

MAGNETISIERUNGSKURVEN UND HYSTERESE- KENNGRÖßEN VON GRANITEN*

H. Markert

Zusammenfassung

Es werden Messungen der Neukurven und rückläufige Hysterese-
äste fünf verschiedener Granitproben vorgestellt. Dabei zeigt
sich, daß wegen ihres extrem langgestreckten, schmalen und
flachen Kurvenverlaufes die Hysterese in Feldern bis zu 900
Oersted nur teilweise angesteuert werden kann. Dennoch sind
quantitative Aussagen über zahlreiche Magnetisierungskenn-
größen möglich. Die Werte der Sättigungsremanenz liegen, von
einer Ausnahme abgesehen, bei 10^{-4} Gauß, jene der Anfangs-
suszeptibilität bei wenigen 10^{-6} Gauß/Oersted.

Die Messung der anhysteretischen Remanenz ermöglicht die zu-
sätzliche Bestimmung der Scherungsgeraden und der totalen
Entmagnetisierungsfaktoren, die ungewöhnlich hohe Werte von
bis zu $2,4 \cdot 10^5$ Oersted/Gauß erreichen! Es wird gezeigt, wie
sich daraus die Konzentration der magnetisch wirksamen Erz-
komponente abschätzen läßt. Die typischen Packungsdichten
liegen bei einigen 10^5 .

Es wird darauf hingewiesen, daß die beobachteten
Koerzitivkräfte von rund 40 Oersted sehr genau mit jenen
synthetischer Silikatgläser übereinstimmen, in denen reiner
Magnetit von 3μ Korndurchmesser als Träger der Magnetisierung
ausgeschieden worden war. Pseudoeinbereichsverhalten scheint
demnach in diesen Graniten vorzuherrschen. Dem entsprechen
Abschätzungen der Koerzitivkraft der Remanenz H_{CR} in der
Größenordnung von bis zu 84 Oerstedt.

*) Publikation Nr. 4 aus dem "Sonderlabor für Geo- und
Archäomagnetismus" auf der Plassenburg über Kulmbach
(Oberfranken)

Einleitung

Paläomagnetismus an Graniten wird seit längerem mit Erfolg betrieben, vergl. zum Beispiel F. Heller (1971). Dennoch ist unser Wissen über einfache gesteinsmagnetische Basisdaten der Granite, wie Magnetisierungs- und Hysterese Kenngrößen bis heute erstaunlich gering und gänzlich unzureichend für die Entwicklung einer quantitativen Vorstellung von den magnetischen Eigenschaften und Verhaltensweisen der Vertreter dieser Gesteinsklasse.

Insbesondere scheinen systematischere Untersuchungen dazu beinahe vollständig zu fehlen. Eine Ausnahme, möglicherweise die einzige überhaupt, bildet die ausführliche Arbeit von M. Kopf (1966) über physikalische Eigenschaften granitoider Gesteine. Auch hier wird jedoch lediglich eine magnetische Kenngröße - die mittels eines Wechselstrom-Brückenverfahrens ermittelte Suszeptibilität - an einem allerdings eindrucksvollen Probensatz gemessen und daraus zum Beispiel ihr Größenspektrum bestimmt, vergl. Abb. Nr. 9 der Arbeit von M. Kopf.

Die auftretenden Größenordnungen sind bemerkenswert.

So ergab sich daß der weitaus überwiegende Teil aller untersuchten Proben Suszeptibilitäten von weniger als $40 \cdot 10^{-6}$ Gauß/Oersted aufwies.

Die höchsten gemessenen Werte lagen bei 4000 bis $6000 \cdot 10^{-6}$ Gauß/Oe. Im Regelfall muß man deshalb davon ausgehen, in einem Feld von 1000 Oersted lediglich Magnetisierungen von deutlich weniger als 40 mGauß erzielen zu können. Soll eine derartige Magnetisierungskurve auch nur in Zehn-Oersted-Schritte aufgelöst werden, so bedarf es bereits einer Magnetometer-Empfindlichkeit von etwa $1 \cdot 10^{-5}$ Gauß. Vermutlich liegt in diesem Umstand der Befund begründet, daß Magnetisierungs- und Hysteresemessungen an Graniten bislang so gut wie nicht vorzuliegen scheinen.

Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, hier eine erste Abhilfe zu schaffen und einige typische Beispiele von Hysteresekurven und daraus gewonnenen Sätzen von Kenngrößen vorzustellen.

Meßtechnik

Der niedrigen Suszeptibilität der Granite entspricht eine außerordentlich geringe Konzentration an ferrimagnetischen Erzkörnern. Will man reproduzierbare und verlässliche magnetische Untersuchungen durchführen, so bedarf es daher hinreichend grosser, das Gestein in seinem grobheterogenen Gefüge charakterisierender, repräsentativer Proben. Und es bedarf hoher Magnetfel-

der, denn die geringe Erzkonzentration spiegelt sich in einem extrem hohen inneren - und damit auch in einem sehr großen totalen - Entmagnetisierungsfaktor wider, welcher äußerst flache Hysteresekurven zur Folge hat.

Diese drei Vorgaben, nämlich sehr schwache Magnetisierungen, große Probenvolumina und hohe Meßfeldstärken charakterisieren die typischen experimentellen Schwierigkeiten einer Hysterese-messung an Graniten. Die üblichen und kommerziell erhältlichen Meßanlagen mit hinreichend großem Feldbereich, also "vibrating sample magnetometer" im Felde eines Elektromagneten, oder Squid-Sensoren in der Kombination mit supraleitenden Spulen beschränken jeweils das maximal mögliche Probenvolumen auf Zylinder von 7 mm Länge und 7 mm Durchmesser, also auf nur rund $0,27 \text{ cm}^3$ Meßvolumen! Eine repräsentative Probe sollte aber wenigstens inch-Dimensionen aufweisen, also das etwa 45-fache Volumen von $12,27 \text{ cm}^3$ erreichen. Zudem ist die Empfindlichkeit des "vibrating sample magnetometer" mit rund 10^{-5} Gauß Magnetisierungsauflösung für unverrauschte Messungen schon nicht mehr gut genug.

Als Ausweg bot sich der Rückgriff auf eine früher schon erprobte Meßtechnik an: die Umkehrung des "vibrating sample"-Prinzips zum "Schwingspulen-Magnetometer", vergl. F. M. Wagner und H. Markert (1979). Die damals erzielte Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-3}$ Gauß reichte zunächst allerdings ebenfalls bei weitem nicht aus. Sie bot jedoch von Anfang an die Möglichkeit, inch-Proben zu untersuchen. Im Laufe der letzten Jahre gelang es, die Empfindlichkeit um drei Zehnerpotenzen auf $2 \cdot 10^{-6}$ zu steigern!

Die erforderlichen hohen Feldstärken wurden, ebenfalls in Anleh-

nung an die Arbeit von F. M. Wagner und H. Markert (1979), mit Hochfeld-Helmholtzspulen erzeugt. Eine Rechner-gesteuerte Stromversorgung von maximal 30 Ampere und 4,5 kWatt erlaubte Hysterese-messungen bis zu Feldern von etwa 1000 Oersted.

Außerdem stand eine 50 Hz-Wechselfeld-Abmagnetisierungsanlage zur Verfügung. Mit ihr konnten Feldamplituden von bis zu 2360 Oersted erzeugt und bei Überlagerung schwacher Gleichfelder an-hysteretische Magnetisierungszustände aufgebaut werden. Die zu-gehörigen anhysteretischen Remanenzen ließen sich mit einem Spinner-Magnetometer der Empfindlichkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ Gauß in der üblichen Weise registrieren.

Meßergebnisse und Auswertung

Zunächst zeigt die Abb. 1 die Neukurve und den rückläufigen Ast der Hystereseurve einer Basaltprobe aus Island. Dabei handelt es sich um eine nicht voll bis in die magnetische Sättigung aus-gesteuerte, in ihrer Gestalt und in der Größenordnung ihrer Kenn-werte jedoch typische Magnetisierungskurve. Sie soll für die fol-genden Granit-Ergebnisse als Vergleichsstandard gelten. Die Sche-rungsgerade wurde als Nullpunktstangente der Wechselfeld-ideali-sierten Magnetisierungskurve aus der Messung der anhysteretischen Magnetisierung AM gewonnen.

Die Abb.2 enthält dann die Neukurve und den absteigenden Hystere-seast einer Granitprobe aus dem Megalithgrab bei Tarbek nahe Schleswig. Wegen des außerordentlich gestreckten Kurvenverlaufes und der absolut wie relativ sehr kleinen Remanenz ist ein Aus-

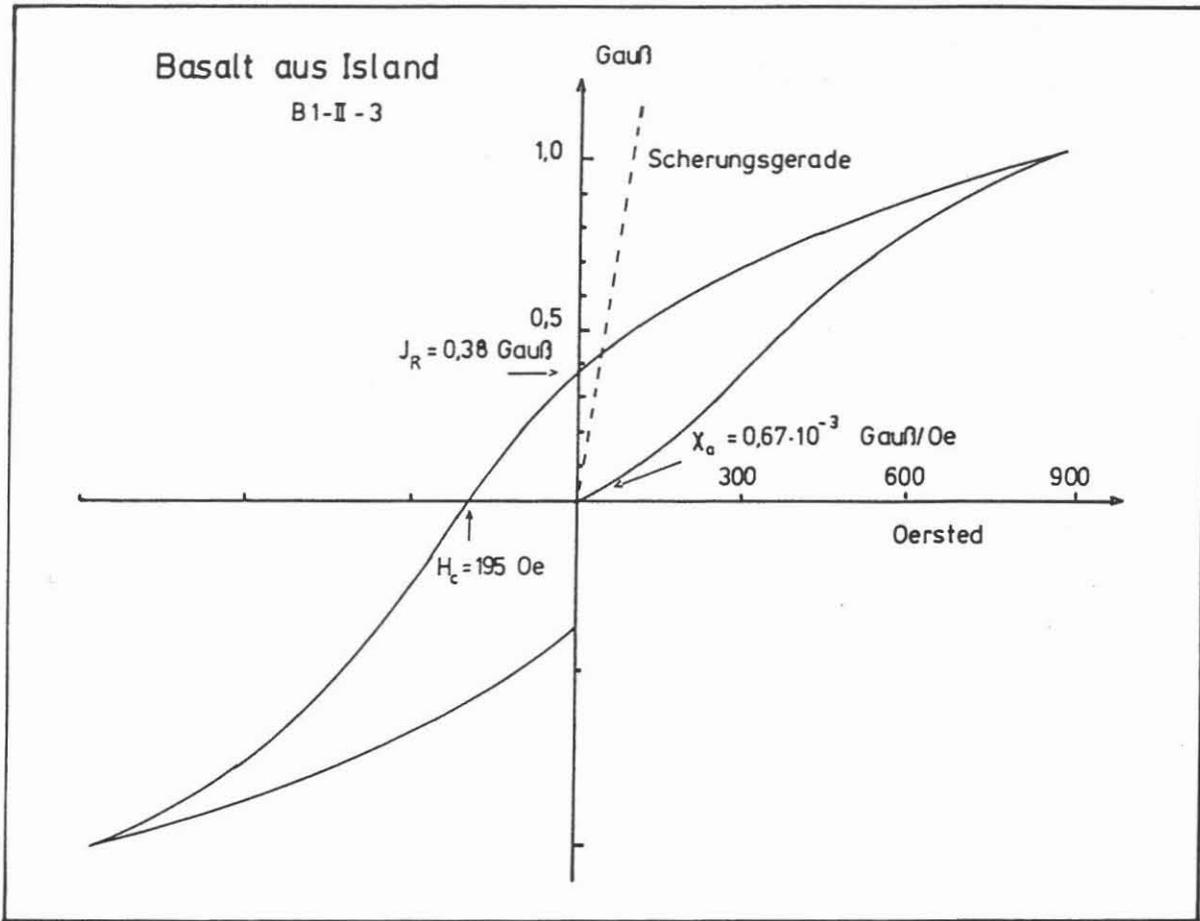


Abb.1 : Neukurve und rückläufiger Hystereseast einer Basaltprobe aus Island. Die kurvenform und die Größenordnung der magnetischen Daten sind für zahlreiche Basaltvorkommen typisch.

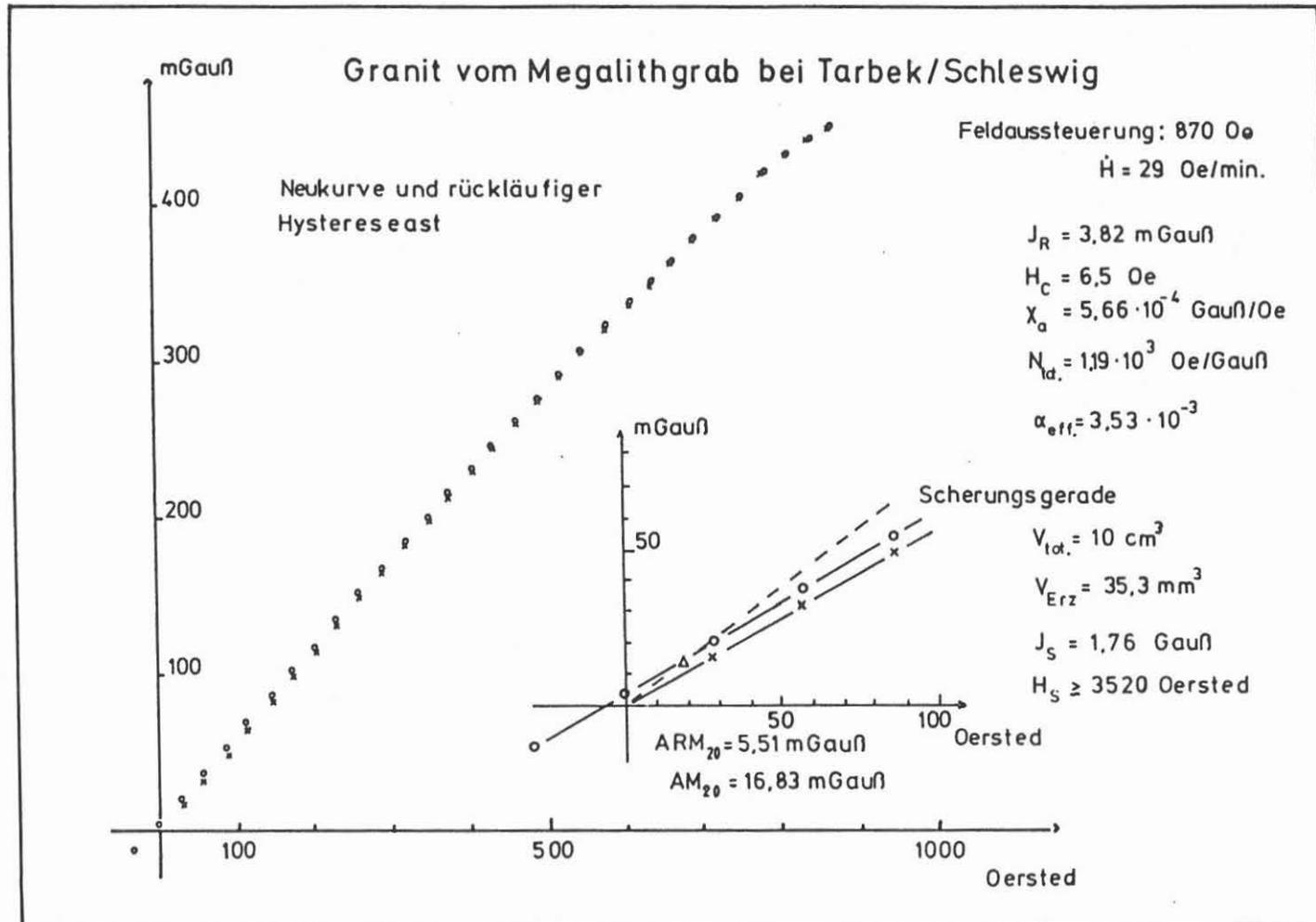


Abb. 2: Neukurve und rückläufiger Hystereseast einer Granitprobe vom Megalithgrab bei Tarbek nahe Schleswig. Der Ordinatenmaßstab des Nullpunktsausschnittes ist gegenüber dem der Abb. 1 zehnfach gedehnt. Die anhysteretische Magnetisierung AM_{20} ist durch ein Dreieckssymbol gekennzeichnet. Weitere Einzelheiten sind im Text erläutert.

schnitt um den Ursprung vergrößert herausgezeichnet. Man beachte den gegenüber Abb.1 erheblich geänderten Ordinatenmaßstab! Es lassen sich unmittelbar die Werte für die Remanenz, die Koerzitivkraft und die Anfangssuszeptibilität ablesen. Sie sind am rechten Bildrand aufgeführt.

Aus der im Gleichfeld von 20 Oersted erzeugten und im Spinnermagnetometer gemessenen anhysteretischen remanenten Magnetisierung $ARM_{20} = 5,51$ mGauß kann durch lineare Extrapolation mit χ_a die anhysteretische Magnetisierung AM_{20} in guter Näherung zu 16,83 mGauß bestimmt werden. Sie definiert die Scherungsgerade.

Die reziproke Steigung der Scherungsgeraden wiederum ergibt den totalen Entmagnetisierungsfaktor $N_{tot.}$. Seine Struktur lautet nach E. Kneller (1962) :

$$N_{tot.} = N_g + N_k \cdot \left[\frac{1}{\alpha_{eff.}} - 1 \right] . \quad (1)$$

Darin bedeuten: N_g den geometrischen Entmagnetisierungsfaktor der gesamten Probe; N_k den geometrischen Entmagnetisierungsfaktor der näherungsweise als kugelförmig anzunehmenden Erzkörner der Matrix; $\alpha_{eff.}$ schließlich die Packungsdichte der effektiven, nicht superparamagnetischen Erzkomponente.

Für einen inch-Zylinder mit dem Achsenverhältnis 1:1 folgt nach R. M. Bozorth (1968) : $N_g = 0,27 \cdot 4 \pi$ (im cgs-System). N_k für näherungsweise kugelförmige Teilchen beträgt nach E. Kneller (1962) : $N_k = 4 \pi / 3$. Damit kann die Packungsdichte der effektiven Erzkomponente abgeschätzt werden:

$$\alpha_{\text{eff.}} = \frac{1}{0,239 \cdot N_{\text{tot.}} - 0,19} \quad (2)$$

Die Werte für $N_{\text{tot.}}$ und $\alpha_{\text{eff.}}$ sind in Abb. 2 ebenfalls angegeben. Mit Hilfe der Packungsdichte folgt aus dem gesamten Probenvolumen von 10 cm^3 ein effektives Erzvolumen von $35,3 \text{ mm}^3$.

Unterstellt man, daß es sich bei der magnetisch effektiven Erzkomponente ganz überwiegend um Magnetit handelt, so ergibt sich eine Sättigungsmagnetisierung J_s der Probe von 1,76 Gauß.

Da das Verhältnis der Sättigungsfeldstärke H_s zur Aussteuerung von 900 Oersted in Abb.2 wegen des flacher werdenden Kurvenverlaufes größer sein muß, als das Verhältnis der Sättigungsmagnetisierung J_s zu dem in Abb.2 erreichten Magnetisierungs-Spitzenwert von 450 mGauß, folgt ferner: $H_s \geq 3520$ Oersted.

In den Abbildungen 3, 4 und 5 sind die teilweise ausgesteuerten Hysteresekurven dreier weiterer Granitproben dargestellt. Die Auswertung erfolgte in der soeben anhand der Abb.2 erläuterten Weise. Man beachte den gegenüber der Ausschnittsvergrößerung aus Abb.2 nochmals um etwa den Faktor 50 gedehnten Ordinatenmaßstab!

Diskussion

Der auf den ersten Blick wohl auffälligste Befund der vorgestellten Messungen ist der extrem schmale, langgestreckte und flache Verlauf der Hysteresekurven der Granite. Bezogen auf den Maßstab der Abbildung 1 verschwinden die Hysteresekurven der Abbildungen

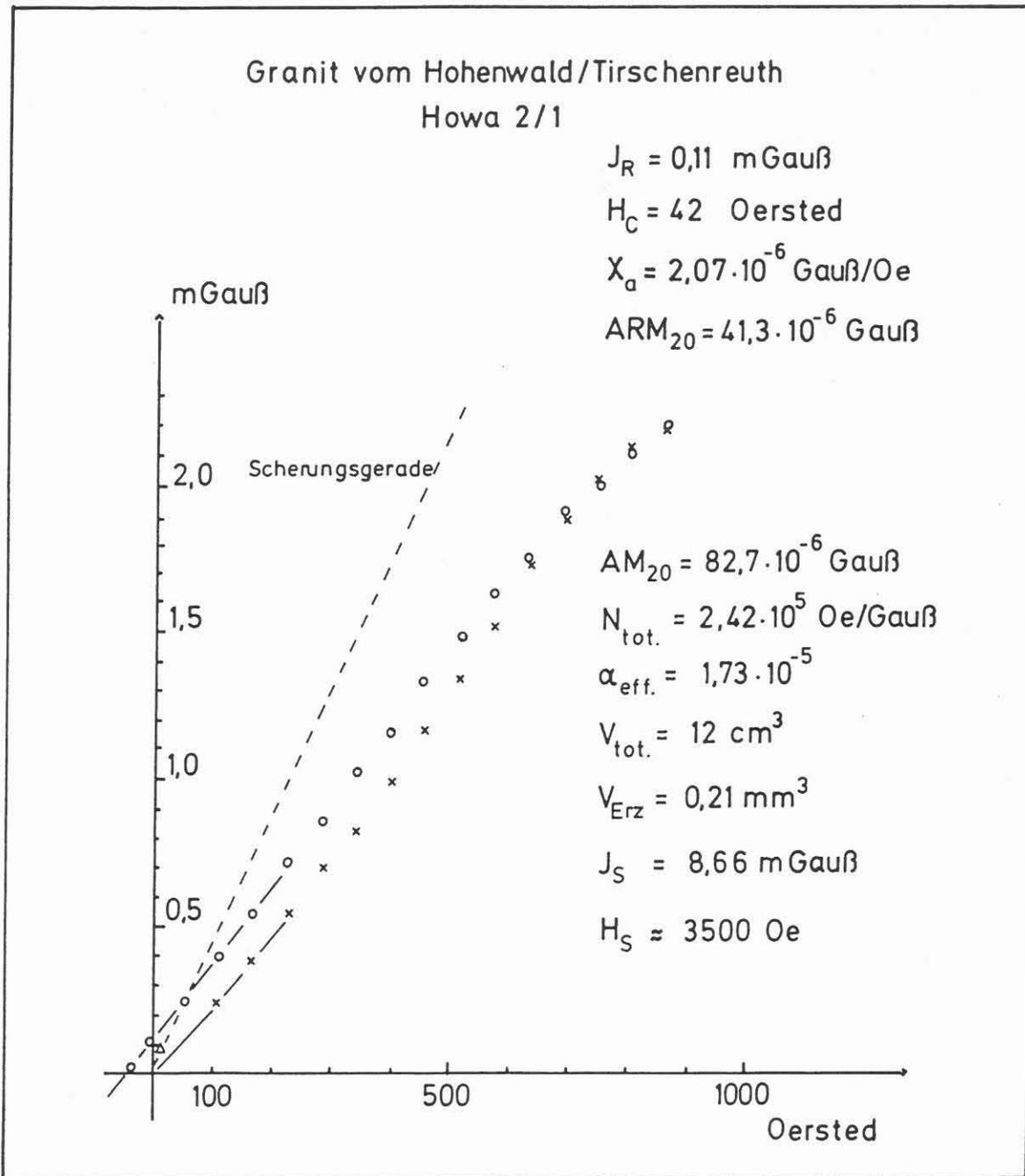


Abb.3 : Neukurve und rückläufiger Hystereseast einer Granitprobe vom Hohenwald bei Tirschenreuth. Der Ordinatenmaßstab ist gegenüber demjenigen der Abb.1 um den Faktor 1000 gedehnt! Alle Symbole haben die gleiche Bedeutung wie in Abb.2 .

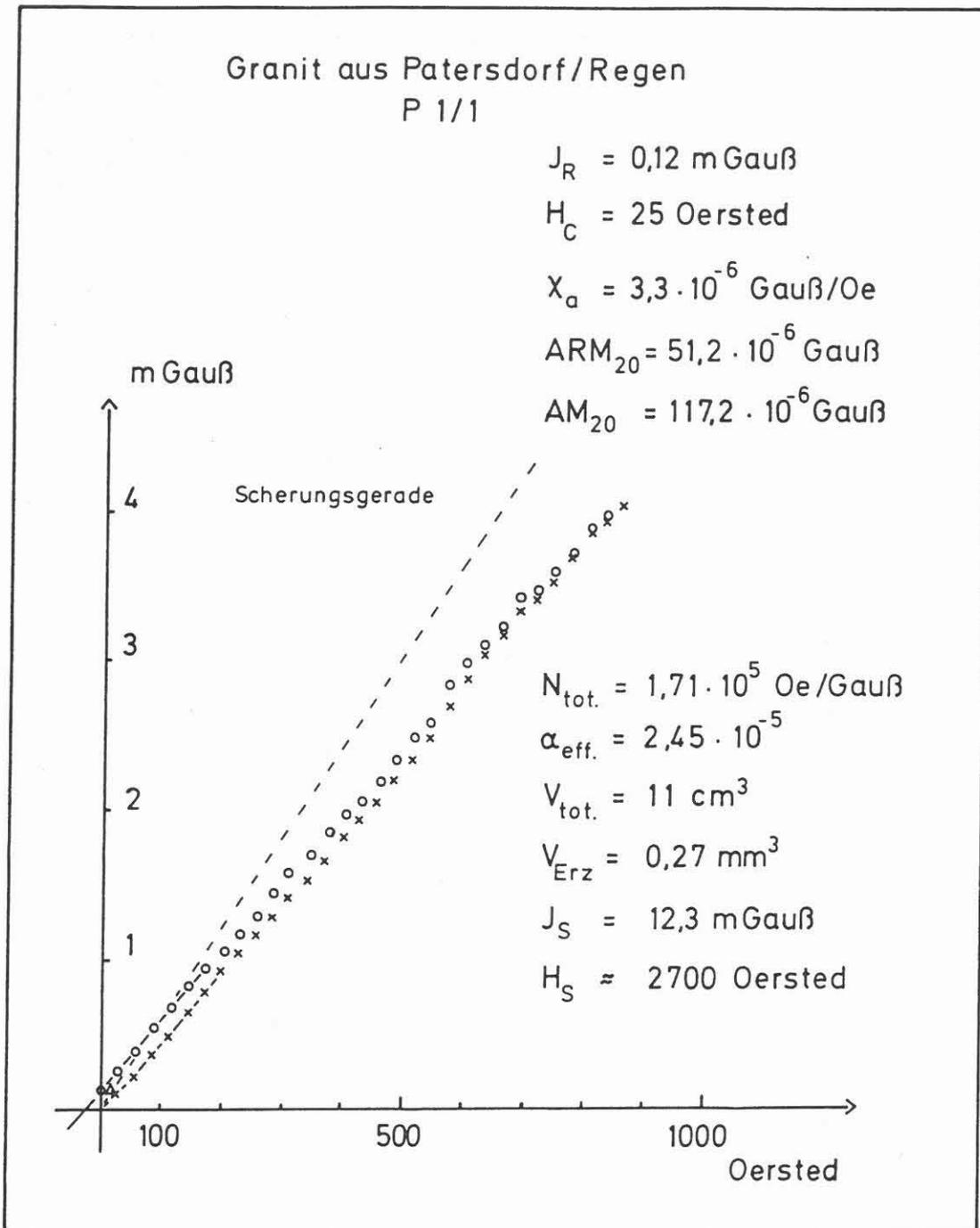


Abb.4 : Neukurve und rückläufiger Hystereseast einer Granitprobe aus Patersdorf bei Regen / Bayer. Wald. Der Ordinatenmaßstab ist gegenüber demjenigen der Abb.1 um den Faktor 500 gedehnt. Die Bedeutung der Symbole ist die Gleiche wie in Abb.2 .

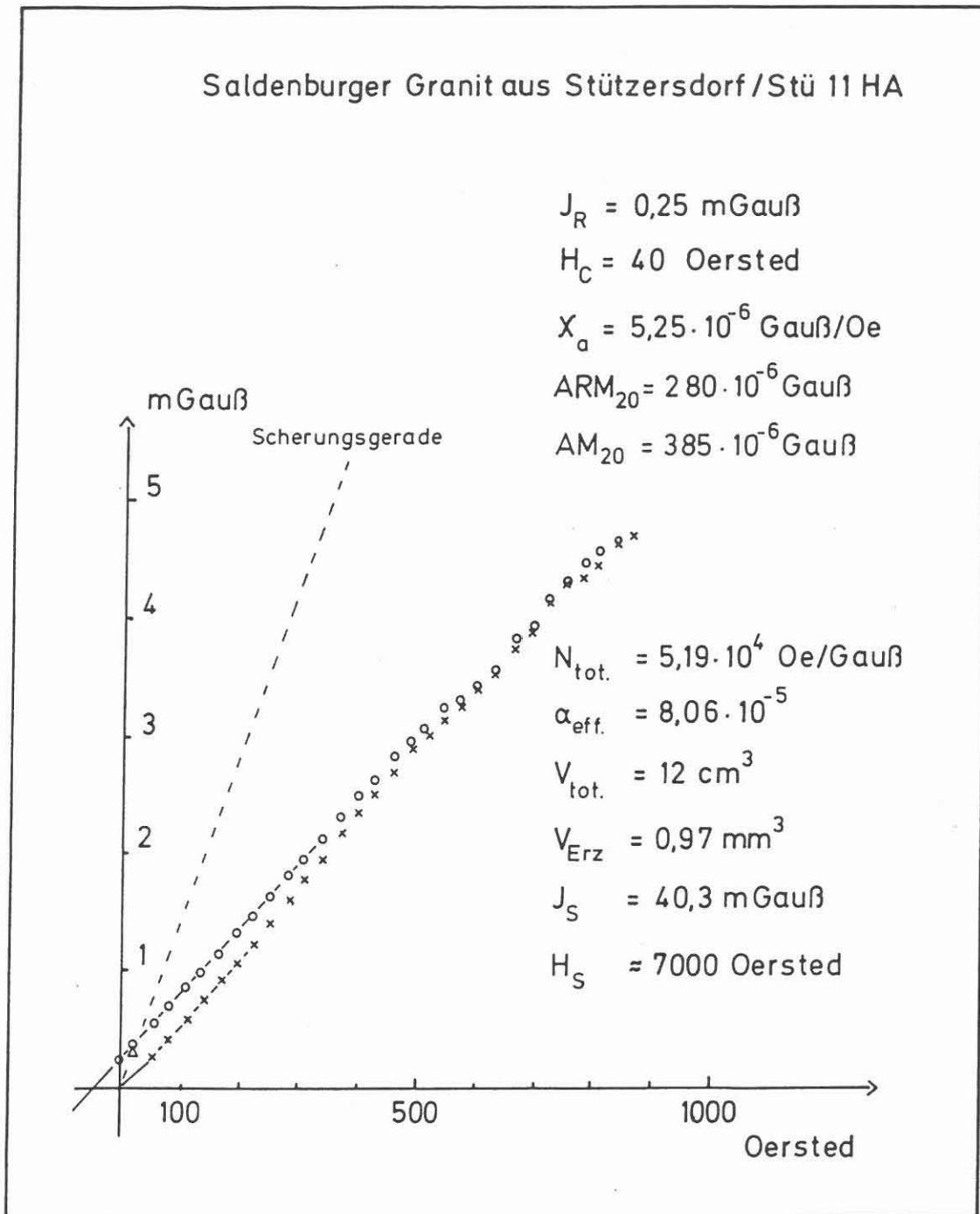


Abb.5 : Neukurve und rückläufiger Hystereseast einer Granitprobe aus Stützersdorf im Bayer. Wald. Der Ordinatenmaßstab ist gegenüber demjenigen aus Abb.1 um den Faktor 400 gedehnt. Die Bedeutung der Symbole ist die Gleiche wie in den vorausgehenden Abbildungen 2 bis 4 .

3, 4 und 5 vollständig innerhalb der Strichbreite der Abszissenachse!

Daraus resultieren die schon angedeuteten meßtechnischen Schwierigkeitsgrade. Auch die direkte Beobachtung der Erzkörner im Licht- oder Rasterelektronenmikroskop ist wegen der geringen Packungsdichten sehr mühselig. Denn angenommen, es handle sich etwa im Falle der Granitprobe vom Hohenwald, Howa 2/1, der Einfachheit halber um würfelförmige Erzkristallite von 2μ Kantenlänge. Dann finden sich auf einer Anschliff-Fläche von 1 cm^2 überhaupt nur ca. 437 derartige Kristallite. Ihr mittlerer Abstand beträgt 478μ . Wegen ihrer Kleinheit benötigt man 1000fache Vergrößerung. Hat dann der Bildschirm eines Rasterelektronenmikroskops die Abmessung $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, der beobachtete Probenausschnitt also die Fläche von $100 \mu \times 100 \mu$, so beträgt die Wahrscheinlichkeit, darauf ein derartiges Erzkorn anzutreffen, nur $W = 1 : 22,86 = 0,044$.

So wird verständlich, daß es trotz langer Suche nur einmal gelang, ein Erzkorn im Rasterelektronenmikroskop nachzuweisen und mit Hilfe der Mikrosondenanalyse als reinen Magnetit zu identifizieren.

Dennoch lassen sich anhand der gemessenen Koerzitivkräfte einige auch paläomagnetisch interessierende Aussagen machen: nach H.-U. Worm und H. Markert (1987) erreichen synthetische Silikatgläser mit Magnetitausscheidungen von 3μ Korndurchmesser Koerzitivkräfte um 40 Oersted. Sie kennzeichnen zudem die für den Übergang vom Viel- zum Pseudoeinbereichsverhalten der Magnetite charakteristische kritische Teilchengröße.

Im Umkehrschluß folgt demnach, daß insbesondere die Proben Howa 2/1 und Stu 11 HA Pseudoeinbereichs-Magnetitkörner enthalten sollten. Ihre paläomagnetisch relevante Stabilität ergibt sich dann aus der Koerzitivkraft der Remanenz H_{cR} , welche ein Maß für die zur Abmagnetisierung der isothermalen Sättigungsremanenz erforderliche Feldstärke darstellt. Der Zusammenhang mit der Koerzitivkraft H_c lautet:

$$H_{cR} = H_c \cdot \left[1 + \frac{N \cdot \chi_a}{1 - N \cdot \chi_a} \right]. \quad (3)$$

Darin ist N der totale Entmagnetisierungsfaktor und χ_a die Anfangssuszeptibilität der ungescherten Neukurve.

Schätzt man aus (3) die Koerzitivkraft der Remanenz H_{cR} etwa für die Granitprobe vom Hohenwald, Howa 2/1, ab, so ergibt sich immerhin ein Wert von $H_{cR} = 84,2$ Oersted. Er kennzeichnet die Größenordnung der 'Halbwertsbreite' der entsprechenden Wechselfeld-Abmagnetisierungskurve und läßt die paläomagnetische Verwendbarkeit solcher Granite verständlich werden.

Einen Überblick über alle Daten dieser Untersuchung gibt die Tabelle 1 .

	Granit vom Megalithgrab bei Tarbek MGTB 86/VII - 1b	Granit vom Hohenwald/Tirschenreuth Howa 2/1	Granit vom Blauberg/Cham Bla 7/1	Granit aus Pattersdorf/Regen P 1/1	Granit aus Stützersdorf/Bayer. Wald Stü 11 HA
Remanenz J_R [mGauß]	3,82	0,11	0,08	0,12	0,25
Koerzitivkraft H_C [Oersted]	6,5	42	25	25	40
Koerzitivkraft der Remanenz H_{CR} [Oersted]	19,92	84,16	53,10	57,34	54,95
Anfangsuszept. χ_a [Gauß/Oe]	$5,66 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-6}$	$2,10 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$5,25 \cdot 10^{-6}$
Anhyst. Remanenz ARM_{20} [Gauß]	$5,51 \cdot 10^{-3}$	$41,3 \cdot 10^{-6}$	$37,3 \cdot 10^{-6}$	$51,2 \cdot 10^{-6}$	$280 \cdot 10^{-6}$
Anhyst. Magnet. AM_{20} [Gauß]	$16,83 \cdot 10^{-3}$	$82,7 \cdot 10^{-6}$	$79,3 \cdot 10^{-6}$	$117,2 \cdot 10^{-6}$	$385 \cdot 10^{-6}$
Entmagnet. Fakt. $N_{tot.}$ [Oe/Gauß]	$1,19 \cdot 10^3$	$2,42 \cdot 10^5$	$2,52 \cdot 10^5$	$1,71 \cdot 10^5$	$5,19 \cdot 10^4$
Packungsdichte $\alpha_{eff.}$	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$8,06 \cdot 10^{-5}$
Probenvolumen V [cm ³]	10	12	13	11	12
Erzvolumen V_{Erz} [mm ³]	35,3	0,21	0,22	0,27	0,97
Sättigungsmagnet. J_S [mGauß]	1760	8,66	8,30	12,3	40,3
Sättigungsfeld H_S [Oersted]	3520	3500	2600	2700	7000

Tabelle 1: Zusammenstellung aller Einzeldaten aus den Abbildungen 2 bis 5, ergänzt durch die gemäß Gl. (3) abgeschätzten Werte für die Koerzitivkraft der Remanenz H_{CR} .

Danksagung

Für die Bohrerlaubnis am Megalithgrab von Tarbek sowie für zahlreiche wertvolle Hilfestellungen sei dem Ltd. wiss. Direktor des 'Landesamtes für Vor- und Frühgeschichte von Schleswig-Holstein', Herrn Dr. J. Reichstein herzlich gedankt.

Die Oberpfälzer Granitproben wurden freundlicherweise von Herrn Prof. Dr. K. Schäfer, Universität Bayreuth, zur Verfügung gestellt. Die Probe Stu 11 HA stammt von Herrn Dr. F. Heller, Geophysikalisches Institut der ETH Zürich, dem hierfür wie für anregende Diskussionen ebenfalls vielmals gedankt sei. Schließlich hat sich Herr cand. phys. H. Bittermann um die sorgfältige Probenpräparation verdient gemacht.

Die vorgestellten Messungen wären nicht möglich geworden ohne die großzügige Unterstützung des apparativen Ausbaues des 'Sonderlabors' durch die Stiftung Volkswagenwerk.

Literatur

- F. Heller: "Remanent magnetization of the Bergell granite"
Z. Geophys. (Germany), Bd. 37, Nr. 3, Seite
557-571 (1971)
- M. Kopf: "Die Untersuchung physikalischer Eigenschaften
von granitoiden Gesteinen als neue Methode der
Granitforschung"
Beiheft Nr.53 zur Zeitschrift Geologie, Jahrgang
15, Seite 1-135 (1966)
- F. M. Wagner und H. Markert: "Reactivation of the magnetic
aftereffect of Nickel single crystals by means
of plastic deformation"
Acta Metallurgica, Bd. 27, Seite 951-957 (1979)
- E. Kneller: "Ferromagnetismus"
Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg
(1962)
- R. M. Bozorth: "Ferromagnetism"
D. Van Nostrand Company, Inc.,
Princeton / New Jersey
Toronto, London, Melbourne (1968)
- H.-U. Worm und H. Markert: "Magnetic hysteresis properties
of fine particle titanomagnetites precipitated in
a silicate matrix"
Erscheint demnächst in Physics of the Earth and
Planetary Interiors