

Matthias Kallenberger

FRANZIS
EXPERIMENTE



Experimente mit selbst gebauten Jakobsleitern

- ▶ Höchstspannungs-Lichtbögen selbst erzeugen
- ▶ Hochspannungs-Transformatoren selbst gebaut

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	15
1.1	Geschichte der elektromagnetischen Induktion	15
1.1.1	Erste elektromagnetische Versuche früherer Wissenschaftler	15
1.1.2	Das große Wechselstromnetz	15
1.1.3	Zur Beschaffung von Hochspannungstransformatoren	16
1.1.4	Induktion	16
1.1.5	Lenzsche Regel	17
1.1.6	Allgemeines	18
1.2	Hochspannungstransformatoren	18
1.2.1	Drehstromtransformatoren	18
1.2.2	Zweiphasen-Transformatoren	19
1.2.3	Einphasen-Transformatoren	19
1.2.4	Allgemeines über Transformatoren	20
1.3	Beschreibung von Lichtbögen	21
1.3.1	Lichtbögen niederer Hochspannungen	21
1.3.2	Lichtbögen von Höchstspannungen	22
1.3.3	Lichtbogenfärbung	23
1.4	Gefahren und Vorsichtsmaßnahmen	23
1.4.1	Die Erdung der Apparaturen	23
1.4.2	Gefahren bei Betrieb von Jakobsleitern	24
1.5	Kerne und Wicklungen	26
1.5.1	Kerne	26
1.5.2	Wicklungen	28
1.5.3	Berechnung von Verhältnissen	29
1.5.4	Blindwiderstand und Wirkstrom	30
1.6	Zündabstände und Funkenstrecken	31
1.7	Energiequellen	31
2	Bau von Hochspannungstransformatoren	33
2.1	»Trockenbau« eines 20-kV-Transformators	33
2.1.1	Isolationspapier	33
2.1.2	Hilfsmittel	34
2.1.3	Spulenkörper	36

2.1.4	Schichtenspannung.....	37
2.1.5	Richtige Erdung der Sekundärseite	38
2.1.6	Berechnung des 20-kV-Transformators	40
2.2	Aufbau der Holzspulenkörper	42
2.2.2	Der Sekundärspulenkörper	43
2.2.3	Der Primärspulenkörper	43
2.3	Wickeln der Spulen.....	45
2.4	Köcheln im Wachsbad	49
2.5	Aufbau der Peripherie des 20-kV-Transformators	51
2.5.1	Isolator	52
2.5.2	Der heiße Pol	52
2.5.3	Verschraubungen	53
2.5.4	Elektroden	54
3	Hochspannungsapparat mit Behälterbau	57
3.1	Behältermaterial.....	57
3.2	Öle	58
3.3	Unterbau des Behälters	59
3.4	Kabelzuführung zum Behälter.....	60
3.5	Teilbehälterbau	61
3.5.1	Fiberglas-Spulenbehälter für Wicklungen.....	61
3.5.2	Kunststoff-Spulenbehälter für Wicklungen.....	63
4	Sicherheitsabstände.....	65
4.1	Das elektrische Wechselfeld	65
4.2	Sicherheitsabstände für Menschen.....	66
4.3	Sicherheitsabstände in der Apparatur.....	66
5	Lichtbogentätigkeit	69
5.1	Elektrodenformen	70
5.2	Weitere Entladungen	72
5.3	Elektrodenwiderstand und -kapazität	73
6	Höchstspannungstransformatoren	77
6.1	Spulendimensionen	77
6.1.1	Der Bau der Sekundärspulen	77
6.1.2	Der Bau der Primärspulen	79
6.2	Schenkelanordnung	80
6.2.1	Waagrechte Anordnung	80

6.2.2	Senkrechte Anordnung.....	80
6.3	Behälterbau	81
6.3.1	Kunststoffbehälter	81
6.3.2	Multiplex- oder Schichtholzbehälter.....	83
6.3.3	Holzbehälter mit innerer Folienauslage	83
6.3.4	Metallbehälter	86
6.3.5	Glasbehälter	86
6.4	Spulenkörper	86
6.5	Behälterdeckel mit Isolatoren	87
6.6	Zuleitungen zum Transformator.....	89
6.7	Ölbefüllung.....	91
7	Bau eines Dreiphasen-Hochspannungstransformators	93
7.1	Verschiedene Kerne	93
7.1.1	Normbleche	93
7.1.2	Sonderkerne	94
7.1.3	Offene Schenkel	94
7.2	Aufbau der gesamten Apparatur.....	94
7.3	Aufbau des Elektrodendreiecks.....	94
8	Transformatoren bei der Arbeit	97
8.1	400-kV-Hochspannungslichtbogen	97
8.2	170-kV-Ein-Schenkel-Trafo waagrecht.....	99
8.3	170-kV-Ein-Schenkel-Trafo senkrecht.....	100
8.4	40-kV-Drehstrom-Hochspannungstrafo	102
9	Faradaysche Schutzgitter.....	105
10	Koronabildungen	107
10.1	Korona	107
11	Bau eines Holzbehälters	109
11.1	Holzplattenverbindung	109
11.2	Verarbeitung von Polyesterharz und Fiberglasmatten	110
11.3	Anschlussstelle am Holzkasten.....	112

12	Bau eines Elektrodenständers	115
13	Wichtige Sicherheitsmaßnahmen	119
13.1	Für den Menschen	119
13.2	Für die Apparatur.....	119
13.3	Sicherheitsmaßnahmen nach Betrieb	120
14	Kabelnormen und Zuleitungen	121
14.1	Belastete Kabel	121
14.2	Geeignete Normen nach Erfahrungswerten	121
14.3	Anschlussmöglichkeiten.....	121
15	Verklebungen	123
15.1	Holzleim	123
15.2	Silikondichtmasse.....	123
15.3	Kontaktkleber.....	123
15.4	Polyesterharz.....	124
15.5	Epoxidharz	124
16	Leistungsverluste	125
16.1	Kernverluste	125
16.2	Verluste durch Wicklungsdimensionierung	125
16.3	Verluste durch Netzfilter oder Vorschaltgeräte	125
16.4	Leistungsverluste durch Kapazitäten	126
16.5	Kurzschlüsse in der Sekundärspule	126
16.6	Besondere Leistungsabfälle.....	127
16.7	Tolerierte Leistungseinbußen	127
16.8	Primärspulenleistung.....	128
17	Handhabung von Ölen	131
17.1	Pflanzenöl	131
17.2	Mineralische Öle.....	131
17.2.1	Böden der Versuchs- und Lagerräume	131
17.2.2	Hilfsmittel zur Vermeidung von Ölüberschwemmungen	133
17.2.3	Lagerung des Öls	133

18 Abbildungen aus der Werkstatt und dem Versuchskeller135

Anhang143

Herstelleradressen145

Glossar147

Literatur157

2 Bau von Hochspannungstransformatoren

2.1 »Trockenbau« eines 20-kV-Transformators

2.1.1 Isolationspapier

Isolationspapier für die Schichten auf den Spulen ist bei jedem Trafokersteller erhältlich. Allerdings kann das Papier sehr teuer werden, wenn man davon große Mengen benötigt. Es gibt aber auch kostengünstigere Lösungen. In den großen Transformatoren, die die Überlandleitungen speisen, werden oft Papiere verwendet, die mit dem im Handel gebräuchlichen Backpapier identisch sind. Es ist temperatur- und reißfest und weicht nicht im Öl auf. Durch mehrere Lagen Backpapier erhält man eine dickere Isolationsschicht, durch deren Zwischenräume dann das Öl hervorragend kriecht.

Abb. 2.1 zeigt das Backpapier, mit Hilfe einer Bandsäge in passende Lagenbreiten geschnitten.

Ein weiterer wunderbarer Isolator ist Zeitungspapier, wenn es in Wachs gekocht ist. Die Wicklung wird trocken gewickelt, die Zeitungspapierlagen werden trocken eingelegt. Wenn die Spule gewickelt ist, wird der ganze Komplex in Wachs gekocht, damit es in jede Ritze kriechen kann. Ausgehärtet ist die Wicklung später hervorragend isoliert.

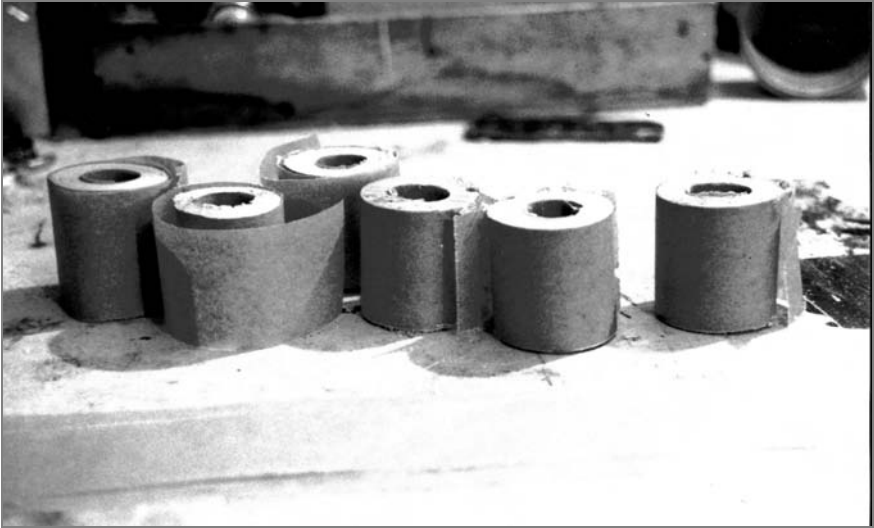


Abb. 2.1: Man kann Backpapier mit der Bandsäge beliebig schneiden. Dabei sägt man die ganze Rolle in kleinere Röllchen, von denen man dann Material bequem abrollen kann. Das Sägen sollten natürlich nur handwerklich Versierte übernehmen.

Ein (nicht zur Nachahmung empfohlener) Test, in dem man die Wicklung fahrlässig opfert, zeigt die guten Isolationseigenschaften von wachsgetränktem Zeitungspapier. Mit einer Schichtenspannung von 1.500 V, (also zwei gegenüberliegenden 3.000 V) hält eine einzelne wachsgetränkte Lage dazwischen etwa 15 Minuten durch, bis ein Durchschlag stattfindet. Um eine sichere Isolierung mit Lagen zu schaffen, sollten die Spannungen der einzelnen Schichten so niedrig wie möglich gehalten werden. Dann sind Durchschläge ausgeschlossen.

Für den Trockenbau ist beides optimal. Wenn man also vier Lagen Isolationspapier verwenden möchte, sollte man wie in *Abb. 2.2* zwei Lagen Backpapier und zwei Lagen Zeitungspapier verwenden, die im Wechsel zusammengelegt werden. Beim Kochen im Wachstopf wirkt die Zeitungspapierlage wie ein Docht und zieht das Wachs zwischen die Backpapiere. Abgekühlt ist die Wicklung eine starre und stabile Masse.

2.1.2 Hilfsmittel

Um die Schichtenränder des Drahts zu sichern, werden außen Pappstreifen angebracht, die ein Herausrutschen der einzelnen Windungen verhindern (*Abb. 2.2*). Die Pappe saugt sich im Wachs- oder Ölbad voll, so dass sie keine Gefahr für die Schichten wird. Beim Verarbeiten von Pappe oder Papier wird so mancher skeptisch Kritik üben. Da Papier oder Pappe mit Leim gebunden sind, der potenziell Strom leiten kann, geht man davon aus, dass ein Durchschlag oder

Überschlag stattfinden kann. Doch alle Versuche mit Pappe und Papier ergaben, dass der Leim durch Wachs oder Öl seine Leitfähigkeit vollständig verliert. Nicht einmal große Farbdrucke auf dem Zeitungspapier, die bekanntlich aus metallhaltigen Farben wie z. B. Blei bestehen, bereiten Probleme.

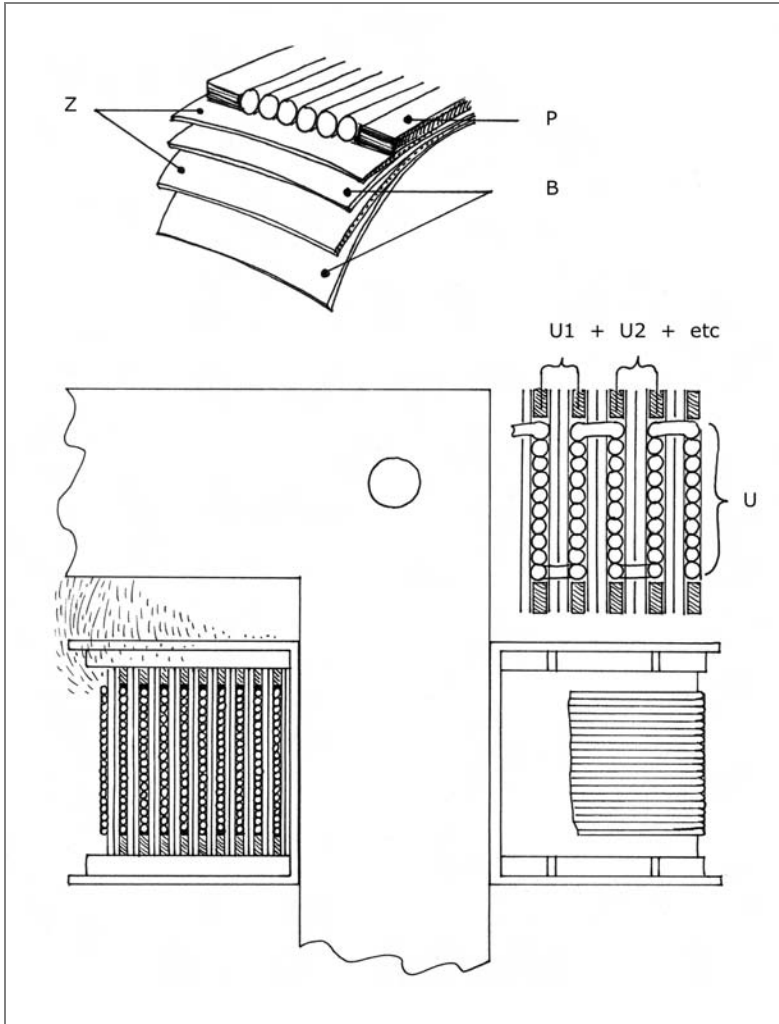


Abb. 2.2: Im oberen Detailausschnitt sind die Lagen einer Schicht abgebildet. Z ist das Zeitungspapier, B das Backpapier. Die Pappestreifen P schützen die äußeren Windungen vor gefährlichem Herausrutschen zum Rand hin. Im Schnitt unten erkennt man die Schichten, wie sie sich durch ihre Einzelspannungen potenzieren, und ihre Gesamtspannung, die zum Kern hin am stärksten wirkt.

2.1.3 Spulenkörper

Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Spulenkörper aufzubauen. Geeignet sind folgende Materialien:

Holz ist nur bis zu einer bestimmten Spannung verwendbar. Bei höheren Spannungen kann es zur Falle werden, denn es enthält mikroskopisch kleine Fasern, in denen Luft auch noch nach längerem Kochen eingeschlossen sein kann. Sie wird dann gerne als Durchschlagsüberbrückung genommen. Bei niedriger Hochspannung jedoch genügen die Eigenschaften des Holzes.

Glas kann ebenfalls verwendet werden. Im trockenen Aufbau kann Glas mit Silikonkautschuk geklebt werden, muss aber trotzdem mit ins Wachs getaucht werden, um die Sekundärwicklung zu tränken. In diesem Fall kann es sein, dass das Glas die Temperaturen des heißen Wachses nicht aushält und springt. Das wäre zwar nicht tragisch, ist aber im Endeffekt ein vermeidbarer Schönheitsfehler. In Öleinbettungen kann man geklebtes Glas gar nicht verwenden, denn die Klebestellen aus Silikonkautschuk lösen sich durch das enorme Kriechverhalten des Öls ab. Dadurch fällt der Spulenkörper wie ein Kartenhaus auseinander und die Wicklung ist zerstört.

Pappe kann man im Wachsbad verwenden, aber man muss vorsichtig damit umgehen. Sie weicht im heißen Wachs auf und wird sehr elastisch. Hier muss man dafür sorgen, dass die Schichten sich nicht verschieben oder Drahtwindungen verrutschen. In Öl ist Pappe absolut ungeeignet. Sie weicht ebenso auf und ist dann im Dauerzustand instabil.

Sperrhölzer sind sehr gut geeignet, wenn die Spannungen bis etwa 40 kV hoch sind. Der wassergebundene Holzleim löst sich im Öl nicht auf. In trockenem Zustand wird er durch das Wachsbad versiegelt und da die Leimstellen innen in Kernnähe sind, stellen sie auch kein Durchschlagspotenzial dar. Hölzer, die durch Harze verklebt sind, sind natürlich noch sicherer in Öl.

Harz-Fiberglas-Spulenkörper sind für niedrigere Hochspannungen geeignet, denn sie sind zäh und dadurch stabil. Doch im Trockenbau ist das Verwenden von Harz als Spulenkörper nicht nötig. Man kann sich die ungesunde Verarbeitung der Glasfasern und des Harzes ersparen.

Bei Höchstspannungen kann man nur noch Kunststoffe verwenden, denn sie sind in der Masse dicht, daher wunderbare Dielektrika und enthalten außerdem keine Lufteinschlüsse. Doch sie erfordern gute Schweißarbeiten, denn sie können nicht in allen Fällen geklebt werden. Für den Trockenbau von 20 kV ist Kunststoff allerdings nicht erforderlich.

Sperrhölzer sind also für den Trockenbau völlig ausreichend, denn sie können bis 40 kV problemlos an der Luft verwendet werden.

2.1.4 Schichtenspannung

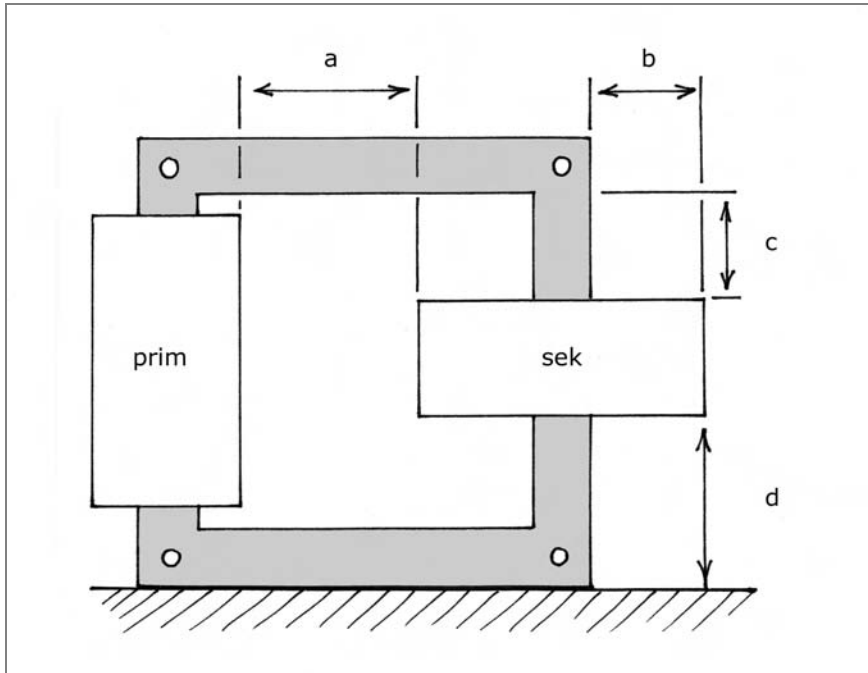


Abb. 2.3: Vier Zonen bestimmen die Gefahrenstellen am Transformator:

a) die Spannungszone zwischen Sekundär- und Primärspule, b) die Zone zwischen dem geerdeten Kern und den äußeren Spulenschichten der Sekundärspule, c) die Zone generell zwischen Sekundärspule und Kern, und d) die Zone zwischen der Sekundärspule und der Erde selbst.

Um die Spannung auf jeder Schicht so gering wie möglich zu halten, die Spule aber trotzdem so kapital wie möglich aufzubauen, um Platz auszunutzen, muss man abwägen, was für den passenden Kern und seine Maße am optimalsten erscheint (*Abb. 2.3*).

Dies kann man anhand der Kernmaße leicht errechnen.

Es gibt drei wesentliche Faktoren:

- die Drahtstärke und die Lagenmenge des verwendeten Isolationspapiers. Daraus ergeben sich die maximale Schichtenmenge und die wachsende Stärke der Wicklung nach außen hin (Ausladung).

- die Schenkelhöhe des Kerns. Mit den nötigen Abständen zum unteren und oberen Rand wird die Wicklungshöhe, also die potenzielle Schichtenbreite, ermittelt. Die Bauweise des kompletten Spulenkörpers richtet sich nach diesem Maß.
- die Gesamtspannung aller Schichten zusammen, die sich in der Strecke der oberen und der unteren Zone der Sekundärspule offenbart. Diese Strecke sollte auf die Gesamtspannung abgestimmt sein, sollte also die potenzielle Funkenstrecke des späteren Lichtbogens nicht wesentlich unterschreiten, um einen Überschlag zwischen den Schichten zu vermeiden.

2.1.5 Richtige Erdung der Sekundärseite

Die Sekundärspule wird über eine Herausleitung, z. B. eine Kupferzunge, geerdet. Von der Kupferzunge aus, die in die Spule ragt, beginnt der Draht für die Wicklung. Mit dieser Verbindung vermeidet man einen Durchschlag zwischen Sekundärspule und Kern, wenn z. B. das äußere heiße Ende der Wicklung über eine Elektrode den Kern berühren sollte. Außerdem entsteht eine Korona, die auch ohne direkten Schluss über den Kern zwischen diesem und der Sekundärinnenseite wirkt. Bei einer Sekundärdoppelspule, die in einem Spulenkörper untergebracht sein kann oder aus zwei separaten nebeneinanderliegenden Spulenkörpern besteht, wird die innere Verbindung beider Hälften mit dem Kern geerdet. Beim Drehstromkern sind es drei Sekundärspulen, die in Sternschaltung über den Sternpunkt geerdet werden. Somit ist jede Seite der drei Phasen getrennt zur Erde hin aktiv (Abb. 2.4-6).

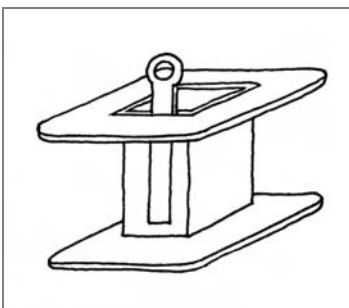


Abb. 2.4: Einfacher Sekundärspulenkörper für niedere Hochspannungen.

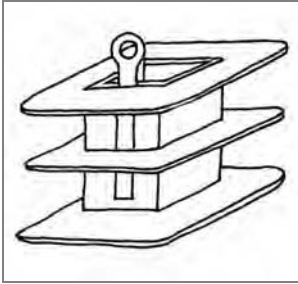


Abb. 2.5: Doppelspulenkörper,
zwei Sekundärausgänge in einer Spule.

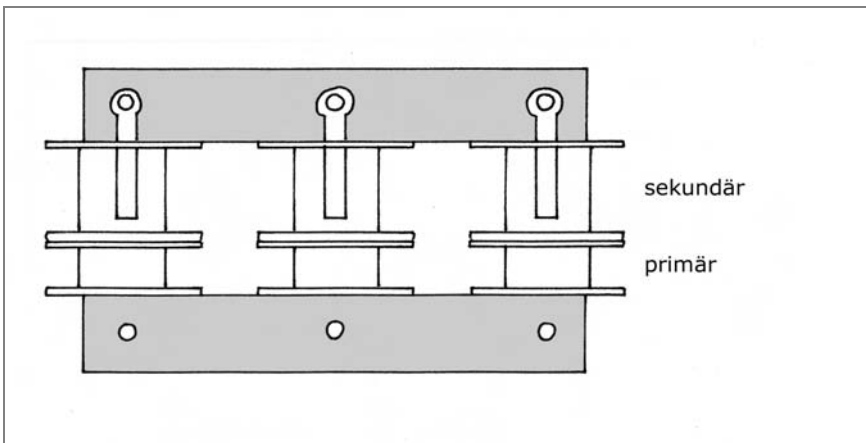


Abb. 2.6: Spulenkörper auf einem Drehstromkern. Sie können einzeln hergestellt, oder im Primär- und Sekundärbereich in einem Spulenkörper untergebracht werden. Jeweils drei Doppelspulen in den Sekundärausgängen sind erdungstechnisch nicht möglich.

Werden Staffelspulen verwendet, also mehrere Spulen nebeneinandergelegt, die getrennt Einzelspannungen zur Gesamtspannung führen, wird die erste Spule mit dem Kern verbunden. Alle weiteren werden mit Abstand zum Kern hin aufgebaut, um einen Sicherheitsabstand zu wahren. Staffelspulen sollten nur für Höchstspannungen verwendet werden, also bei Bauweisen, die nicht mehr ohne Ölisolation auskommen. Bei 20 kV genügt eine einzelne Sekundärspule, die mit dem inneren Wicklungsbeginn geerdet wird. Durch ihre relativ »geringe« Hochspannung muss sie nicht weit ausladend aufgebaut werden. Es entsteht keine hohe Schichtenspannung.

2.1.6 Berechnung des 20-kV-Transformators

Für leistungsfähige 20 kV benötigt man mindestens die Kernnorm EI 300. Aus diesem Drehstromkern kann das Mittelschenkelblatt herausgestanzt werden. Mit Hilfe einer harten Granitplatte als Unterlage kann man das Blech mit einem Hartmetallmeißel gut abtrennen. Man stanzt die Stelle an und bricht sie dann durch Umknicken einfach ab. Wer diese Arbeit scheut, gibt einen Spezialkern in Auftrag: einen quadratischen UI-Kern mit dem Maß 300 x 300 mm. Mit dieser Bauart lässt sich gut eine Leistung von 10 kW herstellen. Der Kern kann auch aus gesonderten Einzelblechen, also »Schenkelblechen« aufgebaut werden. Elektromagnetische Verluste durch mehrere Spalten zwischen den Blechen fallen kaum ins Gewicht. Bei dem Kern 300 x 300 mm hat man eine Schenkelhöhe von 180 mm, die innere Weite beträgt ebenfalls 180 mm.

Als Primärdrahtstärke kann man 3 mm dicken Kupferlackdraht mit 160 Windungen verwenden. Die Drahtschicht wird von Spulenrand bis Spulenrand gewickelt.

Wenn der Holzrand des Spulenkörpers 10 mm beträgt, verbleiben noch 160 mm Wicklungshöhe. Von der Höhe des Spulenkörpers wird noch ein Millimeter abgezogen (es verbleiben also 159 mm), damit er später nicht im Kern klemmt, sondern etwas Spiel hat. Diese Höhe der Wicklung (Schichtbreite) wird nun durch die Größe der Windungsstärke geteilt:

$$159 / 3 \text{ mm} = 53 \text{ Wdg}$$

Um die volle Windungsmenge zu erreichen, benötigt man also vier Schichten. Als Ausgangsdraht kann man rechnerisch Draht verwenden, der 0,5 A verträgt. Der Sekundärwickelkörper sollte etwas größer bemessen werden als der Primärwickelkörper. Dadurch vermeidet man eine stärkere Erwärmung der Sekundärseite, was bei einer Wachsisolation für Wachsaustritt sorgen kann. Man errechnet die Kupfermassen beider Wicklungen, die sich über die Drahtstärke und Windungslänge ergeben, und vergrößert das Verhältnis der Sekundärseite durch eine leichte Erhöhung. Die Erhöhung der Kupfermasse wird nicht in der Länge bemessen, sondern in der Ausgangsdrahtstärke. Um ein gutes Verhältnis zu erreichen, kann man 0,45-mm-starken Kupferlackdraht verwenden, denn auf dem Kern ist genug Platz, wenn die Wicklung durch eine höhere Drahtstärke an Umfang zunimmt. Es empfiehlt sich, doppellackisolierten Draht zu verarbeiten.

Die Schichtenspannung sollte nicht zu hoch bemessen werden, denn zu hohe Schichtenspannungen können zu Durchschlägen in der Wicklung und Überschlägen über die Randzonen führen. Eine Schichtenspannung kann gut 200 V betragen, also zwei gegenüberliegende 400 V.

80 Windungen mit einer Schichtenbreite von ca. 36 mm erzeugen eine Spannung von 200 V. Bei einer Doppelschichtenspannung von 400 V kann man drei Lagen

Backpapier verwenden. Das Backpapier ist in der Regel um die 0,056 mm stark. Drei Lagen ergeben mit der Sekundärdrahtstärke zusammen 0,618 mm, aufgerundet also 0,7 mm.

Bei einer Ausgangsspannung von 20 kV (20.000 V), benötigt man also 100 Schichten mit je 200 V Schichtenspannung. Die Stärke der Wicklung summiert sich aus 100 Schichten x 0,7 mm Schichtenstärke. Daraus ergibt sich eine Wicklungsstärke von ca. 70 mm (7 cm). Hierbei entsteht ein möglichst großer Spielraum zwischen der Primärwicklung (ca. 12 bis 14 mm) und der Sekundärwicklung (70 mm). Zusammen ergeben die Wicklungsstärken beider Zonen 84 mm. Dazu kommen noch die inneren Wandungen der Spulenkörper, z. B. 5 mm Sperrholz. Das addiert sich zu einem Maß von 94 mm. Die lichte Weite im Kern beträgt 180 mm.

180 – 94 mm = 86 mm Luftstrecke zwischen den beiden Wicklungen – das ist ein ausreichender Abstand zur Vermeidung von Überschlügen.

Technische Daten des 20-kV-Transformators:

Kernnorm quadratischer UI-Kern 300 x 300 mm

Kernstärke 60 mm (Schenkelblattbreite 60 mm)

Eingang: 400 V/25 A

Ausgang: 20.000 V (20 kV)

$P = U \times I = 10.000 \text{ W (10 kW)}$

Berechnung der Ausgangsstromstärke:

$10.000 \text{ W} / 20.000 \text{ V} = 0,5 \text{ A}$

Grenzbelastbarkeit Kupferdraht:

1 mm Draht = $0,785 \text{ mm}^2 = 3,6 \text{ A}$ Belastung (Extremfall)

$3,6 \text{ A} / 0,5 \text{ A} = \text{Faktor } 7,2$

$0,785 \text{ mm}^2 / 7,2 = 0,109 \text{ mm}^2$

$A = \pi \times r^2$

$r^2 = A / \pi = 0,109 \text{ mm}^2 / 3,1416 = 0,0347$

$r = \sqrt{0,0347} = 0,186 \text{ mm}$

Durchmesser des Drahts = $r \times 2 = 0,372 \text{ mm}$ Drahtstärke

Drahtentlastung durch größere Drahtstärke: 0,4 – 0,45 mm

Gewählte Drahtstärke: 0,45 mm

Matthias Kallénberger

Experimente mit selbst gebauten Jakobsleitern

Dieses Buch beschreibt, wie Sie anhand verschiedener Experimente, die Hoch- und Höchstspannungen erzeugen, solche Leistungen sicher und gut verpackt sichtbar machen.

Es werden verschiedene Bauweisen gezeigt, die durch gängige Mittel und Baustoffe einfach herzustellen sind. Erfahrungen im Bau von Höchstspannungstransformatoren und die ständige Steigerung ihrer Ausgangsspannungen führen zu umfangreichen Kenntnissen beim Aufbau, bei Anordnungen von Wicklungen und einfachen Proportionsverhältnissen von Kernen und Spulen.

Durch Versuche mit Ein-Schenkel-Transformatoren, die als wirtschaftliche Apparaturen eher ungeeignete Funktionstypen sind, fand der Autor ein Experimentiergebiet, aus dem man erstaunliche Werte für das Erzeugen von Hochspannung ziehen kann. In dieser Richtung lassen sich beeindruckende Entladungen erzeugen, die man mithilfe entsprechender Stromquellenleistungen aus dem Hausnetz ausschöpfen kann.

Ferner wird in diesem Buch der Aufbau der Elektroden behandelt, die für majestätische Spannungsentladungen entscheidend sind. Mithilfe einfacher Berechnungen lassen sich leistungsfähige Transformatoren herstellen. Ziel des Buchs ist es vor allem zu zeigen, dass Jakobsleitern auch in größeren Dimensionen erzeugt werden können.

Um das Thema abzurunden, wird auch die Erzeugung von Lichtbogen durch Drehstromtransformatoren behandelt, die in ihrer Erscheinungsform interessant und relativ einfach herzustellen sind.

Das Knistern der Lichtbogen, das Knallen der Zündfunken und das schwerfällige Brummen der Transformatoren geben ein Gefühl, das mit keinem anderen zu vergleichen ist. Der Moment, in dem ein neuer Transformator ans Netz geschlossen wird, erfüllt mit atemberaubender Spannung. So gefährlich diese Versuche sind, so spannend sind auch die Momente, wenn z. B. ein Lichtbogen die Elektroden emporklettert und sich nach oben hin wie das offene Gefieder eines Engels entfaltet.

ISBN 978-3-7723-4339-1



9 783772 343391

EUR 19,95 [D]