

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 38 (1947)
Heft: 6

Artikel: Beitrag zur Frage der Stossspannungsprüfung an Transformatoren
Autor: Wellauer, M. / Beldi, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061412>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

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

Formel (9) hätte praktisch zu den gleichen Ergebnissen geführt.

Tabelle IV

Klassenmitte q_j	Häufigkeit n_j	Summe der q_j	Summe der q_j^2
7,3	6	50,1	423,43
14,6	12	188,5	2 991,89
21,9	20	447,5	10 119,59
29,2	53	1577,8	47 150,80
36,5	57	2061,7	74 780,29
43,8	30	1296,8	56 207,48
51,1	27	1358,1	68 859,07
58,4	13	744,1	42 620,27
65,7	4	260,6	16 995,18
73,0	1	69,0	4 761,00
80,3	1	78,7	6 193,69
87,6	1	84,0	7 056,00
$N = 225$		8216,9	338 158,69

$$\bar{q} = \frac{8216,9}{225} = 36,5$$

$$s^2 = \frac{1}{224} (338 158,69 - 36,5 \cdot 8216,9) = 169,99$$

$$s = \sqrt{169,99} = 13,03$$

oder, bezogen auf den Durchschnitt

$$\frac{s}{\bar{q}} = \frac{13,03}{36,5} = 0,357$$

Nun kann man die Transformation vornehmen

$$x_j = \frac{q_j - 36,5}{13,03}; \quad y_j = \frac{5 \cdot 13,03}{7,3 \cdot 225} n_j = 0,0396 n_j$$

Die Rechnung erfolgt nach Tabelle V.

Tabelle V

q_j	$q_j - \bar{q}$	$x_j = \frac{q_j - \bar{q}}{s}$	n_j	$y_j = 0,0396 n_j$
7,3	-29,2	-2,24	6	0,24
14,6	-21,9	-1,68	12	0,48
21,9	-14,6	-1,12	20	0,79
29,2	-7,3	-0,56	53	2,10
36,5	0	0	57	2,26
43,8	+7,3	+0,56	30	1,19
51,1	+14,6	+1,12	27	1,07
58,4	+21,9	+1,68	13	0,52
65,7	+29,2	+2,24	4	0,16
73,0	+36,5	+2,80	1	0,04
80,3	+43,8	+3,36	1	0,04
87,6	+51,1	+3,92	1	0,04

Zum Vergleich wurden die einzelnen y -Werte von Tabelle V als Kreise in Fig. 4 eingetragen. Sie streuen noch erheblich, was darauf hinweist, dass die untersuchte Statistik den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht restlos folgt. Die Verteilung ist keine rein zufällige, sondern untersteht gewissen Einflüssen, deren Untersuchung jedoch nicht hierher gehört. Sie ist immerhin wesentlich besser als diejenige des absoluten Energieverbrauches (Fig. 1). Für unsere praktischen Zwecke darf sie als gut bezeichnet werden.

Die Streuung ist, wie zu erwarten war, kleiner als beim Energieverbrauch, da einer der die Variationen verursachenden Faktoren, die Raumzahl, durch Bildung des spezifischen Verbrauches eliminiert wurde.

In einem weiteren Aufsatz soll die hier nur skizzierte Normalverteilung näher untersucht und ihre praktische Anwendung dargelegt werden.

Adresse des Autors:

Ch. Morel, dipl. Ingenieur, Deyenstrasse, Feldmeilen.

Beitrag zur Frage der Stoßspannungsprüfung an Transformatoren

Von M. Wellauer, Zürich

621.317.333.8 : 621.314.21

Beldi hat in einer Arbeit «Versuche mit Stoßspannungen an Transformatoren» [1]¹⁾ Messungen an einigen Transformatoren älterer Konstruktion beschrieben, die er gemeinsam mit Berger auf Wunsch der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich und der Forces Motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe durchgeführt hat. Der vorliegende Artikel diskutiert einige mit der Stoßspannungsprüfung der Transformatoren zusammenhängende Fragen, die in der Arbeit von Beldi aufgeworfen wurden, und es soll vor allem auf eine neuere Arbeit von Hagenguth [2] hingewiesen werden, in der eine neue Schaltung zur Fehlerindizierung bei der Stoßspannungsprüfung angegeben wird.

Dans son rapport sur les essais de transformateurs sous tensions de choc [1]¹⁾, Beldi a décrit les mesures qu'il a effectuées avec Berger sur quelques transformateurs d'ancienne construction, à la demande des Entreprises électriques du Canton de Zurich et des Forces Motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe. Le présent article traite de différentes questions mentionnées dans le rapport de Beldi et qui sont en relation, avec les essais de transformateurs sous tensions de choc. L'auteur attire notamment l'attention sur un nouveau travail de Hagenguth [2], qui présente un nouveau couplage permettant d'indiquer les défauts lors des essais sous tensions de choc.

Die Einführung einer Stoßspannungsprüfung für Transformatoren ist erwünscht, wenn die folgenden zwei Fragen bejaht werden können:

- Kann aus der Stoßspannungsprüfung erkannt werden, ob bei der Stoßspannungsbeanspruchung ein Fehler in der Wicklung auftritt? (Fehlerindizierung)
- Kann gesagt werden, wo sich dieser Fehler befindet? (Fehlerlokalisierung)

Zur Fehlerindizierung geben die American Standards C 57.2 aus dem Jahre 1942 folgende Methoden

an: Geräusch abhören, Beobachtung von Gas- oder Rauchblasen, übermässiger Strom oder Spannungsabfall im Erregerstromkreis, festgestellt durch Messungen mit dem Schleifenoszillographen, Zusammenbruch einer Funkenstrecke oder einer Durchführung, Auftreten von Schwingungen oder eine andere Aenderung des Kathodenstrahl-Spannungsoszillogrammes. Von diesen Methoden, deren Wert auch von den amerikanischen Fachleuten z. T. bezweifelt wird, sagt Beldi mit Recht, dass sie als nicht genügend sicher und einwandfrei betrachtet werden können, um ihre Einführung zu rechtfertigen.

¹⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

Von den genannten Möglichkeiten zur Fehlerfeststellung scheint die Beobachtung der Gasblasen, falls sie überhaupt durchgeführt werden kann, und die Kontrolle des Kathodenstrahloszillogrammes nach amerikanischer Praxis noch am meisten Erfolg zu haben. Deswegen soll auf diese zwei Methoden etwas näher eingegangen werden.

1. Gas- und Rauchbildung

Beldi hat in einem speziellen Versuch an einzelnen Spulen eines 2000-kVA-Transformators die Auswirkung eines Durchschlages unmittelbar nach der Stossprüfung untersucht. Durch möglichst einfache, übersichtliche Versuche sollte aus dem Stossversuch an Transformatorenspulen festgestellt werden, ob Gasblasen mit genügender Sicherheit als Indikator für entstehende Stossdefekte angesehen werden können. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Prüflinge unter Transformatoröl mit Stoßspannung durchgeschlagen «bei Strömen, wie sie durchaus bei Durchschlägen zwischen Spulen bei der Stoßspannungsprüfung von Transformatoren auftreten können».

Bei solchen Versuchen tritt die Frage auf: Wie gross ist die Energie, die bei einem Windungs- oder Spulendurchschlag im entstehenden Lichtbogen vernichtet wird? Diese Frage ist nicht leicht zu beantworten, und auch Messungen bereiten erhebliche Schwierigkeiten. Von der Beantwortung dieser Frage hängt aber die Beurteilung der Fehlerfeststellung ab; denn diese ist um so sicherer, je grösser die Gasblasen sind, d. h. je grösser die Energie ist, die beim Durchschlag vernichtet wird. Sind die Gasblasen klein, so können sie nicht nur schlecht beobachtet werden, sondern es besteht zudem die Möglichkeit, dass sich die Gasblase in der Wicklung verfängt und nicht oder sehr spät an die Oberfläche gelangt.

Bei Untersuchungen der Gasbildung bei Stoßspannungsdurchschlägen in Wicklungen unter Öl sind wir zur folgenden Anschauung gekommen: Der zeitliche Verlauf der Windungs- oder Spulenspannung bei der Anwendung einer genormten oder einer ähnlichen Stoßspannung entspricht, wie aus zahlreichen Messungen hervorgeht, einem Spannungsstoss mit einer Frontdauer von $0,5...1 \mu s$ und einem sehr kurzen Rücken von $5...10 \mu s$. Nach dieser Zeit geht die rasch abfallende Spannung durch Null und nimmt nachher nur noch kleine Werte an, wobei sie noch mehrmals durch Null gehen kann. Der Durchschlagslichtbogen, der beim höchsten Wert dieser Spannung entsteht, kann nun beim Nulldurchgang des Stromes löschen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass trotz der kleinen Spannung an der Ueberschlagsstelle der Stoßstrom durch die Fehlerstelle fliesst. Hingegen geht aus den Untersuchungen vieler Forscher hervor, dass die betriebsfrequente Spannung nur in sehr seltenen Ausnahmen fähig ist, durch die Stoßdurchschlagstelle einen Strom aufrecht zu erhalten.

Im ersten Falle kann die Energie, die beim Durchschlag zwischen Windungen oder Spulen zur Verfügung steht, abgeschätzt werden; denn es ist

die elektrostatische Energie der Windungs- bzw. Spulenkapazität. Man muss sich also vorstellen, dass sich diese Kapazität in Form einer hochfrequenten Stromschwingung innerhalb weniger Mikrosekunden entlädt, worauf der Funke erlischt. Die im Funken vernichtete Energie wird somit

$$W = \frac{1}{2} C (U_1^2 - U_2^2) \quad (1)$$

wo C die Kapazität der Windung oder Spule, U_1 die Zündspannung und U_2 die Löschspannung bedeuten.

Zur Bestimmung der Gasmenge aus dem Energieverbrauch sind u. a. die Messungen von *Bauer* [4] bekannt. Danach ist die entstehende Oelgasmenge nur abhängig von der Energie im Lichtbogen, und zwar erhält man eine Gasmenge von ungefähr 60 mm^3 pro Joule. Um diese Zahl für unsere Verhältnisse zu kontrollieren, wurde eine Meßschaltung angewandt, die einer Kondensatorentladung wie im Falle eines Durchschlages zwischen Spulen entspricht. Bei diesen Versuchen wurde folgendes festgestellt:

- a) Die Löschspannung ist bei einem Oeldurchschlag im Verhältnis zur Zündspannung sehr klein.
- b) Zwischen blanken Elektroden beträgt die erzeugte Gasmenge rund $0,6...1 \text{ mm}^3/\text{Joule}$ und ist durchsichtig wie Luft.
- c) Die erzeugte Gasmenge bei einem Stossdurchschlag durch festes Material (Papier) beträgt rund $10...20 \text{ mm}^3/\text{Joule}$ und ist bei den in Frage kommenden Energien ebenfalls durchsichtig wie Luft.

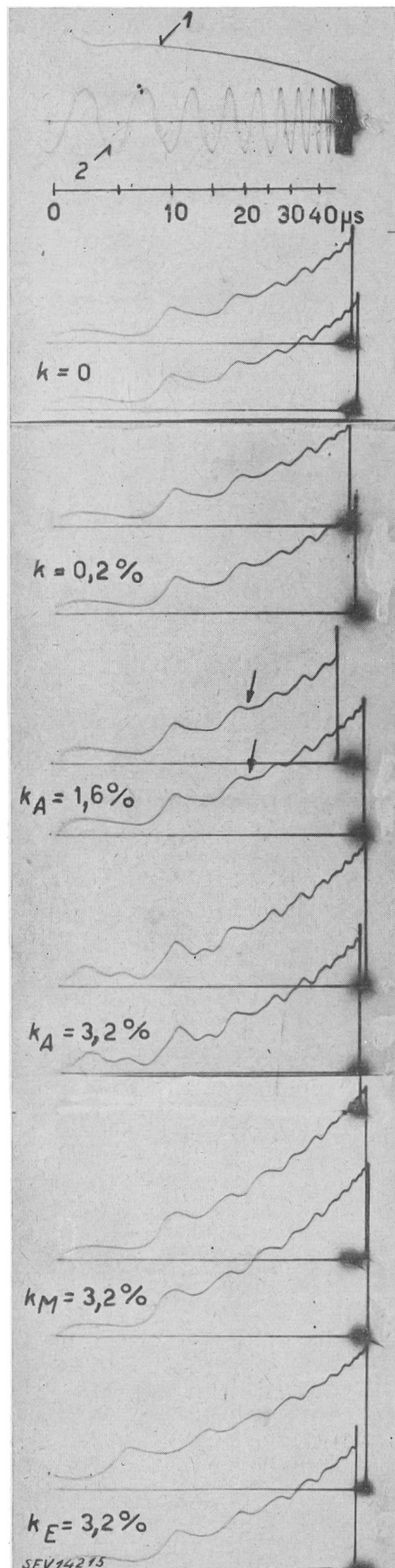
Die erzeugte Gasmenge pro Joule ist also bei einem Stossdurchschlag zwischen blanken Elektroden sehr viel kleiner, als von *Bauer* in einem Lichtbogen grösseren Ausmasses und sehr viel längerer Dauer festgestellt wurde. Dieser Unterschied ist verständlich, da bei einem Stossdurchschlag bei den kleinen entstehenden Gasmengen ganz andere Verhältnisse vorherrschen.

Wir haben die entstehende Gasmenge für diesen Fall für den 2000-kVA-Transformator, den *Beldi* geprüft hat, berechnet und festgestellt, dass bei einem Durchschlag zwischen Eingangsspulen etwa 50 mm^3 und bei einem Durchschlag zwischen Eingangswindungen etwa 5 mm^3 Gas frei werden. Die Gasmenge von 50 mm^3 lässt sich noch sehr gut beobachten, diejenige von 5 mm^3 liegt jedoch an der Grenze der Erkennbarkeit. Solche kleine Gasblasen steigen, besonders im kalten Öl, ziemlich langsam hoch und können leicht in der Wicklung stecken bleiben. Da man nach amerikanischen Vorschriften nur 3 Stöße auf die Wicklung gibt, ist es unwahrscheinlich, dass sich ein Windungsdurchschlag an diesem Transformator, falls er rasch löscht, durch Gasblasen erkennen lässt.

Die im zweiten Fall entstehende Gasmenge, wo der Funke nicht sofort löscht, sondern vom Stoßstrom unterhalten wird, lässt sich schwieriger abschätzen. Nach den Messungen von *Beldi* ist aber auch in diesem Falle die Gasmenge klein. Handelt es sich um Transformatoren kleinerer Leistung, bei denen sowohl die Windungs-, bzw. Spulenkapazität, als auch der Stoßstrom klein sind, so erhält man Verhältnisse, wo die Oelgasmenge bei einem Stoss-

durchschlag so klein ist, dass sie sich nicht mehr mit Bestimmtheit erkennen lässt.

Die Fehlerindizierung durch die Gasbeobachtung



ist also sehr unsicher, besonders bei kleinen Transformatoren, und man muss sich ganz der Meinung von *Beldi* anschließen, dass sie nicht geeignet ist, die Einführung der Stoßspannungsprüfung zu stützen.

2. Kontrolle mit dem Kathodenstrahloszillographen

In der Arbeit von *Hagenguth* [2] wird die amerikanische Praxis der Fehlerfeststellung durch die Kontrolle der mit dem Kathodenstrahloszillographen aufgenommenen Stoßspannung einer eingehenden Prüfung unterzogen und nachgewiesen, dass diese Methode nur für grössere Windungsschlüsse bei geeigneter Schaltung Erfolg verspricht. *Hagenguth* gibt nun eine neue Schaltung an. Bei der Stossprüfung einer Wicklung wird deren nicht gestossenes Ende über einen kleinen Widerstand geerdet und der Stoßstrom in diesem Shunt mit dem Kathodenstrahloszillographen gemessen. Tritt nun ein Windungsschluss in der Wicklung auf, so ändert sich die gemessene Form des Stromes gegenüber dem Oszillogramm ohne Windungsschluss, das bei einer kleineren Spannung aufgenommen wird. Diese Methode hat sich als sehr empfindlich erwiesen. So gibt *Hagenguth* an, dass noch ein Windungsschluss in einer Wicklung von total 1350 Windungen festgestellt werden kann.

Wir haben diese Methode bei der Stossprüfung von Transformatoren und Maschinen untersucht, wobei sich folgende Messresultate ergaben:

Fig. 1 enthält die Stromoskillogramme bei der Stossprüfung einer Wicklung eines Transformators für 6000 kVA und 45 kV. Die angewandte Stoßspannung hatte eine Steilheit von 45 kV/μs. Bei den Versuchen zeigte sich, dass das Oszillogramm bei einem Windungsdurchschlag oder Oeldurchschlag genau gleich aussieht wie bei einem metallischen Windungsschluss. Es wurden für sechs verschiedene, in die Wicklung angebrachte Windungsschlüsse immer zwei Oszillogramme aufgenommen. Der Vergleich dieser Oszillogramme zeigt die Präzision der Messung; denn man erkennt, dass die Oszillogramme bei gleichem Wicklungszustand bis in die kleinsten Details gleich sind. Das oberste Oszillogramm gibt die Stoßspannung mit der Zeiteichung wider. Die erste Gruppe stellt zwei Stromoskillogramme ohne Windungsschluss dar. Die zweite Gruppe, bei der ein Windungsschluss von 0,2 % der Wicklung bestand, lässt noch keine Aenderung erkennen. Bei der dritten Gruppe mit einem Windungsschluss von 1,6 % der Wicklung zeigt sich eine sehr schwache Veränderung. Die Stelle ist mit einem Pfeil bezeichnet.

Fig. 1

Stromoskillogramme von Stoßspannungsprüfungen an einem Transformator bei künstlichen Windungsschlüssen

Oben: 1 Oszillogramm der Stoßspannung mit einer Steilheit von 45 kV/μs.
2 Zeiteichungskurve mit Zeitskala.

Darunter: Gruppen von je zwei Stromoskillogrammen für den gleichen Wicklungszustand. k Prozentzahl der kurzgeschlossenen Windungen. Die Indices A , M und E geben an, ob der Windungsschluss am Anfang, in der Mitte oder am Ende der Wicklung liegt.

net. Sehr deutlich wird die Aenderung in der vierten Gruppe, wo ein Ueberschlag über 3,2 % der Windungen am Anfang der Wicklung auftrat. Dieselbe deutliche Feststellung erhält man, wenn der Windungsschluss in der Mitte oder am Ende der Wicklung liegt.

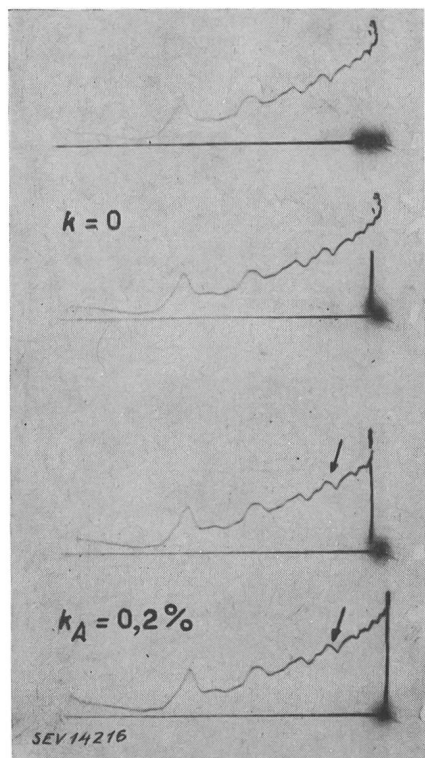


Fig. 2

Stromoszillogramme von Stoßspannungsprüfungen bei erhöhter Steilheit der Stoßspannung auf 150 kV/ μ s

Oben: Oszillogrammpaar, wenn keine Windungen kurzgeschlossen wurden ($k = 0$).

Darunter: Oszillogrammpaar, wenn 0,2 % der Windungen am Anfang der Wicklung kurzgeschlossen sind ($k = 0,2 \%$).

Während man bei dieser Messreihe noch zweifeln konnte, ob die Methode von Hagenguth einen Windungsschluss von 1,6 % noch anzuzeigen vermag, so bringen die Messungen nach Fig. 2 den Nachweis, dass bei einer nun dreimal steileren Stoßspannung von 150 kV/ μ s sogar ein Windungsschluss von 0,2 % der Wicklung festgestellt werden kann²⁾. Im vorliegenden Fall war eine einzige Windung der ganzen Transformatorenwicklung kurzgeschlossen. Bei den Messungen, die Fig. 3 wiedergibt, wurde an der gleichen Wicklung die Stoßspannung, mit 100 kV beginnend, mit jeder Aufnahme um rund 10 % gesteigert. Durch die Steigerung der Stoßspannung wird die Form des Stromoszillogramms nicht verändert, sondern nur dessen Höhe proportional vergrößert. Man erkennt nun sehr gut, dass bis zu einer Spannung von rund 200 kV die Form des Oszillogramms gleich bleibt. Bei dieser Spannung macht sich ein Ueberschlag über mehrere Spulen durch eine grosse Aenderung im Oszillogramm bemerkbar.

²⁾ Es sei noch bemerkt, dass im Original die Unterschiede wesentlich besser zu erkennen sind, als bei dieser verkleinerten Wiedergabe.

Die folgenden Oszillogramme wurden an einem Dreiphasentransformator für 100 kVA und 16 kV aufgenommen. Die Stoßspannung wurde von 35 kV bis 140 kV in Stufen von rund 10 % gesteigert. Fig. 4 zeigt einige Stromoszillogramme aus der Versuchsreihe der Phase V. Durch Pfeile ist angedeutet, dass bei 90 kV die erste Entladung zu erkennen ist. Bei diesem kleinen Wischer handelt es sich um eine kleine Entladung gegen Erde. Bei 125 kV tritt neben diesem Wischer das erste Anzeichen eines Windungsschlusses auf, der in den folgenden Oszillogrammen sehr deutlich festzustellen ist. Bei 150 kV erfolgte der Ueberschlag gegen Eisen.

In Fig. 5 sind die entsprechenden Messungen an der Phase U dargestellt. In dieser Phase tritt das Anzeichen eines Windungsschlusses schon bei 60 kV auf. Diese Windung hatte offensichtlich eine schwache Stelle. Der Zusammenbruch erfolgte wieder bei 146 kV.

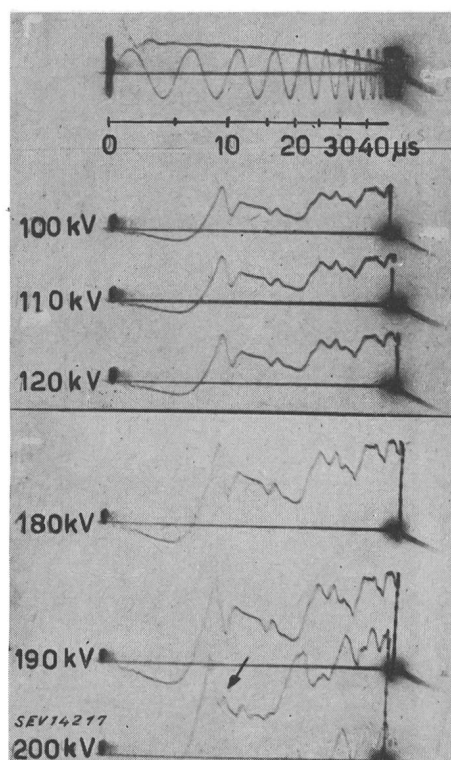


Fig. 3

Stromoszillogramm von Stoßspannungsprüfungen mit verschiedenen Stoßspannungs-Scheitelwerten

Oben: Oszillogramm der Stoßspannung (Steilheit 150 kV/ μ s). Zeiteichungskurve der Zeitskala.

Darunter: Stromoszillogramm mit zugehörigen Angaben der Stoßspannungs-Scheitelwerte. Bei 200 kV Scheitelwert tritt ein Windungsüberschlag auf.

Für die Fehlererkennung nach der Hagenguthschen Methode haben wir noch eine andere Darstellung angewandt. Diese besteht darin, dass man irgend einen Ordinatenwert der gleichen Zeit des Stromoszillogramms in Funktion der Stoßspannung aufträgt. Dies wurde in Fig. 6 für die Phasen V und W und in Fig. 7 für die Phase U gemacht. Man erkennt sehr gut das Auftreten eines Windungsschlusses durch einen Sprung oder Knick im linearen

ren Verlauf der Ordinatenwerte. Der Vergleich mit dem Stromoszillogramm zeigt, dass der Sprung immer mit einer Änderung der Form des Oszillogrammes zusammenfällt. Die Höhe des Sprunges ist ein Mass für den Prozentwert des Windungsschlusses.

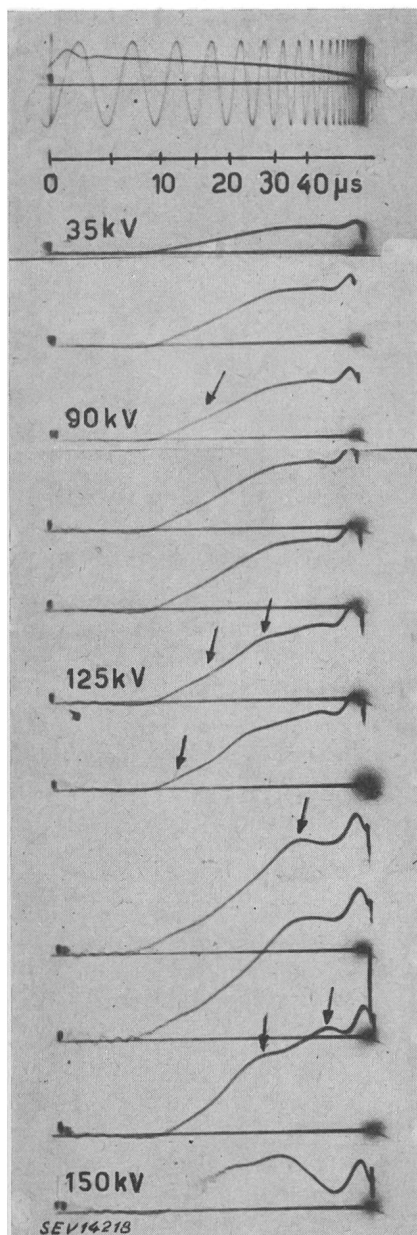


Fig. 4
Stromoszillogramme der Stoßspannungsprüfung an der Phase V eines Dreiphasentransformators
Transformatorleistung 100 kVA, Primärspannung 16 kV, Sekundärspannung 380/220 V.

Oben:
Oszillogramm der Stoßspannung
Steilheit 150 kV/μs, Zeit-
eichungskurve und Zeitskala.

Darunter:
Stromoszillogramme mit zugehörigen Angaben der Stoßspannungs-Scheitelwerte.

Zum Schluss seien noch zwei Messungen an einem Induktionsregler in Oel wiedergegeben. Um die Methode von Hagenguth zu untersuchen, wurde sowohl im Stator, als auch im Rotor in der Phase W ein künstlicher Windungsschluss angebracht. Fig. 8a zeigt das Stromoszillogramm mit und ohne Windungsschluss im Stator. Da der Stator wenig Windungen enthält, kommt der Windungsschluss sehr deutlich zur Geltung. Auch bei der Messung im Rotor lässt sich ein Windungsschluss über 6,7 % (aus praktischen Gründen wurde eine Lage, d. h. 8 Windungen, kurzgeschlossen) sehr gut erkennen.

Auf Grund dieser Untersuchung darf man annehmen, dass die Hagenguthsche Methode einen wesentlichen Fortschritt darstellt in der Fehler-

indizierung bei der Stoßspannungsprüfung der Transformatoren. Natürlich bedarf es noch zahlrei-

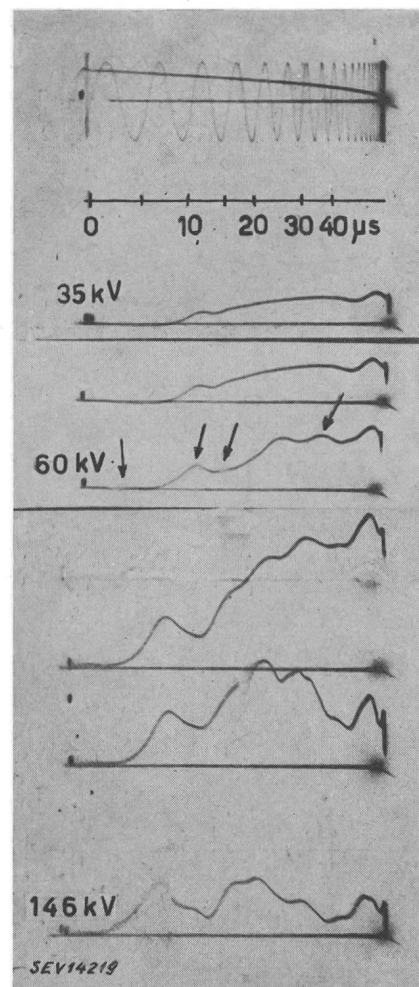


Fig. 5
Oszillogramme der Stoßspannungsprüfung an der Phase U des Dreiphasentransformators
(Erläuterungen siehe Legende Fig. 4.)

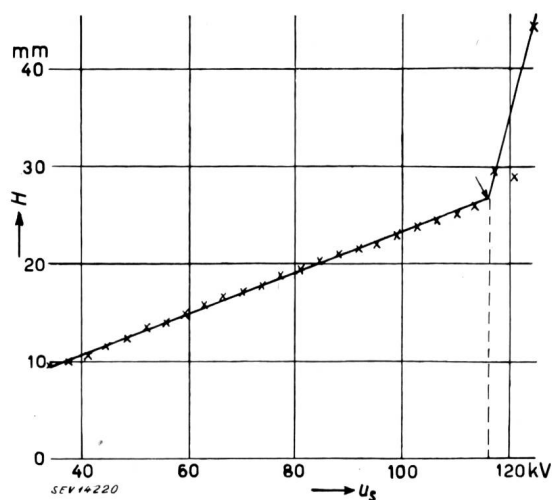


Fig. 6
Graphische Methode zur Fehlerermittlung
Auswertung der Oszillogramme für die Phasen V und W des Dreiphasentransformators (siehe Fig. 4).
 u_s , Stoßspannungs-Scheitelwerte der einzelnen Oszillogrammaufnahmen; H Ordinatenwerte der entsprechenden Stromoszillogramme (ausgemessen in mm) für den Zeitpunkt von 40 μs (nach der Zeitskala).
Ergebnis: Beide Wicklungen weisen keinen frühzeitigen Durchschlag auf.

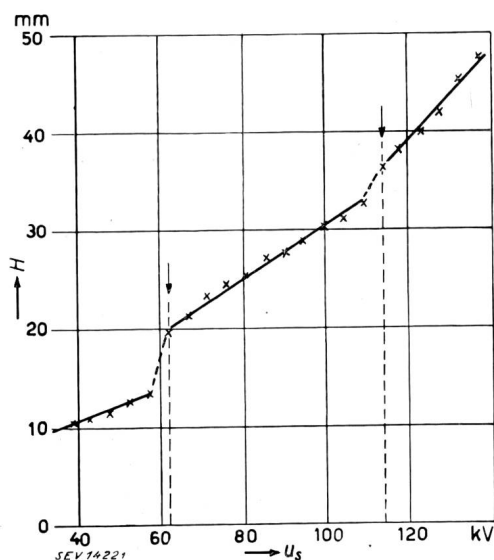


Fig. 7

Graphische Methode zur Fehlerermittlung
Auswertung der Oszillogramme der Phase U des Dreiphasen-
transformators (siehe Fig. 5).

(Erläuterungen siehe Legende Fig. 6.)

Ergebnis: Bei rund 62 kV Scheitelwert tritt ein Windungs-
überschlag über einen grösseren Prozentwert, bei 120 kV
über einen kleineren Prozentwert der Wicklung auf.

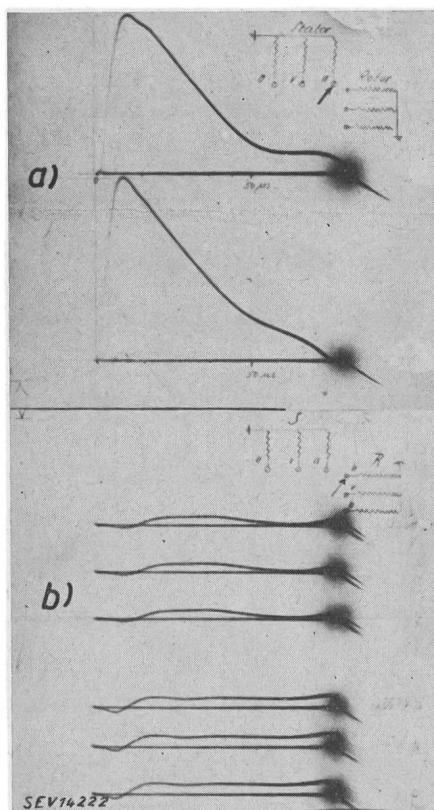


Fig. 8

**Stromoszillogramm der Stoßspannungsprüfung an einem
Induktionsregler**

- a) Messung an der Statorphase W (siehe Wicklungsdiagramm mit Pfeilangabe).
Oben: Ohne Windungsschluss; Unten: Mit Windungsschluss über 8,3 % der Windungszahl.
b) Messung an der Rotorphase W (siehe Wicklungsdiagramm mit Pfeilangabe).
Oben: Oszillogrammgruppe ohne Windungsschluss; Unten: Oszillogrammgruppe mit Windungsschluss über 6,7 % der Windungszahl.

cher Versuche an vielen Objekten, bis sich diese Methode in der Hand des Ingenieurs zu einem zuverlässigen Instrument bei der Stoßspannungsprüfung von Wicklungen entwickeln wird.

3. Fehlerlokalisierung

Beldi hat bei seiner Untersuchung die Transformatorwicklungen zur Lokalisierung des Fehlers aufgewickelt und genau untersucht und damit die zuverlässigste Methode angewandt. Natürlich kann man bei neuen Transformatoren nicht so vorgehen. Er lehnt mit Recht den Vorschlag ab, nach der Stoßspannungsprüfung die Wicklung durch eine neue zu ersetzen. Damit würde ein wichtiger Zweck der Stoßspannungsprobe, fehlerhafte Wicklungen auszuschneiden, nicht erreicht.

Aus den Messungen der Fig. 1 geht hervor, dass das Stromoszillogramm verschieden aussieht, je nachdem der Fehler am Anfang, in der Mitte oder in der Nähe des geerdeten Endes der Wicklung entsteht. Bei genügender Erfahrung mit dieser Methode wird es vielleicht gelingen, aus der Form des Oszillogrammes auf den Ort des Fehlers zu schliessen. Hagenguth erwähnt noch folgende Möglichkeit der Fehlerfeststellung. Nach der Stossprüfung mit den zugehörigen Aufnahmen wird die Wicklung mit kleinerer Spannung gestossen (vielleicht in Luft), und, indem man künstliche Windungsschlüsse anbringt, kann man nun die erhaltenen Stromoszillogramme mit den ursprünglichen Messungen vergleichen und so den Fehler lokalisieren.

Die Methode von Hagenguth gibt aber auch an, ob es sich um einen rasch löschenden Durchschlag oder um einen solchen handelt, der vom Stoßstrom durchflossen wird. Auf diesen Unterschied wurde schon bei der Besprechung der entstehenden Gasmenge hingewiesen. Im ersten Fall wird sich nämlich nur eine relativ kleine Änderung im Stromoszillogramm zeigen. Im zweiten Fall wird sich die Impedanzänderung der Wicklung durch den während des vollen Stossablaufes vorhandenen Windungsschluss darin äussern, dass sich nicht nur die Form, sondern auch die Höhe des Oszillogrammes verändert, d. h. die Ordinate erhöht wird.

Literatur

- [1] Beldi, F.: Versuche mit Stoßspannung an Transformatoren. Bull. SEV Bd. 37 (1946), Nr. 26, S. 751...763.
- [2] Hagenguth, J. H.: Progress in impulse testing of transformers. Electr. Engng., Trans. Sect. Bd. 63 (1944), December-Supplement, S. 999...1005, u. S. 1444.
- [3] Stenkvist, E.: Impulse testing of transformers. CIGRE 1946, Rapport Nr. 130.
- [4] Bauer, B.: Die Untersuchungen an Oelschaltern (4. Bericht der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz). Bull. SEV Bd. 8 (1917), Nr. 9, S. 226...238, und Nr. 10, S. 273...299.

Adresse des Autors:

Dr. M. Wellauer, Ingenieur, Allenmoosstrasse 112, Zürich 11.

Bemerkungen dazu

Von F. Beldi, Baden

In bezug auf den Stand der Stossprüfung von Transformatoren kommt auch *Wellauer* erfreulicherweise zu den gleichen Schlussfolgerungen, die sich aus meinen veröffentlichten Untersuchungen ergeben. Die von ihm durchgeführten Versuche bestätigen die grössere Empfindlichkeit der Methode *Hagenguth* gegenüber den bisher bekannten Methoden. *Wellauer* hat den Schluss gezogen, dass es noch zahlreicher Versuche an vielen Objekten bedarf, bis die *Hagenguth'sche* Methode bei der Transformatoren-Stossprüfung herangezogen werden darf. Diese Schlussfolgerung — der ich voll beipflichten muss — ist wohl nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die sichere Interpretation der Stromoszillogramme am nicht gestossenen Ende der Wicklung einer sehr grossen Erfahrung und Geschicklichkeit bedarf.

Nachdem *Wellauer* die Methode *Hagenguth* erwähnt — die mir vorher nicht bekannt war — wird es den Leserkreis interessieren, über zwei weitere, bisher nicht veröffentlichte Methoden kurz orientiert zu werden. Die Untersuchungen wurden an Transformatoren von 24, 160, 350 und 1800 kVA Leistung bei *Brown Boveri* durchgeführt.

Erste Methode: Wie bereits in meinem Artikel erwähnt wurde, ist die stossmässige Wicklungsbeanspruchung von Schwingungen begleitet. Durch eine zweckmässige Einrichtung lassen sich nun Veränderungen im Schwingungsablauf bei einer Störung an einem Gerät kenntlich machen. So wurden bei-

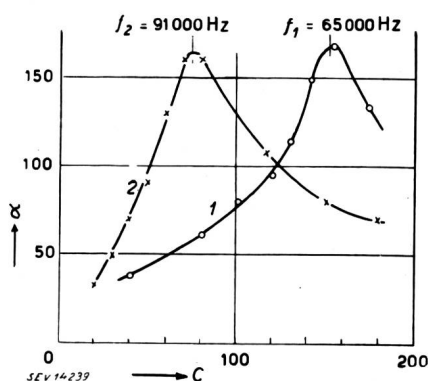


Fig. 1

Prüfung eines 8-kV-Transformators von 350 kVA
Resonanzkurven bei mit Stössen 0,5/50 angeregter Wicklung
1 ohne Störung an der Wicklung
2 mit Funkenentladung unter Öl, Entladung über 4,5 % der vollen Windungszahl
α Ausschlag am Instrument in Funktion der Kapazität C im Messkreis
f₁, f₂ Resonanzfrequenzen

spielsweise an einem Dreiphasen-Transformator von 350 kVA und 8000 V Oberspannung bei Beanspruchung mit Stösspannung bei ungestörter und gestörter Wicklung Resonanzkurven aufgenommen. Während der Beanspruchung mit Stoss 0,5/50 wurden zu diesem Zweck 4,5 % der gestossenen Windungen durch eine Funkenentladung unter Öl überbrückt. Die Frequenz der Schwingungen änderte sich damit, wie Fig. 1 zeigt, von 65 000 Hz ohne Funkenentladung auf 91 000 Hz mit Funkenentla-

dung. Wird das Anzeigergerät auf die Frequenz des ungestörten Transformators abgestimmt, so ist jede Störung leicht an einem passenden Zeigerinstrument festzustellen. Am erwähnten 24-kVA-Transformator haben sich, wie Fig. 2, Kurve 1, veranschaulicht, durch plötzliche Verkleinerung des Zeigerausschlages Entladungen zu erkennen gegeben. An einem Trans-

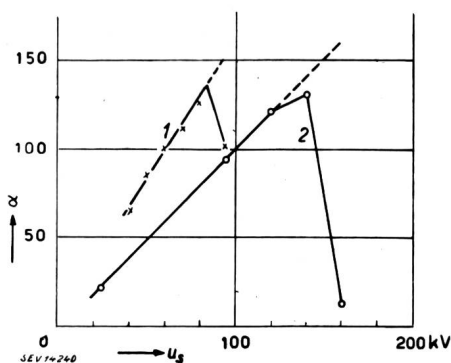


Fig. 2

Stossversuch mit der neu entwickelten Anzeigeeinrichtung für Wicklungsbeschädigungen

- 1 24-kVA-Transformator, 8 kV
2 1800-kVA-Transformator, 25 kV
α Ausschlag am Instrument in Funktion der Stösspannung u_s
--- erwarteter Ausschlag ohne Beschädigung

formator grösserer Leistung, Kurve 2, war der Einfluss einer Funkenentladung im Innern noch krasser, indem der Zeigerausschlag beim Eintritt der Störung auf ca. 7 % des Ausschlages ohne Störung zurückfiel. Dabei trat eine Entladung über 4 % der totalen Wicklungslänge auf. Schon bei 140 kV zeigt sich eine Störung, die jedoch durch die üblichen Anzeigemittel nicht entdeckt worden ist. Das fast gänzliche Verschwinden des Zeigerausschlages bei 160 kV war gleichzeitig von einer Blasenbildung begleitet.

Die Verkleinerung des Ausschlages am Instrument ist schon bei einer schwachen Entladung so eindeutig, dass die Methode Aussicht auf Verwendung als Indikator für Wicklungsdefekte bei der Stossprüfung hat.

Während bei dieser ersten Methode die Frequenzänderung als Mittel zur Störungsanzeige herangezogen wurde, werden bei der zweiten Methode die durch dielektrische Entladungen ausgelösten dynamischen Vorgänge auf elektrisch-akustischem Wege zur Anzeige gebracht. An dem bereits erwähnten 350-kVA-Transformator wurde die Eingangsspule mit einer Funkenstrecke überbrückt. Die Schlagweite dieser scharfkantigen Funkenstrecke war 0,1 mm. Bei der dem Transformator zugeführten Stösspannung von 80 kV traten die ersten Entladungen an der Funkenstrecke auf. Am Messinstrument konnte jeder mit Durchschlag behaftete Stoss eindeutig von solchen ohne Durchschlag unterschieden werden.

Wie die Untersuchungen nach der *Hagenguth'schen* Methode, so sind auch die vorgenannten Me-

thoden noch im Laboratoriumsstadium. Auch sie bedürfen, trotz des ersichtlichen Erfolges, noch der Erprobung an mehreren Objekten, bevor sie zur Stossprüfung an fertigen Transformatoren zugelassen werden dürfen. Wir werden auf diese Kontrollmethoden, die den Vorteil der Verwendung eines direkt zeigenden Messinstrumentes aufweisen, zu gegebener Zeit ausführlicher zurückkommen.

Seit meiner Veröffentlichung habe ich auch die Arbeit von *Strigel* zu Gesicht bekommen ¹⁾. Zu seinen Untersuchungen an Transformatoren hat *Strigel* u. a. die Feststellung gemacht, dass in manchen Fällen trotz deutlicher Fehleranzeige in den Kathodenstrahl-Spannungsszillogrammen keine Scha-

¹⁾ *Strigel, R.*: Ueber Grundfragen der Stoßspannungstechnik. Elektrotechn. u. Maschinenbau Bd. 63 (1946), Nr. 3/4, S. 66...76.

denstelle an der Wicklung gefunden wurde, dass aber auch trotz einwandfreier Szillogramme doch noch eine Fehlerstelle in der Wicklung aufgedeckt worden ist. Auch *Strigel* kommt zum Schluss, dass eine Stossprüfung fertig gestellter Transformatoren so lange zu unterlassen sei, als nicht ein eindeutiges Mittel gefunden wurde, das mit Sicherheit einen Schaden bei der Stossprüfung entdecken lässt.

Es ist sehr erfreulich, festzustellen, dass drei von einander unabhängige Forschungsstellen in bezug auf den Stand der Stossprüfung von Transformatoren zu praktisch gleichen Schlussfolgerungen kommen — nämlich, dass sich diese Prüfungen noch im Laboratoriumsstadium befinden.

Adresse des Autors:

F. Beldi, Ingenieur, Burghalde 7, Baden (AG).

Nachrichten- und Hochfrequenztechnik — Télécommunications et haute fréquence

Die heutige Technik der Rundspruchempfänger

Von T. Vellat, Ste-Croix

621.396.62

(Fortsetzung von Nr. 5, S. 131)

4. Nichtlineare Verzerrungen

Zum Kapitel «Qualität eines Empfängers» gehört auch die Betrachtung der nichtlinearen Verzerrungen, die im Gerät entstehen. Liegen im Verstärkungs kanal nichtlineare Glieder, so entstehen neue, in der Eingangsspannung nicht vorhandene Frequenzen. Legt man an den Eingang eines Verstärkers eine Frequenz ω_1 , so entstehen am Ausgang ausser dieser Frequenz mit der Amplitude a_1 noch die Obertöne $2\omega_1, 3\omega_1$ usw. mit den Amplituden a_2, a_3 usw. Als Mass für die Verzerrung gilt der Klirrfaktor, gegeben durch

$$K = \frac{\sqrt{a_2^2 + a_3^2 + \dots}}{a_1} \quad (10)$$

Es zeigte sich bald, dass der Klirrfaktor nicht ein Mass für die akustisch empfundenen Verzerrungen darstellt.

Bei reinen Sinustönen wird sich durch das Hinzutreten der Oberharmonischen das Klangbild wohl verändern, aber noch lange nicht vom Ohr als unangenehm empfunden werden. Bei 2 Frequenzen aber bilden sich durch die Nichtlinearitäten Kombinationstöne, die unharmonisch zu den Grundtönen liegen und daher physiologisch bei kleinsten Werten als

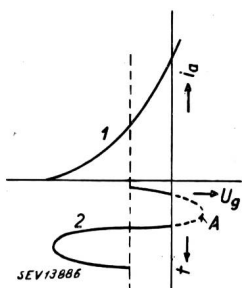


Fig. 13
Uebersteuerung des Eingangsgitters einer Verstärkerröhre
1 Kennlinie der Röhre. 2 an das Eingangsgitter der Röhre gelegte Wechselspannung. U_g Gitterspannung. i_a Anodenstrom. t Zeit. A abgeschnittener Teil der Wechselspannung

äusserst unangenehm empfunden werden. Besonders störend sind z. B. Uebersteuerungen von Verstärkern, in denen die Gitterwechselspannung so gross wird, dass Gitterstrom fliesst (Fig. 13 und 14). Die Kuppe A der Wechselspannung wird dadurch abgeschnitten. Klirrfaktormässig würden diese stark empfundenen Verzerrungen gar nicht zum Ausdruck kommen, wie eine Rechnung leicht beweist. Ein besseres Mass stellt der Modulationsfaktor dar. Man definiert ihn als

$m_f = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}}$. Dabei sind $S_{\max}$ und $S_{\min}$ die grösste bzw. kleinste Steilheit des Teiles der gekrümmten Charakteristik, den die Wechselspannung bestreicht.

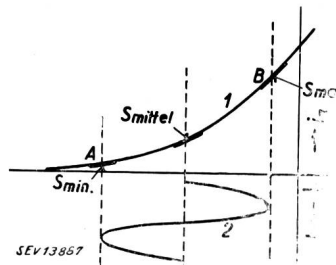


Fig. 14
Darstellung zur Definition des Modulationsfaktors
1 Röhrenkennlinie. 2 an das Eingangsgitter der Röhre gelegte Wechselspannung. U_g Gitterspannung. i_a Anodenstrom. A Arbeitspunkt mit der Steilheit $S_{\min}$. B Arbeitspunkt mit der Steilheit $S_{\max}$. t Zeit

Im Hochfrequenzteil des Empfängers können Verzerrungen vor allem in den Röhren entstehen. Dabei sind nur die Modulationsverzerrungen von Interesse. Denn die Harmonischen des Trägers werden sowieso durch die folgenden Siebmittel unterdrückt. Auf ähnliche Weise wie für die Kreuz-

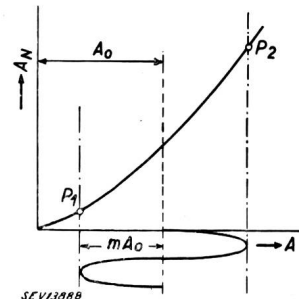


Fig. 15
Verzerrungen im Hochfrequenzteil
A Amplitude der Gitterwechselspannung
 A_N Proportionalitätsfaktor der nach Gleichrichtung entstehenden Nutzspannung.
 m Modulationsgrad
 A_0 maximal zulässige Gitterwechselspannungsamplitude

modulation findet man (Fig. 15), wenn $\mathfrak{F}_{a1}$ die Amplitude des Anodenwechselstromes, A die Amplitude der Gitterwechselspannung, m den Modulationsgrad bedeuten:

$$\mathfrak{F}_{a1} = \left[f'(U_{g0}) + \frac{1}{8} f'''(U_{g0}) A^2 + \dots \right] A \quad (11)$$

Nach der Gleichrichtung entsteht die Nutzspannung proportional