

# Die REPARATUR von Netztransformatoren in der Praxis

A. Die Suche nach der Fehlerquelle

B. Das Feststellen der Windungszahlen

C. Das Wickeln des Spulenkörpers und der Zusammenbau des Transformators

D. Die Prüfung des fertiggestellten Transformators

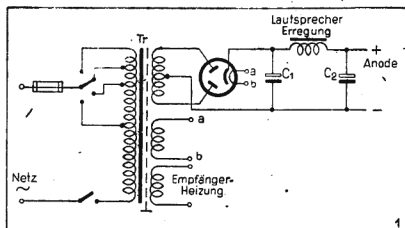


Abb. 1. Normales Netzteil mit Gleichrichter für einen Rundfunkempfänger

Ing. E. Bleicher

Immer mehr ergibt sich durch die gegenwärtigen Zeitumstände die Notwendigkeit für den zivilen Versorgungsbereich mit den Mitteln auszukommen und hausälterisch zu verfahren, die augenblicklich gegeben sind. Wenn in normalen Zeiten der Besitz — und vielleicht nach 2 bis 3 Jahren ein neu zu tätiger der Erwerb — eines modernen Rundfunkempfängers durchaus nicht als Luxus angesprochen werden kann und in weiten Kreisen zur Regel geworden ist, so ist diese Erwerbsmöglichkeit seit einiger Zeit weggefallen. Die vorhandenen Empfänger müssen also zunächst in Betrieb bleiben, ohne durch neue ersetzt zu werden. Dadurch ergibt sich zwangsläufig eine Verlagerung vom Verkauf zur Instandsetzung, die um so mehr in Erscheinung tritt, je länger die Geräte in Betrieb sind.

Neben den mannigfachen Fehlern, die nun in Rundfunkempfängern auftreten können, macht der Ausfall eines Netztransformators mehr Kopferbrechen als irgendein anderes Einzelteil. Dies rührt in erster Linie davon her, dass vielfach die Fachkenntnisse und Erfahrungen fehlen, die zur Instandsetzung von Transformatoren notwendig sind. Ist z. B. die Wicklung eines Transformators so zerstört, dass die Windungszahlen durch Abzählen schlecht festzustellen sind, so müsste der Transformator praktisch neu berechnet werden. Zweckmäßige Rechnungsarten sind aber meist nicht bekannt, es sei denn, dass die Windungszahlen auf andere Weise in Erfahrung gebracht werden. Daneben besteht in weiten Kreisen Unklarheit darüber, wie Transformatoren gewickelt werden können und müssen und was hierbei zu beachten ist.

Eine andere, gegenwärtig häufig anzutreffende Angabe besteht darin, dass eine defekte Röhre nicht mehr beschafft werden kann und durch eine andere ersetzt werden muss. Ändert sich dadurch die Gesamtbelastung des Transformators, so ist eine Umrechnung vorzunehmen und der Transformator um- bzw. neu zu wickeln. Vor allem beim Austausch von Endröhren und Gleichrichter-

röhren verschiedener Typen ist in jedem Fall eine Neurechnung angebracht und erforderlich, um nach der Inbetriebnahme des Empfängers vor unangenehmen Übererschungen bewahrt zu bleiben.

Diese Fragen, die beim Instandsetzen defekter Netztransformatoren entstehen können, sollen namentlich mit der folgenden Arbeit zusammenfassend behandelt und erörtert werden. Dabei werden alle diejenigen Fälle besonders hervorgehoben, die für die Praxis von Bedeutung sind. Es wird vor allem Wert darauf gelegt, den umfangreichen Stoff so allgemeinverständlich wie irgend möglich zur Darstellung zu bringen, um allen Funktechnikern, die sich gegenwärtig mit der Instandsetzung von Rundfunkempfängern, Verstärkern und dergl. zu befassen haben, die Kenntnisse zu vermitteln, die zum Instandsetzen, Berechnen und Neuwickeln von defekten

Netztransformatoren notwendig sind. Durch Beispiele aus der Praxis werden die Erläuterungen weitgehend ergänzt, so dass die vermittelten Grundlagen für andersartige Fälle nutzbringend anwendbar sein sollen.

Ist ein Netztransformator defekt, so sind die erforderlichen Instandsetzungsarbeiten aufzuteilen in:

- Die Suche nach der Fehlerquelle, die den Ausfall des Transformators herbeigeführt hat.
- Das Feststellen der Windungszahlen, was mitunter eine Neurechnung notwendig macht.
- Das Wickeln des Spulenkörpers und der Zusammenbau des Transformators.
- Die Prüfung des fertiggestellten Transformators.

## A. Die Suche nach der Fehlerquelle

Ein Transformator kann auf verschiedene Weise beschädigt oder ausser Betrieb gesetzt werden. In weitaus den meisten Fällen wird der Transformator durch irgendeinen Umstand überlastet, so dass er sich unzulässig, d. h. über die vorgeschriebene Grenztemperatur hinaus erwärmt, wodurch dann vielfach eine oder mehrere Transformatorwicklungen beschädigt werden. Eine Überbelastung des Transformators kann nun wiederum verschiedene Ursachen haben, die

- in der Gleichrichter- und dem anschließenden Siebteil,
- in dem Transformator selbst und
- in der übrigen Empfängerschaltung zu suchen sind. Hierauf soll nun zunächst etwas näher eingegangen werden.

### 1. Fehler im Gleichrichter- und anschließenden Siebteil

Ein Gleichrichternetzteil (Abb. 1) besteht in jedem Fall aus der sekundärseitigen Anodenspannungswicklung des Transformators, der Gleichrichterröhre oder einem sonstigen Gleichrichterelement und dem Ladeblock C<sub>1</sub>. Der Ladeblock bringt

die erste Glättung der in der Röhre gleichgerichteten Wechselspannung und des Stromes, indem C<sub>1</sub> immer dann aufgeladen wird, wenn die Amplitude der Wechselspannung eine bestimmte Grösse erreicht hat. Die so pulsierende Gleichspannung hängt dabei u. a. von der Belastung ab und wird um so grösser, je kleiner die Belastung ist. Der Ladekondensator wird daher in bezug auf die Durchschlagsfestigkeit im Leerlauf am stärksten beansprucht, da an ihm der Scheitelwert der Wechselspannung liegt. Dieser Vorgang hat besonders dann grössere Bedeutung, wenn die Gleichrichterröhre direkt geheizt ist (AZ 1) und die Empfängerröhren eine Kathode besitzen, also indirekt geheizt sind, so dass die Gleichrichterröhre zeitlich vor den Empfängerröhren zu emittieren beginnt. In diesem Fall wird also z. B. beim jedesmaligen Einschalten des Empfängers der Gleichrichter noch nicht und der Transformator nur mit der Heizung belastet, wodurch der Leerlaufzustand für die Anodenspannung gegeben ist (Abb. 2). Wie diese Vorgänge im besonderen miteinander zusammenhängen, wird bei der Behandlung der Berechnungsgrundlagen näher beschrieben.

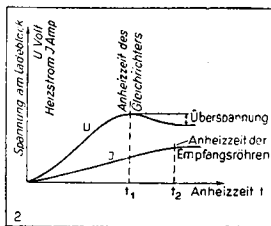


Abb. 2. Spannungsverlauf am Ladekondensator (C<sub>1</sub>) in Abhängigkeit von der Anheizzeit der Röhren

Nun werden im Gleichrichter- und Siebteil von jeher bekanntlich Elektrolyt-Kondensatoren verwendet. Der Grund zu ihrer Verwendung ist darin zu suchen, dass mit verhältnismässig einfachen Mitteln grosse Kapazitätswerte erreicht werden können, wie sie zur Siebung erforderlich sind. Die wirtschaftliche Grenze ist jedoch durch die Betriebsspannung gegeben. Das hat zur Folge, dass vor allem der Ladekondensator bis zu dieser Grenze ausgenutzt wird.

Neben diesen Vorteilen haben Elektrolyt-Kondensatoren die unangenehme Eigenschaft, im Laufe der Zeit auszutrocknen oder trockene Kondensatoren an Isolationsfestigkeit zu verlieren, wodurch sie gleichzeitig ein Einbussen an Spannungsfestigkeit erleiden. Es kommt daher verhältnismässig häufig vor, dass die Elektrolyt-Kondensatoren, in erster Linie der Ladeblock, durchschlagen und einen Kurzschluss des Gleichrichterteiles hervorrufen. Ist dies der Fall, so nimmt die Belastung für die Gleichrichterröhre und die Anodenspannung sehr stark zu. Dadurch wird einerseits die Gleichrichterröhre zerstört — zum mindesten ist sie gefährdet —, andererseits der Transformator so stark erwärmt, dass er beschädigt oder zerstört werden kann. Die unzulässige Erwärmung wird nämlich von zwei Seiten her begünstigt: Durch die ansteigende Belastung auf der Anodenspannungswachstum wächst auch die primärseitige Stromaufnahme. Beide Wicklungen überschreiten daher ihre Grenztemperatur und sind der Gefahr der Zerstörung ausgesetzt.

Bei einer derartigen Überlastung kann nun zweierlei passieren:

a) Sind die Sicherungen richtig bemessen, die zum Teil auch zusätzlich auf der Anodenspannungseite eingebaut sein können, so müssten dieselben rechtzeitig ansprechen, so dass der Transformator keinen Schaden erleiden kann. Immerhin sollen die Sicherungen bis zu einem gewissen Grade überstromträge sein, so dass es auch noch auf andere Umstände ankommt, ob zuerst der Transformator beschädigt wird oder die Sicherungen durchbrennen. Bei Beheltnis- und Notsicherungen, wie man sie in Form von Kupferdrähten gelegentlich geeignet ist einzubauen, fällt natürlich der ursprünglich gedachte Transformatorschutz weg. Bei ihrer Verwendung ist jeder Transformator beim Auftreten des geschilderten Fehlers verloren.

b) Sprechen die Sicherungen nicht sofort an, so werden die lackisolierten Kupferdrähte unzulässig erwärmt. Dadurch wird der Lack der aneinanderliegenden Drähte erweicht und fließt schliesslich an einzelnen Stellen, zum Teil an verschiedenen Berührungspunkten weg.

Die weitere Folge ist ein Windungsschluss, der an mehreren Stellen innerhalb einer Wicklungslage oder in verschiedenen Wicklungslagen gleichzeitig auftreten kann. Der den Transformator belastende Strom nimmt daraufhin noch mehr zu, die Erwärmung steigt weiter an, so dass auch die zwischen den einzelnen Wicklungslagen eingebrachten Isolationen in Mitleidenschaft gezogen werden. Auf diese Weise ist dann der Transformator bald restlos zerstört.

Windungsschlüsse durch Überlastung sind auch dann zu erwarten, wenn zwar die Sicherung nach einer gewissen Zeit angesprochen hat, aber eben nicht rechtzeitig. Dies ist immer dann der Fall, wenn nicht die richtige Sicherung eingebaut worden ist, was häufiger vorkommt, als man zunächst vermuten möchte. Ganz ähnlich sind die Verhältnisse, wenn der Transformator eine eingebaute Thermo-sicherung besitzt, wie man sie hin und wieder vorfindet. Eine derartige Sicherung ist dadurch gekennzeichnet, dass zwei Bimetallstreifen aufeinander gelötet sind und in einer einfachen Klemmvorrichtung im Spulenkörper festgehalten werden. Erwärmt sich der Transformator unzulässig, so wird die Lötstelle der beiden Streifen gelöst, die Streifen selbst voneinander getrennt und der Primärstromkreis unterbrochen. Die auf diese Weise ausgelöste Sicherung ist wieder verwendbar, indem man einfach die beiden Bimetallstreifen zusammenlötet. Schon rein äußerlich hat man bei der Lötstelle das Gefühl der Unsicherheit. Die Praxis hat auch ergeben, dass die Lötstelle entweder zu früh oder zu spät gelöst wird. Das Letztere führt bei Überlastung zu Windungsschlüssen, so dass der Zweck der Sicherung verfehlt ist. Thermo-sicherungen findet man daher nur noch in älteren Geräten.

Es kann ausserdem zu Windungsschlüssen kommen, wenn in der Gleichrichterröhre ein Elektrodenanschluss entstanden ist. Zwar müssten auch hierbei die Sicherungen ansprechen, bevor der Transformator beschädigt worden ist, doch ist dies leider nicht immer so.

In diesem Zusammenhang soll auf einen Vorgang besonders hingewiesen werden, der speziell für die Instandsetzung von grösserer Bedeutung ist. Es wird mitunter empfohlen — und ohne Überlegung mag auch mancher Funktechniker geneigt sein dies durchzuführen —, beim Austausch eines defekten Transformators gegen einen gebrauchsfähigen, der zwar die richtigen Wicklungen für die Heizungen besitzt, für eine bestehende Anodenbelastung jedoch eine zu hohe Anodenspannung abgibt, in die Sieb-kette einen Vorwiderstand nach Abb. 3 einzubauen. Zweifellos stellt sich durch

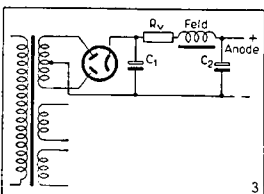


Abb. 3. Bevor der Widerstand R<sub>v</sub> zur Vermeidung der Anodenspannung beim Austausch von Netztransformatoren eingebaut wird, sind die Spannungsverhältnisse am Ladeblock C<sub>1</sub> zu untersuchen

diese Massnahme der gewünschte Spannungsabfall für die Anodenspannung ist, doch leider erst hinter dem Ladekondensator C<sub>1</sub>. Dem Siebkondensator C<sub>2</sub> wird in der Regel nichts passieren, dagegen wird vielfach eine genaue Untersuchung ergeben, dass die Spannung für den Ladeblock C<sub>1</sub> zu hoch ist. Uebersteigt die Spannung an C<sub>1</sub> den Wert der zulässigen Betriebsspannung, so ist der Ladeblock der hohen Spannungsbeanspruchung auf die Dauer nicht gewachsen. Er ist zum mindesten dann stark gefährdet, wenn auch nur ein kurzzeitiger Leerlaufzustand gegeben ist, was bei ungleich geheizten Röhren der Fall ist; ausserdem sind Streuungen in der Anheizzeit immer zu erwarten. Ohne Kenntnis der Spannungsverhältnisse muss daher von der Verwendung eines Vorwiderstandes in der Siebkette zur Verminderung der Anodenspannung abgesehen werden. Wie in solchen Fällen vorzugehen ist, wird mit den Grundlagen zur Berechnung näher erläutert.

Spannungsdurchschläge am Siebkondensator C<sub>2</sub> (Abb. 1 und 3) treten verhältnismässig selten in Erscheinung, es sei denn, dass von vornherein ein Kondensator mit zu niedriger Betriebsspannung eingebaut worden ist. Höchstens bei einem notwendigen Austausch könnte ein solcher Versagen passieren. Schlägt auch dieser Kondensator durch, so ist der Gleichrichter mit dem Transformator auf ähnliche Weise gefährdet wie bei einem Durchschlag des Ladeblocks. Welche Beschädigungen eintreten können, ist weiter oben schon geschildert worden.

Fehler an der als Siebdrossel dienenden Erregerspule des Lautsprechers, die den Transformator gefährden können, sind zwar theoretisch möglich, aber praktisch äusserst selten. Von der Darstellung derartiger Ausnahmen soll daher abgesehen werden.

## 2. Fehlerquellen im Transformator

Eine Überlastung und unzulässige Erwärmung des Transformators kann auch ohne äussere Fehlerquellen im Transformator selbst entstehen. Fast alle Transformatoren werden aus wirtschaftlichen Gründen bis knapp an die Grenze der vom VDE zugelassenen Grenztemperatur ausgenutzt. Eine entsprechende Sicherheit ist zwar dadurch gegeben, dass indirekte Messungen der Grenztemperatur mit 10%iger Überlastung der jeweiligen Nennspannung durchgeführt werden, doch gibt es immerhin einige Möglichkeiten, die zu einer weiteren Erwärmung über die vorgeschriebene Grenze hinaus beitragen.

Wie weiter oben schon erwähnt wurde, führt eine Beschädigung des Lackauftrages einzelner, nebeneinander liegender Windungen zum Windungsschluss. Diese Gefahr ist in erster Linie für Anodenspannungswicklungen gegeben. Derartige Wicklungen besitzen immer Drähte mit dem kleinsten Durchmesser des gesamten Transformators, weshalb sie in bezug auf Überlastung und Erwärmung am empfindlichsten sind. Das hat seine Begründung auch darin, dass die absolute Stärke der aufgetragenen Lackschicht bei Lackdrähten mit kleiner werdendem Drahtdurchmesser abnimmt. Der Lackauftrag beträgt z. B. bei einem Draht von 0,1 mm Nenn-Ø im Mittel 0,02 mm, dagegen bei

einem Draht von 0,3 mm Nenn-Ø bereits 0,04 mm. Die Lackisolation ist daher bei einem dünnen Draht und unzulässiger Erwärmung mehr der Beschädigung ausgesetzt als bei einem dickeren Draht. Dies ist auch für die Instandsetzung nicht ganz ausser acht zu lassen.

Windungsschlüsse können ferner dadurch entstehen, dass Windungen einer Wicklungslage infolge ungünstiger Isolation am Rand des Wickelkörpers zu einer darunter liegenden abrutschen. Unter Umständen wird durch einen solchen Vorgang die Lackschicht des Drahtes beschädigt, was zum Schluss führt. Mit Windungsschlüssen ist vielfach auch gleichzeitig eine Unterbrechung der betreffenden Wicklung verbunden, und zwar dann, wenn die Sicherung nicht rechtzeitig oder überhaupt nicht ansprechen.

Eine weitere Art von „Schlüssen“ ist der Massschluss, also eine Verbindung von einer Wicklung zum Kern des Transformators. Massschlüsse können z. B. entstehen, wenn die äussersten Windungen einer Wicklung gegen den Kern schlecht isoliert oder wiederum abgerutscht sind.

Abschliessend sei noch der sogen. Blechluss erwähnt, der dann in Erscheinung tritt, wenn die zur Verminderung der Eisenverluste durch die Umagnetisierungsarbeit zwischen den einzelnen Blechen aufgeklebten Papierisolationen unwirksam geworden sind. Das hat zur Folge, dass die Eisenverluste zunehmen und den Transformator unzulässig erwärmen.

### 3. Fehler in der übrigen Empfängerschaltung

Neben den bisher aufgezählten Fehlermöglichkeiten kann auch in der übrigen Empfängerschaltung irgendein Schaden entstanden sein, der die Überbelastung des Transformators verursacht; derartige Schäden können an Spulen, Kondensatoren usw. entstanden sein. Die Fehlerquellen sind mannigfaltig, sie sollen im einzelnen hier nicht aufgezählt werden.

### Hilfsmittel zur Fehlersuche

Mit welchen Hilfsmitteln lassen sich nun die geschilderten Fehler am raschesten auffinden? Wenn der Scha-

den nicht sofort augenfällig ist, trennt man am besten die Anodenspannungslleitung hinter dem Siebkondensator (C<sub>2</sub> in Abb. 1 und 4) von der übrigen Schaltung, um zunächst festzustellen, ob die Überbelastung des Transformators — darauf geht es ja fast immer hinaus — vom Gleichrichterteil oder von der übrigen Empfängerschaltung herrührt. Ist die Fehlerursache der Überbelastung dadurch noch nicht beseitigt, so trennt man einerseits nach Abb. 4 die Anodenspannungswicklung vom Gleichrichter oder entfernt einfach die Gleichrichteröhre, andererseits sämtliche Heizwicklungen von den Röhren. Eine rein subjektive Beurteilung, inwieweit sich der Transformator noch erwärmt, müsste jetzt möglich sein, um sagen zu können, ob ein Schaden im Gleichrichter mit Siebteil oder im Transformator zu suchen ist. Es ist aber empfehlenswert, den genaueren Weg über die Messung zu wählen.

Eine Möglichkeit hierzu besteht darin, dass man die aufgenommene Leistung des Transformators misst und mit dem Sollwert vergleicht. Da aber Wattmeter vielfach nicht vorhanden sind, kommt man zu einer sehr einfachen Lösung, indem man den Primärstrom im Leerlauf misst, was z. B. mit einem Multivari, oder besser mit einem guten Wechselstrom-mA-Meter möglich ist (Abb. 4). An Hand von allgemein gültigen Richtwerten kann man mit einer solchen Leerlaufmessung die gewünschten Feststellungen treffen. Diese Richtwerte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1

Leistungsaufnahme in Watt des Gerätes bzw. Transformators	Leerlaufstrom in mA bei 220 Volt Netzspannung	Eisenverluste in Watt (Leerlaufverluste) bei 220 Volt Netzspannung
20—40	30—40	3—5
40—80	40—70	5—9
80—120	70—120	9—12

Angenommen, an einem Transformator mit der bekannten Leistungsaufnahme von 60 Watt werde nach Auftreten der Anoden- und Heizwicklungen ein Leerlaufstrom von 50 mA gemessen, so wäre der Fehler im Gleichrichter mit Siebung zu suchen. Dies ist auch anzunehmen, wenn der gemessene Leerlauf-

strom z. B. 65 mA betragen würde. Derartige Streuungen sind durch die Verwendung von Blechsorten unterschiedlicher Qualität, d. h. Verlustziffer zu erwarten. (Die Verlustziffer gibt an, welche Wattleistungen bei einem bestimmten Blech mit einer Induktion von 10 000 Gauss im Leerlauf eintreten, auf ein Eisengewicht von 1 kg bezogen. Es werden Bleche verwendet mit einer Verlustziffer bis zu 3,6 Watt/(kg.) Mit zunehmender Verlustleistung nimmt also der Leerlaufstrom zu, wie auch aus Tabelle 1 hervorgeht.

Übersteigt der gemessene Leerlaufstrom die in Tabelle 1 angegebenen durchschnittlichen Richtwerte um mehr als die Hälfte, so liegt eine Beschädigung im Transformator vor. Ein Windungsschluss ist nun daran zu erkennen, dass der Leerlaufstrom ein Vielfaches seines Nennwertes erreicht. Auch bei einem Blechluss steigt der Leerlaufstrom entsprechend an, doch ergibt sich in der Regel nicht mehr als das 2- bis 3-fache des Richtwertes. Beide „Schlüsse“ sind also gut zu erkennen und voneinander zu unterscheiden.

Windungsschlüsse mit einem Ohmmeter oder gar mit einer Prüflampe feststellen zu wollen, ist nicht möglich. Diese Messung ist u. a. schon empfohlen worden, indem die durch einen Windungsschluss eingetretene Änderung des Ohmschen Widerstandes ein Vergleichsergebnis liefern soll. Wenn man jedoch berücksichtigt, dass bei einem Windungsschluss meist nur wenige Windungen im Verhältnis zur Gesamtwindungszahl kurzgeschlossen werden, so ist ohne weiteres einzusehen, dass Widerstandsunterschiede praktisch gar nicht feststellbar sind, ganz abgesehen davon, dass die Sollwerte der Widerstände nicht bekannt sind. Derartige Widerstandsunterschiede mit einer Prüflampe erkennen zu wollen, ist ebenfalls unmöglich. Unterbrechungen sind dagegen mit einer Lampe einwandfrei festzustellen. Sehr gut bewährt haben sich hierfür auch die schon vielerorts eingeführten Messinstrumente als Leitungsprüfer.

Zur Feststellung von Massschlüssen eignet sich zum Teil ebenfalls eine Prüflampe, die an ein Wechselstromnetz von 220 Volt angeschlossen wird. Sofern es sich um die Prüfung der Heizwicklungen oder der Primärwicklung handelt, kann die Wechselspannung von 220 Volt u. U. ausreichen, dagegen ist dies für die Anodenspannungswicklung nicht immer der Fall. Letztere führt während des Betriebes eine Wechselspannung bis zu 440 Volt — bei Leistungsverstärkern noch mehr —, so dass eine leitende Verbindung gegen den Kern des Transformators vielleicht erst bei der Betriebsspannung entsteht. Es lässt sich also nicht jeder Massschluss mit einer 220 Volt-Prüflampe ermitteln, da die Isolation dieser Spannungsbeanspruchung noch standhalten kann und erst mit der höheren Betriebsspannung durchschlägt, also dann den Massschluss einleitet. Massschlüsse werden deshalb besser mit höherer Wechselspannung ermitteln. In der Regel genügt für Kleintransformatoren eine Wechselspannung von 500 bis 1000 Volt (Abb. 5).

Der Vorteil der höheren Spannung liegt darin, dass die Stelle des Massschlusses vielfach erkennbar ist. Leitende Verbindungen mit dem Kern treten

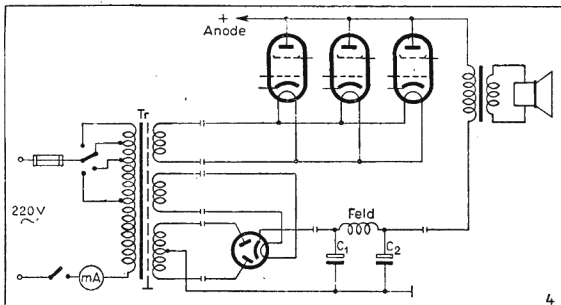


Abb. 4. Der zur Beschädigung des Transformators geführte Fehler wird durch systematisches Auftrennen des Netzteses gefunden. Durch Messung des Leerlaufstromes kann auch die Ursache im Transformator festgestellt werden.

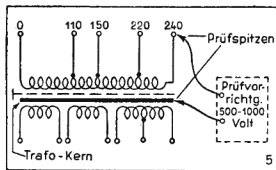


Abb. 5. Prüfung eines Transformators auf Massechluss

besonders an den Seiten der Wicklungen auf, die dem Kern am nächsten sind. Die hohe Prüfspannung ergibt dann das Ueberspringen eines Funken an der Schluusstelle, die auf diese Weise leicht zu erkennen ist. Wenn es sich nur um einen Massechluss handelt, genügt oft ein Stückchen Oelleine oder Pressspan, das zwischen die Schluusstelle und den Kern geschoben wird, so dass der Massechluss u. U. auf diese Weise beseitigt werden kann.

Beim Auseinandernehmen eines Transformators kann man insofern auf erhöhte Schwierigkeiten stoßen, als der gesamte Transformator mit den Wicklungen und dem Eisenkern vergossen sein kann. Bevor man den Eisenkern auseinandernehmen kann, ist zunächst die Vergussmasse, die derjenigen für Starkstromkabel gleichkommt, zu entfernen. Am raschesten würde man unter Verwendung eines Lösungsmittels zum Ziel kommen, die Vergussmasse also abwaschen. Solche Lösungsmittel stehen aber im allgemeinen nicht zur Verfügung, so dass nichts anderes übrig bleibt, als zu versuchen, die Masse abzuschaben.

## B. Das Feststellen der Windungszahlen

Ist die Ursache des Fehlers, die zu einer Beschädigung des Transformators geführt hat, auf Grund der vorstehend beschriebenen Untersuchungen festgestellt, so muss der Transformator ausgebaut werden. Um durch das Ablöten der Wicklungsenden des Transformators von den Anschlüssen beim Wiedereinbau keine Schaltfehler zu erhalten, empfiehlt es sich, die abgelöteten Wicklungsenden und die zugehörigen Lötstellen zu bezeichnen. Hierzu verwendet man am besten kleine Papieranhänger, die mit den entsprechenden Bezeichnungen versehen und durch eine Schlaufenbildung leicht befestigt werden können. Meist besitzt der Transformator eine Schaltplatte, auf der die Sicherungen, der Spannungswähler und verschiedene Lötösen angebracht sind. Die verschiedenen Lötstellen sind also nicht ganz übersichtlich, weshalb sich eine Kennzeichnung als zweckmässig erweist.

### Das Demontieren

Die nächste Aufgabe besteht nun darin, festzustellen, welche Besonderheiten der ausgebauter Transformator abgesehen von den Wicklungen aufweist. In allen Fällen handelt es sich um Spulen mit Eisenkern, der aus einzelnen Blechen von 0,35 bis 0,5 mm Stärke geschachtelt, d. h. zusammengesetzt ist. Das Schachteln dieser Bleche ist nun ganz verschieden und hängt einerseits von dem Verwendungszweck, andererseits von der Herstellerfirma ab. Im einzelnen sind bei Netztransformatoren in bezug auf das Schachteln des Eisenkernes folgende Fälle möglich:

Der Zweck des Eisenkernes bei Netztransformatoren ist die Erhöhung der magnetischen Feldlinien gegenüber einer eisenlosen Spule und die Verkettung dieser Feldlinien mit allen Windungen der Wicklung. Der Eisenkern muss also ringum geschlossen sein, wobei das

Streifeld, das nicht mit allen Windungen verkettet ist, möglichst gering sein soll. Das Eisen ist dann am besten ausgenützt. Dies wird dadurch erreicht, dass man die einzelnen Bleche wechselseitig schachtelt, wie es Abb. 6 z. B. für E-Bleche zeigt. Zwischen zwei wechselseitigen E-Blechen liegt dann immer ein Jochblech (Abb. 6a), so dass damit der Eisenkreis geschlossen ist. Hin und wieder wird man auch Transformatoren mit E-Blechen vorfinden, die zwar wechselseitig geschachtelt sind, bei denen jedoch drei Bleche gleichzeitig in derselben Schachtelrichtung aufeinanderfolgen. Zwischen je drei E-Blechen liegen dann wiederum drei Jochbleche (Abb. 6b). Die erzielte Wirkung ist in beiden Fällen dieselbe. Ein derart mit Eisenblechen nach Abb. 6 aufgebauter Eisenkern muss beim Zusammenbau in derselben Weise wieder geschachtelt werden.

Ausser diesen E-Blechen werden bei einzelnen Fabrikaten noch vielfach geschlossene Mantelbleche nach Abb. 7 anzutreffen sein. Auch diese Bleche sind bei Netztransformatoren wechselseitig geschachtelt, d. h. also derart, dass die bewegliche Zunge zweier aufeinanderfolgender Bleche um 180 Grad versetzt ist.

Es gibt weiterhin noch eine andere Möglichkeit des Schachtelns, von der eine bestimmte Herstellerfirma Gebrauch macht. Der Eisenkern besteht ebenfalls aus E-Blechen, jedoch sind dieselben in diesem Fall einseitig geschachtelt, wie es Abb. 8 zeigt. Auch die Jochbleche sind einseitig geschachtelt und liegen auf den E-Blechen. Damit nun kein Luftspalt entsteht, werden beide mit einer Masse bestimmter Zusammensetzung aus Eisenpulver und einem Bindemittel zusammengeklebt und dadurch miteinander verbunden. Die Wirkung in magnetischer Hinsicht ist damit genau so, wie wenn die Bleche wechselseitig geschachtelt worden wären. Der Nachteil derart zusammengeklebter Bleche beim Instandsetzen ist jedoch, dass sich das mit Eisenpulver versehene Bindemittel nachträglich schlecht auflösen lässt, so dass die magnetische Verbindung nach dem Zusammenkleben schlechter wäre als ursprünglich. Man hilft sich dann am besten so, dass man das Eisenpulver vorsichtig abschabt — wobei die Bleche nachher keine Beulen oder eine Gratbildung aufweisen dürfen — und den Eisenkern beim Zusammensetzen des Transformators wechselseitig schachtelt, wie es in Abb. 6 dargestellt ist.

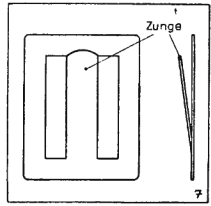


Abb. 7. Mantelblech mit beweglicher Zunge

Wie weit dies im einzelnen gelingt, hängt von der Geschicklichkeit des Betreffenden ab. Wichtig ist hierbei, dass vor allem die Stirnseiten der Bleche von der Masse einwandfrei gesäubert werden, da sich sonst die Bleche schlecht schachteln lassen. Ausserdem dürfen die auf die Bleche geklebten Papierisolationen nicht beschädigt werden.

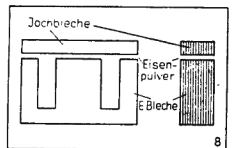


Abb. 8. Einseitig geschachtelter Eisenkern mit E-Blechen und Eisenpulver zusammengeklebt

Nach dem Entfernen der geschachtelten Bleche kann mit dem Abwickeln der einzelnen Wicklungen begonnen werden. Hiermit verbunden ist gleichzeitig die Erfassung der Windungszahlen. Bevor hierauf näher eingegangen wird, soll noch etwas über den Spulenkörper gesagt werden, was allgemein interessieren dürfte.

### Der Spulenkörper ist defekt

Beim Auseinandernehmen des Eisenkernes, vor allem aber auch beim Abwickeln der verschiedenen Wicklungen kommt es häufig vor, dass der Spulenkörper beschädigt wird. In der Regel handelt es sich um Spulenkörper aus Pressspan oder Elektrolackplatte, bei denen Wickelkern und seitliche Flanschen zusammengeklebt sind. Für derartige Spulenkörper gibt es nun verschiedene Herstellungsmöglichkeiten.

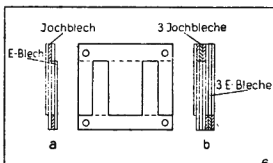


Abb. 6. Wechselseitig geschachtelter Eisenkern mit E-Blechen:  
a) abwechselnd mit je einem E-Blech und Jochblech  
b) abwechselnd mit je 3 E-Blechen und 3 Jochblechen



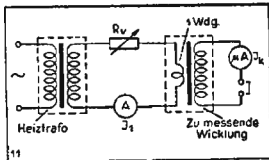


Abb. 11. Mess-Schaltung zur Festlegung der Windungszahlen von Transformatoren

Zunächst bleibt der Stromkreis der zu messenden Wicklung offen (Kurzschlussbügel entfernt). Der Heiztransformator wird nun eingeschaltet und mit Hilfe des Vorwiderstandes R, ein bestimmter Strom  $J_1$ , z. B. 2 Amp., eingestellt. Schliesst man nun den Galvanometerstromkreis, so fließt ein Kurzschlussstrom  $J_2$ , z. B. 0,002 Amp. Die gesuchte Windungszahl ist dann:

$$w = \frac{J_1}{J_2} \cdot z, \text{ z. B. } \frac{2}{0,002} = 1000. \quad (1)$$

Man erkennt, dass die Genauigkeit der errechneten Windungszahl in erster Linie von der Genauigkeit der Messung des Kurzschlussstromes  $J_2$ , d. h. also von dem Galvanometer abhängt. Wenn daher kein genau anzeigendes Galvanometer zur Verfügung steht, wird die errechnete Windungszahl nicht stimmen. Das Messverfahren ist auch nur dann brauchbar, wenn die zu messende Wicklung nicht beschädigt oder unterbrochen ist. Man wird somit auf diese Weise nicht jede Wicklung untersuchen können.

Bei Netztransformatoren kann man sich aber auf eine andere Art helfen. Angenommen, die Anodenspannungswicklung ist an zwei Stellen unterbrochen, so dass die Windungszahl derselben mit dem angegebenen Messverfahren nach Abb. 11 nicht bestimmt werden kann. Dagegen soll auf Grund einer Messung angenommen werden, dass die Primärwicklung unbeschädigt ist. Wir bestimmen daher nach der Messschaltung Abb. 11 die den entsprechenden Netzspannungen zugehörigen Windungszahlen der Primärwicklung. Nach dem Induktionsgesetz lässt sich nun verhältnismässig einfach die Windungszahl der Anodenspannungswicklung errechnen. Ein Beispiel möge dies aufzeigen.

Auf Grund der Strommessungen mit der gesamten Primärwicklung von 0 bis 220 Volt sei nach Formel 1) eine Windungszahl von 738 errechnet worden. Daraus bestimmen wir nun die Windungszahl, die für 1 Volt notwendig ist. Unter Berücksichtigung des Spannungsabfalles auf der Primärseite rechnen wir nicht mit 220 Volt, sondern mit 216 Volt (siehe auch die weiter unten folgenden Grundlagen zur Berechnung). Man erhält dann:

$$\text{Wdg/Volt} = \frac{738}{216} = 3,42. \quad (2)$$

Da das Induktionsgesetz aussagt, dass sich die Spannungen verhalten wie die Windungszahlen, gilt Formel 2) auch für die Anodenspannungswicklung. Wenn man daher am Ladekondensator bei Belastung z. B. 380 Volt Gleichspannung benötigt (dieser Wert ist dem Empfänger-schaltbild zu entnehmen), was einer Wechselspannung an der Anodenspannungswicklung von 365 Volt entsprechen möge, so kann man nunmehr die zugehörige Windungszahl nach Formel 2)

ausrechnen. Auch hierbei ist der Spannungsabfall zu berücksichtigen, der diesmal nicht abgezogen, sondern hinzugezählt werden muss. Er betrage z. B. 2%, womit sich eine Anodenspannungswicklung von 372 Volt ergibt. Nach 2) ist dann die gesuchte Windungszahl

$$w = 372 \cdot 3,42 = 1272.$$

Genau dieselbe Rechnung lässt sich auch mit der Windungszahl einer Heizwicklung durchführen, die leicht durch Abzählen feststellbar ist. Angenommen, wir haben für eine Heizspannung von 6,3 Volt 23 Windungen gezählt, so lassen sich wieder die Wdg/Volt bestimmen. Mit guter Sicherheit kann angenommen werden, dass der Spannungsabfall 0,5 Volt beträgt, so dass wir mit 6,8 Volt rechnen müssen. Wir erhalten damit

$$\text{Wdg/Volt} = \frac{23}{6,8} = 3,41 \quad (3)$$

Das Ergebnis von 3) stimmt nun mit 2) nicht ganz überein. Solche Unterschiede ergeben sich meist dadurch, dass man bei der Berechnung der Wicklungen für die Heizung oft eine Windung ungenutzt abnimmt, sofern sich kleine Unstimmigkeiten im Vergleich zu den anderen Wicklungen herausgestellt haben. Die Ergebnisse von 2) und 3) weichen aber nur 3% voneinander ab, was immer noch innerhalb der meist geforderten Spannungstoleranz von  $\pm 5\%$  liegt.

**Die Berechnung von Netztransformatoren**

In all den Fällen, in denen die Erfassung der Windungszahlen auf eine der oben geschilderten Weise nicht gelingt, muss der Transformator neu berechnet werden. Die Rechnung vereinfacht sich nun insofern, als die Grösse des Eisenkernes und die Abmessungen der Bleche bekannt sind. Um zu einer untrübenden Gesamtübersicht zu kommen, umfassen die folgenden Ausführungen die vollständigen Grundlagen zur Berechnung, soweit sie notwendig sind. Das ist schon deshalb zweckmässig, weil z. B. bei Umbauarbeiten von Rundfunkempfängern, die gegenwärtig häufig vorkommen, auch Änderungen der Wicklungen des Netztransformators erforderlich werden können, was mitunter zu einer völligen Neurechnung führt. (Die Berechnungsunterlagen werden entnommen aus: „Der Wechselrichter, Teil II, Zerhacker und Transformatoren“ von Ingenieur E. Bleicher, Lehrmeister-Rundfunk-Bücherei Nr. 2049, Verlag Hachmeister & Thal, Leipzig 1943. Preis 0,50 RM.)

Der Zweck eines Transformators ist die Übertragung einer ganz bestimmten Leistung, wobei die beiden leistungsbestimmenden Grössen Strom und Spannung auf der Sekundärseite nach dem Induktionsgesetz in die gewünschten Grössen umgeformt werden. Die Umformung geschieht zwar nicht verlustlos, doch soll zunächst von den Verlusten abgesehen werden. In einer Formel ausgedrückt heisst das also, dass der Transformator auf der Primärseite eine Leistung  $N_1$  aufnimmt, die der abgegebenen Leistung  $N_2$  auf der Sekundärseite entspricht. Im verlustlosen Transformator ist daher

$$N_1 = N_2 \text{ Watt.} \quad (3)$$

Jede Leistung setzt sich nun zusammen aus dem Produkt: Spannung  $U$  mal Strom  $J$ , so dass man für Formel 3) auch schreiben kann:

$$U_1 \cdot J_1 = U_2 \cdot J_2 \text{ Watt.} \quad (4)$$

In bezug auf die zu übertragende Leistung ist es also gleichgültig, ob die Spannung hoch und der Strom niedrig gewählt werden oder umgekehrt. Soll der Transformator z. B. 60 Watt abgeben ( $N_2$ ), so kann eine der beiden Grössen  $U_2$  und  $J_2$  beliebig gewählt werden, wobei sich dann die andere von selbst ergibt. Bei einer gewünschten Sekundärspannung von beispielsweise 6 Volt kann ein Strom von

$$J_2 = \frac{N_2}{U_2} = \frac{60}{6} = 10 \text{ Amp.}$$

entnommen werden. Sind für irgendeinen Zweck 600 Volt nötig, so darf der belastende Strom bei der angenehmen Leistung

$$J_2 = \frac{60}{600} = 0,1 \text{ Amp.}$$

betragen. Ganz entsprechend sind die Verhältnisse auf der Primärseite, wobei die Primärspannung  $U_1$  meist als gegeben festliegt.

Man kann diese Zusammenhänge auch etwas anders ausdrücken: Die aufgenommene Leistung  $N_1$  ergibt sich aus den beliebigen Werten von Strom und Spannung auf der Sekundärseite, wenn man wiederum von den Verlusten absieht. Beträgt die sekundäre Belastung z. B.  $J_2 = 0,5$  Amp. bei einer Spannung von  $U_2 = 250$  Volt, dann wird (ohne Verluste)

$$N_1 = N_2 = 250 \cdot 0,5 = 125 \text{ Watt.}$$

Man erkennt hieraus gleichzeitig, dass es in bezug auf die aufgenommene Leistung  $N_1$  gleichgültig ist, wie sich die Einzelbeiträge der Sekundärseite zusammensetzen. Die sekundäre Gesamtleistung  $N_2$  kann deshalb auch aus verschiedenen Einzelleistungen bestehen, deren Summe dann eben die Gesamtleistung  $N_2$  und damit die primäre Leistungsaufnahme  $N_1$  (ohne Verluste) ergibt.

Die Leistungsumsetzung im Transformator erfolgt aber nicht verlustlos, so dass für den genauen Wert von  $N_1$  die Verluste noch hinzurechnen sind. Diese Verluste setzen sich nun zusammen aus den Einzelverlusten  $N_v$  auf der Primär- und Sekundärseite des Transformators. Die Sekundärverluste  $N_{v2}$  entstehen bei Belastung in der Wicklung, es sind daher zunächst Kupferverluste  $N_{Cu2}$  deren Grösse von dem Widerstandswert der Wicklung und der Belastung abhängt. Wird zur Gleichrichtung der sekundären Wechselspannung eine Röhre oder irgendein Gleichrichter-element verwendet, so entstehen in dieser Röhre oder dem Gleichrichter-element zusätzliche Verluste  $N_{G1}$ , die der Transformator zu decken hat. Ebenso bestehen die primären Verluste  $N_{v1}$  zunächst aus den bei Belastung eintretenden Kupferverlusten  $N_{Cu1}$ . Hinzu kommen ausserdem Verluste, die auch im Leerlauf, also ohne sekundäre Belastung eintreten: Die Eisenverluste  $N_E$ . Sie entstehen durch die Ummagnetisierungsarbeit im Eisenkern, hervorgerufen durch das wechselnde magnetische Feld entsprechend der angelegten Wechselspannung. Die Eisenverluste bestehen in der Hauptsache aus den Wirbelstrom-Verlusten und den Hysterese-Verlusten, die sich vorwiegend in Wärme umsetzen. Die Grösse der Eisenverluste wird im wesentlichen durch drei Faktoren festgelegt: Durch die Netzfrequenz, die Induktion und das Gewicht des Eisenkernes. Während die Frequenz und die Induktion als gegeben angesehen

werden können, steigen die Eisen- oder Leerlaufverluste mit zunehmender Grösse des Eisenkernes. Die erreichbaren Absolutwerte sind in Tabelle 1 als Richtwerte angegeben.

Für die genaue Berechnung der aufgenommenen Leistung  $N_1$  kommt man daher unter Berücksichtigung dieser Verlustleistungen zu folgender Formel:

$$N_1 = N_2 + N_{v1} + N_{v2} \text{ Watt} \quad 5)$$

wobei  $N_{v1} = N_{Cu1} + N_E \text{ Watt} \quad 6)$   
 $N_{v2} = N_{Cu2} (+ N_G) \text{ Watt} \quad 7)$

zu setzen sind. Aus der Leistungsformel 5) lassen sich nunmehr alle weiteren, den Transformator bestimmenden Werte der Wicklung und des Eisenkernes herleiten, so dass die erste Arbeit aus der Berechnung der aufgenommenen Leistung  $N_1$  besteht.

Als weitere Folge der Rechnung tritt die Festlegung des Eisenkernes mit dem Eisenquerschnitt  $Q_e$  und den Abmessungen der Bleche in den Vordergrund. Wollte man die interessierenden Grössen des Eisenkernes genau berechnen, so müsste man die hierfür geltenden magnetischen Gesetzmässigkeiten zum Ansatz bringen, wobei mindestens die Annahme eines Erfahrungswertes nötig wäre. Die Praxis hat jedoch gezeigt, dass eine solch umfangreiche Rechnung für Kleintransformatoren nicht erforderlich ist. Mit hinreichender Genauigkeit können Erfahrungsformeln verwendet werden, die in jedem Fall brauchbare Ergebnisse liefern. Vor allem interessiert die Grösse des wirksamen Eisenquerschnittes  $Q_e$ , die auch bei der Berechnung der Wickelraten in Erscheinung tritt.  $Q_e$  lässt sich sehr einfach bestimmen nach folgender Erfahrungsformel:

$$Q_e = 1,2 \sqrt{N_1} \text{ cm}^2 \quad 8)$$

worin  $N_1$  die aufgenommene Leistung nach Formel 5) in Watt bedeutet.

$Q_e$  stellt den „reinen“ Eisenquerschnitt dar. Zur Verkleinerung der Wirbelstromverluste sind die einzelnen Bleche einseitig mit Papier beklebt. Um die „Schachtelhöhe“  $h$  des geschichteten Kernes zu erhalten (Abb. 12), ist daher noch ein Zuschlag zu machen, der die Papierisolation berücksichtigt. Als guter Durchschnittswert gilt ein Zuschlag von 10%, oder anders ausgedrückt beträgt der „Füllfaktor“  $90\% = 0,9$ . Die Schachtelhöhe errechnet sich somit zu

$$h = \frac{Q_e}{a \cdot 0,9} \text{ cm} \quad 9)$$

oder  $Q_e = a \cdot h \cdot 0,9 \text{ cm}^2 \quad 10)$

Weiterhin ist von Wichtigkeit, wenig-

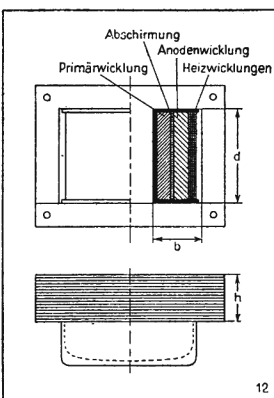


Abb. 12. Aufbauzeichnung des Transformators zur Berechnungsbeispiel

stens annäherungsweise vorausbestimmen, welche sonstigen Abmessungen der Eisenkern voraussichtlich haben wird. Auch hierfür verwendet man am besten eine Erfahrungsformel, die die entsprechenden Anhaltspunkte liefert. Nach den bisherigen Ausführungen ist ohne weiteres einzusehen, dass die Abmessungen des Eisenkernes mit zunehmender Leistung grösser werden müssen. Je grösser die zu übertragende Leistung sein wird, um so grössere Bleche sind zu verwenden. Es ist ausserdem einleuchtend, dass auch die Wicklung um so grössere Ausmasse annimmt, je grösser die Leistung ist. Das bedeutet dann gleichzeitig, dass der zur Verfügung stehende Wickelraum, oder was gleichbedeutend ist mit dem Fensterquerschnitt  $F = b \cdot d$  des Eisenbleches (Abb. 12), ebenfalls mit zunehmender Leistung grösser wird. Mit dem Querschnitt  $Q_e$  des Eisenkernes und dem Fensterquerschnitt  $F$  ist aber jedes Blech zum grössten Teil festgelegt, jedenfalls genügen diese Angaben, um ein Blech auszuwählen oder ein vorhandenes auf seine Brauchbarkeit zu untersuchen. Mit folgender Näherungsformel lassen sich nun die Abmessungen des Fensterquerschnittes ungefähr ausrechnen:

$$F = \frac{\sqrt{N_1}}{1,2} \text{ cm}^2 \quad 11)$$

Damit ist dann der Eisenkern zunächst festgelegt. Um die Formel praktisch verwerten zu können, sind für die beiden gebräuchlichsten Blechschnitte nach Abb. 13 (13a E-Blech, 13b Mantelblech) die Abmessungen der verschiedenen Blechgrössen, die immer wieder anzutreffen sind, in den Tabellen 2 und 3 zusammengestellt. An Hand dieser Tabellen lässt sich nach Formel 11) gleichzeitig ausrechnen, welche Leistung mit einem bestimmten Blech übertragen werden kann, wobei man im allgemeinen voraussetzt, dass der Eisenquerschnitt  $Q_e$  aus wickeltechnischen Gründen quadratisch ist. Nicht zu grosse Abweichungen hiervon sind aber ohne weiteres noch möglich.

Tabelle 2. Zusammenstellung über die Masse von E-Blechen

Nr. des Bleches	a	b	c	d	e	f	g	i
1	18	9	9	27	9	54	36	9
2	20	10	10	30	10	60	40	10
3	24	12	12	36	12	72	48	12
4	25	13	13	38,5	13	77	51,5	13
5	26	13	13	39	13	78	52	13
6	26	15	13	41	15	82	56	15
7	28	14	14	42	14	84	56	14
8	28	17	14	59	17	102	76	17
9	30	16	16	48	16	96	63	16
10	30	18,5	15	48,5	18,5	97	64,5	18,5
11	32	16	16	48	16	96	64	16
12	34	19	19	55	19	110	74	19
13	35	18	18	53,5	18	107	71,5	18
14	40	20	20	60	20	120	80	20
15	45	22,5	22,5	67,5	22,5	135	90	22,5

Tabelle 3. Zusammenstellung über die Masse von Mantelblechen

Nr. des Bleches	a	b	c	d	e	f	g
1	14,5	16,5	9,25	56	12	66	80
2	16	16,25	8	40,5	8	64,5	56,5
3	18	14,5	9	48	9	65	66
4	20	18	10	55	10	76	75
5	20	18	11	52	13	82	78
6	20	18,5	13	69	13	83	95
7	20	19	9	58	9	76	76
8	22	19,5	11,5	65	11,5	84	88
9	22	20	10,5	69	13	83	95
10	24	16	12	55	12	80	79
11	24	17	14	58	14	86	86
12	25	18	12,5	95	12,5	86	120
13	25	21	13	74	13	93	100
14	30	17	15	72	15	94	102
15	30	20	15	91	15	100	121
16	30	23	15	78	15	106	108
17	33	34,5	19	114	18	140	150
18	35	24	18,5	95	18,5	120	132

Die folgenden Betrachtungen behandeln nun die Berechnung der Wickelraten. Um die Rechnung zu vereinfachen, bestimmt man, wie weiter oben bereits ausgeführt wurde, die Windungszahl  $w_v$ , die für 1 Volt benötigt wird. Diese allgemein gültige Formel lautet nach dem Induktionsgesetz

$$w_v = \frac{10^8}{4,44 \cdot f \cdot \mathcal{B} \cdot Q_e} \text{ Wdg pro Volt, } 12)$$

worin  $f$  die Netzfrequenz,  $\mathcal{B}$  die Induktion in Gauss (magnetische Feldlinien pro  $\text{cm}^2$ ) und  $Q_e$  den wirksamen Eisenquerschnitt in  $\text{cm}^2$  bedeuten. Da nun in den meisten Fällen mit einer Netzfrequenz von  $f = 50$  gerechnet werden kann, erhält man die endgültige Formel zur Berechnung der pro Volt notwendigen Windungszahl

$$W_v = \frac{10^8}{222 \cdot \mathcal{B} \cdot Q_e} \text{ Wdg pro Volt } 13)$$

Der Eisenquerschnitt  $Q_e$  ist nach Formel 8) schon bestimmt worden. Die In-

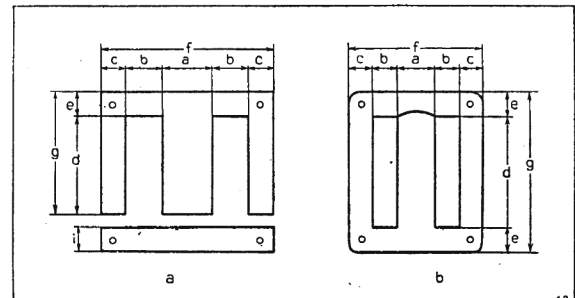


Abb. 13. Die beiden bei Kleintransformatoren anzutreffenden Blechschnitte a) E-Blech, b) Mantelblech

duktion  $\mathcal{B}$  wird für Kleintransformatoren auf 10 000 bis 12 000 Gauss festgesetzt, so dass damit zur Berechnung von  $w$  alle Einzelfaktoren bekannt sind. Die Gesamtwindungszahl erhält man nun dadurch, dass man das Ergebnis von Formel 13) mit der gewünschten oder bekannten Spannung der jeweiligen Wicklung multipliziert unter gleichzeitiger, meist nachträglicher Berücksichtigung der entsprechenden Spannungsabfälle. Es ist also

$$w = w_v \cdot (U \pm u_v) \text{ Windungen } 14)$$

worin  $w_v$  das Ergebnis nach Formel 13),  $U$  die Spannung der betreffenden Primär- oder Sekundärwicklung und  $u_v$  der dazugehörige Spannungsabfall bedeuten.

Die zunächst in erster Annäherung nach Formel 13) errechneten Windungszahlen stellen also nicht das Endergebnis dar, weil ja der Spannungsabfall vom Widerstand der Wicklung, der noch nicht genau bekannt ist, und von der Belastung abhängt. Man wird daher nach den nunmehr folgenden Rechnungen die Windungszahlen nachträglich mit Formel 14) etwas korrigieren müssen.

Zur Berechnung des Wicklungswiderstandes ist die Drahtstärke erforderlich. Den Durchmesser des Drahtes findet man über den Querschnitt desselben für eine bestimmte Belastung, den man aus nachstehender Beziehung erhält:

$$q = \frac{J}{s} \text{ mm}^2 \quad 15)$$

Hierin sind  $J$  der belastende Strom in Amp. der betreffenden Wicklung und  $s$  die Stromdichte in Amp./mm<sup>2</sup>. In der Praxis wählt man:

- für Transformatoren bis 70 Watt  
 $s = 3,0 \text{ bis } 3,5 \text{ Amp/mm}^2$
- für Transformatoren über 70 Watt  
 $s = 2,5 \text{ bis } 3,0 \text{ Amp/mm}^2$

An Hand der Tabelle 4, die auch für die weitere Rechnung von Nutzen ist, lässt sich dann der Drahtdurchmesser festlegen.

Nachdem die Windungszahlen in erster Annäherung errechnet und die Drahtstärken bekannt sind, besteht die nächste Aufgabe in der Bestimmung des Wicklungswiderstandes mit gleichzeitiger Kontrolle des zur Verfügung stehenden Wickelraumes. Man kommt am schnellsten zum Ziel, wenn man die gesamte Drahtlänge der einzelnen Wicklungen ausrechnet, wobei man den mittleren Wicklungsumfang jeder Wicklung benutzt und mit der Windungszahl multipliziert. Mit der Spalte 4) in Tabelle 4, die die Ohmwerte pro Meter für die verschiedenen Drahtstärken angibt, ist der Widerstand der betreffenden Wicklung dann leicht auszurechnen. Mit diesen gefundenen Widerstandswerten werden die zuerst errechneten Windungszahlen korrigiert, indem man den Spannungsabfall  $u_v = R \cdot J$  in Formel 14) einsetzt (siehe auch C. Das Wickeln.)

Zur Kontrolle des Wickelraumes ist für jede Wicklung die Windungszahl für eine Wickellage und die zu wickelnden Lagen zu bestimmen, woraus sich unter Berücksichtigung der Isolation die Gesamthöhe der Wicklung ergibt. Reicht der Wickelraum nicht aus, oder ist die Wicklung vermutlich knapp unterzubringen, so vergrößert man den Eisenquerschnitt  $Q_e$  ein wenig, indem man den Eisenkerz etwas höher schachtelt. Aus wickeltechnischen Gründen macht man aber die Schachtelhöhe  $h$  (Abb. 12) nicht grösser als

Tabelle 4. Zusammenstellung der mechanischen und elektrischen Grössen zur Berechnung von Transformatoren

blank	Draht-Durchm. in mm		Querschnitt in mm <sup>2</sup>	Cu-Draht Ohm pro m $\rho = 0,0175$	Gewicht in kg pro 100 m
	mit Lackisol.	ohne			
0,04	0,06	0,001 256	13,926	0,001	
0,05	0,07	0,001 96	8,94	0,001 6	
0,06	0,08	0,002 83	6,189	0,002 3	
0,07	0,09	0,003 85	4,547	0,003 1	
0,08	0,10	0,005 03	3,432	0,004 1	
0,09	0,11	0,006 36	2,751	0,005 2	
0,10	0,12	0,007 85	2,23	0,006 4	
0,11	0,14	0,009 5	1,841	0,007 7	
0,12	0,15	0,011 3	1,547	0,009 2	
0,13	0,16	0,013 3	1,316	0,010 8	
0,14	0,17	0,015 4	1,136	0,012 3	
0,15	0,18	0,017 7	0,994	0,014 4	
0,16	0,19	0,020 1	0,871	0,016 5	
0,17	0,20	0,022 7	0,772	0,018 5	
0,18	0,21	0,025 4	0,687	0,020 7	
0,19	0,22	0,028 35	0,618	0,023 1	
0,20	0,23	0,031 4	0,557	0,025 5	
0,22	0,25	0,038	0,461	0,031	
0,25	0,28	0,048 1	0,356 5	0,04	
0,28	0,32	0,061 6	0,284	0,05	
0,30	0,34	0,070 7	0,247 6	0,075 5	
0,35	0,39	0,096	0,181 89	0,078 8	
0,40	0,44	0,123 6	0,139 26	0,010 2	
0,45	0,50	0,159	0,110 94	0,13	
0,50	0,55	0,196	0,089 4	0,16	
0,55	0,61	0,238	0,071 89	0,194	
0,60	0,66	0,283	0,061 56	0,23	
0,65	0,71	0,332	0,052 74	0,27	
0,70	0,76	0,385	0,045 47	0,315	
0,80	0,87	0,503	0,034 82	0,41	
0,90	0,97	0,636	0,027 51	0,52	
1,00	1,07	0,783	0,022 13	0,64	
1,10	1,18	0,95	0,018 41	0,775	
1,20	1,28	1,13	0,015 47	0,92	
1,40	1,48	1,54	0,011 36	1,25	
1,60	1,70	2,01	0,008 71	1,64	
1,80	1,92	2,54	0,006 87	2	
2	2,12	3,14	0,005 57	2,5	
2,20	2,35	3,8	0,004 61	3,1	
2,50	2,75	4,9	0,003 56	4	
2,80	3,08	6,15	0,002 84	5	
3	3,30	7,07	0,002 48	5,75	

$$h \leq 1,4 \cdot a \text{ mm. } 16)$$

Durch die Vergrößerung des Eisenquerschnittes  $Q_e$  sind dann die Windungszahlen nach Formel 13) und 14) neu zu rechnen. Da  $Q_e$  im Nenner von Formel 13) steht, verkleinert sich dadurch die Windungszahl. Reicht diese Massnahme allein nicht aus, so muss dann ein grösseres Blech gewählt werden.

**Rechnungsbeispiele:**

Zum besseren Verständnis der bisherigen Ausführungen soll ein praktisches Beispiel gerechnet werden.

**1. Beispiel:** Es sei ein Transformator zu bauen, der sekundärseitig folgende Spannungs- und Belastungswerte haben soll: Eine Anodenwicklung für eine Doppelweg-Gleichrichteröhre mit  $2 \times 360$  Volt Wechselspannung und 80 mA (0,08 Amp), eine Gleichrichter-Heizwicklung mit 6,3 Volt und 1,1 Amp und eine Heizwicklung für weitere Röhren mit 6,3 Volt und 2 Amp belastbar. Der Transformator soll mit E-Blechen aufgebaut werden.

Der Transformator muss eine Leistung abgeben von

$$N_2 = 360 \cdot 0,08 + 6,3 \cdot 1,1 + 6,3 \cdot 2 = 48,33 \text{ Watt.}$$

Für die Berechnung der aufgenommenen Leistung  $N_1$  kann in erster Annäherung ganz allgemein je 5% von  $N_2$  für die Primären und sekundären Kupferverluste angenommen werden. Zur Berücksichtigung der Eisenverluste (Leerlaufverluste) gelten die in Tabelle 1 zusammengestellten Richtwerte. Hieraus entnehmen wir für  $N_E = 6$  Watt. Die

aufgenommene Leistung ergibt sich also angenähert zu

$$N_1 = 48,33 + 2 \cdot 0,05 \cdot 48,33 + 6 = 59,16 \text{ Watt.}$$

Nach Formel 8) resultiert daraus ein Eisenquerschnitt von

$$Q_e = 1,2 \sqrt{59,16} = 9,23 \text{ cm}^2.$$

Der Fensterquerschnitt des Bleches nach Formel 11) wird nun

$$F = \frac{\sqrt{59,16}}{1,2} = 6,41 \text{ cm}^2.$$

Damit man einen einigermassen quadratischen Querschnitt erhält, zieht man aus diesem Ergebnis die Wurzel und wählt daraufhin das am nächsten liegende Blech mit dem Mass a (Abb. 13a), das ausserdem ungefähr den Fensterquerschnitt ergibt. Es ist daher  $\sqrt{6,41} = 2,53 \text{ cm} = 25,3 \text{ mm}$ . Ein Blech mit der Stegbreite (Mass a in Abb. 13a) von 25 mm nach Tabelle 2 ergibt einen Fensterquerschnitt  $F = 1,3 \cdot 3,85 = 5,05 \text{ cm}^2$ ; es ist als nicht ausreichend, so dass ein grösseres Blech gewählt werden muss. Mit Rücksicht auf einen ungefähr quadratischen Eisenquerschnitt wollen wir ein Blech von 30 mm Stegbreite vorsehen. Man erhält dann ein Fenster mit  $F = 1,6 \cdot 4,7 = 7,52 \text{ cm}^2$ , was somit ausreichen müsste.

Mit diesem Blech wird dann die Schachtelhöhe nach Formel 9)

$$h = \frac{9,23}{3,0 \cdot 0,9} = \text{rd. } 3,4 \text{ cm} = 34 \text{ mm.}$$

Wir erhalten also einen Eisenkerz mit einem geschachtelten Querschnitt von  $30 \times 34 \text{ mm}$ .

Nunmehr erfolgt die Berechnung der Windungszahlen.  $w_v$  errechnet man nach Formel 13) zu ( $\mathcal{B} = 11 000$  Gauss angenommen)

$$w_v = \frac{10^8}{222 \cdot 11000 \cdot 9,23} = 4,43 \text{ Wdg/Volt.}$$

Entsprechend den jeweiligen Spannungswerten ergeben sich hieraus als vorläufige Windungszahlen:

- Primär für 110 Volt  $w_v$   
 $= 4,43 \cdot 110 = 487 \text{ Wdg}$
- Primär für 150 Volt  $w_v$   
 $= 4,43 \cdot 150 = 665 = 487 + 187 \text{ Wdg}$
- Primär für 220 Volt  $w_v$   
 $= 4,43 \cdot 220 = 976 = 665 + 311 \text{ Wdg}$
- Sekundär  $2 \times 360$  Volt  $w_v$   
 $= 4,43 \cdot 2 \times 360 = 2 \times 1593 \text{ Wdg}$
- Sekundär 6,3 Volt  $w_v$   
 $= 4,43 \cdot 6,3 = 28 \text{ Wdg}$ .

Zur Bestimmung der Drahtstärke ist die Belastung erforderlich. Die Sekundärströme sind bekannt, primärseitig ergeben sie sich aus der aufgenommenen Leistung und den Spannungen. Für die Primärseite erhalten wir

$$J_1 = \frac{N_1}{U_1} \text{ Amp. } 17)$$

- Für 110 Volt  $J_1 = \frac{59,16}{110} = 0,538 \text{ Amp.}$
- 150 „  $J_1 = \frac{59,16}{150} = 0,395 \text{ Amp.}$
- 220 „  $J_1 = \frac{59,16}{220} = 0,27 \text{ Amp.}$

Mit Formel 15) rechnet man anschliessend den Drahtquerschnitt und entnimmt die Drahtstärke dann der Tabelle 4. Die Stromdichte wählen wir zu 3 Amp./mm<sup>2</sup>.

Primär für 110 Volt:  
 $q = \frac{0,538}{3} = 0,179 \text{ mm}^2 = 0,5 \text{ mm}^2$



Primär für 150 Volt:

$$q = \frac{0,395}{3} = 0,123 \text{ mm}^2 = 0,4 \text{ mm } \varnothing$$

Primär für 220 Volt:

$$q = \frac{0,27}{3} = 0,09 \text{ mm}^2 = 0,35 \text{ mm } \varnothing$$

Sekundär 2 x 360 Volt:

$$q = \frac{0,08}{3} = 0,0266 \text{ mm}^2 = 0,18 \text{ mm } \varnothing$$

Sekundär 6,3 V/1,1 Amp.

$$q = \frac{1,1}{3} = 0,367 \text{ mm}^2 = 0,7 \text{ mm } \varnothing$$

Sekundär 6,3 V/2 Amp.:

$$q = \frac{2}{3} = 0,66 \text{ mm}^2 = 0,9 \text{ mm } \varnothing$$

Nunmehr kann der Wicklungs-widerstand errechnet werden, wobei gleichzeitig eine Kontrolle des Wickelraumes erfolgt. Die ausführliche Rechnung soll hier unterbleiben, weil sie auch einem unübten Rechner keine Schwierigkeiten machen wird; es soll lediglich die Schlussrechnung durchgeführt werden. Man zeichnet sich hierfür am besten eine Handskizze nach Art der Abb. 12 und kann hieraus alle Masse entnehmen. Zu berücksichtigen sind nur noch die Isolationen der einzelnen Wicklungslagen, die einen Zuschlag von durchschnittlich 15% der gesamten Wickelhöhe des Drahtes erforderlich machen.

In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass man bei Netztransformatoren zwischen die Primär- und Sekundärwicklung eine Abschirmfolie oder -wicklung einlegt, die man einseitig an Masse anschliesst. Es ist deshalb notwendig, die Abschirmung in die Berechnung des Wickelraumes mit einzubeziehen. Man kann ganz allgemein damit rechnen, dass durch eine Abschirmwicklung oder Kupferfolie durchschnittlich 0,5 mm zur gesamten Wickelhöhe hinzukommen.

Die einzelnen Wicklungen haben nun folgende Widerstandswerte:

- 0—110 Volt  
93,5 m · 0,0894 Ohm/m = 8,4 Ohm
- 110—150 Volt  
34,2 m · 0,139 Ohm/m = 4,75 Ohm
- 150—220 Volt  
60 m · 0,181 Ohm/m = 10,8 Ohm
- 360 Volt  
308 m · 0,687 Ohm/m = 212 Ohm
- 6,3 V/1,1 Amp  
6,18 m · 0,0455 Ohm/m = 0,282 Ohm
- 6,3 V/2 Amp  
6,18 m · 0,0275 Ohm/m = 0,17 Ohm

Mit den betreffenden Strömen resultieren nachstehende Spannungsabfälle in der Reihenfolge obiger Wicklungen:

- 8,4 · 0,538 = 4,52 Volt
- (8,4 + 4,75) · 0,395 = 5,2 Volt
- (8,4 + 4,75 + 10,8) · 0,27 = 6,48 Volt
- 212 · 0,08 = 16,96 Volt
- 0,282 · 1,1 = 0,31 Volt
- 0,17 · 2 = 0,34 Volt

Die gesamte Wicklung einschliesslich der Isolation erreicht eine Höhe von 13,5 mm. Der Wickelraum ist demnach gerade ausreichend.

Zur Korrektur der zuerst errechneten Wicklungszahlen sind diese Spannungsabfälle einzusetzen. Dabei ist zu beachten, daß der primäre Spannungsabfall von der Nennspannung (z. B. 110 Volt) abzuziehen ist, während er auf der Sekundärseite hinzugezählt werden muss.

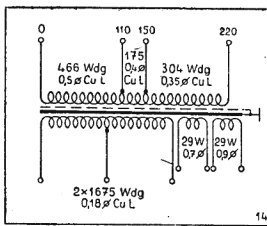


Abb. 14. Wickschema zum Berechnungsbeispiel eines Transformators

Nach Formel (14) erhält man somit folgende verbesserten Windungszahlen:

Primär 110 Volt  
 $w = 4,43 (110 - 4,52) = 466 \text{ Wdg}$

Primär 150 Volt  
 $w = 4,43 (150 - 5,2) = 641 = 466 + 175 \text{ Wdg}$

Primär 220 Volt  
 $w = 4,43 (220 - 6,48) = 945 = 641 + 304 \text{ Wdg}$

Sekundär 2 x 360 V  
 $= 4,43 (360 + 16,96) + 2 \times 1675 \text{ Wdg}$

Sekundär 6,3 V/1,1 Amp  
 $= 4,43 (6,3 + 0,31) = \text{rd. } 29 \text{ Wdg}$

Sekundär 6,3 V/2 Amp  
 $= 4,43 (6,3 + 0,34) = \text{rd. } 29 \text{ Wdg}$

Wollte man ganz genau rechnen, so müsste man von diesen korrigierten Windungszahlen wiederum die sich jetzt neu ergebenden Wicklungs-widerstände und die zugehörigen Spannungsabfälle ausrechnen, solange, bis keine Aenderung der Windungszahlen mehr zu erwarten ist. Diese Feinrechnung soll hier unterbleiben, da sie lediglich eine Wiederholung des bisherigen Rechnungsganges darstellt. Die Windungszahlen sollen deshalb als endgültig angesehen werden, so dass man ein Wickschema nach Abb. 14 erhält.

Ob die primären und sekundären Kupferverluste grössermässig richtig angenommen worden sind, soll abschliessend zur Kontrolle noch nachgerechnet werden. Der Einfachheit halber wird die Rechnung nur für 220 Volt durchgeführt.

$NC_{u1} = u_v \cdot J = 6,48 \cdot 0,0538 = 3,48 \text{ Watt}$   
 $NC_{u2} = 16,96 \cdot 0,08 + 0,31 = 1,1 + 0,34 \cdot 2 = 2,38 \text{ Watt}$   
 $NC_u \text{ gesamt} = 5,86 \text{ Watt}$   
gegenüber der Annahme  $2 \cdot 0,05 \cdot 48,33 = 4,83 \text{ Watt}$ .

Der Unterschied ist also so gering, dass er auf die Gesamtrechnung praktisch keinen Einfluss hat.

**Ermittlung der Transformatorspannung, wenn nur die Anodengleichspannung bekannt ist**

Die bisherigen Berechnungen sind unter der Voraussetzung erfolgt, dass die primären und sekundären Wechselspannungen bekannt sind. Sowohl die Primärspannungen als auch die sekundären Heizspannungen gehen ohne weiteres aus den Angaben des Gerätes hervor; dies trifft jedoch für die Anodenwechselspannung nicht zu. In den Firmenlisten und Schaltungssammlungen sind fast ausschliesslich die Anodengleichspannungen hinter dem Siebkondensator oder am

Ladblock bei der durch die Empfängeröhren resultierenden Belastung angegeben. Diese Gleichspannungswerte entsprechen nun nicht einfach den am Transformator stehenden Wechselspannungen, so dass zur Berechnung der Anodenwicklung die durch Verwendung einer bestimmten Gleichrichteröhre sich ergebende Wechselspannung am Transformator mit Hilfe der Anodengleichspannung zuerst bestimmt werden muss. Ueber diese Zusammenhänge sollen die folgenden Betrachtungen Aufschluss geben.

Zum besseren Verständnis zunächst kurz zusammenfassend etwas über die Arbeitsweise eines Netzgleichrichters. Nach Abb. 15 lässt die Gleichrichteröhre die beiden vom Netztransformator übertragenen Halbwellen des Wechselstromes nur in einer Richtung durch, so dass am Ladekondensator  $C_1$  beide Halbwellen dieselbe Richtung haben. Ist hinter dem Siebkondensator  $C_2$  ein Verbraucherwiderstand  $R$  wirksam, so wird sich der Ladekondensator  $C_1$  solange aufladen, wie die Halbwellenspannung  $U$  grösser ist als die Gleichspannung  $U$ . Nach

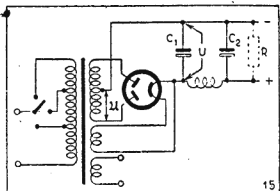


Abb. 15. Schaltung eines Netzteiles mit Kennzeichnung der Anodengleich- und -wechselspannung bei einer gegebenen Belastung R

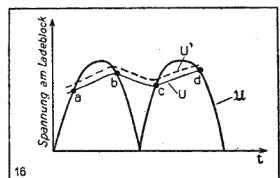


Abb. 16. Zusammenhang zwischen der Gleichspannung U am Ladblock und der Wechselspannung am Transformator

Abb. 16 wird also die für die Gleichspannung  $U$  massgebende Ladung von  $C_1$  beim Punkt  $a$  eintreten und solange aufrechterhalten, bis die Amplitude  $U'$  der Halbwelle beim Punkt  $b$  kleiner wird als die Gleichspannung  $U$ .  $C_1$  entlädt sich dann über den Verbraucherwiderstand  $R$ .

Die Gleichspannung  $U$  sinkt nunmehr solange, bis die Wechselspannung  $U'$  der nächsten Halbwelle im Punkt  $c$  wieder so gross ist wie die Gleichspannung  $U$ .  $C_1$  wird von neuem aufgeladen usw., so dass die Gleichspannung  $U$  mit einem bestimmten Anteil im Rhythmus der Wechselspannung  $U'$  schwankt. Die der Gleichspannung  $U$  gleichsam aufgedrückte Wechselspannung bezeichnet man auch mit Brummspannung  $U_B$ , worauf jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

Wie gross die Gleichspannung  $U$  wird, hängt von der zu- und abfliessenden Ladung ab, d. h. von dem Widerstandsverhältnis des Gleichrichter- und Verbraucherkreises und damit von der Belastung. Vergrössert man z. B. den Verbraucherwiderstand  $R$  (Abb. 15), verkleinert also die Belastung, so erhöht sich am Ladekondensator  $C$ , die Gleichspannung auf  $U'$  (Abb. 16). Daraus resultiert, dass die Gleichspannung um so grösser wird, je geringer die Belastung ist. Die Spannung am Ladekondensator erreicht sogar den Scheitelwert der Wechselspannung am Transformator, wenn die Belastung ganz weggenommen wird. Diese Scheitelspannung beträgt dann das  $\sqrt{2}$ -fache der Effektivspannung, sinusförmigen Wechselstrom vorausgesetzt. Der Ladekondensator wird also spannungsmässig im Leerlauf, d. h. ohne Belastung am stärksten beansprucht.

Wie diese Verhältnisse miteinander zusammenhängen, geht aus den Kennlinien der betreffenden Röhre hervor, so wie sie z. B. in Abb. 17 für die AZ 11 festgehalten sind. Man ersieht daraus zunächst die Abhängigkeit der Gleichspannung  $U$  von der Belastung. Ausserdem ist zu erkennen, dass die Wechselspannung am Transformator bei einer bestimmten Belastung nicht der am Ladekondensator stehenden Gleichspannung entspricht. Aus Abb. 17 ist ausserdem ersichtlich, dass neben der Abhängigkeit der Gleichspannung von der Belastung auch eine solche vom Ersatzwiderstand des Transformators bei einer bestimmten Transformator-Wechselspannung besteht. Mit Hilfe dieser Kennlinien kann man daher die Anodengleichspannung für des Transformators bei einer bestimmten wenn nur die Anodengleichspannung bei gegebener Belastung bekannt ist. Der Ersatzwiderstand des Transformators kann errechnet werden nach der Beziehung

$$R' = R_s + \bar{u}^2 \cdot R_p \text{ Ohm.} \quad (18)$$

worin  $R_s$  den Widerstand der halben Sekundärwicklung,  $R_p$  den Widerstand der Primärwicklung bei der betreffenden Netzspannung und  $\bar{u}$  das Übersetzungsverhältnis der Primärwicklung zur halben Sekundärwicklung darstellen. In Abb. 18 ist die Ersatzschaltung hierfür veranschaulicht (siehe auch Telefonkennröhrenliste).

Diese Erkenntnisse sollen nun mit der AZ 11 als Beispiel praktisch ausgewertet werden. Die Kennlinien nach Abb. 17 sind für Transformatorspannungen gezeichnet, die jeweils einen Unterschied von 100 Volt ergeben. Je 4 Kennlinien (Kurve I bis IV) gehören zu derselben Transformatorspannung, sie unterscheiden sich jedoch voneinander durch die Grösse des Transformator-Ersatzwiderstandes. Wollen wir z. B. eine Gleichspannung am Ladekondensator von 440 Volt erhalten bei einer Belastung von 65 mA, so muss bei einem Ersatzwiderstand von 200 Ohm (Kurve II) die Transformatorspannung (Wechselspannung)  $2 \times 400$  Volt betragen (Punkt a in Abb. 17). Nun sind in der Regel die Wicklungswiderstände und damit der Ersatzwiderstand nicht bekannt, weil ja die Windungszahlen für die Anodenwicklung erst auf Grund der ermittelten Anodengleichspannung errechnet werden können. Man muss daher zunächst einen Ersatzwiderstand annehmen, den man nachträglich etwas korrigieren kann, sofern es sich als notwendig erweisen sollte. In der Praxis kann man damit rechnen, dass der Ersatzwiderstand bei Kleintransformatoren für Rundfunkempfänger 300 bis 500 Ohm erreicht. Man macht daher keinen zu grossen Fehler, wenn man den Untersuchungen allgemein einen Ersatzwiderstand von 400 Ohm zugrunde legt.

Zur Bestimmung der Transformatorwechselspannung sind also jetzt drei Grössen bekannt: Die Anodengleichspannung, die Belastung durch die Röhren (beide Werte können den Schaltungen entnommen oder errechnet werden) und der Ersatzwiderstand, der zunächst mit 400 Ohm angenommen wird. Es soll nun untersucht werden, wie die Verhältnisse sind, wenn eine Gleichspannung am Ladekondensator von 380 Volt bei einer Belastung von 50 mA benötigt wird.

Mit diesen Werten ergibt sich in Abb. 17 zunächst der Punkt b. Wir stellen dabei fest, dass der Punkt b auf keine der gezeichneten Kennlinien fällt. Das bedeutet daher, dass die Transformatorspannung weder 400 Volt =  $U_{Tr1}$  (mit dem angenommenen Ersatzwiderstand müssten wir sonst auf die Kurve III kommen), noch 300 Volt =  $U_{Tr2}$  beträgt, sondern zwischen beiden Werten liegen muss. Wir müssen uns also eine neue Kurve zeichnen, die durch den Punkt b

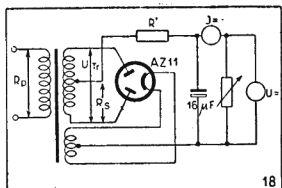


Abb. 18. Die Ersatzschaltung zu den Kennlinien in Abb. 17

geht. Man geht am besten so vor, dass man die Strecke AB (Verbindungsstelle der beiden Kurven III) misst und den Unterschied der Wechselspannungen ( $400 - 300 = 100$  Volt) durch diese Strecke dividiert. Wir erhalten demnach

$$\frac{100}{13.5} = 7.4 \text{ Volt/mm} \text{ (die Zahl 13.5 ist in unserem Beispiel gleich der Strecke } \overline{AB} \text{ in mm).}$$

Der für uns wichtige Punkt b ist nun von B 7.5 mm entfernt, so dass wir eine Wechselspannung erhalten von  $300 + 7.4 \cdot 7.5 = 356$  Volt. Als allgemeinen gültigen Ausdruck findet man daher

$$U_{Tr1} = U_{Tr} + \frac{U_{Tr2} - U_{Tr1}}{\overline{AB}} \cdot \overline{bB} \text{ Volt} \quad (19)$$

Mit dieser gefundenen Transformatorspannung kann die Anodenspannungswicklung berechnet werden.

Die neue gestrichelte Kurve, die durch den Punkt b geht, verläuft parallel zu den Kurven III. Man kann nunmehr ohne weiteres ablesen, welche Spannung sich am Ladeblock bei der Belastung Null (Leerlauf) einstellt. In unserem Beispiel erhält man eine Leerlaufspannung von 500 Volt; sie entspricht dem Scheitelwert der Transformatorspannung

$$\sqrt{2} \cdot 356 \text{ Volt}$$

Aus diesen ganzen Zusammenhängen ist jetzt auch klar ersichtlich, welche Gefahr für den Ladekondensator besteht, wenn man einen Transformator mit zu hoher Anodengleichspannung als Ersatz für einen defekten einbaut und die Anodenspannung durch einen Vorwiderstand nach Abb. 3 an die Röhren angleicht. Hierzu wieder ein Beispiel:

Es sei angenommen, dass ein Transformator zur Verfügung steht, der 400 Volt Wechselspannung liefert und für ein Rundfunkgerät mit der AZ 11 und indirekt geheizten Empfängerröhren vorgesehen ist. Gleichgültig, wie gross auch die Belastung sein mag, ergibt sich durch die Röhrenbestückung beim Einschalten der Leerlaufzustand. Man kann also schon von vornherein sagen, dass wir im Leerlauf eine Spannung am Ladeblock von 560 Volt erhalten (Abb. 17). Elektrolyt-Kondensatoren werden aber nur für eine höchste Spannung bis 550 Volt hergestellt. Abgesehen davon können auch Elektrolyt-Kondensatoren mit niedrigerer Grenzspannung in dem betreffenden Gerät eingebaut sein. Der Ladekondensator ist daher dieser Spannungsbeanspruchung (entspricht der Überspannung in Abb. 2) nicht gewachsen und muss durchschlagen. Es ist also ratsam, vor dem Einbau von Vorwiderständen zur Spannungsverminderung in jedem Fall die genauen Spannungsverhältnisse nach den Röhrenkennlinien zu untersuchen.

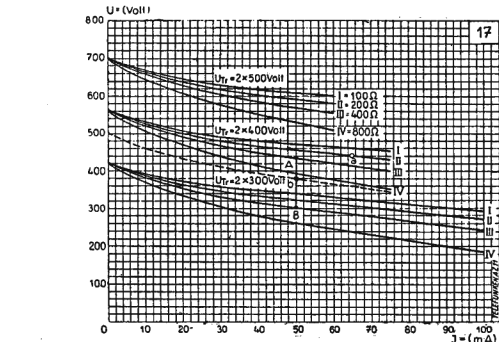


Abb. 17. Die Kennlinien der Gleichrichterröhre AZ 11

### Weiteres Beispiel

Ein Super hat als Endröhre eine EL 12, die defekt geworden ist. Sie soll durch eine vorhandene Röhre AL 4 ersetzt werden. Der gesamte Anodenstromverbrauch des Empfängers beträgt 95 mA, als Gleichrichteröhre ist die AZ 12 verwendet worden. Die Spannung am Ladeblock wird mit 380 Volt angegeben.

Eine Gegenüberstellung der Röhrendaten ergibt nach der Röhrenliste folgenden Bild:

	Heizung		Anode		Schirmg.		Anpassungs- wid. Ohm		Kath.-Wid. R <sub>k</sub> Ohm		Ladung Volt	
	Volt	Amp.	Spez. Volt	mA	Volt	mA						
EL 12	6,3	1,8	250	72	250	8	3500	90	8			
AL 4	4	1,75	250	36	250	5	7000	150	150	3,4		

Für den Netzteil interessieren die Werte der Heizung und Anode. Die Heizung macht insofern keine besonderen Schwierigkeiten, als die Heizspannung für die AL 4 mit 4 Volt ohne weiteres durch einen Vorwiderstand R<sub>v</sub> an der Röhre (Abb. 19) von der Grösse

$$R_v = \frac{6,3 - 4}{1,75}$$

= 1,315 Ohm reduziert werden kann und eine Aenderung des Drahtdurchmessers der Heizwicklung nicht erforderlich ist (annähernd gleiche Stromaufnahme beider Röhren).

Problematischer sind die Verhältnisse auf der Anodenseite. Die Belastung beträgt bei der EL 12 insgesamt 80 mA, hingegen durch die AL 4 nur 41 mA. Würde man die beiden Endröhren ohne besondere Massnahmen gegeneinander austauschen, so würde die Anodenspannung unzulässig ansteigen. Hierüber geben die Röhrenkennlinien der AZ 12 Aufschluss. Nach der Aufgabenstellung erhält man bei einer Gesamtbelastung von 95 mA am Ladeblock eine Gleichspannung von 380 Volt. Mit der AL 4 fällt die Gesamtbelastung auf 56 mA,

gleichzeitig steigt die Anodenspannung auf 405 Volt; sie ist also um 25 Volt grösser geworden. In einem Vorwiderstand könnte man zwar diese 25 Volt verbrauchen, doch ist das, wie gesagt, nicht empfehlenswert. Die um 25 Volt zu hohe Spannung würde am Ladeblock nach wie vor noch stehen, was aber mit Rücksicht auf die normale Lebensdauer des Elektrolyt-Kondensators nicht erwünscht ist. Das Beste ist dagegen in solchen Fällen, die ursprüngliche Belastung wieder herzustellen, indem man hinter dem Siebkondensator (C<sub>2</sub>) des Netzteiles einen Widerstand R parallel schaltet (Abb. 19). In unserem Beispiel errechnet sich dieser Widerstand zu

$$R = \frac{380}{0,095 - 0,056} = 9750 \text{ Ohm.}$$

Durch diese Massnahme haben wir auch erreicht, dass die volle Erregleistung für den Lautsprecher erhalten bleibt.

Eine andere Möglichkeit besteht natürlich darin, dass man den Transformator nach den neuen, durch die AL 4 gegebenen Werten umrechnet. Zu diesem Zweck müssen mit Hilfe der Röhrenkennlinien die entsprechenden Wechselspannungen in der bereits geschiederten Weise bestimmt werden. Ursprünglich hat der Transformator bei der gegebenen Belastung von 95 mA eine Wechselspannung von 378 Volt abgegeben. Mit der neuen Belastung von 56 mA werden 348 Volt Wechselspannung benötigt, um mit dieser Belastung wiederum auf eine

Anodengleichspannung von 380 Volt zu kommen. Hat eine Hälfte der Anodenwicklung z. B. 1550 Wdg, so kann man die neuen Windungszahlen nach folgender Formel ausrechnen:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (20)$$

Durch Umformen erhält man nun

$$w_2 = \frac{w_1 \cdot U_2}{U_1} = \frac{1550 \cdot 348}{378} = 1430 \text{ Wdg.}$$

Von jeder Hälfte der Anodenwicklung müssen also 120 Wdg abgewickelt werden.

Nach dem Festlegen dieser neuen Windungszahl ist noch eine kleine Korrektur dadurch vorzunehmen, dass der Spannungsabfall mit der niedrigeren Belastung von 56 mA etwas geringer wird als ursprünglich. Mit den beschriebenen Rechnungsgrundlagen macht dies keine Schwierigkeiten.

Ausserdem muss man mit dem Umwickeln des Transformators in Kauf nehmen, dass die Erregleistung des Lautsprechers zurückgeht. Wie weit dies tragbar ist, muss von Fall zu Fall entschieden werden.

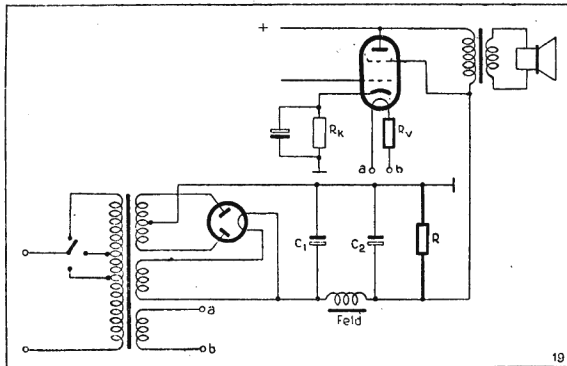
Neben dieser Aenderung ist zudem in bekannter Weise der entsprechende Kathodenwiderstand auszutauschen und die Anpassung des Ausgangsübertragers durch Abwickeln der Sekundärseite bis zur richtigen Windungszahl zu ändern. Irgendwelche weitere Aendrerungen ergeben sich aus der betreffenden Schaltung.

## C. Das Wickeln des Spulenkörpers und der Zusammenbau des Transformators

In weitaus den meisten Fällen ist zum Bewickeln eines Spulenkörpers eine Wickelmaschine erforderlich. Der grundsätzliche Unterschied beim Instandsetzen liegt gegenüber den Wickelarbeiten in

der Industrie darin, dass es sich beim Instandsetzen nur um Einzelanfertigungen handelt und nicht um die für eine Fabrikation erforderliche Serienherstellung irgendwelcher Spulen. Während im letzteren Fall vorwiegend Wickelautomaten für möglichst hohe Stückzahlen Verwendung finden müssen, ist das für eine Einzelanfertigung nicht notwendig. Es genügen also die schon in manchen Werkstätten eingeführten Handwickelmaschinen, die alle einen motorischen Einzelantrieb haben. Sie unterscheiden sich von den Wickelautomaten darin, dass kein selbsttätiges Wickeln mehrerer Wicklungslagen möglich ist und die Maschine beim Erreichen einer einzustellenden Windungszahl auch nicht automatisch abschaltet. Die Handführung wird daher vielfach von Hand erfolgen müssen. Welche Nachteile sich daraus ergeben, soll beim Wickelvorgang selbst näher erläutert werden.

Mit diesen Handwickelmaschinen kann jede vorkommende Wicklung einwandfrei hergestellt werden, soweit es sich nicht um Drähte über 1,5 mm Durchmesser handelt, was sehr selten der Fall sein dürfte. Müssen derartige Drähte aber doch mal verarbeitet werden, so wird es sich meist um verhältnismässig geringe



Windungszahlen handeln, die man behelmässig mit einem kleinen Wickeldorn von Hand auf den Spulenkörper aufbringen kann.

### Die behelmässige Wickelmaschine

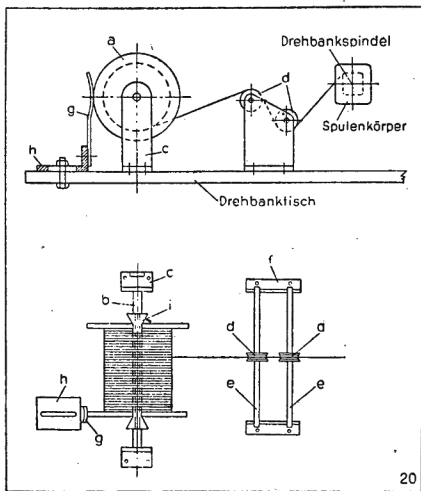
Wie hilft man sich nun, wenn keine Wickelmaschine zur Verfügung steht oder keine solche beschafft werden kann? Das Aufbringen der Wicklungen auf den Spulenkörper von Hand scheidet aus, weil eine solche Arbeit mit Rücksicht auf die oft hohen Windungszahlen viel zu mühsam wäre und ausserdem nicht zufriedenstellend ausfallen würde. Ein motorischer Einzelantrieb wird deshalb immer notwendig sein. Dieser Antrieb ist mit jeder kleineren Mechanikerdrehbank gegeben, die in den meisten Reparaturwerkstätten vorhanden sein dürfte. Damit ist dann auch gleichzeitig die Einspannmöglichkeit für den Wickeldorn geschaffen, so dass also nur eine kleine Vorrichtung zu bauen ist, die den richtigen Ablauf des Drahtes von der Lieferrolle sicherstellt. Eine solche Vorrichtung ist im Prinzip in Abb. 20 aufgezeigt.

Die Lieferrolle a sitzt auf einer Spindel b, die am besten zwischen Spitzen gelagert wird und leicht drehbar ist. Die eine Spitze als Lager in den beiden Lagerböcken c ist so ausgebildet, dass sie verstellbar werden kann, sie wird also z. B. mit einem Gewinde und mit einer Sicherung gegen Verdrehen versehen. Mit Hilfe zweier konischer Spannhülsen i wird die Lieferrolle auf der Spindel festgehalten. Der an der Lieferrolle ablaufende Draht wird über zwei Rollen d geführt, die auf den beiden feststehenden Achsen e leicht hin- und hergeschoben sind. Die Achsen e sind ihrerseits an den Lagerböcken f fest verschraubt. Der über die Rollen d führende Draht geht nunmehr auf den zu bewickelnden Spulenkörper. Damit sich die Lieferrolle a nicht willkürlich drehen kann, ist eine Bremse notwendig. Sie kann z. B. so aufgebaut sein, dass ein Federstahlband g, das an einem Winkel h befestigt ist, gegen den Flansch der sich drehenden Lieferrolle a drückt. Der Winkel h besitzt ein Langloch, so dass die Bremse jedem vorkommenden Durchmesser der einzelnen Lieferrollen angepasst werden kann. Die verstellbare Bremse hat aber gleichzeitig noch den Zweck, einen ganz bestimmten Wickelzug für die jeweils zu wickelnden Drähte einzustellen, worauf nachher noch eingegangen werden soll. Notwendig ist jetzt nur noch ein Umdrehungszähler zum Ablesen der Windungszahlen, der sich mit dem Ende der Drehbankspindel kuppeln lässt.

Eine andere Möglichkeit der Wickelvorrichtung ist in Abb. 21 veranschaulicht. Mit ihr ist dadurch eine zweckmässige Bremsanordnung entstanden, dass man auf derselben Achse, auf der die Lieferrolle abläuft, eine besondere Bremscheibe anbringt, die gesamte Bremse also von der Lieferrolle trennt. Diese Anordnung arbeitet im Prinzip folgendermassen:

Ein Gestänge A mit einer Umlenkrolle ist an einem Ständer drehbar gelagert. An dem Gestänge A ist einmal ein Bremsband B befestigt, das die Bremscheibe C umfasst, zum andern die Feder D, die mit Hilfe einer Schraube F an der Spannvorrichtung E verändert werden kann. Wird die Feder D durch Drehen an der Schraube F gespannt, die

Abb. 20. Schema zum Bau einer Wickelvorrichtung für eine Drehbank



auch als Raste ausgebildet sein kann, so bewegt sich das Gestänge A mit dem daran befestigten Bremsband B nach oben, so dass die Bremswirkung auf die Bremscheibe C und damit auf die Lieferrolle G zunimmt. Der Wickelzug, der das Abflauen des Drahtes von der gegremsten Lieferrolle ermöglicht, muss daher die wachsende Federkraft oder Bremskraft überwinden und wird dadurch ebenfalls grösser. Durch das Spannen und Lockern der Feder D lässt sich also der Wickelzug einstellen.

Der Vorteil der Bremsanordnung nach Abb. 21 besteht darin, dass sich die Bremse nach dem sich etwa ändernden Wickelzug automatisch einstellt. Beim Wickeln von rechteckigen Spulenkörpern z. B. treten Aenderungen des Wickelzuges um so mehr ein, je grösser das Verhältnis der Kernseiten zueinander ist. Die Zugbeanspruchung des Drahtes wechselt also im Rhythmus des sich ändernden Wickelzuges. Dieser wechselnde Vorgang wird durch die Bremsanordnung nach Abb. 21 zum Teil ausgeglichen. Wie weit der Ausgleich stattfindet, hängt von der Massenträgheit der gesamten Anordnung und von der zeitlichen Aenderung des Wickelzuges ab.

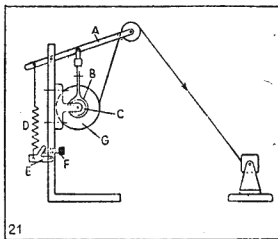


Abb. 21. Wickelvorrichtung mit automatisch veränderlichem Wickelzug

### Vorbetrachtungen zum Wickeln

Für Feindrahtspulen, zu denen ja auch Kleintransformatoren gehören, verwendet man vorwiegend Kupferlackdraht. Lackisolierter Draht ergibt ein Maximum an Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Wickelraumes, so dass man im Vergleich zu Drähten mit Seide- oder Baumwollumspinnung nicht nur die Spulenmasse verkleinert, sondern gleichzeitig auch an Werkstoffen spart. Ausserdem ist die Isolation von mit Seide oder Baumwolle umspinnenen Drähten nicht in jedem Fall ausreichend und erfordert meist ein nachträgliches Tränken der Spulen, so dass durch die Verwendung von Lackdraht auch fertigungstechnisch Vorteile entstehen. Trotzdem der Lackisolation noch einige Mängel anhaften (die Herstellung synthetischer Lacke hat manche Schwierigkeit mit sich gebracht), hat sie sich im allgemeinen in fast allen vorkommenden Fällen als zuverlässig erwiesen.

Als Leiterwerkstoff wird auch heute noch fast ausschliesslich Kupfer verwendet. Austauschstoffe, in erster Linie Aluminium, bringen bei der Herstellung von Feindrahtspulen mehr Nachteile als Vorteile. Neben der Vergrösserung des Wickelraumes entstehen beim Verarbeiten von Aluminiumdraht auch erhöhte Schwierigkeiten beim Wickeln der Spulen und beim Zusammenbau, die sich hemmend auswirken.

Die höchstzulässigen Durchmessertoleranzen von Kupferdrähten sind in den VDE-Vorschriften verankert und werden von den Lieferfirmen eingehalten. Die Grenzwerte von blanken Rundkupferdrähten sind nach DIN VDE 6431, von isolierten Präzisions-Rundkupferdrähten nach DIN VDE 6442 festgelegt. Diese genau festgelegten Durchmesser mit ihren jeweils zulässigen Abweichungen bilden einen Teil der Grundlagen zur Berechnung des Wickelraumes der Spulen (Abb. 22).

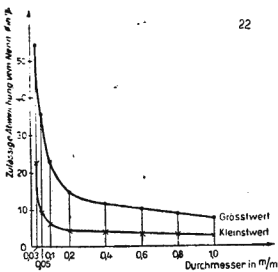


Abb. 22. Die prozentual zulässigen Abweichungen von Rundkupferdrähten in Abhängigkeit vom Nenn Durchmesser

Bei der Berechnung oder Kontrolle des zur Verfügung stehenden Wickelraumes ist also mit den Toleranzen des Drahtdurchmessers zu rechnen, die nach diesen VDE-Vorschriften zulässig sind. Um die Wicklung mit den wechselnden Abweichungen innerhalb der Drahttoleranzen sicher unterzubringen, ist auf jeden Fall der zulässige Größtwert des Drahtdurchmessers einzusetzen. Rechnet man mit dem Nenn-Durchmesser des Drahtes als Mittelwert, so würde der Wickelraum nicht ausreichen, wenn der Drahtdurchmesser die höchstzulässige Grenze erreicht.

Auch für die Berechnung der Ohmschen Widerstände — sie werden bekanntlich zum Berechnen der Spannungsabfälle beim Festlegen der Windungszahlen benötigt; siehe unter B. — sind in den VDE-Vorschriften wiederum Grenzen festgesetzt, die vom Durchmesser und dessen zulässigen Grenzen nach Abb. 22 abhängig sind. Der Rechnungsgang wird dadurch vereinfacht, dass in DIN VDE 6441 der Widerstand in Ohm/m für die jeweiligen Drahtstärken mit dem zulässigen Größt- und Kleinstwert angegeben ist, der von den Drahtlieferanten eingehalten werden muss. Wie gross diese zulässigen Streuwerke prozentual sein dürfen, ist mit der Abb. 23 festgehalten. Ausgehend vom Mittelwert des Widerstandes in Ohm/m als Rechnungswert sind in Abb. 23 nach oben und unten die pro

zentual zulässigen Abweichungen in Abhängigkeit vom Nenn Durchmesser aufgetragen. Daraus geht also hervor, dass im Gegensatz zur Bemessung des notwendigen Wickelraumes, wozu der Größtwert des Drahtdurchmessers einzusetzen war, bei der Berechnung des Wicklungswiderstandes der Mittelwert oder Nennwert des Drahtdurchmessers zu verwenden ist. Diese Notwendigkeit wird verständlich, wenn man berücksichtigt, dass der Draht vom Nenn Durchmesser nach beiden Seiten hin innerhalb bestimmter Grenzen abweichen darf.

Ergänzend zu den Ausführungen bei der Berechnung eines Transformators (siehe unter B.) lautet die Formel zur Berechnung des Wicklungswiderstandes:

$$R = w \cdot l_m \cdot r \text{ Ohm} \quad (21)$$

Hierin bedeuten:

$R$  = Widerstand der Wicklung in Ohm,

$w$  = Gesamtwindungszahl der Wicklung,

$l_m$  = mittlerer Wicklungsumfang in m und

$r$  = Widerstand in Ohm/m als Mittelwert des zu wickelnden Drahtes.

Der mittlere Wicklungsumfang lässt sich nach der Bemessung des Wickelraumes unter Berücksichtigung der Isolationen und der Abrundungen der Wicklung leicht bestimmen (Abb. 12), so dass die Berechnung des Wicklungswiderstandes keine Schwierigkeiten macht.

In diesem Zusammenhang ist erwähnenswert, dass einzelne Lieferfirmen von Lackdrähten die höchstzulässigen Abweichungen erfreulicherweise nicht bei allen Drahtstärken erreichen. Diese Tatsache soll hier als Massstab des hohen technischen Standes der deutschen Lackdrahtindustrie anerkennend vermerkt werden.

Zur Isolierung der einzelnen Wicklungen gegeneinander und gegen Masse benötigt man verschiedene Isolationswerkstoffe. Isolationen sind überall dort unerlässlich, wo es um die elektrische Sicherheit des in-Betrieb zu nehmenden Gerätes und des Bedienenden dieses Gerätes geht. Die belastungsmässige Sicherheit einer Spule ist durch das Einhalten der vorgeschriebenen Grenztemperatur garantiert. Wird diese Grenztemperatur nicht überschritten, ergeben sich in elektrischer Hinsicht keine schädlichen Folgen für die eingelegten Isolationen und damit für die Wicklung. Immerhin soll besonders hervorgehoben werden, dass das Einlegen von Isolationen dann eine bedeutende Rolle spielt, wenn sich durch die Erwärmung der Spule eine Veränderung des dem Draht aufgetragenen Lackes ergibt. Infolge Unregelmässigkeiten des Lackauftrages kann mitunter eine Erweichung des Lackes eintreten, bevor die Grenztemperatur erreicht wird. Einzelne Windungen können dadurch zusammenkleben, so dass die Gefahr des Windungsschlusses gegeben ist. Eine solche Gefahr wird demnach um so geringer, je mehr Lagenisolationen eingelegt werden.

Ganz ähnlich ist es in bezug auf die Spannungssicherheit einer Spule. In weitaus den meisten Fällen würde schon die Lackisolation ausreichen, um der spannungsmässigen Beanspruchung der einzelnen Windungen oder Wicklungslagen untereinander zu genügen. Da aber bei Lackdrähten die Gefahr der mechanischen Beschädigung des verhältnis-

mässig dünnen Lackauftrages sehr gross ist, müssen weitere Isolationen vorgesehen werden, um die erforderliche Spannungssicherheit zu erreichen.

Allen Spulen ist grundsätzlich folgendes gemeinsam:

Eine Isolation am Kern des Wickelkörpers vor dem Bewickeln ist nicht notwendig, wenn es sich um einen aus Hartpapierteilen zusammengesetzten Wickelkörper handelt. Man legt aber dann eine Kernisolation ein, wenn man scharfe Kanten am Kerngrund etwas mildern will.

Bei geklebten Wickelkörpern aus Presspan oder Elektrokapppe ist die Einlage einer Kernisolation für Netztransformatoren zwar empfehlenswert, doch nicht unbedingt erforderlich. Als Kernisolation eignet sich Oellein 0,15 mm stark oder Oelpapier 0,05 mm stark.

Bei Spulen mit mehreren Wicklungen, wie dies bei Kleintransformatoren immer zutrifft, ist eine Isolation zwischen den einzelnen Wicklungen in jedem Fall notwendig. Die Isolationen haben zudem den Zweck, ein Abrutschen der Wicklungslagen zu den darunter liegenden Lagen an den seitlichen Flanschen des Spulenkörpers zu verhindern. Sie sind deshalb zum Teil breiter als der Wickelkörper zugeschnitten. Damit sie sich beim Wickeln einwandfrei um die Wicklung legen, sind sie seitlich mit Einschnitten versehen, wie es Abb. 24 zeigt. Man spricht dann von einer „gefederten“ Isolation. Die Industrie benützt hierfür eine Fiedermaschine für Isolationspapiere. Für Einzelanfertigungen von Transformatoren kann man die Fiederung nachträglich mit Hilfe einer Scheere vornehmen, indem man die Einschnitte 2–3 mm tief und ungefähr 5 mm voneinander entfernt anbringt.

Bei Lackdrähten bis zu 0,35 mm  $\varnothing$  wird gefiedertes Oelpapier 0,08 mm stark zwei- bis dreimal zwischen die Wicklungen gelegt, bis zu 0,75 mm  $\varnothing$  gefiedertes Oelpapier derselben Stärke und einmal Presspan 0,2 mm stark, über 0,75 mm  $\varnothing$  einmal Presspan 0,5 mm stark. An Stelle von Presspan wird mitunter auch Oellein verwendet, das eine hohe Spannungsfestigkeit besitzt und unhygroskopisch ist. Abgesehen von dem relativ hohen Preis des Oelleins und den Schwierigkeiten bei der Beschaffung hat Presspan infolge seiner grösseren Steifigkeit den Vorteil, die Wicklungen mechanisch besser zu sichern und zu stabilisieren. Presspan reicht deshalb in den meisten Fällen vollkommen aus. Für Wicklungen mit besonders hohen Anforderungen, vor allem aber dann, wenn hohe Lagenspannungen der Wicklungen zu erwarten sind, ist Oellein vorzuziehen oder zusätzlich zu verwenden.

Bei Kleintransformatoren müssen während des Wickelns der Primär- und Sekundärwicklungen weitere Isolationen zwischen die einzelnen Lagen eingelegt werden. Besitzt der Spulenkörper seitliche Flanschen, so ist eine Einlage von gefiedertem Isolierpapier 0,03 mm stark nach jeder zweiten oder dritten Lage ausreichend. Bei freigewickelten Spulen (Spulenkörper ohne seitlichen Flanschen) ist grundsätzlich nach jeder Wicklungslage ein gefiedertes Isolierpapier notwendig, damit ein Abrutschen der jeweils aussenliegenden Windungen zur unteren Wicklungslage sicher vermieden wird.

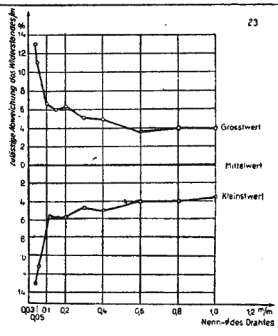


Abb. 23. Prozentual zulässige Abweichung des Widerstandes pro m in Abhängigkeit vom Nenn Durchmesser des Drahtes

Tabelle 5

Jede Spule erhält ausserdem eine Schlusisolation als Berührungss- und Beschädigungsschutz. Hierfür ist Oelpapier 0,08 mm stark oder Presspan von 0,1 bis 0,2 mm Stärke ausreichend. Besitzt die Spule einen Eisenkern, was bei Kleintransformatoren immer der Fall ist, so ist die Wicklung gegen den Eisenkern mit einem Presspanstreifen zu isolieren, wenn keine Schlusisolation vorgesehen und der Abstand zwischen Wicklung und Kern kleiner als 2 mm ist. Sicherer ist aber auf jeden Fall eine Schlusisolation über der ganzen Wicklung.

In Tabelle 5 sind die notwendigen Isolierungen für Kleintransformatoren nochmals übersichtlich zusammengestellt. Abweichungen hiervon sind in besonders gelagerten Fällen zum Teil möglich.

Zum Einspannen des Wickelkörpers ist ein Wickeldorn aus Hartholz notwendig, dessen Masse denjenigen des Eisenkernquerschnitts entspricht. Der Wickeldorn soll gut sitzend passen, was sich beim Wickeln immer günstig auswirkt. Er ist ausserdem einige Millimeter kürzer als der Spulenkörper selbst (Abb. 25) und besitzt eine konzentrische Bohrung zur Aufnahme in der Spindel der Wickelmaschine. Damit der Spulenkörper beim Wickeln nicht auseinandergeht, wird er mit 2 kräftigen Wickelflanschen aus Hartpapier oder Hartgewebe zusammengehalten. Der Wickelflansch erhält einige Längsschlitzlöcher oder eine Aussparung, durch welche die freien Wicklungsenden herausgeführt werden.

Handelt es sich um eine freigewickelte Spule (Spulenkörper ohne seitlichen Flanschen), so muss man beachten, dass der Spulenkörper nicht der ganzen Breite nach ausgewickelt werden darf. Vielmehr muss man beim Wickeln auf beiden Seiten einen Rand von 2–3 mm stehen lassen, um zu verhindern, dass die aussenliegenden Windungen nachträglich abrutschen. Aus diesem Grunde bildet man die seitlichen Flanschen für das Wickeln nach, die man provisorisch auf die Wickelflanschen klebt, so dass ein Wickelbehelf ähnlich der Abb. 25 entsteht.

Die freien Wicklungsenden werden in der Regel mit Isolierschläuchen (Bougierrohr) überzogen. Zur Kennzeichnung der Wicklungen sind verschiedenfarbige Schläuche zweckmässig. Für die Befestigung der Wicklungsenden bei Drähten über 0,5 mm Durchmesser ist Baumwollband von 10 bis 15 mm Breite geeignet. Ausserdem benötigt man einen Streifen Oellein, den man zur Isolierung der Anzapfungen und Lötstellen bei Drahriszen während des Wickelns ausschneidet.

### Die Wickeltechnik

Es soll nunmehr angenommen werden, dass es sich um das Wickeln des berechneten Transformators nach Abb. 14 handelt, der deshalb Schwierigkeiten machen kann, weil Wicklungen mit verschiedenen Drahtstärken hergestellt werden müssen.

Spule oder Wicklung	Kernisolation		Zwischenisolation	Schlussisolation	Sonstige Isolierungen
	Wickelk. aus Hartpapier	Wickelk. aus Elektrolackpappe gel.			
Spule mit Anzapfungen und getrennten Wicklungen	Keine (evtl. Oellein zur Milderung scharfer Kanten)	Oellein 0,15 mm oder Oelpapier 0,06 mm beiderseits gefiedert	Nach jeder Anzapfung: Drähte bis 0,35 Ø Oelpapier 0,08 mm gel. bis 0,75 mm Ø Oelpapier 0,08 mm gel. und Presspan 0,1 mm über 0,75 mm Ø Presspan 0,5 mm bei hoh. Lagenspannungen zusätzlich Oellein	Oelpapier 0,08 mm oder Presspan 0,1 bis 0,2 mm	wenn Abstand vom Eisenkern 2 mm: Presspanstreifen 0,3 mm zwischen Kern und Wicklung
Kleintransformatoren und Wickelkörper mit seitlichen Flanschen			nach jeder 2. oder 3. Lage Isolierpapier 0,03 mm gel., sonst wie Spule mit Anzapfung	nach Bedarf	
Kleintransformatoren und Wickelkörper ohne seitlichen Flanschen		keine	Nach jeder Lage Isolierpapier 0,03 mm gel., sonst wie Spule mit Anzapfungen	nach Bedarf	

Nach dem Aufspannen des Wickelkörpers auf die Wickelmaschine in der mit Abb. 25 gezeigten Weise wird der Wicklungsanfang (0) in (Abb. 14) so befestigt, dass er sich durch den Wickelzug nicht mehr lösen kann. Einzelne Hersteller legen nun sogleich einen Streifen Oellein als Kernisolation ein. Diese Massnahme ist jedoch, wie schon erwähnt, bei Netztransformatoren nicht unbedingt erforderlich.

Wir schalten nun die Wickelmaschine ein (eine Kupplung zum allmählichen Anfahren eignet sich am besten) und versuchen, die erste Lage so zu wickeln, dass mit dem von Hand geführten Draht Windung neben Windung kommt. Die Bremse an der Wickelvorrichtung, d. h. also der Wickelzug ist gleichzeitig einzustellen. Wie schon erwähnt wurde, ist ein bestimmter Wickelzug einerseits erforderlich, um eine zu lose Wicklung mit Hohlräumen zu vermeiden, andererseits um ein sauberes Abläufen des Drahtes von der Lieferrolle sicherzustellen. Die Zugbeanspruchung des Drahtes ist also nicht zu umgehen. Sie wirkt sich dann ungünstig aus, wenn die Streckgrenze des Drahtes erreicht wird. Die Folge ist eine Querschnittsänderung, die während des Wickelvorganges vollkommen unkontrollierbar ist, so dass auch die damit verbundene Aenderung des Widerstandes erst nach dem Wickeln erfasst werden kann. Das führt dann zu einer übermässigen Erwärmung der Wicklung, was natürlich nicht tragbar ist. Bei übertriebenem starkem Wickelzug reisst sogar der Draht.

Die Gefahr einer unerwünschten Dehnung des Drahtes wird einerseits um so grösser, je dünner der zu wickelnde Draht ist, andererseits je mehr die Geschwindigkeit beim Wickeln zunimmt, d. h. also je höher die Drehzahl der Wickelmaschine ist. Bei der Betrachtung des Letzteren kommt man zu der Erkenntnis, dass die Drahtbeanspruchung auch mit zunehmender Wicklung ansteigt, da ja die Umfangsgeschwindigkeit mit anwachsendem Wicklungsdurchmesser zunimmt. Die Nutzenwendung hieraus ist somit, dass der Wickelzug schon zu Beginn des Wickelns nicht sein Maximum erreichen darf, weil er während des Wickelns bei gleichbleibender Drahtstärke stetig anwächst.

Der richtige Wickelzug ist durch eine Messung sehr schwer festzustellen, er richtet sich nach dem Durchmesser des zu wickelnden Drahtes. Um für den Anfang zu wissen, ob man den Wickelzug richtig eingestellt hat, kann man aber so vorgehen, dass man den Widerstand eines beliebigen Drahtstückes des betreffenden Drahtes misst und nunmehr auf einen Wickelkörper aufwickelt. Misst

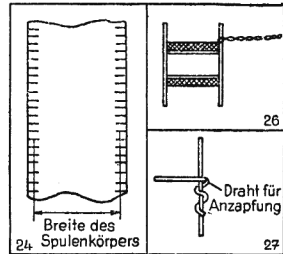


Abb. 24. Gefiedertes Isolierpapier als Isolation zwischen den einzelnen Wicklungslagen

Abb. 26. Bei gleichem Drahtdurchmesser der Wickelzweige werden die Wicklungsenden verdrillt herausgeführt

Abb. 27. Ungleiche und dünne Drähte werden bei Anzapfpunkten gelötet

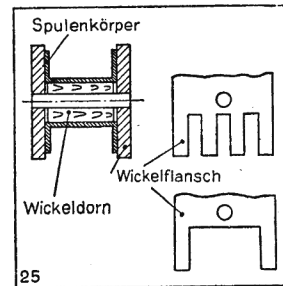


Abb. 25. Auf einem Wickeldorn und zwischen Wickelflanschen wird der Spulenkörper aufgespannt

man nach dem Wickeln wiederum den Widerstand, so darf bei richtig eingestelltem Wickelzug keine nennenswerte Erhöhung des Widerstandes eingetreten sein.

Die erste Lage ist also Windung an Windung vollgewickelt und somit die ganze Breite des Spulenkörpers ausgefüllt. Ueber diese erste Lage kann nun ein Isolierpapier rund um die Wicklung gelegt werden. Auf diese Papiereinlage folgt jetzt die zweite Wicklungslage, daraufhin wieder Papier und so fort, bis die Windungszahl des ersten Anzapfpunktes erreicht ist (110 in Abb. 14). Aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass eine Papiereinlage auch nach jeder zweiten Wicklungslage ausreicht. Bei den einzelnen Herstellerfirmen sind hier vergleichsweise Unterschiede festzustellen.

Am ersten Anzapfpunkt muss nun ein Wicklungsende ausgeführt werden. Hierfür gibt es praktisch zwei Möglichkeiten. Muss der Drahtdurchmesser für den folgenden Wickelzug (110 bis 150 Volt) beibehalten werden, so verdrillt man ein Drahtstück wie in Abb. 26 dargestellt und führt das verdrillte mit Isolierschlauch überzogene Drahtstück aus. Beim späteren Anschliessen der Enden ist darauf zu achten, dass beide Drahtenden miteinander verlötet werden, da sonst die Wicklung unterbrochen wäre. Hat dagegen der folgende Wickelzug eine Wicklung mit anderer Drahtstärke, so ist die Ausführung des Anzapfpunktes nach Abb. 27 zweckmässiger. Danach schmirgelt man das Drahtende des ersten Wicklungsweiges ein kleines Stück weit blank und lötet den neuen Draht an. Die Lötstelle darf aber nicht direkt auf die Wicklung zu liegen kommen, sie muss vielmehr mit einem Streifen Oel-leinen umwickelt werden.

Nach dem ersten Anzapfpunkt folgt zunächst wieder ein Streifen Isolierpapier, dann die nächste Wicklungslage usw. bis zum zweiten Anzapfpunkt. Hier verfährt man genau so wie vorher, bis die gesamte Primärwicklung hergestellt ist. Es soll aber nochmals besonders hervorgehoben werden, dass darauf geachtet werden muss, beim Wickeln Windung dicht an Windung zu legen. Dies gilt ganz allgemein für Drähte über 0,3 mm  $\varnothing$ , weil man sonst zuviel Wickelraum verlieren würde. Bei Drähten unter 0,3 mm  $\varnothing$  kann hiervon abgesehen werden. Das Führen des Drahtes von Hand hat allerdings den Nachteil, dass sich die einzelnen Windungen beim Wickelvorgang überkreuzen. Verhindert oder beseitigt man derartige Kreuzstellen nicht, so ergibt sich bei Drähten über 0,3 mm  $\varnothing$  eine sehr ungleich verteilte Wicklung, was um so mehr Wickelschwierigkeiten mit sich bringt, je grösser die restliche Windungszahl ist. Unter Umständen ist dann ein Ausgleich mittels einer schmalen Papierwickel-lage notwendig, die die weitere Wickelarbeit nicht vereinfacht, ganz abgesehen davon, dass Wickelraum verlorengeht. Auf ein sauberes Wickeln ist daher von vornherein Wert zu legen.

Nach dem Wickeln der gesamten Primärwicklung legt man wieder ein Isolierpapier ein und darauf einen Pressspanstreifen nach Tabelle 5. Netztransformatoren erhalten nun zwischen der Primär- und Sekundärwicklung eine Abschirmung. Diese Abschirmung wird nachher nur einseitig an Masse gelegt, während das andere Ende frei bleibt; sie wirkt also kapazitiv. Sie hat den

Zweck zu verhindern, dass Hochfrequenzenergie, auch störfrequente Energie über den Netzteil an die Röhren gelangt. Vielfach verwendet man für die Abschirmung Kupferfolie von 0,05 mm Stärke, die man so zuschneidet, dass sie nicht ganz so breit ist wie der Spulenkörper und sich beim Einlegen der Länge nach etwas überlappt, wie es Abb. 28 zeigt. Die überlappten Enden dürfen aber auf keinen Fall metallisch miteinander in Berührung kommen, da sonst eine Kurzschlusswindung entsteht, die mit dem dadurch eintretenden Kurzschlussstrom den Transformator primärseitig stark überlastet. Auf die Isolierung der Kupferfolie ist deshalb besondere Sorgfalt zu verwenden. Die auf beiden Seiten der Folie liegenden Isolationen bestehen am besten aus 0,1 mm starkem Oelleinen oder Lackpapier. Sie sind auf beiden Seiten je ungefähr 10 mm länger als die Folie (Abb. 28), so breit wie das normale Isolierpapier ohne Fiederung und ebenfalls überlappt. Nach der isolierten Abschirmung folgt ein normales Isolierpapier und dann der schon erwähnte Pressspanstreifen. Für den einseitigen Masseanschluss der Abschirmung lötet man an ein Ende der Folie ein Drahtstück von 0,3 bis 0,4 mm  $\varnothing$ , das man am Spulenkörper herausführt.

Beim Instandsetzen von Transformatoren kommt es verhältnismässig selten vor, dass eine zur Abschirmung eingelegte Folie nicht wieder verwendet werden kann. Ist dieselbe aber doch unbrauchbar geworden, so kann man sich auf sehr einfache Weise anders helfen. Auf die der Primärwicklung folgende Isolation (Oelleinen und Lackpapier) wickelt man eine Lage Draht von 0,3 bis 0,4 mm  $\varnothing$  Windung dicht an Windung. Das eine Ende der Wicklungslage bleibt frei und wird nicht ausgeführt, während das andere Ende mit entsprechender Länge dem Masseanschluss dient. Die Wirkung einer solchen Abschirmwicklung ist dann genau so wie diejenige einer Kupferfolie.

Nun beginnt das Wickeln der Anodenwicklung. Wir müssen deshalb den

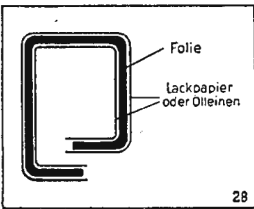


Abb. 28. So liegt die Kupferfolie mit den Isolationen nach dem Einlegen auf der Wicklung

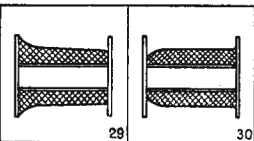


Abb. 29. Eine ungleich verteilte Wicklung muss vermieden werden

Abb. 30. Bei nach innen abisolerter Wicklung besteht die Gefahr des Durchschneidens der nächstfolgenden Wicklung

Wickelzug, d. h. die Bremse anders einzustellen, weil der Drahtdurchmesser jetzt wesentlich kleiner ist als für die Primärwicklung. Bei Anodenwicklungen handelt es sich ja meist um Drähte von 0,1 bis 0,35 mm  $\varnothing$ . Hier ist ein Ueberschreiten des maximalen Wickelzuges gefährlicher als bei stärkeren Drähten, weil eine Querschnittsveränderung des Drahtes bei den verhältnismässig hohen Windungszahlen eine grössere Widerstandszunahme bedeutet. Die Gefahr eines Abreisens des Drahtes ist ausserdem grösser, weshalb dem richtig eingestellten Wickelzug erhöhte Bedeutung zukommt.

Wird der Wicklungsanfang des dünnen Drahtes direkt ausgeführt, so besteht die Gefahr, dass er beim späteren Anschliessen abreisst. Man verstärkt daher die Wicklungsenden und die Anzapfung mit einem dickeren Draht in der Art nach Abb. 27 und führt die verstärkten Drähte aus.

Es wurde weiter oben schon erwähnt, dass ein Wickeln Windung an Windung von Drähten unter 0,3 mm  $\varnothing$  nicht notwendig ist. Ein sauberes Lagewickeln dünner Drähte macht ohne Wickelraum erhebliche Schwierigkeiten. Selbst wenn sich einzelne Windungen häufiger überkreuzen, ist der Anteil des „luftgewickelten“, d. h. verlorenen Wickelraumes nicht sehr gross, so dass er in Kauf genommen werden kann. Dünne Drähte können daher in der Regel wild gewickelt werden, von Spezialfällen abgesehen. Wir führen also den Draht beim Wickeln von Hand derart, dass die erste Lage der Anodenwicklung so gewickelt wird, wie es sich gerade ergibt, wobei man darauf achtet, dass man nicht zu viel Kreuzstellen erhält. Wenn man eine gewisse Wickelfertigkeit besitzt, wird dies ganz gut gelingen. Ob nach dieser ersten Lage ein Isolierpapier eingelegt wird, hängt von dem betreffenden Fabrikat ab. Die Lackisolation des Drahtes ist so ausreichend, dass eine mechanische Beschädigung durch zwei weitere Wicklungslagen sehr selten eintritt. In bezug auf die elektrische Sicherheit bestehen meist keine Bedenken. 2 oder 3 Lagen ohne Papiereinlage übereinander zuwickeln, da die Lagenspannung so gering ist, dass kein Durchschlag eintreten kann. Infolge der Erwärmung der Wicklung während des Betriebes ist es zum Teil jedoch schon vorgekommen, dass sich die Lackisolation aufgelöst hat. Die Folge ist dann, dass sich leicht Kurzschlusswindungen ergeben, die ein Neuwickeln notwendig machen. Eine einwandfreie Lackisolation hält aber Temperaturen von 120°C ohne weiteres aus, deren Grösse von der normalen Betriebstemperatur bei weitem nicht erreicht wird. Es ist deshalb im allgemeinen auch nicht notwendig, nach jeder Wicklungslage ein Isolierpapier einzulegen, vielmehr genügt eine solche Papiereinlage nach jeder zweiten oder dritten Wicklungslage.

Obwohl die Anodenwicklung mehr oder weniger wild gewickelt werden kann, ist trotzdem eine gleichmässige verteilte Wicklung herzustellen. Die Wicklung darf auf keinen Fall an den Spulenflanschen ungleich hochsteigen (Abb. 29) oder abfallen (Abb. 30). Nach Abb. 29 würde man die Heizwicklung nicht mehr unterbringen, während mit der ungleichen Wicklung nach Abb. 30 die Heizwicklung sehr wahrscheinlich durchrutschen würde und dadurch die Gefahr des Windungsschlusses gegeben wäre. Teil-

weise eintritte. Unregelmäßigkeiten beim Wickeln können mit jeder Papier-einlage nach zwei bis drei Wicklungslagen ganz gut ausgeglichen werden.

Die Mittelanzapfung der Anodenwicklung wird mit einem dickeren Draht wiederum verstärkt und ausgeführt. Die Lötstelle ist mit einem Stückchen Oellein sorgfältig zu umwickeln. Dasselbe gilt für das Wicklungsende der Anodenwicklung.

Bei richtig eingestelltem Wickelzug darf ein Abreißen des Drahtes während des Wickelns nicht eintreten. Durch irgendeinen Umstand kommt ein Draht-riss doch hin und wieder vor. Die beiden Drahtenden werden dann zusammengeführt und die Lötstelle mit Oellein isoliert. Diese Isolation darf auf keinen Fall vergessen werden, weil sonst die Lötstelle mit ihrer rauen Oberfläche die Lackisolation der darunter liegenden Windungen beschädigt.

Nach dem Wickeln der Anodenwicklung folgt wieder ein Isolierpapier über der Wicklung. Da es sich bei den nun folgenden Heizwicklungen um Drähte mit meist über 0,5 mm liegendem Durchmesser handelt, muss die Anodenwicklung mechanisch geschützt werden. Das Isolierpapier allein reicht hierzu nicht aus. Die abschliessende Isolation wird am besten aus einem Presspanstreifen von 0,25 bis 0,5 mm Stärke bestehen, der in derselben Weise geliefert ist wie das Isolierpapier (hierfür gelten auch die Aufzeichnungen in Tabelle 5).

Auf dem Presspanstreifen liegen nun die Heizwicklungen, die nicht besonders schwierig herzustellen sind, da es sich vielfach nur um eine Lage und wenige Windungen handelt. Sie können unter Umständen von Hand aufgewickelt werden. Das Wicklungsende wird, wenn die Wicklung nicht über die ganze Breite des Spulenkörpers reicht, mit Hilfe des schon erwähnten Baumwollbandes befestigt, und zwar derart, dass man das Band doppelt zusammenfaltet und die sich bildende Schlaufe vor dem Wickeln der letzten 5 bis 8 Windungen so einlegt, dass die Schlaufe dem Wicklungsende zugekehrt ist. Das Band wird nun mit eingewickelt und die letzte Windung mit dem Wicklungsende durch die Schlaufe gefädelt. Die beiden freien Enden des Bandes werden daraufhin angezogen, so dass das Drahtende in der Schlaufe festgehalten wird. In derselben Weise wird mit der zweiten Heizwicklung verfahren.

Damit wäre also der Netztransformator fertig gewickelt. Um Beschädigungen auch der Heizwicklungen vor allem beim Schachteln zu vermeiden, bringen wir noch eine Schlussisolation an, die aus einem Streifen Oellein oder Presspan von 0,1 bis 0,2 mm Stärke bestehen kann.

Aus den Darstellungen über das Spulnwickeln ist abschliessend zu erkennen, dass manche Fragen entstehen können, so dass das Gebiet der Wickeltechnik keine so untergeordnete Rolle spielt, wie man fälschlicherweise geneigt sein mag, dies anzunehmen.

#### Der Zusammenbau des Transformators

Es ist ratsam, vor dem Zusammenbau des Transformators die einzelnen Wicklungen erst auf Stromdurchgang zu untersuchen. Beim anschließenden Schachteln des Eisenkerns sind die ursprünglichen Verhältnisse wieder herzustellen (siehe unter B. Das Demontieren). Hier-

bei ist die Beachtung folgender Einzelheiten noch wichtig:

Zur wirksamen Verkleinerung der Eisenverluste sind die Bleche einseitig lackiert oder mit Papier beklebt. Beim Schachteln muss nun immer eine isolierte und eine nichtisolierte Seite der Bleche aufeinander zu liegen kommen. Wird hierauf nicht geachtet, so steigen die Leerlaufverluste, d. h. die Eisenverluste sehr stark an und der Transformator erwärmt sich unzulässig. Sind einzelne Stellen der Papier- oder Lackisolation abgerissen oder abgeblättert, so empfiehlt sich ein dünnes Bestreichen der nicht mehr isolierten Stellen mit einer Schellacklösung.

Die Bleche dürfen ausserdem nicht gewaltsam, etwa durch übermässig starke Hammerschläge in den Spulenkörper gepresst werden. Die unter Umständen sich ergebende Gratbildung würde ein-

zelne Bleche magnetisch kurzschliessen und die Maßnahme des Isolierens illusorisch machen. Es könnte zudem leicht eine Beschädigung des Spulenkörpers eintreten, die so weit führen kann, dass sogar die Wicklung mitbeschädigt wird. Es ist weiterhin darauf zu achten, dass beim Schachteln die oberste Wicklung nicht verletzt wird. Dies soll zwar die Schlusisolation vermeiden, doch kann auch diese von den scharfen Kanten der Bleche aufgerissen werden, besonders dann, wenn der Spulenkörper vollgewickelt ist. Schwierigkeiten macht mitunter das Einbringen der letzten beiden Bleche. Eine Beschädigung des Spulenkörpers ist mit den Schlussblechen am ehesten gegeben. Wenn sie übermässig stark eingepresst werden müssen, um sie überhaupt noch unterzubringen, sind die übrigen Bleche nicht sehr sorgfältig geschachtelt worden.

## D. Die Prüfung des Transformators

### 1. Prüfung auf Unterbrechung

Diese Prüfung wird, wie schon erwähnt, am besten vor dem Schachteln des Eisenkerns, also anschliessend nach dem Wickeln vorgenommen. Mitunter kommt es nämlich vor, dass verstärkte Drähte oder Anzapfpunkte schlecht gelötet sind, so dass man sich gegebenenfalls Mehrarbeit erspart, wenn man vorher sämtliche Wicklungen auf Unterbrechung nachprüft. Hierfür eignen sich Prüflampen oder Leitungsprüfer.

### 2. Prüfung auf Massschluss

Die Prüfung auf Massschluss wird an sämtlichen Wicklungen nach Abb. 5 vorgenommen. Wie dort bereits ausgeführt wurde, prüft man am besten mit einer höheren Spannung, z. B. 500 Volt.

### 3. Prüfung auf Isolationsfehler Wicklung gegen Wicklung

Mit dieser Prüfung soll festgestellt werden, ob die zwischen je zwei Wicklungen eingelegten Isolationen in elektrischer Hinsicht ausreichen. Gleichzeitig soll nachgeprüft werden, ob einzelne Windungen, zu einer darunter liegenden Wicklung durchgerutscht und durch eine etwaige Beschädigung des Lackes beide Wicklungen galvanisch miteinander verbunden sind. Diese Kontrolle kann ebenfalls mit einer 500-Volt-Prüfeinrichtung durchgeführt werden.

### 4. Prüfung auf Windungsschluss und Blechschluss

Beide etwa vorhandene Fehler werden mit einer Leerlaufmessung festgestellt (die Primärwicklung wird an das Wechselstromnetz angeschlossen, die Sekundärwicklungen bleiben offen). Ueber die Messung ist eingangs schon ausführlich berichtet worden (siehe unter A. Die Suche nach der Fehlerquelle).

### 5. Messung der Gleichstromwiderstände

Ist der Transformator nach der eigenen Berechnung gewickelt worden, so interessieren die Ohm'schen Widerstände zur Kontrolle der Rechnung. Die Gleichstromwiderstände sind ausserdem zur Feststellung der Betriebstemperatur des Transformators erforderlich, wie aus den folgenden Ausführungen unter 6. hervorgeht.

### 6. Kontrolle der Transformatorspannungen und der Erwärmung bei Belastung

Sofern sich nach den bisherigen Prüfungen ergeben hat, daß die Wicklungen einwandfrei hergestellt worden sind, kann

der Transformator nunmehr wieder eingebaut werden. Man sollte sich aber vorher genauestens davon überzeugen, dass der Fehler, der zur Beschädigung des Transformators geführt hat, auch tatsächlich beseitigt ist. Bei einem Umbau ist vorher zu untersuchen, ob und auf welche Weise die Schaltung geändert worden ist.

Die Messung der sekundären Spannungen erfolgt bei der betreffenden Nennspannung des Netzes und mit der vorgeschriebenen Belastung. Zur Kontrolle der Belastung schaltet man am besten ein mA-Meter auf der Sekundärseite (Heizungen und Anode) ein. So wohl die Heizspannungen als auch die Anodenspannung dürfen dabei nicht mehr als  $\pm 5\%$  von ihren Sollwerten abweichen.

Die Erwärmung der Wicklungen wird über die Messung der Ohm'schen Widerstände bestimmt, indem man die Wicklungen im kalten (siehe unter 5.) und im warmen Zustand misst. Auf Grund dieser beiden Widerstandswerte kann dann die Uebertemperatur nach folgender Formel errechnet werden (siehe VDE-Vorschriften):

$$t_u = \frac{R_w - R_k}{R_k} (235 + t_k) - (t_l - t_k) \text{ Grad C} \quad (22)$$

In dieser Formel bedeuten:  $t_u$  = Uebertemperatur in Grad Celsius,  $R_w$  = Widerstand der Wicklung in warmem Zustand in Ohm,  $R_k$  = Widerstand der kalten Wicklung in Ohm,  $t_k$  = Temperatur der kalten Wicklung und  $t_l$  = Temperatur der umgebenden Luft.

Der Widerstand der warmen Wicklung darf erst nach einer Betriebsdauer von 3–5 Stunden gemessen werden, nur dann erwärmt sich der Transformator nicht mehr über den gemessenen Wert hinaus. Zur Erwärmungsmessung muss der Transformator im Gerät eingebaut sein. Während der Erwärmung ist zu beachten, dass der Transformator keiner Zugluft ausgesetzt wird. Die Temperatur  $t_l$  entspricht der dem Transformator umgebenden Temperatur im Gehäuse nach der Erwärmung. Die Uebertemperatur darf für Wicklungen mit Lackdraht bis zu 60 Grad C betragen; die Grenztemperatur einschl. der Raumtemperatur darf 95 Grad C nicht überschreiten. Die Temperatur-Messungen sind mit  $10\%$ iger Ueberspannung durchzuführen. Schluss