

Kupfer oder Aluminium im Antennenbau?

**Mitteilungen aus dem
Institut für Umwelttechnik
Nonnweiler – Saar
Dr. Schau
DL3LH**

Vorwort:

Die Antenne ist der beste Hochfrequenzverstärker, war das gängige Schlagwort unserer Oldtimer. Auch heute ist der Antennenbau für viele Amateure ein wichtiges Betätigungsfeld. Und es lohnt sich. Was nutzt ein teurer Transceiver oder eine Endstufe, wenn die teuer erzeugte HF-Leistung im Koppler, in der Zuleitung oder im Antennendraht in Wärme gewandelt wird, weil das Zusammenspiel der Einzel-Komponenten nicht aufeinander abgestimmt wurde. Eine Antennenanlage muss berechnet werden, will man ein optimales Ergebnis erzielen.

Beim Antennenbau tritt daher auch immer wieder die Frage nach dem zu verwendeten Material auf. Kupfer oder Aluminium, was ist die beste Lösung? Traditionell wird Kupfer oder Bronze verwendet und dem Aluminium meist, wegen der schlechteren Leitfähigkeit, keinerlei Beachtung geschenkt. Dabei ist Aluminium ein guter Wärmeleiter und leitet wegen seiner freien Elektronen im Leitungsband den Strom sehr gut, ist also ideal für die Übertragung elektrischer Energie. Stellte sich die Frage, ob Aluminium auch für den Antennenbau geeignet ist? Da Kupfer das vorherrschende Material ist, bietet sich ein Vergleich zur Beurteilung der Eignung mit diesem Material an.

1. Eigenschaften des Aluminium

Die Anwendung des Aluminiums ist aus der HF-Technik nicht mehr weg zu denken. Die Anwendung beschränkte sich allerdings meist auf Gehäuse und Abschirmungen. Die Funkgeräte der ehemaligen Wehrmacht sprechen dafür eine deutliche Sprache.

Werkstoff	Leitfähigkeit Sm / mm ²	Spez. Gewicht	Zug - festigkeit N/mm ²
Silber	61.4	10.5	200
Kupfer	56 - 58	8.9	210 - 240
Gold	45.5	19.3	140 - 240
Alu	36.6 - 37.7	2.7	70 - 90
Messing	11 - 14	8.8	310 - 460
Eisen	7 - 10	7.8	250 - 1000
V2A/V4A	1.4	7.8	700
Bronze	9	8.9	120 - 180

Tab. 1

Der Grund für den eingeschränkten Einsatz ist wohl die im Gedächtnis der Techniker verankerte Meinung, dass die geringere elektrische Leitfähigkeit Aluminium für HF unbrauchbar macht. Bei genauer Betrachtung stellt sich aber heraus, dass Aluminium dem Kupfer gleichwertig oder sogar überlegen ist. Tab. 1 zeigt einige wichtige Eigenschaften verschiedener Materialien im Vergleich.

Für den Antennenbau ist nur der Vergleich von Aluminium mit Kupfer interessant. Zu berücksichtigten ist allerdings, dass die Eigenschaften von Aluminium stark von den Zusätzen, den Legierungen, abhängig sind. Der Vergleich soll sich daher auf Reinalu beziehen.

Betrachten wir Tab. 1 genauer, dann ergeben sich daraus wichtige Gesichtspunkte für die Anwendung von Aluminium im Antennenbau:

1. Aluminium wiegt bei gleichem elektrischen Widerstand und gleicher Länge nur die Hälfte des Kupfers
2. Das Gewicht des Aluminiums beträgt bei gleichem Querschnitt und Länge nur 1/3 von dem des Kupfers
3. Da sich der spezifische Widerstand von Aluminium zu Kupfer wie etwa 1.6 : 1 verhält, muss der Querschnitt von Aluminium 1.6 mal so groß gewählt werden, will man den gleichen Leitwert erhalten.
4. Mit Aluminium kann im Antennenbau ein gleicher elektrischer Widerstand wie Kupfer erreicht werden und das nur bei 1/3 des Gewichtes

Aluminium hat einige besondere Eigenschaften, dazu gehört, dass blankes Aluminium sich sofort mit einer nicht leitenden Oxidschicht überzieht. Diese schützt gegen extreme äußere Belastungen wie Regen, Sonne oder aggressive chemische Verbindungen. Sogar in der rauen norddeutschen Luft ist Aluminium für den Antennenbau bestens geeignet. Die Schutzschicht erneuert sich umgehend, selbst bei einer Verletzung durch Scheuern oder Kratzen, ist aber hinderlich bei der Herstellung leitender Verbindungen /1/. Der Kontaktdruck sollte daher mindestens 5 N /mm² betragen, damit ein guter Stromübergang gewährleistet ist.

Ein Nachteil des Aluminiums ist die Tatsache, dass Aluminium nicht mit jedem Material zusammenkommen darf, wenn Feuchtigkeit in die der Verbindungsstelle eindringen kann.

Dazu betrachten wir die elektrolytische Spannungsreihe gegenüber Wasserstoff nach Tab. 2.

Aluminium ist stark elektronegativer und besitzt gegen Kupfer ein Kontaktpotential von rund 2.0 Volt. Bei Feuchtigkeit oder in Gegenwart leitender Flüssigkeiten wie Wasser oder Seewasser tritt daher immer starke Korrosion ein.

Die Verbindung mit Materialien der türkisen hinterlegten Spalte der Tab. 1 ist günstig. Dazu gehört das weit verbreitete Zink. Hier ist die Spannungsdifferenz nur $\Delta U = 0.9$ Volt. Je nach Dicke der Oxidschicht des Aluminiums ist das Kontaktpotential auch unterhalb dieses Wertes.

Stoff	Spannung in Volt
Fluor	+ 2.87
Gold	+ 1.69
Platin	+ 1.20
Quecksilber	+ 0.85
Titan	+ 0.80
Silber	+ 0.80
Kupfer	+ 0.35
Arsen	+ 0.23
Antimon	+ 0.15
Wasserstoff	0.00
Blei	- 0.13
Zinn	- 0.14
Nickel	- 0.25
Kobalt	- 0.28
Cr-Ni Stähle	- 0.32
Cadmium	- 0.40
Eisen	- 0.41
Gusseisen	- 0.42
Flussstahl	- 0.48
Cr Stähle	- 0.50
Stahl verzinkt	- 0.60
Zink	- 0.76
Chrom	- 0.91
Vanadium	- 1.18
Mangan	- 1.19
Aluminium	- 1.66
Magnesium	- 2.38
Natrium	- 2.71
Lithium	- 3.05

Tab. 2 Elektrolytische Spannungsreihe gegenüber Wasserstoff bei 20 °C

Für die Anwendung von Aluminium in der Hochfrequenz ist wichtig, dass es sich mit Kupfer beschichten lässt. Dabei werden Kupfer und

Aluminium zusammengeschweißt und dann gewalzt. Dieser Verbundwerkstoff heißt Cupal.

Damit kein Übergangswiderstand entsteht, kann mit Cupal-Klemmen ein gut leitendes Verbindungselement zwischengeschaltet werden. Die Aluminiumoberflächen werden aufeinander gepresst und die Kupferoberfläche mit den üblichen elektrischen Verbindungstechniken bearbeitet.

2. Hochfrequente Eigenschaften des Aluminiums

Die hochfrequenten Eigenschaften eines Drahtes werden vom Skin-Effekt bestimmt. Bei Stoffen mit geringer Leitfähigkeit ist die Eindringtiefe sehr groß. Dabei durchdringt eine elektromagnetische Welle den Stoff fast ungehindert – wie beim Menschen. Die Frequenz spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Je größer die elektrische Leitfähigkeit, desto kleiner ist die Eindringtiefe. Am kleinsten ist sie bei gut leitenden Materialien wie Kupfer oder Silber. Hierbei macht sich die Frequenz stark bemerkbar. Je höher die Frequenz, umso weniger dringt die elektromagnetische Welle in den Stoff ein und der elektrische Strom fließt nur noch auf der äußeren Haut des Leiters. Daher auch der Begriff Haut – oder Skineffekt. Da der hochfrequente Wechselstrom nur noch im äußeren Ring eines Drahtes fließt, wird der elektrische Widerstand des Leiters gegenüber dem Widerstand bei Gleichstrom erhöht. Das Drahtinnere ist dabei nahezu strom- und feldfrei /2/.

Die äquivalente Leitschichtdicke, in der der hochfrequente Strom als konstant angenommen wird, berechnet sich für Kupfer aus der zugeschnittenen Größengleichung /3/

$$d_{\text{CU}} = 66.6 / \sqrt{f} \quad \text{mm} \quad (\text{Gl.2.1})$$

und für Aluminium

$$d_{\text{AL}} = 104.65 / \sqrt{f} \quad \text{mm} \quad (\text{Gl.2.2})$$

wenn f in 1/s eingesetzt wird. Bei Aluminium ist die Leitschichtdicke 1.57 mal, also rund 1.6 mal größer als die des Kupfers und berechnet sich aus dem Verhältnis der Wurzeln aus den Leitfähigkeitswerten nach Tab. 1.

Beispiel 2.1

Wir berechnen die äquivalente Leitschichtdicke eines Kupfer- und Aluminium-Drahtes bei der Frequenz $f = 1 \text{ MHz}$. Nach (Gl.2.1) ergibt sich für Kupfer $d_{\text{CU}} = 66.6 / \sqrt{10^6} = 0.0666 \text{ mm}$ und für Aluminium $d_{\text{AL}} = 104.65 / \sqrt{10^6} = 0.10465 \text{ mm}$.

Der Umstand, dass die höhere Leitfähigkeit des Stoffes eine stärkere Stromverdrängung zur Folge hat, verkleinert bei Hochfrequenz den Widerstandsunterschied zwischen Kupfer und Aluminium. Während bei Gleichstrom der Aluminiumdraht einen rund 1.6mal so großen Widerstand wie Kupferdraht gleichen Querschnitts hat, ist bei Hochfrequenz nur der 1.25fache Widerstand vorhanden. Bei Verwendung von Aluminium im Antennenbau ist diese Tatsache von besonderer Bedeutung. Der Widerstand eines runden Leiters bei Gleichstrom berechnet sich aus der bekannten Beziehung

$$R_0 = L / (\kappa A) \tag{Gl.2.3}$$

und bei Hochfrequenz aus dem Zusammenhang

$$R_{\text{HF}} = L K \sqrt{f} / \kappa \pi \{D - 1 / (K \sqrt{f})\} \tag{Gl.2.4}$$

mit der Abkürzung

$$K = \sqrt{\kappa \mu_0 \mu_r \pi} \tag{Gl.2.5}$$

und L als Länge des Drahtes.

Setzt man die entsprechenden Werte für Kupfer ein, so wird mit $\mu_r = 1$ die Abkürzung

$$K = 15.1 \sqrt{s / m} \tag{Gl.2.6}$$

und

$$R_{\text{HF}} = 83,5 * 10^{-7} \sqrt{f} / \{D/m - 6.63 * 10^{-2} * 1 / \sqrt{f}\}. \tag{Gl.2.7}$$

Setzt man die entsprechenden Werte für Aluminium ein, so wird mit $\mu_r = 1$ die Abkürzung

$$K = 12.1 \sqrt{s / m} \tag{Gl.2.8}$$

und

$$R_{\text{HF}} = 104,52 * 10^{-7} \sqrt{f} / \{D/m - 8.32 * 10^{-2} * 1 / \sqrt{f}\} \tag{Gl.2.9}$$

erhalten. Durchmesser D in Meter und f in 1/s.

Mit (Gl.2.9) berechnen wir für verschiedene Durchmesser D und Frequenzen f den Wechselstromwiderstand eines runden Aluminiumleiters.

Hz Durchmesser in mm	0	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸
0.5	13.9	13.9	13.9	25	69	212
1.0	3.48	6.22	4.49	11.40	33.95	105
2.0	0.87	0.89	1.90	5.45	16.75	52
3.0	0.38	0.48	1.21	3.58	11.11	35
4.0	0.22	0.33	0.88	2.66	8.31	26

Tab. 3: Wechselstromwiderstand in Ω eines 100 m langen Aluminiumdrahtes verschiedener Durchmesser als Funktion der Frequenz f

Als Vergleich sei für einen 100 m langen Kupferdraht die ohmschen Werte nach (Gl.2.7) bei den gleichen Frequenzen angegeben /2/.

Hz Durchmesser mm	0	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸
0.5	8.85	-	9.09	19.25	55.1	169
1.0	2.21	2.48	3.34	8.94	26.9	84.2
2.0	0.55	0.63	1.47	4.32	13.3	41.8
3.0	0.25	0.36	0.95	2.85	8.86	27.9
4.0	0.14	0.25	0.69	2.12	6.63	20.9

Tab. 4: Wechselstromwiderstand in Ω eines 100 m langen Kupferdrahtes verschiedener Durchmesser als Funktion der Frequenz f

Wie man der Tab. 3/4 entnehmen kann steigt der ohmsche Widerstand erst ab Frequenzen etwa von $10^4 \text{ Hz} = 1 \text{ MHz}$ stark an.

3. Der Antennendraht in Aluminium

Der Ersatz von Kupferleitungen durch Aluminium ist aus dem Gesagten sehr sinnvoll. Besonders bei Empfangsantennen, wo der ohmsche Widerstand eine unwichtige Rolle spielt, wird kaum ein Unterschied zwischen einer Antenne in Kupfer, Bronze oder Aluminium zu bemerken sein.

Stellt man sich die Frage um wie viel größer der Durchmesser eines Aluminiumdrahtes sein muss, damit die gleiche Leitfähigkeit wie bei Kupfer erreicht wird, so ergibt sich bei Gleichstrom und bei hochfrequenten Wechselstrom der gleiche Faktor von 1.57.

Bei gleichem Querschnitt ist der Hochfrequenz – widerstand in etwa nur 35 % größer.

Bei der Senderantenne lässt sich daher durch 70 % ige Querschnittsvergrößerung ein gleicher Verlustwiderstand erreichen, ohne das hohe Gewicht der Antenne in gleicher Ausführung und in Kupfer zu haben.

Für Senderantennen ist Reinaluminium weniger gut geeignet, da die Werkstoffeigenschaften wie Bruch- oder Biegefestigkeit und das Elastizitätsmodul relativ gering sind.

Ein Material mit besseren Material-Eigenschaften ist Aldrey (E-ALMgSi). Es bezeichnet eine Legierung aus 99 % Aluminium, 0.5% Magnesium und 0.5 % Silizium. Die Zugfestigkeit und die Korrosionsbeständigkeit sind dabei größer als bei Reinaluminium. Die elektrische Leitfähigkeit entspricht dem des Reinaluminiums und ist daher für den Antennenbau mehr als geeignet. Auch eignen sich andere, legierte Aluminiumdrähte, die heute in Schweißautomaten Verwendung finden.

Die Festigkeit dieser Antennen ist Antennen aus Kupfer oder Bronze weit überlegen. Werden Stahlseelen zur Verbesserung der Tragfähigkeit verwendet, dann muss der Stahl absolut rostfrei sein, da durch den Rost die Verluste unweigerlich steigen. Das gilt natürlich auch für die derzeit angebotenen „fast unsichtbaren“ dünnen Drahtantennen in Ausführung Kupfer mit Stahlseele, die einen Antennenwirkungsgrad von weniger als 60 % haben.

Für die Anbringung von Antennen in der Ausführung Aluminium sind einige Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Eine direkte Verbindung mit Kupfer, Bronze oder Eisen ist an wasserzugänglichen Stellen wegen der Spannungsreihe unbedingt zu vermeiden. Korrosion würde die Antenne in kurzer Zeit unbrauchbar machen.

Zur Verbindung zweier Aluminiumlitzen werden am besten Würge- oder Ziehverbinder benutzt, die man aus Rohrstücken selbst herstellen kann. Auch bei diesen Verbindungen ist eine Abdichtung gegen Feuchtigkeit vorzusehen, was mit der heutigen Kunststofftechnik ein Leichtes ist. Den besten Stromübergang bietet natürlich das Löten oder Schweißen /1/.

Für Antennen bei den höheren Frequenzen ist Cupal-Rohr bestens geeignet. Bei Frequenzen oberhalb von $f = 3$ MHz reicht eine Kupferauflage von 0.07 mm völlig aus. Wird Aluminium zur Abschirmung verwendet, dann steigen, wegen der größeren Eindringtiefe, die Verluste um etwa 5 % gegenüber einer Abschirmung aus Kupfer.

4. Der Wirkungsgrad einer Antenne

Die Fußpunktimpedanz einer Antenne ist komplex und kann in der Form

$$\underline{Z}_A = R_A \pm j X_A \quad (\text{Gl.4.1})$$

geschrieben werden.

Wird eine Spannung an die Klemmen gelegt, dann fließt nach dem Ohmschen Gesetz ein komplexer Strom

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}_A. \quad (\text{Gl.4.2})$$

Das Stromquadrat zur Berechnung der Leistung ist

$$|\underline{I}|^2 = |\underline{U}|^2 / |\underline{Z}_A|^2$$

Die von der Antenne aufgenommenen Wirkleistung ist

$$P_{in} = |\underline{I}|^2 * R_A = |\underline{U}|^2 R_A / |\underline{Z}_A|^2. \quad (\text{Gl.4.3})$$

Der Realteil der Antennenimpedanz R_A setzt sich aus dem Strahlungswiderstand R_s und dem Verlustwiderstand R_v zusammen. Dabei repräsentiert der fiktive Strahlungswiderstand die von der Antenne abgestrahlte Leistung

$$P_{ab} = |\underline{U}|^2 R_s / |\underline{Z}_A|^2 \quad (\text{Gl.4.4})$$

oder auch

$$P_{ab} = R_s |\underline{I}_{eff}|^2 \quad (\text{Gl.4.5})$$

mit \underline{I}_{eff} als Effektivwert des HF-Stroms.

Wie den Tab. 3/4 entnommen werden kann, hat jede Antenne einen durch den Skin-Effekt verursachten Verlustwiderstand. Befindet sich die Antenne in Erdnähe, so erzeugt die Feldstärke der Antenne in der Erde, wie in einem Leiter, einen Strom. Das Sekundärfeld dieser Ströme beeinflusst das Ursprungsfeld und versucht dieses zu schwächen. Die Folge, ein zusätzlicher Verlustwiderstand am Antennenspeisepunkt, der nur schwer berechenbar ist. Die Leistung zur Deckung dieser Verluste kommt natürlich ebenfalls vom HF-Generator.

Fassen wir den gesamten Verlustwiderstand zu R_v zusammen, dann ist die der Antenne zugeführte Leistung mit (Gl 4.3) und

$$P_{ges} = (R_s + R_v) |\underline{I}_{eff}|^2. \quad (\text{Gl.4.6})$$

Aus (Gl.4.5/4.6) oder auch (Gl.4.3/4.4) berechnet sich der Wirkungsgrad der Antenne als Verhältnis von abgegebener zu zugeführten Wirkleistung

$$\eta = R_s / (R_s + R_v). \quad (\text{Gl.4.7})$$

Wird rein theoretisch $R_v = 0$, dann und nur dann ist der Wirkungsgrad $\eta = 1$ oder auch 100 %. Je größer der Verlustwiderstand im Verhältnis zum Strahlungswiderstand ist, umso kleiner ist der Wirkungsgrad der Antenne.

Je niederohmiger der Strahlungswiderstand einer Antenne im Speisepunkt ist, desto mehr macht sich ein Verlustwiderstand bemerkbar.

Betrachtet man das VSWR, welches gerne zur Beurteilung der optimalen Abstrahlung der Antenne betrachtet wird, dann wird dieses durch einen Verlustwiderstand scheinbar „verbessert“. Nur leider hat das nichts mit einer besseren Abstrahlung zu tun.

Beispiel 4.1

Wir messen mit einem Impedanzmessgerät die Fußpunktimpedanz eines Vertikalstrahlers bei der Frequenz $f = 3.6 \text{ MHz}$ zu $Z_e = (15 - j 200) \Omega$ und die Eingangsleistung mit einem kombinierten Stehwellen – Leistungsmesser zu $P_{in} = 100 \text{ W}$. Der Verlustwiderstand wurde durch Erdmessung und Messung der Radials zu $R_v = 6 \Omega$ ermittelt. Nach (Gl.4.7) berechnet sich der Antennen-Wirkungsgrad zu

$$\eta = R_s / (R_s + R_v) = (15 - 6) / 15 = 9/15 = 0.6$$

oder auch $\eta = 60 \%$.

Die von der Antenne abgestrahlte Leistung ohne den Gewinn der Antenne ist $P_{ab} = 100 \text{ W} * 0.6 = 60 \text{ W}$ und die Verluste $P_v = (100 - 60) \text{ W} = 40 \text{ W}$.

Angenommen die Antenne habe einen Gewinn von $G_i = 3\text{dB}$ (über isotropen Strahler), dann ist die von der Antenne tatsächlich abgestrahlte Leistung $P_{ges} = 2 * 60 \text{ W} = 120 \text{ W}$.

Die Antenne ist bei dieser Frequenz unterhalb der Eigenresonanz.

Der Betrag des Reflexionsfaktors ist $r = |50 - 15 + j 200| / |50 + 15 - j 200| = 0.965486957$.

Das VSWR berechnet sich aus dem Reflexionsfaktor zu $S = 56.94$.

Beispiel 4.2

Zur Kompensation des kapazitiven Blindanteils nach Beispiel 4.1 ist eine Serien-Induktivität $X_L = 200 \Omega$ erforderlich. Das entspricht bei der Frequenz $f = 3.6 \text{ MHz}$ einer Induktivität von $L = 8.842 \mu\text{H}$.

Bei einer Güte von $Q_L = 50$ ist der Serienverlustwiderstand $R_L = 200 \Omega / 50 = 4 \Omega$. Der gesamte Verlustwiderstand ist jetzt $R_{v,ges} = 10 \Omega$. Der Wirkungsgrad der Anordnung nunmehr $\eta = 9/19 = 0.47$ oder 47.36 %. Die Leistung der eigentlichen Antenne bei gleicher Eingangsleistung ist $P_{ab} = 100 \text{ W} * 0.47 = 47 \text{ W}$ ohne den Gewinn der Antenne.

Das VSWR bezogen auf 50Ω hat sich verbessert auf $S = 50 \Omega / 19 \Omega = 2.63$, obwohl sich die Leistung P_{ab} von 60 W auf 47 W verkleinert hat.

Die Leistung P_{ab} kann nur dadurch vergrößert werden, dass der Verlustwiderstand von $R_v = 6 \Omega$ durch Hinzufügen von Radials verkleinert und die Güte der Spule erhöht wird.

An diesem Beispiel sieht man besonders die nachteilige Wirkung der Verlustwiderstände.

Das VSWR $S = 2.63$ hat einen Return-Loss von $R_L = -20 \log(1/r) = 6.94 \text{ dB}$ zur Folge. Es besteht, bezogen auf 50Ω , noch eine enorme Fehlanpassung, die durch eine Anpassschaltung beseitigt werden muss.

Die Berechnung einer passenden LC-Anpassschaltung /4/ bei einer Spulengüte von $Q_L = 100$ und der Güte des Kondensators $Q_c = 500$ ergibt einen Hochpass mit $C_s = 88.6 \text{ pF}$, $L_p = 6.33 \mu\text{H}$ mit einem Verlust in der Anpassschaltung von $L_v = 2.02 \text{ dB}$.

5. Dünner Draht oder dicker Draht?

Betrachtet man die Tabellen 3, 4 etwas genauer, dann zeigt sich, dass dünne Drähte einen erheblich höheren HF-Widerstand haben als Drähte ab etwa 2 mm Durchmesser. Daher sind Drähte mit größerem Durchmesser zu bevorzugen. Auch Antennenlitzen haben im Sendebetrieb nichts zu suchen.

Für den Antennenwirkungsgrad ist immer das Verhältnis von R_v/R_s verantwortlich, das bei gegebener Antenne konstant ist, egal wo oder wie die Antenne eingespeist wird.

6. Zusammenfassung

Der Ersatz von Kupfer-Antennenleitungen durch Aluminium ist aus dem oben Gesagten sehr sinnvoll. Besonders bei Empfangsantennen, wo der ohmsche Widerstand eine ungeordnete Rolle spielt. Macht man den Querschnitt von Aluminium um den Faktor 1.6 mal größer wird ein gleicher Leitwert wie beim Kupfer erreicht und das bei nur 1/3 des Gewichtes.

Aluminium ist eine wirklich gute Alternative für den KW-Antennenbau.

Die heute in Schweißautomaten verwendeten Aluminium Legierungen sind dem Kupfer bezüglich Reißfestigkeit und Dehnung weit überlegen. Sie sind preiswert und leicht erhältlich. Manchmal in den Längen, die benötigt werden, sogar „Abfall“ in den Containern.



DL3LH, Walter

wa-schau@t-online.de

dl3lh@gmx.de

www.heide-holst.de

Literatur

- /1/ **Löten von Aluminium, DK5XX**
- /2/ **Der Skin Effekt, DL3LH**
- /3/ **Die Antenne macht die Musik, DL3LH**
- /4/ **Passive Netzwerke zur Anpassung, DL3LH**

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.