

KFK-290

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

März 1964

*Gesellschaft für Kernforschung m. B. H.
Zentralbücherei*

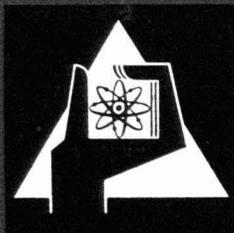
KFK 290

Institut für Reaktorbauelemente

16. Feb 1964

Zur fraktionierten magnetischen Trennung pulverförmiger Gemische

H. Sundermann



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Zur fraktionierten magnetischen Trennung pulverförmiger Gemische

Fractional magnetic separation of powdered mixtures

Contribution à la séparation magnétique fractionnée des mélanges pulvérisés

Von H. Sundermann *)

(Mitteilung aus dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, Institut für Reaktorbauelemente. — Vortrag anl. der Herbstsitzung des Wissenschaftlichen Ausschusses der DKG am 18. Okt. 1963 in Würzburg)

Kurzfassung

Magnetische Trennverfahren werden in den verschiedensten Arbeitsgebieten angewandt, so in der Scheidungsanalyse wo vorwiegend für metallkundlich analytische Untersuchungen die verschiedenen Legierungsphasen nach ihrer elektrochemischen Freilegung nach unterschiedlichen ferromagnetischen Eigenschaften getrennt werden. In der Erzaufbereitung gilt es ebenfalls nach ferromagnetischen Unterschieden das Erz von der Gangart zu trennen. In der Mineralogie und in der Keramik besteht die Aufgabe darin, vor allem nach unterschiedlichen para- und diamagnetischen Daten zu trennen. Je nach Aufgabenstellung müssen die Trenneinrichtungen in ihrem Aufbau dem jeweiligen Problem angepaßt sein. Vor allem ist zu unterscheiden, ob es sich um Trennungen von großen Mengen für weitere Verarbeitungszwecke handelt oder aber um kleine Mengen, die mit hohem Reinheitsgrad für Versuchs- oder analytische Zwecke gewonnen werden sollen. Gilt es aus einem sog. unmagnetischen Pulver (dia- oder paramagnetisch) Reste von ferromagnetischen Verunreinigungen herauszubringen, so gelingt dies bereits mittels eines einfachen Stabmagneten. Stellt man aber die Forderung, daß jene ferromagnetischen Phasen rein, d. h. ohne die meist bis zu 50 % Anteile mit umklammerten unmagnetischen Phasen, abzutrennen sind, beispielsweise für analytische Zwecke, dann erfordert dies bereits eine speziellere, dem Zweck angepaßte Vorrichtung. Bei fraktionierten Trennungen, also Trennungen innerhalb und unter den ferro-, para- und diamagnetischen Stoffgruppen muß neben den Trennfeldern, Schwerfeld und Magnetfeld — letzteres mit hohem Gradienten — noch für eine lokale Bewegung des Trenngutes gesorgt werden, so daß Umklammerungen und Koagulationen vermieden bleiben, daß also das einzelne Teilchen frei dem Kräftespiel der Trennfelder folgen kann. Eine derartige lokale Bewegung kann bereits in einfacher Weise durch rhythmisches Unterbrechen eines durch Gleichstrom erzeugten Magnetfeldes hervorgerufen werden. Wirkungsvoller sind aber mechanische Bewegungen, die sich auf mannigfaltige Art realisieren lassen, so z. B. durch Wälzen oder Vibration des Trenngutes im Polgebiet, aber derart, daß keine geordnete Bewegung des Gutes in Richtung der Trennkräfte entsteht. Werden zur Trennung Wechselfelder (50 Hz) verwandt, so erzeugt das Wechselfeld neben den Trennkräften auch eine lokale Bewegung und damit die gewünschte Auflockerung des Trenngutes. In der Praxis wird man in jedem Fall eine abstufbare Überlagerung der verschiedenen Möglich-

keiten anstreben. Nachstehend sei das Verhalten von Pulvern in einem Wechselfeld etwas näher erläutert.

Wenn man *permanente* magnetische Dipole in ein Magnetfeld bringt, so unterliegen sie im zeitlich konstanten Feld H einer Anziehung in Richtung des Feldgradienten. Die anziehende Kraft ist gegeben durch $\vec{K} = \vec{M} \text{ grad } \vec{H}$. Auf die Dipole wird ferner ein Drehmoment von der Größe $\vec{D} = \vec{M} \times \vec{H}$ ausgeübt. In einem periodischen Wechselfeld $H = H \cdot \cos(\omega t)$ sind die Verhältnisse wesentlich verwickelter. Größere makroskopische Dipole (größer als etwa 1 mm) unterliegen auf Grund ihrer Massenträgheit praktisch keiner Bewegung. Größere nichtpermanente ferromagnetische Dipole werden infolge der Ummagnetisierung angezogen. Kleinere permanente Dipole (kleiner als etwa 1 mm) mit wesentlich geringerem Trägheitsmoment werden im Wechselfeld in räumliche Schwingung versetzt, allerdings infolge des Trägheitsmomentes mit Phasenschlupf zum äußeren Feld. Die Phasendifferenz wirkt sich dabei so aus, daß im zeitlichen Mittel eine antiparallele Komponente des Dipolmomentes zum Felde erhalten bleibt. Dadurch tritt nun eine pseudodiamagnetische Kraft auf, die dem Feldgradienten entgegengerichtet ist. Kleine Dipole unterliegen somit einem Abstoßungseffekt.

Für die abstoßende Kraft K gilt nach Mittelung über die Zeitperiode und über alle Anfangslagen in Näherung

$$K = - \frac{M^2 \text{ grad } H_0^2}{8 \Theta \left(\frac{k^2}{\omega^2} + u^2 \right)}$$

Θ = Trägheitsmoment, k = Reibungskoeffizient, ω = Kreisfrequenz. Da die Reibung quadratisch in den Nenner eingeht, ist zu entnehmen, daß Trennungen mit Hilfe des aufgefundenen Abstoßungseffektes¹⁾ in Gasen wirkungsvoller sind als in wäßrigen Aufschlämmungen.

Das in der Praxis anfallende Trenngut besteht natürlich keineswegs aus permanenten Dipolen, sondern aus ferro-, para- und diamagnetischen Substanzen. Ferromagnetische Körper haben zwei verschiedene Freiheitsgrade, sich dem äußeren Wechselfeld anzupassen. Der eine besteht in der zuvor beschriebenen Schwingung, der andere liegt in der Umorientierung der Weißschen Bereiche, also in der Ummagnetisierung. Je nach Form der Hystereseurve folgt daher ferromagnetisches Material beiden Freiheitsgraden in unterschiedlicher Stärke²⁾. Ein zuvor im Gleichfeld vormagnetisiertes Teilchen wird

¹⁾ H. Sundermann: Über die Abstoßung ferromagnetischer Stoffe im magnetischen Wechselfeld. Z. Phys. Chem. N. F. 19 (1959), 23–28.

²⁾ H. Sundermann: Mem. sc. Rev. Metallurgie 9 (1961), 655–660 Reprint: EUR 46. f Communauté Européenne de l'Énergie Atomique.

*) Dr. H. Sundermann, Karlsruhe-Waldstadt, Kohlbergerstr. 2 b.

im Wechselfeld sowohl eine Schwingung (Bild 1) beginnen und damit dem Abstoßungseffekt unterworfen sein als auch gleichzeitig allmählich seine Elementarbereiche neu orientieren. Ist das Wechselfeld in seiner Amplitude kleiner gewählt als der Koerzitivkraft der zugehörigen Hystereseurve entspricht (Bild 2), dann setzt solange ein Entmagnetisierungsvorgang ein, bis wiederum eine dem Wechselfeld entsprechende kleinere Hystereseurve periodisch durchlaufen wird (Bild 3). In diesem Zustand ist die vorher beschriebene Schwingung und damit die abstoßende Kraft abgeklungen, das

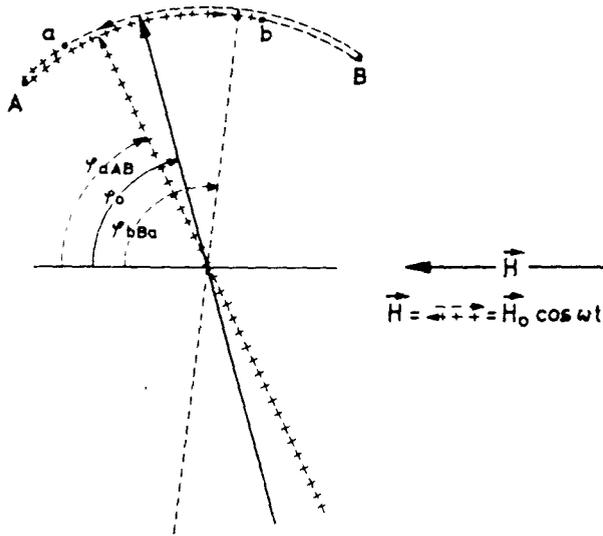


Bild 1. Schwingung eines permanenten Dipols im periodischen Magnetfeld $H = H_0 \cdot \cos \omega t$. Die Umkehrpunkte der Schwingung A und B fallen wegen $\Theta \neq 0$ nicht mit den Nullstellen des Feldes a und b zusammen. $\Theta =$ Trägheitsmoment. Für $0 < \varphi_0 < \pi/2$ ist der auf φ_0 bezogene Ausschlag $A < B$. Für $\pi/2 < \varphi_0 < \pi$ ist der auf φ_0 bezogene Ausschlag $A > B$. Stellen φ_{aAb} und φ_{bBa} die zeitlichen Mittelwerte zwischen den Nullstellen des Feldes dar, so gilt:

$$\begin{cases} \cos \varphi_{bBa} < \cos \varphi_{aAb} & \text{für } \varphi_0 < \pi/2 \\ \cos \varphi_{aAb} < -\cos \varphi_{bBa} & \text{für } \varphi_0 > \pi/2 \end{cases}$$

Somit ist die mittlere Kraft $K = M \cdot \text{grad } H_0 (\cos \varphi_{bBa} - \cos \varphi_{aAb})$ stets negativ in bezug auf $\text{grad } H_0$.

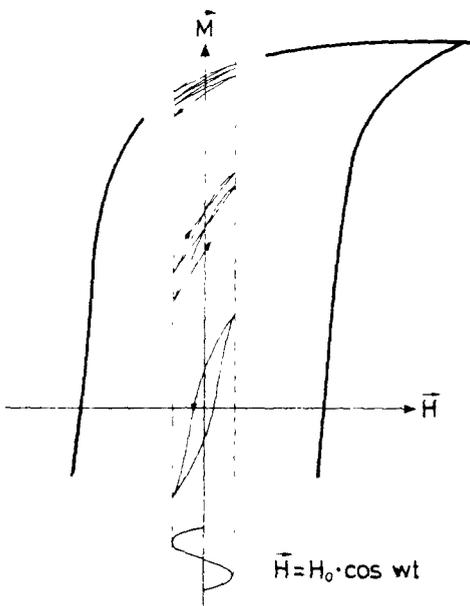


Bild 2. Abfall der Vormagnetisierung unter Einwirkung des äußeren periodischen Feldes längs eines zyklischen Weges innerhalb der Hysterese.

Teilchen unterliegt nun der normalen Anziehung infolge ständiger Ummagnetisierung in Richtung des äußeren Feldes.

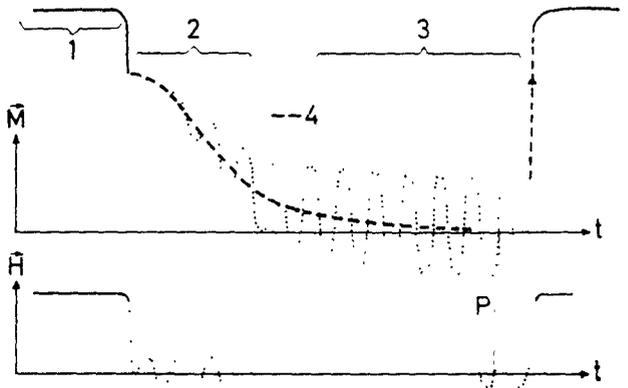


Bild 3. Darstellung des Abklings der Vormagnetisierung durch Einwirkung eines periodischen Feldes im zeitlichen Verlauf. Gebiet (1): Anziehung im Gleichfeld. Gebiet (2): Abstoßung im Wechselfeld. Gebiet (3): Anziehung im Wechselfeld, pulsierend. Kurve (4): Abfall der Dipolmomente der Teilchen im Zeitmittel. P : Phasenverschiebung infolge Hysterese.

In geeigneter Anordnung lassen sich mit Hilfe des geschilderten Effektes ferromagnetische Substanzen mit annähernd leichter Suszeptibilität noch nach unterschiedlicher Remanenz und Koerzitivkraft, also nach Gestalt der Hystereseurve trennen. Da in die Magnetisierung eines Körpers noch in die Abhängigkeit seiner Geometrie der Entmagnetisierungsfaktor eingeht, wirkt der Effekt sogar selektiv nach unterschiedlicher Teilchenform. So war es z. B. möglich, für metallkundliche Untersuchungen für die Ausscheidungsanalyse lamellares von körnigem Eisenkarbid zu trennen.

In Bild 4 und 5 sind einige Trennergebnisse wiedergegeben, die mit einem nach obigen Überlegungen entwickelten Magnettrenngerät gewonnen wurden. Es handelt sich um ein Gerät, das noch mit Aufschlammungen arbeitet und speziell auf die Belange der metallkundlichen Ausscheidungsanalyse^{3,4)} abgestimmt ist.

Die in den keramischen Laboratorien benutzten Geräte arbeiten vorwiegend noch mit gleichstromerregten Magnetfeldern. Das zu trennende Gut läuft längs einer Schiene im Spalt des Magnetjoches. Die Aufspaltung erfolgt in weitem Spektrum bis herab zu Suszeptibilitätswerten von 10^{-7} . Als Trennfelder dienen einmal das in Stärke und im Gradienten veränderliche Magnetfeld und zum anderen das Schwerfeld, in dem die Gleitschiene verschiedene Stellungen einnehmen kann. Die notwendige lokale Bewegung wird durch mechanische lokale Vibration mit 50 Hz erreicht. In der Praxis zeigt sich, daß die einfache Vibration jedoch nicht ausreicht, um Teilchenkoagulationen von etwa unter $100 \mu\text{m}$ zu vermeiden. Sicherlich würde ein Wechselfeld die lokale Auflockerung wesentlich unterstützen. Bezüglich des beschriebenen Abstoßungseffektes im Wechselfeld muß bemerkt werden, daß er natürlich an diamagnetischen Teilchen in der beschriebenen Weise nicht auftreten kann, da die Elektronen in diamagnetischen Stoffen dem äußeren Feld auf reibungslosen Bahnen folgen, derart.

³⁾ W. Koch und H. Sundermann: *Isolierungstechnische Untersuchungen an Thomasroheisen*. Forschungsber. Nr. 703 Kultusminist. NRW. Westdtsh. Verlag Köln u. Opladen 1959.

⁴⁾ H. Sundermann: *Freiberger Forschungsh.* C 103 (1962). Akademie Verlag, Berlin.



Halbberuhigter Stahl

Si	Mn	P	S
0.046	0.68	0.024	0.033
C	Al	O ₂	
0.20	0.005	0.013	



20 μm

magnetgetrennt

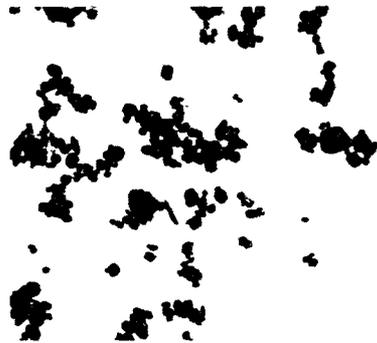
chloriert

Bild 4. Elektrochemisch freigelegte Phasen eines halb beruhigten Stahls. Links wie sie nach ihrer magnetischen Separierung anfallen, glasige Körper mit einem dunklen Kern aus Mangansulfid. Rechts Bruchstücke der gleichen Körper nur anstatt durch Magnet-trennung durch einen Chlor-Vakuum-Trennungsgang gewonnen, wobei der Sulfidkern gelöst wurde und für die metallkundliche Aussage verloren ging

Stahl	0.73	0.35	0.84			magnetisch	3.67	15.5	1.3	8.7	74.2	Fe ₃ C, (VC)
Bilanz	0.68	0.05	0.59	2.76		unmagnetisch	0.41	25.5	0.9	65.1	8.5	VC, (Fe ₃ C)
Isolat	4.08	C	Mn	V	Fe	Röntgenanalyse						



1 μm



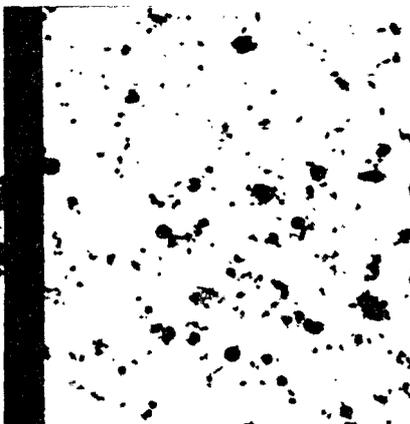
1 μm

Bild 5. Magnetische Trennung der Karbide eines vergüteten Werkzeugstahles. Links die magnetische Fraktion, die vorwiegend aus Fe₃C-Lamellen besteht mit fest aufgewachsenen Vanadinkarbidkörnern. Rechts ist die unmagnetische Fraktion gezeigt, die mit fokussiertem Ultraschall von den Verwachsungen abgelöst wurde und dann bei der Trennung als eigene Fraktion anfiel.

Stahl		0.03	0.3	2.20	0.017	0.027				
Bilanz		0.018	0.015	0.26	0.017	0.026	0.17			
Isolat	0.298	C	Si	Mn	S	O ₂	Fe	Al		Röntgenanalyse
stark magn.	0.16	0.2	< 1	1.7	n. b.	n. b.	97	n. b.		α-Fe
schwach magn.	0.018	1.8	14.6	29.6		31.7	22	n. b.		Oxide: MnO, FeO, SiO ₂
unmagnetisch	0.12	15.3	12.8	20.0	14.6	21.6	10.4	7.9		MnS, Oxide: Al ₂ O ₃ , SiO ₂



100 μm



100 μm



20 μm

Bild 6. Beispiel einer Trennung in drei Fraktionen. Links: Stark magnetisches α-Eisen. Mitte: Magnetische, oxidische Mischkörper, bestehend aus MnO, FeO und SiO₂. Rechts: Unmagnetische Mangansulfide (langgestreckt) und unmagnetische oxidische Körper aus Al₂O₃ und SiO₂.