

# Magnetische Eigenschaften keramischer Minerale

Neil Rowson<sup>1</sup>, Paul Fears<sup>2</sup>

Magnetische Minerale und feines Eisen plagten die Keramikhersteller, seit vor vielen tausend Jahren der erste glasierte Topf hergestellt wurde. Die frühen Keramiker verwendeten aufwändige und farbenfrohe Muster, um durch solche Verunreinigungen verursachte Unvollkommenheiten zu kaschieren. Doch mit der Zeit stieg die Nachfrage nach weißen oder einfarbigen Keramikprodukten, so dass es immer schwieriger wurde, Unvollkommenheiten zu verdecken.

Die Keramikhersteller wandten sich der Technologie zu und nutzten Magnetabscheider und Siebe, um problematische Minerale und feines Eisen zu erfassen und zu entfernen. Viele keramische Rohstoffvorkommen, wie Feldspat, Quarzsand, Ton und Kaolin, weisen problematische magnetische Minerale auf, darunter Glimmer (Muskovit und Biotit), Hämatit, Chromit und eisenhaltigen Quarz. Zusätzlich wird durch Verschleiß oder Ausfall von Prozessanlagen oft freies Eisen in den Prozess eingebracht (Bild 1). Für den Entwurf eines Magnetabscheiders ist das Verständnis der

magnetischen Eigenschaften der Minerale und ihrer Reaktion in einem Magnetfeld entscheidend.

Das Verhalten von Minerale in einem Magnetfeld wird in fünf Kategorien unterschieden:

- ▶ diamagnetisch
- ▶ paramagnetisch
- ▶ ferromagnetisch
- ▶ anti-ferromagnetisch
- ▶ ferrimagnetisch

Diese Klassifizierungen definieren, ob eine Trennung mit einem Magnetabscheider möglich ist (Bild 2).

## Ursprung magnetischer Eigenschaften

Die magnetischen Eigenschaften jedes Minerals beruhen auf den Elektronen der Atome oder Ionen. Nach den Gesetzen der Wellenmechanik wird das Elektron, das sich auf einer geschlossenen Bahn um den Kern bewegt, als ein Strom betrachtet, der sich wie eine Welle verhält. Dieser sich bewegende Strom erzeugt ein Magnetfeld. Wenn ein Kristall in ein äußeres ungleichmäßiges Magnetfeld gebracht wird, wirkt eine Kraft, die die Magnetfelder der Atome ausrichtet und ein magnetisches Moment für den gesamten Kristall erzeugt. Die magnetische Suszeptibilität  $\chi$  ist das Verhältnis des resultierenden magnetischen Moments  $M$  zur Stärke des externen Feldes  $H$  ( $\chi = M/H$ ).

## Diamagnetismus und Paramagnetismus

Diamagnetische Minerale haben einen niedrigen negativen Wert der magnetischen Suszeptibilität  $\chi$  und werden durch das Magnetfeld leicht abgestoßen. Im Gegensatz dazu haben paramagnetische Minerale einen niedrigen positiven Wert von  $\chi$  und werden schwach von dem Feld angezogen.

Paramagnetismus wird mit den Spins der Elektronen in Verbindung gebracht, während Diamagnetismus mit der Verteilung der Elektronen im Raum zusammenhängt. Diamagnetismus ist eine Eigenschaft, die alle Atome besitzen. Wenn das Atom jedoch eine ungerade Anzahl von Elektronen enthält oder unvollständige Elektronenhüllen

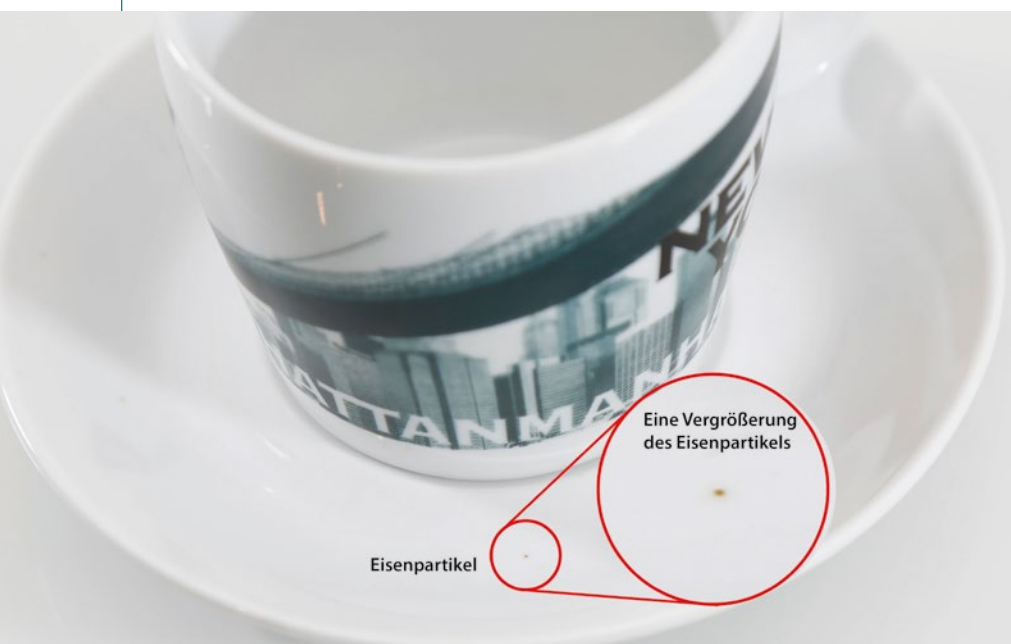


Bild 1 Verunreinigung durch Eisenpartikel in gebranntem Keramikgeschirr (© Paul Fears Photography)



**Bild 2** Nichtmagnetische, halb magnetische und magnetische Fragmente nach der magnetischen Abtrennung (© Paul Fears Photography)

hat (wie bei den Übergangselementen), führt ein Ungleichgewicht der Elektronenspins dazu, dass der paramagnetische Effekt den diamagnetischen Teil der gesamten magnetischen Suszeptibilität überdeckt. Paramagnetismus kommt auch in Metallen vor, wenn eine Wolke von frei leitenden Elektronen vorhanden ist.

Dieses Verhalten wird im Allgemeinen nur auf Kristalle angewendet, da das innere Kristallfeld als Ganzes die magnetischen Effekte modifiziert. Die elektronischen Energieniveaus in einem Kristall werden als gespalten aufgefasst und die gesamte magnetische Suszeptibilität hängt von der Verteilung der Elektronen in den verschiedenen Niveaus ab. Daher ist es bei komplexen Verbindungen nicht möglich, die magnetischen Eigenschaften vorherzusagen.

In Minerale sind eisenhaltige Strukturen paramagnetisch. Es gibt jedoch auch paramagnetische Minerale ohne Eisen. Die Unterschiede in der magnetischen Suszeptibilität sind ausreichend, um eine Trennung mit Hochintensitäts-Magnetscheidern zu ermöglichen.

Bismut ist das einzige Beispiel für ein diamagnetisches Mineral. Paramagnetische Minerale sind weitverbreitet und umfassen Hämatit sowie Biotit-Glimmer (**Bild 3**).

### Ferromagnetismus

Ferromagnetische Minerale besitzen auch in Abwesenheit eines angelegten Magnetfeldes ein magnetisches Moment. Sie werden selbst von einem schwachen Magnetfeld stark angezogen und bleiben permanent magnetisiert. Ferromagnetische Substanzen existieren aber auch in unmagnetisierten Zuständen, wenn

bei Raumtemperatur die elektronischen magnetischen Momente durch Wechselwirkung zwischen benachbarten Atomen permanent ausgerichtet sind. Eisen, Kobalt, Nickel und Pyrrhotin sind typische Beispiele für die ferromagnetische Spezies.

### Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus

Die Art und Weise, in der sich Elektronen in bestimmten Kristallen ausrichten, erzeugt entweder einen antiferromagnetischen oder ferrimagnetischen Effekt.

### Antiferromagnetismus

Dieses Phänomen tritt auf, wenn benachbarte Atome so interagieren, dass die Spins in parallele, aber entgegengesetzte Richtungen ausgerichtet werden, was als antiparallelen Spins bezeichnet wird. Die beiden Momente heben sich gegenseitig auf und es gibt kein permanentes magnetisches Moment. Typische Beispiele sind Metalle wie Chrom und Oxide wie Nickeloxid (NiO).

### Ferrimagnetismus

Als Ferrimagnetismus wird ein permanentes Moment bezeichnet, das daraus resul-



**Bild 3** Mit einem elektromagnetischen Filter abgeschiedene, paramagnetische Minerale (© Paul Fears Photography)

Tabelle 1 Magnetische Eigenschaften der für die Keramikherstellung relevanten Minerale (© Bunting)

Mineral	Magnetische Feldstärke (Gauß)	Keine Magnetsierung																								
		1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000	23000	24000	
Apatit																										
Biotit																										
Calciumcarbonat																										
Feldspat																										
Granat																										
Goethit																										
Hematit																										
Limonit																										
Magnetit																										
Muscovit																										
Nephelin Syenit																										
Olivin (Fayalit)																										
Quarz																										
eisenhaltiger Quarz																										
Talk																										

tiert, dass bei antiparalleler Ausrichtung die Komponenten in entgegengesetzten Richtungen nicht gleichwertig sind. Magnetit ist ein wichtiges Beispiel für ein ferrimagnetisches Mineral (Tabelle 1).

### Folge der Kontamination mit Magnetpartikeln

Das Vorhandensein von magnetischen Partikeln in einem Keramikkörper oder einer Glasur, sowohl in mineralischer Form als auch als freies Eisen, verursacht eine Vielzahl von Problemen während des Brennprozesses. In der Vergangenheit wurden solche Fehler durch kunstvolle und farbenfrohe Glasuren und Dekorationen abgedeckt. Moderne Keramikhersteller haben jedoch nicht die Möglichkeit, solche Methoden anzuwenden.

Magnetische Partikel verursachen sowohl Struktur- und Oberflächenfehler als auch Farb- und Helligkeitsprobleme. Minderwertige, in Massenproduktion hergestellte Keramiken weisen oft sichtbare schwarze Flecken und damit verbundene Glasurverformungen auf. Weniger sichtbare schwarze oder braune Partikelflecken sind ebenfalls häufig (Bild 1). Solche Fehler entstehen, wenn während des

Brennprozesses magnetische Minerale oder freies Eisen in der Glasur vorhanden sind. Die Wärme wird von den Partikeln absorbiert und gespeichert, was zu einer Verdunkelung der Partikelfarbe und Ausdehnung führt. Das Partikel kann auch ‚platzen‘ und Defekte in der umgebenden Glasur verursachen. Ein weiterer Effekt ist die Veränderung der endgültigen Farbe der gebrannten Glasur und die Verringerung der Helligkeit, besonders, wenn sie weiß oder weiß mit leicht grauem oder gelbem Schimmer ist, aufgrund der Anwesenheit von feinen magnetischen Partikeln.

Defekte bei Produkten wie Keramikfliesen, Geschirr und Sanitärobjekten, die auf perfektes Aussehen angewiesen sind, machen entweder partielle Nacharbeit oder vollständige Ausmusterung und Recycling nötig. In Anlagen mit unzureichenden Systemen zur Entfernung der magnetischen Partikel können solche Raten bei über 10 % liegen. Dies ist sowohl zeit- als auch materialaufwendig.

Nicht sichtbare magnetische Verunreinigungen bleiben problematisch. Magnetische Partikel, die vor dem Brennen im Scherben verbleiben, reagieren auf Wärme in der gleichen Weise wie die Partikel in der Glasur. Dadurch wird die umgebende Keramik-

struktur geschwächt, was zu feinen Rissen führt, die sich mit der Zeit entwickeln. Das Versagen eines Keramikprodukts aufgrund von Brüchen kann häufig auf ein oder mehrere magnetische Partikel zurückgeführt werden, die entlang der Bruchlinie sichtbar sind. Ein einziger Magnetpartikel reicht aus, um ein solch katastrophales Versagen auszulösen.

Dies stellt für viele Hochleistungskeramiken ein Risiko dar, zumal die Kontamination nicht von Anfang an sichtbar ist. Das Versagen tritt erst mit der Zeit ein.

### Magnetische Trennung von Mineralen

Das Verständnis der magnetischen Eigenschaften der Minerale in einem bestimmten keramischen Rohmaterial ist für die Optimierung der magnetischen Trennung von entscheidender Bedeutung. Die breite Palette von Magnetabscheidern verwendet unterschiedliche Arten und Stärken von Magnetfeldern, um eine Separation zu erzeugen. In einem einzigen Mineralaufbereitungsvorgang können verschiedene Magnetabscheider zum Einsatz kommen.

Die Palette der Hochintensitäts-Magnetabscheider wird in Trocken- und Nassaufbereitung unterteilt (Tabelle 2). Viele keramische Rohstoffe wie Feldspat, Zirkon- und Quarzsand werden im trockenen Zustand gehandhabt und verarbeitet. Die meisten Verarbeiter von keramischen Mineralen behandeln ihre eigenen Rohstoffvorkommen magnetisch, da höher aufbereitete Materialien einen höheren Gewinn erzielen. Hochintensive Magnetabscheider entfernen magnetische Minerale und freies Eisen. Zu den Ausführungen gehören der Seltene Erden-Rollen-Magnetabscheider und der Seltene Erden-Trommelmagnetabscheider, die beide Permanentmagnete verwenden, oder der elektromagnetisch-induzierte Rollenmagnetabscheider, der sich besonders für die Handhabung von Hochtemperaturmaterialien (z. B. direkt nach der Trocknung) eignet. Innerhalb der Produktionsanlage wird beim Sprühtrocknenkeramikverfahren üblicherweise feines Eisen in den Prozess eingebracht. Sowohl die Seltene-Erden-Rollenmagnetabscheider als auch Trommelmagnete werden eingesetzt, um diese problematische Verunreinigung zu entfernen.

Nachdem die keramischen Rohstoffe gemahlen und zu Schlickern, Scherben und Glasuren verarbeitet und gemischt worden sind, erfolgt eine weitere magnetische Extraktion. Beim Mahlprozess wird oft eingeschlossenes mineralisches Eisen freigesetzt, während

**Tabelle 2** Hochintensitäts-Magnetabscheider, die üblicherweise zur Aufbereitung von keramischen Rohstoffen, Scherben und Glasuren verwendet werden (© Bunting)

Magnetabscheider	Prozess	Teilchengrößenverteilung	Magnetische Feldstärke
Elektromagnetischer Filter	nass	0 - 500 µm	0 - 10.000
Elektromagnetisch-induzierter Rollenmagnetabscheider (IMR)	trocken	65 - 1000 µm	0 - 22.000
Seltene Erden-Rollen-Magnetabscheider (RE Roll)	trocken	65 µm - 10 mm	14.000
Magnetabscheider mit hoher Intensität im Nassverfahren (WHIMS)	nass	0 - 800 µm	0 - 18.000

freies Eisen wieder durch den Prozess eingebracht wird (z. B. beim Sieben, Pumpen usw.).

Elektromagnetische Filter, die starke Magnetfelder erzeugen, reinigen sowohl den Scherben als auch die Glasur. Größere Modelle für hohe Kapazitäten stellen die letzte Trennstufe zur Entfernung sehr feiner und schwach magnetischer Minerale vom Scherben dar. Kleinere elektromagnetische Filter, oft auf beweglichen Rahmen montiert, trennen feines Eisen und schwach magnetische Stoffe von der Glasur (Bild 4). Es ist jedoch Vorsicht geboten, da einige Glasurfärbungen magnetisch sind.

Als abschließende Kontrolle – und um sichtbare Verunreinigungen auf der Glasur zu verhindern – werden Neodym-Seltene-Erden-Röhrenmagnete oder magnetische

Flüssigkeitsabscheider mit Neodym-Magneten nahe an oder innerhalb der Glasurstation positioniert. Dadurch werden alle magnetischen Partikel aufgefangen, die während des Transports zur Station in die Glasur eingebracht wurden.

### Zukünftige Mineralreserven

Da die traditionellen keramischen Mineralreserven erschöpft sind und zunehmend komplexere Lagerstätten abgebaut werden, ist das Verständnis der Mineralogie in Bezug auf die magnetische Suszeptibilität von entscheidender Bedeutung. Lieferanten von Magnetabscheidern arbeiten eng mit Mineralverarbeitern und Anlagenkonstrukteuren zusammen, oft bereits in der Durchführbarkeitsphase des Projekts, und beraten bei der Auslegung des Magnetabscheiders. Dies erfordert oft umfangreiche Testarbeiten in Magnetseparationslabors und vor Ort. Die anhaltende Nachfrage nach weißer und fehlerfreier Keramik bedeutet, dass die Beseitigung von magnetischen Mineralen und freiem Eisen für Keramikhersteller und Rohstofflieferanten auch zukünftig eine hohe Priorität haben wird. ◀

**Kontakt:**  
Bunting-Redditch,  
Worcestershire B98 9PA, UK,  
[www.mastermagnets.com](http://www.mastermagnets.com)



**Bild 4** Elektromagnetischer Filter von Bunting in einer Produktionsanlage für Keramik (© Bunting)

- 1 Laborversuchsleiter bei Bunting-Redditch, ehemaliger Professor für Minerals Engineering an der Universität Birmingham
- 2 Berater für Marketing und Minerale bei Bunting