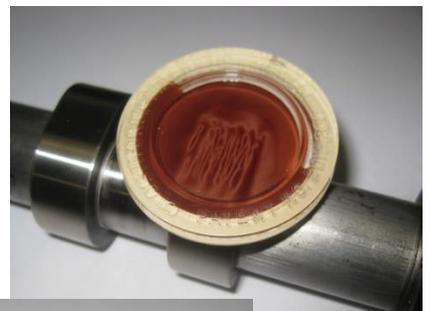


Aktualisierte Version 1.2

Restmagnetismus-Messung von ferromagnetischen Bauteilen



Maurer Magnetic AG
8627 Grüningen
Switzerland

Maurer Magnetic AG, Ihr Spezialist für:

- Industrielle Entmagnetisierereinrichtungen
- Magnetismus-Messtechnik
- Entmagnetisierung als Dienstleistung
- Problemlösungen in Magnetismus
- Magnete und Magnet-Systeme



Zusammenfassung

Moderne Herstellungsverfahren verwenden zunehmend komplexe und sensible Fabrikationsprozesse, welche auf eine sehr hohe Qualität der Zwischenprodukte angewiesen sind. Fertigungsprozesse wie z.B. Beschichtungsverfahren, Schweissprozesse oder Urform- und Stanzprozesse sind auf möglichst tiefen Bauteil bzw. Werkzeug-Restmagnetismus angewiesen. Die Montage von modernen Verbrennungsmotoren, präzisen Kugellagern, Getriebekomponenten, Elektronik-Bauteilen oder medizinischen Injektionssystemen erfordert die Einhaltung von strengsten Sauberheitskriterien. Zur Erfüllung der zunehmend hohen Restschmutzkriterien sind Reinigungsprozesse auf möglichst tiefen Bauteil-Restmagnetismus angewiesen. Die Forderung nach geringem Restmagnetismus hat sich aus diesen Gründen zu einem entscheidenden Qualitätsmerkmal entwickelt.

Der genauen Messung von Restmagnetismus auf ferromagnetischen Bauteilen kommt deshalb eine neue Bedeutung zu. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Dokumentes gibt es zum Thema Messung von Restmagnetismus auf Bauteilen weder breiter anerkannte Vorgehensweisen noch Normen.

Restmagnetismus von Bauteilen wird üblicherweise mit handgehaltenen Magnetfeldstärke-Messgeräten gemessen. Andere gängige Bezeichnungen für Feldstärke-Messgeräte sind Gaussmeter oder Teslameter. Restmagnetismus kann nur an der Oberfläche eines Bauteils gemessen werden. Das Ergebnis hängt von der Konstruktion und Gestaltung der Sonde, ihrer Position, und der Konfiguration des Magnetfeldes ab.

Eine genauere Betrachtung von typischen Produktionsteilen aus ferromagnetischen Stählen zeigt, dass die Magnetisierung meistens stark inhomogen ist. Die aus der Oberfläche austretenden Streufelder weisen oft nur kurze Wege auf, was eine geeignete Suchmethodik zum Finden des maximalen Restmagnetismus auf der Oberfläche erforderlich macht.

Die Bedeutung der oberflächennahen Feldstärke spielt im Zusammenhang mit folgenden industriellen Prozessen eine entscheidende Rolle:

- Reinigungsverfahren (Anhaftung von magnetisierbaren Partikeln)
- Beschichtungsverfahren (z.B. bei Nickel- oder Chrombeschichtungen)
- Schweissverfahren (z.B. bei Elektronenstrahl-Schweissen)

Eine weitere wichtige Einflussgrösse auf die Messergebnisse sind Umgebungsfelder, wie z.B. das Erdmagnetfeld. Diese Felder erzeugen in ferromagnetischen Materialien induzierte Flüsse, welche sich vektoriell zum Restmagnetismus des Bauteils addieren.

Die meist inhomogene Magnetisierung von Bauteilen und die Beeinflussung der Messwerte durch umgebende Magnetfelder führt zu neuen Anforderungen an Restmagnetismus-Messverfahren. Ohne geeignete Messinstrumente und definierte Vorgehensweisen sind Messungen ungenau und können nur schlecht reproduziert werden. Im Messbereich von 0 bis ca. 4A/cm sind bei Wiederholmessungen Abweichungen von über 100% keine Seltenheit. Die aus Risikobetrachtungen festgelegten Grenzwerte für Restmagnetismus bewegen sich genau in diesem kritischen Bereich von 2 bis 4A/cm bzw. 2.5 bis 5 Gauss.

In diesem White Paper werden geeignete Vorgehensweisen und Messinstrumente vorgestellt, welche die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit von Restmagnetismus Messungen von ferromagnetischen Bauteilen mit industriell einsetzbaren Messmitteln verbessern.

Folgenden drei Einflussfaktoren fällt eine besondere Bedeutung zu:

- Die Magnetisierung des Bauteils (Dipol- oder feinpolige Magnetisierung)
- Der Einfluss des Erdmagnetfeldes oder anderer Umgebungs-Magnetfelder
- Die Bedeutung der Suchmethodik zum Finden des maximalen Restmagnetismus auf Oberflächen

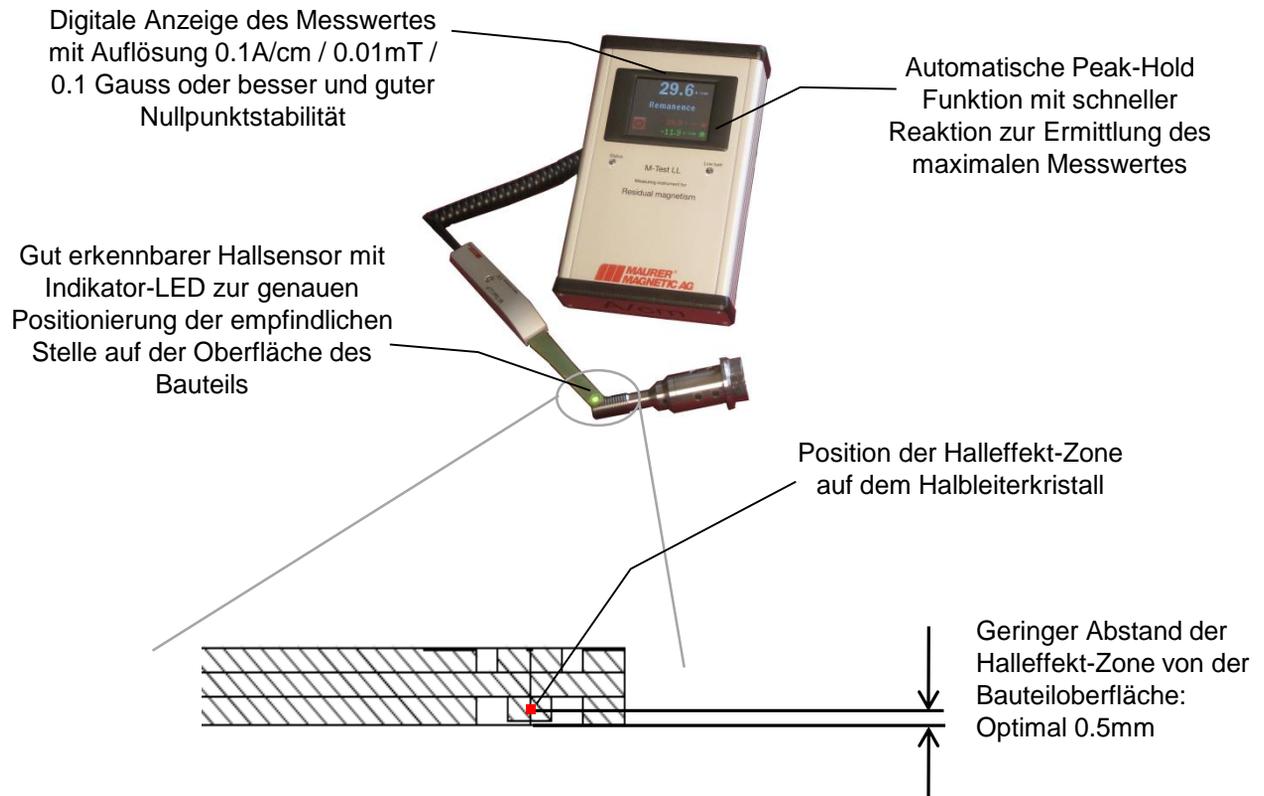
Feldstärke von Magnetfeldern

Die Dichte der Feldlinien nimmt mit zunehmender Distanz überproportional vom magnetischen Pol ab. Die Stärke der Abnahme hängt im Wesentlichen ab von der Konfiguration der Pole, erkennbar an den Poltrennungen, und von deren Verlauf auf der Oberfläche des Bauteils. Beispielsweise nimmt die Feldstärke H eines einzelnen magnetischen Dipols in grösserem Abstand r gemäss $H \sim 1/r^3$ ab.

Die oberflächennahe Feldstärke eines Bauteils mit inhomogen verteiltem Magnetismus lässt sich nur durch Messungen darstellen. Typischerweise sinkt die Feldstärke an der Oberfläche bereits nach wenigen Millimetern Abstand auf sehr tiefe Werte unter $1A/cm$ ab. Unmittelbar an der Oberfläche ist die Feldstärke um ein Vielfaches höher und hängt hauptsächlich von den Werkstoffeigenschaften ab.

Die häufig auftretenden Unterschiede von Restmagnetismus-Messungen mit verschiedenen Messgeräten begründen sich unter anderem in der Konstruktion der Sonde und deren Eignung zur Messung von kleinen Streuflüssen an der Oberfläche des Bauteils. Nur in homogenen Feldern sind die Messwerte von Magnetfeld-Messgeräten vergleichbar.

Eigenschaften eines geeigneten Restmagnetismus-Messgerätes



Restmagnetismus von ferromagnetischen Bauteilen

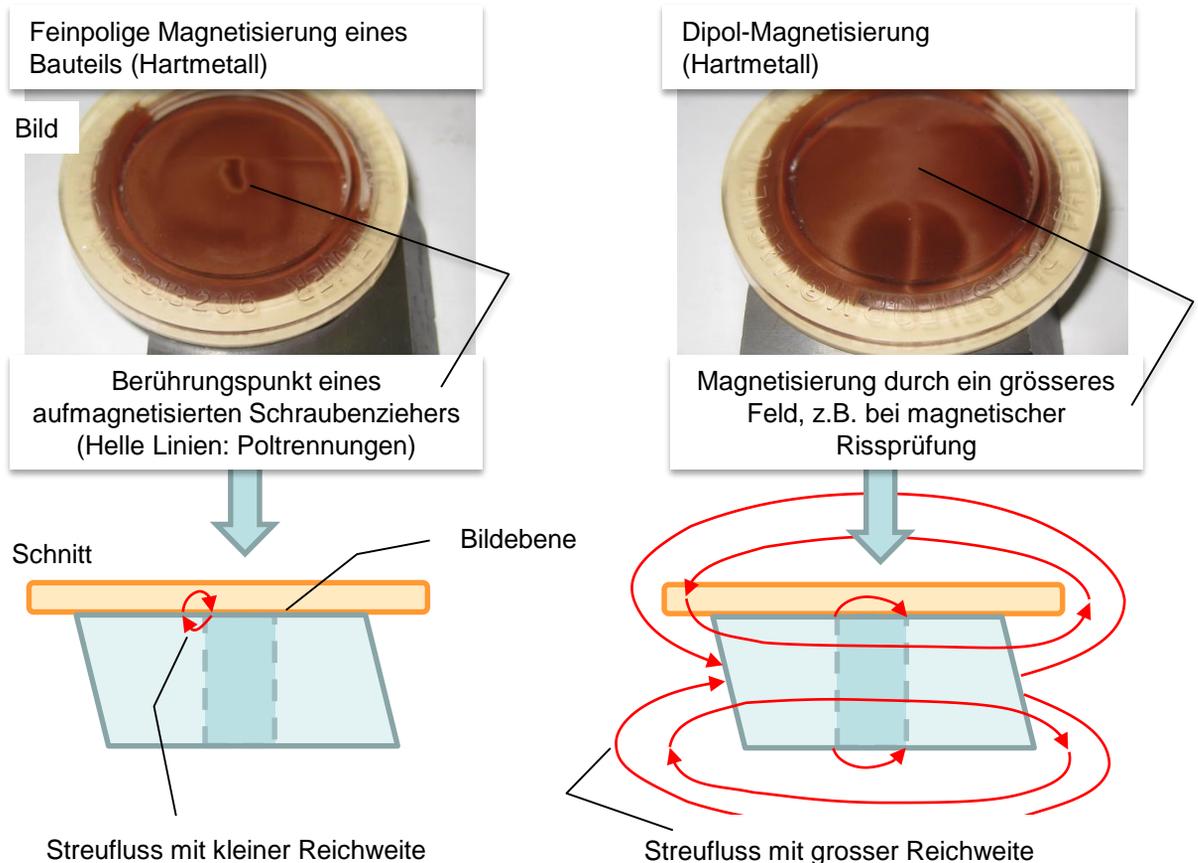
Die Magnetisierung eines Bauteils ist im Wesentlichen von den vorgängigen Herstellungs- und Handlingprozessen abhängig.

Die erste magnetische Beeinflussung des Bauteils geschieht bereits im Stahlwerk. Glüh-, Walz- und Transportprozesse unter Einfluss des Erdmagnetfeldes magnetisieren ferromagnetische Stähle mit grosser Tiefenwirkung auf Werte im Bereich 10...40A/cm auf. Der Restmagnetismus des gesamten Rohstahls oder von grösseren Teilbereichen entspricht nach diesen Prozessen tendenziell einer Dipol-Magnetisierung. Die in der Industrie weit verbreitete magnetische Rissprüfung führt z.B. auch zu einer Dipol-Magnetisierung.

Im weiteren Verlauf der Herstellung kommt ein Bauteil unzählige Male mit mehr oder weniger starken Magnetfeldern zufälliger Polung in Kontakt. Magnetische Handlingsvorrichtungen, Werkzeuge, Spannzangen, Schneidwerkzeuge, Spannmittel oder induzierte magnetische Flüsse usw. magnetisieren das Bauteil weiter auf oder polen es lokal um. Diese magnetischen Einwirkungen führen tendenziell zu einer feinpoligen Magnetisierung des Bauteils (siehe auch Titelseite).

Die Erscheinungsformen von Restmagnetismus auf ferromagnetischen Bauteilen werden zum besseren Verständnis in folgende Kategorien unterteilt:

- Dipol-Magnetisierung des Bauteils mit einer Haupt-Poltrennung
- Magnetisierung mit kleiner Streufeld-Reichweite (feinpolige Magnetisierung)
- Mischform beider Magnetisierungen in verschiedenen Teilbereichen



Messung von Restmagnetismus

Feldstärke bei zunehmendem Abstand von der Bauteiloberfläche



Geeignete Sonde:

- Abstand der Halleffekt-Zone zur Oberfläche ~0.5mm
- Kein magnetischer Flusssammler
- Genau positionierbar

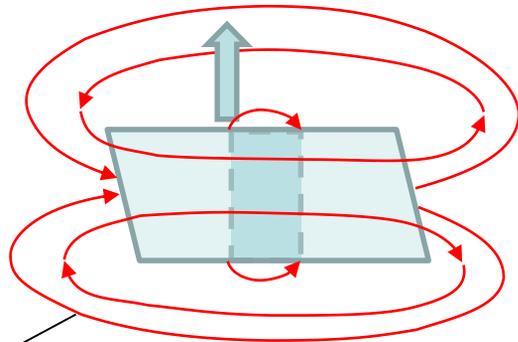


Ungeeignete Sonde:

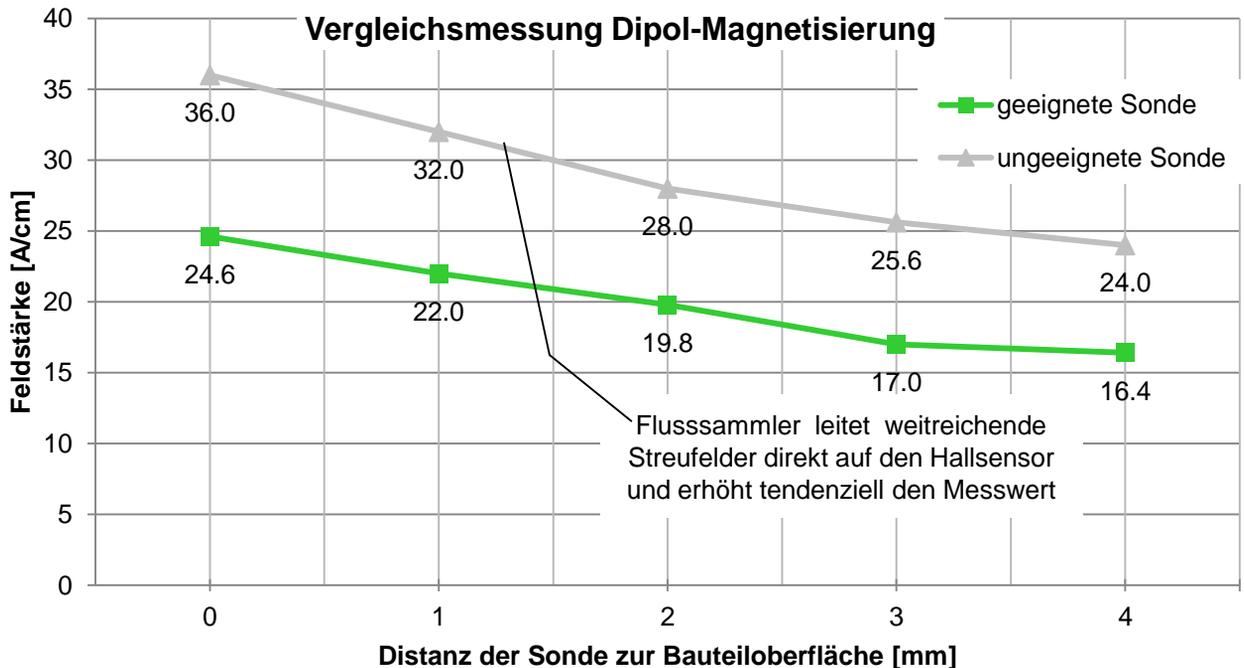
- Abstand der Halleffekt-Zone zur Oberfläche unbekannt
- Sensor mit Flusssammler
- Nicht genau positionierbar

Vergleichsmessung zwischen beiden Sonden:

Restmagnetismus-Messung mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche des Bauteils. Das Streufeld des Bauteils entspricht einer Dipol-Magnetisierung.



Dipol-Magnetisierung



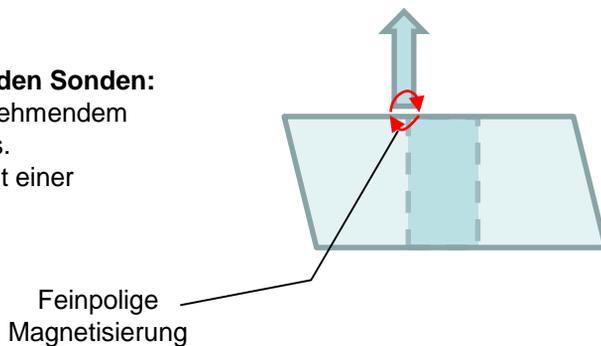
Feldstärke bei zunehmendem Abstand von der Bauteiloberfläche

Restmagnetismus-Messungen von Bauteilen mit grosser Streufeldausdehnung, wie bei der Dipol-Magnetisierung, sind bei unterschiedlicher Sondenkonstruktion deutlich besser vergleichbar als Messungen von Bauteilen mit feinpolem Restmagnetismus. Auf Bauteil-Oberflächen können feinpole Felder nur mit Sonden aufgespürt werden, in denen der Abstand der Halleffekt-Zone zur Oberfläche deutlich unter 1mm liegt.

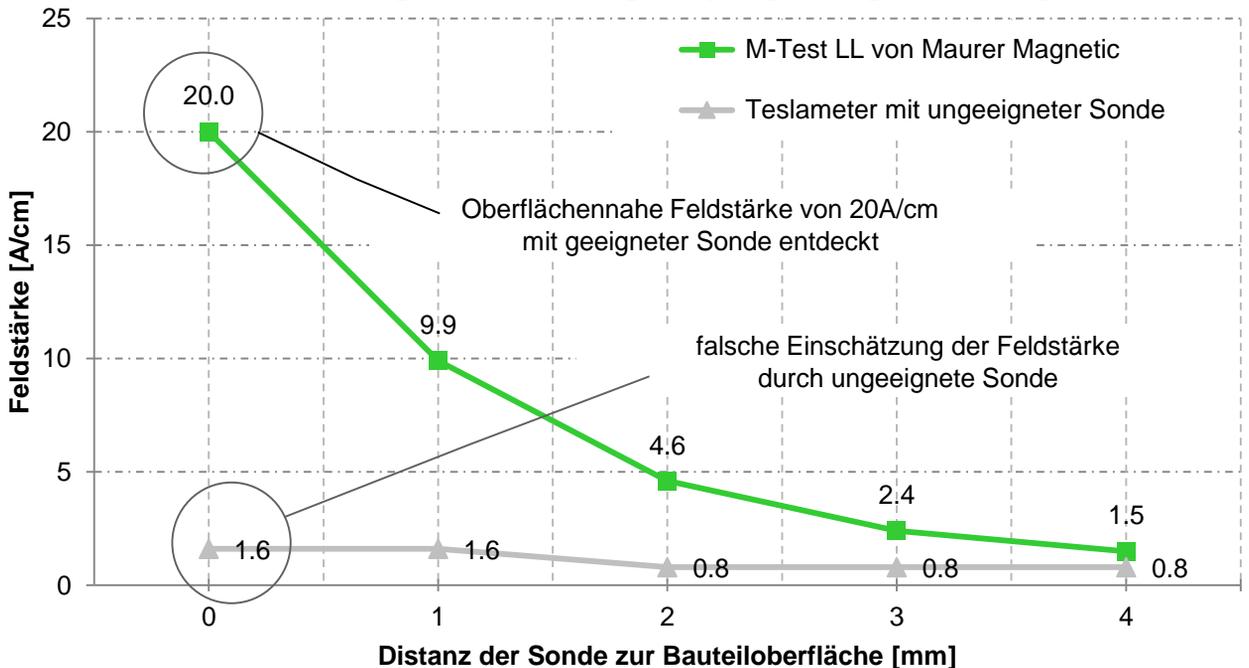
Das Benutzen von Magnetfeld-Messgeräten mit ungeeigneten Sonden führt zu einer falschen Einschätzung der Feldverhältnisse an Oberflächen von Bauteilen. Hallsonden mit Flussamplifier glätten den Streufluss bei feinpolem Restmagnetismus, was oft dazu führt, dass nichts mehr gemessen wird. Stärkere feinpole Magnetfelder auf Bauteilen bleiben deshalb mit ungeeigneten Messgeräten oft unentdeckt und wirken sich in der Produktion störend auf Reinigungs-, Schweiß- und Beschichtungsprozesse etc. aus.

Vergleichsmessung zwischen beiden Sonden:

Restmagnetismus-Messung mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche des Bauteils.
Das Streufeld des Bauteils entspricht einer feinpolem Magnetisierung.



Vergleichsmessung feinpolem Magnetisierung



Induzierte Magnetfelder

Das Magnetfeld der Erde hat im Mittel eine Stärke von $\sim 0.03 \dots 0.06 \text{ mT}$. Die Richtung der Feldlinien verläuft im Freien im Wesentlichen parallel zur N-S Achse, mit einer Neigung von ca. 45° zur Erdoberfläche. In Gebäuden wird das Erdmagnetfeld zusätzlich durch umgebende ferromagnetische Strukturen bezüglich Richtung und Stärke verzerrt.

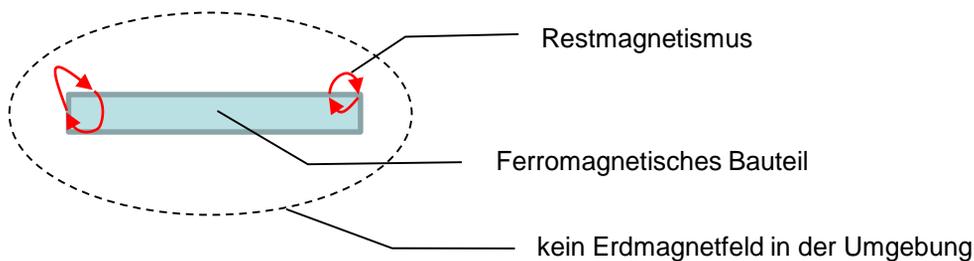
Ferromagnetische Stoffe bilden aufgrund der hohen Permeabilität einen geringen Flusswiderstand für Magnetfelder. Ein ferromagnetisches Bauteil zieht deshalb die Feldlinien von umgebenden Magnetfeldern (z.B. Erdmagnetfeld) an, und es bilden sich induzierte Dipol-Magnetfelder im Bauteil. Die Stärke der induzierten Magnetfelder hängt von der Permeabilität des Werkstoffes, der Geometrie, der Grösse und von der Orientierung des Bauteils im Erdmagnetfeld ab.

In langgestreckten ferromagnetischen Bauteilen induziert das Erdmagnetfeld magnetische Pole. Orientierungsabhängige Schwankungen von ca. $\pm 1 \dots 4 \text{ A/cm}$ zeigen sich bei Restmagnetismus-Messungen im Erdmagnetfeld. Bei einem Schlankheitsgrad L/D von mehr als 4 sind der Einfluss des Erdmagnetfeldes und die Lage des Körpers im Raum zu berücksichtigen.

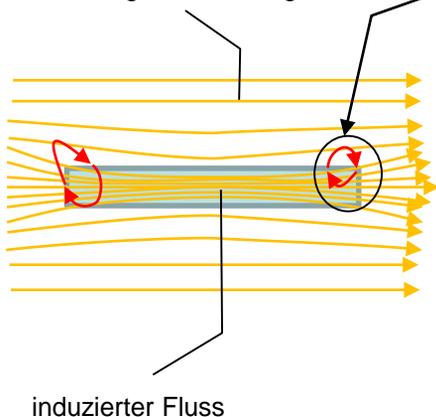
In Querrichtung durchflossene Körper induzieren deutlich geringere Feldstärken.

Bei Messungen von Magnetismus unter Erdmagnetfeldeinfluss wird ein Gesamtfluss gemessen, der sich aus den Komponenten Restmagnetismus und induziertem Fluss zusammensetzt.

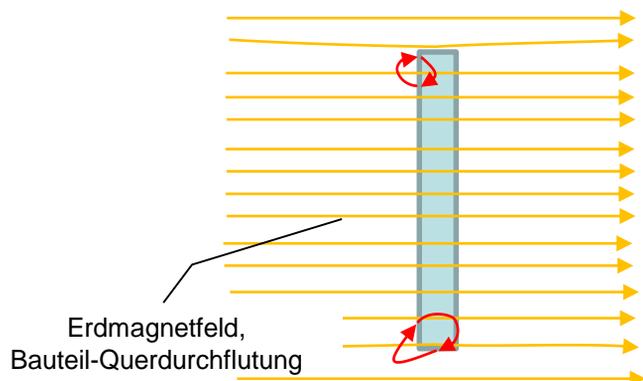
Bei unterschiedlichen Umgebungsverhältnissen lassen sich die gemessenen Werte von ferromagnetischen Bauteilen nicht mehr reproduzieren.



Feldlinien des Erdmagnetfeldes,
Bauteil-Längsdurchflutung



Gesamtfluss =
Restmagnetismus + induzierter Fluss



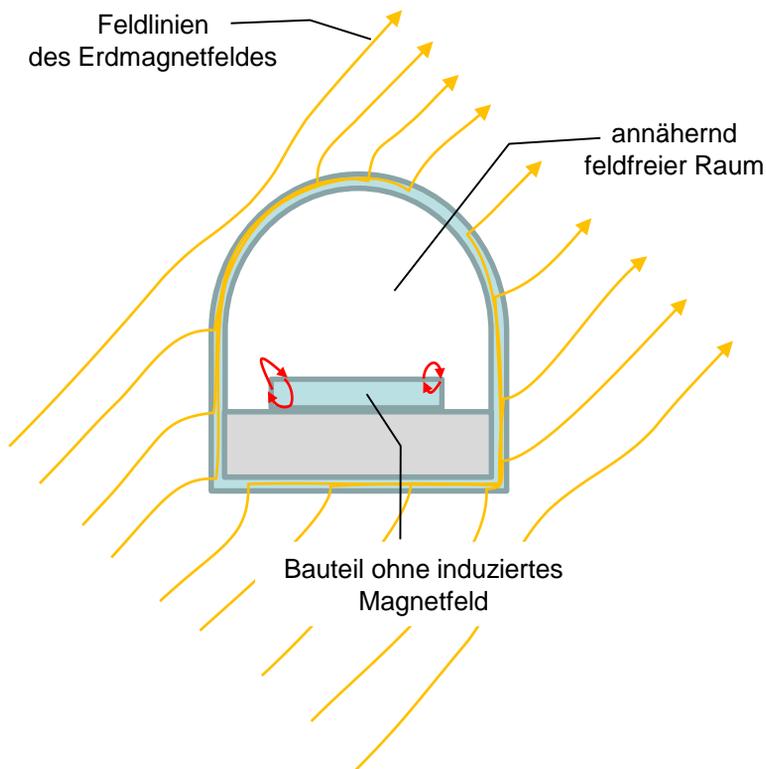
Messung in Magnetfeld-Abschirmkammern

Restmagnetismus-Messungen werden nicht mehr durch induzierte Magnetfelder beeinflusst, indem die Messungen des Bauteils in einer vom Erdmagnetfeld (oder anderen Umgebungsfeldern) abgeschirmten Umgebung stattfinden. Die Abschirmung des Erdmagnetfeldes kann auf zwei unterschiedliche Arten gelöst werden.

Die passive Abschirmkammer besteht aus Wänden aus hochpermeablem Material. Das Erdmagnetfeld wird in der Wand der Abschirmkammer abgeleitet und der Einfluss des Erdmagnetfeldes im Inneren der Kammer sinkt ca. um einen Faktor 3.5 bis 4 (Gesamtabschirmfaktor für alle 3 Raumrichtungen). Das reicht für reproduzierbare Messungen von Restmagnetismus. Passive Abschirmungen eignen sich gut zur Messung von Bauteilen bis zu einer Grösse von ca. 300x300x300mm (Kammer >> Bauteil).

Die zweite Lösung besteht aus einer 3-dimensionalen Helmholtz-Kammer. Die Seiten der Kammer bestehen aus Spulen, die das Erdmagnetfeld im Inneren durch Gegenfelder kompensieren. Helmholtz-Kammern eignen sich auch zur Messung von Bauteilen mit grösseren Abmessungen.

Wirkungsweise einer passiven Abschirmkammer (Null-Gauss-Kammer)



Null-Gauss-Kammer
Nutzbereich ca. 250x250x250mm



3D Helmholtz-Kammer
Nutzbereich ca. 1500x1500x1500mm

Typische Werte von induzierten Magnetfeldern

-Hallsonde auf der Endfläche des Teils auf Kontakt angebracht und fixiert
 -Erdmagnetfeld $\sim 0.05\text{mT}$

Teil	Erdmagnetfeld abgeschirmt; Ausrichtung Teil spielt keine Rolle [A/cm]	Teil in Längsrichtung parallel zum Erdmagnetfeld orientiert [A/cm]	Teil im Erdmagnetfeld um 180° gedreht [A/cm]	Maximales Induziertfeld [A/cm]
Kugellagerstahl Zylinder-Rolle LxD = 40x50mm L/D = 0.8	0.2	-0.3	0.6	0.5
Chromstahl Rundstange LxD = 100x4mm L/D = 25	1.9	1.7	2.9	1.0
Automatenstahl Rundstange LxD = 1500x15mm L/D = 100	7.2	5.8	8.9	1.7

Der Einfluss der Messmethodik

Das Erfassen des technisch kritischen Restmagnetismus-Maximalwertes auf ferromagnetischen Bauteilen erfordert eine geeignete Messmethodik. Folgende Fälle stellen die höchsten Anforderungen an die Methodik:

- Im Erdmagnetfeld gemessene Bauteile
- Bauteile mit kleiner Streufeld-Reichweite (feinpoliger Restmagnetismus)

Reproduzierbare Messwerte von Bauteilen im Erdmagnetfeld

Im Fall der im Erdmagnetfeld gemessenen Teilen hängt der gemessene Restmagnetismus-Wert stark von der Richtung und Stärke des Erdmagnetfeldes ab. Stahlbeton, Stahlstrukturen, Maschinen, benachbarte Leitungen mit hohen elektrischen Strömen usw. verzerren das Erdmagnetfeld. Feldstärke-Schwankungen zwischen 0...600% vom Wert des Erdmagnetfeldes in freier Natur ($0.03\text{...}0.06\text{mT}$) sind in industriellen Gebäuden üblich. Das in ferromagnetischen Bauteilen induzierte Magnetfeld ist direkt mit der Feldstärke des bei der Messung vorliegenden Erdmagnetfeldes verbunden. Starke Umgebungseinflüsse können dazu führen, dass Restmagnetismus nicht mehr vernünftig gemessen werden kann.

Reproduzierbare Messwerte werden nur durch Messung in einer feldfreien Umgebung erzielt. Falls eine Abschirmung nicht realisiert werden kann, wird durch Mittelwertbildung von 6 Messwerten in drei um 90° gedrehten positiven und negativen Raumrichtungen ein reproduzierbares Ergebnis angenähert.

Suche von Restmagnetismus-Maximalwerten auf Teilen mit feinpoligem Restmagnetismus

Aufgrund der geringen Reichweite von feinpoligen Streufeldern müssen die interessierenden Oberflächen des Bauteils zur Erfassung des Maximalwertes möglichst umfassend mit der Sonde abgesucht werden. Zu diesem Zweck eignet sich besonders eine „Peak-Hold“ Funktion auf dem Messgerät, die automatisch den höchsten Messwert speichert. Der Bediener kann sich bei der Messung auf die genaue Führung der Sonde auf dem Bauteil konzentrieren. Dadurch wird sichergestellt, dass Maximalwerte auch bei feinem mehrpoligem Restmagnetismus zuverlässig erfasst werden.

Die Spezifikation und Umsetzung der Suchmethodik für Restmagnetismus-Maximalwerte der betreffenden Oberfläche entscheidet im Wesentlichen darüber, wie gut die Messwerte reproduzierbar sind.

Definition von Restmagnetismus-Grenzwerten

Ein Restmagnetismus-Grenzwert definiert den maximal zulässigen Messwert auf der gesamten Oberfläche oder einer bestimmten Funktionsfläche des Bauteils. Die N-S-Polarität des Feldes spielt für die häufigsten Anwendungen (Partikelanhaftung, Schweißen, Beschichten) keine Rolle.

Die zuverlässige Überprüfung von Bauteilen hinsichtlich Restmagnetismus-Grenzwerten erfordert folgende zusätzliche Spezifikationen:

- Abstand der Halleffekt-Zone von der Bauteiloberfläche (geeignetes Messgerät)
- Messung ohne Einfluss von induzierten Magnetfeldern (Abschirmung Erdmagnetfeld)
- Messung durch qualifiziertes Personal (geeignete Suchmethodik)
- Spezifikation einer geeigneten Suchmethodik

Magnetismus-Einheiten Umrechnungstabelle

Einheit Leserichtung ->	A/cm	A/m	mT	Gauss oder Oerstedt
1 A/cm =	-	100	0.1256	1.256
1 A/m =	0.01	-	0.001256	0.01256
1 mT =	7.96	796	-	10
1 Gauss oder 1 Oerstedt =	0.796	79.6	0.1	-

Beziehung zwischen Feldstärke H [A/m] und Flussdichte B [mT]:

$B = \mu_r \times \mu_0 \times H$, in Luft ist $\mu_r \sim 1$; Permeabilität vom Vakuum ist $\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$ [Vs / Am]