtung,

$$o_{FF}^{(i_1,i_2)} = o_F^{(i_2)} - o_F^{(i_1)}.$$

Da sich ein Versatz auf zwei Spurfelder bezieht, wird nach Indexkonvention in Kapitel 3.5 das Kürzel „FF“ für den Bezugsindex verwendet.

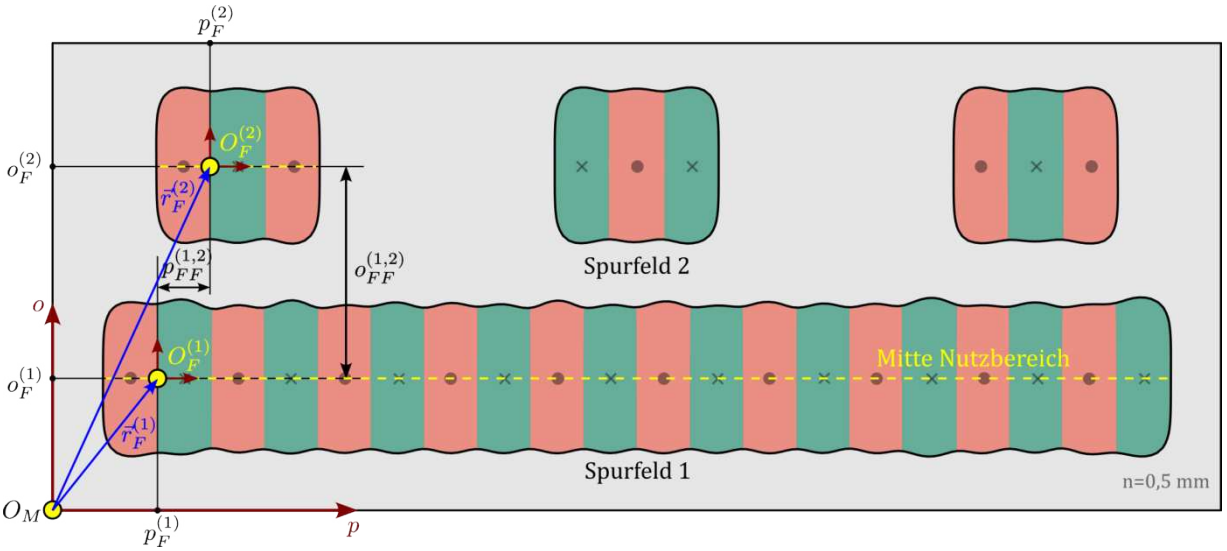


Abbildung 6.3: Spurfeldlage

Abbildung 6.3 zeigt den in Abbildung 5.12 dargestellten magnetischen Maßstab in Aufsicht. Die Nutzbereiche bei einer Messhöhe von $n = 0{,}5\,\text{mm}$ sind auf die funktionale Oberfläche des Maßstabs projiziert. Innerhalb der Nutzbereiche ist die B_n-Komponente des Magnetfeldes in binärer Darstellung wiedergegeben.

Für jede Spur ist ein zugehöriges Spurfeld-KS eingezeichnet. Die Ursprünge $O_F^{(1)}$ und $O_F^{(2)}$ werden im Maßverkörperungs-KS durch die blau eingezeichneten Spurfeldlagen $\vec{r}_F^{(1)}$ und $\vec{r}_F^{(2)}$ beschrieben. Im dargestellten Beispiel werden ihre Lagen in p-Richtung durch die jeweils erste Nullstelle und in o-Richtung durch die Mitte des zugehörigen Nutzbereichs (gelb) festgelegt.

Die **Abmessungen eines Spurfeldes** werden aus den Abmessungen seiner Nutzbereiche abgeleitet. Dabei ist in p-Richtung nicht die gesamte räumliche Ausdehnung eines Nutzbereichs maßgebend, sondern nur der Bereich, in dem für die jeweilige Anwendung ein nutzbares Spurfeld erforderlich ist.

Dazu werden entlang einer Spur ein oder mehrere **Betriebsabschnitte** festgelegt. Sie bezeichnen zusammenhängende Bereiche in p-Richtung, innerhalb derer das Spurfeld bewertet wird. Die Ermittlung der Spurfeldabmessungen erfolgt ausschließlich innerhalb dieser Betriebsabschnitte.

Die **Spurfeldbreite** w_F ergibt sich aus der Breite eines gemeinsamen Nutzbereichs, der sich über sämtliche Betriebsabschnitte einer Spur erstreckt. Die für den magneto-mechanischen Bezug genutzte **Mitte des Nutzbereichs** ergibt sich aus der Mitte dieses gemeinsamen Bereichs. Eine entsprechende Spurfeldlänge wird nicht definiert, da die relevante Ausdehnung in p-Richtung bereits durch die Betriebsabschnitte festgelegt ist.

Der sich aus den Spurfeldbreiten und dem Spurfeld-Querversatz ergebende Abstand zwischen zwei benachbarten, räumlich getrennten Spurfeldern wird als **Spurfeldabstand** w_{FF} bezeichnet. Es gilt:

$$w_{FF}^{(i_1,i_2)} = \left| o_{FF}^{(i_1,i_2)} \right| - \frac{w_F^{(i_1)} + w_F^{(i_2)}}{2}$$

Die folgende Abbildung 6.4 zeigt den magnetischen Maßstab aus Abbildung 6.3 in Aufsicht. Zusätzlich wurde ein Materialdefekt simuliert, der im ausgewiesenen Bereich zu einer Verringerung der Polarisation auf $80\,\%$ ihres ursprünglichen Wertes führt.

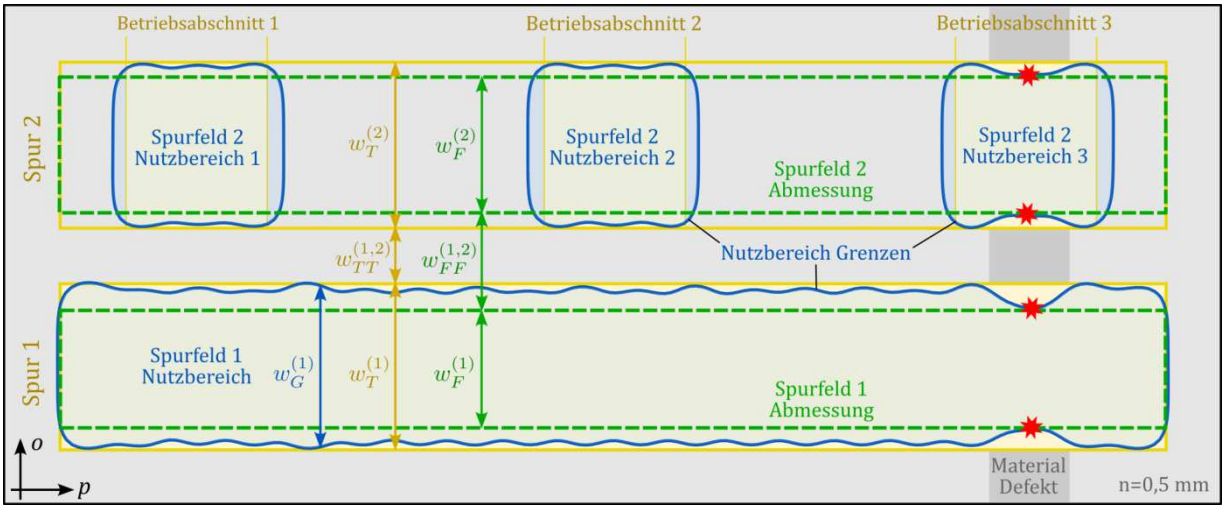


Abbildung 6.4: Spurbreite und Spurfeldbreite

In der Abbildung sind die Nutzbereiche bei einer Messhöhe von $n = 0{,}5\,\text{mm}$ auf die funktionale Oberfläche des Maßstabs projiziert und blau dargestellt. Die darunterliegenden Spuren sind gelb umrandet; ihre Betriebsabschnitte sind gelb ausgefüllt.

Die Spurfeldbreite ergibt sich aus der minimalen Breite des Gesamtnutzbereichs aller Betriebsabschnitte. Die Positionen, an denen diese Mindestbreiten auftreten, sind durch rote Sterne markiert. Die sich daraus ergebenden feldbezogenen Spurabmessungen sind grün strichliert umrandet. Breiten und Abstände von Nutzbereich (lokal), Spur und Spurfeld sind entsprechend eingezeichnet.

Tabelle 6.1: Begriffe Spurfeld

Begriff	Symbol	Beschreibung
Spurfeldlage	$\vec{r}_F^{(i)}$	Lage des Ursprungs des Spurfeld-KS i im Maßverkörperungs-KS
Spurfeld-Längsversatz, **Spurfeld-p-Versatz**	$p_{FF}^{(i_1,i_2)}$	Versatz in p-Richtung vom Spurfeld i_1 zum Spurfeld i_2
Spurfeld-Querversatz, **Spurfeld-o-Versatz**	$o_{FF}^{(i_1,i_2)}$	Versatz in o-Richtung vom Spurfeld i_1 zum Spurfeld i_2
Spurfeldbreite	$w_F^{(i)}$	Minimale Breite des Gesamtnutzbereichs aller Betriebsabschnitte des Spurfeldes i
Spurfeldabstand	$w_{FF}^{(i,i+1)}$	Abstand in o-Richtung zwischen benachbarten Spurfeldern

6.5 Strukturbegriffe und Feldgrößen

Experimentell ermittelte magnetische Größen beziehen sich auf das Streufeld nach Kapitel 5 und sind von den in Kapitel 4 eingeführten Strukturgrößen der Maßverkörperung zu unterscheiden. In der Praxis werden beide Begriffsebenen aufgrund ihrer engen physikalischen Zusammenhänge jedoch häufig miteinander vermischt. Dies kann zu **Missverständnissen** führen und insbesondere dazu, dass die für feldbezogene Größen wesentlichen Ermittlungsbedingungen nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Hinweis 6.3

*Für eine **eindeutige Kommunikation** wird empfohlen, Strukturbegriffe und Feldgrößen in endlicher Messhöhe konsequent voneinander zu unterscheiden.*

Die Felddarstellung nach Kapitel 5.5 unterstützt die Trennung der Begriffsebenen, indem in Abbildungen die Messhöhe angegeben wird und für Feldkomponenten unterschiedliche Richtungssymbole eingesetzt werden.

Der Begriff **Magnetpol** bezieht sich in diesem Dokument ausschließlich auf Bereiche an der physischen Oberfläche der Maßverkörperung und die Normalkomponente des Streufeldes. In der Praxis wird er häufig auch zur Beschreibung von Feldmerkmalen von OOP- und IP-Komponenten in endlicher Messhöhe verwendet.

Tabelle 6.2: Begriffsklärung zu Magnetpol

Begriff Alt	Empfehlung für feldbezogene Größen in endlicher Messhöhe
Magnetpol	Zur Beschreibung von OOP- und IP-Feldkomponenten in endlicher Messhöhe wird der Begriff **Halbwelle** nach Kapitel 5.4 empfohlen.
Pollänge	Zur Beschreibung der Länge einer Halbwelle wird der Begriff **Halbperiode** nach Kapitel 5.3 empfohlen.
Polbreite	Zur Beschreibung der Breite einer Halbwelle bzw. eines Nutzbereichs werden **Nutzbreite einer Halbwelle** bzw. **Nutzbereichsbreite** nach Kapitel 5.3 und Kapitel 5.4 empfohlen.
Pollage	Zur Beschreibung der Lage einer Nullstelle in endlicher Messhöhe wird der Begriff **Nullstellenlage** nach Kapitel 5.3 empfohlen.

Der Begriff **Spur** bezeichnet in diesem Dokument ausschließlich ein Strukturelement der Maßverkörperung. In der Praxis werden dessen Lage und Abmessungen häufig mit Lage und Abmessungen des zugehörigen Spurfeldes gleichgesetzt. In diesem Fall ermöglicht die symmetrische Benennung der struktur- und feldbezogenen Größen eine einfache Zuordnung.

Tabelle 6.3: Begriffsklärung zu Spur

Begriff Alt	Empfehlung für feldbezogene Größen in endlicher Messhöhe
Spur	Zur Beschreibung des Streufeldes wird der Begriff **Spurfeld** nach Kapitel 5.6 empfohlen.
Spurbreite	Zur Beschreibung der Breite des Spurfeldes wird der Begriff **Spurfeldbreite** nach Kapitel 6.4 empfohlen.
Spurlage	Zur Beschreibung der Lage des Spurfeldes wird der Begriff **Spurfeldlage** nach Kapitel 6.4 empfohlen.
Spurversatz	Zur Beschreibung eines Versatzes zwischen Spurfeldern wird der Begriff **Spurfeldversatz** nach Kapitel 6.4 empfohlen.
Spurabstand	Zur Beschreibung des Abstands zwischen Spurfeldern wird der Begriff **Spurfeldabstand** nach Kapitel 6.4 empfohlen.

7 Einteilung magnetischer Maßverkörperungen

Dieses Kapitel führt eine systematische Einteilung magnetischer Maßverkörperungen nach struktureller Komplexität, geometrischer Anordnung und magnetischer Ausprägung ein. Sie erfasst typische praxisrelevante Ausführungsformen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Es handelt sich um eine Weiterentwicklung der in DIN SPEC 91411 (Innomag 2022) vorgeschlagenen Einteilung.

7.1 Grundlegende Einteilung und Kurznotation

Die Einteilung magnetischer Maßverkörperungen erfolgt auf mehreren Beschreibungsebenen. Auf der **ersten Ebene** werden sie anhand ihrer strukturellen Komplexität in drei **Arten** eingeteilt: Dipolmagnete, Multipolmagnete und magnetische Maßstäbe.

Auf der **zweiten Ebene** wird die geometrische **Form** der Maßverkörperung beschrieben. Hierzu werden die Begrenzungsbox-Geometrien nach Kapitel 4.6 verwendet.

Auf der **dritten Ebene** wird die geometrische **Anordnung** der magnetischen Struktur beschrieben. Bei magnetischen Maßstäben entspricht diese der Spurausrichtung, bei Multipolmagneten der Anordnung der Zonen beziehungsweise Pole.

Auf der **vierten Ebene** wird die **magnetische Ausprägung** der Maßverkörperung beschrieben. Zonenbezogen erfolgt dies über Zonenmuster, beispielsweise über die Polarisationsrichtung eines Dipolmagneten oder die Polarisationsart einer Spur. Feldbezogen erfolgt die Beschreibung über das Polmuster oder die Ausprägung der Halbwellen.

Auf der **fünften Ebene** wird die Beschreibung weiter spezifiziert und **quantifiziert**. Bei Multipolmagneten wird je nach gewählter Repräsentation die Anzahl der Zonen oder Pole angegeben. Bei magnetischen Maßstäben werden Spurtypen sowie gegebenenfalls die Anzahl der Zonen, Pole, Halbwellen oder Referenzlagen angegeben.

Zur kompakten Kennzeichnung wird eine **Kurznotation** eingeführt. Sie fasst die wesentlichen Merkmale in der Reihenfolge der Einteilungsebenen zusammen. Zunächst werden die Angaben zu Art, Form und geometrischer Anordnung aufgeführt. Anschließend wird die magnetische Ausprägung angegeben, bei zonenbezogener Beschreibung in eckigen Klammern und bei feldbezogener Beschreibung in runden Klammern. Abschließend werden weiterführende Spezifikation und Quantifizierung angehängt. Sind innerhalb einer Einteilungsebene mehrere Angaben erforderlich, beispielsweise bei mehreren Spuren, werden diese durch einen Doppelpunkt getrennt. Beispiele sind in Abbildung 7.1 gezeigt.

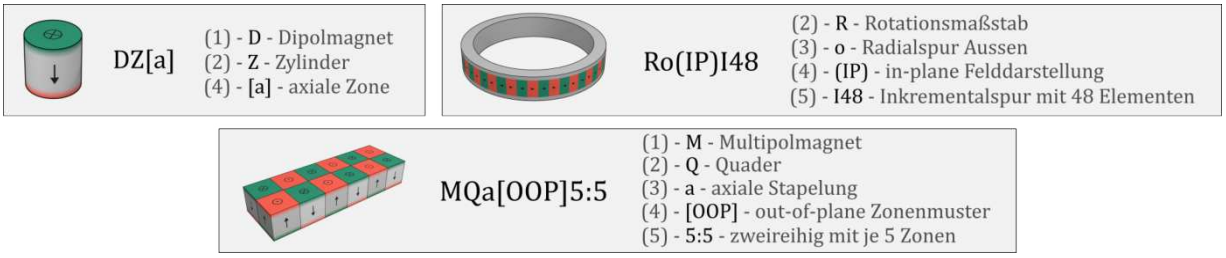


Abbildung 7.1: Kurznotation zur Einteilung

Die Einteilung in fünf Ebenen bezieht sich auf die **Repräsentation einer Maßverkörperung**. Insbesondere auf der vierten Ebene kann dieselbe Maßverkörperung je nach Zweck zonenbezogen über ein Zonenmuster oder feldbezogen über ein Polmuster beziehungsweise die Ausprägung der Halbwellen beschrieben werden. Beispielsweise können Ra[OOP]48 und Ra(IP)48 dieselbe Maßverkörperung einmal in zonenbezogener und einmal in feldbezogener Repräsentation bezeichnen.

Das Einteilungssystem ist in der **Taxonomie magnetischer Maßverkörperungen** in Abbildung 7.14 übersichtlich dargestellt. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Einteilungsebenen für jede der drei Hauptgruppen im Detail.

7.2 Dipolmagnete

Dipolmagnete „D“ sind magnetische Maßverkörperungen, deren Polarisation durch eine einzelne magnetisierte Zone beschrieben werden kann. Im Außenraum wird das Magnetfeld typischerweise durch den Dipolanteil dominiert. Sie stellen damit hinsichtlich ihrer magnetischen Struktur die einfachste Art dar.

Auf der **zweiten Einteilungsebene** werden Dipolmagnete anhand ihrer geometrischen **Form** unterschieden. Die gängigste Ausführung ist der Quader „Q“. Abhängig vom Verhältnis seiner Kantenlängen werden quaderförmige Magnete häufig auch als Würfel-, Platten- oder Stabmagnete bezeichnet. Weitere verbreitete Formen sind Zylinder „Z“, Ringe „R“, Ringsegmente „S“ und Trapezprismen „T“. Trapezprismen werden insbesondere als Einzelmagnete zum Aufbau zusammengesetzter magnetischer Strukturen, beispielsweise von Halbach-Anordnungen, eingesetzt.

Die **dritte** und die **fünfte Einteilungsebene** entfallen bei Dipolmagneten, da sie nur aus einer einzelnen Zone bestehen.

Die magnetische Ausprägung auf der **vierten Einteilungsebene** wird durch die **Polarisationsrichtung** in eckiger Klammer beschrieben. Quaderförmige Dipolmagnete sind typischerweise entlang einer ihrer Hauptachsen axial polarisiert „a“. Bei Zylindern und Ringen werden insbesondere axiale „a“, diametrale „d“ und radiale „r“ Polarisation unterschieden. Axiale Polarisation verläuft parallel zur Zylinderachse, diametrale Polarisation senkrecht dazu und radiale Polarisation in radialer Richtung. Freie Polarisationsrichtungen „f“ werden angegeben, wenn die Polarisation keiner der definierten Standardrichtungen entspricht.

Abbildung 7.2 zeigt typische Beispiele der hier beschriebenen Ausführungen, großteils in der farbcodierten Zonendarstellung.

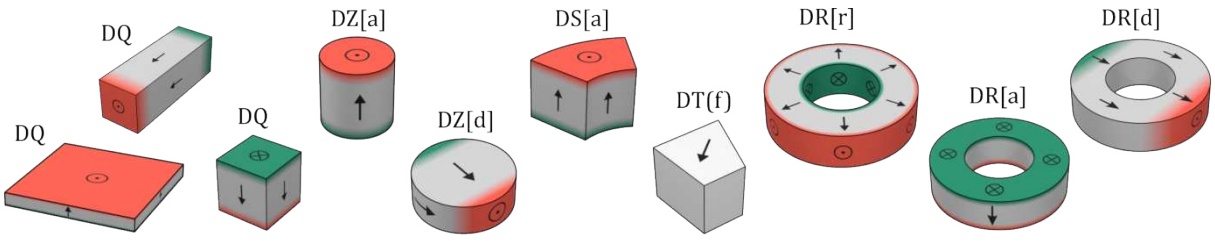


Abbildung 7.2: Beispielhafte Dipolmagnete

7.3 Multipolmagnete

Multipolmagnete „M“ sind magnetische Maßverkörperungen, die aus mehreren Zonen bestehen. Im Unterschied zu magnetischen Maßstäben ist ihre magnetische Struktur weniger komplex und nicht in magnetische Spuren gegliedert.

Auf der **zweiten Einteilungsebene** wird ihre geometrische **Form** beschrieben. Analog zu Dipolmagneten werden insbesondere Quader „Q“, Zylinder „Z“, Ringe „R“, Ringsegmente „S“ und Trapezprismen „T“ unterschieden. Entspricht die Form der Maßverkörperung wegen komplexer Zusammensetzung keiner der hier beschriebenen Formen, kann alternativ die Zonenform herangezogen werden, siehe MTs[h]8 in Abbildung 7.3.

Auf der **dritten Einteilungsebene** wird die geometrische **Anordnung** der Zonen oder Pole beschrieben. Sie können geradlinig beziehungsweise axial „a“ oder sektoral beziehungsweise kreisförmig „s“ angeordnet sein. Darüber hinaus wird zwischen einreihigen und mehrreihigen Anordnungen unterschieden.

Die **magnetische Ausprägung** von Multipolmagneten wird auf der **vierten Einteilungsebene** zonenbezogen in eckigen Klammern und feldbezogen in runden Klammern angegeben. In der feldbezogenen Einteilung werden Out-of-Plane „OOP“ und In-Plane „IP“ unterschieden; in der zonenbezogenen Einteilung sind zusätzlich Halbach-Anordnungen „h“ möglich. Bei rotationssymmetrischen Maßverkörperungen können alternativ in beiden Fällen die Bezeichnungen axial „a“, diametral „d“ und radial „r“ verwendet werden, die jeweils die entsprechende Ausrichtung des magnetischen Musters beschreiben. Anordnungen, die keiner dieser Klassen zugeordnet werden können, werden als frei „f“ gekennzeichnet.

Auf der **fünften Einteilungsebene** wird die Struktur durch die **Anzahl der Elemente** weiter spezifiziert. Je nach gewählter Repräsentation kann es sich dabei um Zonen oder Pole handeln. Bei mehrreihigen Anordnungen wird sie für jede Reihe getrennt angegeben.

Abbildung 7.3 zeigt typische Beispiele der hier beschriebenen Ausführungen in Zonen- und Poldarstellungen.

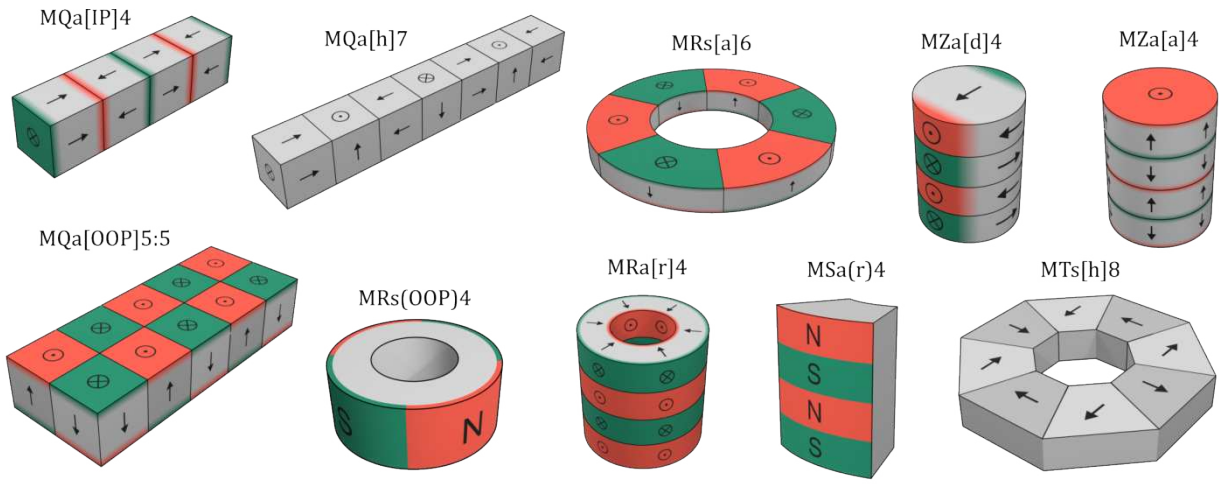


Abbildung 7.3: Beispielhafte Multipolmagnete

7.4 Magnetische Maßstäbe

Magnetische Maßstäbe sind Maßverkörperungen mit komplexer magnetischer Struktur, die in eine oder mehrere magnetische Spuren gegliedert ist. Auf **zweiter Ebene** unterscheidet man Linearmaßstäbe „L“ und Rotationsmaßstäbe „R“. Auf **dritter Ebene** werden Rotationsmaßstäbe in Maßstäbe mit innenliegenden Radialspuren „i“, außenliegenden Radialspuren „o“ und Axialspuren „a“ eingeteilt.

Die Beschreibung der **magnetischen Ausprägung** auf der **vierten Einteilungsebene** erfolgt entweder zonen- oder feldbezogen. Zonenbezogene Angaben werden durch eckige Klammern, feldbezogene Angaben durch runde Klammern gekennzeichnet. Die zonenbezogene Beschreibung erfolgt anhand des Zonenmusters. Typische Anordnungen sind In-Plane „IP“, Out-of-Plane „OOP“ und Halbach „h“. Die feldbezogene

Beschreibung erfolgt anhand des Polmusters oder der Halbwellen einer ausgewählten Streufeldkomponente. Dabei werden In-Plane-Komponenten „IP“ und Out-of-Plane-Komponenten „OOP“ unterschieden.

Auf der **fünften Einteilungsebene** wird die magnetische Struktur durch den **Spurtyp** sowie gegebenenfalls eine zugehörige Kenngröße gekennzeichnet, die die **Anzahl** der Elemente oder Referenzlagen angibt. Bei mehrspurigen Maßstäben werden die Angaben für die einzelnen Spuren durch Doppelpunkte getrennt angegeben.

Die **Spurtypen** beschreiben die magnetische Strukturierung einer Spur und dienen ihrer funktionalen Unterscheidung. Ein Spurtyp kann durch unterschiedliche Zonenmuster, beispielsweise IP, OOP oder Halbach, realisiert und sowohl zonen- als auch feldbezogen beschrieben werden. In den nachfolgend dargestellten schematischen Mustern werden Zonen, Pole und Halbwellen abstrahierend als Elemente bezeichnet; Richtungssymbole werden nicht verwendet. Im Zweifelsfall beziehen sich die dargestellten Elemente auf Halbwellen.

Inkrementalspuren „Ix“ bestehen aus x alternierenden Elementen gleicher Länge. Das daraus resultierende periodische Spurfeld ermöglicht die Erfassung relativer Lage-, Winkel- oder Geschwindigkeitsänderungen mit hoher Ortsauflösung. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.4 gezeigt.



Abbildung 7.4: Spurtypen – Inkrementalspur I24

Referenzspuren „Rx“ kennzeichnen x definierte Referenzlagen, beispielsweise Start- oder Endlagen. Eine Referenz wird typischerweise nicht durch ein einzelnes Element, sondern durch eine charakteristische Kombination mehrerer Elemente gebildet. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.5 gezeigt.



Abbildung 7.5: Spurtypen – Referenzspur R1

Eine Sonderform bilden **abstandscodierte Referenzspuren** „RCx“ mit x Referenzlagen. Die Lage wird dabei aus dem Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Referenzen bestimmt. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.6 gezeigt.



Abbildung 7.6: Spurtypen – Abstandscodierte Referenzspur RC3

Für bestimmte Anwendungen können Spuren mit variablen Elementlängen eingesetzt werden. Ein wichtiger Vertreter ist der **Pseudorandomcode** „P“, der beispielsweise auf einer Pseudozufalls-Binärfolge (pseudo-random binary sequence, PRBS) beruhen kann. Dabei handelt es sich um eine Codierung, aus der mit geeigneter Sensorik die absolute Lage bestimmt werden kann. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.7 gezeigt.

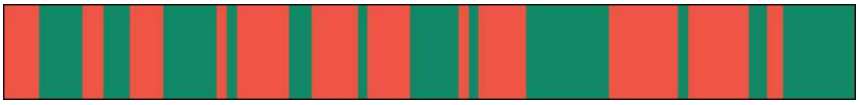


Abbildung 7.7: Spurtypen – Pseudorandomcode P

Die Bestimmung der Absolutlage ist auch mit **gedrehten Elementgrenzen** „V“ möglich. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.8 gezeigt.



Abbildung 7.8: Spurtypen – Gedrehte Grenzen V

Kombinationen mehrerer parallel verlaufender Spuren eröffnen weitere Anwendungsmöglichkeiten. Beispielsweise kann eine Inkrementalspur mit einer Referenzspur kombiniert werden, um einen definierten Bezugspunkt für die Zählung der Inkremente festzulegen. Nach dem Anfahren der Referenzlage kann daraus eine absolute Lage mit der hohen Genauigkeit der Inkrementalspur bestimmt werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.9 gezeigt.

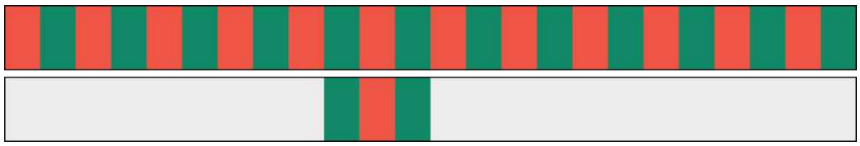


Abbildung 7.9: Spurtypen – Inkrementalspur mit Referenzspur I24:R1

Auch bei der Kombination einer Inkrementalspur mit einer abstandscodierten Referenzspur kann eine absolute Lage bestimmt werden. Dies ist gegenüber der Kombination mit einfacher Referenzspur bereits nach kürzerer Relativbewegung möglich. Ein entsprechendes Beispiel ist in Abbildung 7.10 gezeigt.

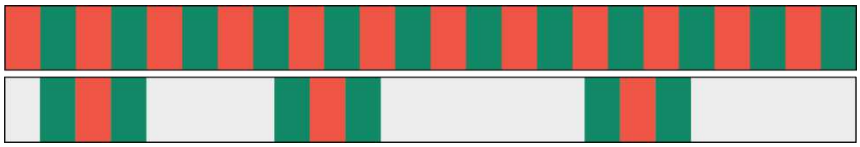


Abbildung 7.10: Spurtypen – Inkrementalspur mit abstandscodierter Referenzspur I24:RC3

Wenn zwei Inkrementalspuren nebeneinander angeordnet sind und sich ihre Elementanzahlen in einem definierten Verhältnis unterscheiden, kann aus dem Phasenbezug zwischen den beiden Spuren die Absolutlage bestimmt werden. Die Kombination wird häufig als **Noniusmuster** bezeichnet. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.11 gezeigt.

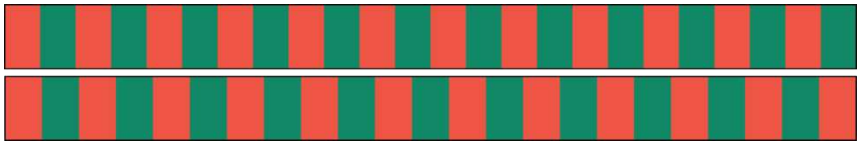


Abbildung 7.11: Spurtypen – Noniusmuster I23:I24

Mit einem Pseudorandomcode kann die absolute Lage direkt bestimmt werden. Die erreichbare Auflösung ist jedoch begrenzt. Durch die Kombination mit einer Inkrementalspur können Messauflösung und -genauigkeit erhöht werden. Dabei liefert die Pseudorandomcode-Spur die absolute Lage, während die Inkrementalspur zur höher aufgelösten Feinbestimmung und gegebenenfalls zur Korrektur verwendet wird. Ein Beispiel ist in Abbildung 7.12 gezeigt.

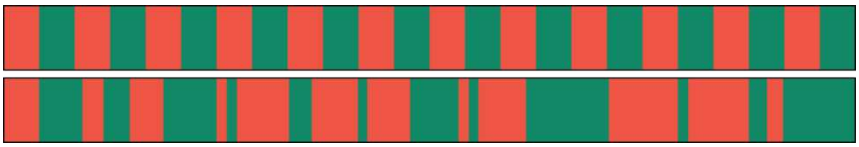


Abbildung 7.12: Spurtypen – Inkrementalspur mit Pseudorandomcode I24:P

Abbildung 7.13 zeigt Beispiele typischer magnetischer Maßstäbe mit der jeweils zugehörigen Kurznotation.

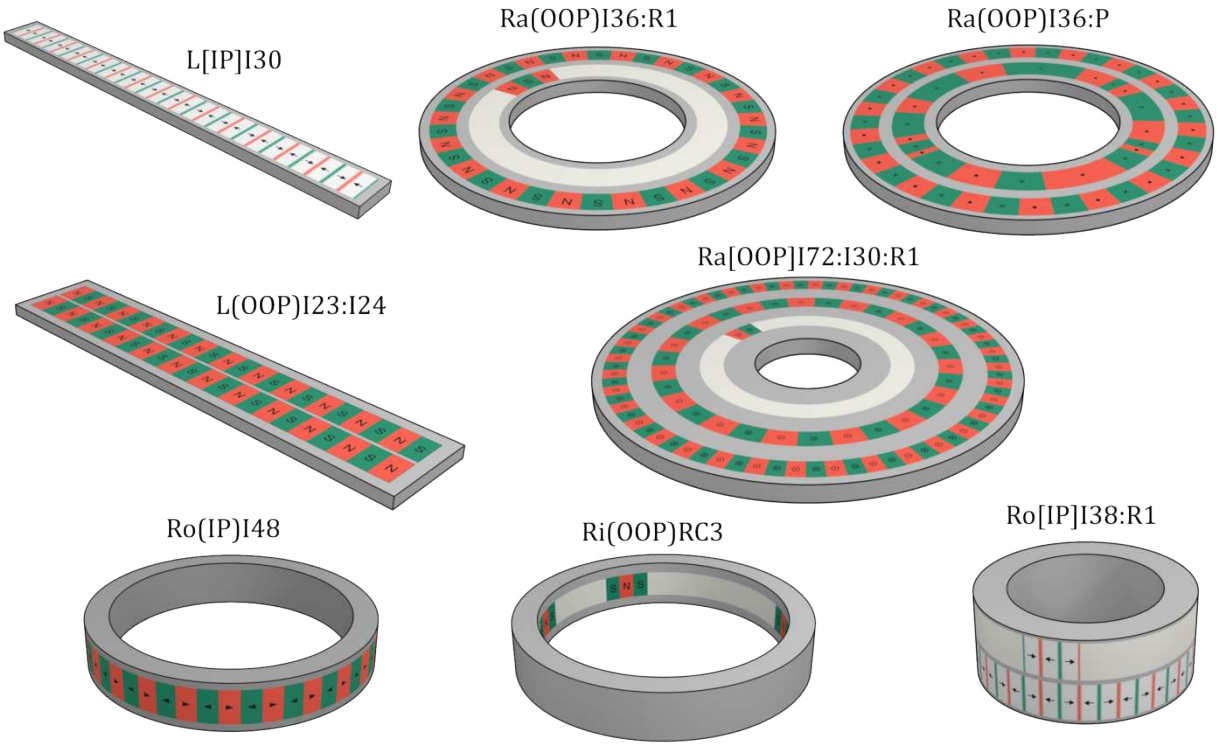


Abbildung 7.13: Beispielhafte magnetische Maßstäbe

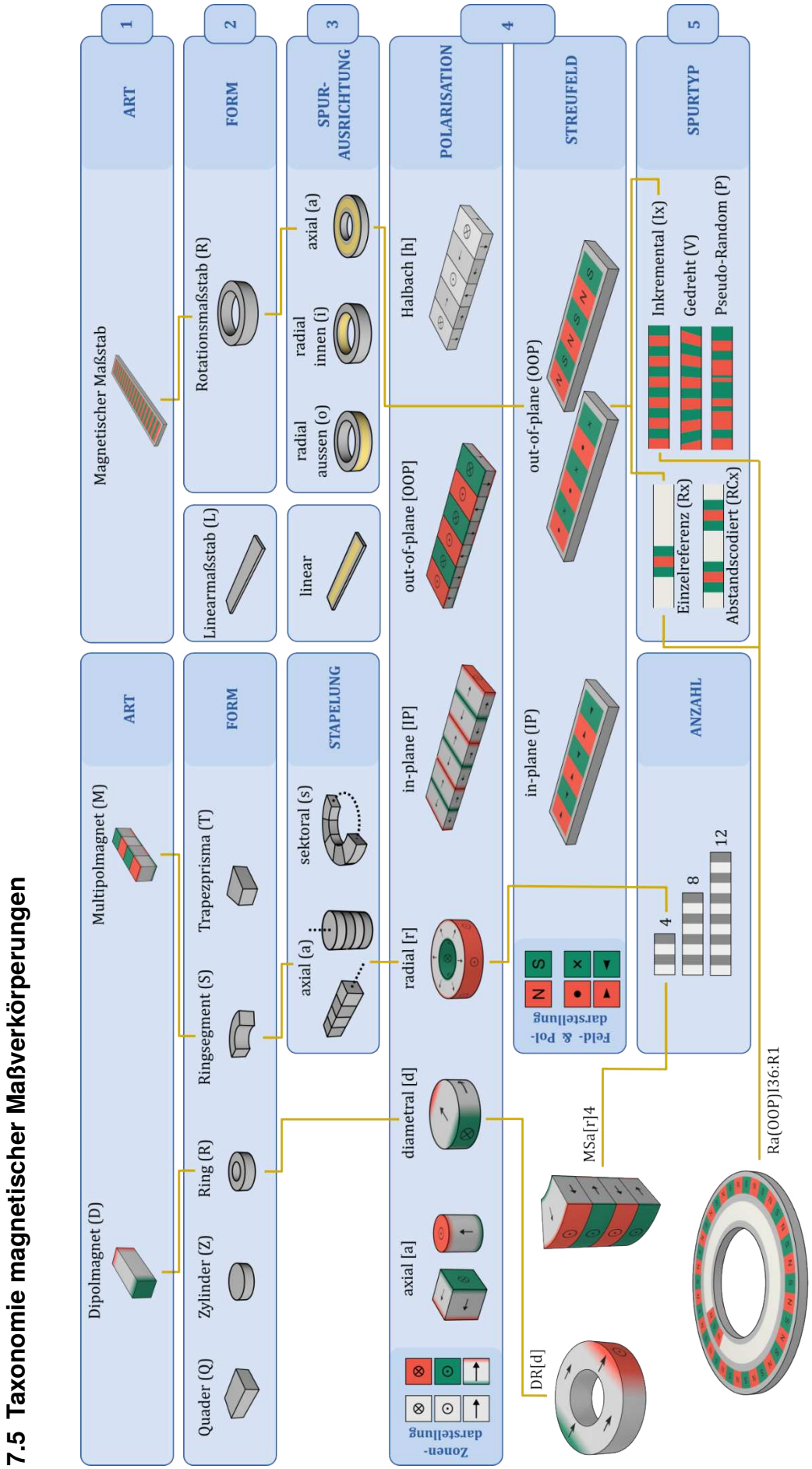


Abbildung 7.14: Taxonomie magnetischer Maßverkörperungen

8 Schnittstelle zur Sensorik

Der Sensor erfasst das von der Maßverkörperung erzeugte Streufeld und bildet damit die Schnittstelle zwischen Maßverkörperung und Messsystem. Seine konkrete technologische Ausführung ist nicht Gegenstand dieser Richtlinie. Im Folgenden werden jedoch die für die Beschreibung magnetischer Messsysteme erforderlichen sensorbezogenen Begriffe zum Aufbau des Sensormoduls, zur Erfassung des Streufeldes sowie zur Lagebeziehung zwischen Sensor und Maßverkörperung eingeführt.

8.1 Sensorart und -funktion

Magnetische Sensoren können nach der **Art der ausgegebenen Messgröße** unterschieden werden. Ein **Magnetfeldsensor** dient dazu, den Wert einer oder mehrerer Komponenten des Magnetfeldvektors ortsbezogen zu erfassen und als feldbezogene Ausgangsgröße bereitzustellen. Ein **magnetischer Positions- oder Winkelsensor** erfasst ebenfalls das Magnetfeld, verarbeitet dieses jedoch intern weiter und gibt als Ausgangsgröße unmittelbar eine Positions- oder Winkelinformation aus. Während der Magnetfeldsensor somit eine feldbezogene Messgröße liefert, stellt der magnetische Positions- oder Winkelsensor bereits eine anwendungsbezogene Ausgangsgröße bereit.

Unabhängig von der Art der Ausgangsgröße können Sensoren nach ihrer **Funktion** im jeweiligen Anwendungs- oder Prüfkontext unterschieden werden. Ein **Prüfsensor** bezeichnet dabei keine eigene Sensorart, sondern die Funktion eines Sensors, der zu Prüf-, Einstell- oder Charakterisierungszwecken eingesetzt wird; hierbei handelt es sich in der Regel um einen Magnetfeldsensor. Ein **Referenzsensor** dient der Bereitstellung eines Vergleichs- oder Bezugswertes. Ein **Betriebssensor** ist der im regulären Betrieb des Systems eingesetzte Sensor, dessen Ausgangssignal für die vorgesehene Funktion des Systems genutzt wird.

8.2 Aufbau des Sensormoduls

Ein **Sensormodul** ist eine funktionale Einheit zur Erfassung und Verarbeitung magnetischer Messgrößen. Es umfasst ein oder mehrere magnetisch sensitive Sensorelemente sowie gegebenenfalls weitere Komponenten für Versorgung, Signalaufbereitung, Datenverarbeitung und elektrische Anbindung.

Das **Sensorelement** bezeichnet das eigentliche Wandlerelement, das eine magnetische Messgröße erfasst und in eine elektrische Größe umwandelt. In einem Sensormodul können mehrere Sensorelemente räumlich unterschiedlich angeordnet sein und unterschiedliche Komponenten des Magnetfeldes erfassen.

Bei Sensoren in Halbleitertechnik sind ein oder mehrere Sensorelemente typischerweise auf einem **Sensorchip** integriert. Der Sensorchip kann zusammen mit elektrischen Kontaktierungen und weiteren Bauelementen in einem **Package** zusammengefasst sein. Das Package schützt den Chip und stellt insbesondere die mechanische und elektrische Schnittstelle zur weiteren Integration bereit.

Ein Package kann unmittelbar das äußere **Sensorgehäuse** bilden oder zusammen mit weiteren Komponenten in ein separates Sensorgehäuse integriert sein. Das vollständige Sensormodul kann darüber hinaus beispielsweise eine **Leiterplatte**, zusätzliche elektronische Bauelemente, Steckverbinder und mechanische Befestigungselemente umfassen.

Die genannten Integrationsebenen sind nicht bei allen Sensoren getrennt ausgeführt und stellen keine zwingende Aufbauhierarchie dar. Die Begriffe dienen der eindeutigen Bezeichnung der jeweils betrachteten funktionalen beziehungsweise konstruktiven Ebene.

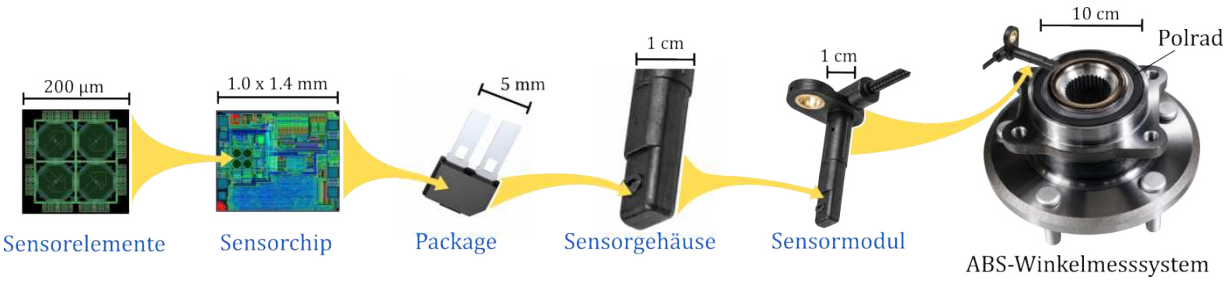


Abbildung 8.1: Beispielhafter Aufbau eines Sensormoduls[1]

Abbildung 8.1 zeigt beispielhaft den Aufbau eines Sensormoduls in Halbleitertechnik und veranschaulicht die Integrationsebenen vom Sensorelement über Sensorchip, Package und Sensorgehäuse bis zum Sensormodul.

8.3 Lagebeziehung des Sensors

Die in Kapitel 5.1 eingeführten Ermittlungsbereiche beschreiben die räumlichen Bereiche, in denen das Streufeld betrachtet beziehungsweise vermessen wird. In einem realen Messaufbau werden sie durch eine entsprechende Lagebeziehung zwischen Sensor und Maßverkörperung realisiert. In diesem Unterkapitel wird die hierfür erforderliche Terminologie eingeführt.

Als **Sensorreferenz** O_S wird ein zweckmäßiger Bezugspunkt für die Sensorelemente festgelegt. Er sollte die Lage der Sensorelemente möglichst repräsentativ beschreiben, beispielsweise in der geometrischen Mitte der Sensorelemente beziehungsweise des von ihnen eingenommenen sensitiven Bereichs. Mit der Sensorreferenz als Ursprung wird ein rechtshändiges **Sensor-KS** mit den Koordinatenrichtungen x, y und z definiert.

In diesem Bezugssystem werden Lage und geometrische Ausdehnung der Sensorelemente beschrieben. Das ermöglicht eine einheitliche geometrische Beschreibung der Sensorelemente, deren Ausführung stark von der eingesetzten Sensortechnologie abhängen kann.

Bei **nominaler Ausrichtung** des Sensors verlaufen die x-, y- und z-Richtung parallel zur lokalen p-, o- beziehungsweise n-Richtung des Maßverkörperungs-KS.

Die **Sensorlage** $\vec{r}_S$ bezeichnet die Lage der Sensorreferenz im Maßverkörperungs-KS. Sie wird durch die Koordinaten p_S, o_S und n_S beschrieben. Durch die Relativbewegung von Sensor und Maßverkörperung werden unter Berücksichtigung von Lage und geometrischer Ausdehnung der Sensorelemente die entsprechenden Ermittlungsbereiche erfasst.

Zur Beschreibung des **Abstands zwischen Sensor und Maßverkörperung** wird aufgrund des oft mehrschichtigen Aufbaus von Sensormodul und Maßverkörperung zwischen Luftspalt, Wirkabstand und Messhöhe unterschieden.

Der **Luftspalt** d_{mech} bezeichnet den freien mechanischen Abstand zwischen den einander zugewandten Oberflächen von Maßverkörperung und Sensorgehäuse. Er beschreibt damit eine konstruktive Größe des Messsystems.

[1] Quelle der Abbildungen: Infineon AG, Augustin Group GmbH und mit freundlicher Genehmigung von U. Ausserlechner; redaktionelle Aufbereitung durch Autoren.

Der **Wirkabstand** d_{mag} bezeichnet den Abstand in lokaler n-Richtung zwischen der sensorzugewandten Begrenzung der Zonenstruktur und der Sensorreferenz. Im Gegensatz zum Luftspalt beschreibt er die Distanz zwischen der Oberseite der magnetisch wirksamen Struktur und den Sensorelementen, unabhängig von dazwischenliegenden magnetisch inaktiven Elementen wie Schutzabdeckungen und Packages.

Die **Messhöhe** n bezeichnet die n-Koordinate im Maßverkörperungs-KS und damit den Abstand von der funktionalen Oberfläche. Die Messhöhe der Sensorreferenz entspricht dem Wirkabstand,

wenn die Begrenzung der Zonenstruktur mit der funktionalen Oberfläche zusammenfällt, was beispielsweise bei Maßverkörperungen mit Schutzabdeckungen nicht gegeben ist.

Die **Sensororientierung** bezeichnet die Orientierung des Sensor-KS relativ zum lokalen Maßverkörperungs-KS an der Sensorlage. Bei nominaler Ausrichtung stimmen die entsprechenden Koordinatenrichtungen beider Koordinatensysteme überein.

Abweichungen von der nominalen Ausrichtung werden durch die **Sensordrehwinkel** α (Rotation um $\vec{e}_p$), β (Rotation um $\vec{e}_o$) und γ (Rotation um $\vec{e}_n$) beschrieben. Drehungen mit α und β führen zu einer Verkippung des Sensors gegenüber der funktionalen Oberfläche, während eine Drehung mit γ einer Verdrehung innerhalb der zur funktionalen Oberfläche parallelen Ebene entspricht. Treten mehrere endliche Sensordrehwinkel gleichzeitig auf, ist die verwendete Reihenfolge der Drehungen anzugeben.

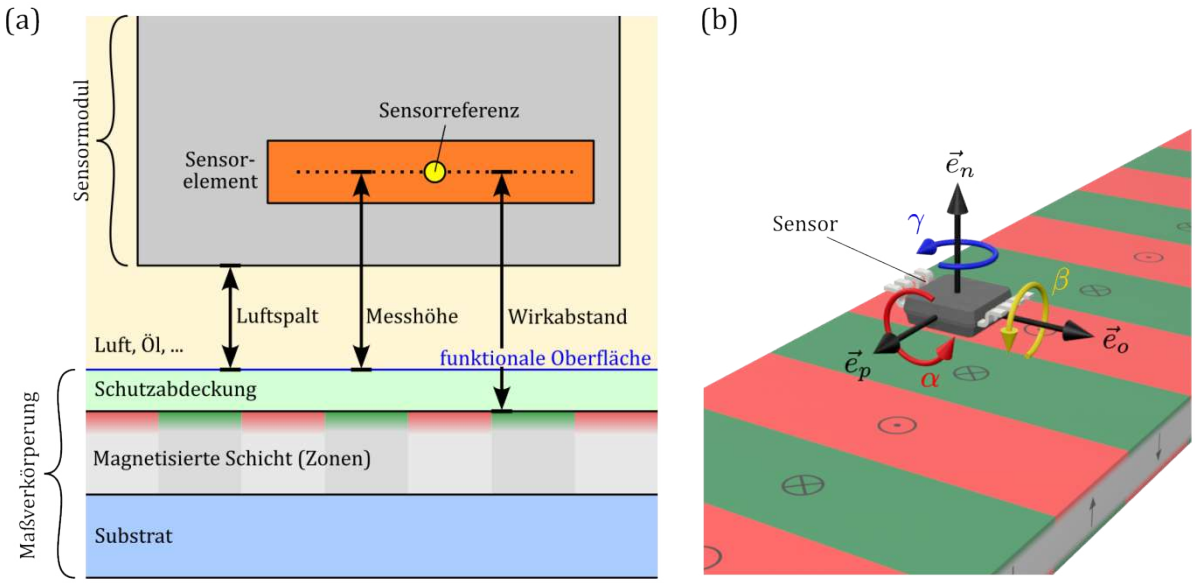


Abbildung 8.2: Lagebeziehung des Sensors

Abbildung 8.2 veranschaulicht die Lagebeziehung zwischen Sensor und Maßverkörperung. Teilbild (a) zeigt die Größen Luftspalt, Wirkabstand und auf die Sensorreferenz bezogene Messhöhe. Teilbild (b) zeigt die Sensordrehwinkel.

Tabelle 8.1: Begriffe Sensorlage

Begriff	Symbol	Beschreibung
Sensorlage	$\vec{r}_S$	Lage der Sensorreferenz im Maßverkörperungs-KS
Luftspalt	d_{mech}	Freier mechanischer Abstand zwischen Sensorgehäuse und Maßverkörperung
Wirkabstand	d_{mag}	Abstand zwischen der Oberseite der Zonenstruktur und der Sensorreferenz
Messhöhe	n	n-Koordinate im Maßverkörperungs-KS; Abstand von der funktionalen Oberfläche
Sensordrehwinkel	α, β, γ	Drehwinkel zur Beschreibung der Orientierung des Sensors gegenüber der nominalen Ausrichtung

Literatur

Ausserlechner, Udo. 2012. „Closed Analytical Formulae for Multi-Pole Magnetic Rings“. *Progress In Electromagnetics Research B* 38: 71–105. https://doi.org/10.2528/PIERB11112606.

Bruckner, Florian, Claas Abert, Gregor Wautischer, u. a. 2017. „Solving Large-Scale Inverse Magnetostatic Problems using the Adjoint Method“. *Scientific Reports* 7: 40816. https://doi.org/10.1038/srep40816.

Cassing, Wilhelm, Karl Kuntze, und Gunnar Ross. 2018. *Dauermagnete: Mess- und Magnetisiertechnik*. 3., aktualisierte Auflage. Bd. 672. Kontakt & Studium. Expert verlag.

Coey, J. M. D. 2010. *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press.

Crameri, Fabio, Grace E. Shephard, und Philip J. Heron. 2020. „The Misuse of Colour in Science Communication“. *Nature Communications* 11 (1): 5444. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19160-7.

Cullity, B. D., und C. D. Graham. 2008. *Introduction to Magnetic Materials*. 2. Aufl. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470386323.

Hägele, Alexander. 2014. „Active Rear Axle Kinematics – Improving Driving Dynamics, Safety and Comfort“. *5th International Munich Chassis Symposium 2014* (München), 411–19.

Hilzinger, Rainer, und Werner Rodewald. 2013. *Magnetic Materials: Fundamentals, Products, Properties, Applications*. Publicis Publishing.

Innomag. 2022. *Anforderungen an die technische Darstellung von magnetischen Maßverkörperungen in Konstruktionszeichnungen*. DIN SPEC 91411:2022-08. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://doi.org/10.31030/3359425.

International Organization for Standardization. 1996. *Technical drawings – Projection methods – Part 2: Orthographic representations*. International Standard ISO 5456-2:1996. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/11502.html.

International Organization for Standardization. 2024. *Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Datums and datum systems*. International Standard ISO 5459:2024. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/87855.html.

Jackson, John David. 1998. *Classical Electrodynamics*. 3. Aufl. John Wiley & Sons.

Kolb, Johannes, Patrick Roll, Lars Gehrke, u. a. 2019. „Sensorik und Regelungsqualität“. In *Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Grundlagen – vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-60356-7_17.

Michalowsky, Lothar, und Jürgen Schneider. 2006. *Magnettechnik: Grundlagen, Werkstoffe, Anwendungen*. 3., aktualisierte Auflage. Vulkan-Verlag.

Petrascheck, Dietmar, und Franz Schwabl. 2023. *Elektrodynamik*. 4. Aufl. Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-68528-0.

Saslow, Wayne M. 2022. „Magnetic Poles: A Missing Manual“. *The Physics Teacher* 60 (7): 540–45. https://doi.org/10.1119/5.0079043.

Schliesch, Thomas. 2022. „Injection Molded Permanent Magnets“. In *Modern Permanent Magnets*, herausgegeben von John J. Croat und John Ormerod. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88658-1.00009-1.

Schwegler, Dietmar, und Rainer Rapp. 2016. *Permanentmagnete: Werkstoffe, Magnettechnik, Anwendungen*. Bd. 387. Die Bibliothek der Technik. Süddeutscher Verlag onpact.

ZF Friedrichshafen AG. 2026. „Active Kinematics Control“. https://www.zf.com/products/en/cars/products_64266.html.

Über dieses Buch

Problemstellung:
Magnetische Maßverkörperungen bilden die Grundlage zahlreicher berührungsloser Weg- und Winkelmesssysteme. An ihrer Entwicklung, Herstellung, Integration und Prüfung sind meist mehrere Akteure beteiligt. Einheitliche Begriffe und Standards sind dabei entscheidend für eine klare technische Kommunikation.

Inhalt:
Diese Richtlinie schafft einen einheitlichen Rahmen für die technische Beschreibung magnetischer Maßverkörperungen in Weg- und Winkelmesssystemen und dient als Grundlage für deren Spezifikation und Vermessung. Sie greift etablierte Fachbegriffe auf, vereinheitlicht deren Verwendung und führt physikalisch fundierte und in sich konsistente Definitionen ein. Darauf aufbauend legt sie Konventionen zur technischen Darstellung magnetischer Strukturen und Streufelder fest und führt eine systematische Einteilung und Kurznotation gängiger magnetischer Maßverkörperungen ein.

Zielgruppen:
Die Richtlinie richtet sich an Hersteller, Entwickler, Prüfeinrichtungen und Anwender magnetischer Messsysteme. Darüber hinaus bietet sie Technikern, Studierenden und Einsteigern einen verständlichen Zugang zu den physikalischen Grundlagen und technischen Konzepten magnetischer Maßverkörperungen in Weg- und Winkelmesssystemen.

INNOMAG e. V.
https://innomag.org/