

Ein elektronisch gesteuerter Magnetisierungsmesser

Autor(en): **Stähli, W. / Gasser, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **64 (1973)**

Heft 10

PDF erstellt am: **17.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915550>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

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 Hysteresisschleife 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]¹⁾ 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.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

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 Magnetisierungsspule selbst entmagnetisiert. Dafür wird dieselbe mit einem niederfrequenten 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.

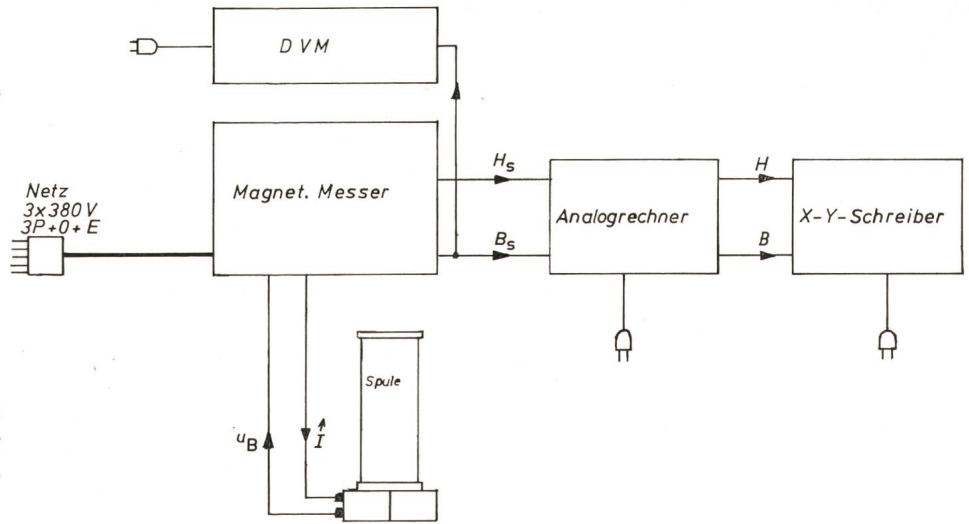
Die Registrierung der ganzen B - H -Schleife erfolgt mit der höchsten Stromstufe, so dass das Gebiet der Sättigung weitgehend erfasst wird. Damit die Kurve lagerichtig herauskommt, muss auch hier der Einfluss der Remanenz in der Probe ausgeschaltet werden. Man muss deshalb auf die Neukurve verzichten 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.

Fig. 1

Elektronischer Magnetisierungsmesser
Gesamtschemata

- u_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. 1 1/2 min.

2. Funktionsbeschreibung

Fig. 3 zeigt das Blockschemata des Magnetisierungsmessers. Die ellipsoidische Probe liegt in der Magnetisierspule 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 ± 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 Regelschaltung des Stromverstärkers glättet die restliche 300-Hz-Komponente praktisch vollständig aus. Der Verstärker stellt eine Quelle mit eingepprägtem Strom dar, indem der dem Ausgangsstrom I proportionale, an einem Widerstand R_m erzeugte Spannungsabfall auf den Verstärkereingang gegengekoppelt ist. Die Grösse des Spannungsabfalles 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 Ω 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 Magnetisierfeldstärke, 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 Ramp-Generator 1, der eine stetig veränderliche Spannung zwischen -1 und $+1$ V liefert.

In der Magnetisierspule 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 Ramp-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 ausnützt. 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 Analogrechenschaltung vorgenommen.

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

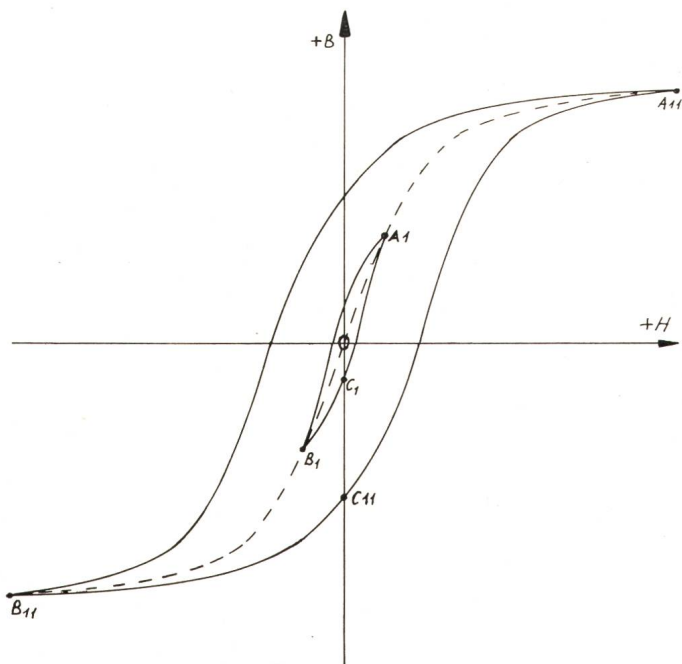


Fig. 2

Verlauf von B und H bei der Ausmessung der Neukurve

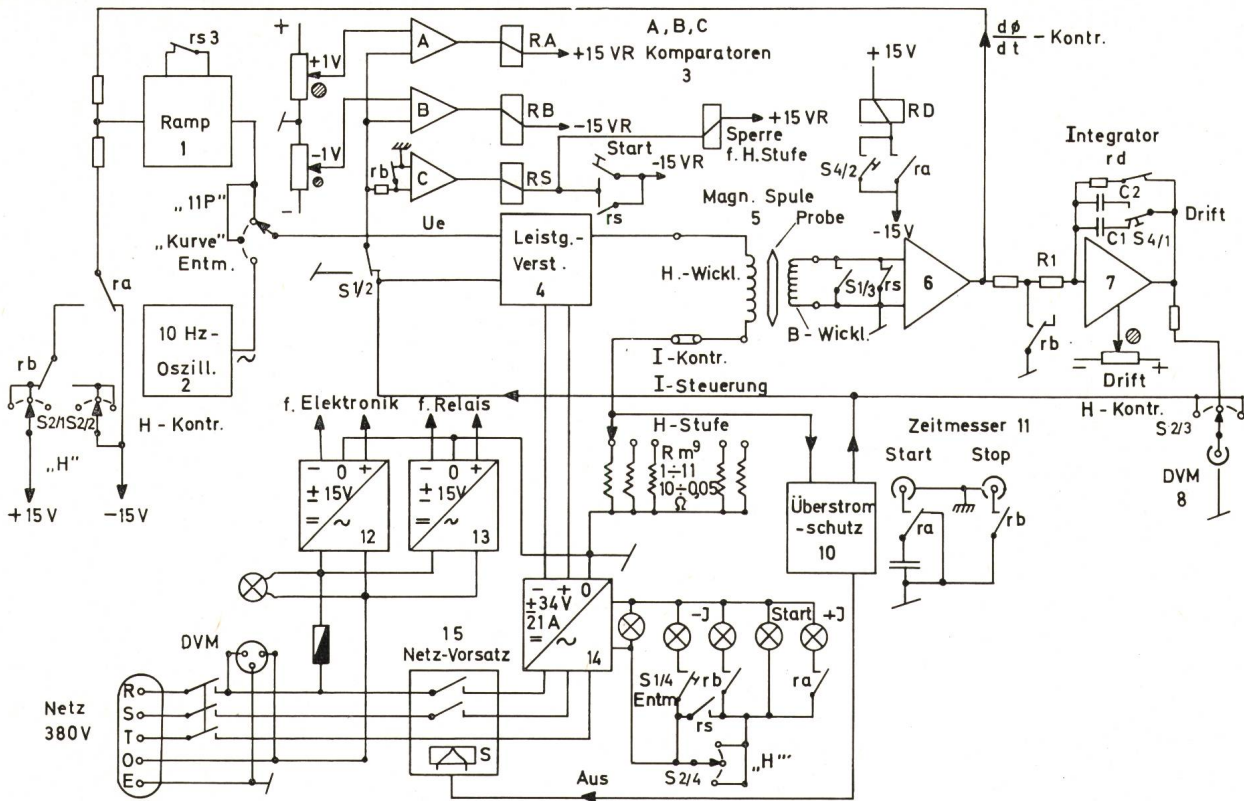


Fig. 3
Elektronischer Magnetisierungsmesser
Funktionsschema

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 aufintegriert 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, Auswertblatt für Proben 180 mm											
Spulenkonstante $S = 4792 \text{ m}^{-1}$		Apparatekonstante $k = 0,2498 \text{ sek/m}^2$		Korrektur $x = (DM/10)^2$		Probe:		DM =		a = 1,005033	
										b = 0,877499 · 10 ⁻⁶ Tesla/A/m	
										c = 1,013717	
										d = 0,645876 · 10 ⁴ A/Tesla m	
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
Auswertblatt 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 Kontrollschalter 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/m².

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

Andererseits 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 180MM
105C      KORREKTUR DER MIT DEM ELEKTRONISCHEN MAGNETISIERUNGSMESSE
110C      GEMESSENEN H- UND B-WERTE
115C      K-EICHKONSTANTE DER APPARATUR (SEK/W2)
120C      A, B, C, D = BERECHNETE KOFFIZIENTEN
125C      MU-ABSOLUTE PERMEABILITAT (TESLA/A/M)
130C      DM-DURCHMESSER DER PROBEN IM MITTELTEIL(MM)
135      REAL K
140      DIMENSION HS(11), TEXT(12)
145      READ,(HS(JA),JA=1,11)
150      K=0,2498
155      A=1,00503380
160      B=0,87749918E-06
165      C=1,01371720
170      D=0,64587677E+04
175      2  READ 51, TEXT
180      51  FORMAT(5X,12A6)
185      READ,DM
190      K=(DM/10,)**2
195      PRINT 20, TEXT
200      20  FORMAT(/12A6/)
205      PRINT 21
210      21  FORMAT(11X,7HHS(A/M),7X,6HH(A/M),9X,4HU(V),
215      +      8X,5HBS(T),9X,4HB(T)/)
220      DO 1  JA=1,11
225      READ, U
230      BS=U*K/X
235      BE=A*BS-B*HS(JA)
240      H=C*HS(JA)-D*BS
245      1  PRINT 22, JA,HS(JA),H,U,BS,BE
250      22  FORMAT(15,2F13,1,3F13,3)
255      GO TO 2
260      END
265      $DATA
270      474,74 705,85 1175,95 2028,44 3110,94 4648,20
275      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)	BS(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)	BS(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

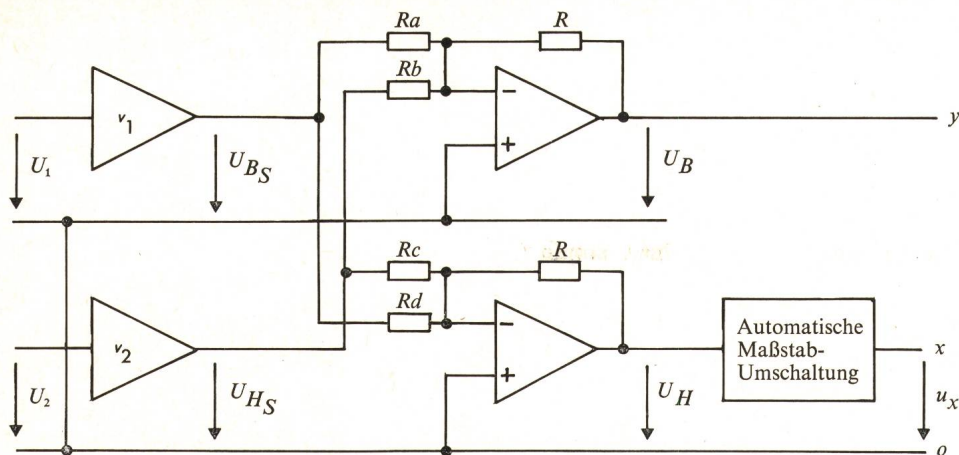


Fig. 6
 Funktionsschema des Analogrechners
 Bezeichnungen siehe im Text

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

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

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:

$$B = aB_s - bH_s$$

$$H = cH_s - dB_s$$

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

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

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

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

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

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

Die 4 Koeffizienten der Korrekturpolynome erhalten dann die Werte:

$$a = 1,004\ 249$$

$$b = 0,878\ 323 \cdot 10^{-6} \text{ Tm/A}$$

$$c = 1,011\ 529$$

$$d = 0,542\ 862 \cdot 10^4 \text{ A/Tm}$$

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

$$\alpha = 0,008\ 013$$

$$A_w' = 1,272\ 3 \text{ cm}^2$$

$$a = 1,005\ 033$$

$$b = 0,877\ 499 \cdot 10^6 \text{ Tm/A}$$

$$c = 1,013\ 717$$

$$d = 0,645\ 876 \text{ A/Tm}$$

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

Die gemessenen und umgerechneten Werte werden in einem Auswertblatt nach Fig. 4 eingetragen. Um die Auswertarbeit 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.

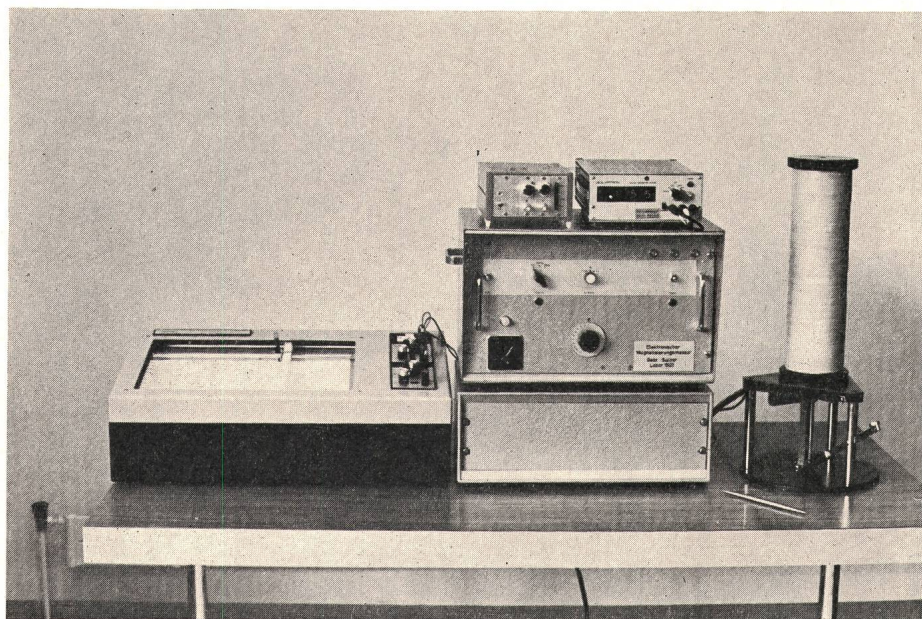
4. Analogrechner für die Registrierung der Hysteresiskurve

Die Hysteresiskurve charakterisiert den Zusammenhang zwischen Feldstärke und Induktion, wenn abwechselungsweise 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:

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 ± 10000 A/m überstreicht die Feder des Koordinatenschreibers auf der x -Achse ein Gebiet von ± 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 ± 100000 A/m beträgt somit ± 19 cm.

Den Schreibeingängen 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.