

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Band:	67 (1976)
Heft:	8
Artikel:	Quasistatische H-B-Trajektorien beim Eisen
Autor:	Gerecke, E.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-915155

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: 26.01.2026

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

Quasistatische H-B-Trajektorien beim Eisen

Von E. Gerecke

621.318.4.042.2:537.623

Es wird über Versuche an luftspaltlosen Ringbandkernen aus kornorientiertem Silizium-Eisen-Blech von der Qualität, die für Transformatoren verwendet wird, berichtet. Die geometrischen Eigenschaften von unsymmetrischen Hystereseschleifen werden bei beliebigen, zeitlich sehr langsam veränderlichen Magnetisierungsströmen beschrieben und ein «Rückkehrsatz» formuliert. Die Umlaufzeit einer geschlossenen Schleife liegt zwischen 1 min und 1 h. Zum Schluss werden kurz die durch Kriechen sowie rasche Stromvariationen hervorgerufenen Abweichungen gestreift.

Des tores sans entre-fer en alliage au Fer-Silicium, orienté et laminé à froid, d'une qualité identique à celle utilisée pour les transformateurs de puissance, font l'objet d'essais. On étudie quelques propriétés géométriques des boucles asymétrique d'hystérèse magnétique dans le fer soumis à des courants magnétisants variant arbitrairement et très lentement. On formule également un théorème sur le retour conditionné au point de départ. Le temps de circulation dans une boucle varie entre 1 min et 1 h. Pour terminer on mentionne brièvement l'influence de la dérive magnétique du fer ainsi que les écarts provoqués par des variations rapides du courant.

1. Aufbau und Schema der Versuchsanlage

Für die Versuche wurde ein luftspaltfreier, gewickelter Ringbandkern aus 0,3 mm starkem, kaltgewalztem, kornorientiertem Textur- α -Eisen mit etwa 3% Siliziumgehalt (ARMCO M5 und Trafoperm N2 der VAC) verwendet [1, S. 24]¹⁾. Die Quelle u_q (Fig. 1) lieferte rampen- und dreieckförmige Spannungen von etwa 0,01 Hz. Zufolge der Weisschen Beziekte schwankt die örtliche Flussdichte über dem Eisenquerschnitt sehr stark, deren Mittelwert B ist proportional zum Integral $\int u_2 dt$ der induzierten Spannung u_2 . Die mittlere Erregung $H = N_1 \cdot l_1^{-1} \cdot i(t)$ bezieht sich auf die Mitte des Kernes, wobei l die mittlere Länge des Kernes bedeutet. Der x-y-Schreiber zeichnet bei sehr langsam sich veränderndem Strom $i(t)$ quasistatische H-B-Trajektorien.

2. Definitionen

Der momentane (mittlere) Zustand des Kernes kann durch einen Bildpunkt $P(H, B)$ in einer H-B-Ebene dargestellt werden. Bei sehr langsam sich änderndem Strom $i(t)$ beschreibt P eine *quasistationäre Trajektorie* T , deren Durchlaufsstinn durch einen Pfeil gekennzeichnet wird. Geht $i(t)$ durch ein Maximum oder ein Minimum, so zeigt die Trajektorie eine *Spitze* oder einen *Umkehrpunkt*. Es ist zweckmäßig, *Aufwärts- und Abwärstrajektorien* zu unterscheiden, je nachdem di/dt positiv oder negativ ist.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

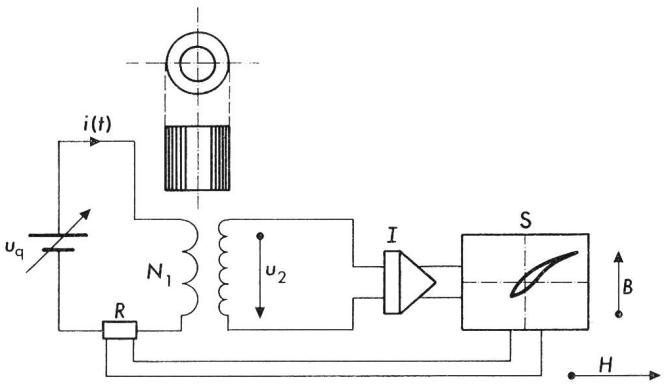


Fig. 1 Anlagenschema

- u_q variable Spannungsquelle
- N_1 Anzahl Windungen der Erregerwicklung
- $i(t)$ Erregerstrom
- R Messwiderstand
- u_2 sekundär induzierte Spannung
- I Integrator
- S Koordinatenschreiber
- H Erregung
- B Flussdichte

3. Ideales Eisen

Die zugehörige äusserste Trajektorie (Fig. 2) hat zwei nahezu senkrechte Flanken UV, U^*V^* und zwei horizontale Äste VEU^* und V^*E^*U [1, S. 10]. Die Koerzitiverregung H_c liegt beim Monokristall aus Silizium- α -Eisen bei etwa 1 A/m. Überschreitet im Punkt U die Erregung H den Wert H_c ganz wenig, so wandern im Eisenkern die Blochwände von aussen nach innen. Reduziert man im Bildpunkt 1 den Strom $i(t)$ bis 1', und erhöht man ihn wieder bis 1, so stehen die Blochwände dabei still und die Trajektorie ist eine horizontale Gerade. Ähnlich verhält sich die Trajektorie 2-2'-2. Bei der Trajektorie 3-3' muss man H von $-H_c$ bis $+H_c$ und bei 4-4' von $+H_c$ bis $-H_c$ ändern. Durch Kombination erhält man die geschlossenen Schleifen 3-3'-4-4'-3, sowie $V-U^*-3-3'-V$ und $U-4-4'-V^*-U$.

Bei technischem Eisen gehen die Trajektorien 1-1'-1 sowie 2-2'-2 in flache krummlinige Zweiecke (oder Zweiseite) und die Fig. 2 in Fig. 3 über.

4. Experimentelle Resultate

Fig. 3 zeigt zwei bezüglich des Mittelpunktes M zentrisch-symmetrische, geschlossene Trajektorien 1-T₁-1*-T₁*-1 und 2-T₂-2*-T₂*-2. Deren Umkehrpunkte 1, 1* und 2, 2* liegen auf der *Kommutterungs-* (oder *Spitzen-*) Kurve K-M-K*. Verlegt man den Punkt 1 bis zum Punkt E mit der höchst erreichbaren Erregung H_E , so erhält man die zugehörigen *Grenztrajektorien* mit dem linken Ast G_1 : $E-R_0-G_1-H_c^*-E^*$ und dem rechten Teil $E^*-R_u-G_r-H_c-E$.

Geht man von beliebigen, auf T_1 gelegenen Bildpunkten wie 3 oder 4 wieder nach rechts, so gelangt man über T_3 bzw. T_4 zurück nach 1. Kommutiert man ferner in einem beliebigen Bildpunkt P auf T_4 den Strom, so gelangt man über die zugehörige Trajektorie T_4^* in den Ausgangspunkt 4 zurück, folgt dann T_1 bis 1* und hernach ungefähr der *Kommutterungskurve* K^* bis E^* . Diese Trajektorie von P bis E^* weist zwei *Knickpunkte* 4 und 1* auf; dort ändert sich die Tangente und damit auch die differentielle Permeabilität (dB/dH) unstetig. Kommutiert man $i(t)$ in einem beliebigen Punkt 5 auf T_4^* , so gelangt man über T_5 abermals nach P . Auf T_2 existiert ein Punkt 6 derart, dass dessen Aufwärstrajektorie T_6 genau durch P geht. Auf der *Grenztrajektorie* G_r gibt es zudem einen Punkt 7 so, dass dessen Abwärstrajektorie T_7 ebenfalls durch P geht; die zugehörige Aufwärstrajektorie T_7^* endet wieder in 7. Durch jeden Bildpunkt P innerhalb der *Grenztrajektorien* gehen also unendlich viele quasistatische Trajektorien; sie verlaufen in den zu P gehörigen 1. und 3. Quadranten. Die differentielle Permeabilität dieser Trajektorien in P ist stets positiv

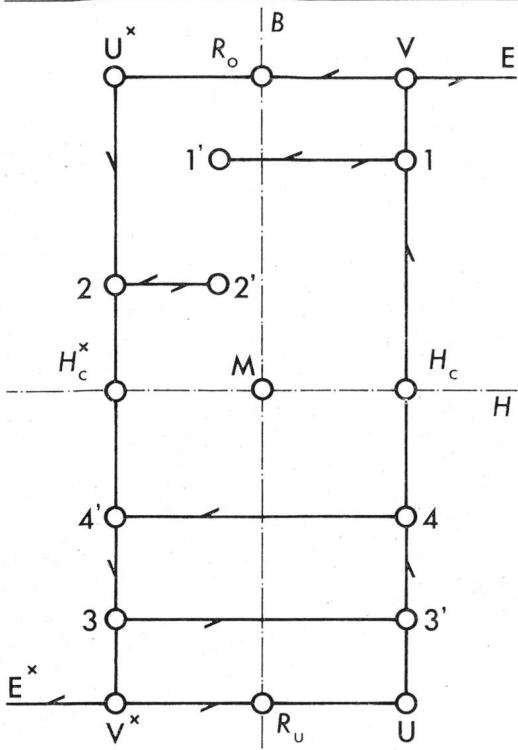


Fig. 2 H-B-Schleifen von idealen monokristallinem Eisen

H	Erregung
B	Flussdichte
R_0, R_u	Oberer, bzw. unterer Remanenzpunkt
H_c	Koerzitiverregung
U, V, U^*, V^*	äußerste Hystereseschleife
E, E^*	äußerste Bildpunkte
1-1'-1, 2-2'-2	kleine Schleifen
3-3'-4-4'-3	mittlere Schleife

Fig. 2 H-B-Schleifen von idealen monokristallinem Eisen

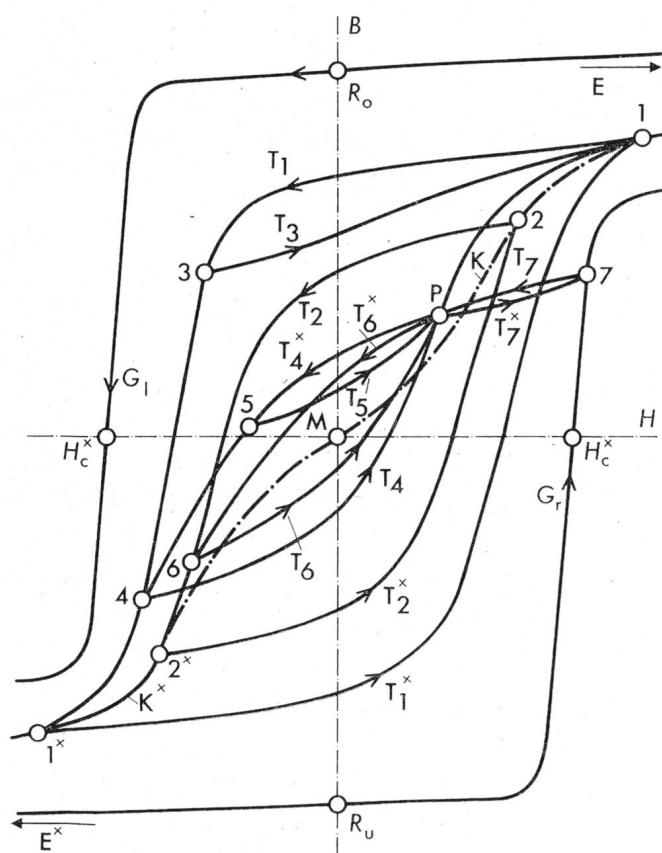


Fig. 3 H-B-Trajektorien von technischem Eisen
Symmetrische und unsymmetrische Schleifen
Bezeichnungen siehe im Text

und liegt zwischen einem unteren und einem oberen Grenzwert. Zweiseitig geschlossene Schleifen wie P-4, P-5, P-6 und P-7 können beliebig oft durchlaufen werden, man kehrt immer wieder zu den gleichen Umkehrpunkten zurück. Geht man jedoch z. B. von P über 4 nach 1* und kommutiert dann, so erreicht man P nicht mehr, offenbar weil man den Knickpunkt 4 passiert hat.

5. Schlussfolgerungen

Aus dem Vorhergehenden ergeben sich folgende Schlüsse:

1. Durch jeden innerhalb der Grenztrajektorien gelegenen Bildpunkt $P(H, B)$ gehen unendlich viele quasistatische Trajektorien; sie verlaufen im ersten und dritten Quadranten des Koordinatensystems mit Ursprung P.
2. Die differentielle Permeabilität (dB/dH) ist bei quasistatischen Trajektorien stets positiv und liegt in jedem Bildpunkt zwischen 2 Grenzwerten.
3. Bildpunkte $P(H, B)$ außerhalb der Grenztrajektorien sind nicht erreichbar.
4. Die Umkehrpunkte symmetrischer Trajektorienschleifen liegen auf einer Kommutierungskurve (Spitzenkurve). Diese kann von der Neukurve abweichen.
5. Trajektorien können Knickpunkte aufweisen, bei denen sich die differentielle Permeabilität unstetig ändert [1, S. 33].

6. Beispiele zum Rückkehrsatz

6. Gelangt man bei zunehmendem Strom zu einem Bildpunkt P_1 , kommutiert man alsdann den Strom bis man einen Punkt P_2 erreicht hat und erhöht man diesen wieder, so gelangt man zu P_1 zurück, falls man keinen Knickpunkt passiert hat (Rückkehrsatz) [1, S. 31].

6. Beispiele zum Rückkehrsatz

In Fig. 4 geht man von einem beliebigen Bildpunkt P sehr langsam abwärts bis 1, dann wieder aufwärts bis P, dann abwärts bis 2 und zurück bis P und wiederholt diesen Vorgang bis Punkt 14. Man gelangt dabei stets in den Umkehrpunkt P zurück.

In Fig. 5 [1, S. 34] startet man vom unteren Remanenzpunkt R_u aufwärts, reduziert dann $i(t)$ langsam auf Null, erhöht $i(t)$ wieder und wiederholt dieses Spiel abwechselungsweise. Man gelangt dabei stets wieder auf die Grenztrajektorie G_r . H_c beträgt hier 7,5 A/m. Man vergleiche diese Trajektorien mit denen des idealen Eisens von Fig. 2.

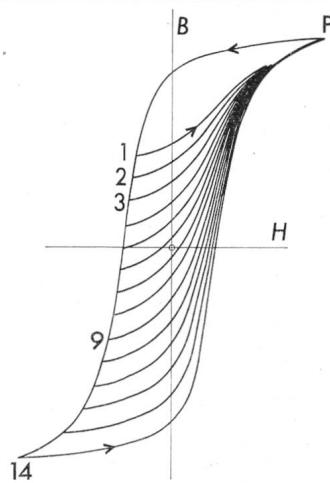
7. Dynamische Trajektorien

Befindet sich allgemein ein System zur Zeit t_1 in einem stationären Zustand I und zur Zeit t_2 in einem stationären Zustand II, so durchläuft es zwischen t_1 und t_2 einen transienten Vorgang. Ist z. B. bei t_1 der Strom $i = i_1$ konstant und bei t_2 $i = i_2$ konstant, so kann der Übergang von I zu II sehr langsam, also quasistatisch oder sehr rasch, also dynamisch vorgenommen werden; je nachdem ergibt sich eine quasistatische oder dynamische H-B-Trajektorie. Es zeigt sich nun beim System «Eisen», dass sich der gewünschte stationäre Zustand II gar nicht sofort einstellt, es kann Sekunden oder Stunden oder Jahre benötigen. Denn das Eisen besteht aus rund 10^{29} m^{-3} Elementarmagneten (spin), und es dauert sehr lange, bis alle die endgültige Lage erreicht haben. Diese Erscheinung ist schon lange als *Kriechen* oder *magnetische Nachwirkung* bekannt [1, S. 20], sie muss bei den vorhergehenden Abschnitten 3 und 4 mitberücksichtigt werden.

Fig. 4

Beispiel zum Rückkehrersatz

Beginn in Punkt P; von P nach einander abwärts bis zu den Punkten 1...14 und zurück. Dabei gelangt man stets zum Ausgangspunkt P zurück.



Ist beim Zustand II $i(t)$ eine periodische Funktion der Zeit, so durchläuft die dynamische H - B -Trajektorie eine Reihe von nicht ganz geschlossenen Schleifen, die dauernd wandern und sich erst nach 10...100 oder mehr Perioden in einen nahezu stationären Zustand einspielen, wie das folgende Beispiel zeigt.

Startet man nach Fig. 6 vom unteren Remanenzpunkt R_u mit einer sinusförmigen Erregung $H_0 \sin \omega t$ kleiner Frequenz, so gelangt man zunächst längs G_r zu Punkt 1, dann längs der zu 1 zugehörigen statischen Abwärtstrajektorie T_1 nach Punkt 2 und anschliessend laut dem Rückkehrersatz nach 1 zurück. Dann verschiebt sich die Schleife 1-2 beim vielfältigen Durchlaufen kaum merklich [1, S. 36]. Wiederholt man den Vorgang jedoch stundenlang, so hebt sich die Schleife langsam an und gelangt über die Zwischenlagen 3-4 schliesslich in die stationäre Lage 5-6, wobei die Spitzen symmetrisch zum Mit-

telpunkt M auf der Kommutierungslinie KK* liegen. Beginnt man beim oberen Remanenzpunkt R_o , so verschiebt sich die Schleife langsam abwärts bis in die Endlage 5-6. Solch langsame Kriechvorgänge sind schon vielmals beobachtet worden, z. B. bei Messinstrumenten und bei Pupinspulen nach Stromstößen.

Bei *dynamischen* Vorgängen sind die Schlussfolgerungen von Abschnitt 5 wie folgt zu ändern:

3* Dynamische Trajektorien können sehr wohl ausserhalb der Grenztrajektorien verlaufen.

1* Durch jeden erreichbaren H - B -Bildpunkt gehen unendlich viele dynamische Trajektorien; sie können dort in allen Quadranten verlaufen.

2* Die differentielle Permeabilität (dB/dH) bei dynamischen Trajektorien kann jeden Wert zwischen $(-\infty)$ und $(+\infty)$ annehmen.

4* Bei Extremwerten von $i(t)$ verläuft die Trajektorie senkrecht. Bei dynamischen symmetrischen Trajektorien liegen die Bildpunkte mit extremalem H nicht mehr genau auf der Kommutierungskurve KK*.

6* Der Rückkehrersatz gilt nur noch näherungsweise.

Die *Neukurve* ist eine dynamische Trajektorie, sie kann ja jeweils nur einmal durchlaufen werden. Sie kann sogar die Grenztrajektorien überqueren.

Literatur

- [1] E. Gerecke: Ferromagnetophysik. Scientia Electrica 19(1973)3, S. 57...96, 20(1974)1, S. 1...47 + Nr. 2, S. 49...80 + Nr. 3, S. 81...110.

Adresse des Autors

Prof. Dr. h. c. Ed. Gerecke, ETHZ-ETL Physikstrasse 3, 8006 Zürich.

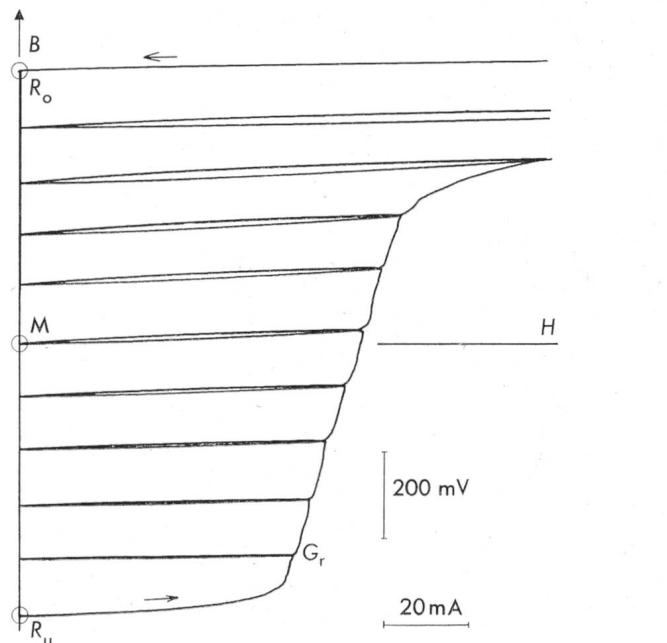
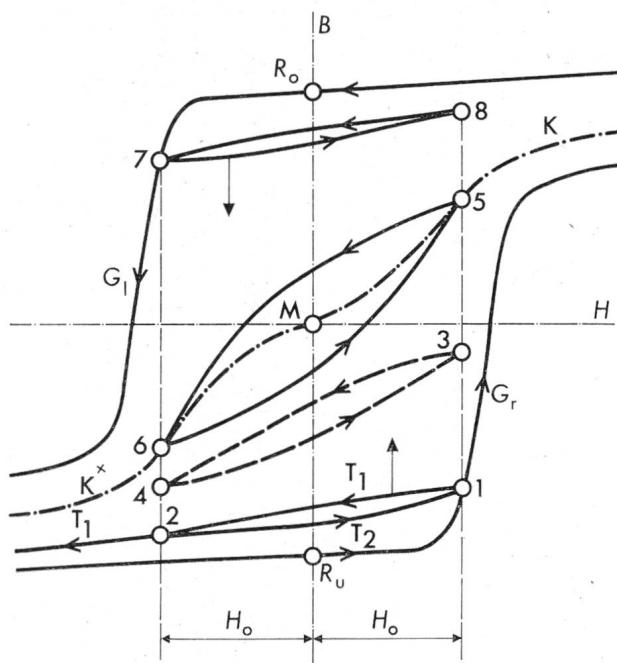


Fig. 5 Linsenförmige Schleifen

Beginn im unteren Remanenzpunkt R_u . Fortschreiten längs der Grenztrajektorie G_r . Dabei mehrmals Reduktion von $i(t)$ bis Null und jeweils anschliessende Erhöhung von $i(t)$. ARMCO M5. [1, S. 34, Fig. C 10]

Abszisse H: $20 \text{ mA} \triangleq 1,91 \text{ A/m}$, $H_c = 7,5 \text{ A/m}$
Ordinate H: $200 \text{ V} \triangleq 0,5 \text{ Tesla}$, $B_u/B_0 = 3,06 \text{ Tesla}$

Fig. 6 Kriechen der H-B-Schleifen bei periodischem Strom $i(t)$

Beginn in R_u , dann nach 1. Zu 1 gehörende statische Abwärtstrajektorie T_1 . Schleife 1-T₁-2-T₂-1. Schleife 3-4 in einer späteren Zwischenlage. Stationäre Schleife 5-6-5 mit Umkehrpunkten auf der Kommutierungskurve K-M-K*. Obere anfängliche Schleife 7-8-8.