Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 9 (1936)
Heft: I

Artikel: Technische Probleme des Ferromagnetismus bei schwachen Feldern
Autor: Goldschmidt, R.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-110617

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: 12.07.2025

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

Technische Probleme des Ferromagnetismus bei schwachen Feldern

von **R. Goldschmidt**, Lausanne.
(Mitteilung aus dem Laboratorium der S.A. des Câbleries & Tréfileries) (Cossonay-Gare).[1])

(20. XII. 35.)

Den Anforderungen der Technik entsprechend, sind in den letzten Jahrzehnten eine Reihe magnetischer Werkstoffe verschiedenartigster Charakteristiken entwickelt worden[2]) (Fig. 1). Stand der Elektrotechnik zuerst als magnetischer Werkstoff beim Bau von Apparaten und Maschinen nur das technische Weicheisen zur Verfügung, so führte die Entwicklung, in dem Streben, die Wirbelstrom- und Hystereseverluste zu vermindern, doch bald zu den silizierten Blechen. Man kam dann zu den Eisen–Nickel-Legierungen und erzielte durch spezielle thermische Behandlungen Materialien mit steil ansteigender Induktionskurve. Damit hatte man Werkstoffe hoher Anfangspermeabilität, die wie das Permalloy oder die Permalloy-ähnlichen Legierungen erhebliche Bedeutung für die Schwachstromtechnik gewannen. Kurz darauf wurden dann die Eisen–Nickel–Kobalt-Legierungen (Perminvar-Gruppe) entwickelt. Diese Legierungen werden wegen ihrer geringen Hysterese bei schwachen Feldern für die Krarupierung von Seekabeln benutzt, zeigen jedoch nur ungenügende magnetische Stabilität gegenüber stärkeren magnetischen Störfeldern. Durch besondere magnetische Stabilität zeichnen sich die magnetisch harten Legierungen auf Eisen–Nickel-Basis (Isoperm-Gruppe) aus, deren Charakteristikum eine schmale lanzettförmige Hystereseschleife ist. Neben der Entwicklung von magnetischen Werkstoffen für die Wechselstromtechnik bei schwachen und starken Feldern, verlief die Entwicklung der magnetischen Stähle für Dauermagnete, die gerade in der letzten Zeit durch die Einführung der vergütbaren Eisen–Nickel–Aluminium-Stähle ganz bedeutende Fortschritte gemacht hat.

---

[1]) Vortrag gehalten auf der Tagung der S. N. G. in Einsiedeln, August 1935.

[2]) W. Kussmann, Archiv für Elektrotechnik **29**, 297, 1935. — W. C. Ellis und E. Schumacher, Bell System Technical Journal, Vol. XIV, No. 1, 1935.

So verschiedenartig die Form der Hystereseschleife und damit das magnetische Verhalten der angeführten Werkstoffe bei starken Feldern ist, so gleichartig sind die Gesetze, denen sie bei schwachen Feldern gehorchen. Dabei sind als starke Felder solche anzusehen, die wesentlich grösser, und als schwache Felder solche, die wesentlich kleiner als die Koerzitivkraft des Materials sind. Mit starken Feldern haben wir es im Maschinen- und Transformatorenbau, mit schwachen Feldern im allgemeinen in den Apparaten und Schaltungen der Fernmeldetechnik zu tun. Bei schwachen Feldern ist nun die Hystereseschleife aller magnetischen Werkstoffe schmal lanzettförmig; die Begrenzungslinie dieser Flächen ist, wie RAYLEIGH[1]) durch eingehende Untersuchungen bereits 1887 zeigen konnte, quadratisch abhängig von der Feldstärke, und zwar nach der Beziehung

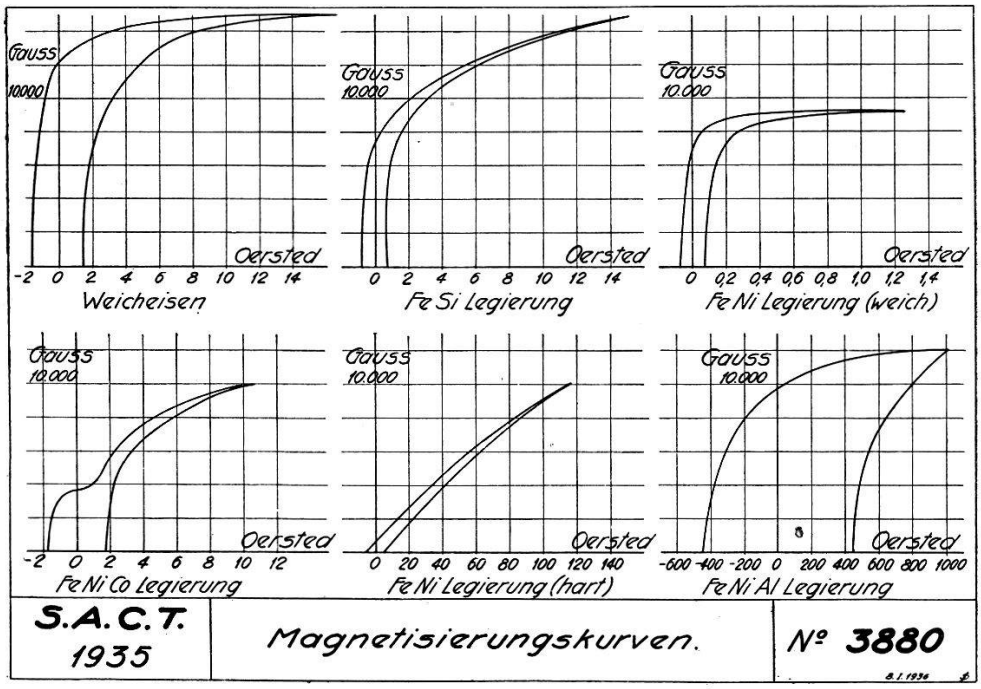

Fig. 1.

$$B = (\mu_0 + 2\nu H_1) H \pm \nu (H^2 - H_1^2) .$$

Dabei bedeuten μ_0 die Anfangspermeabilität und ν den Hysteresefaktor des Materials; H_1 ist die maximale und H die jeweilige Feldstärke auf der Schleife. Untersucht man nun einen magnetischen Werkstoff bei schwachen Wechselfeldern auf Permeabilität und Verluste, so ergibt das Experiment, wie sich auch aus der RAYLEIGH'schen Beziehung ableiten lässt, eine lineare Abhängigkeit der Permeabilität und des Verlustwinkels von der Ampli-

[1]) Lord RAYLEIGH, Phil. Mag. XXIII, 225, 1887.

tude. — Ferner steigt, bedingt durch die Wirbelstromverluste, der Verlustwinkel bei genügend fein unterteiltem Material linear mit der Frequenz. JORDAN[1]), der diese Verhältnisse zuerst eingehend an Kernen von Pupinspulen untersuchte, stellte nun fest, dass ausser dem durch die Hystereseverluste bedingten, linear mit der Amplitude ansteigenden, und dem durch die Wirbelströme hervorgerufenen, der Frequenz proportionalen Verlustwinkelanteil, noch ein in weitem Frequenzband von Amplitude und Frequenz unabhängiger Verlustwinkel vorhanden ist. Den Wert dieses Verlustwinkelanteils bestimmt man aus dem Verlustdiagramm durch Extrapolation auf Feldstärke und Frequenz Null (Fig. 2). JORDAN

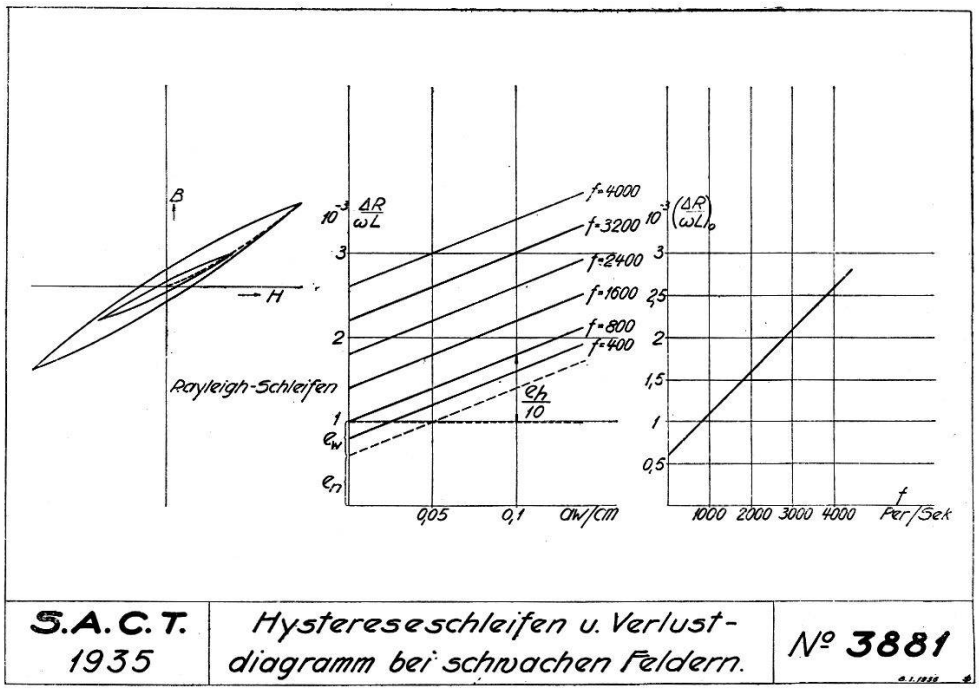

Fig. 2.

glaubt, in Analogie zu mechanischen und dielektrischen Verhältnissen annehmen zu dürfen, dass dieser Verlustwinkelanteil auf Nachwirkungseffekte zurückzuführen ist.

Die Frage der Nachwirkungsverluste ist seitdem vielfach diskutiert und experimentell untersucht worden, da sie sowohl theoretisch für die Erkenntnis der magnetischen Vorgänge, insbesondere bei schwachen Feldern, als auch praktisch für die Technik des Schwachstromspulenbaus von erheblicher Bedeutung ist. Die Magnetisierung bei schwachen Feldern wird ja nach GANS[2]) als reversibel angesehen, ohne dass bisher genauere Vorstellungen über den Mechanismus dieses Prozesses bestehen.

---

[1]) H. JORDAN, El. Nachr. Technik **1**, H. 1, 7, 1924.

[2]) R. GANS, Göttinger Nachrichten 1910, 197; 1911, 118.

Grössere Klarheit über diese Verhältnisse zu erzielen wäre aber gerade mit Hinblick auf die neuen Theorien des Ferromagnetismus (Akulov, Becker, Perrier)[1]) von Interesse.

Was die praktische Bedeutung der Nachwirkungsverluste betrifft, so ist darauf hinzuweisen, dass diese z. B. bei Pupinspulen einen nennenswerten Teil der gesamten Eisenverluste ausmachen können.

Im Anschluss an die Arbeit von Jordan wurde nun an verschiedenen Stellen die Frage der Verluste bei schwachen Feldern eingehend untersucht und es wurde gefunden, dass bei fast allen magnetischen Materialien ein von Frequenz und Amplitude unabhängiger Verlustwinkelanteil vorhanden ist. Es konnte ferner die Abhängigkeit dieser Verluste[2]) von einer dem Wechselfeld überlagerten Gleichstrommagnetisierung festgestellt werden. Ferner wurde die Temperaturabhängigkeit bestimmt, wobei sich zeigte, dass kurz vor Erreichung des Curie-Punktes, jedoch nach dem bekannten Permeabilitäts-Maximum, ein Maximum des Nachwirkungsverlustwinkels in der Grössenordnung von einigen Prozent auftritt, während im allgemeinen bei Zimmertemperatur Verlustwinkel von nur wenigen $^0/_{00}$ beobachtet werden. Die physikalische Realität des frequenz- und amplitudenunabhängigen Verlustwinkelanteils ist also erwiesen, und es handelt sich nur darum, eine Deutung für diese Verluste zu finden.

Es gilt also festzustellen, ob es sich bei diesen zusätzlichen Verlusten tatsächlich um reine Nachwirkungsverluste handelt, um Verluste also, die durch ein zeitliches Nacheilen der Induktion hinter der Feldstärke bedingt werden[3]). Die Verhältnisse wären dann analog denen bei der elastischen Nachwirkung, so wie sie von Wiechert und Becker[4]), oder denen der dielektrischen Nachwirkung, so wie sie von Debye[5]) gedeutet wurde. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass es sich um Mischkörpereffekte handelt, sodass wir ähnliche Beziehungen hätten wie Wagner[6]) sie für die Dielektrika angenommen hat. Ferner ist es möglich, dass zusätzliche Hystereseverluste auftreten, dass also die Hystereseschleife bei schwachen Feldern nicht genau die von Rayleigh beobachtete quadratische Form hat. Die Untersuchung der Effekte

[1]) N. Akulov, Zeitschr. f. Physik **52**, 389, 1928. — R. Becker, Zeitschr. f. Physik **62**, 253, 1930. — A. Perrier, H.P.A. 231, 1931.

[2]) R. Goldschmidt, Zeitschr. f. techn. Physik **13**, H. 11, 534, 1932.

[3]) H. Jordan, Annalen d. Physik **5**, 21; H. 4, 405, 1934.

[4]) E. Wiechert, Wied. Ann. **50**, 335, 1893. R. Becker, Zeitschr. f. Phys. **33**, 185, 1925.

[5]) Debye, Handbuch der Radiologie **6**, 597, 1925.

[6]) K. W. Wagner, Archiv f. Elektrotechnik **2**, 371, 1913.

erstreckt sich in erster Linie auf die Prüfung des Verlustwinkels in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude. Ferner kann aber auch die Frequenzabhängigkeit der Permeabilität und ausserdem der zeitliche Verlauf der Ein- oder Ausschaltvorgänge von Gleichstromfeldern zur Beobachtung mitherangezogen werden.

Was die Frage der Form der Hystereseschleife betrifft, so konnte WITTKE[1]) zeigen, dass Abweichungen von der RAYLEIGH-Form auch bei schwächsten Feldern nicht zu beobachten sind. JORDAN[2]) und später NEUMANN[3]) wiesen ferner darauf hin, dass auch die bei verzerrter Hystereseschleife zu erwartende Oberwellenkomponente bei Wechselstrommagnetisierung nicht auftritt. Während für ein gegebenes Material die den Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Amplitude darstellende Gerade deutlich als Abschnitt auf der Ordinate einen amplitude-unabhängigen Anteil zeigt, geht die Gerade, die in Abhängigkeit von der Wechselamplitude die Oberwellenamplitude angibt, durch den Nullpunkt des Koordinaten-Systems. Eine Deutung der zusätzlichen Verluste durch Hystereseeffekte versucht auf eine Anregung von BECKER hin, PREISACH[4]). PREISACH hat zuerst einmal untersucht, in welchem Zusammenhang die zusätzlichen Verluste und das Absinken der Permeabilität mit der Frequenz stehen. Dabei war durch genügend feine Unterteilung des Materials dafür Sorge getragen, dass die Wirbelstromverluste vernachlässigbar klein waren. Er fand, dass dieser Zusammenhang genügend genau dem Ansatz entspricht, wie er von BECKER in seiner allgemeinen Nachwirkungstheorie für elastische Körper entwickelt worden war. Danach muss der Nachwirkungskoeffizient β mit dem Nachwirkungsverlustwinkel ε_n durch die Beziehung verbunden sein:

$$\operatorname{tg} \varepsilon_n = \frac{\pi}{2} \beta .$$

PREISACH hat dann aber noch weitere Versuche bei Ein- und Ausschaltvorgängen gemacht; hier zeigt sich nun, dass die beobachteten Ergebnisse sich nicht ohne weiteres aus der Nachwirkungstheorie deuten lassen. Um diese Erscheinung jedoch mit den Effekten bei Wechselstrommessungen in Einklang bringen zu können, nimmt PREISACH an, dass es sich um durch innere Spannungen bedingte, gemäss thermischer Wahrscheinlichkeitsstatistik verzögerte Hystereseeffekte handelt.

---

[1]) WITTKE, Ann. d. Physik [5] **20**, 106, 1934.
[2]) H. JORDAN, Zeitschr. f. techn. Physik **11**, 3, 1930.
[3]) E. NEUMANN, Zeitschr. f. Physik **89**, 308, 1934.
[4]) F. PREISACH, Zeitschr. f. Physik **94**, 277, 1935.

Eine andere Deutungsmöglichkeit ist nun die, dass man Mischkörpereffekte annimmt. Eine entsprechende Theorie ist von K. W. Wagner für die Dielektrika entwickelt und auch in vielen Fällen praktisch gut bestätigt worden. Für ferromagnetische Körper konnte ich vor einiger Zeit zeigen[1]), dass ähnliche, auf Wirbelstromeffekten beruhende Deutungen gleichfalls möglich sind. So genügt z. B. schon die Annahme zweier parallel geschalteter Magnetkerne verschiedener Permeabilität und elektrischer Leitfähigkeit, um ganz analoge Beziehungen zu erzielen, also z. B. ein Verlustmaximum bei bestimmter Frequenz oder einen konstanten Verlustwinkel in weitem Frequenzbereich, sowie gleichzeitig ein Absinken der Permeabilität mit der Frequenz.

Nun ist aber auch, mit Hilfe der Mischkörpertheorie, noch eine weitere Deutung für die zusätzlichen Verluste möglich, wobei es sich wiederum um zusätzliche Wirbelströme handelt. Nimmt man nämlich an, dass Einschlüsse hochpermeabler oder unmagnetischer Natur vorhanden sind, so müssen in aus Blech geschichteten oder aus Band gewickelten Kernen die magnetischen Kraftlinien in der Nähe dieser Einschlüsse eine zur Blechebene senkrechte Komponente besitzen. Diese senkrechte Komponente erzeugte jedoch nun sofort sehr starke Wirbelstromverluste, weil die wiederum zu ihr senkrechte Materialdicke nicht mehr genügend klein ist. Im allgemeinen werden dabei die Wirbelstromverluste bereits bei niedrigsten Frequenzen so gross sein, dass der Verlustwinkel den Grenzwert von $\pi/_4$ erreicht, und also dann bei gleichzeitigem Absinken der wirksamen Permeabilität im weiteren Frequenzbereich konstant bleibt. Diese Deutung würde ohne zu grosse Schwierigkeiten eine Erklärung dafür geben, dass der Verlustwinkel, wie beobachtet, bei Annäherung an den Curie-Punkt stark ansteigt. Man müsste hierfür nur annehmen, dass das magnetische Material inhomogen im Aufbau wäre, und dass einzelne Teile einen niedereren Curie-Punkt hätten als andere. Dieses würde dann dazu führen, dass die Inhomogenität der magnetischen Werte, durch Bildung unmagnetischer Einschlüsse bei Annäherung an den Curie-Punkt stark ansteigt, und so die erhöhten Verluste bedingt. Auch die starken zusätzlichen Verluste bei siliziertem Eisenblech, von denen im Nachstehenden noch die Rede sein wird, wären dann dadurch zu erklären, dass durch den starken Siliziumzusatz inhomogene Ausscheidungen, z. B. an den Krongrenzen, entstehen, wodurch der unregelmässige Verlauf der Kraftlinien und dadurch die zusätzlichen Verluste bedingt werden.

---

[1]) R. Goldschmidt, Zeitschr. f. techn. Physik **11**, 534, 1932.

Wir haben nun im Laboratorium der S. A. des Câbleries & Tréfileries, Cossonay-Gare, die Verhältnisse an hochsilizierten Transformatorenblechen an einem speziellen Beispiel, das nach-

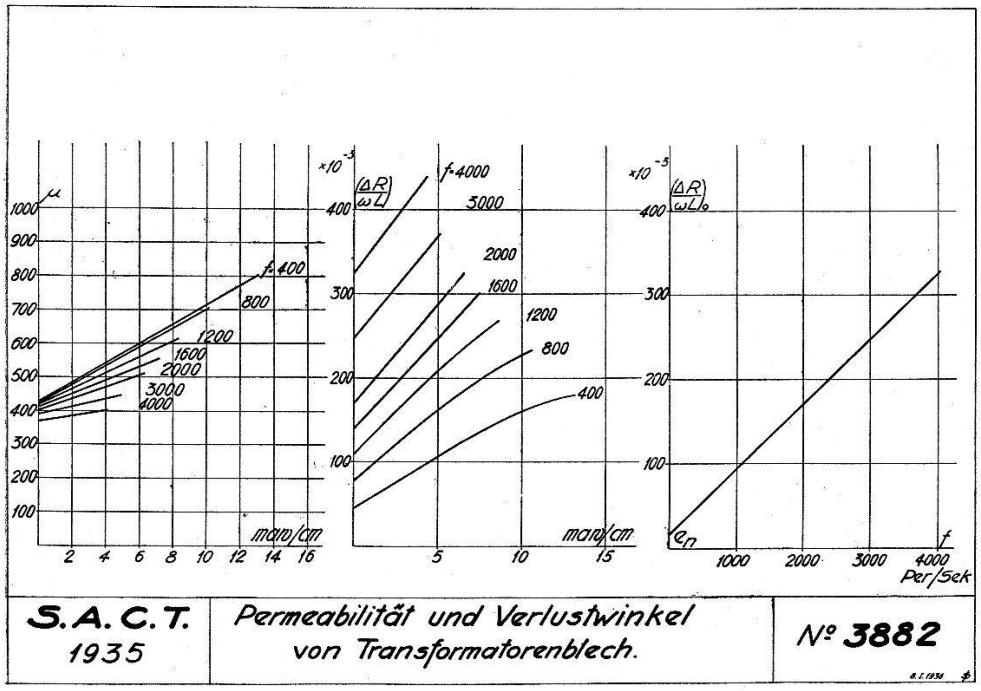

Fig. 3.

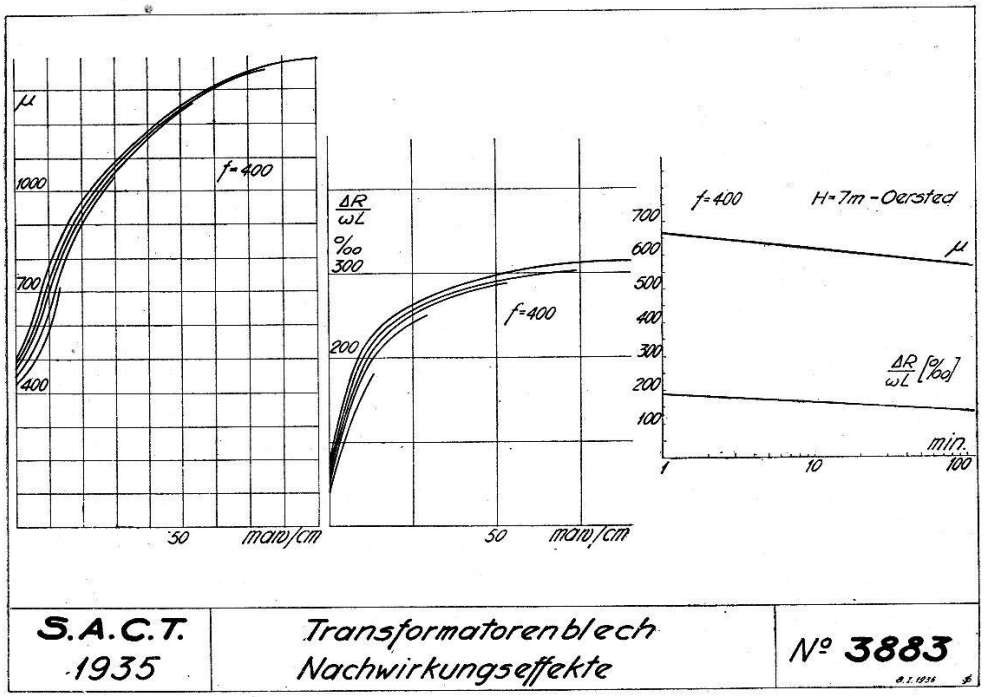

Fig. 4.

wirkungsähnliche Erscheinungen in verschiedenartigster Form aufweist, eingehend untersucht. Man findet bei solchem Blech, wie schon gesagt, sehr starke Nachwirkungsverluste, wie aus Fig. 3 zu ersehen ist, die das Verlustdiagramm in Abhängig-

keit von Frequenz und Amplitude und insbesondere nochmals in Abhängigkeit von der Frequenz für die Amplitude Null zeigt. Man sieht deutlich den Linearanstieg mit der Frequenz, bedingt durch die der Blechstärke, Materialpermeabilität und -Leitfähigkeit entsprechenden Wirbelstromverluste, und den auf der Ordinate verbleibenden Abschnitt für die zusätzlichen Verluste. Die Permeabilität sinkt gleichfalls stark mit der Frequenz ab, jedoch stärker als wie durch einfache Wirbelstromverluste zu erwarten wäre. Die Abhängigkeit lässt sich aber erklären, wenn man die dem beobachteten Nachwirkungsverlustwinkel nach Becker-Preisach entsprechende Nachwirkungskonstante mit in Betracht

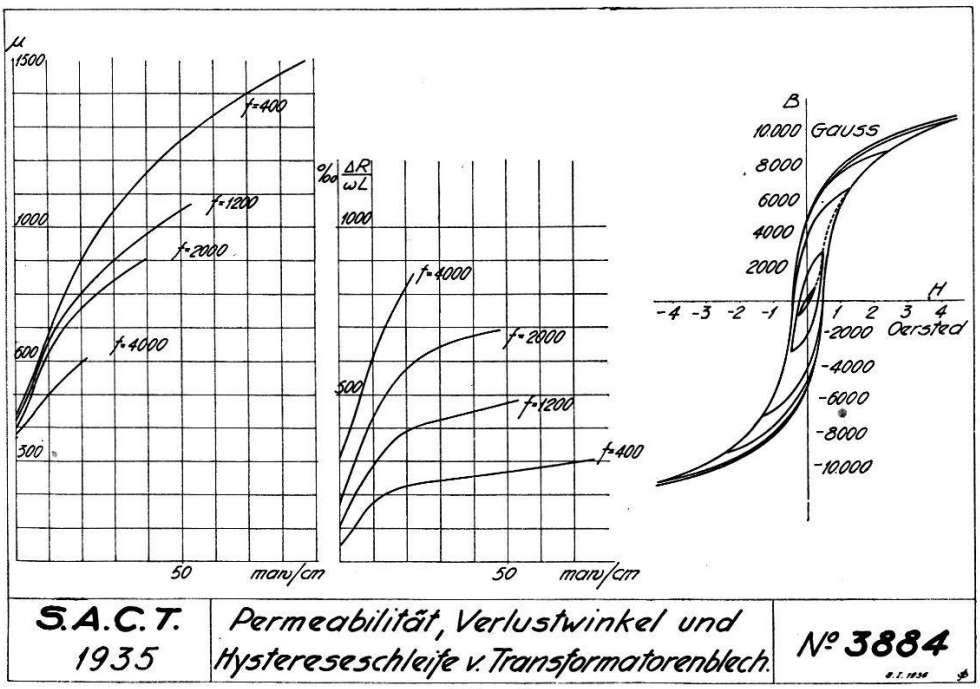

Fig. 5.

zieht. Untersucht man das Material nun mit steigender, jedoch immer noch sehr kleiner Feldstärke, so findet man, wie aus Fig. 4 zu ersehen ist, und wie bereits Atorf[1]) gezeigt hat, dass schon bei Magnetisierungen mit ganz schwachen Wechselfeldern Erhöhungen der Induktions- bzw. der Permeabilitätswerte, zugleich aber auch der Verluste auftreten. Dieselben klingen nach einem linear-logarithmischen Gesetz wieder ab, jedoch so, dass nach 4 Stunden im allgemeinen der Ausgangszustand wieder erreicht ist. Ferner beobachtet man nun, dass die Kurven für Permeabilität und in noch stärkerem Masse für den Verlustwinkel bei steigender Feldamplitude, jedoch bei immer noch sehr kleinen Feldstärken, nicht proportional mit der Feldstärke

[1]) H. Atorf, Zeitschr. f. Physik **67**, 513, 1932.

ansteigen, sondern nach dem ersten steilen Anstieg umbiegen, und weniger steil verlaufen. Man kann auch umgekehrt sagen, dass die bei schwachen Feldern beobachtete Permeabilitäts- und Verlustwinkelkurve bei noch schwächeren Feldern nicht mehr, wie bei andern Materialien im allgemeinen beobachtet wird, linear verlaufen, sondern ziemlich plötzlich von ihrer ursprünglichen Richtung abweichen und nach geringeren Werten absinken. Die ganze Erscheinung spielt bei Feldstärken, die nur wenige Prozent der Koerzitivkraft des Materials betragen, wie aus Fig. 5 und der dort gleichzeitig dargestellten Hystereseschleife zu ersehen ist. Wie weit dieses eigenartige Verhalten auf Nachwirkungserscheinungen oder auf Mischkörpereffekte oder schliesslich auf verzögerte, Hysterese behaftete Umklapprozesse zurückzuführen ist, kann an Hand des bisher vorliegenden Materials noch nicht entschieden werden.