

Aluminium in der Hochfrequenztechnik

Von

Dr. L. Rohde und Dr. H. Schwarz

Das Aluminium spielt in der heutigen Metallbewirtschaftung eine besonders wichtige Rolle. Es erscheint daher zeitgemäß, zu prüfen, welche Bedeutung ihm in der Hochfrequenztechnik zukommt. Dabei ist es durchaus nicht notwendig, das Aluminium unter dem Gesichtspunkt eines Ersatzstoffes zu betrachten; es kann vielmehr gezeigt werden, daß Aluminium sogar ein für viele Zwecke der Hochfrequenztechnik besonders geeigneter Baustoff ist. Eine Gegenüberstellung mit dem Kupfer muß natürlich erfolgen, soweit es sich um die Anwendungen als Leiterwerkstoff handelt. Einleitend sei noch bemerkt, daß 93 % des Rohmetallwertes von Aluminium durch die in Deutschland vorgenommene Aufbereitung und Veredelung getragen werden. Nur 7 % des Metallwertes werden aus dem Ausland als Rohstoff eingeführt und erfordert deshalb Devisen. Aluminium ist daher durchaus als vorwiegend deutscher Rohstoff zu werten.

Die Anwendung des Aluminiums in der Hochfrequenz ist altbekannt. Man kann sagen, daß es von dem Augenblick an benutzt wurde, von dem an man Bleche und Drähte herstellen konnte. In der Hauptsache ist es allerdings als Werkstoff für Gehäuse und mechanische Bauteile verwendet worden, weniger als Leiter für hochfrequente Ströme. Die Gründe hierzu sind mannigfaltig; der Hauptgrund dürfte der sein, daß man gegenüber dem Kupfer entsprechend der geringeren Leitfähigkeit Nachteile zu erhalten glaubte. Durch besondere Verfahren kann man aber Aluminium in der Hochfrequenztechnik dem Kupfer gleichwertig machen.

Die Eigenschaften des Aluminiums

Tafel 1

Werkstoffeigenschaften von Reinaluminium und Kupfer

	Reinaluminium	Kupfer
Spez. Gewicht bei 20° C	2,7	8,9
Elektr. Leitfähigkeit bei 20° C (hart) $\frac{m}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$	rund 35	56
Elektr. Leitfähigkeit bei 20° C (weich) $\frac{m}{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}$	„ 36	58
Spez. Widerstand bei 20° C (hart) $\frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{m}$	„ 0,0286	0,0178
Spez. Widerstand bei 20° C (weich) $\frac{\text{Ohm} \cdot \text{mm}^2}{m}$	„ 0,0278	0,0172
Spez. Wärme bei 1° 100° C $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{°C}}$	0,22	0,09
Temp. Koeffizient d. elektrischen Widerstandes bei 20° C	+0,004	0,0038
Wärmeleitfähigkeit $\frac{\text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sek} \cdot \text{°C}}$	0,5	0,9
Schmelzpunkt °C	658	1083
Schmelzwärme cal/g	100	43,3
Zugfestigkeit (hart, gewalzt oder gezogen) kg/mm ²	14—25	35—45
Zugfestigkeit (halbhart und hart für sehr starke Profile) kg/mm ²	9—14	25—35
Zugfestigkeit (weich, gewalzt oder gezogen und gegläht) kg/mm ²	7—9	21—24
Elastizitätsmodul kg/mm ²	6000—7000	12000—13000
Linearer Ausdehnungskoeffizient von 20—100° C	24 · 10 ⁻²	17 · 10 ⁻⁶

Zum Vergleich wollen wir Aluminium dem Kupfer gegenüberstellen. Unter Aluminium soll Reinaluminium verstanden werden, das einen Mindestgehalt von 99,5 % Aluminium aufweist. Die Eigenschaften des Aluminiums hängen nämlich stark von seinem Reinheitsgrad ab. In Tafel 1 sind die hier interessierenden Daten für Aluminium und Kupfer aufgeführt; aus ihnen ergeben sich folgende wesentliche Gesichtspunkte:

1. Aluminium wiegt bei gleichem elektrischem Widerstand und gleicher Länge des Leiters nur die Hälfte des Kupfers.

2. Das Gewicht beträgt bei gleichem Querschnitt und Länge nur $\frac{1}{2}$ von dem des Kupfers.

3. Da sich der, spezifische Widerstand von Aluminium zu Kupfer wie etwa 1,6:1 verhält, muß man den Querschnitt von Aluminium 1,6 mal so groß machen, damit gleicher Leitwert erhalten wird.

4. Wie wir später sehen werden, kann mit Aluminium in der Hochfrequenztechnik gleicher Widerstand gegenüber Kupfer bei nur $\frac{1}{2}$ des Gewichtes erreicht werden.

Unter den Eigenschaften des Aluminiums ist hervorzuheben, daß es sich stets mit einer nicht leitenden Oxydschicht überzieht, die auch gegen chemische Angriffe schützt. Diese Schicht erneuert sich bei einer Verletzung sofort; das ist ein Grund dafür, daß sich Aluminium ohne besondere Behandlung der Oberfläche sehr lange Zeit schön aussehend hält. Die Schicht ist aber bei Herstellung leitender Verbindungen störend, weshalb hierbei Vorsicht zu walten hat. Insbesondere muß der Kontaktdruck mindestens 0,5 kg pro qmm betragen, damit ein wirklich guter Stromübergang gesichert ist.

Aluminium darf nicht mit jedem Metall zusammengeschaltet werden, wenn es Feuchtigkeit oder starken Verunreinigungen ausgesetzt ist. Wie man aus der elektrolytischen Spannungsreihe der Tafel 2 ersieht, ist Aluminium

Tafel 2

Elektrolytische Spannungsreihe

Lithium	..... -3,02 Volt	Kobalt	..... -0,26 Volt
Kalium	..... -2,95 „	Nickel	..... -0,25 „
Barium	..... -2,8 „	Zinn	..... -0,15 „
Natrium	..... -2,72 „	Blei	..... -0,13 „
Strontium	..... -2,7 „	Antimon	..... +0,2 „
Kalzium	..... -2,5 „	Wismut	..... +0,2 „
Magnesium	..... -1,87 „	Arsen	..... +0,3 „
Aluminium	..... -1,3*	Kupfer	..... +0,35 „
Mangan	..... -1,1 „	Silber	..... +0,80 „
Zink	..... -0,76 „	Quecksilber	..... +0,86 „
Chrom	..... -0,56 „	Platin	..... +0,87 „
Eisen	..... -0,43 „	Gold	..... +1,5 „
Kadmium	..... -0,42 „	Wasserstoff	..... ± 0 „
Thallium	..... -0,34 „		

stark elektronegativer und besitzt z. B. gegen Kupfer ein Kontaktpotential von 1,65 Volt. In Gegenwart leitender Flüssigkeiten tritt daher starke Korrosion ein. Die Verbindung mit verzinktem Metall ist günstig, weil Zink gegen Aluminium nur eine geringe Spannung besitzt.

Von dieser Eigenschaft des Aluminiums macht man übrigens bei den Eloxalverfahren (Elektrolytisch-oxydiertes Aluminium) Gebrauch. Man kann nämlich elektrolytisch durch verschiedene Verfahren eine Ober-

* Je nach Stärke der Oxydhaut kann Aluminium bis an die Stelle von Zink vorrücken.

flächenschicht erzeugen, die bis zur Härte des Korunds gebracht werden kann und die gleichzeitig eine hohe Durchschlagsfestigkeit hat. Die Durchschlagsfestigkeit der Eloxalschichten läßt sich für Sonderzwecke sehr weit treiben; es sind Durchschlagsspannungen bis zu 1000 Volt gemessen worden, während sich Spannungsfestigkeiten von einigen 100 Volt mit Sicherheit herstellen lassen. Das ist selbst dann möglich, wenn das Metall noch nachträglich gebogen werden muß. Eloxierte Oberflächen können gleichzeitig auch mit Kunstharzen imprägniert werden, wodurch sich ganz besonders hochwertige Isolationen erreichen lassen. Für die Hochfrequenz von höchster Wichtigkeit ist die Tatsache, daß sich Aluminium mit Kupfer plattieren läßt. Kupfer und Aluminium werden hierzu zusammengeschweißt und dann z. B. gewalzt; dieser Werkstoff wird als Cupal bezeichnet. Die Verbindung von Kupfer und Aluminium ist ganz innig und löst sich nicht. Auf diese Weise können Bleche, Drähte und Rohre mit Kupferüberzug hergestellt werden; das sind Werkstoffe, die dem Hochfrequenztechniker geradezu eine Fülle neuer Möglichkeiten geben. Elektrolytisch aufgebrachte Kupferoberflächen haben sich dagegen bisher nicht sonderlich bewährt.

Aluminiumlegierungen kommen in der Hochfrequenztechnik nur insofern in Frage, als mechanische Bauelemente daraus hergestellt werden. Vorwiegend wird hierzu Spritzguß und Silumin verarbeitet.

Die Hochfrequenzeigenschaften

Besondere Beachtung erfordern die mit dem Skinneffekt zusammenhängenden Erscheinungen. Bekanntlich hat dieser auch als Stromverdrängung bezeichnete Effekt zur Folge, daß bei Hochfrequenz mehr die äußeren Leiterteile der Stromführung dienen, während das Innere nur wenig oder gar nicht beteiligt ist. Somit entsteht effektiv eine Verringerung des dem Strom zur Verfügung stehenden Querschnitts. Diese Erscheinung tritt um so stärker auf, je höher die Frequenz, je besser die Leitfähigkeit und je größer der Durchmesser des jeweiligen Drahtes sind. Zur Berechnung des effektiven Widerstandes bei einem zylindrischen geraden Leiter dient folgende Formel:

$$R_H = R_{gl} \cdot \sqrt{\pi} \cdot f \cdot a + \frac{1}{4}$$

f = Frequenz in Hz, L = Leitfähigkeit pro cm in CCS-Einheiten

Der Umstand, daß die höhere Leitfähigkeit eines Metalls eine stärkere Stromverdrängung zur Folge hat, verkleinert bei Hochfrequenz den Widerstandsunterschied von Kupfer und Aluminium. Während beispielsweise bei Gleichstrom Aluminiumdrähte einen 1,7mal so hohen Widerstand als Kupferdrähte gleichen Querschnitts besitzen, ist bei Hochfrequenz nur der 1,35fache Widerstand vorhanden. Bei der Verwendung in der Hochfrequenztechnik darf diese wichtige und dem Aluminium günstige Tatsache nicht übersehen werden. In Tafel 3 sind für verschiedene Drahtstärken und Frequenzen die für ein Meterstück geltenden Widerstände in Ohm angegeben.

Tafel 3

Wechselstromwiderstand in Ω von 1 m langen Aluminiumdrähten in Abhängigkeit von der Frequenz

\varnothing mm	1000 kHz	500 kHz	200 kHz	100 kHz	50 kHz	10 kHz	2 kHz	1 kHz
0,5	—	0,195	0,287	0,394	0,542	1,17	2,58	3,62
1,0	0,066	0,089	0,102	0,189	0,264	0,579	1,29	1,81
2,0	0,022	0,042	0,066	0,092	0,129	0,286	0,639	0,900
4,0	0,011	0,022	0,035	0,049	0,068	0,152	0,342	0,48

Stellt man die Frage, um wieviel größer der Durchmesser eines Aluminiumleiters sein muß, damit gleiche Leitfähigkeit wie bei Kupfer erzielt wird, so ergibt sich sowohl bei Gleichstrom als bei Hochfrequenz der gleiche Faktor, nämlich 1,7. Daß sich bei Hochfrequenz kein günstigerer Wert ergibt, hat seinen Grund in der dem zunehmenden Querschnitt proportionalen Vergrößerung der Stromverdrängung. Falls die Belastbarkeit des Leiters von Wichtigkeit ist, wird infolge der 2,5mal so großen Oberfläche die Abkühlung bei Aluminium besser sein, da die geringere Wärme-Leitfähigkeit schon teilweise durch die Querschnittvergrößerung aufgehoben ist.

Reziprok der Stromverdrängung zur Oberfläche ist der Begriff der Eindringtiefe elektrischer Ströme in das Metall. Je größer die Eindringtiefe, desto größer sind bei Abschirmungen die Verluste. In Abb. 1 sind für Aluminium und

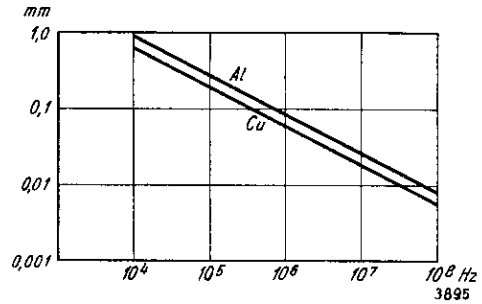


Abb. 1. Eindringtiefe von Hochfrequenz in Aluminium und Kupferbleche

Kupfer die Eindringtiefen angegeben. Verwendet man beispielsweise zur Abschirmung von Spulen Aluminium, so sind dadurch die Verluste um etwa 5 % größer als bei Kupfer.

Da — wie aus obigem ersichtlich — in der Hochfrequenztechnik hauptsächlich die Oberfläche des Metalls als Leiter

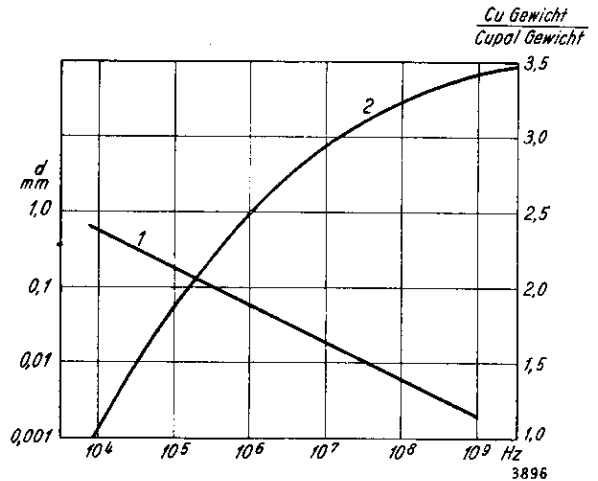


Abb. 2. Kupferschichtstärke für Hochfrequenz und Gewichtsverhältnis bei gleichem Leitwert

Bedeutung hat, besteht die Möglichkeit, durch Aufbringen einer gut leitenden Oberflächenschicht eine Vergütung herbeizuführen. Wie bereits oben dargelegt, kommt dafür das Walzverfahren in Frage. Bei den bekannten Cupalblechen sind oft nur zehntel Millimeter starke Kupferschichten auf Aluminium gewalzt. Das Gewicht solcher Platten ist um ein geringes größer als das solcher aus reinem Aluminium. Für Abschirmungen im Rundfunkbereich sind etwa Eindringtiefen von $1/100$ bis $1/10$ mm anzunehmen. Durch eine Kupfer-

schicht dieser Stärke wird ein etwa 2 mm starkes Aluminiumblech höchstens um 15 % im Gewicht schwerer, als wenn es aus reinem Aluminium bestünde. Da zu diesen elektrischen Eigenschaften auch noch die günstigen chemischen Kupferoberflächen hinzukommen, die auch Lötungen, galvanische Überzüge mit Silber usw. ermöglichen, haben wir in dem Cupal einen Werkstoff für die Hochfrequenz, der mit dem geringen Gewicht des Aluminiums die Vorzüge der Kupferoberfläche vereint.

In neuerer Zeit sind auch erfolgreiche Versuche unternommen worden, Aluminiumdrähte und Röhren mit Kupferüberzügen zu versehen. Die Stärke der Kupferschicht, die notwendig ist, um einen Aluminiumdraht so zu vergüten, daß er die gleiche Leitfähigkeit wie ein Kupferdraht besitzt, hängt durch den Stromverdrängungseffekt in erster Linie von der Frequenz ab. In Kurve 1 der Abb. 2 ist für einen 2 mm starken Draht die Schichtdicke der Oberfläche angegeben, die zur Erzeugung gleicher Leitfähigkeit notwendig ist. In Kurve 2 ist dann gleichzeitig das Gewichtsverhältnis gegen reinen Kupferdraht dargestellt.

Wenn die Stromleitung nur von der äußeren Kupferschicht übernommen wird, dann dient die Aluminiumseele eigentlich nur als Träger, also zur Erzielung einer genügend großen mechanischen Festigkeit. Für Durchmesser über 2 mm ist es aus Gewichtsgründen vorteilhafter, als Träger hartgezogenes Aluminiumrohr zu verwenden. Bei einem Gesamtdurchmesser von 20 mm reicht für die meisten Anwendungen eine Wandstärke von 1 mm voll aus. Nach Verkupferung der Oberfläche hat dann ein 1 m langes und 237 g schweres Leiterstück bei 10^7 Hz nur einen Hochfrequenzwiderstand von 0,013 Ohm.

Anwendung von Blechen und Guß

Die Gehäuse fast aller in den Laboratorien hergestellten Geräte bestehen aus Aluminium; geringes Gewicht und angenehme Verarbeitung sind die Gründe hierzu. Auch für das Innere, für das Gestell sowie für die Bauteile fast aller Rundfunkgeräte wird Aluminium verwendet. Es läßt sich für Massenherstellung sehr leicht verarbeiten, bleibt ohne besondere Behandlung sauber und sieht daher gut aus. Prä-

aus dem Abschnitt über die Hochfrequenzeigenschaften hervorgeht, ist Cupal praktisch dem Vollkupfer gleich. Daher kann man z. B. Drehkondensatoren gemäß Abb. 4 an Stelle von Aluminium mit Cupal ausrüsten; man erhält dann eine Verbesserung von etwa 10 % bei 10^7 Hz.

Beliebt sind in der Hochfrequenz Gußteile aus Aluminium und Silumin. Ganze Gerätegehäuse werden daraus gegossen (Abb. 3). Auf besondere Eigenschaften des Gußmetalls für die Hochfrequenz kommt es dabei nicht an.

Die in den Empfängern verwendeten Wickelkondensatoren haben ausschließlich Aluminium-Folien als Belege. Soweit die Gehäuse bisher aus verzinkten Eisen hergestellt werden, geht man auch jetzt langsam dazu über, Aluminium zu verwenden. Ist es unbedingt notwendig, daß Anlöten von Drähten möglich sein muß, so kann hier einseitiges Cupal benutzt werden.

Anwendung von Drähten und Röhren

Der Ersatz von Kupferleitern durch Aluminium ist gemäß den ergangenen Verordnungen am weitestgehendsten im Antennenbau durchgeführt. Besonders bei Empfangsantennen, wo der rein Ohmsche Widerstand von vollkommen untergeordneter Bedeutung für Aufnahme und Zuführung der elektrischen Energie zum Empfänger ist, wird in elektrischer Hinsicht kein Unterschied zwischen einer Bronze-, Kupfer- oder Aluminiumantenne bestehen¹⁾. Bei gleichem Querschnitt ist der Hochfrequenzwiderstand nur um etwa 35 % verschieden. Auch bei Sendeantennen läßt sich, ohne das Gewicht einer Kupferantenne zu erreichen, durch 70%ige Querschnittsvergrößerung ebenfalls gleicher Verlustwiderstand erzielen.

Durch die Vergrößerung des Durchmessers ist aber eine stärkere mechanische Beanspruchung durch Winddruck bedingt. Damit wird die empfindlichste Stelle im Aluminiumantennenbau berührt. Die mechanischen Werkstoffeigenschaften, besonders bei Reinaluminium, genügen kaum den Anforderungen frei schwingender Antennen. Die gegenüber Bronze etwa 3—4mal kleinere Bruchfestigkeit, die halb so große Streck- und Elastizitätsgrenze führen oft zu Zerstörung bei Vereisung, Schneelast oder federnden Antennenmasten usw. Durch Verwendung von Aluminiumlegierungen oder durch die Kombination von Stahl mit Aluminium, z. B. durch die Umspinnung von Stahlseelen mit Aluminium, ist es gelungen, auch diese letzte Schwierigkeit zu beseitigen.

Als Aluminiumlegierung dürfte hauptsächlich der bekannte Aldreydraht in Frage kommen. Diese aus Aluminium, Mangan und Silizium bestehende Legierung hat nur 10—20 % geringere Bruchfestigkeit als Kupfer, während die Elastizitätsgrenzen übereinstimmen.

Stahlseelen mit Aluminiumumspinnung sind nur dann sinnvoll, wenn die tragende Seele tatsächlich aus elastischem, nichtrostendem Stahl besteht. Eingeflochtene weiche Eisendrähte führen durch Rost zu Korrosion und Bruch und damit zu baldiger Zerstörung der Antenne. Die Festigkeit guter

Kombinationsantennen übersteigt noch die der Kupfer- und Bronzeantennen.

Für die Anbringung von Aluminiumantennen sind allerdings noch besondere Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Eine direkte Verbindung mit Kupfer, Bronze oder Eisen an wasserzugänglichen Stellen ist unbedingt zu vermeiden, da an und in der Nähe der Verbindungsstelle das Aluminium

¹⁾ Ja sogar eine Stahlantenne besitzt für Empfangszwecke gleich gute Eigenschaften, weshalb man hierfür in steigendem Maße Drähte aus nichtrostendem Stahl verwendet.

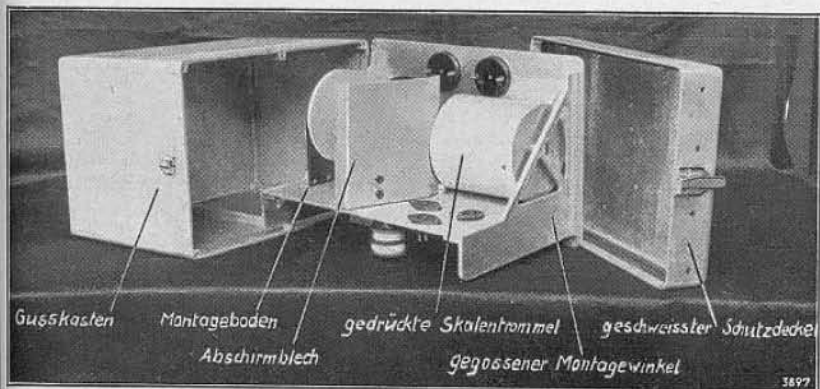


Abb. 3. Beispiel der weitgehenden Anwendung von Aluminium im Gerätebau

und Stanzteile lassen sich gut formen, da die Härte des Metalls dem Zweck angepaßt werden kann. Trennwände, Abschirmung, Hüllen für Transformatoren, Skaleneinfassungen, Gehäuse von Dreh-Spannungsteilern usw. findet man aus Aluminium, vor allem auch, weil es billiger als Kupfer ist. Als Beispiel möge Abb. 3 dienen, die eine weitgehende Verwendung des Aluminiums zeigt. Es ist interessant festzustellen, daß in sehr vielen Geräten das Aluminium über die Hälfte der vorhandenen Metallmenge einnimmt.

Hauptsächlich werden zu obigen Zwecken wie auch zur Herstellung von Drehkondensatoren Bleche verwendet. Wie

durch Korrosion stark angegriffen wird. Die Berührungsstelle von Aluminium und Kupfer stellt nämlich ein galvanisches Element mit einer Spannung von etwa 1,6 Volt dar, dessen negativer Pol das Aluminium bildet. Ist eine direkte Verbindung notwendig, so muß sie sehr rein und sauber ausgeführt und in ganz trockenem Zustand mit einer isolierenden Schicht umgeben werden. Vorteilhaft ist das Bestreichen mit Asphaltlack und darauffolgendes Umwickeln mit Isolierband²⁾.

Für die Verbindung zweier Aluminiumlitzen, z. B. der Rückschlingen bei der Befestigung an der Isolierkette, werden am besten aus Weichaluminium bestehende Rohre in Form von Würg- oder Ziehverbindern benutzt. Bei diesen Verbindungen ist ebenfalls eine Abdichtung gegen Feuchtigkeit wegen der sonst im Inneren möglichen Korrosion zu empfehlen. Auf Druck beruhende Verbindungen machen

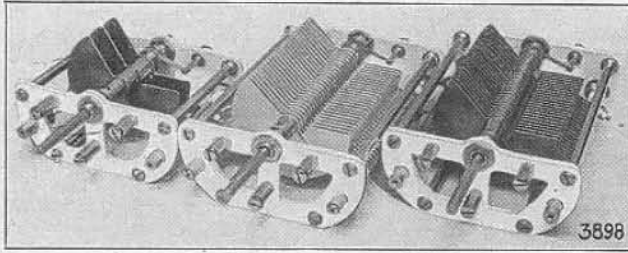


Abb. 4. Drehkondensatoren mit Aluminium und Cupalblechen. Bei 10⁷ Hz ist Cupal um 10% besser

eine sehr sorgfältige Reinigung der Verbindungsstellen notwendig, da bekanntlich jedes Aluminiumstück eine nichtleitende Oberflächen-Oxydschicht besitzt.

Den besten Stromübergang bietet zweifellos die Schweißung, doch darf diese nur an Stellen vorgenommen werden, die keiner mechanischen Beanspruchung unterworfen sind. Die Technik der Aluminiumlötung ist noch nicht so weit fortgeschritten, daß Lötverbindungen volle mechanische Sicherheit aufweisen.

Für eine eindrätige Zuleitung zu den Antennen gilt das bereits für die Antennen selbst Gesagte. Neue Gesichtspunkte treten erst auf, wenn konzentrische Rohrleitungen als Zuführung verwendet werden. Die durch den Wellenwiderstand gegebenen günstigen geometrischen Abmessungen lassen hierbei einen Ausgleich der verminderten Leitfähigkeit des Aluminiums durch größeren Werkstoff nicht zu; nur mit Hilfe des Cupal kann die Angleichung an Kupfer erfolgen. Aus gleichen Gründen ist Cupalrohr ein wichtiger Baustoff für Energieleitungen, Dipolantennen und Breitbandkabel. Bei Frequenzen oberhalb 3 · 10⁶ Hz genügt eine Kupferauflage von 0,07 mm. Cupalröhren können aneinandergelötet werden.

Die Anwendung von Aluminiumgeflechtem für abgeschirmte Kabel ist ziemlich naheliegend. Auf der metallischen Abschirmung befindet sich ja fast immer noch ein Lack- und Gewebeüberzug, so daß das Aluminiumgeflecht vor Feuchtigkeit geschützt liegt. Es empfiehlt sich, für die Enden einen einseitigen Cupalring zu verwenden; dadurch wird es möglich, durch Lötung weitere Verbindung anzubringen.

Selbstinduktionsspulen aus Aluminium haben bisher in der Hochfrequenztechnik noch fast gar keine Anwendung gefunden. Die Herstellung dünnadrätiger zäher Litzen, aus denen die meisten Spulen größerer Selbstinduktion hergestellt werden, ist bisher noch nicht einwandfrei gelungen. Lediglich dort, wo Volldrähte oder Rohre aus Kupfer zum Bau

von Spulen verwendet werden, ist ein Ersatz durch Aluminium heute bereits möglich. Die durch geringeren Leitwert und größere Wirbelstromverluste verursachte Dämpfung sowie die schlechte Kontakt- und Lötbarkeit geben aber auch hier zu Schwierigkeiten Anlaß. Da gerade im Senderbau auf kleinste Dämpfung der Schwingungskreise geachtet werden muß, wird auch in nächster Zukunft Reinaluminium kaum herangezogen werden. Damit soll aber nicht gesagt sein, daß in diesem Fall Reinkupfer nicht ersetzt werden könnte. Ganz im Gegenteil bietet die Verarbeitung von Cupalrohren und Drähten durch geringes Gewicht eine wirkliche technische Verbesserung. Da die Kupferoberfläche

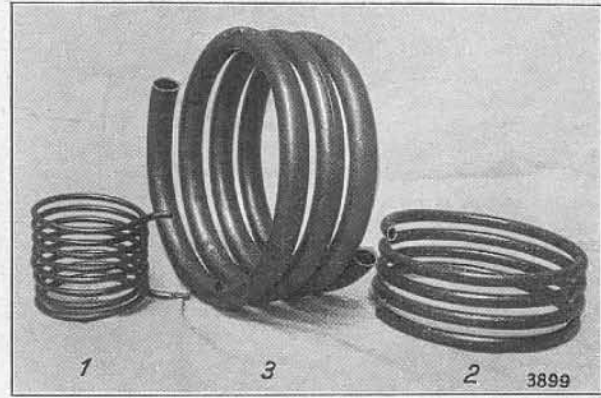


Abb. 5. Spulen aus Kupfer-Aluminium = Cupal von 5, 10 und 20 mm

stets so dick gemacht werden kann, daß für die jeweilige Arbeitsfrequenz nur sie als Stromleitung dient, besteht auch kein elektrischer Güteunterschied. Auch Löt- und Klemmverbindungen lassen sich nun ohne weitere Gefahr ausführen. In Abb. 5 sind einige Cupalspulen wiedergegeben, deren Daten in Tafel 4 zusammengefaßt wurden. Die ge-

Tafel 4

Spulen-Werkstoff	L	Gewicht in g	Gütefaktor $\omega L/R$			
			30 m	100 m	300 m	Abb. 5
Cupalrohr ∅ 5 × 4 mm ...	3600	58	470	350	250	I (1)
Cu-Auflage 0,1 mm Aluminiumrohr ...		38	360	250	170	
Kupferrohr ∅ 5 × 4	3600	127	470	350	260	
Cupalrohr 10 × 8,5. Aluminiumrohr ...	2600	154 120	580 410	400 270	270 200	(2)
Kupferrohr 10 × 8,5		390	580	400	280	
Cupalrohr 20 × 18 . Aluminiumrohr ...	2000	480 380	900 600	600 400	400 280	
Kupferrohr		1290	900	600	400	(3)
Kupferdraht ∅ 1 mm	11600	22	320	220	170	
Aluminiumdraht ∅ 1 mm		6,5	215	158	115	
Cupaldraht ∅ 1 mm		9,3	320	220	165	

messenen Gütezahlen ($G = \frac{\omega L}{R}$) zeigen, daß gerade im Gebiet der Kurzwellen, in das die Spulen ihrem Selbstinduktionswert entsprechend gehören, die Verluste genau gleich dem der viel schwereren Kupferspule sind. Vergleichsweise sind die für reine Aluminiumspulen geltenden Werte aufgeführt. Im Grenzfall wiegt eine Cupalspule nur $\frac{1}{3}$ der gleichguten Kupferspule.

Zeichnungen und Aufnahmen vom Verfasser

²⁾ Vgl. dazu „Funk“ 1936, Heft 9, Seite 265: Anschluß von Aluminium-Antennenlitzen an Blitzschutzgeräte.