

In Abb. 7.2 ist die Abhängigkeit der Eindringtiefe und des daraus resultierenden max. Drahtdurchmesser von der Betriebsfrequenz grafisch dargestellt.

Um trotzdem zu den notwendigen großen, verlustarmen Leiterquerschnitten zu gelangen, hat die Drahtindustrie sogenannte HF-Litzen entwickelt. Sie bestehen aus einer Vielzahl von Einzellackdrähten geringen Durchmessers, auf der Basis der bereits erläuterten Kupferlack-Runddrähte. Die Beeinflussung durch den Skin-Effekt ist so bei der richtigen Wahl des Einzeldrahtes zu vernachlässigen. Bei sehr vielen notwendigen Einzeldrähten werden zunächst Teilmengen gebündelt und diese dann zur Gesamtlitze versellt. Die Schlaglänge gibt an, wie oft das Litzenbündel verdrillt ist. Eine lange Schlaglänge führt zu hochflexiblen Litzen mit schlechter Rundheit, eine zu kurze Schlaglänge zu besserer Rundheit, guter Formstabilität und damit verbessertem Füllfaktor. Abträglich ist aber eine erhöhte Steifigkeit. Ungünstig ist der erhöhte Wickelraumbedarf durch das Versellen der Einzeladern zu einer Gesamtlitze und hervorgerufen durch ein Vielfaches an erforderlichen Einzeldrahtisolationen.

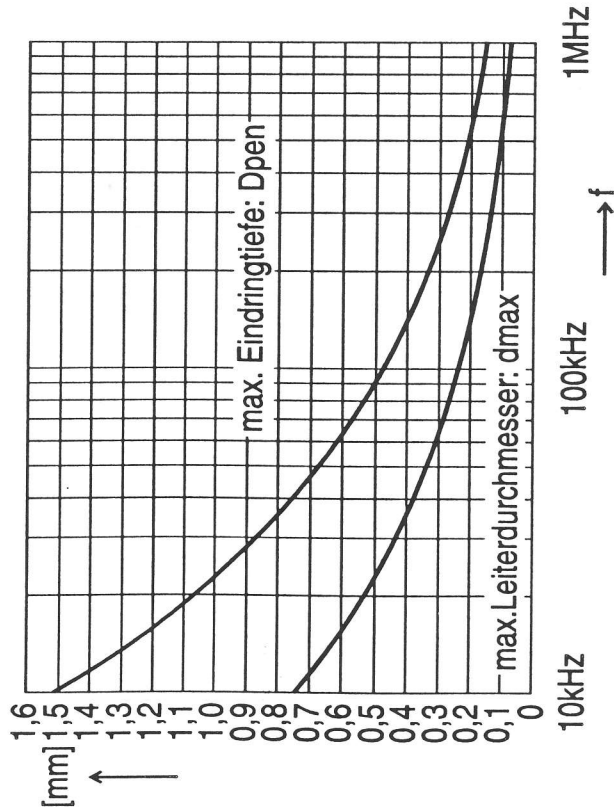


Abb. 7.2 Frequenzabhängige Eindringtiefe bei Kupferlack-Runddrähten

Da sich bei der einfachen Form der HF-Litze ein Überlappen einzelner Adern mit Adern aus entfernteren Lagen während des Wickelvorganges nur schwer verhindern läßt, sind ausschließlich niedrige Windungs- bzw. Lagenspannungen zulässig. Abhilfe kann durch eine zusätzliche Lagenisolation geschaffen werden.



Abb. 7.3 Aufbau einer HF-Litze

Neben offenen HF-Litzen gibt es Ausführungen mit einer zusätzlichen Umspinnung aus den unterschiedlichsten Materialien. Eines der am häufigsten verwandten Garne besteht aus Naturseide. Die positiven Auswirkungen der Umspinnung sind:

- einfache, sauber verlegte Wicklungen in den Lagen
- ein vergrößerter Abstand der Gesamtlitzenoberflächen zueinander und damit verbunden günstigere Voraussetzungen für höhere Windungs- und Lagenspannungen
- bei durchgeführten Imprägnierungen erfolgt eine zusätzliche Steigerung der Isolierspannungsfestigkeit von Windung zu Windung und zwischen den Lagen durch die Imprägniermitteldurchtränkung der Umspinnung
- verbesserte Durchtränkung der HF-Litze.

Als negative Auswirkungen sind:

- der erhöhte Aufwand beim Verzinnen der Anschlußenden
- die Verunreinigung der Lötstelle durch Verbrennungsrückständen der Umspinnung
- gesteigerter Wickelraumbedarf durch die Umspinnung des Aderbündels

zu nennen.

Betrachtet man die in 90% aller Anwendungen geforderte, max. Dauerbetriebstemperatur von 100 °C für einen Schaltzeitteil-Transformators und kalkuliert man die möglichen partiellen Temperaturerhöhungen im Wickelaufbau mit ein, so sollte mindestens die Wärmeklasse B, besser aber Wärmeklasse F gewählt werden.

Ein nicht unerheblicher Nebeneffekt ist direkt mit den verschiedenen Lackbasen gekoppelt. Die Verzinnbarkeit der Drahtenden erschwert sich mit den wachsenden Anforderungen an die Dauergrenztemperatur. So gibt es Drähte, die nur mit Lötinnentemperaturen von bis zu 500 °C oder aber erst nach mechanischer Vorbehandlung verzinnbar sind. Dies kann aber zu Querschnittsreduzierungen im Bereich des Drahtanschlusses oder zum Abriß des Drahtes beim Lötvorgang führen. Als einzige Gegenmaßnahme für sehr dünne Drähte ($\leq 0.10 \text{ mm}\varnothing$) ist das mehrfache Verdrillen der Drahtenden möglich. Eine chemische Ablösung der Isolierschicht ist nicht zu empfehlen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß für die Konzeptionierung eines Isoliersystems innerhalb eines Transformators die üblichen Drahtlacksschichten nicht zur "sicheren elektrischen Trennung" herangezogen werden dürfen, wie sie in den verschiedenen Vorschriftenwerken gefordert sind, weder für sich allein noch als Bestandteil im Gesamtaufbau eines Isoliersystems integriert. Einer der ablehnenden Gründe ist die Zulässigkeit von Fehlstellen der Lackdrahtisolation. Diese Fehlerzahl korreliert mit der Lacksschichtdicke und kann bis zu 15 Isolationsschwachpunkte bei Drahtdurchmessern von 0,04 - 0,50 mm bedeuten.

7.1.1.2 HF-Litze

Mit steigender Betriebsfrequenz macht sich der Skin-Effekt negativ in den Wickeldrähten bemerkbar. Dabei kommt es durch hochfrequente Wirbelströme innerhalb des Leiters zu Strombahnverdrängungen weg von der Leitermitte, hin zur Drahtoberfläche. Der effektive Leiterquerschnitt wird dadurch reduziert. In ausgeprägten Fällen wäre ein Hohl Draht in der Lage, die gleiche Stromdichte wie ein Massivdraht zu tragen.

Die frequenzabhängige Eindringtiefe kann in überschlägigem Maße nach folgender Zahlengleichung ermittelt werden:

$$D_{pen} = 75 \times \frac{1}{\sqrt{f}}$$

7.1.1.1 Kupferlack-Runddrähte

Das gebräuchlichste Material zur Fertigung der Wicklungen ist der Kupferlack-Runddraht. Es handelt sich hierbei um einen runden Kupferkern hoher Reinheit mit aufgebrachtener Lacksschicht. Diese Isolation der Kupferader, die Stärke der Schicht beträgt einige µm, der Kupferader dient der elektrischen Trennung der Windungen untereinander.

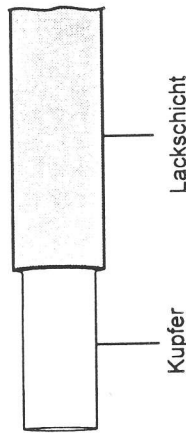


Abb. 7.1 Aufbau eines Kupferlack-Runddrahtes

Kupferlackdrähte erfahren eine Einteilung in verschiedene Kategorien. Das erste Unterscheidungsmerkmal ist die Dicke der Lacksschicht. Es finden sich nach IEC 317-0-1 Gruppen mit den Bezeichnungen Grad 1, Grad 2 und Grad 3. Die Gradzahlen geben die Stärke der aufgetragenen Lacksschicht an. Diesen Werten entsprechend staffelt sich auch eine mit steigender Gradzahl zunehmende Spannungsfestigkeit.

Eine weitere Differenzierung erfolgt durch die Trennung in zulässige Dauer-Grenztemperaturbereiche bei einer zu erwartenden Mindestgebrauchsdauer von 20000 Std. Voraussetzung hierfür sind Lacke mit wechselnder Zusammensetzung, auf Basis von z.B. Polyurethan, Polyesterimid oder Polyimid. Zu den wichtigsten Grenztemperaturen zählen:

Kennbuchstabe der Temperaturklasse	A	E	B	F	H
zulässige Grenzdauer-temperatur für 20000 Std.	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C

7.1.1.8 Tabellen zu den gebräuchlichsten Wickelmaterialien

Die nachfolgenden Tabellen beinhalten die wichtigsten Drahtsorten zur Fertigung von Schalteteilübertragern. Viele Werte sind den entsprechenden Normenwerken entnommen. Doch muß auch gesagt werden, daß die verschiedenen Drahtanbieter häufig über eine entsprechende Hausnorm verfügen. Dies läßt solche Tabellen nur angenähert für allgemein gültig erklären. Bei der Berechnung eines Übertragerwickels sollten folgende Punkte bedacht sein:

- HF-Litzenparameter ohne und mit Umspinnung sind nur sehr schwer in einer Tabelle aufzulisten. Die für die Wickeltechnik erforderlichen Daten sind von sehr vielen äußeren Einflüssen abhängig. Für eine angenäherte Füllfaktorberechnung einfachumwickelter HF-Litze mit 0,10 mmØ Einzeladern reicht der folgende Ausdruck aus:

$$f_{u_{HF}} = \frac{110}{dr_{HF}^2} \quad dr_{HF} = \text{Außendurchmesser der HF-Litze}$$

- Füllfaktorberechnungen für Runddrähte basieren auf Mittelwerten oder sind exemplarisch an Musterwickeln aufgenommen worden. Der Füllfaktor ist neben dem Außendurchmesser sehr stark vom Drahtzug, der Drehgeschwindigkeit, der Qualität der Wickelmaschine, der Gleitfähigkeit, der Spulenkörperbreite (Häufigkeit der Lagenzahl) und der eventuell erforderlichen Drahtausführungsisolierung abhängig. Überschlägig läßt sich der Füllfaktor auch nach einem vereinfachten Formalismus berechnen:

$$f_{u_{DR}} = \frac{116}{1,9595 \cdot dr_{DA}} \quad dr_{DA} = \text{Außendurchmesser des Runddrahtes}$$

- Drahtaußendurchmesserangaben sind aus den Extremabmessungen gemittelt worden.
- Mittlere Windungszahlen basieren auf optimalen Voraussetzungen wie z.B. ein absolut gerader Wickelgrund. Mit steigender Lagenzahl kann sich der Wert verschlechtern.
- Wechselspannungsfestigkeit bezieht sich auf eine 50 Hz-Prüfspannung nach dem „Twisted Pair“-Testverfahren. Die Tabellenwerte sind nicht den DIN-Einstufungen entsprechend sondern orientieren sich an den notwendigen Praxisanforderungen.

7 Induktive Komponenten für Schaltnetzwerke

allerdings einen extrem großen Wickelraum. Ein eventueller Kernsprung kann vonnöten werden. Raumangebot in der Schaltung und der Materialpreis des größeren Kernes sind die Beurteilungskriterien für diesen Lösungsansatz.

- Kostenoptimierung:
Die ökonomischen Belange angestrebter Mittel- und Großserien haben in vermehrtem Maße Einfluß auf den Aufbau und die Wahl der Materialien für eine Wicklung. In solchen Fällen ist nicht immer der technisch optimale Wickelaufbau sondern vielmehr der Kompromiß zwischen diesem und einer preiswürdigen Realisierbarkeit unter Einbeziehung der Gesamtfertigungskosten anzutreffen. Eine Wicklung mit zwei parallel gewickelten Runddrähten von je 0,60 mmØ ist vielfach kostengünstiger als die Fertigung mit einer 75 x 0,10 mmØ querschnittsgleichen Litze. In diesem gewählten Beispiel ist nicht nur die reine Wickelzeit sondern es sind auch die erhöhten Materialkosten der Litze und die schwierigeren Lötarbeiten zu kalkulieren. Nur wenn es um das technologisch Machbare hinsichtlich Wirkungsgrad, Spannungsfestigkeit, Lebensdauer usw. geht, treten die Aspekte der Kostenoptimierung in den Hintergrund.

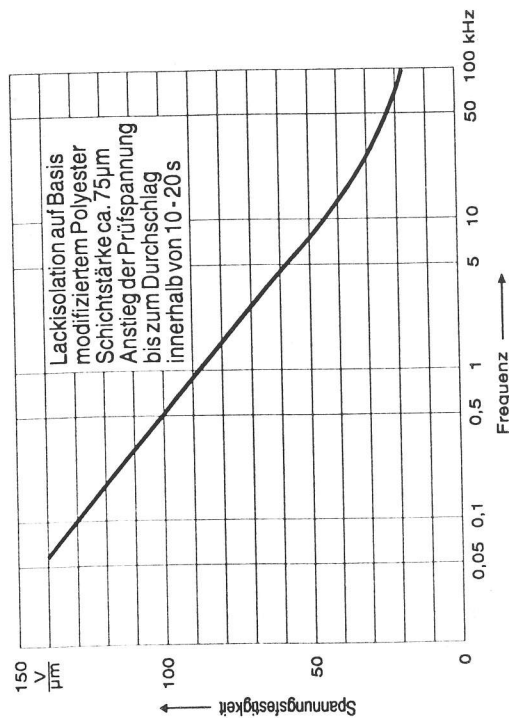


Abb. 7.7 Abhängigkeit der Isolierfähigkeit von Kupferlack-Drähten von der Frequenz