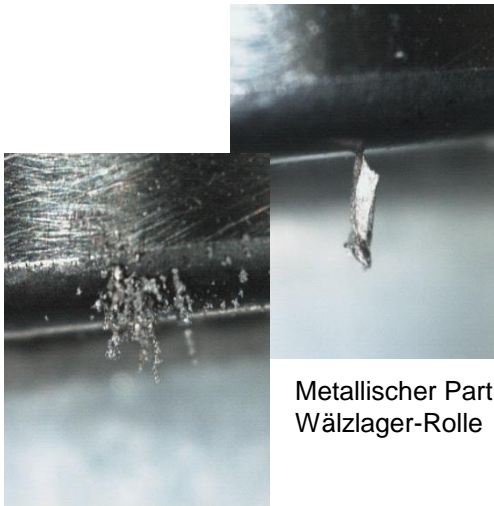


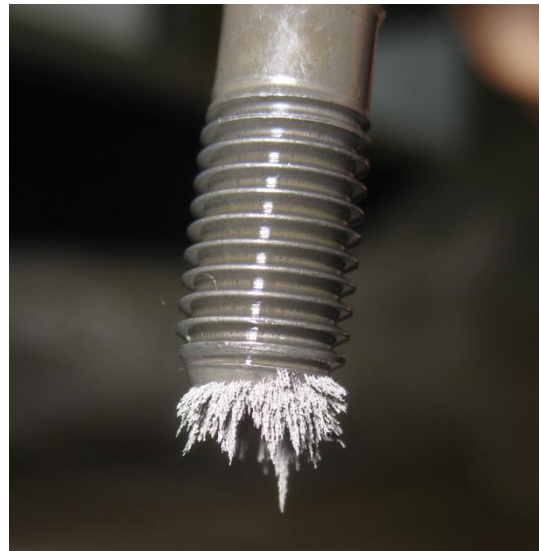
aktualisierte Version 1.1

Magnetische Anziehungskraft auf ferromagnetische Partikel



Sinterpulver an einer Wälzlager-Rolle

Metallischer Partikel an einer
Wälzlager-Rolle

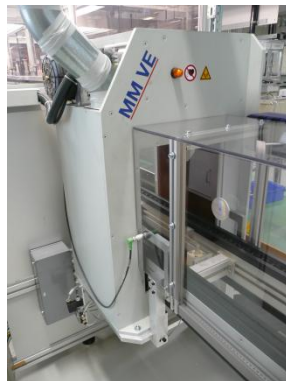


Sinterpulver an einer Pleuelschraube

Marek Rohner
Head of Technology
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



Einführung

Partikel sind in der Produktion, Montage und Betrieb von hochwertigen Produkten seit längerem als eine wichtige Fehlerursache bekannt. Aus diesem Grund werden aufwändige Verfahren eingesetzt, um die Partikelbelastung so gering als möglich zu halten. Dementsprechend ist ein Sauberkeitstrend in der Automobilindustrie zu beobachten.

Besonders interessieren aufgrund von Restschmutz-Risikobeurteilungen die harten, metallischen Partikel, weil sie im Allgemeinen das grösste Fehlerpotential in Fertigungsprozessen und Endprodukten zur Folge haben.

Einige Beispiele:

- Reinigungsverfahren können metallische Partikel nicht prozesssicher entfernen.
- Die Produktion mit zerspanenden Verfahren wird durch störende Späne-Anhaftung an Werkzeugen und Bauteilen beeinträchtigt.
- Oberflächenbeschichtungen haften schlecht oder platzen aufgrund von Verunreinigungen des Grundbauteils ab.
- Die Qualität von lackierten Oberflächen ist mangelhaft wegen Partikel-Anhaftungen an Ecken und Kanten.
- Pulverpress- und Feinstanzverfahren werden durch Anhaftung von Sinterpulver bzw. Stanzresten an Stempel und Matrize beeinträchtigt.
- Beim Öffnen von gecrackten Pleueln entstehende Partikel verhindern die anschliessende passgenaue Montage.
- Elektrisch leitende Partikel verursachen Kurzschlüsse auf Elektronikplatinen.
- Anhaftung von harten Partikeln aus der Produktion und Montage führen zu frühzeitigem Ausfall von Gleit und Wälzlagern.
- Metallische Partikel in hydraulischen Steuerkanälen blockieren die Funktion von Ventilen.
- Benzin und Diesel-Einspritzsysteme werden im Betrieb durch kritische Partikel beschädigt.

Zusammenfassung des Inhalts

In Bezug auf magnetisches Haftpotential lassen sich die metallischen Partikel in magnetisierbare (ferromagnetisches Verhalten) und nicht magnetisierbare Partikel unterteilen.

Die magnetische Anziehungskraft auf ferromagnetische Partikel ist proportional zum Feldgradienten und zur absoluten Feldstärke im Bereich des Partikels. Gemäss der Automotive Norm VDA19 / ISO16232 werden hier Partikelgrössen bis 5µm betrachtet. Die minimale Distanz der aktiven Messzone zur Oberfläche der Bauteile von modernen Restmagnetismus-Messgeräten ist durch die Gehäusegrösse des Hallsensors begrenzt und beträgt ca. 0.5mm (500µm). Viele industriell eingesetzte Messgeräte weisen noch eine deutlich grössere Distanz der Messzone zur Oberfläche auf.

Die Ausprägung von Restmagnetismus auf ferromagnetischen Bauteilen ist meistens feinpolig und chaotisch. Die Feldstärke-Änderungen erfolgen in diesem Fall auf kleiner Fläche, was sich durch grosse Feldgradienten im Oberflächen-Nahbereich bemerkbar macht.

Um Aussagen über Feldgradient, Feldstärke und schliesslich über die magnetische Anziehungskraft auf Partikel treffen zu können, werden in diesem White Paper die Ergebnisse von physikalischen Berechnungsmodellen im Vergleich zu praktischen Versuchen bewertet.

Magnetisierbarkeit von metallischen Partikeln

Die magnetischen Eigenschaften von metallischen Partikeln sind abhängig davon, ob sie sich para-, dia- oder ferromagnetisch verhalten. Sich paramagnetisch (z.B. austenitischer Edelstahl) oder diamagnetisch (z.B. Aluminium) verhaltende Partikel lassen sich bei magnetischen Feldstärken in der üblichen Grössenordnung von Restmagnetismus (ca. 0...50A/cm) nicht anziehen.

Ferromagnetische Partikel lassen sich aber aufgrund der hohen magnetischen Suszeptibilität bereits bei geringen Feldstärken bedeutend magnetisieren und bleiben infolge dessen an Bauteilen haften.

Berechnung der magnetischen Anziehungskraft auf Partikel

Die magnetische Suszeptibilität χ beschreibt die Magnetisierbarkeit eines Materials. Die Suszeptibilität χ_p eines Partikels berechnet sich gemäss [1]:

$$M_p = \frac{(\mu_i H_p)}{\left(1 + \frac{\mu_i H_p}{M_s}\right)} \quad \text{und} \quad \chi_p = M_p / H_p$$

Als H_p [A/m] wird die auf den Partikelschwerpunkt wirkende magnetische Feldstärke bezeichnet.

Für kugelförmige Eisenpartikel erhält man gem. [1] mit Sättigungsmagnetisierung $M_s = 1'550$ [kA/m], rel. Permeabilität $\mu_i = 40$ und Feldstärke H_p zw. 1...50 [A/cm] eine Suszeptibilität $\chi_p = 20...36$.

M_p ist die Magnetisierung des Partikels.

Die Berechnung der magnetischen Anziehungskraft auf ferromagnetische Partikel erfolgt gem. [2]:

$$M_p = \chi_p H_p \quad \text{und} \quad F_m = \mu_0 V_p M_p \nabla(H_p)$$

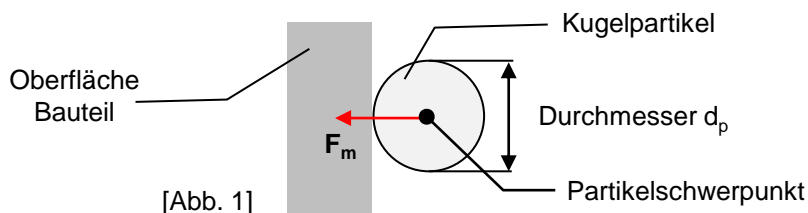
F_m magnetische Anziehungskraft auf den Partikel in [N]

$\mu_0 = 1.256 \times 10^{-6}$, Permeabilität des Vakuums in [Vs / Am]

V_p Volumen des Partikels in [m³]. $V_p \sim d_p^3$

$\nabla(H_p)$ Feldgradient¹ im Partikelschwerpunkt [A/m²].

Der Angriffspunkt der Feldstärke und des Feldgradienten wird zur Vereinfachung der Berechnungen im Partikelschwerpunkt angenommen. Der Partikel wird modellhaft als Kugelpartikel definiert. Die Distanz des Partikelschwerpunktes zur Oberfläche eines Bauteils ergibt sich somit als $d_p/2$ des Partikels. Das Volumen V_p ergibt sich aus $V_p = 4/3 * \pi * (d_p/2)^3$.



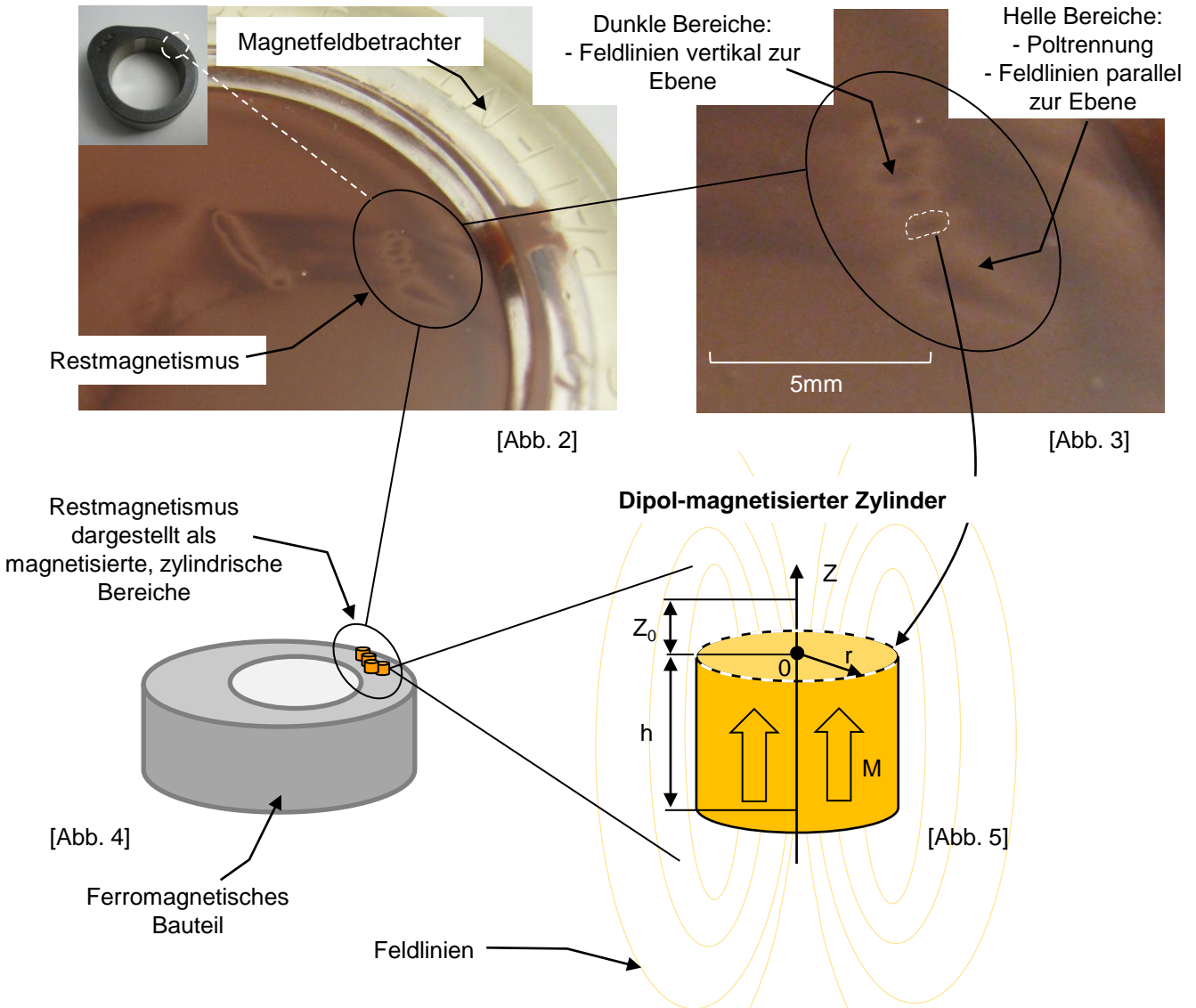
[Abb. 1]

¹Feldgradient = Mass für Feldstärke-Änderung pro Distanzeinheit

Abschätzung von Feldstärke und Feldgradient im Oberflächen-Nahbereich

Der Restmagnetismus auf Oberflächen von Bauteilen lässt sich unterhalb $\sim 0.5\text{mm}$ Distanz nicht mehr messen, weil die Gehäusegrösse von Hallsensoren in diesem Grössenbereich liegt. Feldstärke und Feldgradient im Schwerpunkt eines Partikels mit Durchmesser $d_p < 500\mu\text{m}$ müssen aus diesem Grund mit einem Berechnungsmodell abgeschätzt werden.

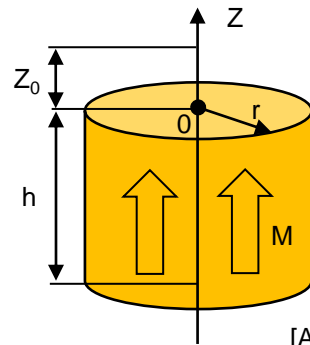
Näherungsweise lässt sich ein magnetisierter Bereich auf der Oberfläche [Abb. 2, 3, 4] als Dipol-magnetisierter Zylinder [Abb. 5] modellieren. Die Abmessungen h , r und die Magnetisierung M des Zylinders bestimmen den Verlauf der Feldstärke entlang der Z -Achse im Mittelpunkt des Zylinders. Die Feldstärke lässt sich in einem Abstand Z_0 von der Oberfläche des Zylinders berechnen. Durch Einsetzen von versuchsweise ermittelten Parametern h , r und M lassen sich Feldverläufe entlang der Z -Achse berechnen, die mit gemessenen Werten übereinstimmen. Die zur Bestimmung der magnetischen Anziehungskraft benötigten Parameter Feldstärke und Feldgradient lassen sich in der Folge für Partikel mit Durchmesser unter $500\mu\text{m}$ abschätzen.



Feldverlauf eines magnetisierten Zylinders entlang der Z-Achse

Die Feldstärke H wird berechnet gem. [3]:

$$H(Z_0) = 2\pi M \left[\frac{Z_0 + h}{\sqrt{(Z_0 + h)^2 + r^2}} - \frac{Z_0}{\sqrt{Z_0^2 + r^2}} \right]$$



[Abb. 6]

Feldverlauf bei unterschiedlicher Zylindergrösse

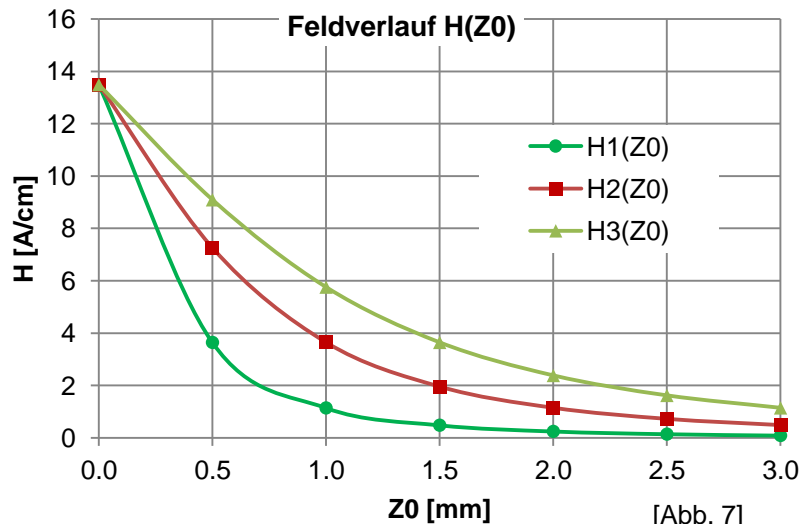
Zur Bewertung des Feldverlaufs in Abhängigkeit zur Zylindergrösse wurden drei Beispiele mit unterschiedlichen Parametern gerechnet.

Der Feldverlauf des Zylinders mit $h=1$, $r=0.5$, Kurve H1(Z0) entspricht etwa einem durch eine leicht magnetisierte Schraubenzieherspitze eingepprägten Restmagnetismus auf der Oberfläche eines ferromagnetischen Bauteils.

Die Magnetisierung mit einer Schraubenzieher-Spitze wurde gewählt, um einen realistischen Fall darzustellen. Feinpolige Herstellungsprozess-bedingte Magnetisierungen entsprechen in der Tendenz diesem Fall.

Feldverlauf Parameter

	H1(Z0)	H2(Z0)	H3(Z0)
h [mm]	1	2	3
r [mm]	0.5	1.0	1.5
M [A/m]	240	240	240



[Abb. 7]

Feldgradient im Nahbereich

Die Abnahme der Feldstärke mit zunehmender Distanz ist bei Zylindern mit kleiner werdenden Werten h und r zunehmend ausgeprägt [Abb. 7]. Bauteile mit chaotischem, mehrpoligem Restmagnetismus folgen der gleichen Tendenz und weisen eine geringe Reichweite des Magnetfeldes auf.

Der Feldgradient ist dementsprechend umso höher, je kleiner der Zylinder bzw. je feinpoliger der Restmagnetismus des Bauteils ist.

Magnetische Anziehungskraft im Vergleich zur Gewichtskraft

Die magnetische Anziehungskraft F_m auf Partikel wird in diesem praktischen Versuch in Bezug zur Gewichtskraft F_g des Partikels gebracht.

Van der Waals Kräfte werden in der Betrachtung vernachlässigt und elektrostatische Effekte treten aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Bauteils und Partikels nicht auf. Flüssigkeits- bzw. Festkörperbrücken werden im Versuch gezielt eliminiert.

Der Restmagnetismus wird versuchsweise mit einer magnetisierten Spitze (Kreuz-Schraubenzieher) auf eine 100Cr6 Wälzlager-Rolle aufgebracht [Abb. 10]. Die Feldstärke des Restmagnetismus-Punktes wird experimentell so gewählt, dass ein ferromagnetischer Partikel knapp mit seiner Gewichtskraft am Bauteil hängen bleibt.

In diesem Fall gilt näherungsweise: $F_m = F_g$

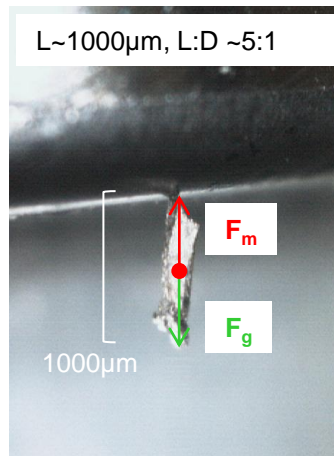
Der Feldverlauf [Abb. 11] des für die Partikelhaftung ursächlichen Restmagnetismus-Punktes dient zur anschließenden Gegenüberstellung der Haftkraft-Berechnung mit dem Versuch. Der Feldverlauf und das Haftexperiment wurden im Zentrum des Restmagnetismus-Punktes ermittelt.

Länglicher Partikel [Abb. 8]

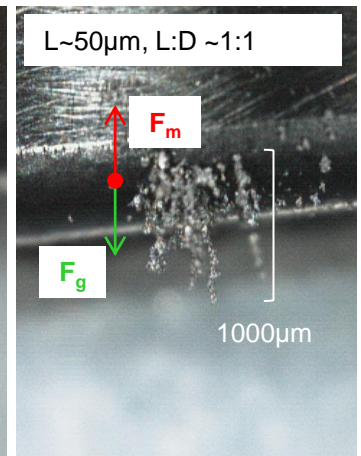
Gem. [4] ergibt sich bei einem Schlankheitsgrad $L:D \sim 5:1$ eine in Relation zu einem Kugelpartikel um den Faktor 1.44 stärkere Magnetisierung.

Kugelförmiger Partikel [Abb. 9]

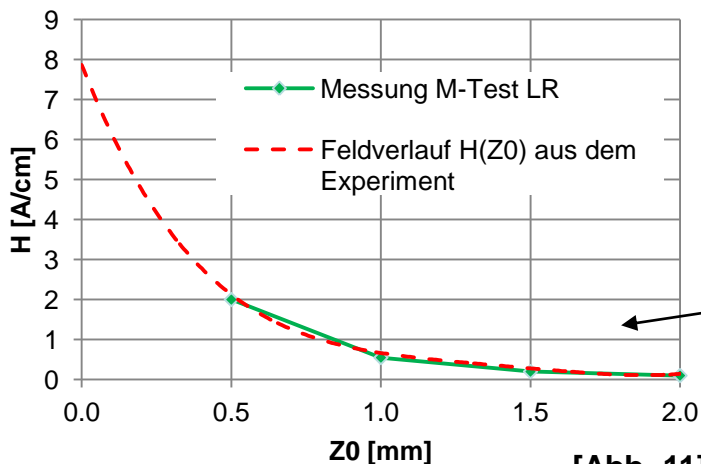
Die Partikelform (Sinterpulver) ist annähernd kugelförmig. Zu Beachten ist die Bildung von Partikelstrings entlang der Feldlinien. Die Länge der Partikelstrings entspricht annähernd dem länglichen 1000µm Partikel.



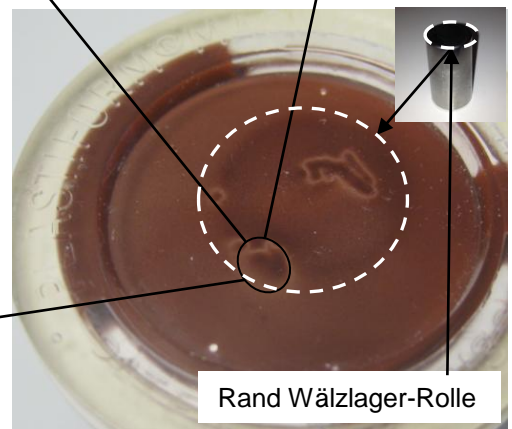
[Abb. 8]



[Abb. 9]



[Abb. 11]



[Abb. 10]

Korrekturfaktor für richtungsbezogene Messung des Magnetfeldes

Die meisten industriellen Feldstärke Messgeräte verwenden Sonden mit einem einzigen Hallelement. Triaxiale Hallsensoren sind zu gross und erfordern einen wesentlich grösseren Abstand zur Oberfläche. Sie eignen sich daher weniger für Restmagnetismus-Messgeräte.

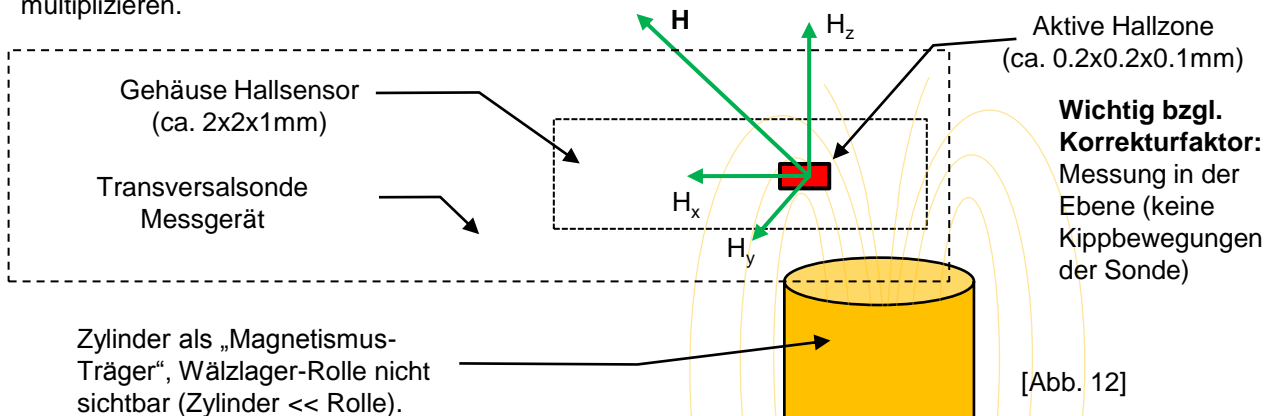
Die Feldstärke wird mit richtungsbezogenen Messgeräten (z.B. M-Test LR / LL) demzufolge nur in einer Achsrichtung erfasst. Gem. [Abb. 12] wird die aktive Hallzone senkrecht von H_z durchflutet. Der Anzeigewert des Messgerätes entspricht in der Folge H_z . Als vektorielle Grösse hat Feldstärke aber drei räumliche Komponenten $\mathbf{H} = H_x + H_y + H_z$.

Der Betrag des Vektors berechnet sich gem.: $|\mathbf{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$

Bei Restmagnetismus kleiner räumlicher Ausdehnung (Dimension Hallsensor ~Dim. Zylinder) wird hier die vereinfachende Annahme getroffen, dass alle drei Richtungen denselben Betrag liefern, es folgt bei Kenntnis von H_z :

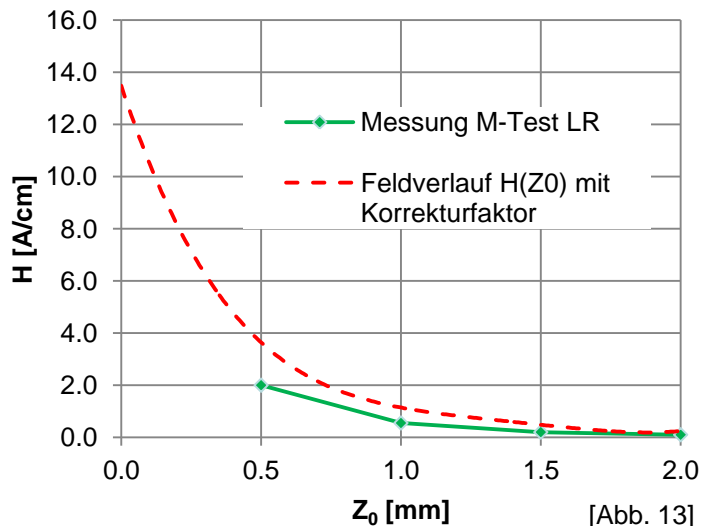
$$|\mathbf{H}| = \sqrt{3H_z^2} = \sqrt{3}H_z$$

Es ergibt sich ein Korrekturfaktor $\sqrt{3}$. Um aus Messung der Feldkomponente normal zur Oberfläche den Betrag des Feldvektors \mathbf{H} zu erhalten, ist die Annahme berechtigt, den Messwert mit dem Faktor $\sqrt{3}$ zu multiplizieren.



Auf Partikel wirkende Feldstärke

Die Skalierung des Feldverlaufs von [Abb. 11] mit dem Korrekturfaktor $\sqrt{3}$ führt zu dem Feldverlauf gemäss [Abb. 13.] Die Haftkraft-Berechnung erfolgt mit dem skalierten Feldverlauf.



Berechnung der magnetischen Anziehungskraft

Mit den Methoden aus den vorangehenden Seiten lässt sich die magnetische Anziehungskraft auf Partikel berechnen und mit den experimentellen Ergebnissen vergleichen.

Feldgradient

Aus dem Feldverlauf der Feldstärke $H(z)$ lässt sich der Feldgradient $\text{Grad}(H)$ berechnen [Abb. 14].

Nahe dem Nullpunkt ist eine Abflachung des Feldgradienten zu beobachten. Dieses Verhalten ergibt sich im Nahbereich: $Z_0 \ll h, r$.

Berechnung Haftkraft unter Annahme folgender Parameter

Param.	Wert	Erläuterungen
h [mm]	1	Gem. Seite 6
r [mm]	0.5	Gem. Seite 6
M [A/m]	240	Gem. Seite 6
m_{spez} [kg/m ³]	7'800	Spez. Masse
χ_{p1}	25	Suszeb. Partikel 50 μm , L:D ~1:1, gem. Seite 4
χ_{p2}	36	Suszeb. Partikel 1000 μm , L:D ~5:1, gem. Seite 4

Vergleich Berechnung / Versuch

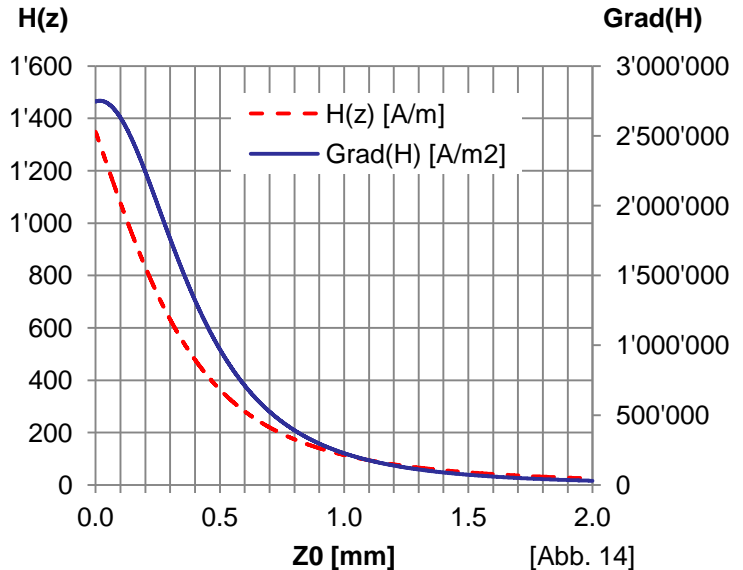
50 μm Partikel gem. [S. 7, Abb. 9]

Der kugelförmige Partikel haftet gem. [Abb. 15] mit einem Verhältnis $F_m/F_g \sim 1.44$. Diese Größenordnung erscheint im Vergleich zum Versuch von Seite 7 plausibel.

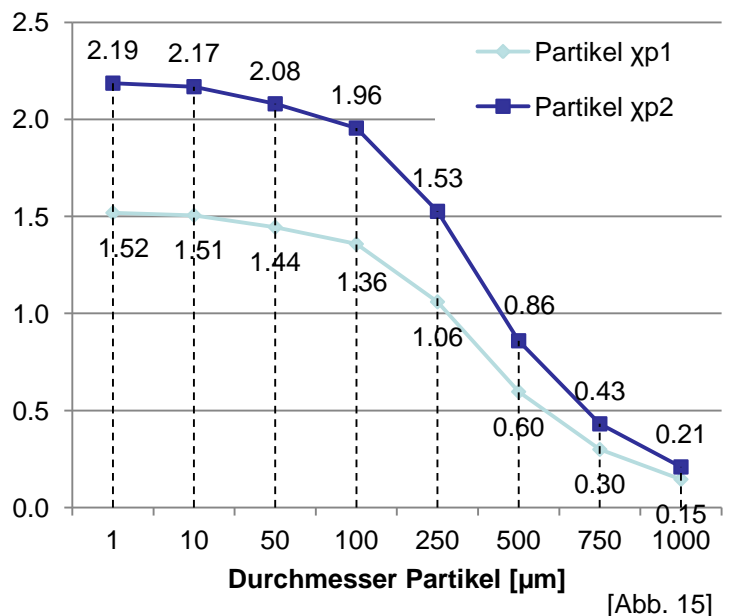
1000 μm Partikel gem. [S. 7, Abb. 8]

Der längliche 1000 μm Partikel aus Seite 7 hat gegenüber einem Kugelpartikel eine ca. 13-fach geringere Gewichtskraft. Aus [Abb. 15] folgt für einen kugelförmigen 1000 μm Partikel $F_m/F_g \sim 0.21$.

Bei 13-fach geringerer Gewichtskraft folgt $F_m/F_g \sim 2.73$. Auch diese Haftkraft erscheint im Vergleich zum Versuch plausibel.



F_m / F_g Haftkraft kugelförmiger Partikel



Erkenntnisse

- Aufgrund der Gehäusegrösse von Hallsensoren kann ein feinpoliger Restmagnetismus mit Abstand kleiner als ca. 0.5mm nicht mehr korrekt gemessen werden. Die auf feine Partikel wirkende Feldstärke nimmt bei abnehmender Distanz überproportional zu.
- Die magnetische Anziehungskraft F_m auf ferromagnetische Partikel steigt bei zunehmend feinpoligem Restmagnetismus an. Grund ist der zunehmende Feldgradient.
- Bei gegebenem Restmagnetismus ist die magnetische Anziehungskraft auf kleine Partikel grösser, weil im Nahbereich die auf den Partikel wirkende Feldstärke und Feldgradient ansteigen.
- Vorspringende Kanten und Ecken führen zu stark erhöhten Feldgradienten und in der Folge zu hohen (ca. bis zu 100-fach grösseren) Anziehungskräften auf ferromagnetische Partikel.
- Eine Halbierung des Bauteil-Restmagnetismus führt zu einer annähernd 4-fach geringeren magnetischen Haftkraft auf Partikel ($F_m \sim H^2$).
- Die magnetische Anziehungskraft F_m auf Partikel wächst bei homogenem Feld wie die Gewichtskraft F_g proportional zur dritten Potenz des Partikel-Durchmessers d_p an. $F_m, F_g \sim d_p^3$.
- Schlanke Partikel werden bei gegebenem Restmagnetismus stärker angezogen als kugelförmige Partikel.
- Das Abziehen von Partikeln oder Kleinstteilen mit Magneten funktioniert auf ferromagnetischen Oberflächen nicht zuverlässig, weil das Streufeld des Magneten auch den unter dem Partikel liegenden Oberflächenbereich magnetisiert. Je nach vorliegender Konfiguration (z.B. Partikel an vorspringender Kante) erfolgt aufgrund der hohen Feldstärke und des Feldgradienten zwischen Partikel und Oberfläche eine stärkere Anziehungskraft als zum Magneten.
- Die magnetische Haftung von Partikeln kann nur durch eine vollständige Entmagnetisierung der Bauteile minimiert werden.

Verweise

- [1] A. Merino-Martos, J. de Vicente, L. Cruz-Pizarro, I de Vicente, 2011. „Setting up High Gradient Magnetic Separation for combating eutrophication of inland waters
- [2] Mathias Stolarski, 2011. „Die Magnetfeldüberlagerte Zentrifugation, Ein neues hybrides Trennverfahren zur Selektiven Bioseparation“
- [3] NT-MDT „<http://www.ntmdt.com/spm-basics/view/magnetic-field-cylinder-domens>“, 07.03.2012
- [4] Herbert Daniel, 1997 „Physik 2, Elektrodynamik, relativistische Physik“, Seite 77