

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 64 (1973)

**Heft:** 10

**Artikel:** Ein elektronisch gesteuerter Magnetisierungsmesser

**Autor:** Stähli, W. / Gasser, R.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915550>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Ein elektronisch gesteuerter Magnetisierungsmesser

Von W. Stäheli und R. Gasser

621.317.43

In dieser Arbeit wird ein Gerät zur Ausmessung der magnetischen Neukurve sowie zur Registrierung der Hystereseschleife von massiven Stählen beschrieben. Die Materialproben werden in Form von langgestreckten Rotationsellipsoiden in einer Magnetisierungsspule ausgemessen. Die Neukurve wird punktweise nach der Kommutationsmethode mit 11 vorgegebenen Feldstärkenwerten von 5...1000 A/cm gemessen, die Hysteresisschleife hingegen auf einen X-Y-Schreiber nach dem Durchlaufverfahren registriert. Das beschriebene Gerät ist dadurch gekennzeichnet, dass die Änderungsgeschwindigkeit des Flusses in der Probe durch eine elektronische Regulierung des Magnetisierungsstromes annähernd konstant gehalten wird. Die eigentliche Messung der Induktion erfolgt mit einem elektronischen Integrationsverstärker.

Das Gerät ermöglicht auch die der Messung vorangehende Entmagnetisierung der Probe. Die Reproduzierbarkeit der Messwerte ist besser als 0,5%. Wegen der offenen Form der Proben müssen aber die Messwerte rechnerisch korrigiert werden.

## 1. Wahl und Beschreibung des Systems

Für die Proben wurde in Anlehnung an das unter [1]<sup>1)</sup> beschriebene System die langgestreckte Stabform mit rotationsellipsoidischem Profil gewählt. Im Hinblick auf eine gegenseitige Austauschbarkeit wurden sogar dieselben Dimensionen für Proben und Meßspule übernommen. Für die Messapparatur selbst ist grosser Wert auf eine möglichst einfache und von subjektiven Fehlern unabhängige Bedienung gelegt worden. Es entstand somit eine halbautomatische Einrichtung, bei welcher die Werte des Spulenfeldes bei der Messung der Neukurve durch einen Stufenschalter vorgewählt und die zugehörigen Werte der scheinbaren Induktion als elektrische Spannung an einem Digitalvoltmeter abgelesen werden können.

Nach Umstellung eines Funktionsschalters kann die ganze Hysteresiskurve im Durchlaufverfahren auf dem X-Y-Schreiber aufgezeichnet werden.

Die offene Form der Proben bedingt eine rechnerische Korrektur der gemessenen Werte, die vor allem für die Feldstärke im Bereich der grossen Permeabilität (steile Flanke der B-H-Kurve) ein grosses Gewicht hat. Bei der Ausmessung der Neukurve mit den vorgegebenen 11 Feldstärkenwerten kann die Korrektur der B-H-Wertpaare wegen der nötigen Genauigkeit mit einem Tischrechner oder einem Computer vorgenommen werden.

Für die Aufzeichnung der Hysteresiskurve müssen die B-H-Werte laufend korrigiert sein; dies wird mit einer eigens dafür entwickelten Analogrechenschaltung zwischen Magnetisierungsmesser und X-Y-Schreiber durchgeführt.

Fig. 1 zeigt das Blockschema und Fig. 7 die Ansicht der gesamten Apparatur.

Die Ausmessung der 11 Punkte der Neukurve mit vorgegebenen  $H$ -Werten erfolgt nach der Kommutationsmethode (Fig. 2) mit sukzessiv erhöhten Stromstufen von 1...11. Der Strom wird zunächst mit elektronisch gesteuerter Geschwindigkeit von Null aus bis zum ersten positiven vorgegebenen Maximalwert (A1) gesteigert, darauf bis zum spiegelbildlich liegenden Punkt (B1) im 3. Quadranten verändert und schliesslich wieder auf Null reduziert (C1). Zwischen A1 und B1 erfolgt die Integration des Flusses, welche bis zu 10 s dauert. Bei dieser langsamen Änderung dürften alle unkontrollierbaren Nebeneinflüsse des Probematerials ausgeschaltet sein [1].

Ein einzelner Zyklus O-A-B-C dauert also max. 20 s, das manuelle Aufschreiben der am Digitalvoltmeter angezeigten Integratorspannung erfordert max. 5 s, die Ausmessung der 11 Punkte der Neukurve also etwa 5 min.

Vor der Messung werden die Proben in der Magnetisierspule selbst entmagnetisiert. Dafür wird dieselbe mit einem niedrfrequenten Wechselstrom von 10 Hz gespeist, der eine Wechselfeldstärke von ca. 500 A/cm Amplitude erzeugt. Die Probe wird während dieser Erregung langsam und vollständig aus der Spule herausgezogen. Die verbleibende Magnetisierung ist dann so klein, dass sie bei der Messung der Neukurve wegen der Kommutationsmethode keine Rolle mehr spielt.

Die Registrierung der ganzen B-H-Schleife erfolgt mit der höchsten Stromstufe, so dass das Gebiet der Sättigung weitgehend erfasst wird. Damit die Kurve lagerichtig herauskommt, muss auch hier der Einfluss der Remanenz in der Probe ausgeschaltet werden. Man muss deshalb auf die Neukurve verzichten und die Aufzeichnung im Sättigungspunkt statt im Nullpunkt beginnen lassen. Im vorliegenden System fängt die Aufzeichnung im Punkt B11 (Fig. 2) an. Voraussetzung ist, dass zu diesem Zeitpunkt der elektronische Integrator die der Induktion  $-B_{\max}$  entsprechende Ladung gespeichert hat. Zu diesem Zweck lässt man, wie bei der Messung des höchsten Punktes der Neukurve, das Feld zunächst von Null aus bis zum positiven Maximum A11 bei kurzgeschlossenem Integrator ansteigen. Hier wird der Integrator freigegeben, seine Zeitkonstante durch Zuschaltung eines Widerstandes genau verdoppelt und die Stromänderungsrichtung umgekehrt. Von A11 bis B11 wird also die der doppelten Induktion  $2B_{\max}$  entsprechende Flussänderung erfasst, aber nur die einfache Meßspannung erzeugt, so dass sich der Kurvenpunkt B11 ergibt. Ist nun dieser Punkt erreicht, so wird die Zeitkonstante des Integrators automatisch auf den Normalwert verkleinert und die Schreibfeder des X-Y-Schreibers aufgelegt. Die Kurve wird nun in der Reihenfolge B11 - C11 - A11 - B11 geschrieben und kann beliebig oft durchlaufen werden, bis der Funktionsschalter in die Stellung «11-Punkte-Messung» zurückgestellt ist.

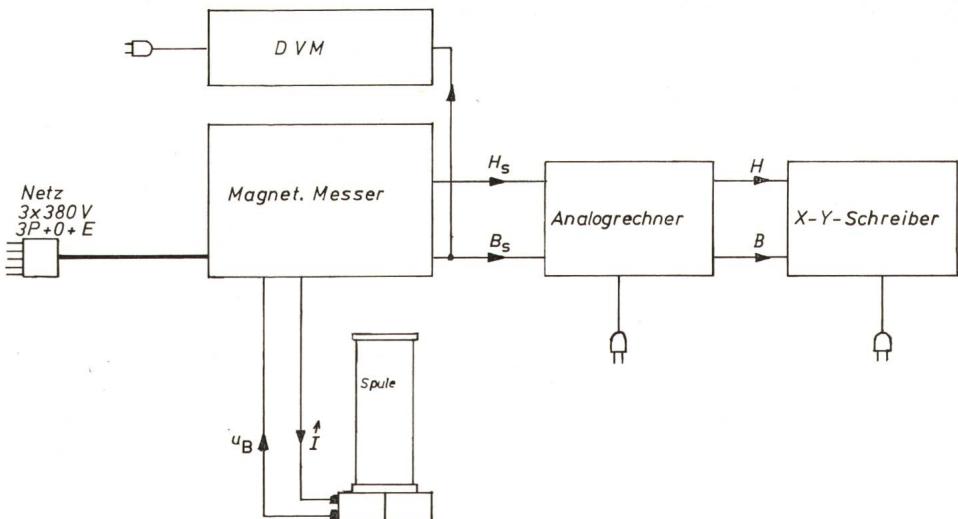
Als Abszissenwert (Feld  $H$ ) wird der dem Spulenfeld proportionale Spannungsabfall  $u_2$  an  $R_m$  abgegriffen, der zwischen +1 und -1 V stetig ändert.

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Fig. 1  
Elektronischer Magnetisierungsmesser

Gesamtblöckschema

$u_B$ ,  $B$  induzierte Spannung in der Meßspule  
 $H$ ,  $B$  korrigierte Analogspannungen für  
Feldstärke und Induktion  
 $I$  Magnetisierungsstrom  
 $H_s$ ,  $B_s$  Analogspannungen für scheinbare  
Feldstärke und Induktion



Die Registrierung eines vollständigen Durchlaufes, d.h. 0 – A11 – B11 leer und B11 – C11 – A11 – B11 mit Aufzeichnung dauert max. 1½ min.

## 2. Funktionsbeschreibung

Fig. 3 zeigt das Blockschema des Magnetisierungsmessers. Die ellipsoidische Probe liegt in der Magnetierspule 5 unter fast identischen geometrischen Verhältnissen, wie in [1] beschrieben. Die Spule hat eine  $H$ -Wicklung, die mit einem Strom von max. 20 A eine Feldstärke von ca. 1000 A/cm erzeugt. Diese Wicklung hat eine Länge von 40 cm, einen Ausendurchmesser von 13 cm und ein Gewicht von ca. 28 kp.

Der Magnetisierungsstrom wird vom Gleichrichter (14) geliefert und über den linearen Leistungsverstärker (4) im Bereich von  $\pm 20$  A elektronisch geregelt. Der Gleichrichter ist dreiphasig in Doppelwegschaltung, um die Welligkeit auf ein tragbares Mass zu reduzieren. Die Oberwellen werden durch einen Filter zusätzlich unterdrückt, und die elektronische Regelung des Stromverstärkers glättet die restliche 300-Hz-Komponente praktisch vollständig aus. Der Verstärker stellt eine Quelle mit eingeprägtem Strom dar, indem der dem Ausgangstrom  $I$  proportionale, an einem Widerstand  $R_m$  erzeugte Spannungsabfall auf den Verstärkereingang gegengekoppelt ist. Die Grösse des Spannungsabfalls an  $R_m$  wird durch die Komparatoren  $A$  und  $B$  auf +1 und -1 V begrenzt und durch

den Überstromschutz 10 überwacht: Übersteigt er 1,2 V, so wird der Schütz im Netz-Vorsatz 15 ausgelöst. Der Widerstand  $R_m$  ist auf 11 Werte zwischen 10 und 0,05  $\Omega$  umschaltbar, die im Bereich kleiner Ströme im Faktor etwa 1,6, im Bereich der grösseren Ströme (Sättigung) im Faktor 2 abgestuft sind. Damit ergeben sich 11 feste Werte für die Magnetizerfeldstärke, die fast optimal sind.

Beim Entmagnetisieren wird der Stromverstärker durch den 10-Hz-Oszillator 2 mit einer Amplitude von ca. 0,5 V angesteuert.

Bei der Messung erfolgt eine Aussteuerung durch den Rampen-Generator 1, der eine stetig veränderliche Spannung zwischen -1 und +1 V liefert.

In der Magnetierspule 5 ist die  $B$ -Wicklung angeordnet, die den Mittelteil der Probe unmittelbar umschliesst. Sie ist 14 mm lang und mit 4200 Windungen Lackdraht von 0,05 mm  $\varnothing$  bewickelt. In diese Wicklung wird eine der Flussänderungsgeschwindigkeit proportionale Spannung induziert, die bei unserer Auslegung etwa 120 mV erreicht und im Vorverstärker 6 um den Faktor 82 verstärkt wird, so dass am Eingang des Integrators 7 eine Spannung von max. 10 V zur Verfügung steht. Diese Spannung ist auf den Rampen-Generator 1 so zurückgeführt, dass sich eine Gegensteuerung der Stromänderungsgeschwindigkeit ergibt: Im steilen Teil der Magnetisierungskurve wird also die Stromänderung stark verlangsamt, im Sättigungsbereich weniger. Dadurch bleibt die Geschwindigkeit der Flussänderung in der Probe praktisch konstant, was sich auf die Ummagnetisierung günstig auswirkt und die Aussteuerung des Verstärkers 6 optimal ausnutzt. Der Integrator 7 wird gebildet durch einen hochwertigen parametrischen Verstärker und einen Polykarbonat-Kondensator. Die Zeitkonstante  $R_1C_1$  beträgt ca. 14 s. Die aufintegrierte Spannung, die am Ausgang zur Verfügung steht, beträgt ca. 8 V für eine scheinbare Induktion von 2 T (Tesla) in der Probe. Nachdem die Bestimmung der wahren  $H$ - und  $B$ -Werte der Neukurve ohnehin eine rechnerische Nachkorrektur erfordert, ist die zahlenmässige Beziehung zwischen den elektrischen Grössen des Gerätes und den magnetischen Werten gleichgültig. Bei der Registrierung der Hysteresisschleife hingegen wird die genaue Anpassung der Spannungsverhältnisse in der Analogrechnerschaltung vorgenommen.

Bei der Ausmessung der Neukurve nach der Kommutationsmethode, gemäss Fig. 2, spielt sich im Prinzip folgender Zyklus ab:

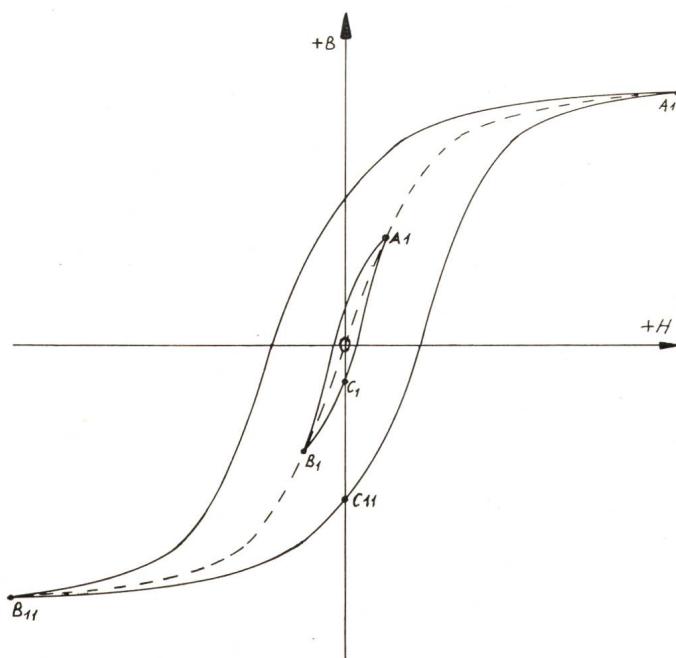


Fig. 2

Verlauf von  $B$  und  $H$  bei der Ausmessung der Neukurve

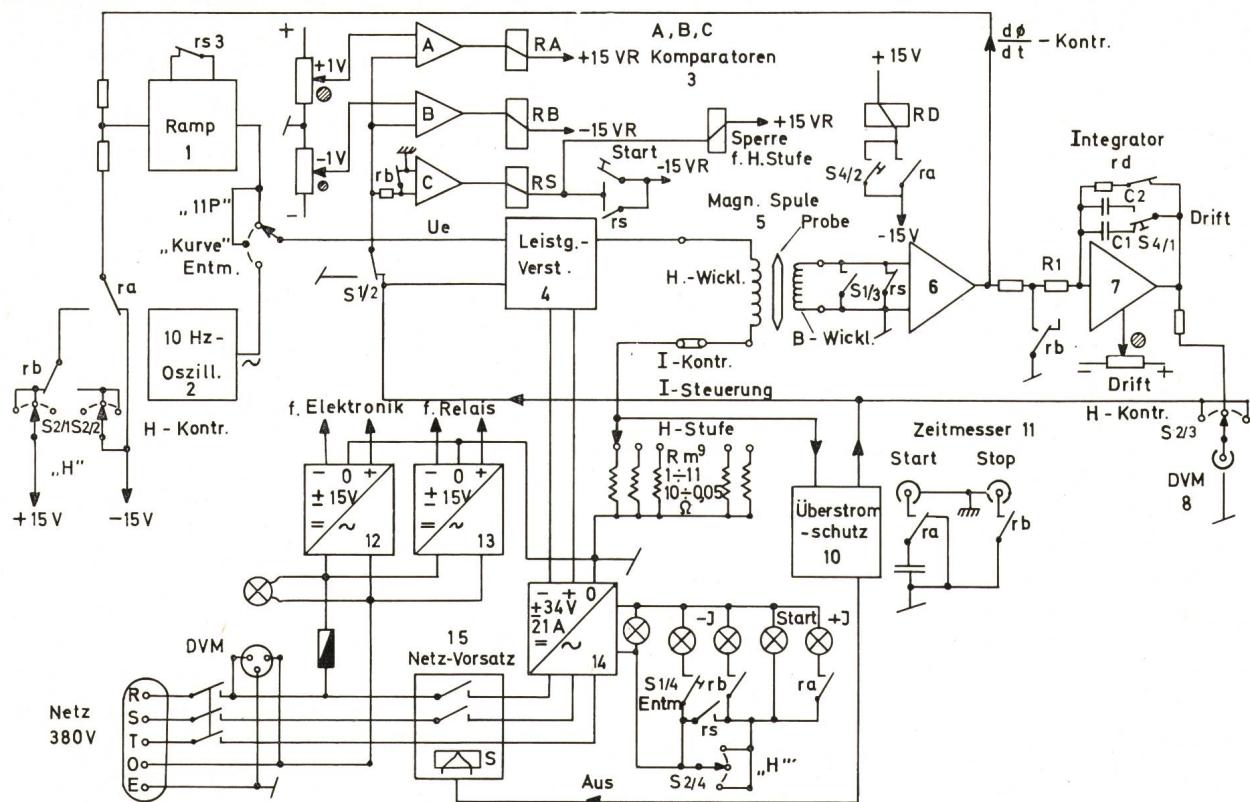


Fig. 3  
Elektronischer Magnetisierungsmesser  
Funktionsschema

Beim Druck auf die Start-Taste wird der Ramp-Generator 1 in Fig. 3) freigegeben, dessen Spannung von 0 bis + 1 V ansteigt und den Leistungsverstärker aussteuert. Der Magnetisierungsstrom steigt bis auf den dem vorgewählten Widerstand  $R_m$  entsprechenden Wert. Sobald der Spannungsabfall + 1 V erreicht hat, spricht der Komparator A an, der die Polarität des Ramp-Ladestromes umkehrt und den Integrator (7) freigibt.

Jetzt wird der Strom mit kontrollierter Geschwindigkeit von A herunter bis zum Punkt B verändert, wobei die durch die Flussänderung in der Meßspule induzierte Spannung integriert wird. Sobald der Spannungsabfall an  $R_m - 1$  V erreicht hat, spricht Komparator B an, der die Laderichtung des Ramp-Generators wieder umkehrt und den Integrator blockiert. Die der totalen Flussänderung proportionale Integratorspannung

837655-14 Elektronischer Magnetisierungsmesser, Auswertebrett für Proben 180 mm											
Spulenkonstante $S = 4792 \text{ m}^{-1}$				Apparatekonstante $k = 0,2498 \text{ sek/m}^2$				Probe: ..... mm			
Korrektur $x = (\text{DM}/10)^2$				DM = ..... mm				a = 1,005033			
H-Stufe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Stromstärke I (A) (fest eingestellte Werte)	0,0991	0,1473	0,2454	0,4233	0,6492	0,97	1,6537	2,924	4,9080	9,7830	20,367
Spulenfeld $H_s$ (A/m) $H_s = S \cdot I$	474,74	705,85	1175,95	2028,44	3110,94	4648,20	7924,47	14011,71	23519	46880	97598
Abgelesene Ind.Spannung am DVM $u_1$ (V)											
Scheinbare Induktion $B_s = k \cdot u_1/x$ (T)											
Effektive Induktion $B = a \cdot B_s - b \cdot H_s$ (T)											
Effektive Feldstärke $H = c \cdot H_s - d \cdot B_s$ (A/m)											

Fig. 4  
Auswertebrett für die Auswertung mit Tischrechner

bleibt gespeichert und wird am externen Digitalvoltmeter abgelesen. Der Magnetisierungsstrom sinkt vom Wert  $-I$  langsam auf Null zurück, wo der Komparator C anspricht und den Messzyklus beenden lässt. Dieser Zyklus wird mit steigender Stromstufe elfmal wiederholt, und man erhält somit die diskreten Punkte der Neukurve.

Bei der Aufzeichnung der  $B$ - $H$ -Schleife wickelt sich praktisch dasselbe Spiel ab, wobei zusätzlich die Zeitkonstante des Integrators angepasst und die Schreibfeder des  $X$ - $Y$ -Schreibers betätigt wird.

Die Anschlüsse «Start» und «Stop» zum externen elektronischen Zeitmesser 11 werden nur zur Bestimmung der Integrationszeit bei der ersten Eichung und bei allfälligen Kontrollen der Zeitkonstante des Integrators verwendet.

### 3. Auswertung der gemessenen Neukurve

Die Erregerfeldstärke in der Magnetisierspule ist streng proportional dem Magnetisierungsstrom  $I$ . Nachdem die Stromwerte für die 11 Messpunkte durch Wahl der Widerstände  $R_m$  vorgegeben sind, ergeben sich auch 11 feste unvariable Werte für die Feldstärke  $H_s$ .

Der Apparat ist mit einem Kontrollschatz versehen, der gestattet, während des Messzyklus die erreichten Scheitelwerte  $+1$  oder  $-1$  V vom Spannungsabfall an  $R_m$  am DVM zu kontrollieren. Zudem kann im Kreis der Magnetisierspule ein Präzisionsampèremeter eingeschaltet werden, um die wahren Stromwerte zu überprüfen.

Für Routine-Messungen kann man sich auf die im Auswertungsblatt vorgedruckten  $H_s$ -Werte stützen (Fig. 4).

Die Spannung, die am Schluss der Kommutation am Ausgang des Integrators erscheint, ist der gesamten erfassten Flussänderung, also der doppelten scheinbaren Induktion  $B_s$  proportional. Diese Induktion ist auf den Querschnitt der Probe im Mittelteil bezogen. Man kann also eine Apparatekonstante  $k$  definieren, die auf den genauen Nennquerschnitt  $A$  der Probe bezogen ist:

$$B_s = k u_1$$

$u_1$  ist die Integratorspannung in V,  $B_s$  die scheinbare Induktion in der Probe in T.

Der genaue Nenndurchmesser der Proben beträgt 10,00 mm. Um die Bearbeitungstoleranz zu berücksichtigen, wird der Durchmesser  $D_m$  der Proben nachgemessen und ein Korrekturfaktor

$$x = \left( \frac{D_m}{10} \right)^2$$

definiert.

Es wird somit:

$$B_s = k \frac{u_1}{x}$$

Bei dieser Auslegung ist  $k \approx 0,25$  s/m<sup>2</sup>.

Die so ermittelte scheinbare Induktion muss um den Anteil des Flusses zwischen Probe und Meßspule und um den Anteil des inneren Feldes korrigiert werden.

Anderseits wird das erregende Feld  $H_s$  um den Anteil des entmagnetisierenden Feldes  $H_1$  der Probe vermindert.

Es ergeben sich somit die beiden Korrekturpolynome:

$$B = a B_s - b H_s$$

$$H = c H_s - d B_s$$

Die physikalischen und rechnerischen Zusammenhänge zu diesen Korrekturen sind in [1] ausführlich dargelegt.

Für die besprochene Apparatur ergibt sich durch die Eichung der Wert der wirksamen Fläche der Induktionsspule:

$$A_w = 1,327 \text{ cm}^2$$

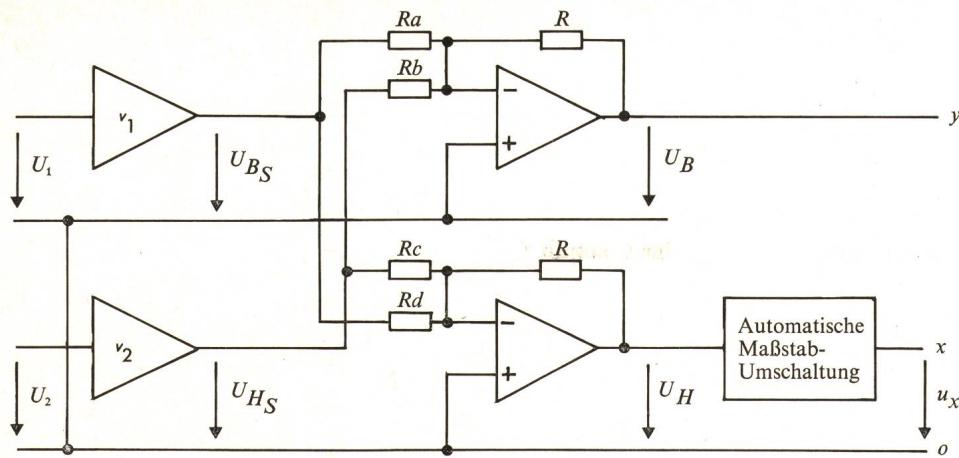
Für die Probendimensionen nach [1] (10 mm  $\varnothing \times 200$  mm) ist der Entmagnetisierungsfaktor  $\alpha = 0,006749$ . Damit ergibt sich eine reduzierte Fläche der  $B$ -Spule:

$$A_w' = 1,2744 \text{ cm}^2$$

LIST NH					
FLUX 10:16 ZURICH 26/07/72					
100C PROGRAMM FLUX 18 FUER PROBEN SULZER 100MM 105C KORREKTUR DER MIT DEM ELEKTRONISCHEN MAGNETISIERUNGSMESSEHER 110C GEMESSENEN H- UND B-WERTE 115C K-EICHKONSTANTE DER APPARATUR (SEK/M2) 120C A, B, C, D - BERECHNETE KOEFIZIENTEN 125C MU=ABSOLUTE PERMEABILITAET (TESLA/A/M) 130C DM=DURCHMESSER DER PROBEN IM MITTELTEIL (MM)					
REAL K DIMENSION HS(11), TEXT(12) READ,(HS(JA),JA=1,11) K=0.2498 A=1.00503380 B=0.87749918E-06 C=1.01371720 D=0.64587677E+04 2 READ 51, TEXT 51 FORMAT(5X,12A6) READ,DM X=(DM/10.)**2 PRINT 20, TEXT 20 FORMAT(//12A6/) 20 PRINT 21 21 FORMAT(11X,7HHS(A/M),7X,6HH(A/M),9X,4HU(V), + BX,5HBS(T),9X,4HB(T)//) 22 DO 1 JA=1,11 22 READ, U 230 BS=U*X/ 235 BE=A*BS-B*HS(JA) 240 HC=C*HS(JA)-D*BS 245 1 PRINT 22, JA,HS(JA),H,U,BB,BE 22 FORMAT(I5,2F13.1,3F13.3) 255 GO TO 2 260 END 265 BDATA 270 474.74 705.85 1175.95 2028.44 3110.94 4648.20 7924.47 14011.71 23518.97 46879.81 97598.00 280 PROBE SULZER NO.1 DM=10.00 MM 285 10. 290 0.2646 0.4028 0.6909 1.208 1.868 2.781 295 4.583 6.554 7.460 8.412 9.025 300 PROBE SULZER NO.2 DM=10.00 MM 305 10. 310 0.2556 0.3919 0.6778 1.192 1.850 2.759 315 4.545 6.477 7.383 8.317 8.938 320 PROBE SULZER NO.3 DM=10.00 MM 325 10. 330 0.2643 0.4022 0.6900 1.206 1.865 2.774 335 4.563 6.540 7.451 8.402 9.015					
RUN					
FLUX 14:08 ZURICH 04/08/72					
PROBE SULZER NO.1 DM=10.00 MM					
HS(A/M)	H(A/M)	U(V)	BB(T)	B(T)	
1 474.7	54.3	.265	.066	.066	
2 705.8	65.7	.403	.101	.101	
3 1175.9	77.4	.691	.173	.172	
4 2028.4	107.3	1.208	.302	.301	
5 3110.9	139.8	1.868	.467	.466	
6 4648.2	225.1	2.781	.695	.694	
7 7924.5	639.0	4.583	1.145	1.144	
8 14011.7	3629.7	6.554	1.637	1.633	
9 23519.0	11805.6	7.460	1.864	1.852	
10 46879.8	33950.9	8.412	2.101	2.071	
11 97598.0	84375.8	9.025	2.254	2.180	
PROBE SULZER NO.2 DM=10.00 MM					
HS(A/M)	H(A/M)	U(V)	BB(T)	B(T)	
1 474.7	68.9	.256	.064	.064	
2 705.8	83.2	.392	.098	.098	
3 1175.9	98.5	.678	.16		
USED 8.33 UNITS.					

Fig. 5  
Rechenprogramm und Resultate bei Auswertung mit Computer

Fig. 6  
Funktionschema des Analogrechners  
Bezeichnungen siehe im Text



Die 4 Koeffizienten der Korrekturpolynome erhalten dann die Werte:

$$\begin{aligned} a &= 1,004\,249 \\ b &= 0,878\,323 \cdot 10^{-6} \text{ Tm/A} \\ c &= 1,011\,529 \\ d &= 0,542\,862 \cdot 10^4 \text{ A/Tm} \end{aligned}$$

Aus herstellungstechnischen Gründen machen wir einen Teil der Proben nur 180 mm lang. Es ergeben sich dann folgende Werte:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,008\,013 \\ A_w' &= 1,272\,3 \text{ cm}^2 \\ a &= 1,005\,033 \\ b &= 0,877\,499 \cdot 10^6 \text{ Tm/A} \\ c &= 1,013\,717 \\ d &= 0,645\,876 \text{ A/Tm} \end{aligned}$$

Der Einfluss der Probenlänge auf die Koeffizienten ist also nicht vernachlässigbar.

Die gemessenen und umgerechneten Werte werden in einem Auswertebrett nach Fig. 4 eingetragen. Um die Auswertearbeit zu beschleunigen, können die Korrekturen mit einem Computer vorgenommen werden. Dazu wurde ein Fortran-Programm zusammengestellt, welches in Fig. 5 mit typischen Resultaten wiedergegeben ist.

#### 4. Analogrechner für die Registrierung der Hysteresiskurve

Die Hysteresiskurve charakterisiert den Zusammenhang zwischen Feldstärke und Induktion, wenn abwechselnd positive und negative Sättigung durchlaufen werden (Fig. 6).

Als Ausgangsgrößen des Magnetisierungsmessers stehen zwei Spannungen zur Verfügung, nämlich:

$U_2 = I R_m$  als Spannungsabfall am Messwiderstand  $R_m$ , erzeugt durch den Erregerstrom  $I$ , der ja ein Mass für das scheinbare Feld  $H_s = K_s I$  darstellt. Es ist also:

$$U_2 = \frac{R_m}{K_s} H_s$$

Anderseits ist die Integrationsspannung  $U_1 = -\frac{B_s}{2K}$  Mass für die scheinbare Induktion  $B_s$ . Darin ist  $K$  die im Abschnitt 3 definierte Apparatekonstante.

Für den Analogrechner ist auf die Korrektur  $X$  des Probendurchmessers verzichtet worden, weil sie nur etwa 2...3 Promille ausmacht.

Die wahren Größen  $B$  und  $H$  sind mit den scheinbaren – wie bereits erwähnt – durch zwei Gleichungen verknüpft:

$$\begin{aligned} B &= aB_s - bH_s \\ H &= cH_s - dB_s \end{aligned}$$

Dieses Gleichungspaar kann mit 2 Summierverstärkern nachgebildet werden, wenn  $B$ ,  $H$ ,  $B_s$ ,  $H_s$  durch proportionale Spannungen ersetzt werden. Als Proportionalitätsfaktoren wurden gewählt:

$$\alpha = -\frac{U_{Bs}}{B_s} = \frac{U_B}{B} = 4 \quad [\frac{\text{V}}{\text{T}}]$$

$$\beta = -\frac{U_{Hs}}{H_s} = -\frac{U_H}{H} = 10^{-4} \quad [\frac{\text{V}}{\text{A/m}}]$$

Dies bedingt eine Anpassung der Ausgangsgrößen  $U_1$  und  $U_2$  an die Spannungen  $U_{Bs}$  und  $U_{Hs}$  durch zwei Vorverstärker mit den Verstärkfaktoren

$$v_1 = \frac{U_{Bs}}{U_1} = 2\alpha k$$

$$v_2 = \frac{U_{Hs}}{U_2} = \beta \frac{k_s}{R_m}$$

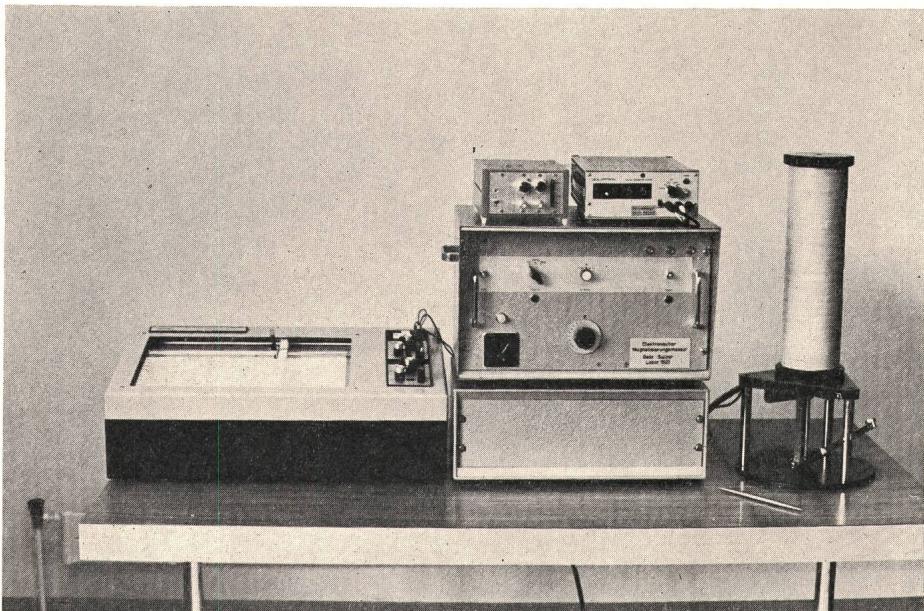


Fig. 7  
Die gesamte Apparatur

Die nachzubildenden Gleichungen lauten dann, ausgedrückt in den zugehörigen Spannungen,

$$\frac{U_B}{\alpha} = -a \frac{U_{Bs}}{\alpha} - b \frac{U_{Hs}}{\beta}$$

$$\frac{U_H}{\beta} = c \frac{U_{Hs}}{\beta} + d \frac{U_{Bs}}{\alpha}$$

oder

$$U_B = -a U_{Bs} - b \frac{\alpha}{\beta} U_{Hs}$$

$$U_H = c U_{Hs} + d \frac{\beta}{\alpha} U_{Bs}$$

Für die beiden Summierverstärker errechnen sich folgende Ausgangsspannungen:

$$U_B = - \frac{R}{R_a} U_{Bs} - \frac{R}{R_b} U_{Hs}$$

$$- U_H = + \frac{R}{R_c} U_{Hs} + \frac{R}{R_d} U_{Bs}$$

Durch Koeffizientenvergleich gewinnt man die gesuchten Widerstandsverhältnisse

$$\frac{R}{R_a} = a \quad \frac{R}{R_b} = b \frac{\alpha}{\beta}$$

$$\frac{R}{R_c} = c \quad \frac{R}{R_d} = d \frac{\beta}{\alpha}$$

Dabei ist zu beachten, dass das Vorzeichen von  $U_H$  verkehrt erscheint, was aber im nachgeschalteten Skalenumschalter richtiggestellt wird.

Eine Maßstabunterteilung ist erwünscht, um das schmale Gebiet des steilen Anstieges der Induktion gegenüber dem Sättigungsgebiet zu dehnen. Bei Feldstärken bis  $\pm 10000$  A/m überstreicht die Feder des Koordinatenschreibers auf der  $x$ -Achse ein Gebiet von  $\pm 10$  cm. Beim Überschreiten dieses Wertes wird über Reedrelais eine Verstärkungsverminderung und eine Nullpunktverschiebung vorgenommen, so dass die Kurve kontinuierlich, aber um einen Faktor 10 gestaucht, weiterläuft. Der Ausschlag für  $\pm 100000$  A/m beträgt somit  $\pm 19$  cm.

Den Schreibereingängen können über Drucktasten zwei Eichspannungen entsprechend 1 T bzw. 10000 A/m sowie die Spannung Null zugeführt werden. In Verbindung mit je einem 10-Gang-Potentiometer als Abschwächer für die Ausgangsspannungen  $U_B$  und  $U_X$  wird die Anpassung und Einstellung eines beliebigen Koordinatenschreibers erleichtert.

### Literatur

- [1] R. Risch: Magnetisierbarkeitsmesser für massive Stähle. Brown Boveri Mitt. 56(1969)7, S. 336...341.
- [2] P. Erdmann: Ein elektronisches Präzisionsgerät zum automatischen Messen und Schreiben von Magnetisierungsschleifen. Techn. Mitt. Krupp, Forschungsberichte 26(1968)1, S. 1...10.

### Adresse der Autoren:

Werner Stäheli, Dipl. Ing. ETH, Leiter des Labors für Messtechnik, und Rolf Gasser, Dipl. Ing. ETH, Mitarbeiter des Labors für Messtechnik, Gebr. Sulzer AG, Winterthur.