

Messungen über die Spannungsverteilung auf Transformatorwicklungen unter dem Einfluß von Sprungwellen.

Von

W. Reiche, Dresden.

Vorbemerkung.

Die nachstehend im Auszug veröffentlichten Untersuchungen sind in den Jahren 1922/24 im Institut für Elektromaschinenbau der Technischen Hochschule Dresden durchgeführt worden. Der Verfasser ist Herrn Prof. Dr.-Ing. Binder für die Anregung zu dieser Arbeit und vielfache gütige Förderung, sowie der Firma Koch & Sterzel A.G. in Dresden und der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft für tatkräftige Unterstützung zu tiefem Danke verpflichtet.

Stoffeinteilung.

Einleitung.

Einführender Teil. Betrachtungen über das Verhalten von Wicklungen gegenüber Sprungwellen.

- I. Bildung labiler Spannungsverteilungen auf der Wicklung
 - a) durch dielektrische Verschiebungsströme quer zur Windungsrichtung:
 1. auf der einlagigen Spule,
 2. auf der mehrlagigen homogenen Spule,
 3. auf Scheibenwicklungen;
 - b) durch Wanderung der Welle längs des Drahtes.
- II. Ausgleich der labilen Spannungsverteilungen.

Hauptteil. Messungen über die Spannungsverteilung auf Transformatorwicklungen unter dem Einfluß von Sprungwellen.

- I. Erläuterung der Versuchsgrundlagen.
 - a) Kritik der Versuchsanordnung.
 - b) Beschreibung der benutzten Apparate und des Meßverfahrens.
- II. Schilderung der Messungen
 - a) an der Gesamtwicklung:
 1. Zylinderwicklung,
 2. Scheibenwicklung;
 - b) an einzelnen Spulen:
 1. normale scheibenförmige zweiteilige Runddrahtspulen,
 - a) ungeschützt,
 - β) durch Isolationsverstärkung geschützt
 - γ) durch Ringscheiben geschützt;
 2. flachgewickelte Bandspulen,
 3. hochkant gewickelte Bandspulen.

Zusammenfassung.

Einleitung.

Im normalen Betriebszustand einer Wechselstromanlage, der gekennzeichnet wird durch konstanten Effektivwert und regelmäßige Pulsationen der Netzspannung, geht innerhalb der Wicklung eines an das Netz angeschlossenen Transformators das jeweilige Potential der einen Klemme nahezu linear auf das Potential der anderen Klemme über. Dabei wird zwischen aufeinander folgenden Windungen eine Spannung in der Größenordnung einiger weniger Volt erzeugt. Jede Störung des stationären Zustandes bewirkt aber in der normalen Verteilung der Spannung auf der Wicklung so weitgehende und vielfach so gefährliche Änderungen, daß die Durchforschung dieses Sondergebietes der Hochspannungstechnik von jeher ein bedeutendes wissenschaftliches und praktisches Interesse beansprucht hat.

Die hierüber veröffentlichten Arbeiten beschäftigen sich vorwiegend mit der theoretischen Behandlung des Problems und bringen die mathematische Formulierung

des Verlaufs von Rechteckwellen und von Hochfrequenzschwingungen in einfachen Spulen oder Ersatzbildern der Wicklung. Soweit experimentelle Untersuchungen an Transformatorwicklungen vorliegen, schildern sie die von Spule zu Spule gemessene Spannungsverteilung, wie sie auf der Gesamtwicklung unter dem Einfluß von Sprungwellen und Hochfrequenzschwingungen entsteht; sie berücksichtigen Unterschiede im Wesen der auftretenden Wellen und veranschaulichen die Wirkung vorgeschalteter Schutzapparate.

Der Verfasser nachstehender Arbeit vorzugsweise experimentellen Charakters hat seine Messungen beschränkt auf die Folgeerscheinungen gleichbleibender steiler Sprungwellen. Er hat andererseits seine Untersuchungen ausgedehnt auf verschiedene Arten verwickelter Spulenanordnungen des praktischen Transformatorenbaues und ist insbesondere bemüht gewesen, den Spannungsverlauf von Windung zu Windung und selbst einzelne Windungsspannungen zu beobachten.

In Erfüllung dieses Programmes enthalten die folgenden Darlegungen als Hauptteil die Beschreibung und Deutung der an ganzen Wicklungen und einzelnen Spulen unter der Einwirkung von Sprungwellen gemessenen Spannungsverteilungen nebst Schilderung und Kritik der Versuchsanordnung. Ein vorangehender Überblick über Methoden und Ergebnisse der theoretischen Behandlung des vorliegenden Problems dient dem erleichterten Verständnis der Versuchsergebnisse.

Einführender Teil. Betrachtungen über das Verhalten von Wicklungen gegenüber Sprungwellen.

1. Bildung labiler Spannungsverteilungen auf der Wicklung.

Jede Theorie über Sprungwellenerscheinungen in Wicklungen beginnt mit dem Auftreten der Welle auf der ersten Windung, wobei zur vorläufigen Vereinfachung des Verfahrens angenommen wird, daß die als unendlich steil gedachte Welle in voller Höhe in die Wicklung einzieht. Befaßt sich die Untersuchung mit der einlagigen Spule als der einfachsten Gestalt einer Wicklung, so wird zweckmäßig von einem Ersatzbild ausgegangen, einem Kettenleiter, dessen Glieder die Eigenschaften der einzelnen Windung verkörpern¹⁾. Diese besitze einen Elementaranteil L an der Gesamtinduktivität der Wicklung, sowie Kapazität C gegen die Nachbarwindungen und Kapazität c gegen Erde, wie es unter Voraussetzung der Gleichartigkeit aller Konstanten längs der ganzen Wicklung gezeigt wird durch Bild 1. Solange die Welle noch auf der ersten Windung verweilt, erscheint ihr gegenüber die übrige Wicklung wie eine Kette von Kondensatoren, auf der sich unter dem Einfluß der Spannung E zwischen Anfang und Ende durch dielektrische Verschiebung eine Spannungsverteilung herausbildet, die gegeben ist durch das bekannte Gesetz²⁾

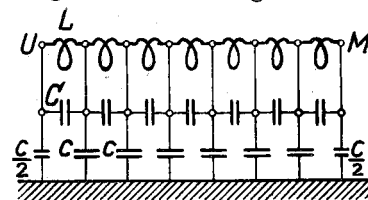


Bild 1. Ersatzbild der einlagigen Spule.

$$p_x = E \left(1 - \frac{\sin k \cdot (l - x)}{\sin k \cdot l} \right) \quad \text{für } k = \sqrt{\frac{c}{C}} \quad (1)$$

wenn l die Länge der Kette und p_x die Spannung irgendeines Gliedes x gegen den Anfang U bedeuten.

Dieses Gesetz ist für eine zehngliedrige Kette und für mehrere einfache Kapazitätsverhältnisse in Bild 2 durch die ausgezogenen Kurven dargestellt, während die gestrichelten Kurven die Größe der Gliedspannungen wiedergeben.

¹⁾ K. W. Wagner, EuM 1915, S. 89.

²⁾ Rüdenberg, ETZ 1914, S. 412 — K. W. Wagner, EuM 1915, S. 89.

Für die Untersuchung des Verhaltens mehrlagiger Spulen wird gern eine andere Art der Betrachtung herangezogen, nämlich Auffassung der Wicklung als Mehrfachleitersystem¹⁾. Hier erstreckt sich im ersten Augenblick das elektrische Feld, das die eindringende Welle begleitet, von der ersten Windung wie von einer Leitung aus in den Raum und durchsetzt die Spule bis zum geerdeten Eisenkern, auf den sie aufgebracht ist. Bild 3 gibt einen schematischen Querschnitt der einen Spulenhälfte und zeigt den Verlauf des elektrischen Feldes²⁾, überdies sind Niveaulinien zur Kennzeichnung der jeweiligen Feldstärke eingetragen worden. Allerdings wurde bei dieser Darstellung die Brechung der Feldlinien bei ihrem Übergang von Luft in das Dielektrikum der Spule nicht berücksichtigt, auch hätte selbst dann dieses Bild, strenggenommen, nur abgeschlossenen, nicht aber erst in der Entwicklung begriffenen Vorgängen entsprochen. Es läßt sich aber doch so viel daraus entnehmen, daß für die Größe der auf statischen Ladungen beruhenden Spannung zwischen a

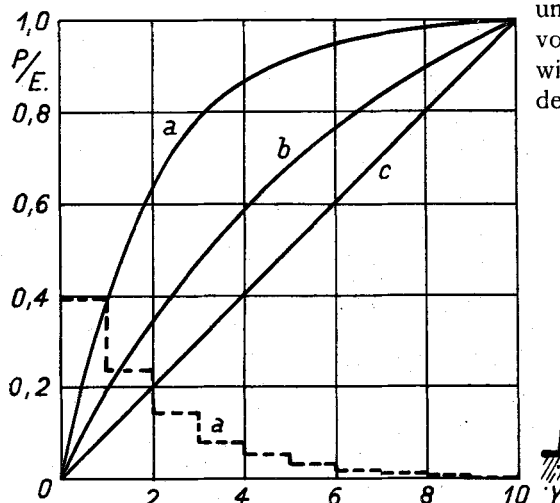


Bild 2. Spannungen gegen Anfang und Gliedspannungen auf einer rogliedrigen Kondensatorenkette. a-Kurven: $k = 0,5$, b-Kurven: $k = 0,2$, c-Kurven: $k = 0,02$.

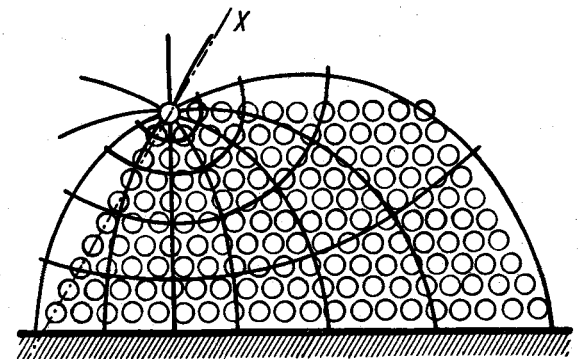


Bild 3. Schematischer Querschnitt durch eine mehrlagige Wicklung.

Auch auf der mehrlagigen Spule ist im ersten Augenblick der Spannungsverlauf längs einer Windungsreihe abhängig von dem Grad der kapazitiven Verkettung der Einzelglieder, insofern zum Beispiel erhebliches Überwiegen der Windungskapazität gegenüber der Erdkapazität jeder Windung eine weitgehende Vergleichmäßigung des statischen Feldes bedingt. Die Größe der elektrischen Feldstärke etwa längs der strichpunktiierten Linie x—y von Bild 3 wird in Bild 4 durch die Kurve e bekannter Gestalt veranschaulicht. Ihr entspricht die Kurve der Windungsspannungen auf dieser Strecke, während sich durch Summierung der einzelnen Windungsspannungen die Spannungen gegen den Anfang nach Kurve a ergeben.

In diese Darstellung allgemeinen Charakters bringt die im Transformatorenbau vielfach übliche Unterteilung der Wicklung in zweiteilige flache Scheibenspulen ein Moment der Unstetigkeit, weil die Wicklung den gesamten zu ihrer Verfügung stehenden Raum nicht gleichmäßig ausfüllt. Beispielsweise geschieht die Ausbildung der statischen Ladungen auf einer derart hergestellten Oberspannungswicklung (Bild 5) von der Eingangswindung a aus in jeder der Richtungen, die begrenzt werden durch die beiden über m und n und das Ende der Wicklung bis zum Joch

¹⁾ Rogowski, Arch. f. Elektrot. 1918, S. 265, 377; 1919, S. 17, 33, 161, 320.

²⁾ Binder, ETZ 1916, S. 600 (Diskussionsbemerkung).

und über b, c und k und die zylinderförmige Niederspannungswicklung zum Schenkelseisen verlaufenden Hauptspannungsreihen.

Diese beiden Hauptreihen zeigen in ihrer Gestaltung wesentliche Verschiedenheiten. Die eine von a über b, c und k führende umfaßt bis k eine Folge gleichmäßig aufeinander liegenden Windungen mit stetig sich ändernden Spannungen gegen Anfang. Ganz am Ende erst, nämlich von der Windung k zur Niederspannungswicklung und von dieser zum geerdeten Eisen, enthält sie zwei Glieder vergrößerten Abstandes, die sprunghaft hohe Potentialdifferenzen aufnehmen.

Anders die zweite Hauptreihe. Sie enthält in ihrer ganzen Länge Elemente wechselnden Abstandes, nämlich kleinen von Windung a zu m und großen von Windung m zu n usw. und bietet daher in ihrem Verlauf bis zum geerdeten Joch ein treppenartiges Bild.

Aus der Betrachtung beider Hauptreihen folgt schließlich die Spannungsverteilung auf der gesamten Wicklung. Und zwar möge über der Windungszahl als Abszisse die jeweilige Spannung gegen den Wicklungsanfang aufgetragen werden, wie es auch späterhin bei graphischer Darstellung der Meßwerte geschehen soll.

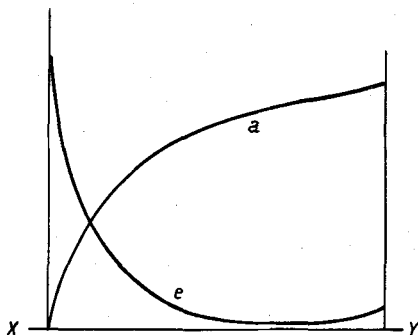


Bild 4. Spannungen gegen Anfang (a) und Gliedspannungen (e) auf einer mehrlagigen Spule längs Strecke x-y von Bild 3.

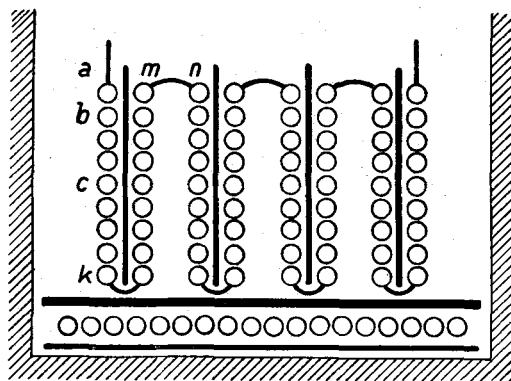


Bild 5. Schematischer Querschnitt durch eine Transformatorwicklung.

Dann zeigt die Kurve des ersten Spannungszustandes innerhalb der ersten Spule ein Anwachsen bis k (zunehmende Entfernung von a) und ein allmähliches Fallen bis m (abnehmende Entfernung von a); die Spannung von a bis m ist hierbei gleich der Spannung von a bis c, wenn sowohl m wie c auf der gleichen Niveaulinie liegen (Bild 6).

Diese Erscheinung gewissermaßen wellenförmiger Potentialverteilung kehrt auch innerhalb der folgenden Spulen wieder, nimmt aber an deutlicher Ausprägung ab, je gleichmäßiger das elektrische Feld der Eingangswindung tiefer im Innern der Wicklung verläuft.

Der Übergang von einer Spule zur anderen überbrückt auf der zweiten Hauptreihe ein Glied großen Abstandes mit seinem beträchtlichen Spannungssprung. Zwei unmittelbar aufeinander folgende Windungen, nämlich die letzte Windung der ersten Spule und die Eingangswindung der zweiten Spule, versuchen also im ersten Augenblick des Auftreffens einer Sprungwelle auf die Wicklung wesentlich verschiedene Spannungen gegen den Wicklungsanfang anzunehmen. Dieser Unterschied in den Spannungen von m und n nach a muß allerdings schon im Entstehen zusammenbrechen, sind doch die beiden Windungen m und n direkt und widerstandsfrei miteinander verbunden. Der Wirklichkeit näher kommt daher die Spannungskurve, die (in Bild 6 strichpunktiert eingezeichnet) den Übergang von Spule zu Spule ohne

Sprung vollzieht. Die erhebliche Spannung zwischen erster und zweiter Spule und zwischen den folgenden wird hierdurch freilich nicht etwa aufgehoben, sondern nur auf die benachbarten letzten Windungen der ersten und Eingangswindungen der zweiten verteilt. Diese erhalten also jede eine um so höhere Windungsspannung, je größer der auszugleichende Spannungssprung ist. Die Windungsspannungen auf einer zweiteiligen flachen Scheibenspule zeigen daher einen mehr oder minder erheblichen Anstieg nach beiden Enden hin, wie es in Bild 7 verdeutlicht wird.

Die Entwicklung der angegebenen Potentialverteilung geschieht innerhalb des Dielektrikums Luft mit Lichtgeschwindigkeit, sonst aber mit einer Geschwindigkeit, die der Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante der Windungsisolation umgekehrt proportional ist. Diese Feststellung ist insofern von Bedeutung, als die einzelnen Vorgänge innerhalb einer Wicklung größtenteils miteinander verflochten sind; was letzten Endes dem Beobachter als meßbares Erscheinungsbild entgegentritt, kann nur aus den zeitlichen Beziehungen zwischen den Einzelvorgängen begriffen werden.

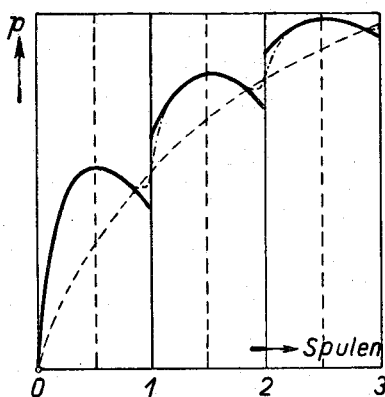


Bild 6. Spannungsverteilung auf Scheibenspulen.

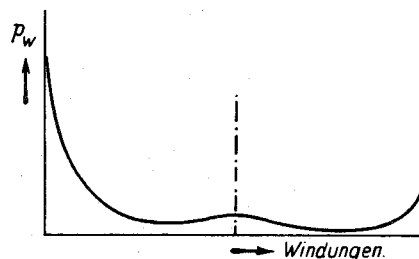


Bild 7. Windungsspannungen auf einer zweiteiligen Scheibenspule.

Die bisherigen Ausführungen über die Größe der Windungsspannungen bedürfen einer Korrektur, wenn auf das Vorhandensein einer beachtlichen Länge der Wellenstirn Rücksicht zu nehmen ist. Während nämlich unter solcher Voraussetzung die Spannung auf der ersten Windung nicht schlagartig, sondern allmählich, und zwar in der Zeit ansteigt, die von der Welle zum Durchlaufen der eigenen Stirnlänge benötigt wird, dringt die Stirn selbst immer schon in die Wicklung ein und setzt die Eingangswindungen unter Spannung. Die Steilheit der Wellenstirn wird nunmehr von ausschlaggebender Bedeutung für die Größe der Windungsspannung. Verhältnismäßig flache Wellen gestatten nur Windungsspannungen gleich dem größten Potentialgefälle, das innerhalb der Wellenstirn auf die Länge einer Wicklung vorkommt. Geht jedoch die Steilheit der Stirn über einen gewissen kritischen Wert hinaus, so bleibt die jeweilige Stärke des elektrischen Feldes maßgebend für den Anteil, den die betreffende Windung an der Gesamtspannung erhält.

Während noch die Verschiebungsströme von der ersten Windung aus die besprochenen Spannungsverteilungen aufbauen, wandert die Welle selbst längs des Wicklungsdrahtes weiter und erfüllt nach und nach die zweite Windung. Dabei erfährt zunächst die statische Potentialverteilung eine solche Verlagerung, als ob die erste Windung ausgesondert und die zweite zum Träger des Ausgangspotentials geworden sei, wobei zwischen der ersten und zweiten Windung fast keine Spannung mehr besteht. Andererseits induziert die strömende Welle Gegenströme in den magnetisch mit der Eingangswicklung verketteten Nachbarwindungen, wodurch die Welle gestaut und ihr Potential erhöht wird. Maßgebend für die statische Spannungsverteilung auf der Wicklung ist also bereits von der zweiten Windung an ein

anderes, dem anfänglichen gegenüber vergrößertes Ausgangspotential. Im folgenden wächst die von Windung zu Windung fortschreitende Welle auf immer höhere Potentiale an, immer neue Spannungszustände werden durch den von ihr ausgesandten Verschiebungsstrom den schon auf der Wicklung bestehenden überlagert. Im Grenzfall, der allerdings nicht verwirklicht werden kann, erreicht die Höhe des Staupotentials das Doppelte der ursprünglichen Wellenhöhe.

Von Veränderungen der Wellenstirn ist vorläufig nicht die Rede gewesen. Indessen wird selbst eine ursprünglich steil ansteigende Welle schon innerhalb eines verhältnismäßig geringen Anteiles an der Wicklung durch Energieabgaben derartig abgeflacht, daß die bisherigen Ausführungen nur für die Eingangswindungen gelten. In ihrem weiteren Lauf vermag die von Windung zu Windung immer stärker gedämpfte Welle nur noch Spannungsverteilungen zu erzeugen, die ihrem jeweiligen eigenen Potentialgefälle entsprechen.

II. Ausgleich der labilen Spannungsverteilungen.

Wäre die Wicklung nur eine Folge unabhängiger Metalleinlagen in ein Dielektrikum, so würde bei unverändert bleibender Spannung zwischen Anfang und Ende die Potentialverteilung des ersten Augenblicks von bleibendem Bestand sein. Die leitende Verbindung von Glied zu Glied gestattet aber, daß sich die einzelnen Potentialdifferenzen nach ihrer Bildung alsbald wieder ausgleichen. Dieser Ausgleich geschieht längs des Drahtes in Gestalt freier Schwingungen. Als Endergebnis des Ausgleichs stellt sich die lineare Spannungsverteilung des normalen Betriebes ein; der Ausgleich selbst kann mithin als dem Dauerzustand überlagert aufgefaßt werden. Wegen eingehenderer Behandlung von Schwingungen sei auf die hierüber erschienene Literatur verwiesen¹⁾.

Hauptteil. Messungen über die Spannungsverteilung auf Transformatorwicklungen unter dem Einfluß von Sprungwellen.

I. Erläuterung der Versuchsgrundlagen.

a) Kritik der Versuchsanordnung.

In Erfüllung der eingangs auseinandergesetzten Aufgabe galt es zunächst eine Versuchsanordnung und ein Meßverfahren auszubilden, die einerseits den Bedingungen

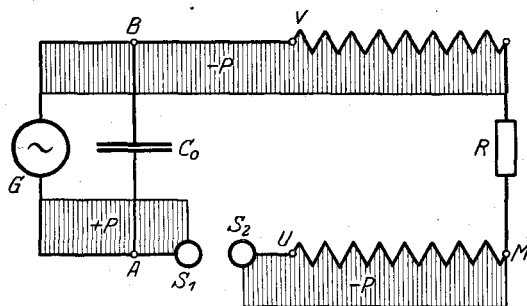


Bild 8. Schaltbild mit R im Stromkreis.

des praktischen Betriebes entsprachen und zum anderen charakteristische, stets in gleicher Weise wiederkehrende und einfach zu messende Erscheinungen veranlassen.

¹⁾ Siehe u. a. K. W. Wagner, l. c. — Rogowski, l. c. — Böhm, Arch. f. Elektrot. 1917, S. 383. — Gothe Arch. f. Elektrot. 1920, S. 1. — Schroeder, Arch. f. Elektrot. 1922, S. 203. — Ridder, Arch. f. Elektrot. 1922, S. 339.

Die im nachfolgenden beschriebene Versuchsanordnung, welche in ihren Grundzügen für die Untersuchung von Sprungwellen bereits vielfach Anwendung fand¹⁾, benutzt den wechselstromgespeisten Kondensator als Behälter für elektrische Ladungen, die sich durch Betätigung eines Schalters unter Ausbildung steiler Wellen unmittelbar über den Versuchsapparat ausgleichen. Es wurde daher (Bild 8) die Oberspannungswicklung UV eines Einphasentransformators mit der einen Klemme V direkt, mit der anderen Klemme U über den Schalter S an den Kondensator C_0 angeschlossen, der seinerseits gespeist wurde aus der Hochspannungswechselstromquelle G. Sämtliche Verbindungsleitungen waren kurz und möglichst übersichtlich und geradlinig geführt.

Der einpolige Schalter gibt insofern die Verhältnisse der Praxis wieder, als auch ein zweipoliger Schalter niemals beide Klemmen des Transformators gleichzeitig an die unter Spannung stehende Stromquelle angeschlossen hätte. Der erste Teil des Schaltvorganges, Schluß zwischen B und V, wird mithin als vollendet angenommen und das Interesse auf die Erscheinungen bei der Verbindung von A mit U konzentriert.

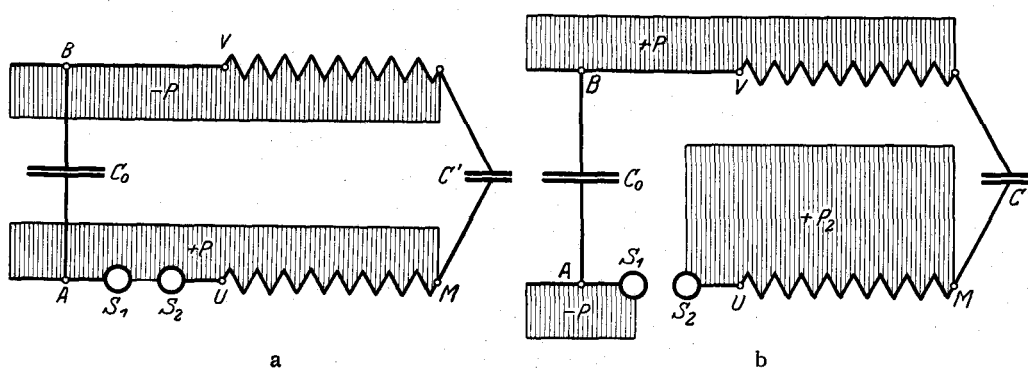


Bild 9a und b. Schaltbild mit C' im Stromkreis.

Bei geöffnetem Schalter folgt die Spannung zwischen den Schalterelektroden S_1 und S_2 den Pulsationen der Netzspannung. Es möge nun gelegentlich eines Durchgangs der Spannungskurve durch den Höchstwert eine Potentialverteilung vorhanden sein, wie sie in Bild 8 veranschaulicht wird: Auf dem Leitungsstück AS_1 das Potential $+P$, auf dem Leitungszug $BVMUS_2$ das Potential $-P$, wobei mit $\pm P$ die jeweilige Spannung gegen Erde bezeichnet sei. Wird in diesem Augenblick durch einen Funken zwischen den einander genäherten Schalterkugeln die Brücke von S_1 nach S_2 geschlagen, so steht zumindest die Wicklung des Schenkels UM schlagartig unter der gesamten Potentialdifferenz $2P$ (vermindert um den Spannungsabfall im Funken) und wird überflutet von Ladungen aus dem Behälter C_0 , nicht anders als ob eine Welle mit steiler Stirn und fast der Höhe $E = 2P$ auf dem Transformator aufgeprallt sei.

Für die Reproduzierbarkeit der Meßwerte erweist es sich als glücklich, daß der gesamte Entladungsvorgang bereits abgeschlossen ist, noch ehe sich die Netzspannung von ihrem Höchstwert $2P$ merklich hat entfernen können. Mithin hat es auch keinen Einfluß auf die Messung, ob der Kondensator C_0 mit hochgespanntem Wechselstrom oder Gleichstrom aufgeladen wird. Dagegen bleibt wesentlich, bei der Stromquelle G die Voraussetzung unendlicher Ergiebigkeit weitgehend zu erfüllen, da andernfalls die Spannung während der Entladung sinken und womöglich bis zur nächsten Entladung nicht wiederhergestellt sein könnte. Es wurde daher

¹⁾ R. P. Jackson, Proc. A.I.E.E. 1906, S. 843. — Binder, ETZ 1915, S. 241, 259; ETZ 1917, S. 381, 395. — Courvoisier, Bulletin S. E. V. 1922, S. 437.

in den durch Ladekondensator C_0 und Versuchstransformator gebildeten Kreis, zweckmäßig an der Verbindungsstelle M der Wicklungen beider Schenkel, eine weitere sehr kleine Kapazität C' oder ein Widerstand R erheblichen Betrages eingesetzt, deren Hauptaufgabe darin bestand, die Entnahme übermäßiger Elektrizitätsmengen aus C_0 zu verhindern, ohne das Eindringen von Spannungswellen in die Wicklung irgendwie zu beeinflussen.

Allerdings sehen die Dinge bei Verwendung eines Kondensators innerhalb des Entladekreises noch etwas verwickelter aus, als wenn sich dort ein Ohmscher Widerstand befindet. Solange der Schalter S geschlossen ist, liegen die beiden Kapazitäten C_0 und C' parallel an der Stromquelle, so daß ihre Spannungen jederzeit der speisenden Spannung folgen. Hört der Stromfluß über den Versuchstransformator durch Öffnen des Schalters im Maximum der Betriebsspannung auf, so gleicht zwar die Spannung auf C_0 auch weiterhin der Netzspannung, am offenen Schalter S aber wird sie bestimmt durch die auf dem freien Ende MS_2 nach dem Ausschalten verbliebene Ladung.

Dieses freie Ende besteht einmal aus der einen Hälfte der Belegungen von C' , sodann aus der Wicklung UM mit der Gesamtkapazität C_e gegen das geerdete Schenkeleisen und der Gesamtkapazität C_w gegen die Wicklung des anderen Schenkels, und letztlich aus der Schalterelektrode S_2 mit der Kapazität C_s gegen die andere Elektrode S_1 (Bild 9a). Bei symmetrischer Entwicklung der auf den Klemmen der Stromquelle erzeugten Potentiale (und ohne Rücksicht auf den Spannungsabfall im Funken) treten folgende Spannungen an den erwähnten Kapazitäten auf:

$$\begin{array}{ll} \text{An } C' : 2P & \text{An } C_e : P \\ \text{An } C_w : 2P & \text{An } C_s : 0. \end{array}$$

Auf dem freien Ende hat also untergebracht werden können die Ladung:

$$Q = 2P \cdot C' + 2P \cdot C_w + P \cdot C_e + 0 \cdot C_s. \quad (2)$$

Nach einer Halbperiode haben sich die Betriebspotentiale dem in Bild 9a festgehaltenen Zustand gegenüber umgekehrt und dabei die Potentialdifferenzen an C' und C_w vermindert, so daß zur Bewahrung der Gesamtladung die Spannung des freien Endes gegen Erde auf den Wert P_2 hat ansteigen müssen. Jedenfalls ist der Gleichung

$$Q = (P_2 - P) \cdot C' + (P_2 - P) \cdot C_w + P_2 \cdot C_e + (P_2 + P) \cdot C_s \quad (3)$$

Genüge zu leisten (Bild 9b). Hieraus folgt zur Bestimmung von P_2 :

$$\frac{P_2}{P} = \frac{3C' + 3C_w + C_e - C_s}{C' + C_w + C_e + C_s}. \quad (4)$$

Die am Schalter auftretende Potentialdifferenz $P_2 + P$, die bei Vernachlässigung von C_e und C_s gegenüber C' und C_w gleich $4P$, sonst geringer ist, reicht bei nicht zu großen Schaltgeschwindigkeiten aus, um den Raum zwischen den sich öffnenden Elektroden des Schalters aufs neue durch eine Entladung zu überbrücken. Dieser als Rückzündung bekannte Vorgang unterwirft die Wicklung einer Beanspruchung, als ob eine Welle von fast doppelter Höhe der Betriebsspannung an den Klemmen des Transformators erschienen sei.

Durch die Rückzündung wird, sobald die Wicklung von der eindringenden Welle durchlaufen ist, der Kondensator C' umgeladen. Diese Umladung stellt sich in dem durch Zusammenschaltung mehrerer Kapazitäten und Selbstinduktivitäten gebildeten Schwingungskreis als oszillatorischer Vorgang dar, der durch die Energieverluste im Funken und im Widerstand der Wicklung wirksam gedämpft wird. Die Lichtbogenbrücke am Schalter S reißt in der Regel wieder ab, sobald die Schwingungen ihr Ende gefunden haben; es hängt von der Öffnungsgeschwindigkeit der Elektroden ab, ob der einen Rückzündung noch mehrere gelegentlich der weiteren Polwechsel der Wechselstromquelle folgen sollen.

Wenn übrigens die Eigenfrequenz des Schwingungskreises klein ist (also z. B. bei vermehrter Selbstinduktion der Wicklung) und bei stark gekühlten Elektroden mag es sich ereignen, daß der rückgezündete Stromkreis unterbrochen wird, noch ehe die Schwingungen ausgeklungen sind¹⁾. Unter Umständen verbleibt dann auf dem freien Ende eine größere Ladung unter höherer Spannung, als nach Gleichung (2) zu erwarten sein würde; entsprechend größere Rückzündungsspannungen können also am Schalter auftreten.

b) Beschreibung der benutzten Apparate und des Meßverfahrens.

Zur Ausführung der Messungen stand ein von der Firma Koch & Sterzel A.G. in Dresden für diese Versuche eigens angefertigter Einphasen-Lufttransformator zur Verfügung, dessen Leistungsschild die Angaben trug:

Nennleistung	30 kVA
Nennspannung	30000 / 440 / 220 Volt
Nennstrom	1 / 68 / 136 Amp.
Nennfrequenz	50 Perioden / Sekunde.

Als Niederspannungswicklung konnten wahlweise zwei verschiedene Anordnungen benutzt werden: Entweder auf jedem Schenkel 1 zylinderförmige Spule, die auf der vollen Länge jedes Schenkels 84 Windungen in zwei Lagen enthielt oder 8 scheibenförmige Spulen mit je 10 bzw. 11 Windungen.

Die Hochspannungswicklung besaß auf jedem Schenkel 5726 Windungen verteilt auf 2 scheibenförmige, flache Eingangsspulen von je 238 vierfach mit Baumwolle isolierten und 14 Normalspulen von je 375 nur zweifach mit Baumwolle isolierten Windungen aus Kupfer-Runddraht von 0,8 mm Ø. Die mittlere Windungslänge betrug 78 cm. Außerdem waren zu gelegentlichem Einbau vorhanden:

1 Spule mit 95 Windungen aus flach gewickeltem Kupferband von $0,2 \times 5 \text{ mm}^2$ Querschnitt,

2 Spulen mit je 10 Windungen aus hochkant gewickeltem Kupferband von gleichen Abmessungen,

mehrere geschlitzte, ringförmige Scheiben, die nach Innen- und Außendurchmesser den Hochspannungsspulen entsprachen.

Sämtliche Verbindungen wurden nicht verlötet, sondern durch leicht lösliche Schraubklemmen hergestellt; überhaupt war beim Entwurf des Transformators auf einfaches Auseinandernehmen zum Zwecke des Austausches oder der Abstandsveränderung von Spulen-besonderes Gewicht gelegt worden. Etliche Hochspannungsspulen trugen zahlreiche, sorgfältig isolierte Anzapfungen aus Bandkupfer, die zu Klemmbrettern in unmittelbarer Nähe der Spulen geführt waren.

In der Verwirklichung der weiter oben dargelegten Gesichtspunkte über eine geeignete Versuchsanordnung wurde die Kondensatorenbatterie C_0 von $0,087 \mu\text{F}$ Kapazität durch einen Wechselstrom-Generator über einen Transformator geladen, wobei die Erregung des Generators, um Spannungsschwankungen durch kapazitive Rückwirkung nach Möglichkeit zu vermeiden, so hoch eingestellt wurde, daß der Arbeitspunkt der Spannungskurve über dem Knie lag. Danach ergab sich eine Spannung von 20000 Volt an der Kondensatorenbatterie C_0 als günstig.

Der eine Pol B der Kondensatorenbatterie blieb mit der einen Klemme V der Hochspannungswicklung des Versuchstransformators dauernd verbunden, während die andere Klemme U an den anderen Pol A durch einen Luftschalter S mit Kugelelektroden von 20 mm Ø angeschlossen werden konnte. Die Begrenzung der Leistungsentnahme geschah durch einen Kondensator C' von $0,001 \mu\text{F}$ Kapazität oder einen Widerstand R aus einer Schiefertafel von etwa 2 Megohm.

¹⁾ Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge, I. Auflage S. 239.

Zur Messung des Spannungsverlaufs auf der Wicklung diene ein Präzisions-Funkenmikrometer mit auswechselbaren Kugelelektroden von 10 bzw. 20 und 50 mm \varnothing , dessen Angaben mit Hilfe bekannter Eichkurven¹⁾ ausgewertet wurden.

Die Dauer des Bestehens einer Spannung zwischen den Meßkugeln genügte angesichts der überaus rasch verlaufenden Vorgänge nicht zur ausreichenden Ionisierung des Luftzwischenraums lediglich durch die auf den Meßkugeln erscheinenden Potentiale; als notwendig und andererseits für das zuverlässige Ansprechen des Funkenmikrometers völlig hinreichend erwies sich vielmehr die Vorionisierung der Meßstrecke, die in einfacher und bequemer Weise durch ein Radiumpräparat bewirkt wurde.

Außerdem durfte in die Zuleitung zur Meßfunkenstrecke kein Schutzwiderstand eingeschaltet werden: er hätte verhindert, daß die Aufladung der Meßkugeln mit dem rapiden Anwachsen der Wellenspannung Schritt hielte, und daher zu falschen Meßergebnissen Anlaß gegeben. Die Länge der Leitungen zum Funkenmikrometer konnte indessen ohne Beeinträchtigung der Meßgenauigkeit zwischen etwa 5 und 50 cm verändert werden. Daß übrigens über die Meßkugeln keine starken Kurzschlußströme flossen, die an den Elektroden schwere Brandschäden hervorgerufen hätten, war eine weitere Folge der Verwendung von Widerstand R oder Kapazität C im Stromkreis.

Zweckmäßig war es auch, den Schalter durch einen Ventilator kräftig anblasen zu lassen. Ohne diesen Kunstgriff wäre der dem Einschaltfunken folgende Lichtbogen auch beim Nulldurchgang des Betriebsstromes stehen geblieben und hätte die Elektroden dauernd miteinander verbunden. Erst das völlige Öffnen und dann wieder das erneute Schließen des Schalters hätte der Wicklung abermals Spannungssprünge aufgedrückt. Wurde aber durch den Luftstrom der Lichtbogen bei jedem Nulldurchgang des Arbeitsstromes ausgeblasen, so traten am Schalter laut prasselnde Funken auf, die, im Einklang mit der Polwechselzahl des Betriebes, 100 Zündungen bzw. Rückzündungen in der Sekunde darstellten.

Und doch nahm selbst bei dieser Zündfrequenz jede Messung geraume Zeit in Anspruch, da die Wellen hinsichtlich der Steilheit ihrer Stirn nicht immer gleichartig ausfielen. Um nun mit einer gewissen gleichbleibenden Wahrscheinlichkeit stets und ausschließlich die jeweils höchstmöglichen Spannungen festzustellen, erfolgte jede Messung in der Weise, daß die Schalterkugeln von Hand mit der Häufigkeit von etwa 2 Schaltungen in der Sekunde bis zur Zündung einander genähert und bis zum Aufhören des Funkenspiels wieder voneinander entfernt wurden. Vor Beginn jeder Messung wurden die Meßkugeln einander so weit genähert, daß jedes Schließen und Öffnen des Schalters zum Ansprechen der Meßstrecke führen mußte. Diese wurde nun allmählich unter fortwährendem Schalten um je 0,05 bis 0,2 mm so lange vergrößert, bis bei 50 aufeinander folgenden Schaltungen kein Überschlag mehr eintrat. Zur Aufzeichnung gelangte alsdann der vorangehende Meßwert.

Dieses Meßverfahren sei zur Verdeutlichung an einem besonderen Beispiel geschildert. Und zwar soll die Spannung festzustellen sein, die unter gewissen Bedingungen durch Betätigung des Schalters S zwischen U und M , also über der gesamten Schenkelwicklung auftritt. Solange die Meßkugeln noch dicht beieinander stehen, springt an der Meßstrecke jedesmal ein Funke über, wenn am Schalter S eine Zündung erfolgt. Das „Zündverhältnis“, also das Verhältnis der innerhalb einer gewissen Zeit an der Meßstrecke gezählten Funkenfolgen zur Zahl der Schaltungen beträgt mithin 100% und behält diesen Wert auch noch bei einem Meßkugelabstand von 11,4 mm (Bild 10). Dieser Abstand m_1 und die ihm nach den Eichkurven für

¹⁾ W. O. Schumann, Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen. I. Auflage 1923. — A. Klemm, Arch. f. Elektrot. 1923, S. 553.

Kugeln von 50 mm \varnothing entsprechende Spannung $p_1 = 25\,100$ Volt verdienen festgehalten zu werden¹⁾. Bei weiterer Vergrößerung der Meßstrecke sinkt das Zündverhältnis rasch ab, immer seltener wird das Ansprechen der Meßstrecke, schließlich hört es ganz auf, so oft auch am Schalter S gezündet werden mag. Derjenige Abstand der Meßkugeln, bei dem zum letzten Male ein Funke beobachtet wurde, nämlich $m_2 = 14,0$ mm entsprechend $p_2 = 29\,600$ Volt, wird ebenfalls aufgezeichnet.

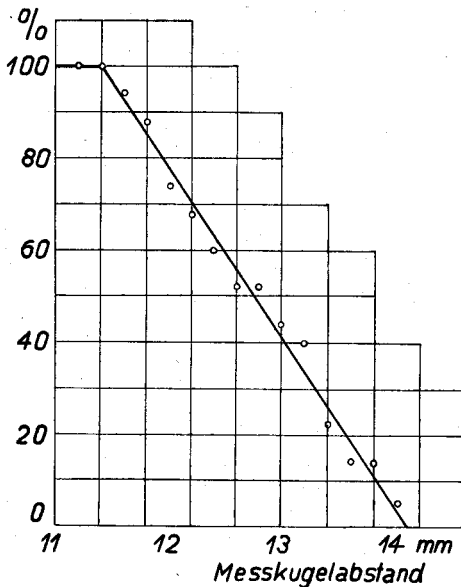


Bild 10.

Verlauf des Zündverhältnisses bei Messung der Spannung über U.M.

Es ist nun für die Zwecke der vorliegenden Arbeit an sich gleichgültig, ob die Werte m_1 bzw. p_1 oder m_2 bzw. p_2 aufgenommen werden, wenn nur das einmal angewandte Verfahren unentwegt beibehalten wird. Wenn hier ausschließlich auf die Werte p_2 Gewicht gelegt wurde, so waren dafür maßgebend einmal die Beobachtung, daß die Werte p_2 mit größerer Schärfe gemessen werden konnten als die Werte p_1 , sodann das Bestreben, in allen Kurven stets die jeweils höchstmöglichen Spannungen zu veranschaulichen. Denn diese sind es ja, die an der Zerstörung der Isolation Schuld tragen.

II. Schilderung der Messungen.

a) An der Gesamtwicklung.

Die ersten Versuche hatten zur Aufgabe, die Höhe der Betriebsspannung sowie die Größe von R bzw. C' unter dem Gesichtspunkt besonderer Eignung für das angewandte Meßverfahren festzustellen; die gewählten Werte sind auf S. 224 bereits mitgeteilt worden. Weitere Vorversuche befaßten sich mit dem Schalter S, da Form, Größe und Abstand der Elektroden, sowie die Natur des die Schaltstrecke erfüllenden Mediums wesentlich die Gestalt der Wellenstirn im Sinne einer gewissen Parallelität zwischen Steilheit der Stirn und Durchbruchfestigkeit des Schalterdielektrikums beeinflussten. Unter Verweisung des eingehenden Studiums dieser Erscheinung an Sonderuntersuchungen wurde im vorliegenden Fall zur Herstellung stets gleicher Versuchsbedingungen konsequent festgehalten an Luftschaltern mit Kugelelektroden von 20 mm \varnothing .

Die erste geschlossene Versuchsreihe betraf die Feststellung der Potentialverteilung auf der gesamten Transformatorwicklung, um zunächst einen allgemeinen Überblick über die Größe der erregten Spannungen zu gewinnen und sodann den Einfluß der Spulenanordnung zu erkennen. Gemessen und über der Spulenzahl graphisch aufgetragen wurden bei fast allen diesen Versuchen

- die Spannungen an den Spulenverbindungen gegen den Wicklungsanfang,
- desgl. gegen das Ende des beobachteten Schenkels,
- die Windungsspannung, und zwar als Mittelwert
$$= \frac{\text{Spannung je Spule}}{\text{Windungszahl je Spule}}$$

Die als Ausgangsanordnung gewählte Wicklung enthielt zylinderförmige Niederspannungsspulen und als Oberspannungswicklung auf jedem Schenkel 16 in großen

¹⁾ In dieser Arbeit sind sämtliche Spannungen als Effektivwerte sinusförmiger Wechselspannungen angegeben.

Abständen aufgestellte flache Scheibenspulen. Die beobachteten Spannungsverteilungen, gewonnen sowohl mit R als auch mit C' zwischen den Wicklungen beider Schenkel, gehen aus Bild 11 hervor.

Zur Beurteilung der Meßergebnisse sei daran erinnert, daß die Funkenstrecke stets nur die jeweils höchstmöglichen Spannungen der Beobachtung zugänglich macht, ohne Rücksicht darauf, ob die gelieferten Werte zu einem einzigen oder zu mehreren zeitlich voneinander gesonderten Spannungszuständen gehören. Es ist daher erforderlich, mit Hilfe der vorangeschickten theoretischen Betrachtungen Ordnung in die mitgeteilten Resultate zu bringen.

Jedenfalls veranschaulichen auf Bild 11 die mit a bezeichneten Kurven die durch statische Verschiebungsströme geschaffene Spannungsverteilung des ersten Augenblicks, da das Vordringen der Welle schon von der zweiten Windung an niedrigere Potentialdifferenzen zwischen der Wicklung und ihrem Anfang geliefert

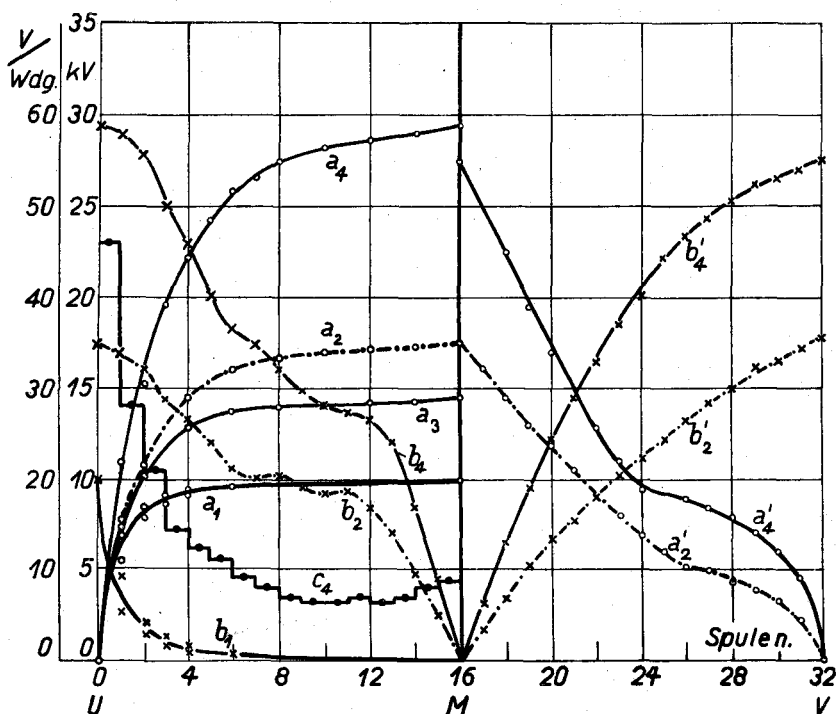


Bild 11. Spannungsverteilung auf der Gesamtwicklung TMV. Ausgangsanordnung: Zylinderwicklung, große Abstände zwischen den Oberspannungsspulen.

haben würde. Die Kurven entsprechen in ihrem Charakter durchaus dem Verlauf des elektrischen Feldes auf der Wicklung zwischen der Eingangswicklung und dem geerdeten Eisen, wie es durch Bild 4 verdeutlicht worden ist.

Am reinsten entspricht der Theorie die Kurve a_1 , die bei geöffneten Spulenverbindungen aufgenommen wurde; in allen anderen Fällen hat die eindringende Wellenstirn den Wicklungsanfang immer schon mehr oder minder aufgeladen und in diesem Bereich die Spannungen gegen Anfang nicht auf die theoretische Höhe anwachsen lassen. Kurve a_2 entstand unter Einschaltung von Widerstand R in den Stromkreis, während die Werte a_3 und a_4 mit 10 bzw. 20 kV Betriebsspannung und C' bei M gemessen wurden.

Schwerer fällt die Deutung der b-Kurven. Auf der Kondensatorkette und ebenso auf der unterbrochenen Wicklung müssen die gegen das Ende aufgenommenen Spannungen zu Kurven führen, die spiegelbildlich liegen zu den bisher betrachteten:

Siehe Kurve b_1 auf Bild 11. Indessen werden bei geschlossener Wicklung die gegen das Ende hin auftretenden Spannungen des ersten Augenblicks verdeckt durch 2 ineinandergreifende Vorgänge, die der Meßfunkenstrecke höhere Werte liefern. Da ist einmal die vorrückende Welle, deren starke Dämpfung, zumal von der 3. Spule an, im Abfall der Kurven b_2 (mit R gemessen) und b_4 (mit C' gemessen) zum Ausdruck kommt. Aber auch diese Erscheinung wird für den überwiegenden Rest der Wicklung UM überdeckt durch das Bild einer sinusförmigen stehenden Schwingung, in der die erzeugte labile Potentialverteilung ihren Ausgleich sucht. Daß hier außer der Grundwelle noch die 3. Harmonische sichtbar wird, dürfte als zufällige Resonanzerscheinung zu werten sein.

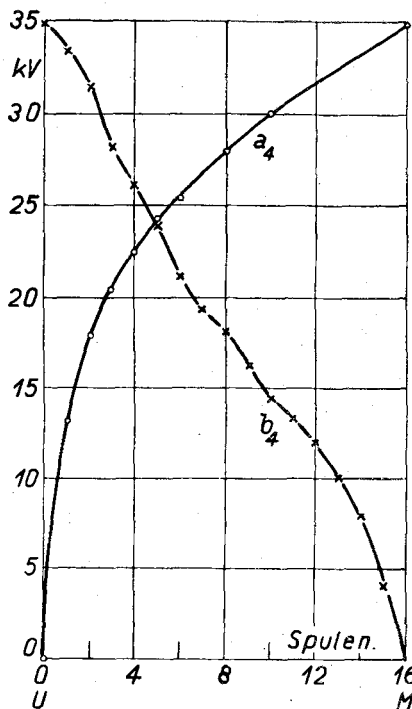


Bild 12. Spannungsverteilung auf der Wicklung UM. Zylinderwicklung, kleine Abstände zwischen den Oberspannungsspulen.

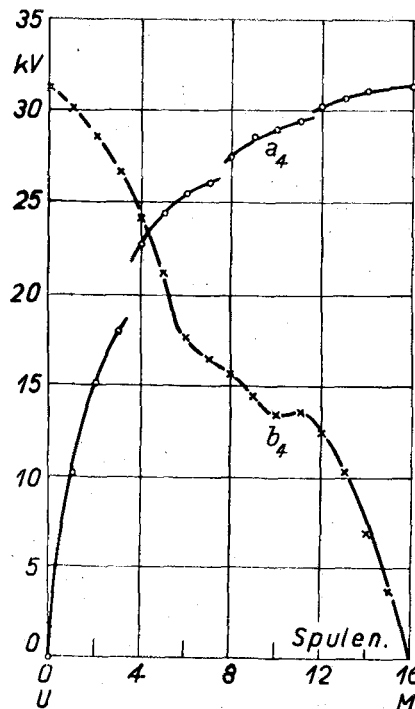


Bild 13. Spannungsverteilung auf der Wicklung UM. Scheibenwicklung. Abwechselnde Gruppen von Ober- und Niederspannungsspulen.

Die treppenförmige Kurve c schließlich gibt ganz allgemein an, daß die Windungsbeanspruchung nach dem Innern der Wicklung zu abnimmt, ohne indessen den später mitgeteilten exakteren Messungen vorgreifen zu wollen.

Auf dem anderen, dauernd angeschlossenen Schenkel VM sind plötzliche Spannungsänderungen über den Ladekondensator C_0 hinweg nur in bescheidenem Umfange möglich; die hier aufgenommenen Kurven zeigen daher einen fast linearen Verlauf als Folge allmählich anwachsender Potentialdifferenzen. Nur den Anfang der Wicklung füllt eine flach eindringende Welle, die zum Teil vom Schalter S aus über den trotz seiner Größe in gewissem Maße beeinfluszbaren Kondensator C_0 auf die Klemme V gestoßen ist, zum Teil auch vom Schenkel UM her erregt sein mag.

Weiterhin wurde durch eine Anzahl von Meßreihen festgestellt, daß die angegebenen Spannungsverteilungen unabhängig davon sind, ob das trennende Element R bzw. C' bei M oder etwa vor dem dauernd angeschlossenen Schenkel bei V sitzt.

Betrag innerhalb der Hochspannungswicklung der Abstand von Spule zu Spule in der bisher untersuchten Ausgangsanordnung etwa 30 mm, so wurde er für die

nun folgenden Messungen zur Beobachtung des anderen Extrems auf 3 mm herabgesetzt. Diese Zusammendrängung der Wicklung bewirkt eine Verringerung des Kapazitätsverhältnisses $\frac{c}{C}$ und eine Vermehrung der Gesamtinduktivität. Deutlich prägen sich diese Erscheinungen in den Meßergebnissen auf Bild 12 aus. Nicht nur hat Kurve a_4 eine gestrecktere Gestalt, entsprechend dem Vergleich auf Bild 2, angenommen; auch die Gesamtspannung über der Wicklung ist gewachsen und verrät, daß hier der Fall vorzeitigen Wiederabreißen der Rückzündung eingetreten ist, von dem auf S. 224 die Rede war. Interessant ist weiterhin die Beobachtung, daß in dieser Wicklung veränderter Induktivität die höheren Harmonischen der Ausgleichsschwingungen nicht die deutliche Ausbildung von Bild 11 erfahren haben.

Eine von den bisher betrachteten Anordnungen grundsätzlich abweichende Art ergibt sich durch Unterteilung auch der Sekundärwicklung in Scheiben: Die 16 Hochspannungsspulen sind in 4 Gruppen zu je 4 Spulen zusammengefaßt, wobei die Spulenabstände innerhalb der Gruppe etwa 10 mm, die Abstände von Gruppe zu Gruppe aber über die zwischenliegenden Niederspannungsspulen hinweg 95 mm betragen. Für diejenigen Vorgänge, die — wie der oszillierende Ausgleich — längs des Wicklungsdrahtes erfolgen, ist diese Ungleichmäßigkeit der Anordnung belanglos: Kurve b_4 auf Bild 13 zeigt daher auch keine besonderen Merkmale. Andererseits sind die quer zur Wicklung durch den dielektrischen Verschiebungsstrom getragenen Spannungsverteilungen äußerst empfindlich gegen Abweichungen in den gegenseitigen räumlichen Beziehungen der Wicklungselemente: Kurve a_4 auf Bild 13 verläuft nicht mehr stetig, sondern weist deutliche Sprünge an den Stellen vermehrten Spulenabstandes auf. Nun kann aber diese Kurve, statt über der Spulenzahl, auch über dem Spulenabstand als Abszisse aufgetragen werden, unter Reduktion des Wicklungszwischenraumes auf gleiche Dielektrizitätskonstante. Dann ergibt sich auch für die statisch erzeugten Potentialverteilungen ein stetiger Verlauf (Bild 14).

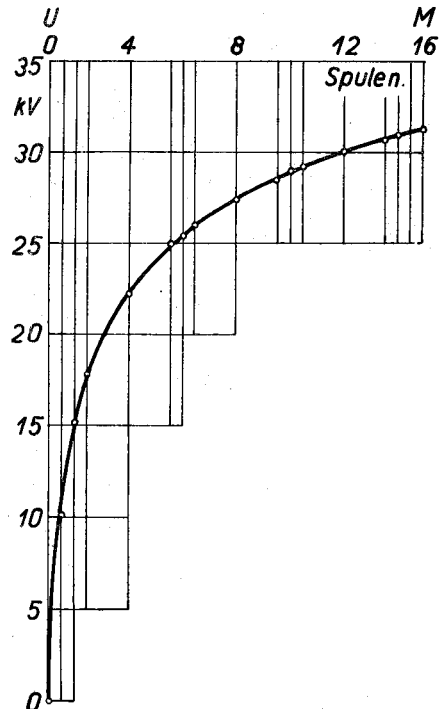


Bild 14. Spannungsverteilung auf der Wicklung UM bei Scheibenwicklung, aufgetragen über dem Spulenabstand.

b) An einzelnen Spulen.

1. Normale, scheibenförmige, zweiteilige Runddrahtspulen.

a) Ungeschützt.

Die Anzapfungen an den Hochspannungsspulen gestatteten eine Verfolgung des Spannungsverlaufs bis ins einzelne sowie eine direkte Messung der Windungsspannungen besonders am Wicklungsanfang. Aufgenommen wurden wie bisher:

- a) Die Spannungen gegen den Wicklungsanfang,
- b) desgl. gegen das Spulenende,
- c) die Windungsspannungen.

Zu c) ist zu bemerken, daß die Windungsspannungen nur dann zur Einzelmessung mit dem Funkenmikrometer groß genug waren, wenn ihr Betrag 500 Volt

überschritt; in allen übrigen Fällen mußte die Windungsspannung als Mittelwert aus den Spannungen über mehrere Windungen berechnet werden, was bei Beurteilung der angegebenen Beträge berücksichtigt werden möchte.

Die sämtlichen hier mitgeteilten Messungen erfolgten, mit einer einzigen Ausnahme, an der als Ausgangsanordnung bezeichneten Wicklung mit weitgestellten Hochspannungsspulen und zylinderförmigen Niederspannungsspulen.

Das Ergebnis der Messungen an den ersten drei Spulen der Hochspannungswicklung UM veranschaulicht Bild 15. Und zwar beziehen sich die strichpunktierten Kurven auf eine durch Widerstand R getrennte Wicklung, während die ununterbrochenen Kurven den mit C' aufgenommenen Versuchsreihen zugehören. Unter diesen wiederum kennzeichnen die mit kräftigem Strich ausgeführten Kurven eine Wicklung mit verstärkter Isolation der ersten 10 Windungen der Eingangsspule und

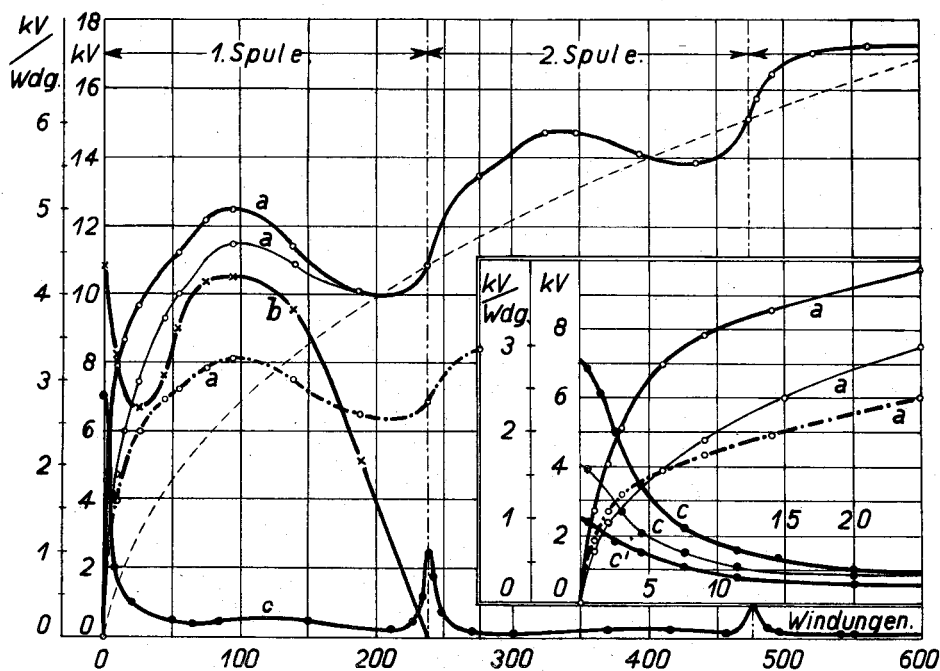


Bild 15. Spannungsverteilung auf den ersten drei Spulen der Wicklung UM in der Ausgangsanordnung.

die schwach ausgezogenen Kurven die ursprüngliche, durchaus gleichartig isolierte Spule. Auf demselben Bilde hat auch eine Nebendarstellung Platz gefunden, die das Verhalten der ersten 25 Windungen der Eingangsspule, sowie die Windungsspannungen (Kurve c') im Anfang der zweiten Spule in einem vergrößerten Abszissenmaßstab wiedergibt.

Die Deutung des Kurvenverlaufs hinsichtlich der wellenförmigen Verteilung der Spannungen gegen Anfang und Ende, sowie hinsichtlich der in der Mitte und besonders an den Enden der Spule erhöhten Windungsspannung geschieht zwanglos an Hand von Bild 5 bis 7. Überdies kommt hier deutlicher noch als auf Bild 11 zum Ausdruck, daß die mit R im Stromkreis aufgenommenen Kurven der Spannungen gegen Anfang trotz niedrigerer Gesamtspannung vergleichsweise steiler ansteigen, als wenn C' die Wicklung trennt: Eine Folge des Arbeitens mit verschiedenen Spannungen, also verschiedenen Elektrodenabständen am Schalter S und eine Mahnung zur Herstellung stets gleicher Versuchsbedingungen. Bei den folgenden Messungen fand nur noch C' Verwendung.

Tiefer im Innern der Wicklung schwinden der wellenförmige Charakter der gegen den Anfang hin aufgenommenen Kurven und das Ansteigen der Windungsspannung am Anfang und Ende jeder Spule. Doch gibt es auch hierin Ausnahmen. Diejenigen Spulen nämlich, die zwischen sich einen übergroßen Abstand aufweisen, zeigen selbst dann ein beträchtliches Anwachsen der Windungsspannungen in Nähe ihrer Ein- und Ausgänge, wenn sie vom Wicklungsanfang verhältnismäßig weit entfernt sind. Eine solche Erscheinung bietet z. B. die schon erwähnte Scheibenwicklung mit ihren in Gruppen zusammengefaßten Hochspannungsspulen. Am Ende der ersten Gruppe (4. Spule) und am Anfang der zweiten Gruppe (5. Spule) sind nach Bild 16 Windungsspannungen gemessen worden, die einen Wiederanstieg nach den Windungsspannungen innerhalb der Gruppe bedeuten.

Zur Vervollständigung der mitgeteilten Meßwerte sei noch erwähnt, daß die Windungsspannungen am Ende der gesamten Wicklung UM jedenfalls zu klein ausfielen, als daß sie einigermaßen zuverlässig mit dem Funkenmikrometer hätten festgestellt werden können. Ein gewisser Anstieg war aber unverkennbar.

Der Wert dieser Messungen besteht zunächst darin, daß durch Ausbildung eines besonderen Verfahrens, entgegen aller bis in die jüngste Zeit vertretenen Anschauungen, einwandfrei festgestellt werden kann, welchen Einfluß steile Sprungwellen auf Spannungsverteilung und Windungsspannung innerhalb von Wicklungen bis hinein zur einzelnen Windung ausüben: Ein Ergebnis, das für die systematische Erforschung des Überspannungsproblems weite Ausblicke eröffnet. Wie sehr die Einbeziehung der Einzelwindung in das Experiment die Kenntnisse vertieft hat, lehrt allein schon ein vergleichender Blick auf die gemessenen Kurven von Bild 13 und auf die gestrichelte Kurve, die lediglich die an den Spulenverbindungen beobachteten Werte miteinander verbindet.

Der praktische Nutzen der hier mitgeteilten Messungen besteht insbesondere in einer Klärung der Ansichten über den Umfang des erforderlichen Windungsschutzes. Dieser Schutz hat in erster Linie die Eingangswindungen der ersten Spule zu betreffen, er ist aber an sonst noch gefährdeten Stellen, z. B. in der Nachbarschaft von Spulenverbindungen, zumal über vergrößerte Spulenabstände hinweg, auch später noch anzuwenden. Es scheint aber eine übertriebene Vorsicht zu bedeuten, wenn die ersten Windungen oder gar ein erheblicher Teil der ganzen Wicklung so hoch isoliert werden, daß die Windungsisolation überall der vollen Betriebsspannung standzuhalten vermag. Wer solches verlangt, übersieht den mildernden Einfluß der Windungskapazität, auf deren Vergrößerung er in erster Linie sein Augenmerk richten sollte.

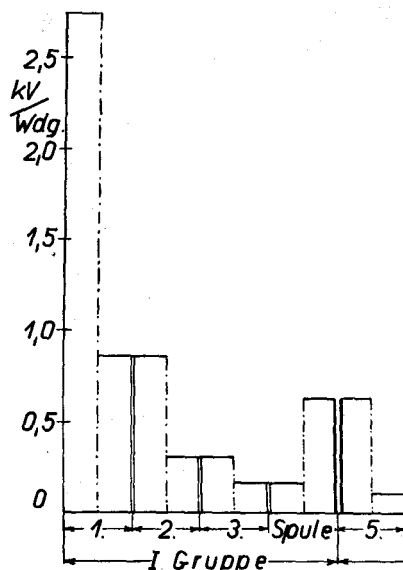


Bild 16. Spannung über der ersten und der letzten Windung an den ersten fünf Spulen der Wicklung UM bei Scheibenwicklung.

β) Normale Runddrahtspule, durch Isolationsverstärkung geschützt.

Das am häufigsten geübte Verfahren zur Erzielung des erstrebten Windungsschutzes besteht in Verstärkung der Windungsisolation. Wird jedoch bei solcher Gelegenheit die als vorteilhaft erkannte hohe Windungskapazität verringert, so ist nach Bild 13 das gleichzeitige Anwachsen der Windungsspannung zum Schaden des erstrebten Schutzes unausbleiblich. Ein Erfolg steht mithin nur dann zu

erwarten, wenn die Verwendung eines besonders durchschlagfesten Isoliermittels die Beibehaltung oder gar Verringerung der bisherigen isolierenden Schichtdicke gestattet, oder wenn die Verstärkung dieser Schicht wettgemacht wird durch die Wahl einer Hülle von gesteigerter Dielektrizitätskonstante.

γ) Normale Runddrahtspule, durch Ringscheiben geschützt.

Ein eleganteres Verfahren zum Schutz der einmal vorhandenen Normalspule gegen übermäßige Windungsspannungen berücksichtigt die Tatsache, daß die auf einer gewissen Windung gegen den Anfang der Wicklung erzeugte Spannung bei rein kapazitiver Aufladung lediglich abhängt von der räumlichen Stellung dieser Windung zwischen Anfang und Ende der ganzen Wicklung (vgl. S. 218). Gelingt es also, die Eingangswindung des Transformators nicht nur mit der zweiten Windung,

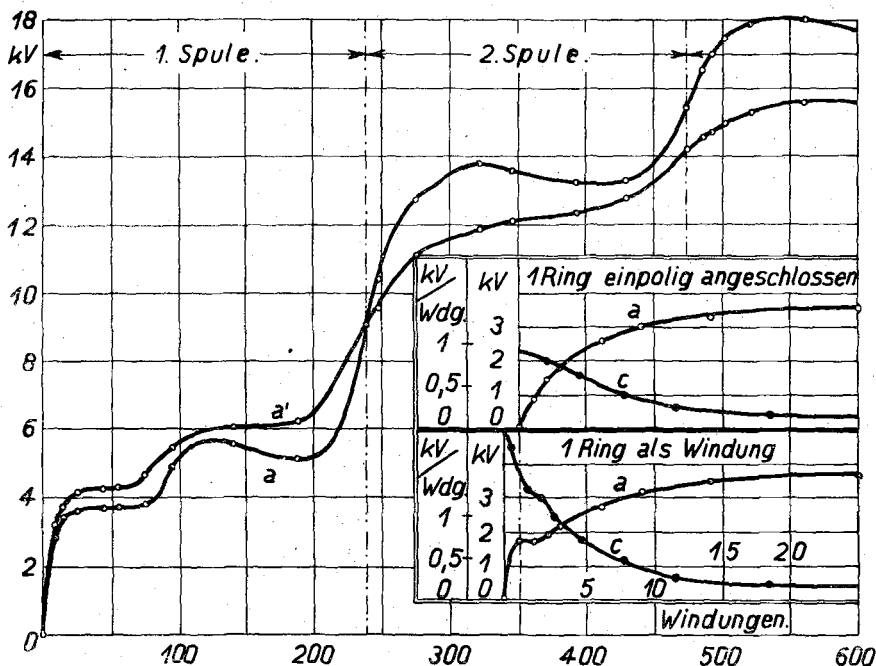


Bild 17. Einfluß von Schutzringen auf die Spannungsverteilung auf den ersten drei Spulen der Wicklung UM in der Ausgangsanordnung. Kurve a und Nebendarstellungen: 1 Ring auf der Eingangsspule. Kurve a': Außerdem Ringe zwischen den Spulen.

sondern auch mit den benachbarten Windungen kapazitiv so eng und so gleichmäßig zu koppeln, daß alle diese Windungen ein und denselben geringen Abstand von der Eingangswindung erhalten, so liegt auf der Hand, daß diese Windungen nahezu dasselbe Potential annehmen, mithin zwischen ihnen nur unerhebliche Potentialdifferenzen auftreten können, und daß weiterhin auch die Spannung zwischen der ersten und zweiten Windung nicht unbeträchtlich herabgedrückt werden wird. Zur Verwirklichung dieser Gedankengänge wird am zweckmäßigsten auf die erste Spule ein metallener, flacher Ring gelegt, der zur Vermeidung des Auftretens von Kurzschlußströmen einen Schlitz bekommt und der mit der Eingangswindung in leitender Verbindung steht¹⁾.

Die mit diesem Schutzring angestellten Versuche beweisen nach Bild 17 eine erhebliche Verminderung der anfänglichen Windungsspannungen, und zwar erwies es sich als günstiger, den Ring einpolig anzuschließen, statt ihn als Windung für

¹⁾ D.R.P. 262251, 297433. Siehe auch ETZ-Festschrift 1923, S. 27, Bild 11 und ETZ 1923, S. 900, Bild 2.

die Ausbildung des Kraftflusses mit heranzuziehen, da durch das im Ring selbst auftretende Potentialgefälle die Windungsspannungen in den benachbarten Windungen erhöht werden. Irgendwelcher Einfluß des Ringes auf die zweite und folgenden Spulen war nicht zu erkennen.

So wirkungsvoll und einfach dieser Schutz zumal im Hinblick auf nachträglichen Einbau in bereits fertige Transformatoren erscheinen mag, so hat doch die kritiklose Anwendung ihre Gefahren. Zunächst sei bedacht, daß bei einpoligem Anschluß der Ring in Eigenschwingungen geraten kann, die an seinem freien Ende erhebliche Überspannungen gegen die benachbarte Wicklung hervorrufen, während bei Verwendung des Ringes als Windung seine Potentiale allenthalben beherrscht werden. Vor allem aber ist zu beachten, daß der Ring nur die nächstliegenden Windungen wesentlich beeinflusst. Der beste und allen Windungen gleichmäßig zukommende Schutz ist also dann zu gewärtigen, wenn die Spulen flach (möglichst nur mit einer Windung/Lage innerhalb jeder Halbspule) gewickelt werden und zwischen alle Halbspulen des ganzen Schenkels je ein Metallring zu liegen kommt, der an die betreffende Spulenverbindung leitenden Anschluß erhält.

Ein derartig rigoroses Vorgehen mag im Hinblick auf den Raumbedarf der vielen Ringe und der für sie benötigten Isolationsscheiben eine Übertreibung bedeuten. Immerhin erscheint dieser Gedanke zum Schutz wenigstens der ersten drei oder vier Spulen als brauchbar. Die mit je einem Ring zwischen den normalen Runddrahtspulen angestellten Messungen zeigen nach Bild 17, Kurve a', einen wesentlich stetigeren Anstieg der Spannungen gegen den Wicklungsanfang.

Eine andere Nutzenanwendung desselben Gedankens, vornehmlich bei solchen Zylinderwicklungen, bei denen auch die Oberspannungswicklung in ihrer Gesamtheit lagenweise aufgespult wird (Bild 3), besteht in Umkleidung der Wicklung mit einem geschlitzten und wohl isolierten Metallmantel, der an die Eingangswicklung leitend angeschlossen wird¹⁾. Doch sind hierüber keine Untersuchungen angestellt worden.

2. Die flachgewickelte Bandspule.

Nach den bisherigen Darlegungen dürfte über die Bedeutung einer hohen Windungskapazität für den Selbstschutz der Spulen kein Zweifel mehr bestehen. So liegt es nahe, von vornherein die Spulen derartig aufzubauen, daß ihre Windungskapazität eine wirkliche Höhe erreicht: eine Forderung, die in weitgehendem Maße durch Herstellung der Spulen aus Bändern statt aus Runddraht erfüllt wird.

Die experimentelle Nachprüfung dieses Gedankenganges durch den Vergleich einer flach gewickelten Bandspule mit einer Runddrahtspule ist insofern schwierig, als die Herstellung einer gemeinsamen Grundlage so gut wie ausgeschlossen erscheint. Ein wissenschaftlich einwandfreier Vergleich würde nämlich bedingen, daß in beiden Spulen der gleiche Wicklungsraum von der gleichen Windungszahl mit gleicher Durchschlagsfestigkeit der Windungsisolation erfüllt sei. Auf eine solche, jedenfalls sehr zeitraubende, wenn nicht unmögliche Abgleichung wurde hier verzichtet, vielmehr bei Angabe der Daten für die Bandspule das Augenmerk lediglich darauf gerichtet, die geringste Stärke der isolierenden Schicht in Band- und Runddrahtspule gleich zu halten. Die mit dieser (der normalen Wicklung vorgeschalteten) Spule erzielten Ergebnisse sind auf Bild 18 durch die ausgezogenen Kurven veranschaulicht.

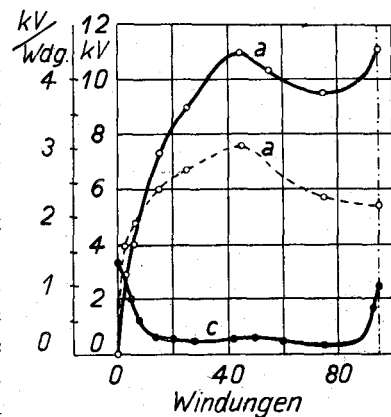


Bild 18. Spannungsverteilung auf der Flachbandspule.

¹⁾ D.R.G.M. 632971.

Hinsichtlich der Spannungen gegen Anfang bringen diese Messungen keine neuen Gesichtspunkte. Die Spannung an der ersten Windung bleibt wegen der vergleichsweise hohen Windungskapazität mit nur 1300 Volt wesentlich hinter den bei Runddrahtspulen gemessenen Werten zurück (vgl. Bild 15). Weiterhin beansprucht Aufmerksamkeit, daß die leichte Anzapfmöglichkeit einer aus blanken Metall- und isolierenden Preßspanbändern aufgewickelten Spule Gelegenheit zur Feststellung der Windungsspannungen in dem ganzen, zwischen Anfang und Ende liegenden Bereich bot, wobei allerdings, zur Vermeidung eines mikroskopischen Ableseverfahrens an der Meßfunkenstrecke, die Spannungen über 2 oder 3 Windungen gemeinsam erfaßt wurden. Diese aus Bild 18 ersichtlichen Werte zeigen an, daß erhebliche Windungsspannungen tatsächlich nur an den Ausgängen der Spule auftreten, wie es nach Bild 6 bereits vorausgesagt wurde. Daß auch in der Mitte der Spule eine geringfügige Erhöhung der Windungsspannung gemessen wird, ist eine Folge des hier, zunächst dem Eisen, vergrößerten Kapazitätsverhältnisses $\frac{C}{C}$ (vgl. Bild 4 und 7).

Eine andere, nicht minder wichtige Bestätigung ergab die Untersuchung der in radialer Richtung aufgeschnittenen Bandspule, die sich vor der geöffneten Normalwicklung befand. Es handelte sich nämlich um den Nachweis, daß Anstieg und Wiederabnahme der Spannungen gegen Anfang auf die dem Bild 5 gegebene Begründung zurückgehen und nicht etwa von stehenden Wellen herrühren. Irgendwelche Ausgleichsschwingungen waren natürlich in der aufgeschnittenen Spule unmöglich. Bild 18 zeigt in gestrichelten Kurven die aufgenommenen Spannungen gegen Anfang. Die Übereinstimmung mit den bisher vertretenen Anschauungen ist unverkennbar.

3. Die hochkant gewickelte Bandspule.

Die aus flachem Band aufgewickelte Spule hatte sich der Runddrahtspule durch größere Kapazität zwischen den aufeinander liegenden Windungen überlegen gezeigt. Ungelöst war aber die Aufgabe geblieben, die Windungskapazität nach jeder Richtung hin, also auch in Richtung der Schenkelachse, wirkungsvoll zu vergrößern. Diesem Ziel entspricht eine aus zwei Halbspulen von wenigen spiralförmigen Windungen hochkant gewickelten, breiten Bandes bestehende Spule in wesentlich vollkommenerem Maße. Denn es ergibt sich beim Aufeinanderlegen einer von außen nach innen auf eine von innen nach außen fortschreitenden und stets gleichsinnig umlaufenden, spiralförmigen Halbspule von selbst, daß jede Windung der einen mit zwei Windungen der anderen zur Deckung gelangt. Dadurch wird eine enge kapazitive Kopplung aller Windungen einer Spule untereinander und überdies mit den Windungen der Nachbarspule erreicht, auch bei verhältnismäßig großen Isolationsabständen.

Für den Versuch wurden zwei derartige Bandspulen von je 10 Windungen der übrigen Wicklung aus Runddrahtspulen vorgeschaltet. Sie nahmen (Bild 19) einen erheblichen Anteil der Spannung gegen Anfang in sich auf und wirkten vergleichsmäßigend auf den Potentialverlauf innerhalb der nachfolgenden Runddrahtwicklung. Die Windungsspannungen in den Bandspulen waren im Hinblick auf die 4 mm starke Isolierschicht von Windung zu Windung ungefährlich; die Windungsspannungen in den anstoßenden Normalspulen sank auf ein völlig bedeutungsloses Maß herab.

Allerdings mag es nur in Ausnahmefällen möglich sein, die ganze Oberspannungswicklung eines Transformators aus solchen hochkant gewickelten Bandspulen anzufertigen. Indessen dürften schon ein oder zwei solcher Spulen gewissermaßen als Schutzspulen vor der eigentlichen Hauptwicklung zur wirkungsvollen Entlastung der anstoßenden Normalspulen durchaus genügen.

Die Übertragung dieses Schutzgedankens auf die schon erwähnte, lagenweis aufgespulte Hochspannungswicklung erfolgt in einfacher Weise dadurch, daß deren oberste Lagen aus Band in flach nebeneinander angeordneten Windungen hergestellt werden und zwischen Einführungsklemme und Hauptwicklung zu liegen kommen. Hierüber sind keine Beobachtungen angestellt worden.

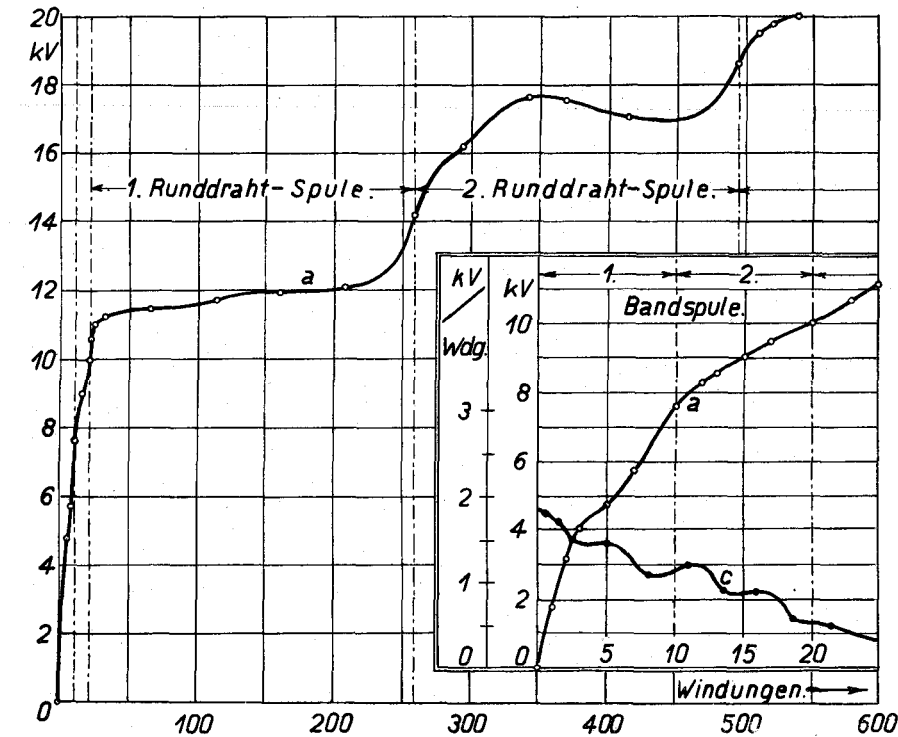


Bild 19. Spannungsverteilung auf zwei Hochkantbandspulen und den anschließenden Normalspulen in Ausgangsanordnung.

Zusammenfassung.

1. Die Spannungsverteilung auf einer Wicklung während des Auftreffens, Eindringens und Verschwindens steiler Sprungwellen erfolgt im Zusammenwirken dreier Vorgänge:

- a) Aufladung der Wicklung durch dielektrische Verschiebungsströme quer zur Windungsrichtung, entsprechend dem Verlauf des elektrostatischen Feldes rings um die von der Welle erfüllte Windung;
- b) stark gedämpftes Vordringen der Welle längs des Wicklungsdrahtes;
- c) Ausgleich der durch Aufladung und Vordringen geschaffenen labilen Spannungsverteilungen in freien Schwingungen längs des Wicklungsdrahtes.

2. Im Experiment ergibt Messung der Spannung beliebiger Wicklungspunkte gegen den Spulenansatz die elektrostatische Spannungsverteilung des ersten Augenblicks, während durch Aufnahme der Spannungen gegen das Spulenende teils das Vordringen der Welle, teils die Ausgleichsschwingung erfaßt werden.

3. Bei elektrostatischer Induktion ist für die Spannung einer beliebigen Windung z. B. gegen den Anfang der Wicklung lediglich die räumliche Stellung der Windung innerhalb der Spule, nicht aber ihre Windungsnummer maßgebend.

4. Größere Windungsspannungen als durch statische Ladung der Wicklung bedingt, können durch Sprungwellen nicht hervorgerufen werden. Doch ist selbst das theoretische Maximum der Windungsspannungen nur dann zu erwarten, wenn

die Steilheit der auftreffenden Wellenstirn einen gewissen kritischen Wert überschreitet; flachere Wellen gestatten nur Windungsspannungen höchstens gleich dem größten Spannungsgefälle innerhalb der Stirn auf die Länge der Windung.

5. Windungsspannungen erheblichen Umfanges treten als Folge von Sprungwellen in homogenen Wicklungen nur am Anfang auf. Abweichungen im Gleichmaß der Wicklungsanordnung bewirken, wenn sie mit Verringerung der Windungskapazität verbunden sind, eine lokale Vermehrung, andernfalls Verminderung der sonst zu erwartenden Windungsspannungen. Derartige Abweichungen treten z. B. bei scheibenförmiger Unterteilung der Wicklung an den Ein- und Ausgängen der Einzelspulen auf. Sie können weiterhin durch stärkere Isolierung bevorzugter Windungen veranlaßt werden.

6. Dem Selbstschutz von Wicklungen gegen Sprungwellen dienen alle Anordnungen, die eine Vergleichmäßigung des elektrostatischen Feldes an den gefährdeten Stellen bewirken. Diese Aufgabe wird am einfachsten durch Vermehrung der Windungskapazität erfüllt. Daher empfehlen sich Aufbau der Wicklung aus metallenen Bändern statt Drähten und Verwendung hochwertiger Isolierstoffe großer Dielektrizitätskonstante.

7. Gleichzeitige Aufladung vieler Windungen auf möglichst gleich hohes Potential führt ebenfalls zu Verringerung der Windungsspannung. Zu diesem Zweck können die Eingangswindung und auch andere Windungen leitend mit Metallflächen verbunden werden, derart, daß diese Flächen die eine Belegung, die benachbarten Windungen die andere Belegung eines Kondensators bilden, wobei sich überdies eine Vergrößerung der Windungskapazität ergibt.

8. Die Vergleichmäßigung des statischen Feldes innerhalb der gefährdeten Spulen kann dadurch erzielt werden, daß bei Scheibenspulenwicklung die betreffenden Spulen aus hochkant gewickeltem Metallband, bei lagenweis hergestellten zylinderförmigen Wicklungen die betreffenden Lagen aus flachgewickeltem Band angefertigt werden, so daß jede Windung der einen Halbspule oder Lage mit ihrer Breitseite mit zwei Windungen der anderen Halbspule oder Lage zur Deckung gelangt.