

Restmagnetismus auf ferromagnetischen Werkstücken:

Physikalischer Hintergrund, Ursachen, mögliche Feldkonfigurationen, hartmagnetische Stellen, erneutes Auftreten von Magnetismus, Feldkonzentration

Qualitätsmerkmal tiefer Restmagnetismus

Moderne Herstellungsverfahren basieren zunehmend auf komplexen und sensiblen Fabrikationsprozessen, welche auf eine hohe Qualität der Zwischenprodukte angewiesen sind.

Fertigungsprozesse wie z.B. Zerspanungs-, Urform- und Stanzprozesse sind auf möglichst tiefen Bauteil- bzw. Werkzeug-Restmagnetismus angewiesen, damit durch Partikelanhaftung keine Störungen auftreten.

Konventionelle Schweissverfahren funktionieren nur bis zu einem gewissen Restmagnetismus prozesssicher, ansonsten ist mit störender magnetischer Blaswirkung zu rechnen.

Die Montage von heutigen Verbrennungsmotoren, Getriebekomponenten, Kugellagern, Elektronik-Bauteilen und Medizinalprodukten erfordert die Einhaltung von strengsten Sauberheitskriterien. Zur Erfüllung der Anforderungen sind Reinigungsprozesse auf möglichst tiefen Bauteil-Restmagnetismus angewiesen, damit die ferromagnetischen Partikel vom Produkt vollständig abgelöst werden können.

Das manuelle oder automatisierte Handling von kleinsten ferromagnetischen Komponenten wie z.B. medizinischen Injektionsnadeln oder miniaturisierten Bauteilen für die Uhrenindustrie wird bereits bei geringem Restmagnetismus erschwert oder verunmöglicht.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren auf Wirbelstrombasis zur Riss-, Schleifbrand-, oder Materialerkennung funktionieren nur zuverlässig, wenn die zu prüfenden Produkte möglichst geringe Restmagnetismus-Schwankungen aufweisen. Andernfalls ist mit hohem Pseudoausschuss zu rechnen.

Elektronenstrahl-Verfahren wie z.B. Elektronenstrahl-Schweissen und Härten, Transmissionselektronen-Mikroskopie, Fotolithografie und Strahlentherapie mit Elektronen benötigen zur Prozessfähigkeit ein magnetisch möglichst neutrales Umfeld auf der Strahlstrecke.

Die Forderung nach geringem Restmagnetismus hat sich aus diesen Gründen zu einem entscheidenden Qualitätsmerkmal entwickelt.

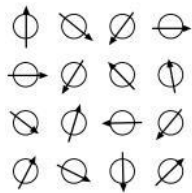
Physikalische Ursachen und Einheiten von Magnetismus

- Physikalische Ursachen für Magnetfelder
 - Ferromagnetische Elemente, wie Eisen, Nickel und Kobalt
 - Elektrische Ströme
 - Zeitliche Änderung eines elektrischen Feldes (gem. Maxwell Gleichungen)
- Größen und Einheiten von Magnetfeldern
 - Magnetische Feldstärke **H** (A/m oder Oersted)
 - Magnetische Flussdichte **B** (Tesla oder Gauss, $1\text{mT} \hat{=} 10\text{Gauss}$)
 - Verknüpfung der beiden Größen über Formel: **B** = $\mu_0\mu_r\mathbf{H}$
 - In Luft ist $\mu_r \sim 1$, Umrechnung: $1\text{mT} \hat{=} 7.96\text{A/cm}$
- Beispiele von H-Feldern nahe der Teil-Oberfläche
 - Neodym-Dauermagnet $\sim 3'500\text{A/cm}$
 - Stahlteil mit Restmagnetismus $\sim 1...100\text{A/cm}$

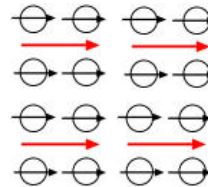
Grundlagen mikroskopischer und makroskopischer Magnetismus

• Mikroskopischer Magnetismus

- Magnetisches Moment von Atomen (Elementarmagneten)



ungeordnete
Elementarmagnete.
(Die Feldvektoren heben
sich gegenseitig auf).

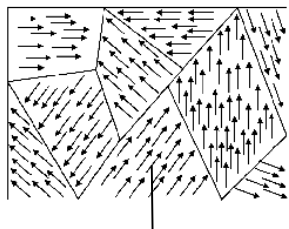


ausgerichtete
Elementarmagnete

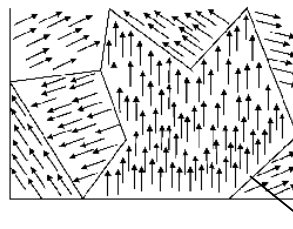
Summierte Feldvektoren

• Makroskopischer Magnetismus im ferromagnetischen Material

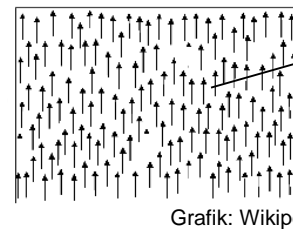
- Spontane Ausrichtung der Elementarmagnete aufgrund Material- und quantenmechanischer Effekte.
- Gruppierung von Elementarmagneten zur Domänenstruktur (Domäne = Weiss 'scher Bezirk).
- Die Erhöhung eines äusseren Feldes H polt die Domänen zunehmend durch Barkhausensprünge in Richtung des äusseren Feldes um.



Domäne (~10 μ m...1mm)



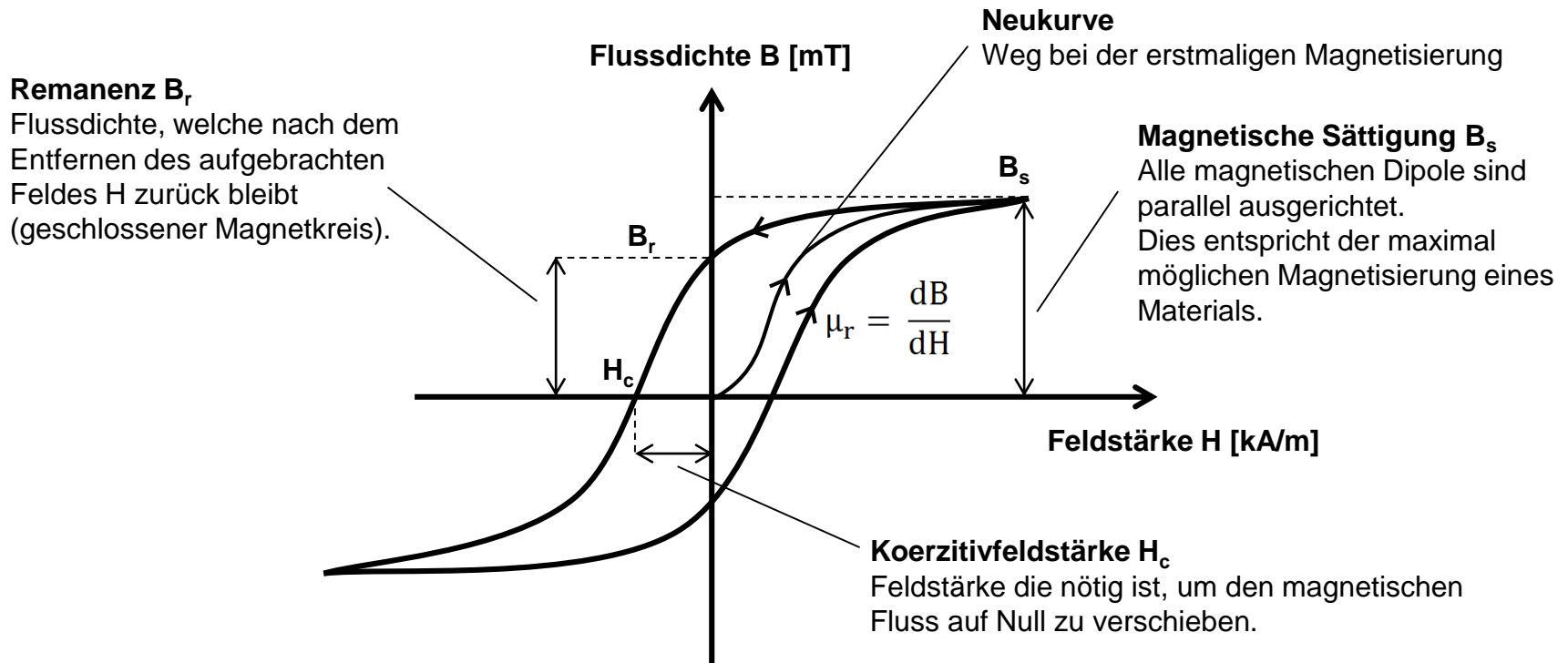
Blochwand



Ausrichtung von Domänen.
Gleichgerichtete (summierte)
Feldvektoren
führen zu messbarem Magnetismus
an der Oberfläche.

Grafik: Wikipedia

Hysteresekurve zur Beschreibung der magnetischen Eigenschaften eines Materials



Einflussfaktoren auf den Restmagnetismus von ferromagnetischen Werkstoffen

Die Koerzitivfeldstärke bestimmt im wesentlichen, wie viel Restmagnetismus im Werkstoff nach einer Magnetisierung zurückbleibt.

Unten stehende Tabelle beschreibt die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Magnetisierbarkeit von Stahlwerkstoffen.

Niedrig	Restmagnetismus	Hoch
Niedrig legierte, weiche Stähle (z.B. Baustahl, Automatenstahl, Einsatzstahl etc.)	Stahlsorte	Hochlegierte, hochfeste Stähle (z.B. HSS, 100Cr6, X-Stähle etc.)
Nicht vergütet	Vergütungszustand (Anlassen über Curie-Temp. eliminiert Restmagnetismus)	Vergütet
Niedrig	Kaltverformungsgrad	Hoch
	Magnetische Hysteresekurve (Materialeigenschaft des Stahls)	

Restmagnetismus erzeugende Prozesse in der Produktionsumgebung

>100
A/cm

- Rissprüfung (Magnetpulver- und Streuflussprüfung)
- Einsatz von Lasthebe- bzw. Handlingmagneten (permanent und elektrisch)
- Einsatz von Spannmitteln (permanent und elektrisch)

50
A/cm

- Abstellen von Magnetständern (z.B. Messuhren)
- Schweißverfahren (hohe DC oder AC-Ströme)
- Bearbeitung mit magnetisierten Werkzeugen, Spannmitteln etc.

20
A/cm

- Handling mit magnetisierten Werkzeugen, Aufnahmen, Greifern etc.
- Galvanische und elektroersoive Prozesse (Verchromen, ECM, Erodieren...)
- Einige PVD-Beschichtungsprozesse (z.B. Magnetron-Sputtern)

10
A/cm

- Umformprozesse (Gefügeveränderung im Material)

Typische Grenzwerte Automotive 2...5A/cm, Messabstand zur Oberfläche?

2
A/cm

0,4
A/cm

- Vibrationen + Erdmagnetfeld
- Erdmagnetfeld

[A/cm] - Werte im Pfeil gelten für Messabstand zur Oberfläche 0.5mm

Restmagnetismus entsprechend magnetischer Dipol-Feldkonfiguration

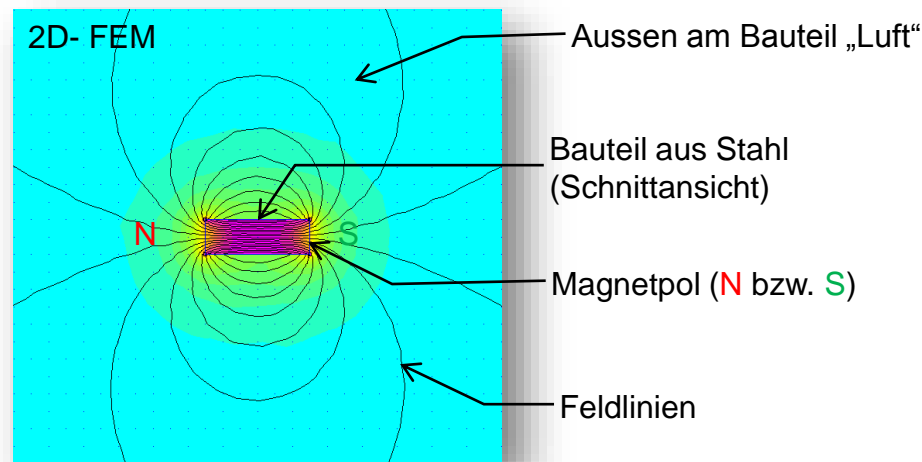
Die Magnetisierung eines ferromagnetischen Bauteils in einer Hauptrichtung führt zu einem magnetischen Dipol. Diese Magnetisierung entspricht z.B. einem Stabmagneten.

Ein magnetischer Dipol führt aufgrund des hohen Polabstandes im Verhältnis zur Bauteilgrösse zu relativ grossvolumigen Streufeldern.

An Kanten und Ecken sind in diesem Fall die höchsten Restmagnetismus-Werte zu erwarten.

In grösserer Distanz zum Dipol nimmt das Feld H mit der dritten Potenz zur Distanz r ab ($H \sim 1/r^3$).

Die 2D-FEM Darstellungen wurden mit einer Magnetfeld Finite-Element-Berechnungssoftware erstellt.



Mögliche Ursachen:

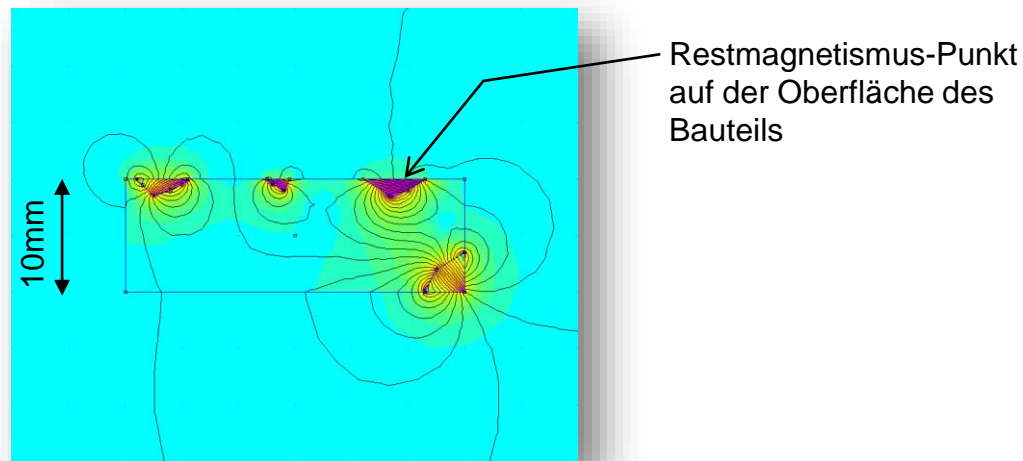
- Lagerung oder Transport von grossen Teilen mit hohem Schlankheitsgrad parallel zum Erdmagnetfeld
- „Einfrieren“ statischer Feldkomponenten (z.B. Erdmagnetfeld) beim Abkühlen von Stahl
- Rissprüfung mit Gleichstrom
- konventionelle Schweißprozesse mit hohen Gleichstromanteilen

Restmagnetismus entsprechend oberflächlicher, feinpoliger Feldkonfiguration

Weitaus häufiger vorkommend und praktisch „Normalzustand“ bei ferromagnetischen Bauteilen ist ein feinpoliger, oberflächlicher Restmagnetismus.

Bei Bauteilen aus hartem Stahl (hohe Koerzitivfeldstärke) nehmen die magnetischen Stellen auf der Oberfläche in der Regel deutlich höhere Werte an und sind schärfer abgegrenzt als auf weichem Stahl. Dieser oberflächliche Restmagnetismus weist meistens eine feinpolige, chaotische Struktur auf.

Restmagnetismus-Maximalwerte müssen nicht zwingend an Ecken oder Kanten liegen, sondern können überall auf der Oberfläche auftreten. Zur Entdeckung der magnetischen Stellen an Oberflächen ist ein Scannen der gesamten Bauteiloberfläche mit einer Messgeräte-Sonde mit geringem Messabstand zur Oberfläche (0.5mm) notwendig.



Mögliche Ursachen:

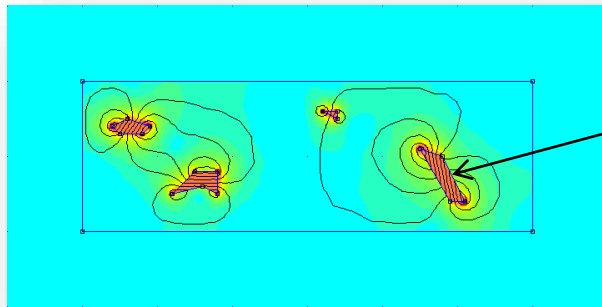
- Direktkontakt zu Werkzeugen, Spannzangen, Aufnahmen etc. mit erhöhtem Restmagnetismus
- Einsatz von magnetischen Hebe- bzw. Spannmitteln

Hartmagnetische Stellen in Stahl-Legierungen

Hartmagnetische Stellen sind lokale Stellen im Material mit hohen Koerzitivfeldstärken aufgrund von Verunreinigungen, Einschlüssen oder lokal veränderter Legierungs-Zusammensetzung. An hartmagnetischen Stellen wird stark erhöhter Restmagnetismus gemessen. Hartmagnetische Stellen können unter gewissen Umständen (z.B. Vibrationen, Erschütterungen) eine Magnetisierung der benachbarten Materialbereiche bewirken.

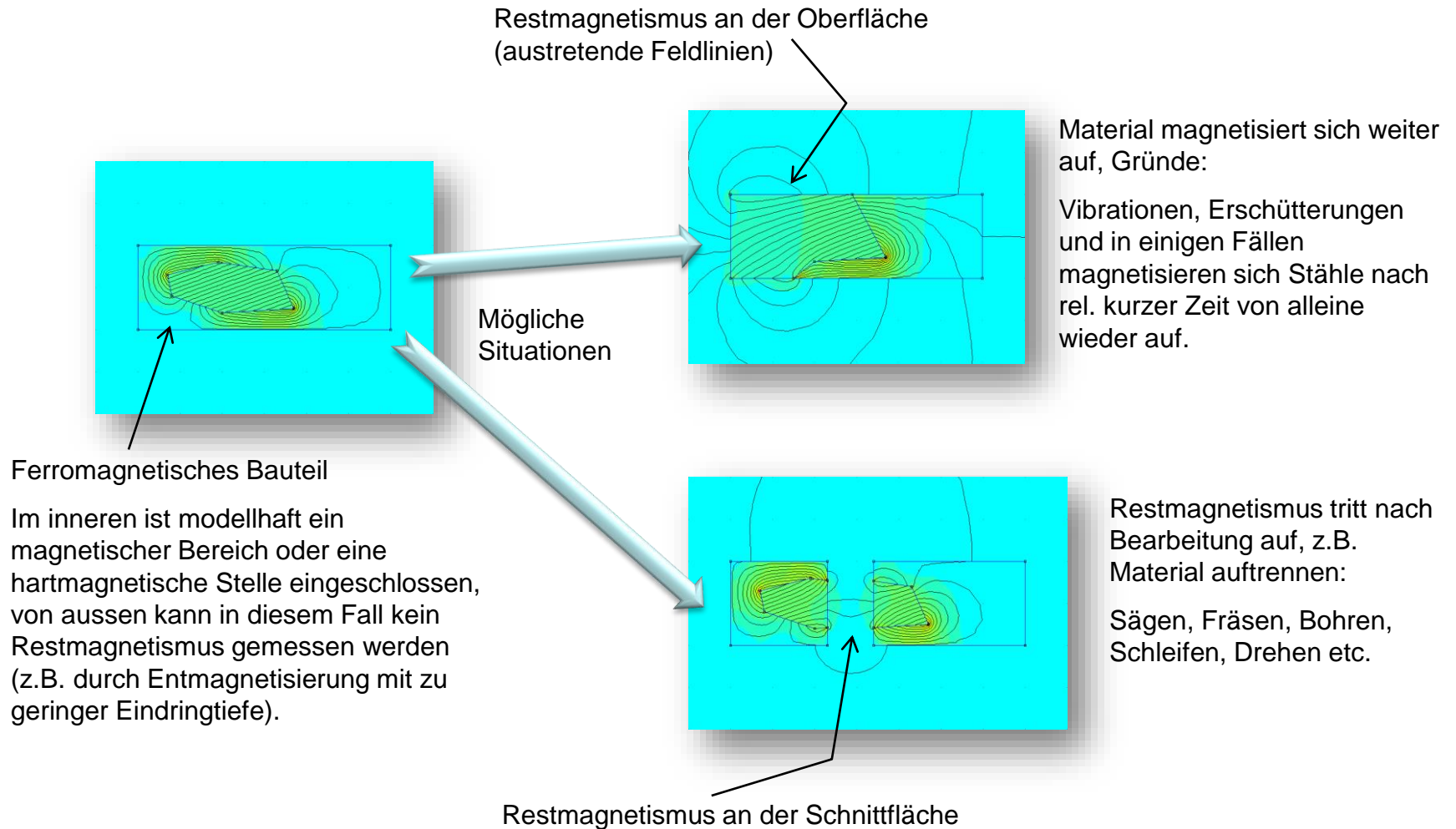
Zur Entdeckung von hartmagnetischen Stellen an Oberflächen ist ein Scannen der gesamten Bauteiloberfläche mit der Messgeräte-Sonde notwendig.

Zur Entmagnetisierung dieser Stellen wird aufgrund der hohen Koerzitivfeldstärken deutlich mehr Feldstärke benötigt als für die übrigen Bereiche des Materials.



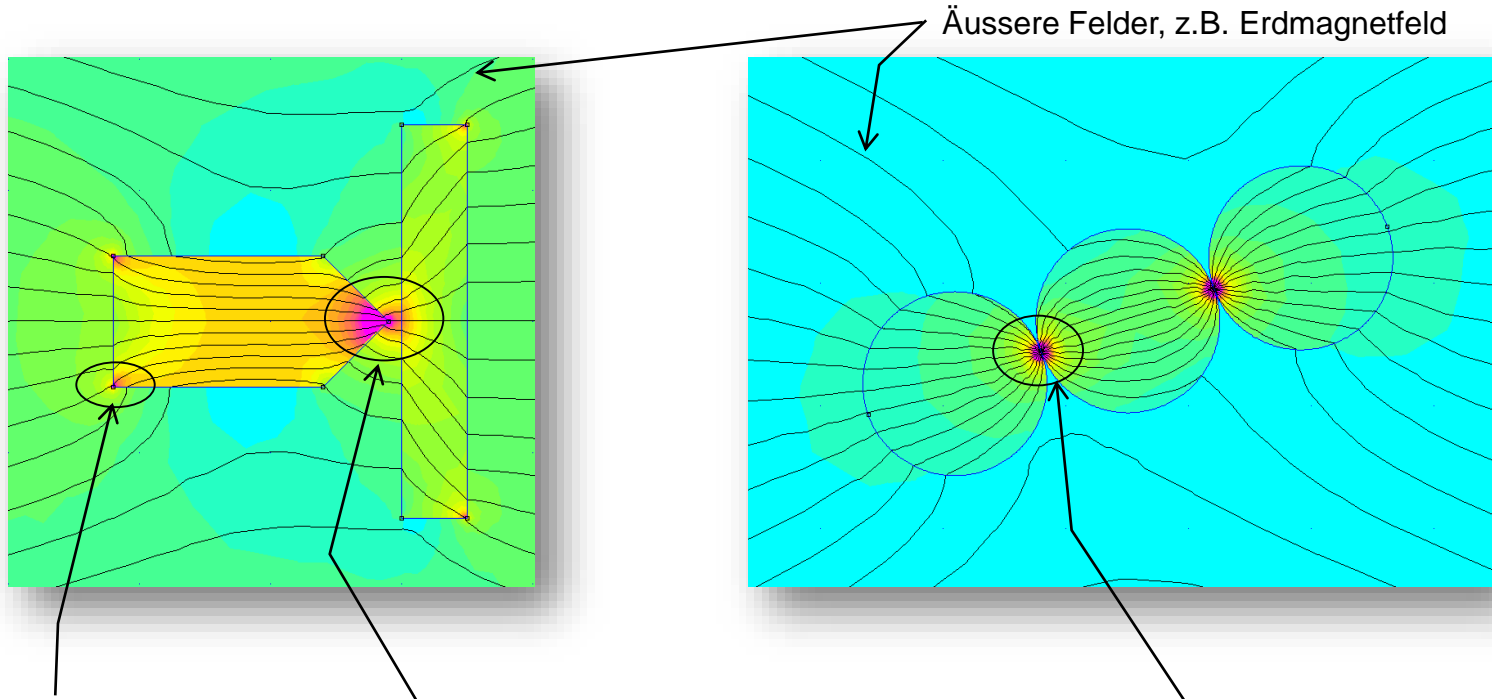
Hartmagnetische Stelle im Bauteil drin

Erneutes Auftreten von Restmagnetismus auf ferromagnetischen Bauteilen



Feldkonzentration aufgrund von Direktkontakt, Engstellen, Kanten und Ecken

Engstellen, Kanten und Ecken auf ferromagnetischen Bauteilen führen aufgrund von Feldkonzentration zu erhöhten Feldstärken und Feldgradienten.



Feldkonzentration an einer Kante.

Feldkonzentration aufgrund einer Engstelle.

Übersteigt die Feldstärke an der Engstelle einen kritischen Wert, überträgt sich der Restmagnetismus.

Feldkonzentration aufgrund von Direktkontakt zwischen zwei Rollen. Restmagnetismus überträgt sich an diesen Engstellen verstärkt.

- Maurer Magnetic AG, Ihr Spezialist für
 - Industrielle Entmagnetisiermaschinen
 - Magnetismus-Messtechnik
 - Entmagnetisieren als Dienstleistung
 - Troubleshooting in Magnetismus
 - Magnete und Magnet-Systeme