

OPTIMALE STOCKUNG VON RICHTANTENNEN

Günter Hoch, DL 6 WU

Es gibt bereits eine Reihe von Veröffentlichungen (1 ... 4), die sich mit dem Aufstocken von Richtantennen befassen. Trotzdem trifft man immer wieder auf Unklarheiten und Mißverständnisse. Gar nicht so selten wird der mit viel Aufwand und Mühe erstrebte Aufstock-Gewinn von theoretisch maximal 3 dB für eine Verdoppelung zumindest teilweise verschenkt. Es erscheint deshalb lohnend, einmal ausführlicher auf die Zusammenhänge einzugehen.

Die zugrundeliegenden Prinzipien gelten für alle Arten von Antennengruppen, auch wenn im folgenden hauptsächlich von Yagi-Antennen ausgegangen wird, weil dies der wichtigste Anwendungsfall ist.

1. GEWINN EINER RICHTANTENNE

Der Gewinn einer Richtantenne wird – vorausgesetzt, daß keine Verluste durch Nebenzipfel und Verlustwiderstände auftreten – nur durch die Keulenbreite des Richtdiagramms bestimmt. Kraus (5) gibt hierfür die folgende Formel an:

$$G_i = \frac{4 \pi}{\Theta_E \cdot \Theta_H} \quad (1a)$$

Θ_E und Θ_H sind hierin die Winkel zwischen den 3-dB-Punkten des E- beziehungsweise H-Diagramms. Für Winkel im Gradmaß und Gewinn in dB über einem Dipol lautet der Ausdruck:

$$G_d = 10 \log \frac{41253}{\Theta_E \cdot \Theta_H} - 2,14 \quad (1b)$$

Der Weg zu einer Gewinnerhöhung führt demnach zwangsläufig über eine Verkleinerung der Öffnungswinkel; und zwar bewirkt eine Halbierung der Keulenbreite in einer Ebene eine Verdopplung des Leistungsgewinns (3 dB). Sind die Möglichkeiten zur Gewinnerhöhung bei einer Einzelantenne – beispielsweise durch Verlängern des Booms bei Yagi-Antennen – ausgeschöpft (6), so bleibt nur die Möglichkeit Gruppen zu bilden. Dies wird jetzt im einzelnen besprochen.

2. DAS SUPERPOSITIONSPRINZIP

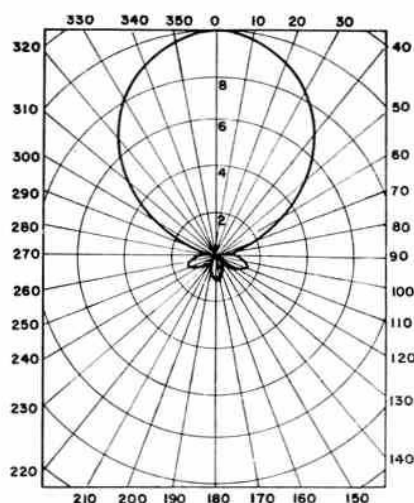
Die Strahlungscharakteristik einer Gruppe von gleichen Richtantennen entsteht durch Multiplikation zweier Komponenten:

1. Der Charakteristik einer gleichen Anordnung von (isotropen) Elementarstrahlern
2. Der Charakteristik einer der zu bündelnden Richtantennen (2). Voraussetzung ist dabei, daß keine gegenseitige Beeinflussung auftritt.

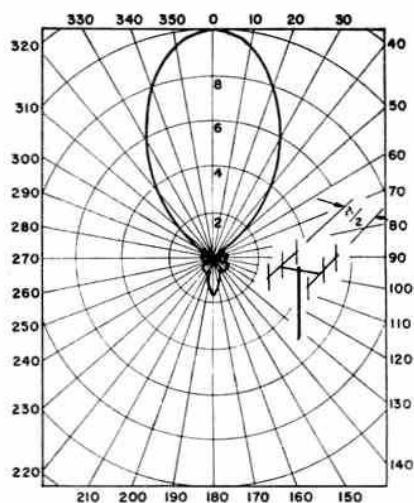
Bei einer flächenhaften Anordnung muß das Verfahren in beiden Ebenen durchgeführt werden, wobei natürlich auch die Einzelcharakteristik in dieser (Polarisations-) Ebene zugrunde zu legen ist.

2.2. Diagramm zweier gestockter Yagi-Antennen

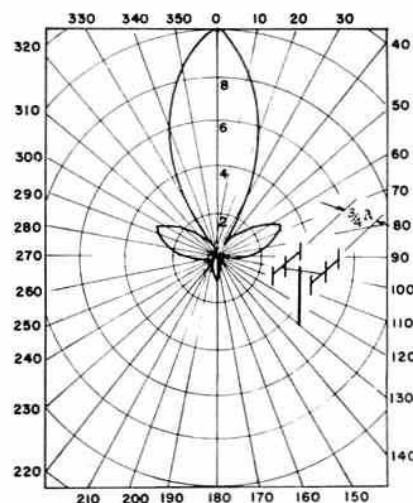
Multipliziert man das Diagramm der Punktquellen mit dem H-Diagramm einer Yagi-Antenne, so setzen sich in jedem Fall die Nullstellen durch: Das ist leicht einzusehen, denn wo eine Antenne alleine nichts hinstrahlt, strahlt auch die Gruppenanordnung nichts hin. Je nach Abstand mehr oder weniger klar ausgeprägt, bildet die Einzelcharakteristik die Umhüllende der Gesamtcharakteristik. Die der Veröffentlichung (1) entnommenen Diagramme für zwei gestockte 3-Element-Yagis zeigen das Prinzip deutlich (**Bild 2**). Die Bilder zeigen die Polar-diagramme der relativen Feldstärke in der H-Ebene in linearer Teilung. Jedes Diagramm ist auf den jeweiligen Höchstwert bezogen, ein Vergleich untereinander ist nicht möglich.



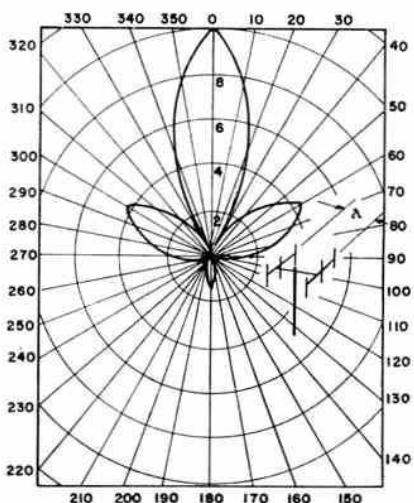
2a



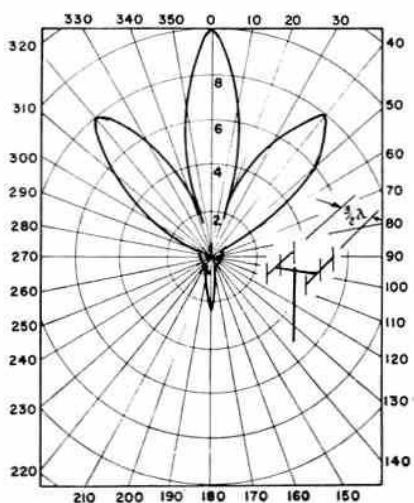
2b



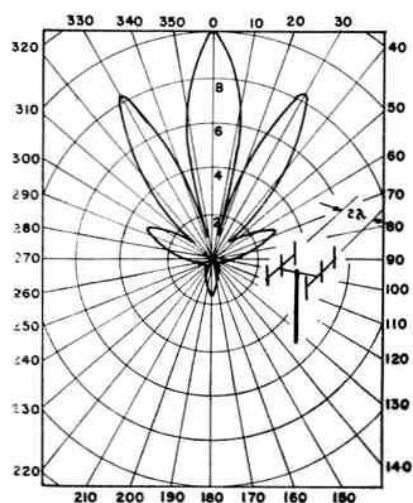
2c



2d



2e



2f

Bild 2: Horizontal-Diagramme von zwei vertikal polarisierten, horizontal gestockten 3-Element-Yagis für verschiedene Stockungsabstände

3. OPTIMALER ABSTAND

Wie man leicht überlegen kann, ergeben sehr große Abstände immer annähernd 3 dB Stockungsgewinn. Denn in der Hälfte aller Raumrichtungen subtrahieren sich Feldkomponenten, in der anderen Hälfte addieren sie sich; die Gesamtenergie bleibt gleich. Als optimal ist der geringste Abstand anzusehen, bei dem noch annähernd die Gewinnverdopplung erzielt wird.

Aus der eingangs angegebenen Gewinnformel ergibt sich die Notwendigkeit, die Hauptkeule auf die halbe Breite zu reduzieren. Die Lage der ersten Nullstelle muß also so gewählt werden, daß eine entsprechende »Einschnürung« stattfindet. Das ist dann der Fall, wenn die Nullstelle auf den – 3-dB-Punkt der Einzelcharakteristik gelegt wird. Ein Beweis würde hier zu weit führen; man kann sich aber auch durch die Anschauung anhand von Bild 2c davon überzeugen:

Der Öffnungswinkel der Einzelantenne (**Bild 2a**), das heißt der Winkel zwischen den Punkten 0,71-facher Empfangsspannung beträgt ca. 80°. Ein Abstand von $D = 0,75 \lambda$ erzwingt Nullstellen bei $\pm 41,8^\circ$ und schnürt, wie **Bild 2c** zeigt, die Hauptkeule auf etwas weniger als 40° ein.

$D = \lambda/2$ (**Bild 2b**) führt zu einer ca. 50° breiten Keule, ist also unzureichend; $D = \lambda$ reduziert die Hauptkeule zwar auf ca. 30°, hat aber schon sehr große Nebenzipfel zur Folge (**Bild 2d**).

Setzt man in Formel (2) für φ den halben Öffnungswinkel $\Theta/2$ ein, so erhält man:

$$D_{\text{opt}} = \frac{\lambda}{2 \sin \Theta/2} \quad (3)$$

Es gibt eine Reihe anderer Verfahren D_{opt} zu berechnen, beispielsweise über die Gewinnberechnung durch Diagramm-Integration, oder über die Wirkflächen. Das Ergebnis ist mit hoher Genauigkeit gleich.

Bei optimalem Stockungsabstand ist der erste Nebenzipfel stets etwa 13 dB schwächer als die Hauptkeule. Wie die Nebenzipfel mit wachsendem Abstand größer werden, ist in Bild 2 klar zu erkennen. Es wird auch deutlich, warum bei Diagrammen mit starken Nebenzipfeln die Gewinn-Formel nicht mehr gilt, denn der Gewinn bleibt infolge der Nebenzipfelverluste trotz schmaler werdender Hauptkeule konstant.

Interessant ist weiter, daß schon bei so kurzen Antennen wie 3-Element-Yagis der optimale Stockungsabstand größer als eine halbe Wellenlänge ist. Nach Angaben des Verfassers beträgt der Stockungsgewinn bei $D = 0,5 \lambda$ 2 dB, bei $D = 0,75 \lambda$ ($\approx D_{\text{opt}}$) 2,8 dB, und schwankt bei noch größeren Werten für D zwischen 2,8 und 2,95 dB.

Trägt man den Zusammenhang zwischen D_{opt} und dem Öffnungswinkel Θ der zu stockenden Antennen auf, so ergibt sich das aus verschiedenen Veröffentlichungen bekannte Diagramm (**Bild 3**).

4. ANDERE ABSTÄNDE

In der Praxis ist oft wissenswert, wie eine Abweichung vom errechneten Wert den Gewinn beeinflußt.

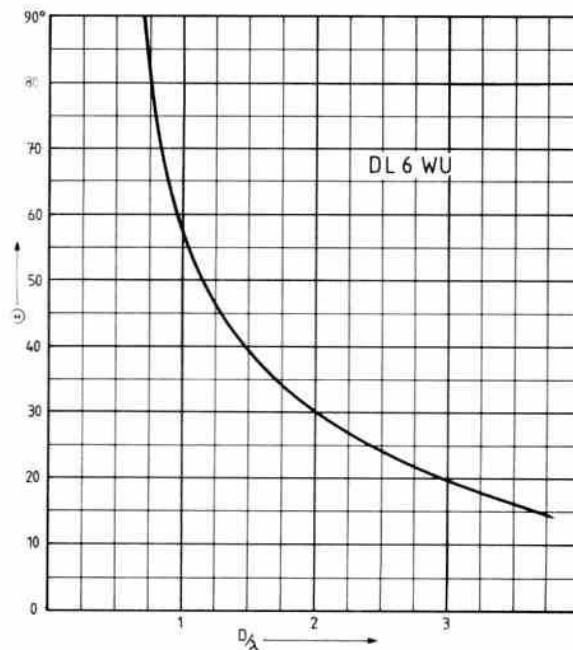


Bild 3: Optimaler Stockungsabstand für zwei gleiche Richtantennen

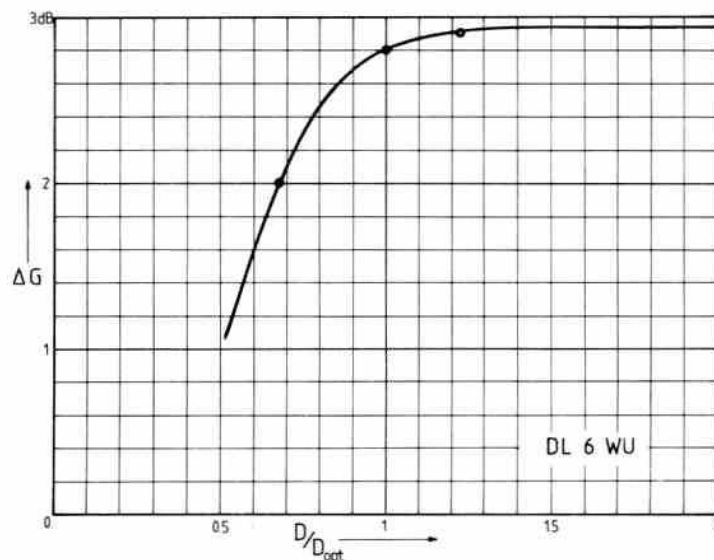


Bild 4: Stockungsgewinn für zwei Antennen bei Abweichung vom Optimalabstand

Vergrößert man den Abstand, so wachsen – wie schon erwähnt – die Nebenzipfel an, die Hauptkeule wird schärfer, doch der Gewinn steigt höchstens noch um Bruchteile eines dB pro Stockungsebene. Dieser geringe Zuwachs wird durch die genannten Nachteile und den konstruktiven Mehraufwand teuer erkauft und kann durch die längeren Zuleitungen leicht wieder verloren gehen.

Ein Unterschreiten des optimalen Abstands führt sehr schnell zu merklicher Gewinnabnahme, wobei auch die wachsende Verkopplung der Antennen eine Rolle spielt. **Bild 4** zeigt die Mittelwerte zahlreicher Meßwerte aus verschiedenen Quellen.

Vertretbar ist in manchen Fällen eine Reduzierung des Abstands auf $2/3$ von D_{opt} , wobei der Stockungsgewinn noch ca. 2 dB beträgt und fast keine zusätzlichen Nebenzipfel mehr entstehen. Der Spielraum für Kompromisse ist also ziemlich klein.

5. GRUPPEN HÖHERER ORDNUNG

Das bisher Gesagte galt stets für eine Anordnung von zwei Antennen. Sollen größere Gruppen gebildet werden, so wird man weitere Antennen zu horizontalen oder vertikalen Zeilen zusammenfassen oder Matrixanordnungen bilden. Dabei gilt stets das Superpositionsprinzip, wobei man jetzt beispielsweise eine nach Abschnitt 3 gestockte Zweiergruppe von Yagis als Einzelantenne auffassen darf. Hat man dann eine Vierergruppe optimal angeordnet, so darf man diese als Einzelantenne für noch größere Gruppen ansehen.

Für den Mittenabstand zweier solcher Vierergruppen ergibt das geometrische Verfahren beispielsweise den doppelten Abstand der Einzelantennen. Hier weichen die Werte nach den verschiedenen Verfahren geringfügig voneinander ab.

Allerdings wird bei sehr großen Gruppen (mehr als 16 Einzelantennen) der Gewinn ohnehin überwiegend von der Fläche der Anordnung bestimmt, so daß der eigentliche Vorteil von Yagi-Antennen mehr und mehr verloren geht.

Prinzipiell darf man von jeder Verdopplung der Antennenfläche in der Praxis etwa 2,5 dB Gewinnzuwachs erwarten (7).

6. ANFORDERUNGEN AN DIE EINZELANTENNEN

Beim Entwurf einer Antennengruppe wird man in der Regel von der Einzelantenne ausgehen. Ihre Eigenschaften müssen genau bekannt sein, wenn man optimale Ergebnisse erzielen will.

Die wichtigste Kenngröße ist das Strahlungsdiagramm in der Stockungsebene. Hier benötigt man vor allem den Öffnungswinkel (Halbwertsbreite) und die Nebenzipfeldämpfung. Zwischen diesen Größen und dem Gewinn besteht ein enger Zusammenhang (8). Von mehreren Antennen gleichen Gewinns ist diejenige mit den niedrigsten Nebenzipfeln die geeignetste. Da sie gleichzeitig zwangsläufig den größten Öffnungswinkel besitzt, erfordert sie auch den geringsten Stockungsabstand. Zu fordern ist eine Nebenzipfeldämpfung von mindestens 15 dB.

Diesen Wert erreichen leider die wenigsten Langyagi-Antennen. Erschwerend kommt noch hinzu, daß meist nur die E-Diagramme (also in der Polarisationssebene) erhältlich sind, und die Nebenzipfel in der H-Ebene stets deutlich größer sind. Vereintigt man Antennen mit starken Nebenzipfeln zu Gruppen, so ergeben sich mehrere Nachteile:

Zu den konstruktiven Problemen durch die unnötig großen Abstände kommt die, durch die schärfere Hauptkeule erforderliche, höhere Einstellgenauigkeit. Die Anzahl und Größe der Nebenkeulen des Gesamtdiagramms wächst, da sich die unvermeidlichen Nebenzipfel der Gruppencharakteristik mit denen der Einzelcharakteristik überlagern. Besonders bei EME-Antennen (große Antennengruppen für Erde-Mond-Erde-Funkverbindungen) wächst hierdurch die Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten Empfangs zusätzlicher Rausch- und Störquellen.

»Rezepte« für nebenzipfelarme Yagi-Antennen hat der Verfasser in (6) gegeben. Beispiele für käufliche Langyagi-Antennen mit sauberem Diagramm sind die 16-Element-Tonna für das 2-m-Band und die 19-Element-Konni für das 70-cm-Band. Die Antennen der »9- bis 12-Element-Klasse« besitzen fast alle ausreichend gute Nebenzipfeldämpfung.

7. PLANUNGSBEISPIEL

Für das 2-m-Band ist eine Antenne mit ca. 18 dB Gewinn über einen Dipol zu entwickeln. Es müssen also zwei Yagis von mindestens 15 dB oder vier mit 12 bis 13 dB Gewinn vereinigt werden.

Ein Blick auf Bild 1 in (6) zeigt, daß ein 15-dB-Yagi mindestens 5λ lang sein muß – hier also über 10 m. Sinnvoller ist demnach eine Vierer-Anordnung.

Zu einem Gewinn von 12,5 dB gehört eine Mindestlänge von $2,3\lambda$ oder ca. 4,75 m. Eine 10-Element-Antenne nach (6) mit 4,5 m Länge und 12 bis 12,5 dB Gewinn entspricht etwa den Anforderungen. Die Öffnungswinkel liegen bei 35° beziehungsweise 40° . Eine Überprüfung durch Einsetzen dieser Werte in die Kraus-Formel ergibt mit 12,55 dB einen plausiblen Wert.

Die Stockungsabstände für horizontale Polarisierung errechnen sich wie folgt:

$$\text{Vertikaler Abstand } D_H = \frac{2,08 \text{ m}}{2 \cdot \sin 20^\circ} = 3,04 \text{ m}$$

$$\text{Horizontaler Abstand } D_E = \frac{2,08 \text{ m}}{2 \cdot \sin 17,5^\circ} = 3,46 \text{ m}$$

Diese Antennengruppe besitzt Öffnungswinkel von $17,5^\circ$ horizontal und 20° vertikal, was einem rechnerischen Gewinn von 18,6 dB entspricht, wovon etwa 1 dB für Nebenzipfel abzuziehen ist.

Diese noch verhältnismäßig kompakte Antennengruppe liegt bereits an der Grenze der EME-Tauglichkeit. Ihr Gewinn übertrifft den einer 64- beziehungsweise 80-Element-Collinear-Gruppe! Modellmessungen im 70-cm-Band haben die errechneten Werte bestätigt; die Stockungsgewinne wurden in den angegebenen Abständen mit 2,7 beziehungsweise 2,8 dB gemessen.

8. SPEISUNG

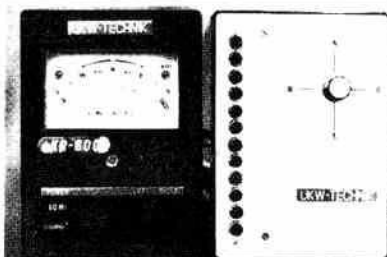
Es würde zu weit führen, alle möglichen Arten der Speisung von Antennengruppen aufzuzählen, dies ist an anderer Stelle bereits geschehen (7, 9). Wesentlich ist, daß alle Teilantennen mit gleicher Amplitude und gleicher Phase erregt werden müssen (von Spezialfällen abgesehen). Dabei sollten die Leitungszüge innerhalb der Gruppe stehwellenfrei und möglichst (gleich) kurz sein, und aus verlustarmem Kabel bestehen. Jedes Zehntel dB Leitungsdämpfung addiert sich zur Rauschzahl des Empfängers oder Vorverstärkers, der sich ja günstigstenfalls am Sammelpunkt der Speisung befinden kann!

Bei den heutigen rauscharmen Transistoren lohnt es sich, auf solche Dinge zu achten, sonst wäre der Aufwand umsonst. Auch der beste Vorverstärker ändert nichts an der Gültigkeit des alten Satzes: »Eine gute Antenne ist der beste Hochfrequenzverstärker«.

9. LITERATUR

- (1) Greenblum, C.: Notes on the Development of Yagi Arrays
Part II: Stacking Yagis
QST, September 1956, Seite 23 - 26, und 122

- (2) Kasper, H.W.: Optimum Stacking Spacings in Antenna Arrays
QST, April 1958, Seite 40 - 43
- (3) Kasper, H.W.: Array Design with Optimum Antenna Spacing
QST, November 1960, Seite 23 - 26
- (4) Bittan, T.: Antennen-Notizbuch
UKW-BERICHTE 14 (1974) Heft 2, Seite 77 - 79
- (5) Kraus, J.D.: Antennas
McGraw-Hill, New York, NY
- (6) Hoch, G.: Mehr Gewinn mit Yagi-Antennen
UKW-BERICHTE 18 (1978) Heft 1, Seite 2 - 9
- (7) Ohne Verfasser-Angabe: Almost everything you want to know about moonbounce
AS 49, EIMAC Div. of VARIAN, San Carlos, CA
- (8) Hoch, G.: Wirkungsweise und optimale Dimensionierung von Yagi-Antennen
UKW-BERICHTE 17 (1977) Heft 1, Seite 27 - 36
- (9) Brier, H.S. und Orr, W.I.: VHF Handbook für Radio Amateurs
Radio Publications, Wilton, CT



ROTORSTEUERUNG (Zusatzgerät)

Bei entsprechendem Interesse werden wir zu unseren Rotoren (zunächst für KR-Serie) das abgebildete **Rotor-Steuer- und Vorwahlgerät** (Bausatz DK 1 OF 033 nach Heft 1/78 UKW-BERICHTE) anbieten. Sie können damit den Rotor wie bisher bedienen **und** bei Bedarf auf automatische Vorwahl mittels Windrosen-Potentiometer oder fest programmierter Tasten (10 Richtungen) umschalten. Das Gerät fand anlässlich der UKW-Tagung Weinheim großes Interesse. Besonders auch für **blinde OMs** und für den **UKW-Stereo-Empfang** geeignet. Preis und Lieferzeit auf Anfrage.

Bausatz DM 199,—



Hochwertige Transistor-Linear-Verstärker f. das 2m- u. das 70cm-Band Passend zu den MICROWAVE-MODULES Transvertern:

Frequenz	Pout	Pin	Strom b. 13,8 V	—	Abmessungen (mm)	Preis DM
145 MHz	80 W	10 W	10 A	NEU*)	130 x 58 x 200	DM 498,—
145 MHz	160 W	10 W	22 A	—	165 x 254 x 50,8	DM 885,—
432 MHz	40 W	10 W	8 A	—	130 x 200 x 58	DM 595,—
432 MHz	110 W	10 W	22 A	NEU	165 x 254 x 50,8	DM 960,—
432 MHz	100 W	10 W	20 A	NEU	142 x 315 x 105	DM 998,—

*) HF-VOX und Vorspannung umschaltbar zwischen FM/CW und SSB



Elektronische Speichertaste MK 1024

Speichertaste mit 4 unabhängigen Speichern von je 256 Bit, — oder umschaltbar auf eine Speicherkapazität von 1024 Bit.

Drucktasten für Wahl und Start der gewünschten Speicher, sowie Rückstellung und Stop · Squeeze-Technik bei Normalbetrieb · Eingebauter Mithör-Oszillator mit variabler Frequenz und Lautstärke · Eingebaute Lautsprecher- und Kopfhörerbuchsen · Eingebaute Transistor- und Relais-Tastung · Maximale Schaltleistung: Transistor 150 V/2 A — Relais 700 V/0,5 A · Betriebsspannung: Netz 220—240 V/50 Hz — Batterie 8—14 V · Abmessungen: 140x60x185 mm · Gewicht: 2,3 kg

Preis: DM 550,—

**UKW-TECHNIK / UKW-BERICHTE · Hans DOHLUS oHG · D-8523 BAIERSDORF ·
Postfach 80 · Jahnstr. 14 · Telefon (09133) 855 + 856 (Anrufbeantworter) · Telex: 629 887**