

Die HF-Antennenanlage NK 20/3909 stellt eine bemerkenswerte Neuentwicklung von Rohde & Schwarz dar. Es wurde eine für eine mobile Anlage außerordentlich günstige Kombination aus hoher Leistungsbelastbarkeit, sehr hohem Wirkungsgrad der Gesamtanlage und der geringen Auf- und Abbauzeit von noch nicht einmal 30 Minuten gefunden.

Mobile 20-kW-Antennenanlage 1,5 bis 30 MHz mit extrem geringer Aufbauzeit

Der Kurzwellenbereich erlaubt auch bei mobilen Anlagen den Aufbau von Funkverbindungen über Entfernungen, die man bei Verwendung höherer Frequenzbereiche nur durch Einschaltung von Relais-Stationen überbrücken kann. Für eine Vielzahl von Anwendungen ist es dabei wichtig, daß ohne mehrstündige Aufbauarbeiten eine Antenne einsetzbar ist, die sichere Nachrichtenübermittlung gewährleistet. Neben dem militärischen Einsatz steht hier vor allem der rasche Verbindungsaufbau aus Katastrophengebieten und bei Großfahndungen zur Verbrechensbekämpfung im Vordergrund.

Eine Reduzierung der Aufbauzeit auf ein Zehntel der bisher üblichen Montagezeiten wurde mit der Antennenanlage NK 20/3909 erzielt. Vom Erreichen des Aufstellungsortes bis zur Aufnahme des Funkbetriebes ist bei durchschnittlichen Umgebungsbedingungen weniger als eine halbe Stunde nötig. Weiterhin ließ sich der Wirkungsgrad bei tiefen Frequenzen gegenüber hochwertigen Anlagen mit vergleichbarer Aufbauzeit – wie sie zur Zeit für Senderleistungen bis 1 kW verwendet werden – mehr als verdoppeln.

Aufgabenstellung

Für den Aufbau mobiler HF-Antennenanlagen, die bei vertretbarem Wirkungsgrad auch mit Senderleistungen von mehr als 1 kW betrieben werden können, waren bisher in der Regel etwa vier bis fünf Stunden nötig, so zum Beispiel bei der mobilen HF-Breitband-Reusenantenne HA 47/44 von Rohde & Schwarz. In einer Reihe von Anwendungsfällen – etwa im Katastropheneinsatz – kann es aber von lebenswichtiger Bedeutung sein, daß sich eine Funkverbindung in erheblich kürzerer Zeit herstellen oder die Anlage vom augenblicklichen Standort an einen anderen Aufbauplatz verlegen läßt. Die Erzielung geringstmöglicher Auf- und Abbauzeiten war daher wichtigster Gesichtspunkt bei der Auswahl aller Anlagenteile.

Die Aufnahme von effektiven Senderleistungen bis zu 20 kW und die Abstrahlung mit Rundcharakteristik stellen neben dem Betriebsfrequenzbereich 1,5 bis 30 MHz die grundlegenden elektrischen Randbedingungen dar. Wegen der Verwendung eines vollprogrammierbaren Anpaßgerätes muß weitestgehende Unabhängigkeit der Antenneneigenschaften vom Aufstellungsort erreicht werden. Ein hoher Wirkungsgrad ist eine selbstver-

ständliche Zusatzforderung, da gerade im mobilen Einsatz die Realisierung gleicher Übertragungssicherheit mit kleinerer Senderleistung besonders wünschenswert ist.

Komponenten der Antennenanlage NK 20/3909

Die **Scherenantenne HA 47/46** ist ein am Fußpunkt gespeister selbststrahlender Mast zur ungerichteten Abstrahlung vertikal polarisierter Wellen. Die Scherenkonstruktion wurde gewählt, weil sie eine geringstmögliche Aufbauzeit gewährleistet. Das **Antennenanpaßgerät HS 9128** transformiert den frequenzabhängigen Fußpunktwideerstand der Scherenantenne verlustarm auf den Widerstandsbereich um $Z_0 = 50 \Omega$, der am koaxialen Verbindungskabel zum Sender benötigt wird. Das **Erdnetz HA 229/251** vermindert die Leistungsverluste im umgebenden Erdboden und schafft eine ausreichende Unabhängigkeit der Anpassungsverhältnisse von der Leitfähigkeit des Untergrundes. Der **Rüstsatz HS 8139** enthält alle Anlagenteile, Werkzeuge und Hilfsgeräte für einen extrem raschen und mühe-losen Auf- und Abbau. Die gesamte Anlage ist – abgesehen von den Pardunen-Ankern – auf einen Zweiradanhänger verlastet (Bild 1).



BILD 1 Antennenanlage NK 20/3909 mit eingefahrener Antenne auf dem Zweiradanhänger.
Foto 21 662/1

HF-Scherenantenne HA 47/46

Bei der Konzeptwahl für eine Kurzwellenantenne sind elektrische und mechanische Anforderungen gleichermaßen zu berücksichtigen: Elektrische und ausbreitungsmäßige Voraussetzungen legen die Grenzen fest, in denen eine mechanische Realisierung sinnvoll ist.

Der **Antennenhöhe** kommt im vorliegenden Fall besondere Bedeutung zu. Die Transformationselemente im Anpaßgerät werden nach einem nur von der Frequenz abhängigen Programm eingestellt; die Antennenimpedanz $Z_a = R_a + jX_a$ darf daher unter den verschiedenen Umgebungsbedingungen nur sehr kleine Änderungen zeigen, damit der transformierte Widerstand und somit die Anpassungsverhältnisse an der Schnittstelle zum Sender innerhalb vorgegebener Grenzen bleiben. Abweichungen können vor allem im Realteil der Antennenimpedanz auftreten, der grundsätzlich aus drei Komponenten besteht: Der Strahlungswiderstand R_s beschreibt die in den Raum ausgestrahlte Nutzleistung, der Erdwiderstand R_e ist ein Maß für die im Erdboden auftretenden Leistungsverluste, die durch $R_{v\alpha}$ dargestellten ohmschen Verluste der Antennenstruktur sind hier gegenüber den beiden anderen Größen zu vernachlässigen

$$R_a = R_s + R_e + R_{v\alpha} \approx R_s + R_e. \quad (1)$$

Bei einer mobilen Antennenanlage wirken sich Umgebungsänderungen vor allem auf den Erdwiderstand R_e aus, da zum Beispiel die in Mitteleuropa praktisch auftretenden Bodenleitfähigkeiten zwischen $\kappa \approx 10^{-5}$ S/m bei trockenem Boden mit steinigem Untergrund und $\kappa \approx 10^{-1}$ S/m bei nassem Wiesboden liegen können. In Abstimmung mit der Dimensionierung des Erdnetzes muß nun der Strahlungswiderstand so gewählt werden, daß in diesem weiten Bereich der Bodenleitfähigkeit die Änderung der Antennenimpedanz innerhalb der zulässigen Grenzen bleibt. Für eine Vertikalantenne, die unsymmetrisch gegenüber gut leitender Ebene erregt wird, ergibt sich mit der Antennenhöhe h und der Betriebswellenlänge λ

$$R_s = 160 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{h_{\text{eff}}}{\lambda}\right)^2, \quad (2)$$

wobei für die elektrisch kurze Antenne ohne Dachkapazität $h_{\text{eff}} \approx \frac{h}{2}$ ist. Da der Erdwiderstand mit zunehmendem Erdnetzaufwand kleiner wird, muß hier also eine Optimierung zwischen Antennenhöhe und der Dimensionierung des Erdnetzes durchgeführt werden.

In dieser Optimierung ist natürlich der Wirkungsgrad der gesamten Antennenanlage zu berücksichtigen. Mit den im Anpaßgerät auftretenden Transformationsverlusten R_{vt} erhält man – bei Definition aller Widerstände gemäß einem Serienerersatzschaltbild – den Wirkungsgrad als Verhältnis der abgestrahlten Nutzleistung zu der vom Sender zugeführten Wirkleistung

$$\eta = \frac{R_s}{R_s + R_e + R_{vt}}. \quad (3)$$

Mit dem Wirkungsgrad wachsen jedoch auch Aufbauzeit und Herstellungskosten der Anlage mit zunehmender Antennenhöhe rasch an.

Die Dimensionierung des Anpaßgerätes bezüglich seiner Transformationselemente wie auch hinsichtlich seiner Verlustleistung hängt ebenso von der Strahlerhöhe ab, wie etwa die Gestaltung des Antennenfußpunktes. Die dort auftretende Spannung U_F läßt sich bei tiefen Frequenzen in erster Näherung nach der Leitungstheorie ermitteln

$$U_F = U_M \cdot \cos \frac{2\pi h}{\lambda}, \quad (4)$$

wobei U_M die an der Antennenspitze auftretende maximale Spannung ist. Mit zunehmender Antennenhöhe kann also die

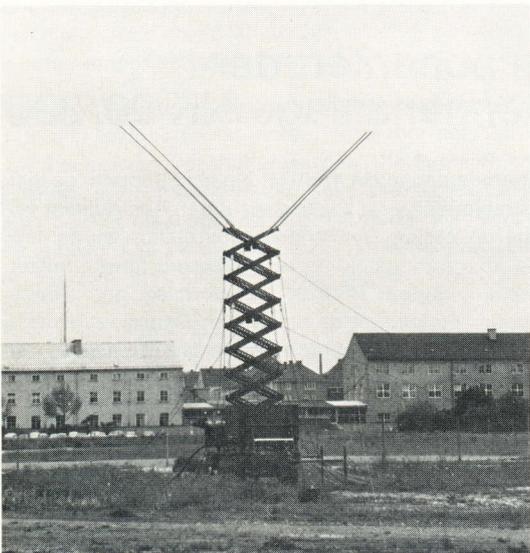
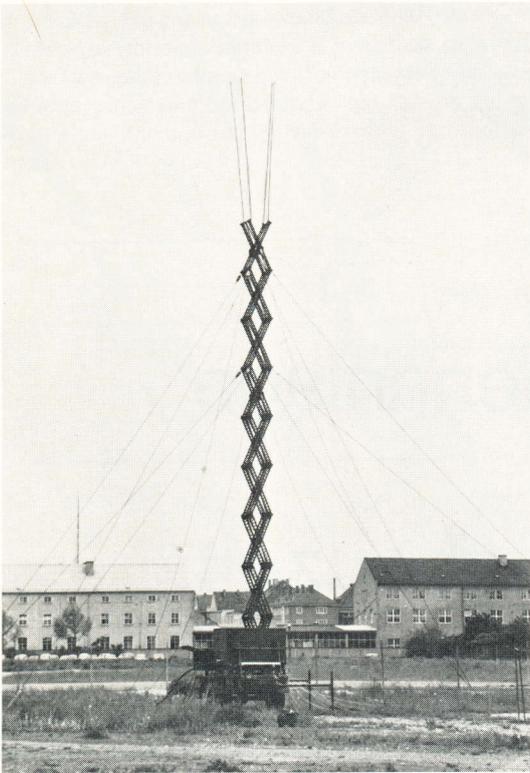


BILD 2 Ausfahren der Scherenantenne HA 47/46.

Foto 21 574/18/13/8

Gestaltung des Fußpunktes in bezug auf Spannungsfestigkeit vereinfacht werden.

Bei der Wahl der Antennenhöhe handelt es sich also um eine komplexe Optimierungsaufgabe, der wegen ihrer weitreichenden Konsequenzen große Bedeutung beigemessen werden muß. Für die Antennenanlage NK 20/3909 wurde als Kompromiß zwischen den sich teilweise widersprechenden Forderungen eine Höhe von rund 17 m ermittelt.

Zur Vorbereitung der Entscheidung über die **mechanische Ausführung** der Antenne wurde umfangreiches Informationsmaterial über handelsübliche Maste zusammengetragen und eine Reihe von Tests durchgeführt. Aufblasbare Maste wurden ebenso auf ihre Verwendbarkeit hin untersucht wie mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch ausfahrbare Teleskopmaste und sich selbst aufrichtende Maste aus vorgeformtem Stahlband. Abgesehen von einigen Fällen unzureichender Betriebssicherheit – vor allem im Hinblick auf die bei mobilen Anlagen auftretenden Windlasten – scheiterte die Anwendung meist an den hohen Spannungen am Antennenfußpunkt sowie an den zu geringen Bandbreiten, die bei elektrisch kurzen, schlanken Antennen im unteren Frequenzbereich auftreten.

Da die handelsüblichen Maste den zahlreichen Anforderungen elektrischer und mechanischer Art nicht entsprachen, wurde die Scherenantenne HA 47/46 entwickelt, bei der neun übereinanderliegende Scheren über einen Seilantrieb von einer elektrischen Winde aufgerichtet werden (Bild 2). Zur Aufnahme der großen Kräfte zu Beginn des Ausfahrens wurden als Kompromiß zwischen hoher Belastbarkeit, geringem Gewicht und vertretbaren Herstellkosten Aluminium-Gitterprofile verwendet. Vier peitschenähnliche Stäbe, die vor dem Ausfahren auf die oberste Schere aufgesetzt werden, dienen der Verlängerung des Mastes und ermöglichen die kostensparende Realisierung der benötigten Mindesthöhe von 17 m mit nur neun Mastschüssen.

Mit einem umfangreichen **Programm mechanischer Prüfungen** zur Gewährleistung hoher Betriebssicherheit wurde die Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) in Ottobrunn beauftragt:

In einer Testserie wurden die einzelnen Scherenstäbe mit den Kräften belastet, die beim Ausfahren der Antenne auftreten. Jeweils rund 9000 Lastwechsel führten zu keinen bleibenden Veränderungen. Bei einem anschließenden Dauertest wurde die gesamte Antenne 500mal aus- und eingefahren, ohne daß sich Verschleißerscheinungen zeigten. Schüttel- und Schocktests sowie Fahrten auf speziellen Teststrecken simulierten die Beanspruchungen, die bei Geländefahrten auftreten können.

Eine Windkanalmessung, durchgeführt von der Landesgewerbeanstalt Bayern in Zusammenarbeit mit dem Institut für Strömungsmechanik der Technischen Universität München, ergab neben der statischen Berechnung die Werte zur Nachbildung der maximalen Windlast. Sie wurde für jeden Mastschuß durch ein entsprechendes Gewicht dargestellt, das über ein Seil mit Umlenkrolle am Mast befestigt war. Bei der Simulation der Windlast während des Ausfahrens der Antenne – dies ist bis zu Windgeschwindigkeiten von 65 km/h zulässig – wurde durch Anbringen der Umlenkrollen an einer schwenkbaren Montageleiter auf einfache Weise erreicht, daß die Kraft am Mast immer horizontal angreifen kann. Das Aufbauschema dieser von der IABG durchgeführten Windlastsimulation zeigt Bild 3.

Durch die gewählte Antennenkonstruktion wurde erreicht, daß der Aus- und Einfahrvorgang jeweils nur etwa zwei Minuten beansprucht. Dies ist vor allem für Einsatzfälle von Bedeutung, bei denen die Antenne nur zeitweise für Aussendungen benötigt wird und in der Zwischenzeit vorzugsweise im eingefahrenen Zustand bereitsteht.

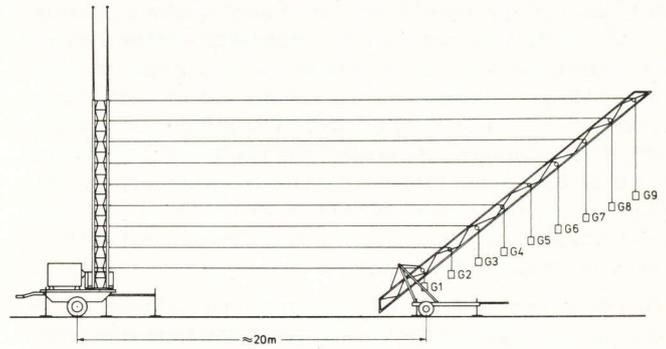


BILD 3 Simulation der Windlasten beim Ausfahren und im Betriebszustand der Scherenantenne HA 47/46.

Antennenanpaßgerät HS 9128

Der komplexe Fußpunktwidestand elektrisch kurzer, also im Vergleich zur Betriebswellenlänge kleiner Vertikalantennen setzt sich aus einem kleinen Realteil R_a und einer hohen kapazitiven Blindkomponente X_a zusammen. Im vorliegenden Fall beträgt bei tiefen Frequenzen R_a einige Ω , X_a einige hundert Ω ; nach (1) und (2) sowie nach

$$X_a \approx -Z_A \cdot \cot \frac{2\pi h}{\lambda} \quad \text{für } h \ll \lambda \quad (5)$$

weisen beide Teile eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit auf. Der mittlere Wellenwiderstand Z_A der Antenne berechnet sich mit dem wirksamen Durchmesser D des Mastes zu

$$Z_A = 60 \cdot \ln \frac{1,15 \cdot h}{D} \quad (6)$$

Aus der Proportionalität von Wellenwiderstand und Blindwiderstand ergibt sich, daß ein bestimmter Mindestquerschnitt des Mastes nicht unterschritten werden darf, wenn die Änderung der Antennenimpedanz im Übertragungskanal innerhalb vorgegebener Grenzen bleiben muß.

Bild 4 zeigt für tiefe Frequenzen den **Impedanzverlauf der Scherenantenne**, wobei eine Vortransformation durch die Ge-

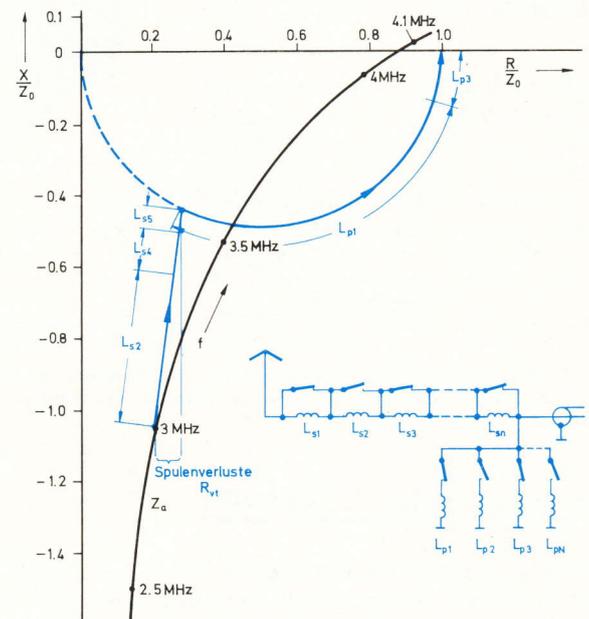


BILD 4 Widerstandstransformation im Anpaßgerät HS 9128 bei tiefen Frequenzen. Z_a Fußpunktwidestand der Antenne, Sollwert $Z_0 = 50 \Omega$, $L_{s1} \dots L_{s5}$ Serieninduktivitäten, $L_{p1} \dots L_{p4}$ Parallelinduktivitäten.

staltung von Speisepunkt und Verbindung zwischen Antenne und Anpaßgerät enthalten ist. Die **Impedanztransformation**, die im Anpaßgerät mit Hilfe von schaltbaren, binär gestuften Blindwiderständen hoher Güte vorgenommen wird, ist in der Widerstandsebene und als Prinzipschaltbild dargestellt. Der hier gezeigte einfachste Transformationsweg mit Serien- und Parallelinduktivitäten ist nur bei tiefen Frequenzen anwendbar; damit die Widerstandstransformation im gesamten Grenz- und Kurzwellenbereich möglich ist, müssen noch Serien- und Parallelkapazitäten zuschaltbar sein.

Äußerst kritisch sind die Leitungslängen im Anpaßgerät. Durch hohe Spannungen sind bestimmte Schutzabstände erforderlich, und Stromstärken bis zu 70 A bedingen große Oberflächen der Transformationselemente zur Reduzierung und Ableitung der nicht völlig vermeidbaren Verlustwärme. Wird nicht besondere Sorgfalt verwendet, so kommen unter Umständen Leitungslängen zwischen den Bauelementen zustande, die bei höheren Frequenzen – insbesondere zwischen 20 und 30 MHz – einen größeren Blindwiderstand darstellen als das Transformationselement. Für die bei den höchsten Arbeitsfrequenzen benötigten Induktivitäten wurden daher spezielle Kombinationsschaltungen verwendet, die eine Anordnung mit extrem induktivitätsarmen Verbindungen gestatten.

Das **Einschalten der benötigten Blindwiderstände** erfolgt über Leistungsschalter, die von Stellmotoren betätigt werden; diese erhalten ihre Einschaltinformation über ein elektronisches Steuergerät von der Antennenprogrammierung, in der die Einstellung der Transformationselemente in Form von 600 Kanälen für den gesamten Frequenzbereich 1,5 bis 30 MHz gespeichert ist. Dieses Prinzip ermöglicht die betriebsbereite Einstellung des Anpaßgerätes ohne Abstrahlung von HF-Leistung.

Auf Grund der hohen Güte der Bauelemente und der günstigen Antennenimpedanz werden selbst bei der tiefsten Betriebsfrequenz nur etwa 20 % der eingespeisten Leistung in Wärme umgesetzt. Die Kühlung erfolgt durch zwei Lüfteraggregate, die mit getrenntem Außen- und Innenluftstrom als Wärmetauscher arbeiten. Für die konstruktive Gestaltung des Gerätes war neben hochfrequenztechnischen Gesichtspunkten vor allem der mobile Einsatz maßgebend. Zur **Gewährleistung hoher Betriebssicherheit auch nach Geländefahrten** wurden Schüttel- und Schockprüfungen mit Simulation der beim Fahrbetrieb auftretenden mechanischen Belastungen sowie umfangreiche Testfahrten durchgeführt.

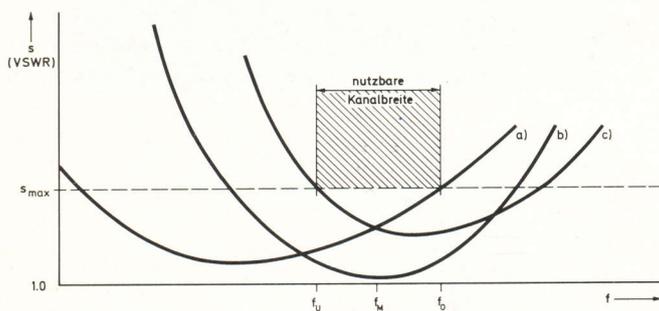


BILD 5 Welligkeitsfaktor in Abhängigkeit von der Frequenz für unterschiedliche Bodenverhältnisse [a) sehr gut leitender, b) mittlerer und c) schlecht leitender Untergrund].

Erdnetz HA 229/251

Durch entsprechende Dimensionierung des Erdnetzes muß sichergestellt werden, daß bei allen praktisch vorkommenden Bodenverhältnissen an der Schnittstelle zum Sender eine hinreichend kleine Welligkeit erzielt wird.

Bei sehr **unterschiedlichen Bodenleitfähigkeiten** ändert sich auch die Welligkeit innerhalb bestimmter Grenzen, die durch

Erdnetzaufwand, Antennenimpedanz und Transformationsweg im Anpaßgerät bestimmt werden (Bild 5). Der in allen Fällen gemeinsam überdeckte Frequenzbereich stellt dann die bei der jeweiligen Frequenz nutzbare Kanalbreite dar. Als Optimierung zwischen Antennen- und Erdnetzaufwand einerseits und Kanalbreite andererseits mußte eine Lösung gefunden werden, in der neben technischen Gesichtspunkten und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen auch die Aufbauzeit zu berücksichtigen war.

Für das Erdnetz werden verzinkte Stahlseile verwendet, die zur leichteren Handhabung und zum Schutz vor Beschädigung mit einer Kunststoffschicht überzogen sind; in etwa gleichen Abständen sind 36 Erdseile am Rand der Ladefläche des Anhängers fest verschraubt, damit auch bei höheren Frequenzen der Durchgriff des Feldes zum Erdboden genügend klein bleibt. Durch die Wahl der relativ großen Seillängen von 50 m konnte auf das zeitraubende Einschlagen von Erdspießen am äußeren Ende jedes Seils verzichtet werden.

Zur **Ableitung von Blitzströmen** – eine Kugelfunkenstrecke begrenzt die an der Antenne anstehende Spannung – werden sechs Erdseile mit den Pardunen-Ankern leitend verbunden, so daß ein hinreichend niedriger Übergangswiderstand zum Erdboden sichergestellt wird.

Rüstsatz HS 8139

Der Rüstsatz umfaßt alle zum Auf- und Abbau nötigen Hilfsmittel; hier sollen nur die wichtigsten erwähnt werden.

Die **Ausleger** nehmen das bei maximaler Windlast auftretende Kippmoment beim Ausfahren der Antenne auf; durch Grob- und Feinverstellung gestatten sie bei unebenem Gelände ein rasches Einrichten der Ladefläche nach der im Mast eingebauten Libelle. Ein **Elektrohammer** mit einem Bohrvorsatz für sehr harten Boden ermöglicht ein rasches und müheloses Einschlagen der Anker für die Mastabspannungen. Mit Hilfe des **Ziehgerätes** werden die auch für den Aufbau auf sehr lockerem Untergrund dimensionierten Anker ebenso rasch wieder gezogen.

Die **Abdeckplane** schützt die Anlage beim Transport; sie ist mit Taschen zur Aufnahme von Anlagenteilen versehen. Zur Zeitersparnis bleibt sie mit dem Planengestell fest verbunden und wird mit ihm zusammen vom Anhänger gehoben. – Am Rande sei bemerkt, daß sie daher während der umfangreichen meteorologischen Untersuchungen an verschiedenen Aufstellungsstellen manchmal auch die Entwickler der Anlage vor allzu heftigen Witterungseinflüssen schützte.

A. Stark

KURZDATEN DER ANTENNENANLAGE NK 20/3909

Frequenzbereich	1,5 ... 30 MHz
Leistungsaufnahme (P_{eff})	≤ 20 kW
Eingangswiderstand	50 Ω unsymmetrisch
Welligkeit	$\leq 1,5$
Zul. Umgebungstemperatur bei Auf-, Abbau und Betrieb	- 20 ... +50 °C
Aufstellungsort	bis 2000 m NN
Geländeneigung	$\leq 5^\circ$
Aufbauzeit	≈ 30 min (bei 3 Personen)
Ausfahrzeit der Antenne	≈ 2 min (1-Mann-Bedienung)
Verlastung	auf 2-Rad-Anhänger, 1,5 t
Gewicht (einschl. Anhänger)	≈ 2830 kg

NÄHERES LESERDIENST KENNZIFFER 61/6