

Sendeversuche mit niedrigen wagerechten Antennen.

Von

H. Brand.

(Mitteilung aus dem Kais. Telegraphen-Versuchsamt.)

1. Einleitung. Frühere Versuche des Telegraphen-Versuchsamts haben gezeigt¹⁾, daß man mit einzelnen Drähten, die in geringer Entfernung über dem Erdboden auf niedrigen Stützen oder an gewöhnlichen Telegraphenstangen befestigt sind, funkentelegraphische Sende- und Empfangswirkungen erzielen kann, wie sie vorher nur mit Hilfe von hochragenden, an Türmen oder hohen Masten befestigten schirm- oder T-förmigen Antennen erreichbar waren. Die Versuche machten es wahrscheinlich, daß in vielen Fällen hochragende Masten und Türme beim Antennenbau entbehrlich werden würden. Das Telegraphen-Versuchsamt entschloß sich daher vor einiger Zeit, als für seine Berliner Versuchsstation (W. 9, Königgrätzer Straße) das Bedürfnis nach einer leistungsfähigeren Antenne — es besaß bis dahin nur eine 10 m über das Dach emporragende Reusenantenne und eine schirmförmige, von einem auskurbelbaren Kometmaste getragene, die erstgenannte noch um etwa 10 m überhöhende Antenne — hervortrat, versuchsweise eine Anzahl eindrähtiger wagerechter Antennen von 100 bis 270 m Länge in geringer Höhe über den Dächern zu bauen. Die Antennenanlage ist in der ETZ.²⁾ kürzlich beschrieben worden; ihre Leistungsfähigkeit hat den Anforderungen bisher in jeder Hinsicht entsprochen, so daß einstweilen der außerordentlich viel kostspieligere Bau der früher geplanten senkrechten Antennenanlage nicht mehr zur Erörterung steht.

Es sollen im folgenden die Ergebnisse einer Reihe von Versuchen mitgeteilt werden, die mit der längsten dieser Antennen, einem 270 m langen, in nahezu östlicher Richtung von dem im vierten Geschoße gelegenen funkentelegraphischen Laboratorium aus erstreckten, 3 mm starken Bronzedraht, vor einiger Zeit angestellt worden sind. Der Antennendraht überschreitet die Königgrätzer Straße in einer Höhe von etwa 20 m; auf etwa $\frac{3}{5}$ seiner Länge liegt er in einer Höhe von nur 5 bis 10 m über den Dächern; seine Eigenwelle beträgt 1340 m; seine Lage inmitten des Häusermeers von Berlin und die unmittelbare Nachbarschaft elektrischer Bahnen und anderer elektrischer Anlagen gibt die Gewißheit, daß die mit ihm unter nicht günstigen örtlichen Verhältnissen erzielten Ergebnisse an anderer Stelle umso sicherer wieder darstellbar sind.

Im Anschluß daran soll die Frage der Belastungsfähigkeit von Antennen erörtert werden.

2. Versuche. In den Monaten Mai und Juli 1913 sind mit der bezeichneten Antenne eine Reihe Sendeversuche durchgeführt worden. An der Beobachtung des Empfangs haben die dem öffentlichen Verkehr dienenden deutschen Küstenstationen und eine Reihe anderer entfernter Funkenstationen ähnlicher Größe teilgenommen. Die Telegraphierentfernungen betrugen 170 bis 630 km, die verfügbare elektrische Leistung nicht mehr als 1,5 und 2,0 kW im Luftleiter. Gesendet wurde an 10 Tagen. An den ersten 3 Tagen fanden die Versuche während der Dunkelheit, an den übrigen 7 Tagen bei Tageslicht statt, und zwar einmal in der Zeit von 7 bis 8 Uhr früh, fünfmal von 1 bis 2 Uhr mittags und einmal von 4 bis 5 Uhr nachmittags. Bei 8 Versuchen wurde das Antennenaußenende frei endigend, bei 2 Versuchen mit einer festen Endkapazität von etwa 28 m benutzt. Gegeben wurden verabredete Kennworte mit anschließendem Text. Die Wellenlängen betrugen 1100 bis 2300 m. Bei den 7 Tagesversuchen haben sämtliche Beobachtungsstellen, soweit sie nicht durch ihren eigenen Dienst, durch schwere Gewitter, oder durch nahe Störer an

¹⁾ Kiebitz: Mitt. a. d. TVA. VI, S. 3 und 158 (Ann. d. Phys. 32, S. 941, 1910, und Verhandlungen der Deutschen Phys. Gesellschaft XIII, S. 876, 1912).

²⁾ Strecker: Mitt. a. d. TVA. VII, S. 13 ff. (ETZ. 1913, S. 1202).

der Beobachtung verhindert waren, regelmäßig die von Berlin gesandten Zeichen erhalten; nur 2 Stationen haben aus nicht erkennbarer Ursache in je einem Falle versagt. Die entfernteste Station, 630 km über Land, erhielt in allen 7 Fällen mit Lautstärken, die einmal 400 Ohm, dreimal 150 bis 300 und dreimal 80 bis 100 Ohm — parallel zum 1000-Ohmfernrohrer — betrug. Diese Lautstärken reichen im allgemeinen für einen betriebsmäßigen Verkehr nicht aus; man wird es indes bei Benutzung gewöhnlicher Hörerempfänger in der Regel nicht unternehmen, auf eine Telegraphierentfernung von mehr als 600 km über Land und bei Tage mit Senderleistungen der angegebenen Größe zu arbeiten. Diese sind für die überbrückte Entfernung vielmehr recht gering, und das Ergebnis erscheint im Hinblick darauf, daß überhaupt regelmäßig Empfang erzielt worden ist, umso bemerkenswerter, als die Versuche in der an luftelektrischen Einflüssen reichen Jahreszeit und die Mehrzahl von ihnen in der ungünstigsten Tageszeit stattgefunden haben. Die vorliegenden Ergebnisse bieten im übrigen so wenig wie die früherer Versuche mit niedrigen wagerechten Antennen einen Anhalt dafür, daß beim betriebsmäßigen Gebrauche solcher Luftleiter, solange im Antennenkreis ohne Verkürzungskapazität gearbeitet wird, mit Richtungswirkungen zu rechnen sei; die Empfangsstellen liegen zum Teil bis zu 50° aus der Längsrichtung der Antenne.

3. Belastungsfähigkeit von Antennen. Die Belastungsfähigkeit solcher Antennen ist, worauf schon von Kiebitz verschiedentlich hingewiesen worden ist, hoch, weil sie einen hohen Dämpfungswiderstand besitzen und die effektive Stromstärke daher bei gleicher Antennenleistung wesentlich geringer ist als bei einer hochragenden Antenne mit Endkapazität und kleinem Widerstand. Es wird sich im folgenden ergeben, daß neben dem Dämpfungswiderstand noch andere Ursachen vorhanden sind, die im gleichen Sinne wirken.

Die Grenze der Belastung einer Antenne wird durch das Auftreten von Isolationschwierigkeiten gegeben; diese bestehen in zweifacher Hinsicht; es sind einmal Gleitentladungen über die Isolatoren der Antenne — an den Gebäudedurchführungen und an den Aufhängevorrichtungen — möglich, und es können zweitens Sprühererscheinungen an den Drahtoberflächen selbst gegen die umgebende Luft eintreten. Die Belastung der Isolatoren und die Feldstärke an ihrer Oberfläche läßt sich, wenn man nur ihre Abmessungen, ihre Formen und ihr Material richtig wählt, in angemessenen Grenzen halten; es bestehen in dieser Hinsicht — im besonderen bei Antennen der in Rede stehenden Art aus einem einzigen Drahte — keine wesentlichen Schwierigkeiten. Für die Beurteilung der Belastungsfähigkeit einer Antenne wird daher diejenige Größe maßgebend sein, die das Auftreten von Sprühererscheinungen an der Leiteroberfläche hervorruft, d. h. die elektrische Feldstärke. Die größte Feldstärke ist in der Regel an den Antennenaußenenden vorhanden; die Leiter enden hier üblicherweise in Sprühschutzisolatoren, deren Gestalt und Oberflächenkrümmung genügende Sicherheit gegen das Sprühen am Ende selbst gewährt. Die Stelle größter Feldstärke liegt daher unmittelbar vor diesem Schutz auf dem eigentlichen Drahte.

Gegeben seien zwei Antennen beliebiger Form mit den wirksamen Kapazitäten C_1 und C_2 , den Selbstinduktionen L_1 und L_2 und den Dämpfungswiderständen R_1 und R_2 . Die beiden Antennen sollen auf dieselbe Wellenlänge λ abgestimmt sein und gleiche Abstimmungsschärfe besitzen; es sollen also in beiden Fällen die Wellenlänge $\lambda = 2\pi c \sqrt{LC}$, das Dekrement $\delta = \pi \cdot R \sqrt{\frac{C}{L}}$ und mithin auch die Dämpfungskonstante $r = \frac{R}{2L}$ gleich sein. Hieraus folgt:

$$1 = \frac{L_1 C_1}{L_2 C_2} = \frac{R_1 L_2}{R_2 L_1} = \frac{R_1}{R_2} \sqrt{\frac{C_1 L_2}{C_2 L_1}} = \frac{R_1 C_1}{R_2 C_2} \quad (1)$$

Für diesen Fall gleicher Wellenlänge und gleicher Abstimmungsschärfe soll untersucht werden, wie sich die Höchstwerte der Feldstärken an den Oberflächen beider Antennen

unter der Voraussetzung verhalten, daß die Leistungen N_1 und N_2 in beiden Antennenkreisen gleich sind.

Sind V_1 und V_2 die an den Antennenaußenenden auftretenden Höchstwerte der Spannung und bezeichnet n die in beiden Fällen als gleich angenommene sekundliche Funkenzahl, so folgt

$$N_1 = N_2 = n \cdot \frac{1}{2} C_1 V_1^2 = n \cdot \frac{1}{2} C_2 V_2^2 \quad (2)$$

oder unter Berücksichtigung von 1)

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (3)$$

Das Auftreten des zeitlichen Höchstwertes der elektrischen Feldstärke fällt mit dem Zeitpunkt der Höchstspannung zusammen; in diesem Augenblick ist der Betrag der radialen Feldstärke

$$|\mathcal{E}| = 4 \pi \cdot \eta \quad (4)$$

wenn η die größte Dichte der — was nach den gebräuchlichen Drahtdicken und den Drahtentfernungen mit großer Annäherung richtig ist — als homogen vorausgesetzten Oberflächenladung bezeichnet. Die Zahl der in Betracht kommenden parallel geschalteten und gleichmäßig geladenen Antennendrähte sei z , der Drahtalbmesser ρ ; dann ist die Oberfläche O der Längeneinheit des Antennenaußenendes

$$O = 2 \rho \pi \cdot z.$$

Auf diesem Teile werde die Spannung als örtlich konstant angenommen; bezeichnet man seine Ladung mit e_0 , so kann man schreiben:

$$e_0 = O \cdot \eta = p \cdot C \cdot V \quad (5)$$

wenn man unter p denjenigen echten Bruch versteht, der das Verhältnis der Teilladung e_0 zur Gesamtladung der Antenne angibt; sein Wert ist offenbar je nach der Bauart der Antenne verschieden und hängt wesentlich von ihrer Erstreckung in die Länge ab. Aus 5) folgt

$$\eta = p \cdot \frac{C \cdot V}{O}$$

und ferner aus 4) und 2)

$$|\mathcal{E}| = \frac{4 \pi \cdot p}{O} \sqrt{2 \cdot \frac{N}{n} \cdot C} \quad (6)$$

Bildet man für 2 Antennen verschiedener Bauart, etwa für eine Schirmantenne (im nachstehenden die mit „1“ bezeichneten Werte) und für eine niedrige wagerechte Antenne (die mit „2“ bezeichneten Werte), das Verhältnis der Feldstärken für gleiche Antennenleistung, gleiche Wellenlänge, Dekrement und Funkenzahl, so ergibt sich

$$\frac{|\mathcal{E}_1|}{|\mathcal{E}_2|} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{O_2}{O_1} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{O_2}{O_1} \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (7)$$

Nun ist sicher, daß der Faktor p für die nur in die Länge erstreckte, schmale wagerechte Antenne erheblich kleiner ist als für die gedungen gebaute Schirmantenne und keinesfalls größer als für eine breite wagerechte Antenne gleicher Drahtlänge. Nehmen wir z. B. die Länge der Drähte einer Schirmantenne zu 30 m, die einer wagerechten Antenne zu 240 m und, was bei diesen Abmessungen zulässig ist, die Längeneinheit etwa

zu 1 m an, so wird $p_1 \sim \frac{1}{30}$, $p_2 \sim \frac{1}{240}$ und $\frac{p_1}{p_2} \sim 8$. Allgemein läßt sich schreiben

$$|\mathcal{E}_2| \ll \frac{O_1}{O_2} \cdot \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \cdot |\mathcal{E}_1|$$

Man erkennt aus den Gleichungen 6) und 7), welchen außerordentlichen Einfluß neben dem Dämpfungswiderstande die gestreckte Form der Antenne auf die Herabsetzung des Höchstwertes der Feldstärke und damit unmittelbar auf die Erhöhung der Belastungsfähigkeit der Antenne hat. Weiter ergibt sich, daß sich die Feldstärken unter sonst gleichen Verhältnissen wie die Wurzeln aus den Antennenkapazitäten verhalten; daraus folgt, daß man — gleiche Oberflächen vorausgesetzt — die Belastungsfähigkeit durch Vergrößerung der Antennenkapazität nicht erhöht, sondern herabsetzt.

4. **Besonderer Fall der eindräftigen Antenne.** Nimmt man an, daß bei einer eindräftigen wagerechten Antenne die statische Kapazität C_s über die ganze Länge l gleichmäßig verteilt ist, so folgt aus Gleichung 5)

$$P = \frac{e_0}{V} \cdot \frac{l}{C} = \frac{C_s}{|l| \cdot C}$$

oder wenn man die Beziehung

$$C = C_s \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}} \quad (8)$$

eingührt³⁾, worin λ_0 die Eigenwelle der Antenne ist,

$$P = \frac{l}{|l|} \cdot \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}}{\sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}} \quad (9)$$

Unter Berücksichtigung dieses Wertes folgt für eindräftige wagerechte Antennen — und unter der gleichen Voraussetzung wie für diese auch näherungsweise für breite geknickte Antennen nach Marconi — aus den Gleichungen 6) und 8)

$$|E| = \frac{4\pi}{O_g} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{N}{n} \cdot C_s} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}}{\sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda}}} \quad (10)$$

worin $O_g = O \cdot |l|$ die gesamte Oberfläche der freien Antennendräfte bezeichnet.

5. **Beispiel.** Die außerordentliche Belastungsfähigkeit schmaler wagerechter Antennen ergibt sich aus folgendem Beispiel: Vielfache Versuche haben gezeigt, daß die eingangs erwähnte wagerechte Antenne des Telegraphen-Versuchsamts von 270 m Länge und 3 mm Drahtdurchmesser [$\lambda_0 = 1340$ m, $C_s = 19,0$ m] bei einer Wellenlänge von 2300 m und 1000 Funken/Sekunde noch mit 3 kW Schwingungsleistung und mehr belastet werden kann, ohne daß Sprüherscheinungen am Draht auftreten. Legt man der Rechnung den Wert 3 kW und die gleiche Funkenzahl 1000 zugrunde, so ergibt sich aus Gleichung 10), daß man eine eindräftige wagerechte Antenne, die folgende Eigenschaften besitzt:

$$l = 900 \text{ m}, \quad \lambda_0 = 3800 \text{ m}, \quad C_s = 38,0 \text{ m}, \quad 2\rho = 8 \text{ mm},$$

beispielsweise bei einer Wellenlänge von $\lambda = 6500$ m mit 100 kW Schwingungsleistung würde belasten können.

6. **Folgerungen:** Für Antennen beliebiger Form, die das gleiche Dämpfungsdekrement, also auch die gleiche Abstimmstärke besitzen, gelten folgende Sätze:

1. Die Belastungsfähigkeit der Antenne hängt vorwiegend von der geladenen Drahtoberfläche ab.
2. Die Erhöhung der Kapazität bewirkt eine Herabsetzung der Belastungsfähigkeit der Antenne; bei gleichbleibender geladener Drahtoberfläche ist die Antenne daher trotz kleinerer Kapazität umso aufnahmefähiger, je schmaler sie ist.

³⁾ Vgl. hierzu Behnken, Phys. Zeitschr. XIV, 1913, S. 432.

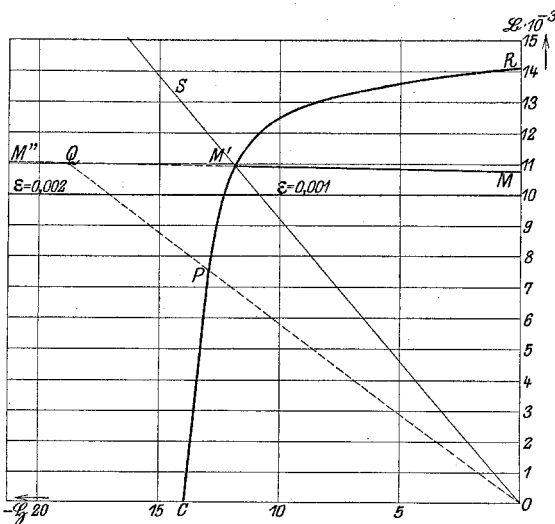
3. Der Betrag der Schwingungsleistung (N) tritt nur in dem Quotienten $\frac{N}{n}$ auf.
Die maximale Feldstärke an der Drahtoberfläche hängt also nicht von dem Betrage der Antennenleistung an sich ab, sondern von der Energie des einzelnen Funkens; diese können gehäuft werden, ohne daß die Feldstärke steigt.
4. Die Wellenlänge tritt nur in dem Quotienten $\frac{\lambda_0}{\lambda}$ auf; ihr Einfluß auf die am Antennenende auftretende maximale Feldstärke ist nicht wesentlich.
5. Irgendein Spannungswert kommt in den Ergebnissen nicht vor; in der Rechnung tritt die Spannung nur in Verbindung mit Kapazitätsgrößen auf. Von der Spannung hängt daher die Belastungsfähigkeit einer Antenne nicht ab.

7. **Zusammenfassung:** Es werden Sendeversuche mit einer wagerechten, im Weichbilde von Berlin in geringer Höhe über den Dächern gezogenen eindräftigen Antenne beschrieben. Die in der heißen Jahreszeit und bei Tage angestellten Versuche haben ergeben, daß es gelingt, mit einem solchen Luftleiter in einer Entfernung von mehr als 600 km über Land bei Verwendung gewöhnlicher Empfänger regelmäßige Empfangswirkungen zu erzielen, wie sie bei gleichen Senderleistungen bisher nur mit Hilfe erheblich höherer, an Masten oder Türmen aufgehängter Antennen erreichbar waren.

Im Anschluß hieran wird die Belastungsfähigkeit von Antennen an der Hand von Berechnungen erörtert; es wird an einem Beispiele gezeigt, daß eindräftige wagerechte Antennen außerordentlich stark belastet werden können.

Berichtigung.

In der Arbeit „Empfindlichkeit eines Telephons“ von R. Gans (Seite 125 bis 130) sind einige Versehen zu berichtigen. Sie sind dadurch entstanden, daß die Korrektur auf



dem Wege nach La Plata verloren ging und die Arbeit veröffentlicht werden mußte, ohne daß der Autor die Korrektur gelesen hatte. Es ist zu ersetzen:

Seite 126, vierte Zeile von oben: Diese Gleichung geht für l im $\frac{l_a}{l_i} = 0$

durch:

Diese Gleichung geht für $\frac{l_a}{l_i} = 0$;

Seite 126 und 127: κ_a und μ_a
durch κ_0 und μ_0 ;

Seite 127, dritte Zeile von unten: Gleichung (1)

durch Gleichung (14) und (15);

Seite 129, siebente Zeile von unten: $\mathfrak{B} = 10\,800$ durch $\mathfrak{B} = 10\,800$; und ferner Figur 6 durch die nebenstehende Figur.