

## 4 Magnetische Geometrievermessung nicht-magnetischer Objekte mit strukturierten Sensorsystem-Komponenten

### 4.1 Objektvermessung mit galvanomagnetischen Sensoren

#### 4.1.1 Bestimmung geometrischer Objektparameter

Das Ziel einer Objektvermessung ist, eine oder mehrere Informationen bezüglich der Geometrie des Objekts oder eines Objektausschnitts zu gewinnen. Zu diesen Informationen zählen je nach Anwendung

- Kantenabmessungen  $l_i$  (z. B. (Teil-)Objektlänge, -breite oder -höhe, ...),
- Flächenmaße  $A_i$  (z. B. Gesamtoberfläche, Auflage-/Kontaktfläche, ...),
- Volumina  $V_i$  (z. B. Gesamtvolumen, Hohlraumvolumen, ...) und
- Oberflächenbeschaffenheiten  $X_i$  (z. B. Rauigkeit, Unregelmäßigkeiten, ...).

Bei der Vermessung von Objekten mit galvanomagnetischen Sensorsystemen sind diese Informationen – ebenso wie mit Messsystemen auf Basis anderer physikalischer Effekte – oftmals nicht direkt zugänglich. Sie müssen vielmehr aus mehreren einzelnen, äquidistant oder kontinuierlich durchgeführten Positions- bzw. Abstandsmessungen in einem definierten Koordinatensystem rekonstruiert werden. Die berechnete Länge  $l_{ber}$  eines ebenen Objekts entspricht dem geometrischen Abstand  $a$  zweier Messpunkte  $x_m$  und  $x_n$ , d. h.

$$l_{ber} = a = x_n - x_m \quad (\text{Gl. 4.1})$$

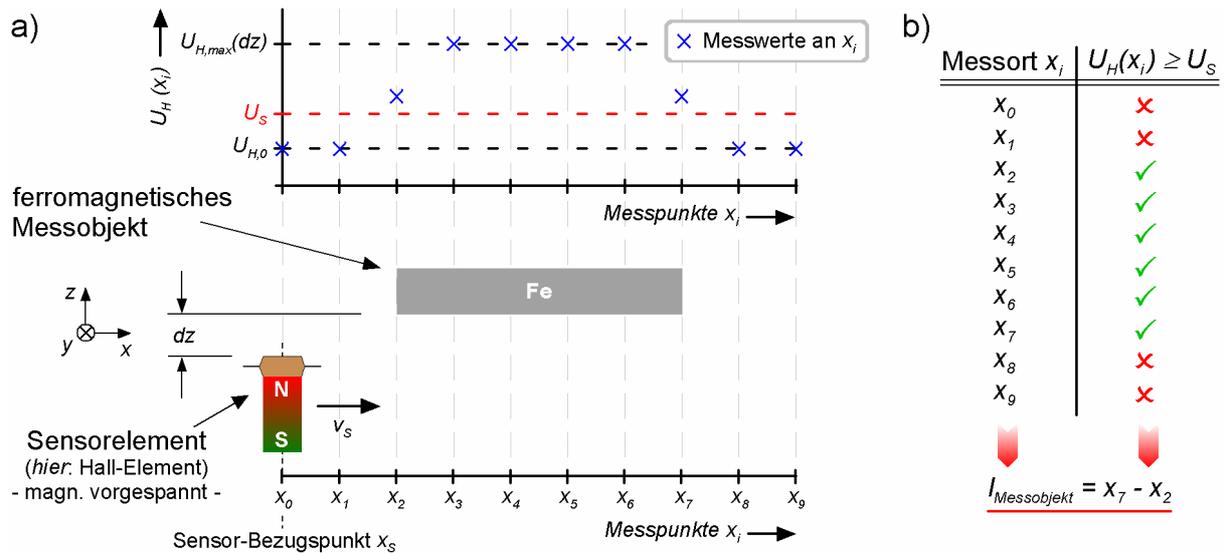
mit  $x_m < x_n$ , wenn die an diesen Punkten z. B. mit einem magnetisch vorgespannten Hallsensor gemessenen Hall-Spannungen  $U_H(x_i)$  folgende Bedingungen erfüllen:

$$U_H(x_n), U_H(x_m) \geq U_S \quad (\text{Gl. 4.2})$$

und

$$U_H(x_{n+1}), U_H(x_{m-1}) < U_S \quad (\text{Gl. 4.3})$$

mit der Schwellenspannung  $U_S$ , Bild 4.1.



**Bild 4.1:** Messung einer Objektlänge mit einem vorgespannten Hall-Sensor

a) Prinzipdarstellung der Messanordnung und der Lage der Messwerte  $U_H(x_i)$  an den Messorten  $x_i$

b) Ermittlung der Objektlänge aus den Messwerten

$dz$  – Abstand zwischen der Sensorebene und dem Messobjekt;  $v_s$  – Sensorgeschw. in Bewegungsrichtung

$U_{H,0}$  – Hall-Spannung ohne Messobjekt;  $U_{H,max}(dz)$  – maximale Hall-Spannung beim gegebenen Abstand

Die Genauigkeit der berechneten Objektlänge ist von der Wahl der Schwellenspannung sowie von der Distanz der Messpunkte abhängig. Die berechnete Länge  $l_{ber}$

$$l_{ber} = k \cdot \Delta x \quad (\text{Gl. 4.4})$$

mit der Distanz  $\Delta x$  zwischen zwei aufeinander folgenden Messpunkten  $x_i$  und  $x_{i+1}$  sowie dem Faktor  $k$  entspricht genau dann der tatsächlichen Objektlänge  $l$

$$l = l_{ber}, \quad (\text{Gl. 4.5})$$

wenn die Bedingungen

$$\Delta x \rightarrow 0 \quad (\text{Gl. 4.6})$$

und

$$k \in [1, 2, 3, \dots, \infty] \quad (\text{Äquidistanz!}) \quad (\text{Gl. 4.7})$$

erfüllt sind. Zudem müssen für den Abstand  $dz$  zwischen der Objektoberfläche und der Sensorebene die Voraussetzungen

$$! dz = const. \quad (\text{Gl. 4.8})$$

und

$$0 \leq dz \leq dz_{max} \quad (\text{Gl. 4.9})$$

mit der Grenze  $dz_{max}$  des Wirkungsbereichs des Sensors – vgl. Kapitel 2.2.2 – gegeben sein. Dieser Idealfall setzt jedoch voraus, dass das Sensorelement eine punktförmige sensitive Fläche aufweist und der Wirkungsbereich auf eine Linie senkrecht zu dieser Fläche begrenzt ist. Im Realfall sind diese Abmessungen jedoch deutlich von null verschieden, so dass zur Berechnung der Objektlänge ein Korrekturwert  $C$  benötigt wird, der in Abhängigkeit von der gewählten Schwellenspannung den aus der Breite  $b_s$  der Sensorfläche resultierenden Messfehler ausgleicht, wenn Gl. 4.6 erfüllt ist, Tabelle 4.1. Damit wird aus Gl. 4.5 unter Berücksichtigung von Gl. 4.4

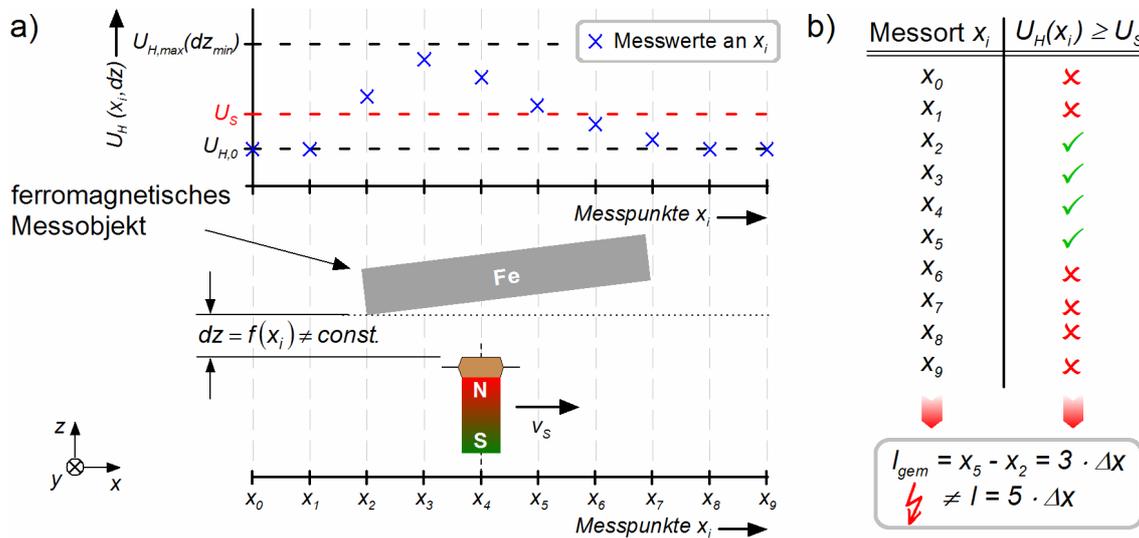
$$l = k \cdot \Delta x + C. \tag{Gl. 4.10}$$

**Tabelle 4.1:** Charakteristische Korrekturwerte zur Berechnung geometrischer Objektdaten bei verschiedenen Schwellenspannungen

$b_s$  – Breite der aktiven Sensorfläche;  $dz$  – Abstand zwischen der zu messenden Objektfläche und der Sensorebene;  $l$  – Objektlänge;  $l_{gem}$  – gemessene Länge;  $\Delta x$  – Distanz zwischen zwei Messorten;  $C$  – Korrekturwert;  $U_{H,0}$  – Hall-Spannung des vorgespannten Sensors ohne magnetisch leitendes Objekt;  $U_{H,max}(dz)$  – Maximalwert der Hall-Spannung;  $U_S$  – elektrische Schwellenspannung

Schwellenspannung $U_S$	Prinzipdarstellung	Korrekturwert $C$
$U_S = U_{H,max}(dz)$		$l = l_{gem} + C; \Delta x \rightarrow 0$ hier: $l_{gem} = l - 2 \cdot \left( \frac{b_s}{2} \right)$ $\Rightarrow C = b_s$
$U_S \cong U_{H,0}$		$l = l_{gem} + C; \Delta x \rightarrow 0$ hier: $l_{gem} = l + 2 \cdot \left( \frac{b_s}{2} \right)$ $\Rightarrow C = -b_s$
$U_S = \frac{1}{2} \cdot (U_{H,max}(dz) + U_{H,0})$		$l = l_{gem} + C; \Delta x \rightarrow 0$ hier: $l = l_{gem}$ $\Rightarrow C = 0$

Ist im Messbereich die Bedingung nach Gl. 4.8 nicht erfüllt, so wird je nach gewählter Schwellenspannung die berechnete Länge deutlich von der tatsächlichen Objektlänge abweichen, Bild 4.2.



**Bild 4.2:** Einfluss einer Änderung des Abstandes  $dz$  im Messbereich

- a) Prinzipdarstellung der Messanordnung und der Lage der Messwerte  $U_H(x_i)$  an den Messorten  $x_i$   
 b) Ermittlung der Objektlänge aus den Messwerten

$l$  – Objektlänge;  $l_{gem}$  – gemessene Länge;  $\Delta x$  – Distanz zweier Messpunkte;  $U_S$  – Schwellenspannung

Die Schwellenspannung muss daher stets so gewählt sein, dass eine zu erwartende Abstandsänderung keinen Einfluss auf die Detektion der Objektkanten hat, also

$$U_{H,0} \approx U_S \ll U_{H,max}(dz). \quad (\text{Gl. 4.11})$$

Alternativ zur Abtastung in äquidistanten Schritten lässt sich eine Länge aus einem zeitkontinuierlichen Sensorsignals  $U_H(t)$  ermitteln. Dann markieren die Messwerte

$$U_H(t_i) = U_S \quad (\text{Gl. 4.12})$$

mit den Zeitpunkten  $t_i$  ( $i = 0 \dots n$ ) die Kanten des Messobjekts. Unter den Voraussetzungen, dass die Geschwindigkeit der Relativbewegung  $v_S(t)$  zwischen dem Sensor und dem Messobjekt bekannt, die Bedingung

$$v_S(t) = const. = v_S \quad (\text{Gl. 4.13})$$

sowie Gl. 4.8 erfüllt sind, errechnet sich die gesuchte Objektlänge  $l$  aus

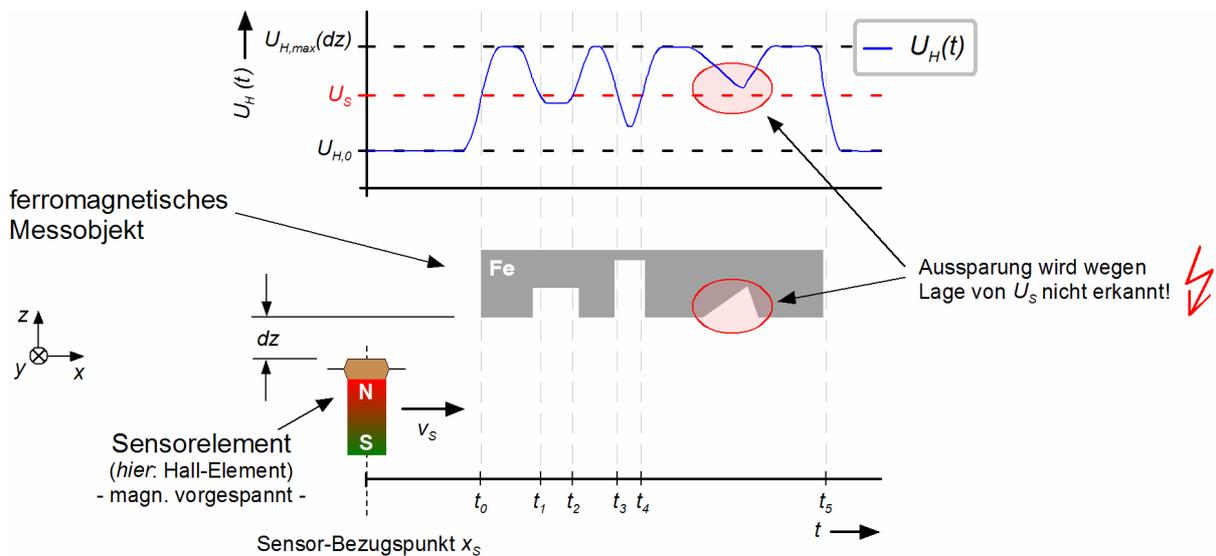
$$l = v \cdot (t_n - t_0) \quad (\text{Gl. 4.14})$$

mit  $t_0$  dem ersten und  $t_n$  dem letzten Zeitpunkt, für den Gl. 4.12 zutrifft.

Bei Objekten mit ebener Oberfläche ist  $n = 1$ . Dies lässt bei der Analyse eines unbekannten Objektes den Umkehrschluss zu, dass insgesamt  $q$  Unebenheiten, Vertiefungen, Aussparungen oder Fehler an der Objektoberfläche existieren, wenn

$$n = 2 \cdot q + 1 \quad (\text{Gl. 4.15})$$

gilt, Bild 4.3.



**Bild 4.3:** Detektion von Unregelmäßigkeiten an der Objektoberfläche  
 $t_i$  – Zeitpunkte, für die  $U_H(t_i) = U_S$  gilt;  $v_S$  – Sensorgeschwindigkeit;  $U_S$  – Schwellenspannung

Über die Beziehung

$$l_i = v_S \cdot (t_{2i} - t_{2i-1}) + C \quad (\text{Gl. 4.16})$$

lassen sich die Einzellängen  $l_i$  der  $q$  Vertiefungen bzw. Fehler einer unebenen Oberfläche aus den Zeitpunkten  $t_i$  bestimmen, an denen die gemessene Hall-Spannung  $U_H(t)$  gleich der Schwellenspannung  $U_S$  ist, vgl. Gl. 4.12. Entscheidend ist hier die Einstellung von  $U_S$ , vgl. Bild 4.3. Die Rekonstruktion einer Oberflächenstruktur ist jedoch nur möglich, wenn die gesamte Fläche kontinuierlich mit parallel angeordneten Sensoren oder zeilenweise mit einem Sensor vermessen wird, Kapitel 4.1.2.

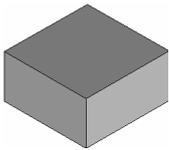
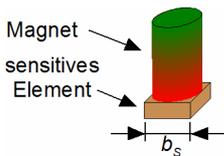
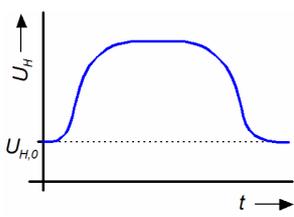
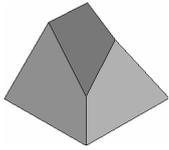
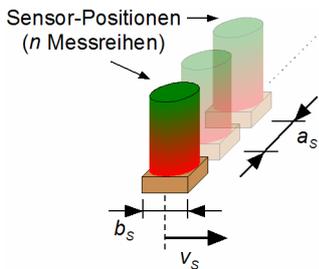
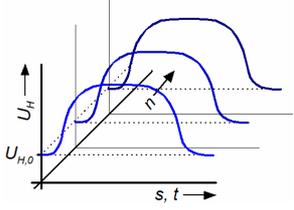
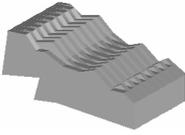
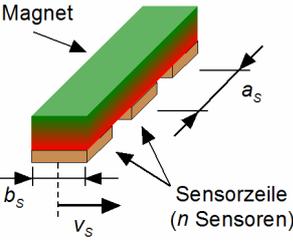
#### 4.1.2 Mehrdimensionale Objektvermessung

Die Durchführung einer mehrdimensionalen Objektvermessung hängt von der Komplexität der Objektoberflächen, von der Art der gewünschten Information sowie von der zu realisierenden Messgenauigkeit ab. Eine Flächen- oder Volumenbestimmung ist bei rechteckigen Objekten mit ebenen Oberflächen beispielsweise bereits mit

einem einfachen Sensorsystem, bestehend aus einem sensitiven und einem felderzeugenden Element, durchführbar. Eine serielle Längenmessung einzelner Körperkanten liefert die Maße, aus denen die gewünschten Informationen berechnet werden können. Nicht-rechtwinklige Objekte und Körper mit komplexen geometrischen Strukturen lassen sich hingegen nur durch sequentielle Abtastung einzelner Flächen und/oder mithilfe von Sensorsystemen mit mehreren sensitiven Elementen in Zeilen- oder Flächenanordnung ohne Informationsverlust vermessen, Tabelle 4.2.

**Tabelle 4.2:** Vermessung von Objektflächen mit Einzel- und Multi-Sensorsystemen

*a<sub>s</sub> – Mittenabstand zwischen sensitiven Elementen (Sensorpitch) bei Zeilen- und Feldanordnung, Mittenabstand zwischen Messreihen bei Einzelsensoren; b<sub>s</sub> – Breite/Länge der aktiven Fläche des sensitiven Elements; n – Messreihe, Sensornummer; s – Ort; t – Zeit; v<sub>s</sub> – Sensorgeschwindigkeit; Δx – Abstand zwischen zwei Messpunkten*

Flächen-/ Körperstruktur	Systemkonfiguration (empfohlen)	Bedingungen	Sensorsignale (prinzipiell)
 <p>- rechtwinklig - glatte Oberflächen</p>	<p><b>Einzelsensor</b></p>  <p>Magnet sensitives Element b<sub>s</sub></p> <p>Einzelmessung je Körperseite / Fläche</p>	$\Delta x \leq b_s$ (ideal: $\Delta x \rightarrow 0$ )	
 <p>- beliebige Winkel - glatte Oberflächen</p>	<p><b>Einzelsensor</b></p>  <p>Sensor-Positionen (n Messreihen) a<sub>s</sub> b<sub>s</sub> v<sub>s</sub></p> <p>Flächen bzw. Seiten komplexer Strukturen zeilenweise messen</p>	$\Delta x \leq b_s$ (ideal: $\Delta x \rightarrow 0$ )	
 <p>- beliebige Winkel - raue oder strukturierte Oberflächen</p>	<p><b>Sensorzeile/-feld</b></p>  <p>Magnet a<sub>s</sub> b<sub>s</sub> v<sub>s</sub> Sensorzeile (n Sensoren)</p> <p>Flächen bzw. Seiten komplexer Strukturen in einem Messvorgang erfassen (Scan-Verfahren)</p>	<p>und</p> $a_s \rightarrow b_s$	
 <p>komplexe Struktur</p>	<p><b>Sensorzeile/-feld</b></p> <p>Flächen bzw. Seiten komplexer Strukturen in einem Messvorgang erfassen (Scan-Verfahren)</p>		

## 4.2 Magnetische Vermessung nicht-magnetischer Objekte durch Einsatz strukturierter Sensorsystem-Komponenten

### 4.2.1 Codierung der Geometrieinformationen nicht-magnetischer Objekte

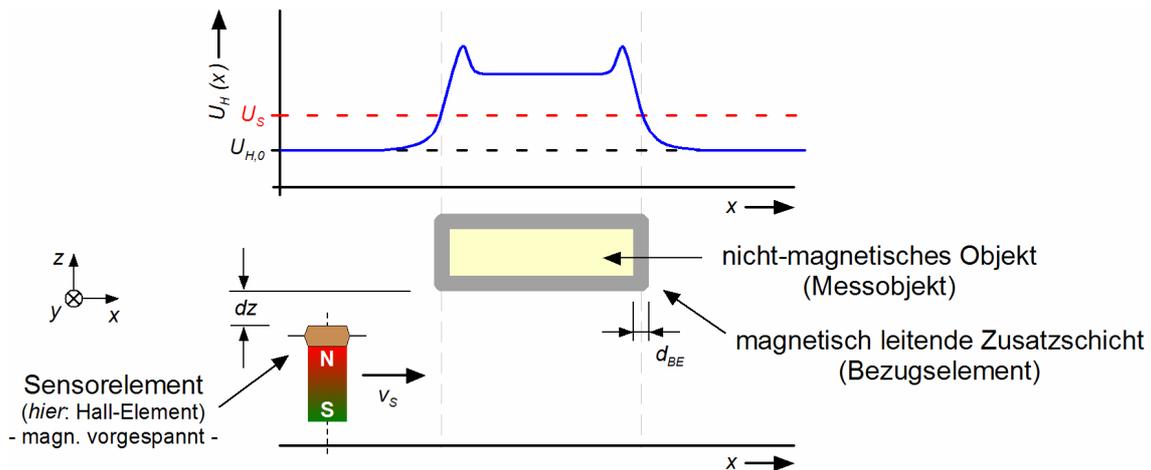
Nicht-magnetische Objekte bestehen aus Werkstoffen, die – makroskopisch betrachtet – nicht oder nur unwesentlich auf ein externes Magnetfeld reagieren, Tabelle 4.3, [MIC-95]. Entsprechend wird auch der Verlauf des magnetischen Feldes nicht oder nur unwesentlich beeinflusst, so dass derartige Werkstoffe für die Magnetosensorik nicht von Bedeutung sind. Das magnetisch als neutral zu betrachtende Verhalten ermöglicht aber beispielsweise eine Verwendung als Verbindungs- und Gehäuseelemente für Komponenten magnetischer Sensorsysteme.

**Tabelle 4.3:** Für die Magnetosensorik unbedeutende Werkstoffe

magnetische Klassifizierung	relative Permeabilität $\mu_r$	mikroskopisches Verhalten	Beispiele
diamagnetisch	$< 1, \approx 1$	Abstoßung vom Magnetfeld	Glas, Kupfer, Gold, Blei, Wasser
paramagnetisch	$> 1, \approx 1$	Anziehung vom Magnetfeld	Sauerstoff, Aluminium, Silizium, Zinn
antiferromagnetisch	$= 1$	neutral (unmagnetisch)	Chrom, Vakuum

Um die Geometrie nicht-magnetischer Objekte mit (galvano-)magnetischen Sensoren erfassen oder sogar vermessen zu können, muss diese zunächst auf Objekte aus magnetischen Werkstoffen abgebildet werden. Ideal geeignet sind hierzu weichmagnetische Materialien mit sehr geringer Remanenz, die makroskopisch ein magnetisches Verhalten nur unter dem Einfluss eines äußeren Magnetfelds aufweisen.

Zur Abbildung der Geometrie nicht-magnetischer Objekte können beeinflussende und nicht beeinflussende Verfahren heran gezogen werden: So ist z. B. das Aufbringen einer dünnen magnetisch leitenden Schicht auf die Oberfläche des Messobjekts ein beeinflussendes Verfahren, da die eigentliche Objektgeometrie irreversibel variiert wird, Bild 4.4. Eine magnetisch leitende Zusatzschicht aus beispielsweise Nickel (Ni) oder Kobalt (Co) kann durch Sputtern, Bedampfen oder Galvanisieren in einer definierten Stärke auf die Objektoberfläche aufgebracht werden. Die Zusatzschicht, deren Struktur durch die Geometrie des nicht-magnetischen Messobjekts gebildet wird, stellt das Bezugselement (BE) des galvanomagnetischen Sensorsystems dar.



**Bild 4.4:** Galvanomagnetische Erfassung/Vermessung eines nicht-magnetischen Objekts mithilfe einer magnetisch leitenden Zusatzschicht  
 $d_{BE}$  – Dicke der magn. leitenden Zusatzschicht;  $U_S$  – elektr. Schwellenspannung;  $v_S$  – Sensorgeschwindigkeit

Die geometrische Objektvermessung erfolgt durch Erfassung der magnetischen Zusatzschicht; die tatsächliche Länge  $l$  des Messobjektes ergibt sich dann aus

$$l = l_{gem} - 2 \cdot d_{BE} + C \quad (\text{Gl. 4.17})$$

mit der gemessenen Länge  $l_{gem}$ , der tatsächlichen Objektlänge  $l$ , der Dicke der magnetischen Zusatzschicht  $d_{BE}$  und dem Korrekturwert  $C$  zum Ausgleich der Sensorabmessungen, vgl. Kapitel 4.1.1. Die Amplitudenerhöhung der Signalspannung  $U_H(x)$  an den Objektenden in Bild 4.4 resultiert aus der höheren Schichtdicke an den Objektseiten. Die Objektlänge kann aber bei einer Auswertung des Sensorsignals über eine Schwellenspannung korrekt bestimmt werden.

Beeinflussende Geometrieabbildungen sind in der Praxis nur in wenigen Ausnahmefällen geeignet, da eine Veränderung des Messobjektes nur dann zulässig sein kann, wenn dies nach der Vermessung keine weitere Funktion besitzt.

Bei einer nicht beeinflussenden Methode wird die geometrische Struktur eines magnetisch leitenden Elements durch die Geometrie des Messobjektes variiert. Diese Strukturvariation stellt eine Codierung der Geometrieinformationen des Messobjektes dar. Die Objektvermessung erfolgt durch Einbringen des strukturvariierten, magnetisch leitenden Elements als Bezugselement in den Wirkungsbereich eines magnetisch vorgespannten Sensorelements. Strukturvariationen felderzeugender oder sensitiver Elemente sind dagegen sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht für die Geometriedatenerfassung nicht-magnetischer Objekte nicht sinnvoll.

Eine irreversible Strukturvariation beschränkt die Nutzung des Bezugselements auf eine einzelne Messung. Im Hinblick auf Praxisanwendungen zweckmäßige Messgeräte müssen hingegen auf einer Informationscodierung durch eine temporäre, vollständig reversible Strukturvariation eines systemimmanenten, elastischen oder beweglichen, magnetisch leitenden Elements basieren. So kann z. B. die Geometriedatenabbildung durch Druck des Messobjekts auf das Bezugselement vorgenommen werden. Zur Rücksetzung des deformierten Bezugselements in den Ursprungszustand ist nach dem Entfernen des Messobjekts eine Rückstellkraft notwendig, die aus der Elastizität des Materials gewonnen und/oder durch Zusatzkräfte realisiert wird, Kapitel 4.2.2.

Die Ausnutzung der Gestaltmerkmale des Bezugselements als Informationsträger für die Geometriedaten eines Messobjekts führt zu verschiedenen prinzipiellen Sensordesign-Topologien, Tabelle 4.4

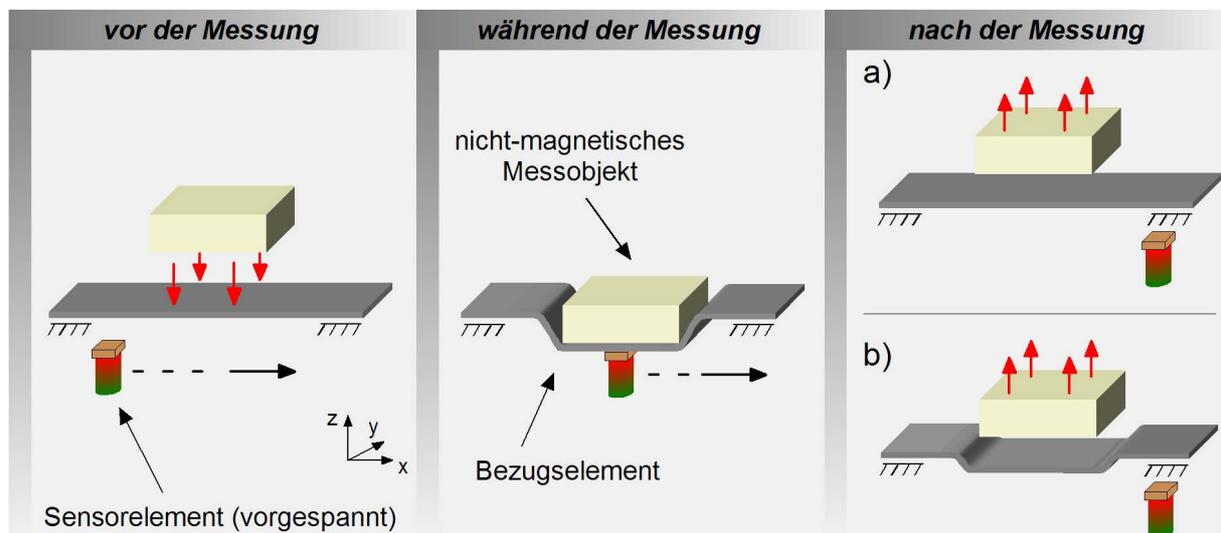
**Tabelle 4.4:** Gestaltmerkmale als Informationsträger zur Codierung von Geometriedaten nicht-magnetischer Objekte

*dz – Abstand Bezugselement / Sensorebene;  $v_s$  – Sensorgeschwindigkeit*

Informationsträger		Systemaufbau (Beispiele)	Anmerkungen
Geometrische Gestalt	Form		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegeradien <math>r_i</math> und Hub <math>\Delta h</math> von Elastizität des magnetisch leitenden Materials abhängig</li> <li>• gut auswertbar</li> </ul>
	Oberfläche		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biegeradien <math>r_i</math> und Hub <math>\Delta h</math> von Elastizität des magnetisch leitenden Materials abhängig</li> <li>• nur für sehr kleine Materialstärken <math>h</math> auswertbar</li> <li>• wenig geeignete Materialien</li> </ul>
Anzahl / Anordnung			<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur sinnvoll für Elementbreiten <math>b \rightarrow 0</math> bzw. -abstände <math>a \rightarrow 0</math></li> <li>• technisch derzeit aber nur für <math>a, b \gg 0</math> realisierbar</li> </ul>
innere Struktur		(z. B. Deformation der Gitterstruktur)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nicht reproduzierbar auszuwerten <math>\rightarrow</math> <b>ungeeignet</b></li> </ul>

#### 4.2.2 Konzept für ein galvanomagnetisches Geometriedaten-Erfassungssystem für nicht-magnetische Objekte

Tabelle 4.4 lässt erkennen, dass die Realisierung eines galvanomagnetischen Sensorsystems mit strukturierten Komponenten zur Geometriedatenerfassung nicht-magnetischer Objekte nach heutigem Stand technisch und/oder wirtschaftlich derart begrenzt ist, dass nur das Gestaltmerkmal *Form* der Systemkomponente ‚Bezugselement‘ den Anforderungen an einen Informationsträger genügt. Die für Messgeräte unabdingbare vollständig reversible Strukturvariation zur Informationscodierung durch eine temporäre Deformation des Bezugselements – siehe Bild 4.5 – erfordert für dieses spezielle Materialeigenschaften und gegebenenfalls zusätzliche Systemkomponenten.



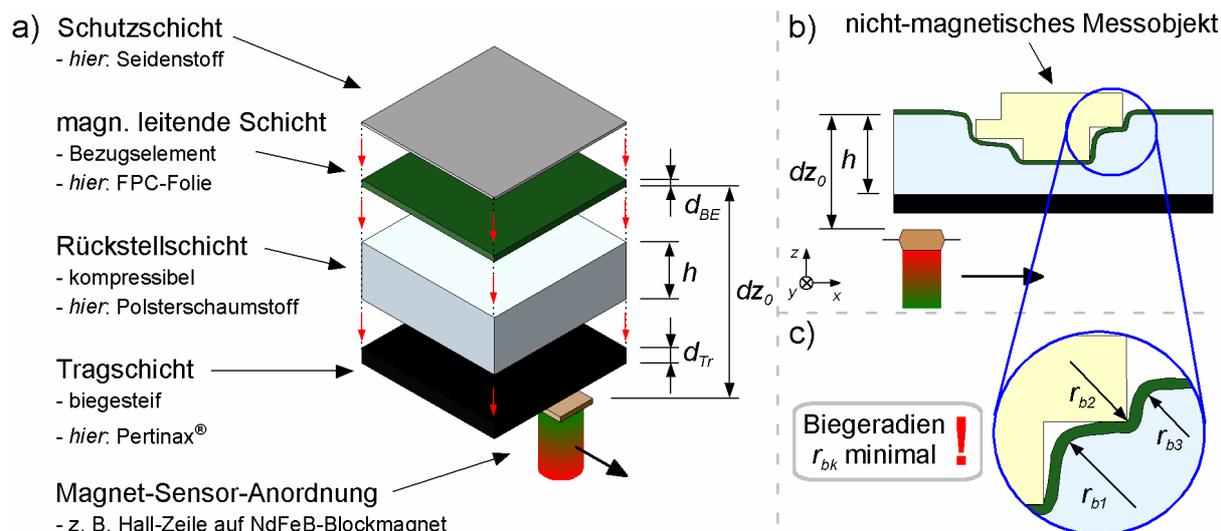
**Bild 4.5:** Mögliche Zustände des informationstragenden Gestaltmerkmals *Form*

- a) Vollständig reversible Strukturvariation des Bezugselements
- b) Teil- bzw. irreversible Strukturvariation des Bezugselements

Die vollständig reversible Strukturvariation erfordert für das Bezugselement ein sehr dünnes, flexibles, weichmagnetisches Material mit einer möglichst hohen relativen Permeabilität. Handelsübliche Materialien, die aufgrund entsprechender magnetischer Eigenschaften grundsätzlich geeignet erscheinen, werden vorwiegend zur Herstellung von Abschirmungen für elektronische Bauteile und Geräte sowie Kabeln gegenüber elektromagnetischen Störfeldern in der Kommunikationstechnik, der Fahrzeugtechnik o. ä. eingesetzt. Obwohl magnetische Abschirmungen überwiegend massiv in stabilen, gehäuseähnlichen Formen aus schlussgeglühten, weichmagnetischen Metalllegierungen gefertigt werden, existieren mittlerweile einige folienartige

Ausführungsformen mit verminderter Abschirmwirkung, vorzugsweise für die Abschirmung flexibler Kabel mit teils geringem Durchmesser. Die Vacuumschmelze GmbH in Hanau liefert beispielsweise Abschirmfolien in mehreren Bandbreiten aus kristallinem MUMETALL<sup>®</sup> (Anfangspermeabilität für Übertrager-Kernwerkstoffe nach DIN 41301 bei  $H = 0,4 \text{ A/m}$ :  $\mu_4 = 8000$ ; Standardbandbreite 155 mm) und amorphem VITROVAC<sup>®</sup> 6025 X ( $\mu_4 = 25000$ ; Bandbreiten bis 50 mm) mit Dicken zwischen 25  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$  [VAC-00]. Diese Materialien sind zwar weitgehend unempfindlich gegenüber einer mechanischen Beanspruchung, doch ist eine Strukturvariation nicht oder nur bedingt reversibel durchführbar. Trotz der vergleichsweise geringen Permeabilität eignet sich daher die FPC-Folie (**Ferrite Polymer Composite Film**) der Firma EPCOS AG (FPC-Folie Typ C 350:  $\mu_i = 9 \pm 20 \%$ ) ideal zur Herstellung flexibler Bezugselemente. Die Ferritfolie besitzt aufgrund ihres hohen Kunststoffanteils gegenüber anderen Abschirmmaterialien den bedeutenden Vorteil, dass sie auch bei der Strukturabbildung kantiger Objekte nicht zur Bildung von zumeist irreversiblen scharfen Falten neigt. Diese führen zur Bildung von magnetischen Streufeldern, welche die Messergebnisse stark beeinträchtigen können. FPC-Folien sind darüber hinaus unempfindlich gegenüber mechanischen Belastungen, hoch flexibel und in kleinsten Stärken preisgünstig und als teilweise selbstklebende Bänder in verschiedenen Breiten lieferbar [EPC-01].

Nur eine hohe Flexibilität eines Bezugselements ermöglicht bei geringer Dicke einen maximal formschlüssigen Kontakt zum Messobjekt. Hierzu ist im Allgemeinen und bei der FPC-Folie im Besonderen ein Zusatzelement in Kontakt mit der magnetisch leitenden Schicht erforderlich, das eine ausreichende Gegenkraft erzeugt, um das Bezugselement mit minimalen Biegeradien an die Kontur der Auflagefläche des Messobjekts zu pressen. Dem Zusatzelement *Rückstellschicht* kommen ferner die Aufgaben zu, außerhalb des Abbildungsbereichs den Ausgangsabend zwischen dem Bezugselement und den sensitiven Elementen des Sensorsystems aufrecht zu erhalten sowie nach dem Entfernen des Messobjekts die Ursprungsform des Bezugselements wieder herzustellen, Bild 4.6.



**Bild 4.6:** Aufbau eines galvanomagnetischen Sensorsystems zur Geometriedatenerfassung nicht-magnetischer Objekte

a) Komponenten des Schichtsystems und deren Anordnung

b) Strukturierung des Bezugselements und Komprimierung der Rückstellschicht durch ein Messobjekt

c) Ausschnitt zu b) mit Darstellung der Biegeradien

$d_{BE}$  – Dicke des Bezugselements (FPC-Folie:  $d_{BE} = 200 \mu\text{m}$ );  $d_{Tr}$  – Dicke der Tragschicht;  $dz_0$  – Abstand zwischen unstrukturiertem Bezugselement und der Sensorebene;  $h$  – Ausgangshöhe der unkomprimierten Rückstellschicht;  $r_{bk}$  – Biegeradien des strukturierten Bezugselements

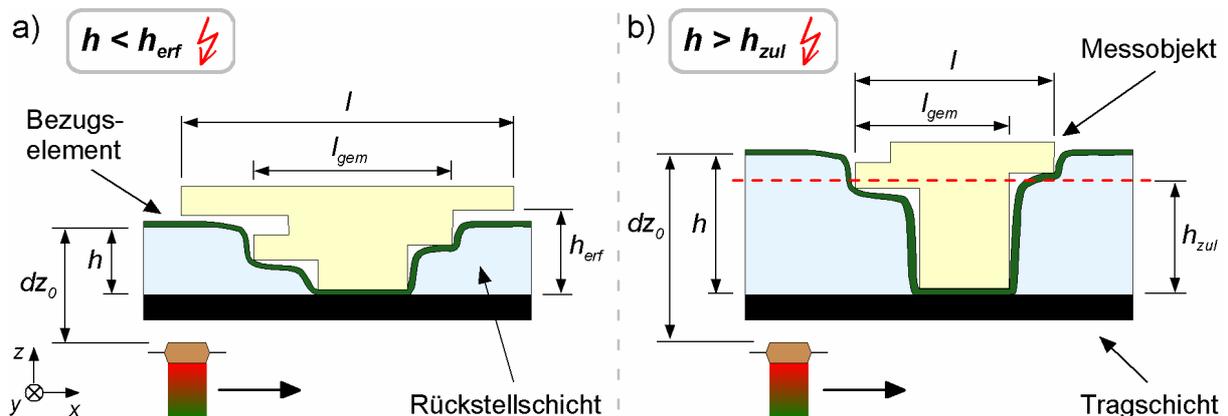
Vorteilhaft für die Realisierung der Rückstellschicht sind kompressible Materialien, die im Gegensatz zu gas- und flüssigkeitsgefüllten Polstern bei Belastung keinen Ausweichraum benötigen. Handelsübliche Schaumstoffe, die als Dämm- und Polsterwerkstoffe in der Textil-, Möbel- und Bauindustrie eingesetzt werden, erscheinen zunächst geeignet. Tatsächlich bieten nur wenige Schaumstoffe bei einer hohen Elastizität auch eine Kompressibilität, die eine Komprimierung auf wenige Prozentpunkte der Ausgangshöhe gestattet, sowie die Fähigkeit, bei Entlastung ohne nachweisbare, remanente Formvariation in die Ausgangsform zurückzukehren. Insbesondere bei häufiger Nutzung sind vollständig reversible geometrische Strukturvariationen bei den meisten Schaumstoffen unmöglich, wenn die Ausgangshöhe den unteren Millimeterbereich übersteigt. Der z. B. in Sitzmöbeln und Matratzen verwendete Polstermöbelschaumstoff T2335 der Firma Koepp Schaum GmbH in Oestrich-Winkel bietet bei einer geringen Rohdichte eine vergleichsweise hohe Stauchhärte, so dass die an die Rückstellschicht gestellten Anforderungen erfüllt werden können [KOE-02].

Eine biegesteife Tragschicht ermöglicht eine geschützte Bewegung der Magnet-Sensoranordnung durch Gewährleistung eines Mindestabstandes. Die Tragkraft des Systems kann durch Einsatz besonders stabiler Materialien optimiert werden, sofern diese das Messprinzip nicht beeinträchtigen. So sind sämtliche magnetisch leitende

Materialien grundsätzlich ungeeignet. Andererseits sind magnetisch nicht, jedoch elektrisch leitende Metalle für hohe Messgeschwindigkeiten, d. h. Verfahrensgeschwindigkeiten der Magnet-Sensoranordnung ungünstig, da die Bewegung des integrierten Permanentmagneten in diesen Materialien zur Bildung von Wirbelströmen, die das Magnetfeld in der Sensorebene unkontrollierbar beeinflussen, führt. So hat sich der Einsatz von Pertinax<sup>®</sup> – einem Schichtpressstoff aus Papier und Phenolharz – als Tragschicht-Material bewährt. Bei geeigneter Gehäusekonstruktion lassen sich mit Pertinax<sup>®</sup>-Trittplatten mit einer Stärke von z. B.  $d_{Tr} = 4 \text{ mm}$  Messsysteme für nicht-magnetische Objekte mit einer Masse von bis zu  $m = 50 \text{ kg}$  konstruktiv auslegen.

Die Ausgangshöhe  $h$  der kompressiblen Rückstellschicht ist der geometrischen Gestalt der zu erwartenden Messobjekte sowie dem Wirkungsbereich der Magnet-Sensoranordnung entsprechend zu dimensionieren, um Messfehler zu vermeiden, Bild 4.7. Für eine mehrdimensionale Objektvermessung muss daher gewährleistet sein, dass

- alle, die Maximalabmessungen einer Objektseite beschreibenden, Ränder eines Messobjekts zur Formvariation der magnetisch leitenden Schicht beitragen, d. h.  $h \geq h_{\text{erf}}$ , und
- jede Formvariation des Bezugselements die Vertikalkomponente des magnetischen Feldes in der Sensorebene beeinflusst, d. h.  $h \leq h_{\text{zul}}$ , vgl. Wirkungsbereich in Kapitel 2.2.2.



**Bild 4.7:** Fehlerhafte Dimensionierung der kompressiblen Rückstellschicht

- a) Rückstellschicht unterschreitet erforderliche Mindesthöhe zur Erfassung der begrenzenden Objekttränder  
 b) Bezugselement-Strukturierung durch äußere Objekttränder erfolgt außerhalb des Sensor-Wirkbereichs  
 $dz_0$  – Abstand zwischen unstrukturiertem Bezugselement und der Sensorebene;  $h$  – Ausgangshöhe der unkomprimierten Rückstellschicht;  $h_{\text{erf}}$  – erforderliche Mindesthöhe der Rückstellschicht;  
 $h_{\text{zul}}$  – Grenze des Sensor-Wirkbereichs (max. zulässige Ausgangshöhe der Rückstellschicht);  
 $l$  – tatsächliche Objektlänge;  $l_{\text{gem}}$  – gemessene Objektlänge

### 4.2.3 Ansätze zur Systemoptimierung

Messgeräte auf Basis des vorgestellten Konzepts unterliegen zusätzlich zu den aus Kapitel 4.2.2 bekannten Anforderungen weiteren Bedingungen, um geometrische Daten beliebiger nicht-magnetischer Objekte korrekt zu erfassen:

- (1) Die relative Lage der Längsachse eines Messobjekts zur Bewegungsachse der Magnet-Sensoranordnung muss bekannt sein. Im Idealfall liegen beide Achsen parallel zu einander.
- (2) Der Messbereich muss alle zur Bestimmung der Objektmaße relevanten Punkte beinhalten.

Bedingung (2) erfordert mehrere gestufte Messvorgänge quer zur Längsachse des Objekts oder alternativ eine Parallelanordnung mehrerer Einzelsensoren auf einer beweglichen Traverse, vgl. Tabelle 4.2 in Kapitel 4.1.2, wodurch eine erhebliche Reduzierung der Messdauer erzielt werden kann. Die Verwendung einer Sensorzeile ist daher insbesondere für die Vermessung aktiver, d. h. lebendiger Objekte zu empfehlen. Ein Beispiel hierzu liefert Kapitel 4.3.

Bei der Parallelanordnung mehrerer Einzelsensoren zu einer Sensorzeile ergibt sich die Objektlänge bzw. die Länge der aufliegenden Objektfläche  $l$  aus

$$l = x_r - x_q + C, \quad (\text{Gl. 4.18})$$

wenn an den Messorten  $x_q$  und  $x_r$ , mit  $r > q$ , für ein oder mehrere Sensorelemente die Bedingung nach Gl. 4.2

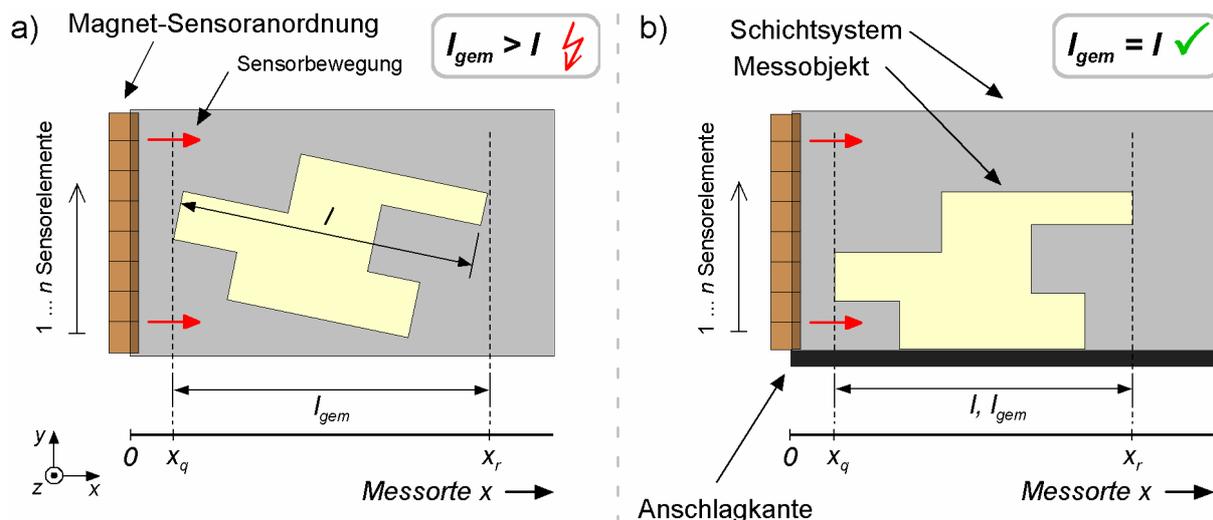
$$U_{H,i}(x) \geq U_S \Big|_{x=x_q, x=x_r}$$

und an beliebigen Messorten  $x_j$  für alle  $n$  Sensorelemente die Bedingung nach Gl. 4.3

$$U_{H,i}(x_j) < U_S \quad \forall i \quad \text{und} \quad x_j \notin [x_q \dots x_r]$$

mit der ortsabhängigen Hall-Spannung  $U_{H,i}(x_j)$  des Sensorelements  $i$  und der Schwellenspannung  $U_S$  gelten.

Bedingung (1) erfordert, das Messobjekt an einer Anschlagkante auszurichten, die parallel zur Bewegungsrichtung des sensitiven Elements angebracht ist, Bild 4.8. Je nach Anwendung sind weitere Anschlagkanten zweckmäßig oder unumgänglich.



**Bild 4.8:** Anschlagkanten zur Ausrichtung des Messobjekts

- a) Fehler bei der Messung der Objektlänge wegen fehlender Ausrichtung zur Sensor-Bewegungsrichtung  
 b) Korrekte Erfassung der Objektlänge durch Ausrichtung an Anschlagkante

$l$  – tatsächliche Objektlänge;  $l_{gem}$  – gemessene Objektlänge;  $x_q$  – erster Messort, an dem Schwellenspannung überschritten wird;  $x_r$  – letzter Messort, an dem Schwellenspannung überschritten wird (vgl. Gl. 4.2)

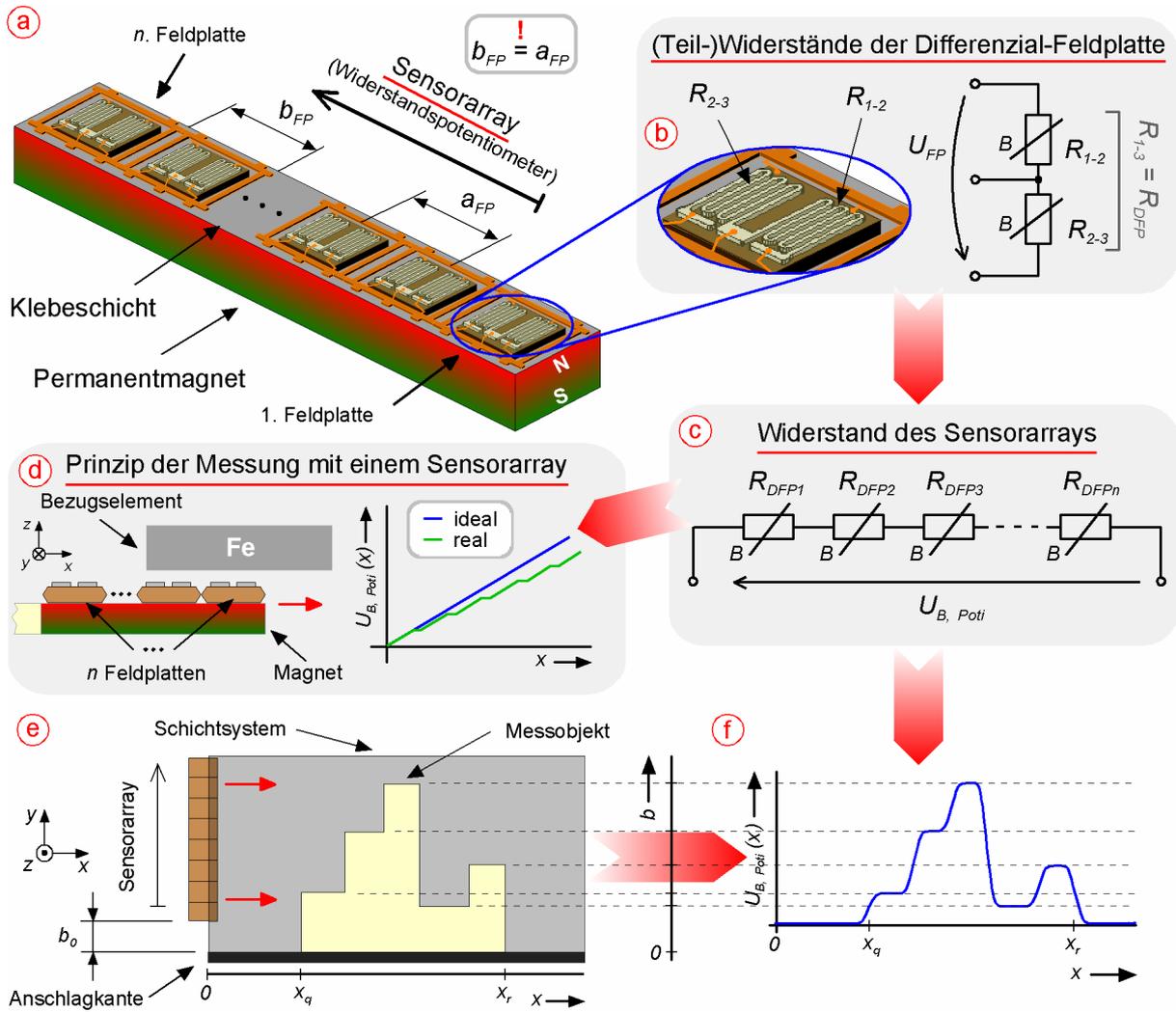
Weitere Möglichkeiten der Systemoptimierung entstehen durch Einsatz von Feldplatten anstelle von Hall-Generatoren. Eine Reihenschaltung dieser Sensoren führt zu einem magnetisch angesteuerten Widerstandspotentiometer, dessen elektrischer Gesamtwiderstand von der Größe des Bereiches abhängt, in dem die Rückstellschicht durch das Messobjekt komprimiert wird. Bei einer Reihenschaltung von  $n$  typgleichen Feldplatten – beispielsweise Differenzial-Feldplatte *FP412 D 250* (Infineon AG), vgl. Tabelle 2.2 in Kapitel 2.1.2 – besitzt das Widerstandsarray den elektrischen Grundwiderstand ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes

$$R_{0,Poti} = n \cdot R_{0,FP} \cong n \cdot (370 \, \Omega \dots 630 \, \Omega) \quad (\text{Gl. 4.19})$$

mit dem elektrischen Widerstand  $R_{0,FP}$  einer einzelnen Feldplatte ohne Magnetfeld-einfluss. Unter Einwirkung eines magnetischen Feldes ist eine Erhöhung des elektrischen Widerstands des Potentiometers um

$$\left( \frac{R_{B,Poti}}{R_{0,Poti}} \right)_{max} > 12 \quad (\text{Gl. 4.20})$$

möglich, was aufgrund der feinen Mäanderstruktur der Feldplatten aus Halbleiterbahnen mit einer Breite von ca. 80  $\mu\text{m}$  eine sehr hohe Messgenauigkeit ermöglicht. In Verbindung mit einer Anschlagkante gestattet ein solches Feldplattenarray z. B. die Durchführung einer Breitenmessung neben der Längenmessung bzw. der Erfassung des Profils der Auflagefläche durch weitere Einzelsensoren, Bild 4.9.



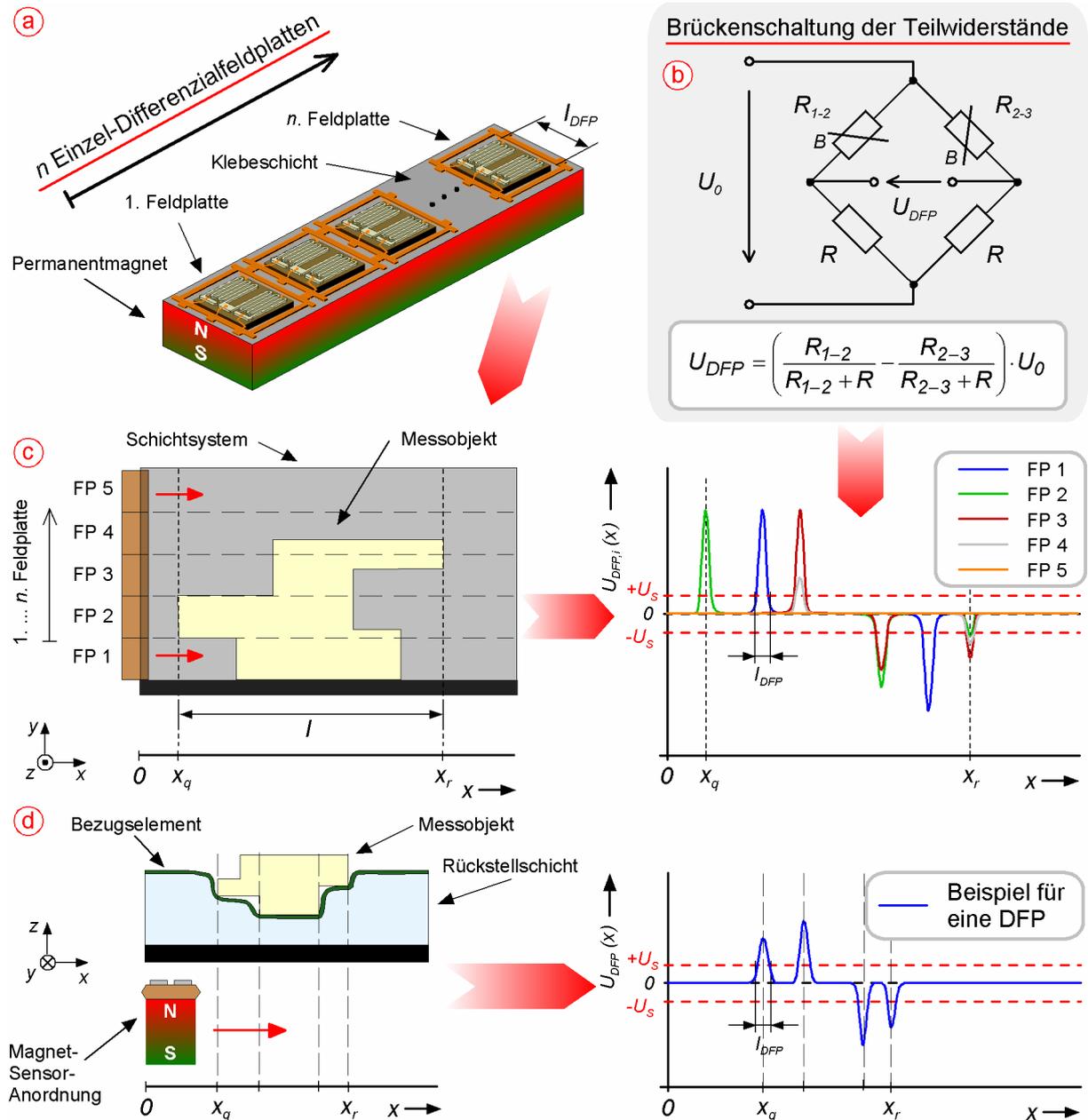
**Bild 4.9:** Beispiel für die Verwendung von Feldplatten-Widerstandspotentiometern  
 a) Sensor-Magnetanordnung – Positionierung der  $n$  Feldplatten des Sensorarrays auf der Magnetoberfläche  
 b) (Teil-)Widerstände einer Differenzialfeldplatte – Bezeichnungen, Anordnung und elektr. Schaltbild  
 c) Elektrisches Schaltbild für ein Sensorarray aus  $n$  in Reihe geschalteten Feldplatten  
 d) Ferromagnetische Bezugsobjekte mit einem Sensorarray erfassen  
 e) Anordnung zur Bestimmung der Breite eines nicht-magnetischen Messobjekts mit einem Sensorarray  
 f) Darstellung des Verlaufs der elektrischen Spannung  $U_{B, Poti}(x)$  bei Messung der Breite des Objekts nach e)  
 $a_{FP}$  – Mittenabstand zweier Feldplatten (FP);  $b_0$  – Abstand zw. Anschlagkante u. Sensorarray;  $b_{FP}$  – Feldplattenbreite;  $n$  – Feldplattenanzahl;  $x$  – Sensorarrayposition;  $R_{i,j}$  – Teilwiderstände einer Differenzial-Feldplatte (DFP);  $R_{DFP}$  – Gesamtwiderstand einer DFP;  $U_{B, Poti}$  – elektr. Spannungsabfall über dem Sensorarray

Die Objektbreite kann aus der über dem Potentiometer abfallenden Spannung  $U_{B, Poti}(x)$  für jeden Punkt  $x$  des Messbereichs aus

$$b(x) = b_0 + n \cdot b_{FP} \cdot \frac{U_{B, Poti}(x)}{U_{B, Poti, max}} \quad (\text{Gl. 4.21})$$

mit dem Abstand  $b_0$  des aus  $n$  Feldplatten gebildeten Potentiometers von der Anschlagkante, der Breite  $b_{FP}$  einer Einzel-Feldplatte sowie der bei vollständiger Komprimierung der Rückstellschicht über der gesamten Breite des Messbereichs des Potentiometers abfallenden Spannung  $U_{B, Poti, max}$  berechnet werden.

Auch für die Messung der Objektlänge bietet der Einsatz von Differenzial-Feldplatten Vorteile: Werden die beiden Teilwiderstände einer Feldplatte in einer abgeglichenen Halbbrücke verschaltet, so führt nur eine Änderung des Oberflächenprofils eines Messobjekts zu einem elektrischen Signal am Ausgang der Brücke, Bild 4.10.



**Bild 4.10:** Einsatz von Differenzial-Feldplatten zur Analyse der Oberflächengeometrie nicht-magnetischer Messobjekte

- Sensor-Magnetanordnung – Positionierung der n Feldplatten auf der Magnetoberfläche
- Brückenschaltung zur Erzeugung eines Spannungshubes bei Änderung der elektrischen Teil-Widerstände einer Differenzial-Feldplatte (DFP) an einer Objektkante
- Längenbestimmung mit 5 DFPs und strukturiertem Bezugselement (Draufsicht; vgl. Bild 4.8)
- Beispiel einer Oberflächenanalyse mit einer DFP und strukturiertem Bezugselement

$I_{DFP}$  – Länge einer DFP; n – Feldplattenanzahl; x – Position der Magnet-Sensoranordnung;  $x_q$ ,  $x_r$  – Orte der ersten bzw. letzten Kante des Messobjekts;  $R_i$  – elektrische (Teil-)Widerstände;  $U_0$  – Eingangsspannung;  $U_{DFP}$  – Ausgangsspannung der Brückenschaltung für eine Differenzial-Feldplatte;  $U_s$  – Schwellenspannung

Während der Betrag der Differenzspannung  $|U_{DFP}(x)|$  ein Maß für die Niveauänderung des Oberflächenprofils an der Stelle  $x$  ist, gibt die Polarität dieser Spannung Auskunft über die Art der Änderung, d. h. es ist zu erkennen, ob Vertiefungen oder Erhöhungen an der Objektoberfläche vorhanden sind. Schwellenspannungen  $U_S$  ermöglichen die Kompensation des Einflusses der Geometrie der Messanordnung, beispielsweise der Länge  $l_{DFP}$  einer Differenzial-Feldplatte. Aus den geometrischen Abständen der Messpunkte  $x_i$ , an denen Spannungshübe  $U_{DFP}(x_i)$  auftreten, lassen sich schließlich die Längen einzelner Abschnitte der aufliegenden Fläche eines Messobjekts bestimmen. Galvanomagnetische Sensorsysteme mit strukturierten Komponenten sind daher beim Einsatz von Differenzial-Feldplatten ideal für eine Oberflächenanalyse magnetisch nicht-leitender Objekte in der qualitätssichernden Fertigungskontrolle geeignet.

#### 4.2.4 Ermittlung von Sekundärinformationen

Neben der Bestimmung der Objektgeometrie eignet sich das Prinzip der flächendeckenden magnetischen Abstandsmessung zwischen der Sensoroberfläche und einer strukturvariieren, magnetisch leitenden Schicht zur Ermittlung von nicht-geometrischen Informationen. So sind beispielsweise die Objektmasse oder der Druck bzw. die Druckverteilung eines Objekts auf die Messfläche berechenbar. Weist die Rückstellschicht ein rein elastisches Verhalten auf, so gilt das „Hooke'sche Gesetz für Druckbeanspruchung“

$$\Delta p = \varepsilon \cdot E \quad (\text{Gl. 4.22})$$

mit der Druckdifferenz  $\Delta p$ , dem Elastizitätsmodul der Schichtanordnung  $E$  sowie der relativen Höhenänderung der Rückstellschicht  $\varepsilon$ . Aus

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad (\text{Gl. 4.23})$$

mit der Höhe  $h$  der Rückstellschicht und

$$\Delta p = \frac{F}{A}$$

mit der Kraft

$$F = |\vec{F}| = |\vec{F}_G| - |\vec{F}_R|$$

und der Gesamt-Auflagefläche des Messobjekts

$$A = \sum_i (l_i \cdot b_i) \quad (\text{Gl. 4.24})$$

mit den Abschnittslängen  $l_i$  (Gl. 4.18) der auf einer Breite  $b_i$  nach (Gl. 4.21) komprimierten Rückstellschicht folgt mit Gl. 4.22 für die Gesamtmasse  $m$  des Messobjekts:

$$m = \frac{\frac{\Delta h}{h} \cdot A \cdot E + F_R}{g} \quad (\text{Gl. 4.25})$$

mit der Erdbeschleunigung  $g$  und der aus der Elastizität der Materialien der Rückstellschicht und der magnetisch leitenden Schicht resultierenden Rückstellkraft  $F_R$ .

### 4.3 Galvanomagnetisches Fußmesssystem zur Längen- und Weitenbestimmung von Kinderschuhen

#### 4.3.1 Problematik der Fußmessung bei (Klein-)Kindern

Schuhe müssen passen! Der richtige Sitz des Schuhwerks ist eine Voraussetzung für eine gesunde Fortbewegung in allen Bereichen des täglichen Lebens. Grundsätzlich muss der Schuh dem Fuß derart angepasst sein, dass er diesem einerseits einen festen Halt, andererseits genügend Freiraum zur Bewegung der Zehen und der Fußgelenke bietet. Ist dies nicht der Fall, so drohen entweder teilweise erhebliche Verletzungen durch Umknicken oder Verdrehen des Fußes, eine mangelnde Durchblutung sowie Verkrampfungen. Diese Forderungen an Schuhe gelten für Erwachsene gleichermaßen wie für Kinder. Bei Kindern ist die Erfüllung der Forderungen jedoch weitaus wichtiger, weil die noch im Wachstum befindlichen Kinderfüße leicht durch häufiges oder dauerhaftes Tragen von etwa zu kleinen Schuhen zu Verformungen neigen, wodurch ein weit gefächertes Krankheitsbild entstehen kann. Die Folgen falsch angepasster Schuhe im Kindesalter reichen von allgemeinen Fußbeschwerden über Haltungsschäden bis hin zu Gehfehlern im Erwachsenenalter. Die Ursachen hierfür liegen beim Schuhkauf und sind vielfältiger Natur. Während Erwachsene sowohl über die Kenntnis ihrer richtigen Schuhgröße als auch über die Fähigkeit, den Sitz von Schuhen bei der Anprobe richtig zu bewerten, verfügen, mangelt es vor allem Kleinkindern am erforderlichen Beurteilungsvermögen. So wird der Schuhkauf durch die Eltern oft durch folgende Faktoren beeinflusst oder gar bestimmt:

- falsches Urteilsvermögen der Kinder,
- auf Unwissenheit der Kinder basierende, leichtfertige Akzeptanz,
- Kaufpreis der Schuhe in Verbindung mit dem sozialen Stand der Familie,
- Geschmack der Eltern,
- Modetrends,
- Kompetenz des Bedienpersonals sowie
- Stress und mangelnde Motivation bei Kind, Eltern und Verkaufspersonal.

Gerade das vermeintliche Urteilsvermögen der Kinder bei der Anprobe – ein kommunikationsfähiges Alter vorausgesetzt – darf keinesfalls zum Kaufentscheid führen. Seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts ist bereits bekannt, dass das Druckgefühl der Kinder keine verlässliche Aussage über den tatsächlichen Druck auf die Füße im Innern der Schuhe liefern kann. Kleinkinder etwa empfinden keinen Druckschmerz, da der kindliche Fuß derart weich und knochenarm ist, dass er sich mühelos dem zur Verfügung stehenden Schuhinnenraum anpasst. Kinder würden daher nicht einmal zwingend bemerken, dass ein Schuh etwa um mehrere Größennummern zu klein und insbesondere zu schmal ist. Die Festigung der Fußknochen setzt erst im Alter von ca. sechs Jahren ein, während der Wachstumsprozess des Fußes durchschnittlich im Lebensalter von 18 Jahren beendet ist. Die Folge ist eine gesundheitsschädigende Deformation des Fußes aufgrund der permanenten Stauchung [ELE-01].

Auch der soziale Stand der Familie ist ein häufiger Grund für das Tragen nicht passender Schuhe. Umfangreiche Untersuchungen bei Kindern in Wohnbereichen der Unter-, Mittel- und Oberschicht haben ergeben, dass mit dem Sozialstatus auch der Anteil an Kindern mit passendem Schuhwerk deutlich zunimmt, Tabelle 4.5. Diese Studien haben ferner ergeben, dass weder Alter noch Geschlecht der Kinder einen Einfluss auf die getragene Schuhgröße haben. Aussagen vom Fachpersonal im Schuhhandel sowie von Experten aus der Schuhindustrie belegen auch heute noch diese Untersuchungsergebnisse. So zeigt beispielsweise eine vom *DSI* (**D**as **S**chuh-**I**nstitut GmbH) veröffentlichte Statistik zu den im Rahmen der *WMS*-Aktionstage 2001 (**W**eiten-**M**aß-**S**ystem) durchgeführten Fuß- und Schuhmessungen, dass nur 46,7 % der Kinder passende Schuhe trugen [DSI-01].

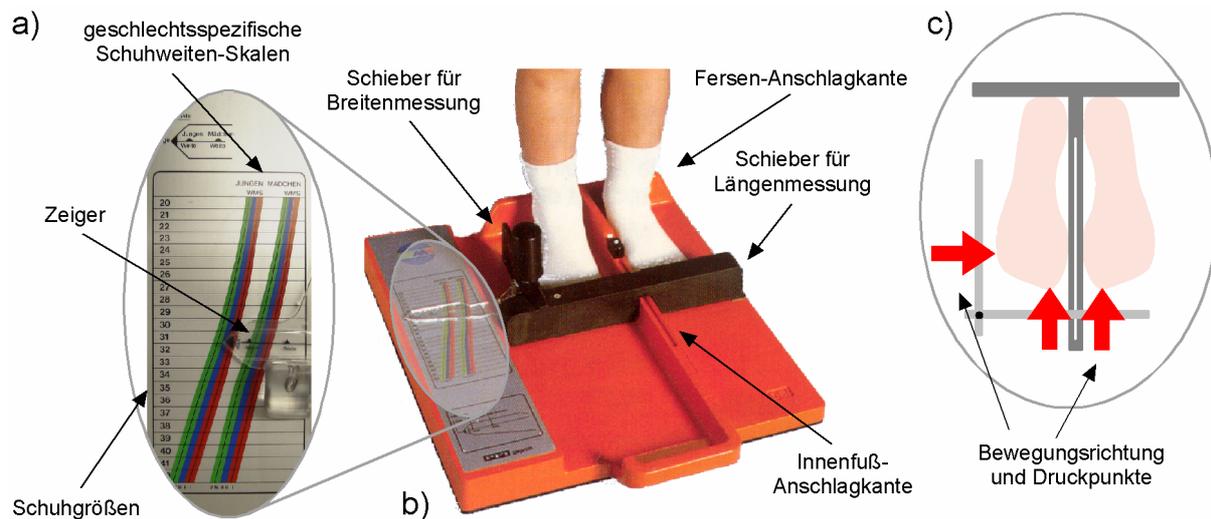
**Tabelle 4.5:** Einfluss des sozialen Status auf die Größe des Schuhwerks [RIN-82]

Sozialstatus	Probandenzahl	Schuhe passend		Schuhe zu kurz	
		Anzahl	%	Anzahl	%
Unterschicht	103	27	26,2	76	73,8
Mittelschicht	185	58	31,4	127	68,6
Oberschicht	167	91	54,4	76	45,5

Die Ursachen dieser Erscheinung sind vornehmlich in der sehr geringen Kaufkraft der Unterschicht zu sehen, die oftmals nicht den Kauf von einem dem Wachstum der Kinder angepassten Schuhwerk erlaubt. Während vor allem Kleinkinder pro Jahr durchschnittlich zwei Fuß- bzw. Schuhängen durchwachsen, steht in diesem Zeitraum aus finanziellen Gründen oft höchstens nur ein Paar Schuhe zur Verfügung. Dieses eine Paar wurde eventuell sogar bewusst zu groß gekauft, um durch ein Hineinwachsen den Nutzungszeitraum zu verlängern. Diese Schuhe bieten jedoch keinen ausreichenden Halt für den Fuß und sind ebenso schädlich für die Gesundheit wie zu kleine Schuhe. Andererseits lässt Tabelle 4.5 anhand der Daten für die Oberschicht erkennen, dass eine höhere Kaufkraft der Eltern nicht automatisch gleichbedeutend mit passendem Schuhwerk der Kinder ist. Vielmehr ist die richtige Schuhgröße neben Kaufkraft und Fürsorge der Eltern vor allem von einer korrekten Vermessung der Füße abhängig. Hierzu ist eine kompetente Fachberatung im Schuhhandel mit geeigneten Messgeräten unbedingt erforderlich. Das „Erfühlen“ der Schuhgröße etwa durch Ertasten der Zehenspitzen von außen durch das Obermaterial ist hier keine geeignete Messmethode, da die Kinder beim Anziehen nicht passender Schuhe unweigerlich die Zehen zusammenziehen. Somit entsteht selbst bei erfahrener Fachpersonal der Eindruck, dass die anprobierten Schuhe die richtige Größe besitzen. Auch das Anlegen von Messlatten an die Füße eines sitzenden Kindes führt zu einem nicht verwertbaren Messergebnis, da sich jeder Fuß in Länge und Weite beim Stehen – also im belasteten Zustand – ausdehnt.

Eine sinnvolle Lösung ist es demnach, Fußlänge und -breite im Stand des Kindes mit einem objektiven Messgerät zu erfassen. Die Messung muss an beiden Füßen separat erfolgen, da Studien belegen, dass bei weniger als 50% der Bevölkerung beide Füße gleich breit sind [RIN-82]. Eine Möglichkeit hierzu bieten seit einigen Jahren verschiedene Messsysteme, welche von der DSI vertrieben werden. Diese Geräte

bestimmen die Schuhgröße auf Grundlage der umfangreichen WMS-Maßtabelle [HDS-90], siehe Kapitel 4.3.2. Ein einfach zu bedienendes, rein mechanisches Fußmessgerät zeigt Bild 4.11. Fußlänge und -weite werden bei diesem Gerät mittels zweier Schieber abgenommen, welche auf der systemimmanenten Skala direkt die adäquaten Schuhdaten anzeigen.



**Bild 4.11:** Mechanisches Kinderfuß-Messgerät der DSI

- a) Skalen für Schuhgröße und -weite; Markierung über Zeiger an Schiebern  
 b) Messgerät während einer Messung [DSI-99]  
 c) Messprinzip mit Darstellung der Bewegungsrichtung Schieber und der Druckpunkte an den Kinderfüßen

Obwohl verschiedene Fußmessgeräte am Markt erhältlich sind, werden sie nur selten eingesetzt. Gründe hierfür sind die umständliche Bedienung und die als Folge oftmals fehlerhaften Ergebnisse. So muss beispielsweise bei Verwendung des Messgerätes nach Bild 4.11 die Messung für jeden Fuß einzeln durchgeführt werden, da zwar zwei kombinierte Längenschieber, jedoch nur ein Weitenschieber vorhanden ist. Dieser Umstand erfordert ein hohes Maß an Geduld und Einfühlungsvermögen beim Verkaufspersonal, weil eine Messung zudem nur im Ruhezustand des Fußes korrekt durchgeführt werden kann. Gerade bei kleinen Kindern, die sich mit einem Gerät konfrontiert sehen, welches rundum ihre Füße berührt, ist dieser Zustand nur selten für kurze Augenblicke zu erreichen. Das Messergebnis wird zusätzlich dadurch beeinträchtigt, dass Kinder beim Berühren des Längenschiebers oftmals reflexartig die Zehen zusammenziehen. Dies macht ein letztlich das Ergebnis weiterhin verfälschendes Herunterdrücken der Zehen durch das Verkaufspersonal erforderlich. Bei dieser doppelten Beanspruchung des Personals kann es leicht zu Ablesefehlern kommen, so dass eine falsche Schuhgröße gewählt wird. Mit steigender Tagesarbeitszeit und/oder Kundenzahl treten zudem Ablesefehler verstärkt auf.

Die dargestellten Schwierigkeiten bei der Fußmessung verdeutlichen im Hinblick auf die gesundheitlichen Folgen falschen Schuhwerks die Notwendigkeit einer objektiven, rückwirkungsfreien und reproduzierbaren Messung.

#### **4.3.2 Anforderungen an Kinderfuß-Messsysteme**

Messsysteme für Kinderfüße unterliegen denselben grundsätzlichen Anforderungen wie entsprechende Systeme zur Fußmessung bei Erwachsenen:

##### Grund-Anforderungen an Fußmesssysteme

- Unabhängige separate Erfassung zumindest der Fußlänge beider Füße.
- Schuhgrößenbestimmung aus Brandsohlenlänge (Bild 4.12) des längeren Fußes.
- Messung an den durch das Körpergewicht des Probanden belasteten Füßen.
- Geringe Messdauer, um Fehlern durch Bewegung der Testperson vorzubeugen.
- Verständliche und eindeutige Anzeige der ermittelten Schuhgröße.

Zur Reduzierung von Messabweichungen sowie zur Steigerung des Komforts für den Probanden während einer Messung sind erweiterte Anforderungen empfehlenswert:

##### Erweiterte Anforderungen an Fußmesssysteme

- Zeitgleiche Messung an beiden Füßen.
- Optionale Angabe der Tendenz zwischen zwei Schuhgrößen.
- Optionale Angabe der geometrischen Fußmaße als Vergleichsparameter.

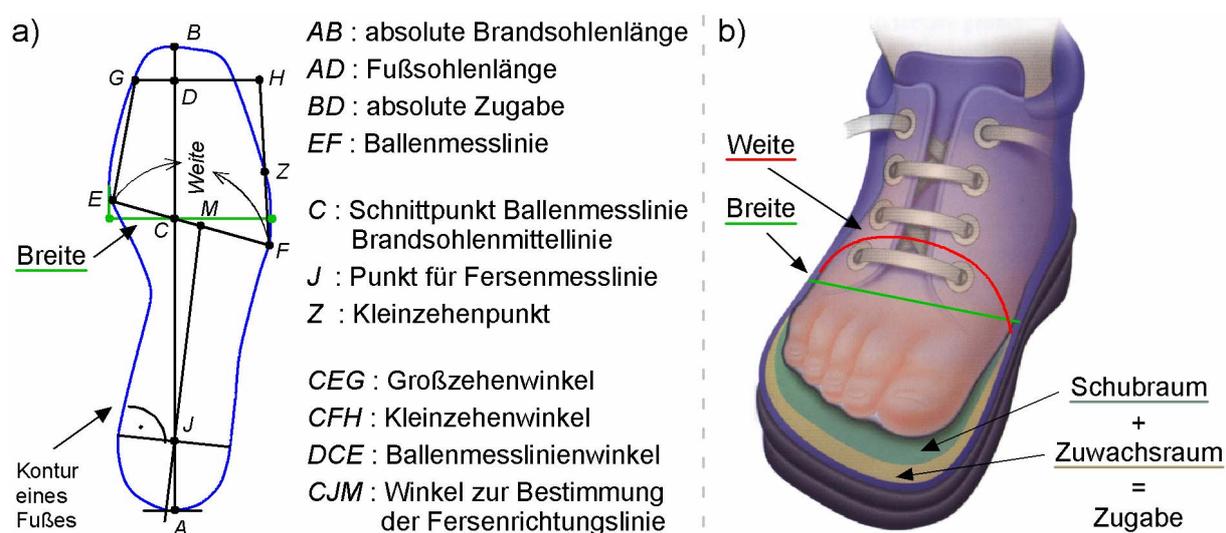
Für den besonderen Fall der Kinderfuß-Messung gelten darüber hinaus weitere Anforderungen, die unbedingt zu erfüllen sind, um den speziellen Problemen dieses Anwendungsbereiches vorzubeugen, vgl. Kapitel 4.3.1:

##### Spezielle Anforderungen an Kinderfuß-Messsysteme

- Berührungslose Messung zur Vermeidung von Verkrampfungen und reflexartigem Zusammenziehen der Zehen.
- Interessantes und beruhigendes Gerätedesign zur Motivierung der Kinder.
- Extrem kurze Messdauer, um ein korrektes Ergebnis auch bei Kleinstkindern und nervösen Kindern zu garantieren.

- Unabhängige und separate Messung beider Fußbreiten.
- Schuhgrößenbestimmung nach WMS-Maßtabelle mit Angabe der Fußweite.
- Geschlechtsspezifische Schuhweiten-Bestimmung nach WMS-Richtlinien.

Die WMS-Richtlinie wurde 1990 auf Basis langjähriger, umfangreicher Studien vom ‚Arbeitskreis Kinderschuhe‘ des Hauptverbandes der Deutschen Schuhindustrie e. V., der die Zuverlässigkeit und Allgemeingültigkeit der Daten garantiert, herausgegeben. Ziel der Richtlinie ist eine eindeutige Zuordnung der Schuhgrößen nach dem auch für Erwachsene geltenden Maßsystem *Pariser Stich* zu den reinen geometrischen Abmessungen der Kinderfüße. Kernstück der Richtlinie ist das für alle Fußgrößen gültige, so genannte Brandsohlen-Konstruktionsschema zur Definition der Messpunkte und der zugehörigen Mess- und Berechnungsvorschriften, Bild 4.12.



**Bild 4.12:** Brandsohlen-Konstruktionsschema gemäß WMS-Richtlinie

- a) Brandsohlen-Konstruktionsschema mit relevanten Punkten am Fuß [HDS-90]  
 b) Darstellung zur Definition von Weite, Breite und Zugabe [ELE-01]

Die WMS-Richtlinie empfiehlt zur korrekten Messung der Fußbreite bzw. -weite ein Anlegen der Fußinnenseite in Höhe des Ballens und der Ferse an einer gemeinsamen Anlageschiene. Diese Empfehlung steht zwar im Widerspruch zur Forderung nach einem berührungslosen Messverfahren bei Kindern, kann jedoch akzeptiert werden, da es sich nicht um eine bewegliche Schiene handeln muss, welche Reflexe und Verkrampfungen hervorrufen würde. Die Fußlänge entspricht gemäß dem Brandsohlen-Konstruktionsschema der Verbindungsgeraden zwischen den Punkten **A** an der Ferse und **D** an der Fußspitze. Durch Addition des Übertritts (Strecke **BD**), der als Zugabe zur Fußlänge (**AD**) im Schuhinneren das Abrollen des Fußes beim

Gehen ermöglicht, ergibt sich die Brandsohlenlänge ( $AB$ ), vgl. Bild 4.12. Der Übertritt ist von der tatsächlichen Fußlänge abhängig und variiert von  $BD = 9$  mm bei Schuhgröße 18 bis  $BD = 15$  mm ab Schuhgröße 31. Die Zugabe hängt zudem davon ab, wie hoch der Fuß beim Gehen angehoben werden muss. So kann bei Schuhen mit hohem Absatz, wie beispielsweise Damen-Pumps, der Übertritt reduziert werden.

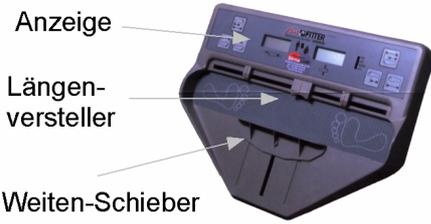
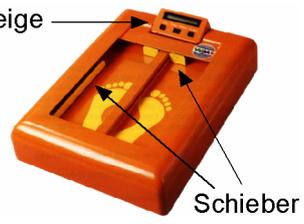
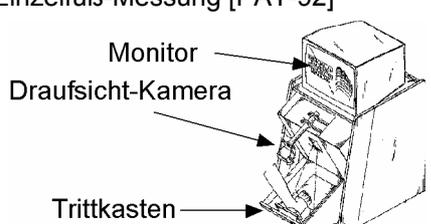
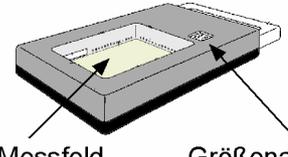
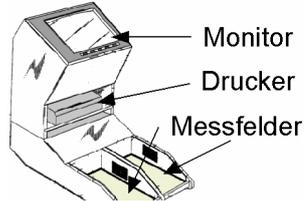
Die Wahl der Schuhgröße erfolgt auf Basis der WMS-Längentabelle entsprechend der gemessenen Fußlänge bzw. der berechneten Brandsohlenlänge. Sie berücksichtigt mit der Zugabe zur gemessenen Fußlänge den beim Gehen bzw. beim Anheben des Fußes notwendigen Schubraum für die Zehen ebenso wie einen kleinen Zuwachsraum als Platzreserve für den im Wachstum befindlichen Kinderfuß, Bild 4.12. Die zugehörige Weite der Schuhe bestimmt sich aus der Fußbreite, die bei 63% der Fußlänge (Punkt C) orthogonal zu dieser zu messen ist. Die WMS-Weitentabellen ordnen jeder Schuhgröße 5 Weitenklassen – *extra-schmal* (XS), *schmal* (S), *mittel* (M), *weit* (W) und *extra-weit* (XW) – zu. Die Fußbreiten-Stufung dieser Klassen variiert zwischen 1,8 mm und 2,8 mm. Die Forderung nach einer geschlechtsspezifischen Fußmessung resultiert aus der unterschiedlichen Anatomie von Frauen- und Männerfüßen, die ab Schuhgröße 36 deutlich erkennbar ist und daher zur Bildung separater WMS-Weitentabellen für beide Geschlechter geführt hat.

### 4.3.3 Nachteile existierender Kinder-Fußmesssysteme

Am Markt sind derzeit verschiedene Systeme zur Bestimmung der Länge und der Weite bzw. der Breite von Füßen – insbesondere von Kinderfüßen – bekannt. Diese Geräte basieren überwiegend auf einer rein mechanischen, daher berührenden Vermessung der Füße. So werden manuell oder automatisch Anschlagleisten von vorn sowie von der Seite bis zur Kontaktierung an die fixierten Füße heranbewegt.

Weitere bekannte Geräte führen eine optische Vermessung der Füße mittels Fotokamera- oder Lichtschranken- bzw. Lichtvorhangsysteme durch. Tabelle 4.6 gibt einen kurzen Überblick über derzeit bekannte Fußmessgeräte. Zudem wird unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.3.2 formulierten Anforderungen sowie unter dem Aspekt einer täglichen Nutzung der Systeme in der Praxis eine Auswahl der jeweils prinzipbedingten Nachteile vorgestellt.

Tabelle 4.6: Fußmessgeräte für die Kinderfuß-Messung – Überblick und Nachteile

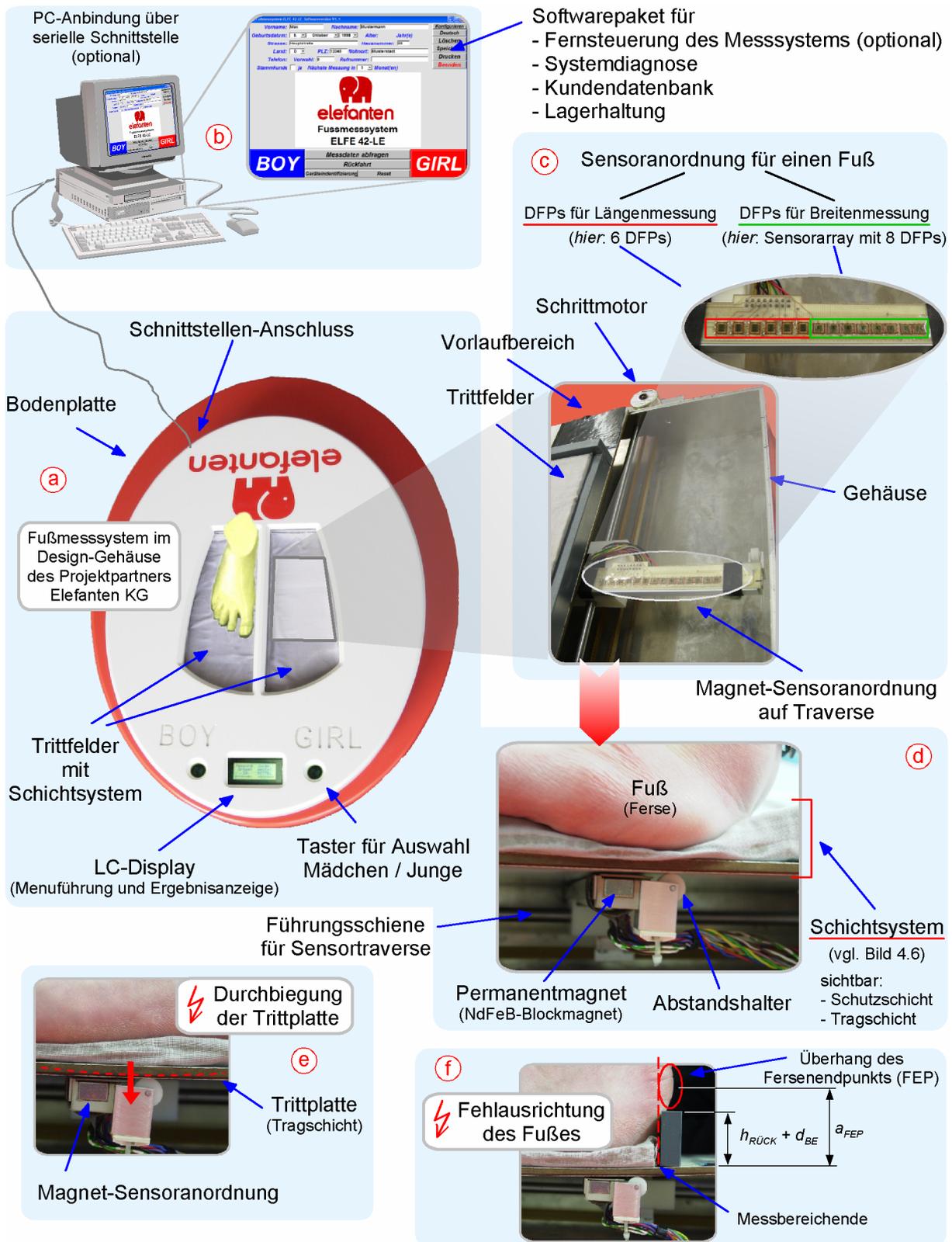
Prinzip	bekannte Ausführungsformen	Nachteile
mechanisch (manuell)	(1) System zur Einzelfußmessung [DIR-00]  <p>Anzeige Längen-versteller Weiten-Schieber</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berühren der Füße kann zum reflexartigen Zusammenziehen der Zehen führen. Hierdurch entstehen Fehlmessungen aufgrund der Reduzierung der tatsächlichen Fußlänge. Mehrfachmessungen werden somit notwendig, die zur Stresssteigerung beim Kind und beim Personal führen; → (1) – (3).</li> <li>• Hoher Zeitbedarf erforderlich, da Anschlagleisten langsam bzw. vorsichtig verschoben werden müssen. Hierdurch entsteht eine enorme Anforderung an die Geduld bzw. die Motivation des Kindes beim Ausrichten und Messen der Füße; → (1) – (3).</li> <li>• Gefahr von Ablesefehlern bei rein manuell zu betätigenden mechanischen Geräten; → (1) + (2).</li> </ul>
	(2) WMS-System [DSI-99]  <p>(vgl. Bild 4.11)</p>	
mechanisch (automatisch)	(3) Vollautomatisches WMS-System [DSI-99]  <p>Anzeige Schieber</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehler durch Unruhe beim Wechsel der Füße; → (1) + (2).</li> <li>• Unvollständige Messungen (nur ein Fuß) aufgrund von Stress oder mangelnder Motivation; → (1) + (2)</li> </ul>
optisch	(4) Mehr-Kamera-System zur Einzelfuß-Messung [PAT-92]  <p>Monitor Draufsicht-Kamera Trittkasten</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Systempreis, insbesondere bei den Fotokamerasystemen, durch enormen apparativen Aufwand; → (4) + (6).</li> <li>• Hoher Platzbedarf des Gerätes aufgrund der Baugröße der Komponenten; → (4).</li> <li>• Messung findet in einem kammerartigen Bereich statt. Hier können Ängste beim Kind hervorgerufen werden, wodurch ein Verkrampfen der Füße bzw. ein Zusammenziehen der Zehen ausgelöst werden kann; → (4) – (6).</li> <li>• Die funktional bedingte Lichtempfindlichkeit optischer Systeme führt zu einer Störanfälligkeit gegenüber Fremdlicht. Dadurch wird die Auswahl des Gerätestandorts stark eingeschränkt; → (4) – (6).</li> <li>• Störanfälligkeit durch Verschmutzung. Staub und Fette wie z. B. Fußschweiß führen zu Irritationen der Lichtstrahlen, welche Fehlmessungen verursachen; → (4) + (6).</li> </ul>
	(5) Lichtschranken-Systeme mit Diodenzeilen zur Einzelfuß-Messung [PAT-81] bzw. mit beweglichen Traversen [PAT-01a]  <p>Tritt-/Messfeld Größenanzeige</p>	
	(6) Lichtvorhang-System zur Parallelvermessung beider Füße [PAT-01b]  <p>Monitor Drucker Messfelder</p>	

#### 4.3.4 Magnetisches Fußmesssystem mit strukturierten Komponenten

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte galvanomagnetische Fußmesssystem zur Bestimmung der Schuhgröße bei Kindern nutzt die in Kapitel 4.2 vorgestellte Codierung geometrischer Informationen nicht-magnetischer Objekte durch eine temporäre Strukturvariation magnetisch leitender Elemente. Dieses in einem Industrieprojekt in Kooperation mit der Elefanten KG, Kleve realisierte Gerät bestimmt aus der zeitgleichen Längen- und Breitenmessung beider Füße die korrekte Schuhgröße durch Detektion des jeweils längeren und breiteren Fußes. Die Grundlage für die Zuordnung der auf dem systemeigenen Display angezeigten Schuhgröße bilden die im Gerät gespeicherten WMS-Tabellen, vgl. Kapitel 4.3.2. Entsprechend dieser Richtlinien ermöglicht das System eine geschlechtsspezifische Schuhgrößenbestimmung, welche vom Bedienpersonal auszuwählen ist, Bild 4.13a.

Die für beide Füße separaten Trittfelder sind mit einer Stoffschicht zum Schutz der darunter liegenden, magnetisch leitenden Schicht (Bezugselement; *hier*: FPC-Folie, Typ C 350 der Fa. EPCOS AG, [EPC-01]) vor einer mechanischen Beschädigung beim Betreten der Messfelder versehen. Die Sensoreinheit des Systems wird während des Messvorgangs unterhalb der Trittfelder entlang deren gesamter Länge von einem Schrittmotor verfahren. Im Standbereich des Fußes wird die Rückstellschicht komprimiert, so dass der Abstand zwischen den Sensoren und dem Bezugselement reduziert wird, Bild 4.13c. Dieser verminderte Abstand führt zur Erkennung der Fußgrenzen. Die Strukturänderung des an das Profil des Fußes gepressten Bezugselements bewirkt während des Messvorgangs einen Spannungshub am Ausgang einer Brückenschaltung, die jeweils die beiden Teilwiderstände einer Differenzial-Feldplatte auswertet. Mehrere dieser Feldplatten sind parallel auf einer Traverse angeordnet. Sie bilden zusammen mit dem Widerstandspotentiometer für die Breitenmessung, das aus einer Reihenschaltung von weiteren Feldplatten besteht, die Sensoreinheit des Messsystems, vgl. Bild 4.10.

Die Tragschicht darf auch unter Maximalbelastung keine Krümmung aufweisen, da diese Art der Abstandsreduzierung zwischen der Sensorebene und der strukturierten FPC-Folie zu fehlerhaften Messwerten führt, Bild 4.13e Die mittlere Anschlagleiste gewährleistet zusammen mit den Kanten der Gehäuseaussparungen für die Trittfelder die parallele Ausrichtung der Brandsohlenlänge zur Bewegungsrichtung der Sensoreinheit.



**Bild 4.13:** Galvanomagnetisches Fußmesssystem mit strukturierten Komponenten

- a) Fußmesssystem im Gehäuse
- b) PC-mit Softwarepaket zur Steuerung, Diagnose etc. (optional)
- c) Geöffnete Messeinheit mit Sensortraverse, Trittfeldern und Vorlaufbereich; Anordnung der Sensoren
- d) Fußmessung ohne hintere Anschlagkante; Sensortraverse unter dem Trittfeld
- e) Unzulässige Durchbiegung der Tragschicht (hier: bei geöffneter Systemwand)
- f) Fehlerhafte Ausrichtung des Fußes mit erhöhtem Fersenendpunkt

$a_{FEP}$  – Abstand des Fersenendpunkts von der Tragschicht;  $d_{BE}$  – Dicke des Bezugselements;  
 $h_{RÜCK}$  – Höhe der Rückstellschicht

Eine hintere Anschlagleiste bietet optional die Möglichkeit, die Position der Ferse zu fixieren, um lediglich das Fußende an den Zehen messtechnisch zu erfassen. Diese Option ermöglicht die Vermessung von Füßen, deren Anatomie derart beschaffen ist, dass der Fersenendpunkt die magnetisch leitende Schicht nicht deformieren kann, Bild 4.13f. Die Bedingung für eine korrekte Fußmessung ohne Fersenanschlag lautet daher

$$a_{FEP} < h_{RÜCK} + d_{BE} \quad (\text{Gl. 4.26})$$

$a_{FEP}$  bezeichnet den vertikalen Abstand des Fersenendpunktes von der Auftrittsfläche des Fußes im belasteten Fall,  $h_{RÜCK}$  und  $d_{BE}$  die Schichtstärken der Rückstellschicht und der als Bezugselement fungierenden FPC-Folie im unbelasteten Fall.

Der Vorlaufbereich (Bild 4.13c) dient zur Kalibrierung des Systems vor jeder Messung. Aufgrund der Temperaturempfindlichkeit der eingesetzten Differenzial-Feldplatten sollten trotz einer elektronischen Temperaturkompensationsschaltung vor jeder Messung aktuelle Parameter für alle Sensorelemente ermittelt werden. Die in einem Teil des Vorlaufbereichs angebrachte Ferritfolie dient beispielsweise zur Bestimmung des maximalen Messsignals  $U_{B,Poti,max}$  (vgl. Gl. 4.21) am Widerstandspotentiometer zur Messung der Fußbreite. Entlang des Folienabschnitts im Vorlaufbereich entspricht der Abstand zwischen dem Bezugselement und der Oberfläche der Sensorzeile für die Breitenmessung im gesamten Messbereich konstant einer vollständigen Komprimierung der Rückstellschicht durch ein Messobjekt im Trittfeld.

Bild 4.13c zeigt die Anordnung der Differenzial-Feldplatten (DFP) auf der Sensortraverse zur Vermessung eines Fußes. Bei normalem Wachstum von Kindern liegt die zu erwartende Schuhgröße altersabhängig zwischen Größe 18 und 42. Um in diesem Schuhgrößenbereich die Fußlänge durch Detektion der beiden entferntesten Punkte auf der Brandsohlenlinie zu bestimmen, sind sechs einzeln angesteuerte Differenzial-Feldplatten ausreichend. Ebenso genügen elf in Reihe angeordnete und verschaltete DFPs des Typs FP 412 D 250, um Schuhweiten von 18 XS bis zu 42 XW bestimmen zu können. Dieser Weitenbereich entspricht bei der gewählten Platzierung auf der Sensortraverse Fußbreiten zwischen 54 mm und 122 mm.

Die Schrittmotorsteuerung sorgt für eine äquidistante Abtastung beider Trittfelder in Schrittweiten von  $\Delta s = 0,35 \text{ mm}$ . Diese feste Distanz bildet die Grundlage für die

Berechnung der zunächst metrischen Fußdaten. Für die Fußlängen (links, rechts)  $l_{F_{l,r}}$  gilt

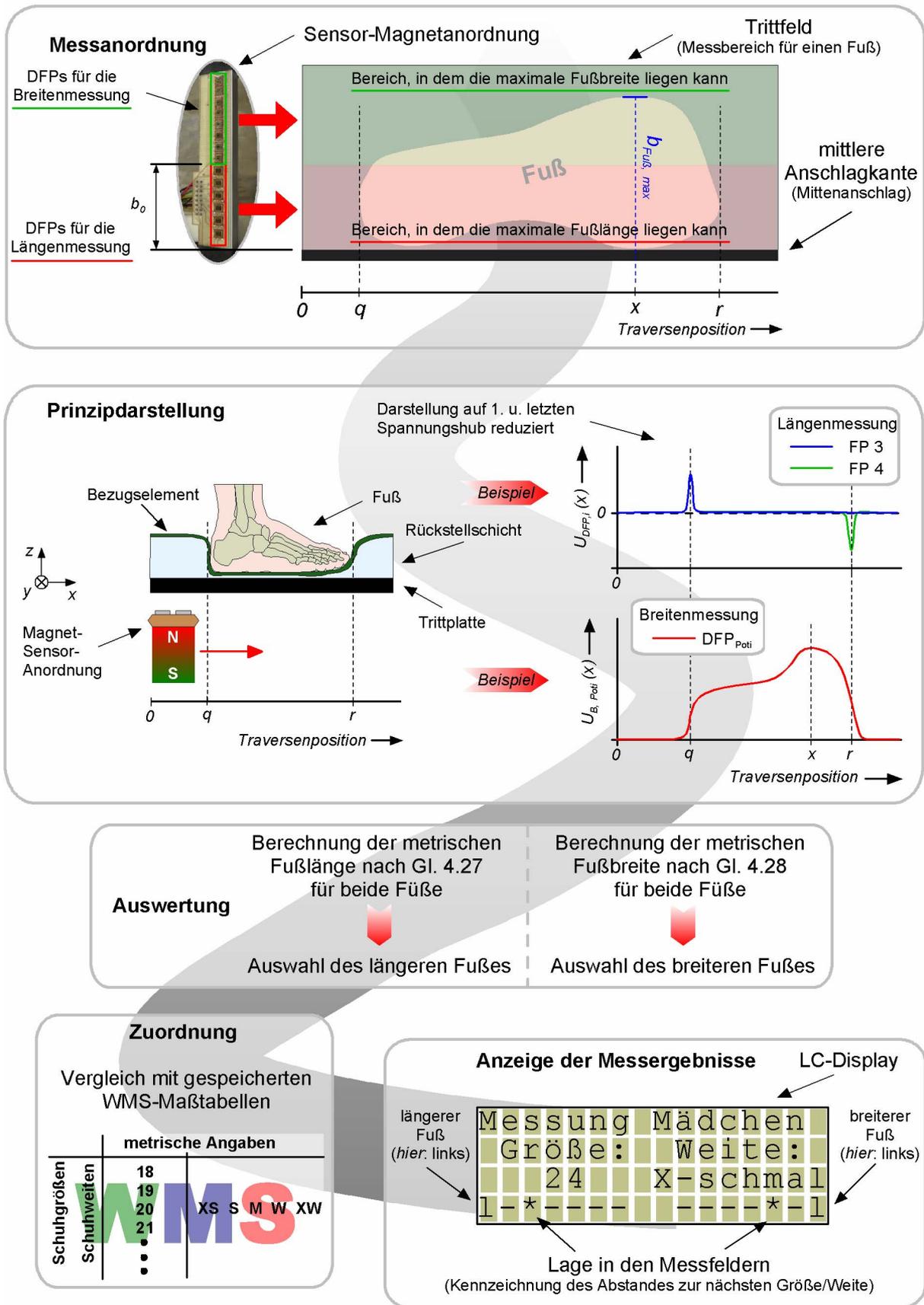
$$l_{F_{l,r}} = \Delta s \cdot (r_{l,r}(U_{End_{l,r}}) - q_{l,r}(U_{Anf_{l,r}})) \quad (\text{Gl. 4.27})$$

mit den den Messpunkten äquivalenten Schrittnummern  $q(U_{Anf})$  und  $r(U_{End})$ , an denen die voreingestellte Schwellenspannung erstmalig bzw. letztmalig erreicht oder überschritten wird. Die Fußbreiten (links, rechts)  $b_{F_{l,r}}$  werden gemäß

$$b_{F_{l,r}} = b_0 + \frac{(U_{x_{l,r}} - U_{B,Poti,min_{l,r}})}{(U_{B,Poti,max_{l,r}} - U_{B,Poti,min_{l,r}})} \cdot b_{Poti} \quad (\text{Gl. 4.28})$$

mit dem Abstand des Sensorarrays für die Breitenmessung von der mittleren Anschlagkante für den Innenfuß  $b_0$ , den gemessenen Maximalspannungen je Fuß  $U_x$ , den im Vorlaufbereich für beide Seiten separat ermittelten Sensorparametern  $U_{B,Poti,min}$  (Spannungsminimum) und  $U_{B,Poti,max}$  (Spannungsmaximum) und der Breite der beiden Widerstandspotentiometer  $b_{Poti}$  berechnet. Das jeweils größere Maß der Fußlänge und der Fußbreite dient abschließend der Zuordnung der Schuhgröße gemäß den WMS-Richtlinien. Der Gesamttablauf einer Fußmessung ist in Bild 4.14 zusammenfassend dargestellt.

Das Gerät gestattet neben der geforderten Ausgabe der richtigen Schuhgröße mit Weitenangabe wahlweise auch die Anzeige der gemessenen metrischen Längen- und Breitenmaße über das systemimmanente Display. Geschultem Bedienpersonal ist so die Möglichkeit gegeben, eine Prognose über die nächste Änderung der Schuhgröße des Kindes anhand der Lage der Messwerte innerhalb der definierten Maßintervalle des WMS zu erstellen. So kann vermieden werden, dass Schuhe über einen langen Zeitraum weiter getragen werden, obwohl die Füße des Kindes seit der letzten Messung über die ermittelte Schuhgröße hinaus gewachsen sind.



**Bild 4.14:** Ablauf einer Fußmessung bzw. Schuhgrößenbestimmung mit dem galvanomagnetischen Fußmesssystem mit strukturierten Komponenten

$b_0$  – Abstand des Widerstandspotentiometers für die Breitenmessung vom Mittenanschlag;  $q, r, x$  – Messorte;  $U_{B, Poti}$  – Spannung am Widerstandspotentiometer;  $U_{DFP,i}$  – Brückenausgangsspgs. der  $i$  abgeglichenen DFPs

#### 4.4 Grenzen der galvanomagnetischen Geometrievermessung nicht-magnetischer Körper

Das galvanomagnetische Verfahren zur Geometrievermessung nicht-magnetischer Körper basiert auf der durch geometrische Verformung, z. B. infolge mechanischen Druckes, generierten Abbildung einer Objektgeometrie auf die geometrische Gestalt einer flexiblen, magnetisch leitenden Schicht. Sowohl die Abbildung als auch deren exakte magnetische Vermessung unterliegen Bedingungen, die das Spektrum potenzieller Messobjekte einschränken:

- (1) Eine formgetreue Abbildung kann nur dann realisiert werden, wenn die Rückstellschicht folgende Eigenschaften aufweist:
  - (a) Erzeugung einer Gegenkraft, um die magnetisch leitende Schicht (Bezugselement) möglichst lückenlos an die Konturen des Messobjekts im Kontaktbereich zu pressen.
  - (b) Die Höhe darf den Wirkbereich der Sensoren nicht übersteigen, um die Erfassung aller Kontaktpunkte des Objektes mit dem Bezugselement bzw. der abschließenden Schutzschicht zu gewährleisten.
  - (c) Das Material der Rückstellschicht muss einerseits maximal kompressibel sein, andererseits im Entlastungsfall vollständig in die Ursprungsform zurückkehren.
- (2) Das Messobjekt muss ein Mindestgewicht aufweisen oder mit einer Zusatzmasse versehen werden, um die Gegenkraft der Rückstellschicht an den Kontaktstellen zu überwinden.
- (3) Die Tragschicht darf im Messbereich keine Durchbiegung aufweisen, um eine störungsfreie Bewegung der Sensortraverse zu gewährleisten sowie um Messabweichungen durch fehlerhafte Abstände zu vermeiden. Die Stärke der Tragschicht ist jedoch durch den Wirkbereich der eingesetzten Sensoren begrenzt. Ein Messobjekt darf daher eine maximale Gewichtskraft, welche durch die Materialeigenschaften der Tragschicht festgelegt ist, nicht überschreiten. Magnetisch und/oder elektrisch leitende Materialien sind generell auszuschließen.