

# Theorie der „Gelsenkirchener Mobilantenne“

Arno Weidemann, DL9AH

**Beim Mobilbetrieb herrschen besondere Bedingungen. Nur durch die Heranziehung von Antennentheorie lässt sich ein guter Mobilstrahler erstellen.**

Bei einem heute üblichen 50- $\Omega$ -Ausgang sähe die gesamte Anordnung gemäß **Bild 5** aus. Unter Beibehaltung der immer gleichen Strahlerlänge wird die Fußpunktkapazität  $C_a$  bei Frequenzverdopplung in etwa halbiert. Auch hier ist Feinabgleich auf den verschiedenen Bändern unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Strahlerlängen

und Durchmesser notwendig.

Durch die Dimensionierung der Fußpunktkapazität  $C_a$  ist es aber immer möglich, ein Stehwellenverhältnis von eins einzustellen. Da im Gegensatz zu einer Röhrenendstufe ein Transistorgerät in aller Regel über keine Abstimmöglichkeit verfügt, muss eine solche geschaffen werden. Es empfiehlt

sich, zwischen dem Antennenfußpunkt und dem Innenleiter des Koaxialkabels eine motorgetriebene Rollspule (ca. 5  $\mu\text{H}/L_{\pi}$ ) zu legen. Mit dieser lässt sich bei Frequenzwechsel (QSY) die Antennenresonanz nachfahren.

## Trickreiche Auskopplung

Der Verfasser benutzte seit 1956 zunächst selbst entwickelte Sender und später Transceiver, jeweils mit einer Röhrenendstufe. Das hat einen besonderen Grund. Röhrenendstufen verfügen nahezu immer über ein  $\pi$ -Filter.

Lötet man die eventuell zum antennen-seitigen „Load-Drehko“ parallel liegenden Festkondensatoren ab (nur 80 m) und bringt den Load-Drehko in eine Stellung mit geringster Kapazität, so bleiben elektrisch nur noch die  $\pi$ -Filter-Induktivität und der Anodendrehkondensator  $C_a$  übrig.

Der optimale Außenwiderstand liegt bei solchen Röhrenendstufen etwa bei 1,2 k $\Omega$ . Der durch die abgestrahlte Leistung zurückgerechnete Lastwiderstand von ca. 180 k $\Omega$  erfordert jetzt nur noch ein Widerstands-Übersetzungsverhältnis ( $\ddot{U}_R$ ) von 150. Daraus die Wurzel gezogen, ergibt ein Spannungs-Übersetzungsverhältnis von 12,25. Wird dieser Faktor mit der Antennenkapazität ( $C_{Ant}$ ) von ca. 24 pF multipliziert, so erhält man einen optimalen Fußpunkt-kondensator  $C_a$  von ca. 290 pF (80 m). Damit kann der anodenseitige „Plate-Drehko“ nicht nur zur Anpassung, sondern auch zur Veränderung der Resonanz der Antenne

selbst verwendet werden.

Die frühere  $\pi$ -Filter-Induktivität ( $L_\pi$ ) wird als Teil der Antennenverlängerungsspule mitbenutzt. Die Antennenspule außerhalb des Fahrzeuges lässt sich nun um diesen Induktivitätsbetrag kürzen. Die kurze Zuleitung zum Antennenfuß – die jetzt keine Wanderwellenleitung darstellt – geht mit in das gesamte Resonanzgeschehen ein. Sie ist praktisch nur eine abgeschirmte Leitung, die verhindern soll, dass bei Empfang Zündstörungen etc. mit aufgenommen werden.

### Kurz und kapazitätsarm

Obwohl infolge des Brückennullpunktes bei diesem Gesamt- $\pi$ -Filter die Spannung auf der Zuleitung sehr gering ist, sollte sie einerseits kapazitätsarm und andererseits nicht zu lang sein. Deshalb hat der Verfasser den Antennenfuß vorne links im Loch der Autoradioantenne montiert.

Der Vorteil dieser „Gelsenkirchener Mobilantennenanpassung“ liegt neben der Vermeidung von mehreren Verlusten vor allem auch in der Handhabung. Es ist weder ein zusätzliches Antennenanpassgerät noch ein Stehwellenmessgerät notwendig. Es genügt – notfalls mit Hilfe des eingebauten Messgerätes in Stellung PO (Power-Output) – mit dem Anodendrehkondensator  $C_a$  ein relatives Maximum einzustellen; das ist alles. Die Veränderung der Antennenresonanz bei OSY beträgt auf diese Art mehr als 150 kHz (80 m). Auf 40 m wird der Drehko auf gut 100 pF, auf 20 m auf ca. 50 pF usw. zurück gedreht (**Bild 6**).

## Antennentheorie in Ehren

Für den interessierten Leser ist es sicher hilfreich, sich an Hand einiger Fragen – die sich im Laufe der Zeit immer wieder ergeben haben – mit der Materie näher beschäftigen zu können.

- Wie kann man die Spannung auf dem Strahler, die abgestrahlte Leistung und die Kapazität des Raumes messen?
- Wo gegen ist die „ladylike“-Spule um 0,6 dB schlechter?
- Wie wurden die „monatelangen Vergleichstests“ abgehalten?
- Eine Mobilantenne ist ein gegen Erde erregtes Antennensystem. Ist es nicht besser, sich anstelle von Vergleichsversuchen auf seriöse Antennensimulationsprogramme zu verlassen?

Nach dem Motto: „Keine Wissenschaft ohne Experiment“, will der Verfasser dabei sowohl die praktischen Versuche als auch die Messverfahren beschreiben, die ihn zu der ungewöhnlichen Betrachtungsweise gebracht haben.

Das gilt grundsätzlich für die gesamte Antennentechnik, vom einfachen Dipol bis zu den Besonderheiten einer Mobilfunkanlage.

Interessant ist z.B., dass ein frei gespannter Draht eine Induktivität von ca.  $1 \mu\text{H}/\text{m}$  entwickelt. Bei einem  $\lambda/2$ -Dipol für 80 m ergibt das zunächst  $40 \mu\text{H}$ . Wird ein solcher – den wir jetzt in den freien Raum verlegen wollen – erregt, so kommt es zu einer Antennenresonanz. Das heißt, es kommt zu resonanten Spannungsaufschaukelungen an beiden Enden der Antenne, obwohl eine Festkapazität nicht vorhanden ist. Die mittlere Kapazität von der einen Dipolseite zur anderen bleibt unberücksichtigt, da sie extrem klein ist.

### Kapazitives Verhalten

Da für eine Resonanz eine Kapazität vorhanden sein muss, zwingt sich der Schluss auf, dass der Raum dieses kapazitive Verhalten haben muss.



Wie kann man sich dies vorstellen? Wir nehmen an, die sinusförmige Spannung würde an beiden Seiten der Antenne von der Nulllinie ansteigen, und zwar an dem einen Ende ins Negative und auf der anderen Seite gleichzeitig ins Positive.

Von null bis zum Spitzenwert, also in den ersten  $90^\circ$ , wird elektrische Energie in Form von elektromagnetischen Wellen in alle Richtungen quer zur Antenne mit endlicher (Licht-) Geschwindigkeit ( $3 \cdot 10^8$  m/s) abgestrahlt. Sobald der Scheitelwert überschritten ist und die Spannung auf der hinteren Flanke abfällt, ist das Potenzial auf der Antenne niedriger als das der sich noch in der Nähe befindlichen elektromagnetischen Wellen.

Es kommt dadurch zu einer Rückstrahlung aus dem Raum auf die Antenne, und zwar mit dem Phasenverhalten eines Kondensators (reaktives Nahfeld). Ein kleinerer Teil der bereits abgestrahlten elektromagnetischen Wellen wird

sich allerdings weiter in Vorwärtsrichtung ausbreiten und in der Unendlichkeit des Raumes verschwinden. Er „verbraucht“ elektrische Energie und stellt somit einen Wirkwiderstand dar, der zunächst immer parallel zur Antenne auftritt.

Die Größe des strahlungsbedingten Lastwiderstandes des Raumes  $R_L$  hängt bei  $\lambda/2$ -Antennen im Wesentlichen von der Oberfläche des Strahlers ab. Bei einem dicken Draht oder Rohr wird er immer niederohmiger. Er bedämpft das Antennenresonanzsystem „auf natürliche Art und Weise“ immer mehr, was zu der bekannten Breitbandigkeit führt.

### **Je kürzer, desto hochohmiger**

Bei stark verkürzten Antennen wird er (leider) immer hochohmiger. Das Ziel muss sein, ihn so niederohmig wie möglich zu halten. Das ergibt ein niedriges Betriebs-Q, damit eine große Bandbreite und die Vermeidung von Verlusten. Die rechnerische Behand-

lung der Verhältnisse bei einem Dipol gestaltet sich deshalb etwas schwieriger, weil wir es dort mit unkonzentrierten, verteilten Reaktanzen zu tun haben.

Viel einfacher ist das bei einer Mobilantenne. Dort haben wir es mit einer konzentrierten Spuleninduktivität von ca.  $62 \mu\text{H}$  ( $80 \text{ m}$ ) zu tun – gemessen mit einem großen Parallelkondensator auf einer niedrigen Frequenz nach der Hochfrequenzmethode unter Verwendung eines R & S L-Messgerätes.

Nach der Thomson'schen Schwingungsformel ergibt sich für die Resonanzfrequenz  $3,650 \text{ MHz}$  eine notwendige Parallelkapazität von  $30,6 \text{ pF}$ . Von diesem rechnerischen Wert muss die Wickelkapazität abgezogen werden. Sie wurde bestimmt nach dem Resonanzdrosselprinzip.

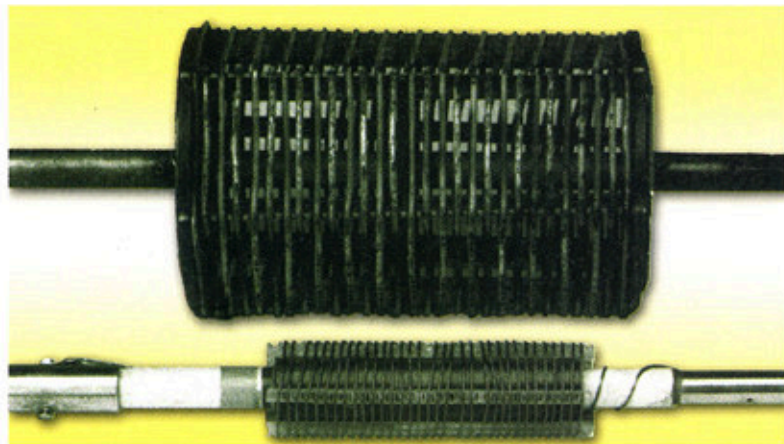
Mit einem R & S-Leistungsmessender und einem normalen Oszilloskop hat der Autor bei extrem loser Kopplung die Eigenresonanz der Spule gemessen.

Sie lag bei 8,5 MHz. Nach Thomson zurückgerechnet, ergibt das eine mittlere Wickelkapazität von 5,66 pF. Diese abgezogen von 30,6 pF, macht 24,94 pF. Als Kontrollvorgang ergab eine Parallelschaltung mit einem Festkondensator von 24 pF tatsächlich wieder die Resonanzfrequenz von 3650 kHz.

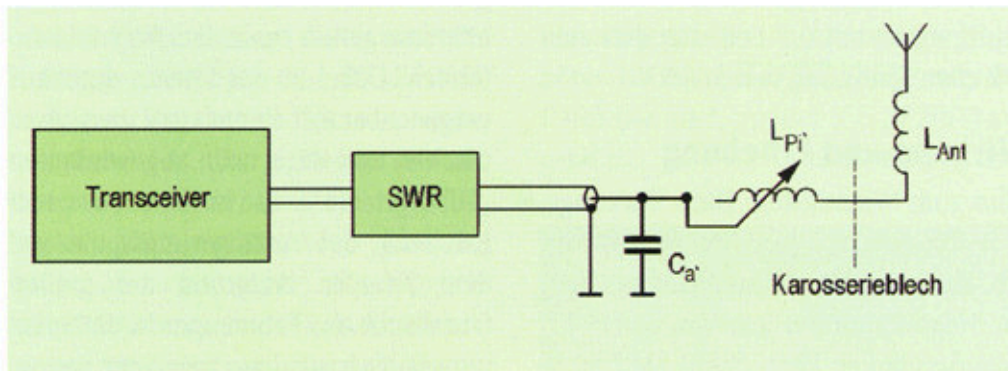
Wenn sich aber die gleiche Resonanzfrequenz mit dem Strahler von ca. 2,60 m ergibt, dann muss der Raum durch seine eingangs erläuterte Verhaltensweise einem Kondensator von ca. 25 pF entsprechen ( $C_{\text{Ant}}$  = Antennenkapazität). Für diesen Beitrag hat der Verfasser den ganzen Vorgang mit einem

etwas längeren Strahler und einer anderen Spule noch einmal nachvollzogen. Die Genauigkeit der Übereinstimmung hat ihn nach mehr als 40 Jahren selbst überrascht.

Dass die „ladylike“-Spule ca. 0,6 dB schlechter ist als die „fullsize“ (Bild 4) wurde auf folgende Weise gemessen:



**Bild 4:** Klassische Gelsenkirchener Mobilantenne mit Luft-Verlängerungsspule hoher Güte (oben), unten: Modifikation nach DL9AH – es wurden mehrere Ringkerne nebeneinander als Spulenkern verwendet. Die Spule verringert ihr Volumen auf 20 % bei gleicher Güte



**Bild 5:** Typischer Aufbau bei 50-Ω-Impedanz

Durch Unterbrechen mit einem Isolierstück und Einfügen eines Thermo-kreuzinstrumentes, wurde der oben aus der Spule herauskommende und in den Strahler fließende Strom gemessen. Er betrug 3 A bei jetzt nur noch 110 W. Nach der Optimierung der „ladylike-Spule“ und unter Beibehaltung der gleichen Messbedingungen, betrug bei ihr der Strom nur ca. 2,8 A. Das ist ein Stromverhältnis von 1,07, quadriert ein Leistungsverhältnis von 1,1449. Daraus den Logarithmus mit 10 multipliziert, ergibt 0,599 dB.

Trotz der Verringerung der Wickelkapazität war der Verlustanteil im Eisen und durch die Wirbelstromverluste im Kupferdraht so, dass dieser kleine Unterschied übrig blieb.

## Spannung am Strahler

Die Frage: „Wie wurde die Spannung auf den Strahler bestimmt?“ lässt sich leicht doppelt beantworten: Der Verfasser hat eine einfache Einweggleichrichtung in den unteren Teil der Spule eingebaut. Mit ihr wurde der Spannungsabfall an einer Windung mit langen Entkoppelwiderständen und einem einfachen empfindlichen Drehspulinstrument (ohne Messgleichrichter) gemessen.

Da der Strom in der Spule prinzipiell an jeder Stelle gleich ist, brauchte er den mit den Vorwiderständen und dem Innenwiderstand auf Effektivwerte umgerechneten Betrag nur noch mit der Zahl der Windungen zu multiplizieren. Das Ergebnis war 5700 V. Kontrolle: Die bei der Gelsenkirchener Mobilantennenauskopplung am Ausgang der Endstufe stehenden Spitzenspannung beträgt  $U_B - U_{A_{rest}}$ . Bei etwa 700 V Betriebsspannung abzüglich  $U_{A_{rest}}$  von 50 V (typisch für Zeilenendröhren) ste-

hen 655 V an. Das multipliziert mit dem ausgewiesenen Übersetzungsverhältnis von gerundet 12,3, ergibt ca. 8056 V Spitzenspannung. Wiederum multipliziert mit 0,7 bedeutet dies eine effektive Spannung von 5696 V.

## Wirkung und Erhebung

Nun zum Wichtigsten: Dem Wirkungsgrad und dem mittleren Erhebungswinkel. Kehren wir kurz zu unserem Dipol im freien Raum zurück. Von einem Erhebungswinkel kann man hier nicht sprechen, da die Energie quer zur Spannrichtung nach allen Seiten abgestrahlt wird. Lediglich in axialer Richtung kommt es zu zwei kelchartigen Abstrahlungslochern.

Der Wirkungsgrad hängt nur noch von den Verlusten im Antennensystem ab. Bei einem gestreckten  $\lambda/2$ -Dipol erbringt ein dünner Stahldraht hohe Verluste und damit einen Wirkungsgrad von bis unter 10 %. Ein dicker Kupfer- oder Silberdraht bringt so wenig Verlus-

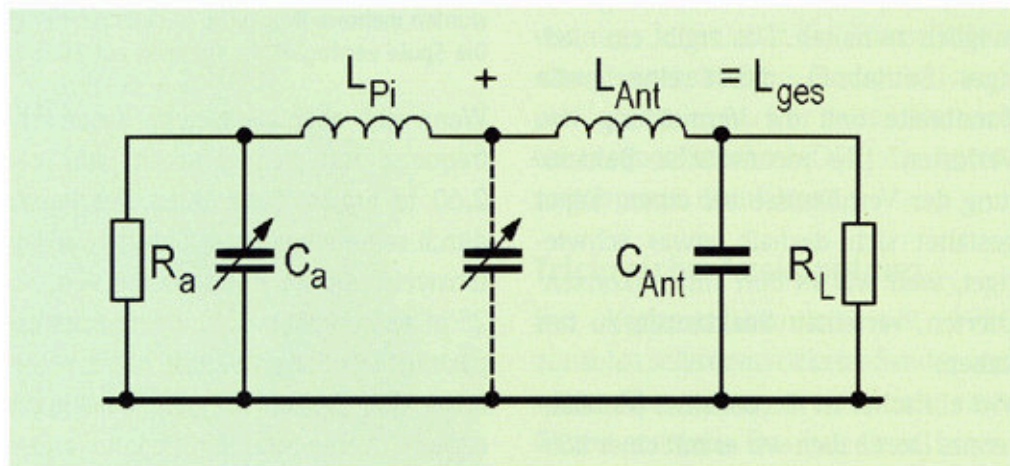
te, dass Wirkungsgrade von nahezu 100 % möglich sind. Verlagern wir nun unseren Dipol in eine mittlere Höhe von 2 m über Grund, so wie das bei Mobilstationen zwangsläufig der Fall ist, sind einige Dinge zusätzlich zu sehen.

Zunächst bleibt bei einer guten Antenne der Wirkungsgrad nahezu 100 %. Das ist einleuchtend, sie selbst hat sich

nicht verändert. Der Antennengesamtwirkungsgrad wird sich allerdings verschlechtern. Neben den meist überschätzten Verlusten im Erdreich kommt es zu einer gewissen Verstimmung, die man aber ausgleichen kann. Außerdem verursacht die Topografie Abschattungen und Verluste durch metallische Leitungen, wie Rohre, Drahtzäune usw.

Darüber hinaus wird Energie durch die mehr oder weniger große Spiegelwirkung der unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten nach oben reflektiert, was je nach Phasenlage zu Verlusten in der Antenne führen kann.

Der vertikale mittlere Erhebungswinkel geht relativ steil nach oben. Diese Verhältnisse gelten besonders für Mobilantennen. Dabei ist das System durchaus vergleichbar mit einem stark unsymmetrischen und dazu noch abgewinkelten „Dipolgebilde“. Es besteht aus dem Fahrzeug, der Verlängerungsspule und dem Strahler. Aufgrund der großen Oberfläche des Fahrzeuges ist die Spannungsaufschaukelung hier sehr gering, während sie auf dem Strahler oberhalb der Spule wegen der geringen Länge und Oberfläche sehr hoch ist.



**Bild 6:** Im Fahrzeug anzutreffender Ersatzkreis;  $L_{\pi}$  = vom  $\pi$ -Filter zur Verfügung stehende Induktivität

$U$  = Spannung  
 $C$  = Kapazität  
 $Q$  = Ladung  
 (Elektronenmenge)

Es handelt sich um ein selbstständiges System, das in der Nähe der Erde betrieben werden muss und daher kein Antennensystem ist, welches gegen Erde erregt wird!

## **Erdspeiß im Boden**

Um diese wiederkehrende Behauptung zu widerlegen, hat der Verfasser vor mehr als 35 Jahren sein damaliges Fahrzeug auf einer Wiese vorne und hinten mit je einem Erdungsspeiß mit dem Erdreich verbunden. Wenn eine Mobilantenne ein gegen Erde erregtes System gewesen wäre, hätten sich die elektrischen Verhältnisse so gut wie nicht verändern dürfen.

Tatsächlich aber hatten sich Resonanz und die Anpassung stark verändert. Umgekehrt ergaben sich so gut wie keine Veränderungen, als das Auto auf einer isolierenden Holzbrücke stand und sich weit vom Erdreich entfernte. Um ganz sicher zu gehen, fuhr der Autor mit zwischengeschaltetem Thermo-

kreuzinstrument am oberen Ende der Spule über Land.

Bei immer wieder länger eingeschaltetem Träger zeigte das Instrument – Beobachtung durch Windschutzscheibe – trotz unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten nahezu konstant 3 A (80 m). Lediglich das Vorhandensein von Telefon- oder Stromleitungen von nahen Häusern oder metallischen Lampenmasten usw. minderten den Antennenstrom um ca. 10 %. Ein Mobilstrahler ist insoweit eindeutig kein gegen Erde erregtes System!

Wirkungsgrade von ca. 1 % und Strahlungswiderstände von ca. 0,9  $\Omega$ , u.a. unter Hinweis auf die Rüdénberg'sche Gleichung immer wieder erwähnt, können nicht akzeptiert werden.

Rüdénberg'sche Gleichung:

$$R_s/\Omega = 1579 (hw/\lambda)^2$$

(1579 = 160  $\pi^2$ , hw = Wirkhöhe)

Das Gleiche gilt für entsprechende Programme. Rechnet man den bereits ausgewiesenen, durch die abgestrahlte Leistung ermittelten Parallelwiderstand von ca. 180 k $\Omega$  nach der Formel

$$R_s = X_L^2/R_p$$

( $R_s$  = Serienwirkwiderstand [im Strombauch auch „Strahlungswiderstand“ genannt],  $R_p$  = Parallelwirkwiderstand)

aus, so ergibt sich 11,22  $\Omega$ .

Im Resonanzfall ist  $X_L = X_C$ , deshalb gilt auch:

$$R_s = X_C^2/R_p.$$

Zieht man davon den Kupferverlustwiderstand der Spule von ca. 0,75  $\Omega$  (17 m Cu/10 mm<sup>2</sup>/3650 kHz) ab, bleibt ein Strahlungswiderstand von ca. 10,47  $\Omega$  übrig. Rechnet man zu Kontrollzwecken aus der Leistung von ca.



110 W und dem gemessenen Strom von 3 A zurück, so kommt man auf  $11,47 \Omega - 0,75 \Omega = 10,72 \Omega$  – eine völlig ausreichende Übereinstimmung. Damit liegt der Wirkungsgrad bei der Gelsenkirchener Mobilantenne bei Werten um 90 %.

### **Wenig Leistung vergeuden**

Um von der abgestrahlten Leistung in der Umgebung, wie bereits erwähnt, möglichst wenig zu vergeuden, kommt es auf einen günstigen vertikalen Abstrahlwinkel an.

Versuche haben ergeben, dass im Stand und an gleicher Stelle Strahlerlängen oberhalb der Spule von ca. 7 m regelmäßig Rapportverbesserungen von 8...12 dB brachten. Dieser Pegelanstieg war besonders auf große Entfernungen zu beobachten (500...1000 km Luftlinie). Gleichzeitig ging der Strom in der Antenne bei gleicher Leistung zurück.

Sicherlich verbessert sich durch die zusätzliche Strahlerlänge der Antennensystem-Wirkungsgrad. Ein niedriges Betriebs-Q führt zu weniger Antennenstrom und damit zu geringeren Verlusten in der Umgebung und in der kleiner gewordenen Spule. Mitentscheidend für den großen Unterschied von durchschnittlich 10 dB aber ist die Absenkung des mittleren Erhebungswinkels.

Zum einen wäre eine Wirkungsgradsteigerung der Antenne selbst in diesen Größenordnungen gar nicht möglich. Zum anderen weiß man, dass eine vertikale Verlängerung bis hin zu einer  $\lambda 5/8$ -Länge zu einem Flachstrahler für DX führt. Zwar kann man mit einer 5...7 m Antenne nicht fahren; sie aber aus teleskopartig zusammensteckbaren etwa 1 m langen Aluminiumrohren für den Standbetrieb vorzubereiten, ist in jedem Fall eine gute Lösung.

Um die Resonanz wieder herbeizuführen, kann die Spule an geeigneter Stelle abgegriffen werden.

## Schlussbetrachtung

Alle Experimente, Beobachtungen und Überlegungen führen zu den charakteristischen Merkmalen der Gelsenkirchener Mobilantenne. Die vom Verfasser gewählte, wenn auch unübliche und manchmal im Gegensatz zur Antennenliteratur stehende, rein elektrische Betrachtungsweise trägt der Tatsache Rechnung, dass einer Antenne eine elektrische Leistung zugeführt wird. Außerdem, dass der Raum eine elektrische Leistung aufnimmt und insofern vergleichsweise „verbraucht“. Damit verhält er sich zwangsläufig wie ein Lastwiderstand.

Es ist der Strom, der über diesen zurückgerechneten Ersatzwiderstand fließt, auf den es für die Ausbildung der elektromagnetischen Wellen ankommt. Keine Antennentheorie darf diese Gegebenheit außer Acht lassen oder gar

gegen die elementaren Grundgesetze der Elektrotechnik wie Ohm'sches Gesetz, Leistungsgesetz usw. verstoßen.

Letztendlich ist jedes gute Antennensystem nichts anderes als ein resonantes, richtig dimensioniertes Anpassglied an den Raum.

DL9AH