Antennentechnik - einmal anders betrachtet

von Arno Weidemann, DL9AH - DL9AH@gmx.de

Der Verfasser hat sich bemüht, bewusst ohne viel Mathematik und möglichst einfach, die Funktionsweise von Antennen aus seiner Sicht zu erläutern. Die Ergebnisse seiner Feldversuche, die seine Denkungsart erzwungen haben, dienen als Beweis.

Wenn man der Sendeantennentechnik näher tritt, so muss man feststellen, dass alle Sendeantennen grundsätzlich gleich arbeiten. Sie sind von der Größe, vom Aufbau, von der Anpassung usw. unterschiedlich, aber sie alle, vom klassischen Dipol bis zur Mobilantenne, haben die Aufgabe, die zugeführte Energie möglichst verlustfrei in den Raum abzustrahlen. Gerade bei in Erdnähe betriebenen Mobilantennen hat man zudem eine gute Möglichkeit die Verhältnisse der optimalen Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen zu studieren und zu messen. Getreu nach dem auf allen guten Universitäten und technischen Hochschulen verwendeten Grundsatz „Keine Wissenschaft ohne Experiment!“ steht auch der Verfasser auf dem Standpunkt, dass Feldversuche die angewendete Theorie bestätigen müssen.

So wird leider z.B. bis heute auch in der internationalen Antennenliteratur und im Internet nach wie vor behauptet, die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen würde durch den Strom in der Sendeantenne verursacht. Es wäre daher gut, den Teil, in dem der große Strom fließt, so groß wie möglich zu machen!
Außerdem sei es förderlich, den Strom in der Antenne - bei gleicher Leistung - durch antennenseitige Maßnahmen so hoch wie möglich zu treiben. Diese Denkungsart ist bei den verschiedenen Ausführungen von kommerziellen Mobilantennen offenbar auch heute noch der Fall. Dort argumentiert man: Wenn der Strom das auslösende Element ist, dann ist es ratsam, den Teil der Antenne, in dem der größte Strom fließt, so groß wie möglich zu machen. Das hat zu absonderlichen Konstruktionen geführt. Sehr verbreitet ist auch heute noch das sogenannte „Toploading System" bei Mobilantennen. Nach den vorgenannten Überlegungen soll die „Verlängerungsspule", die man aus resonatorischen Gründen auf den niedrigen Bändern braucht, so hoch angebracht werden wie möglich. Das würde dann ein möglichst langes Rohrstück ergeben, in dem der große Strom fließt. Der dann kurze Stab oberhalb der Spule, auf dem eine große Spannung steht, sei zwar aus Gründen der Resonanz notwendig, für die Abstrahlung der elektromagnetischen Wellen sei er aber unwichtig! In der Praxis konnte die Richtigkeit dieser Überlegung nicht nachgewiesen worden. Im Gegenteil:

Bei der Entwicklung der Gelsenkirchener Mobilantenne stellte sich heraus, dass es nicht auf den Strom in der Antenne ankommt, sondern dass es vielmehr darauf ankommt, den Teil oberhalb der Verlängerungsspule, auf dem die große Spannung steht, so lang und so dick wie möglich zu machen! Es war und ist also wichtig, die Wirkfläche mit der großen Spannung in einem Antennenresonanzsystem so groß und so lang wie möglich zu machen! Diese Feststellung gilt grundsätzlich für alle Antennen. Um diese Tatsache zu untermauern, wurde der Stab, der wegen der in der Straßenverkehrsordnung maximal zulässigen Gesamthöhe von 4m, nur ca. 2,5m oberhalb der Spule sein konnte, im Stand auf ca. 5m oberhalb der Spule verlängert. Nach entsprechender Spulenänderung - wegen der Resonanz - stellte sich eindeutig heraus, dass zum einen die Abstrahlungswerte - in größerer Entfernung - besser wurden, zum anderen aber der Strom in der Antenne zurückging! Das war

verständlich, denn die verbesserte Abstrahlung dämpfte das Antennensystem mehr, sodass der Betriebsgütefaktor niedriger und die Bandbreite damit größer wurde. Damit wurde automatisch der Strom in der Antenne kleiner.

Um den endgültigen Beweis anzutreten, dass es nicht auf den Strom in der Antenne in Bezug auf die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen ankommt, wurde die Verlängerungsspule mitsamt der stromführenden Zuleitung komplett in den Kofferraum verlegt. Durch ein großes, biertellergroßes Loch in der Karosserie, abgedeckt durch eine isolierende Scheibe, wurde nur noch der spannungsführende, obere Teil der Antenne nach außen geführt. Alle stromführenden Teile der Antenne waren jetzt durch das Stahlblech der Karosserie abgeschirmt! Das Ergebnis war, dass sich kein erkennbarer Unterschied in der Abstrahlung zwischen vorher und dieser Versuchsanordnung erkennen ließ! Trotzdem ist die Position der Spule außerhalb des Fahrzeuges günstiger, weil die, wenn auch kleine, Durchführungskapazität unnötigerweise mit aufgeladen werden muss. Bei Spannungen von 5000 Volt bis 10000 Volt auf dem Strahler (80m) führen selbst wenige Picofarad zu einer unnötigen Blindstrom-Aufladung, welche für die Abstrahlung verloren geht. Hinzu kommen die, zumindest theoretisch möglichen, Verluste durch das magnetische Streufeld der Spule.

Obwohl der Strom für die Entstehung der Spannung in einem Resonanzsystem notwendig ist, ergab sich auch aus diesem Versuch der Beweis, dass der Strom in der Antenne selbst nicht für die Entstehung von elektromagnetischen Wellen verantwortlich ist! Das gilt für alle Antennen, die allerdings nicht länger sein sollten als l/2. Hat man ein Antennensystem mit 2 mal l/2, so ist das vorteilhaft solange die Abstrahlung gleichphasig erfolgt, wie z.B. bei einer Qubical-Quad oder bei einer mit einer Feeder-Leitung gespeisten Doppel-Zeppelin-Antenne. Es kommt dabei immer darauf an, die spannungsführenden Enden in eine gute und hohe Position zu bringen und sie besonders gut zu isolieren! Auch das steht im Widerspruch zur Meinung vieler Leute. Dass für spezielle Antennen, wie z.B. bei Vorhangantennen, Richtantennen, Wanderwellenantennen, oder solche für unterschiedliche Entfernungen etc., ergänzende Überlegungen zum Tragen kommen, ist selbstverständlich. Ein extrem langer, gestreckter Draht hat zwar auch eine große Wirkfläche, ist aber insofern nicht immer günstig, weil die vielen l/2-Stücke, die sich über die Länge ergeben (Partialresonanzen), sich gegenseitig strahlungstechnisch nicht unbedingt unterstützen, sondern teilweise sogar aufheben. Das Horizontaldiagramm wird dadurch sehr verzipfelt. Trotzdem kann man mit solchen Antennen gut zurecht kommen, wenn man keine anderen Möglichkeiten hat. Warum gerade die Spannung auf einer möglichst großen Wirkfläche die Abstrahlung von elektromagnetischen Wellen verursacht, soll weiter unten erläutert werden.

Ein weiterer Widerspruch zu den tatsächlichen Verhältnissen ist die immer wiederkehrende Behauptung „die Erde würde enorm viel Energie verbrauchen und sie würde daher die meisten Verluste bringen“. Dazu hat der Verfasser einen einfachen, von jedermann leicht nachvollziehbaren Versuch unternommen.

Er spannte einen normalen, auf 14 MHz zugeschnittenen Dipol ca. 25 cm über den Boden einer grünen Wiese. Dann maß er mit einem Antennenanalysator (MFJ 259 B) direkt am Einspeisepunkt in der Mitte der Antenne den Fußpunktwiderstand und die tatsächliche Resonanzfrequenz. Es ergaben sich ein Wert von 68 Ohm und eine optimale Resonanzfrequenz von etwa 13.9 MHz. Danach zog er den gleichen Dipol auf eine Höhe von 1,60 m, und maß erneut. Jetzt betrug der Fußpunktwiderstand nur noch ca. 35 Ohm und die optimale Resonanzfrequenz war von vorher 13,9 MHz auf etwa nur 14 MHz gestiegen. Die Auswertung des ersten Punktes, des hohen Fußpunktwiderstandes, zwang zu nur einer Erklärung: bei einer so geringen Entfernung zwischen Antenne und Erdreich wurde durch die kapazitive Einkopplung in das Erdreich ein deutlicher Verluststrom verursacht! Dies umso mehr, als ein Dipol einen großen Spannungsunterschied zwischen den beiden Enden hat. Ist also auf der einen Seite ein positives Potential, so ist gleichzeitig auf der anderen Seite eine negative Spannung. Das Erdreich war durch die Nähe zur Antenne in diesem Fall ein verlustbehafteter Nebenschluss. Die hohe Spannungsdifferenz zwischen den Enden der Antenne hatte einen Verluststrom durch das Erdreich verursacht. Dieser hatte wiederum den Verlustwiderstandsanteil am Einspeisepunkt in die Höhe getrieben. Dieser Verlustanteil würde noch weiter steigen, wenn man die Entfernung zur Erde noch weiter vermindern würde.

Der niedrige Fußpunktwiderstand von nur ca. 35 Ohm bei einer Antennenhöhe von nur 1,6m zwingt aber jetzt den Schluss auf, dass der Verlustanteil durch das Erdreich bereits weitestgehend verschwunden war!
Der niedrige Einspeisewiderstand kam auch dadurch mit zustande, weil das Erdreich jetzt zwar kaum noch Verluste gemacht hat, aber die nach unten abgestrahlte Leistung wurde weitestgehend wieder nach oben zurück reflektiert. Dieser Leistungsanteil wurde dann wieder im Wesentlichen von der Antenne aufgenommen. Dadurch stieg der Betriebsgütefaktor wieder geringfügig an, sodass sich der Fußpunktwiderstand leicht verringerte.

Bemerkenswert war auch die Tatsache, dass die Resonanzfrequenz sich nur um gut 0,1 MHz geändert hatte. Rechnet man das zurück, so ergibt sich daraus, dass das Epsilon-Relativ, also der Kapazitäts-Verstärkungsfaktor der Erde gegenüber dem Vakuum oder der Luft, sehr gering sein musste. Das bedeutet aber auch, dass auch der kapazitive Einfluss der Erde nur einen sehr geringen Einfluss auf die Verhältnisse in der Antenne hatte. In einer Höhe von 4 m stieg dann der Fußpunktwiderstand wieder auf einen Wert von ca. 50 Ohm an, da jetzt der Reflexionsanteil von unten zurückgegangen war und andererseits die Abstrahlung nach oben und zu den Seiten besser geworden war. Auf die verschiedenen Erhebungswinkel, die letztendlich auch von der Aufbauhöhe wesentlich bestimmt werden, soll hier zunächst nicht eingegangen werden.

Da die Verluste oder die Nichtverluste im Erdreich aber den Gesamtwirkungsgrad einer Antenne bestimmen können, ist es ganz wesentlich fest zu stellen, ob z.B. bei einer Mobilantenne die Nähe zum Erdreich den Wirkungsgrad beeinträchtigen kann oder nicht. Im Zusammenhang mit der Gelsenkirchener Mobilantenne wurden auf 3 verschiedenen Wegen immer die gleichen Verlustanteile von etwa 10 % festgestellt. Das heißt,

der Wirkungsgrad der Gelsenkirchener Mobilantenne liegt bei etwa 90 %! Abgesehen davon, dass die Behauptung, eine Mobilantenne sei eine gegen Erde erregte Antenne, nicht der Realität entspricht, kommt man mit der in der Literatur und im Internet verbreiteten „Rüdenbergschen Gleichung“ für verkürzte Antennen - die man fälschlicherweise auch bei Mobilantennen anwendet - auf Wirkungsgrade von nur 1 - 2 %! Damit hätte sich aber die Verlustleistung von 98% bis 99% irgendwo in Form von Wärme wieder finden lassen müssen! Das war aber nicht der Fall! Um dafür eine Scheinerklärung zu finden, kommt man immer wieder mit dem Argument, die Erde würde die Verluste verursachen.

Tatsächlich ist eine Mobilantennenanlage ein selbstständiges Antennensystem. Dieses eindeutig selbstständige Antennensystem, das grundsachlich nichts mit der Erde zu tun hat, besteht aus dem Strahler oberhalb der Verlängerungsspule, der Spule selbst, und der Metallmasse des Fahrzeugs! Eine Art von unsymmetrischem Dipol. Die Spannung ist auf dem Strahler mit seiner relativ niedrigen Wirkfläche groß (80m) und auf der großen Oberfläche des Fahrzeuges entsprechend klein. Aber die Spannung auf dem Fahrzeugblech ist in der Tat vorhanden und man kann sie auch messen; nur sie hat an allen Stellen die gleiche Polarität! Es gibt z.B. keinen Potentialunterschied zwischen dem Fahrzeugvorderteil und dem Fahrzeughinterteil. Die Fahrzeuge befinden sich zwar nur ca. 20 cm über dem Erdreich, aber wo keine Spannungsdifferenz ist, kann nach dem Ohmschen Gesetz auch kein Verluststrom im Erdreich verursacht werden! In Folge dessen kann die Erde auch keine Verluste produzieren. Insofern spielt die Nähe zum Erdreich hier auch so gut wie keine Rolle! Eine weitere Bestätigung dafür ist in der Tatsache begründet, dass sich keine Änderung ergibt, wenn man das ganze Fahrzeug von der Erde entfernt. Der Verfasser konnte diese Beobachtung machen, als er auf eine isolierende Holzbrücke fuhr und sich dabei ca. 4m von der Erde entfernte. Wenn die Erde wirklich den Wirkungsgrad des Mobilantennensystems wesentlich bestimmen würde, dann müsste das Erdreich der Antenne ja Energie entziehen. Das bedeutet, dass die Erde das System mit einem Verlustwiderstand belasten müsste. Das wiederum hätte man an den im Fahrzeug befindlichen Instrumenten für die Spannungsaufschaukelung und für den Resonanzstrom erkennen müssen. Das war aber nicht der Fall! Insofern ist nachgewiesen, dass die Erde nicht den Wirkungsgrad eines Mobilantennensystems bestimmt! Das bedeute aber auch, dass die gängigen Antennensimulierungsprogramme in ihren Aussagen zu Mobilantennen falsch und damit unbrauchbar sind.

Der geringe Einfluss der Erde gilt auch für stationäre Sendeantennen, z.B. für einen klassischen Dipol. Es ergibt sich keine Änderung der Resonanzfrequenz, gleichgültig ob die Antenne 5m über Grund oder 10m über Grund aufgehängt wurde. Die Kapazität gegen Erde ist also ohne Bedeutung und bestimmt u. a. nicht die Resonanzfrequenz. Je höher eine Antenne angebracht worden ist, desto mehr überstrahlt sie allerdings Hindernisse, und je weniger Reflexionsenergie nimmt sie von unten oder von anderen Reflexionswänden wieder auf. Es wird bis zu einem Maximum Energie in den Raum abgestrahlt! Allerdings abhängig von der Topografie und Abschattungen wie Häuser etc., und das unter verschiedenen Erhebungswinkeln.

An dieser Stelle erscheint es sinnvoll, Überlegungen darüber anzustellen, warum zum einen die Spannung das auslösende Moment für die Ablösung von elektromagnetischen Wellen ist, und warum die Wirkfläche auf der die Spannung steht, besonders groß sein soll. Dazu ein kleiner Umweg, der im ersten Moment eventuell ein kleines Schmunzeln erzeugen könnte.

Lässt man einen Stein senkrecht in ein ruhiges Gewässer fallen, so verdrängt er das Wasser an der Einschlagstelle rund herum zur Seite. Da das Wasser gegen die träge Masse des umliegenden Wassers gedrückt wird, erhebt sich das Wasser um die Einschlagstelle aus dem Wasser empor und bildet eine Welle, die sich zum einen nach außen, aber auch zurück in das Zentrum der Einschlagstelle bewegt. Atomar gesehen, bewegen sich die Wassermoleküle weitestgehend komplett. Also die schweren Atomkerne und die rotierenden Elektronen gemäß dem Bohrschen Atommodell. Das ist möglich, weil der Vorgang relativ langsam abläuft. Bei einem Lautsprecher läuft ein ähnlicher Vorgang ab, aber wesentlich schneller. Dort wird die bewusst leichte Membran, etwa bei dem üblichen Messton von 1000 Hz, zunächst gegen die umgebende Trägheit der Luft gedrückt, sodass sich eine Luftdruckerhöhung und damit eine Luftdruckwelle ergibt. Diese Luftdruckwelle breitet sich dann nach außen aus. Auch hier werden die wesentlich leichteren Gasatome der Luft, die zudem weniger gebunden sind, weitestgehend komplett, also die Atomkerne und die sich orbital bewegenden Elektronen, in

Bewegung gesetzt. Kommt dann die Membran im Zuge der Sinusschwingung wieder zurück, so strömt auch hier ein Teil der Luftmoleküle wieder zurück. Normal gute Lautsprecher haben einen Wirkungsgrad von ca. 4 bis 6 %, vor allem wenn die Membran leicht und groß ist. Bei kleineren Membranen muss die Aufhängung so beschaffen sein, dass ein größerer Hub der Membran möglich ist. Auf diese Art können dann auch mit einem kleineren Lautsprecher und damit auch kleineren Membran nahezu vergleichbare Lautstärken und damit ähnliche Wirkungsgrade erzeugt werden. Wird dieser Vorgang auf der Resonanzfrequenz des Lautsprechersystems durchgeführt, so ist der Wirkungsgrad immer um ein Vielfaches höher als 6%.

Und nun zu den schnellen Bewegungen von Elektronen und den nicht mehr so schnellen Bewegungen der relativ schweren Atomkerne. Wird z.B. ein l/2-Dipol auf der Frequenz von z.B. 7 MHz mit einer bestimmten Leistung beaufschlagt, so bewegen sich in dem Antennensystem eine große Menge von leichten Leitungselektronen hin und her. Bei angenommen einem Ampere aufgerundet 6,28 mal 1018 Elektronen pro Sekunde. Also eine gigantische Zahl. Die Masse eines Elektrons ist allerdings sehr klein, nämlich nur 1,38 mal 10^{-23} „Gramm"; aber sie ist vorhanden. Diese „leichten" Elektronen werden durch die eingespeiste Leistung sehr schnell der einen Seite des Dipols entzogen und auf die andere Seite gebracht. Sind alle Elektronen auf einer Seite angekommen, so haben wir dort die größte Spannung, da eine Vielzahl von negativ geladenen Einzelladungen eine große negative Gesamtladung ergibt.

Betrachten wir dann diesen Vorgang einmal in Zeitlupe, so ist festzustellen, dass in diese Seite der Antenne eine große Menge von negativ geladenen Materieteilchen geflossen ist! Die vor allen Dingen sich auf der Oberfläche des Drahtes zusätzlich befindlichen Elektronen, die immer eine negative Elementarladung haben, drängen rund herum die umliegenden Elektronen der Luftmoleküle, die auch eine negative Ladung haben, und die ja ebenfalls außen rotieren, ab. (Gleiche Polaritäten stoßen sich ab). Der Atomkern der Luftmoleküle, der immer eine positive Ladung hat, wird hingegen vom negativen Potential auf der Antenne angezogen. (Ungleiche Ladungen ziehen sich an). Auf Grund der relativ schweren Kerne, und der kurzen Zeit des Umladens können sich die Atomkerne aber nur wesentlich langsamer bewegen als die leichten Elektronen.

Bei den rund herum auf der Drahtoberfläche aufliegenden Luftmolekülen werden somit die Elektronen entgegen ihrer elektrischen Ruhelage gegenüber dem Atomkern ellipsenförmig nach außen verschoben. Da jede Art von Elektronenbewegung einen elektrischen Strom ergibt, haben wir es jetzt mit dem bekannten Verschiebestrom im Raum zu tun. Es handelt sich hier um den gleichen Verschiebestrom, der auch bei Kondensatoren mit einer absoluten Isolation eine Auf- und Entladung ermöglicht. Dadurch, dass sich jetzt die nach außen bewegten Elektronenschalen (Orbits) den nach außen daneben liegenden kreisenden Elektronen nähern, werden auch diese wegen ihrer gleichen Polung abgedrängt - usw. usw. Es ergibt sich eine Elektronenbewegung im Raum, die sich von der Antenne weg bewegt. Da sich die entfernenden Elektronen gegen die Masseträgheit der umgebenen, außen rotierenden Elektronen der dahinter liegenden Luftatome anlaufen müssen, kommt es zu einer Verdichtung der Elektronenmenge. Das führt zu einer Spannungserhöhung im Raum neben der Antenne. Nach einer, von der Resonanzfrequenz abhängigen, kurzen Zeit werden sich von der im Raum aufgestauten Elektronenmenge ein Teil der Elektronenschalen weiter vorwärts bewegen, ein größerer Teil aber wieder zurück zur Antenne fließen. Im Zuge der abfallenden, negativen Spannung auf dieser Antennenseite, wird diese Elektronenmenge aber weitestgehend wieder von der Antenne aufgenommen. Die Zeitabläufe sind dabei so, dass die aus dem Raum zur Antenne zurückfließenden Elektronen sich so verhalten wie bei einem Kondensator, nämlich mit einer Phasenverschiebung von 90 Grad!

Sind die Überschusselektronen aus der Umgebung zur betrachteten Antennenseite zurückgekehrt, so sorgt der resonante Schwungradeffekt dafür, dass dieser Seite der Antenne die Elektronen wieder entzogen werden. Zusätzlich eine bestimmte Menge an Elektronen durch die eingespeiste Leistung, die dann auf die andere Seite fließen. Es fehlen jetzt auf der hier zunächst betrachteten Seite gegenüber dem Neutralzustand Elektronen. Diese Seite ist somit positiv geladen. Nach diesem Zeitablauf ist jetzt auf der anderen Seite ein Überhang von Elektronen, damit ein negatives Potential und der beschriebene Ablauf beginnt jetzt auf der anderen Seite.

Innerhalb der Antenne drehen sich also die Verhältnisse im Zuge der Resonanzfrequenz um und der beschriebene Vorgang wiederholt sich nun auf der anderen Seite. Wir haben es jetzt mit einem von der Resonanzfrequenz zeitlich abhängigen, wechselnden Verschiebestrom im Raum zu tun. Die Energiemenge, die sich in Form von elektromagnetischen Wellen von der Antenne weg bewegt, muss durch die eingespeiste Leistung nachgeliefert werden. In jedem Fall ist es sinnvoll, die Antenne auf der Resonanzfrequenz zu betreiben!

Um ganz sicher zu gehen, dass sich die Abläufe genau so verhalten wie beschrieben, hat der Verfasser einen weiteren Versuch unternommen. Bei dem oben bereits erwähnten Dipol für 20m, bei einer Höhe von 1,6m, (4qmm, NYA, mit Isolation), wurde die genaue Resonanzfrequenz mit einem Antennenanalysator (MFJ 259 B) bei X = 0 mit 13,978 MHz gemessen. Dann schnitt der Verfasser mit einem Messer die etwa 0,7mm dicke Isolation herunter. Der jetzt unveränderte aber nackte Kupferdraht hatte jetzt auf einmal eine Resonanzfrequenz von 14,332 MHz. Also eine Veränderung nach oben von 354 KHz! Das sind immerhin 2,5%! Die einzig mögliche Erklärung dafür kann nur in der engeren Atomstruktur der Plastikisolation liegen. Mehr Atome, direkt auf der Oberfläche des Drahtes, bedeuten mehr Elektronen, und damit mehr Lade- und Entladestrom auf die Raumkapazität. Aus dieser Sicht erscheint es zunächst besser, keinen Antennendraht mit Isolation zu verwenden, denn dann könnte man durch Verlängerung des Drahtes die Wirkfläche erhöhen. Allerdings würde

nackter Kupferdraht sehr schnell auf der Oberfläche oxidieren. Diese Oxydschicht hätte dann allerdings für Hochfrequenzströme einen 3 mal höheren Verlustwiderstand als blankes Kupfer. Es ist also naheliegend, die Oberfläche des Antennendrahtes gegen den Sauerstoffeinfluss der Luft zu schützen, um damit die Verluste zu vermeiden.

Die günstigste Lösung ist hier Kupferlackdraht (CuL). Der hart gebrannte Emaillelack ist sehr dünn und deckt den von der Produktion her blanken Kupferdraht ausreichend dicht ab. Er ist außerdem, auch auf lange Zeit, sehr widerstandsfähig gegen Witterungseinflüsse. Zudem bietet er bei Sturm den geringsten Luftwiderstand. Sicher kann man aus optischen Gründen auch mit einem nur 0,5mm dicken Kupferdraht funken. Grundsätzlich gilt aber auch hier: ein dicker Draht ist immer besser als ein dünner! Ein dicker Draht hat neben den geringeren Verlusten auch noch eine größere Oberfläche und damit eine größere Wirkfläche. Kommt es nicht auf die Optik an, so sind auch dicke Aluminiumdrähte angezeigt. Sie sind leicht und bei großen Spannlängen ausreichend zerreißfest.

Der Raum, der die abgestrahlte elektrische Energiemenge aufnimmt und wegen der dann bereits zu großen Entfernung zur Antenne nicht mehr phasengerecht zurückgeben kann, verhält sich somit wie ein Verbraucherwiderstand. Dieser Wirkwiderstand ist damit der abstrahlungsbedingte Lastwiderstand des Raumes, der grundsätzlich immer der Antenne parallel liegt. Er wird bei immer kleiner werdender Wirkfläche im Mittel immer hochohmiger (z. B. bei Mobilantennen) und erreicht bei umgekehrt voller Wirkfläche seinen niedrigsten Wert. Er lässt sich übrigens als Mittewert leicht berechnen. Da eine resonante Antenne nichts anderes ist als ein Resonanz-Transformator mit einem bestimmten Spannungsübersetzungsverhältnis und einem dazu gehörenden quadratischen Widerstandsübersetzungsverhältnis, findet sich der parallele Widerstand in umgesetzter Form als Strahlungswiderstand in der Mitte eines z.B. Dipols im Fußpunktwiderstand als Serienwiderstand wieder. Die Blindwerte im System heben sich grundsätzlich durch die Resonanz auf ($X_C = X_L$). Das Übersetzungsverhältnis und das dazu quadratische Widerstandsverhältnis lassen

sich übrigens ebenfalls leicht berechnen. Strahlt die Antenne gut ab und ist der parallele, strahlungsbedingte Lastwiderstand klein, dann ist der Strahlungswiderstand am Einspeisepunkt hoch. In dem Fall wird die Antenne breitbandiger, der Betriebsgütefaktor geht zurück, und damit geht der Strom in der Antenne auch zurück, was unter anderem den Wirkungsgrad erhöht. Es kommt also genau umgekehrt darauf an, dass durch antennenseitige Maßnahmen der Strom in der Antenne, bei gleicher Sendeleistung und ohne die Verluste im System zu erhöhen, durch gute Abstrahlung so klein wie möglich gebracht wird. In Serie zu dem übertragenden Strahlungswiderstand erscheint im Fußpunktwiderstand auch noch, als Summe aller Verluste, der Verlustwiderstand. Dieser Widerstandsanteil ist aber in der Regel sehr klein und erreicht bei guten Mobilantennen einen Wert von maximal 10%.

Der magnetische Anteil bildet sich nach einer gewissen Entfernung im Raum, weil sich dort zwei entgegen gesetzt polarisierte Spannungen gegenüber stehen, die dann im Raum einen Magnetismus verursachenden Strom erzeugen. Dieser sich auf- und abbauende Magnetismus induziert allerdings, wie in der Sekundärwindung eines Transformators eine gleichpolige Spannung, sodass diese im Raum erhalten bleibt. Der magnetische Anteil der elektromagnetischen Wellen lässt sich übrigens durch eine Rahmen- oder Magnetantenne zu Empfangszwecken gut verwenden.

Zu dem kapazitiven Verhalten des Raumes hat der Verfasser einen einfachen, aber interessanten Versuch mit der Gelsenkirchener Mobilantenne gemacht. Während er vorher auf empirische Art die Resonanzfrequenz festgestellt hatte, rechnete er danach mit der gemessenen Induktivität der Verlängerungsspule und der Resonanzfrequenz die Kapazität des Strahlers gegen den Raum aus. Mit Hilfe der Thomsonschen Schwingkreisformel war das tatsächlich sehr einfach. Jahre später kam er auf die Idee, die Strahlerkapazität direkt zu messen. An einer Aluminium-Tischtennisplatte befestigte er isoliert nur den Mobilstrahler und maß mit einem Rohde und Schwarz-Kapazitätsmessgerät die Kapazität des Strahlers. Die Tischtennisplatte war das

großflächige Gegengewicht. Die ablesbare Kapazität hatte den gleichen Wert wie die vorher errechnete! Damit war klar, dass das kapazitive Verhalten des Raumes bei gleicher Wirkfläche, aber bei verschiedenen Frequenzen, grundsätzlich gleich ist. Diesem Verhalten kann man somit eine gemittelte, feste Kapazität zuordnen und hervorragend damit arbeiten. Bei der Änderung des Abstandes zur Erde, dadurch dass einmal der Stab senkrecht und einmal horizontal in gut einem Meter Höhe gebracht wurde, kam es nicht zu einer Änderung der gemessenen Kapazität. Auch hier zeigte sich, dass die Kapazität zur Erde zum einen nicht die Resonanzfrequenz bestimmt, zum anderen die Resonanzfrequenz sich aus dem kapazitiven Verhalten des Raumes herleitet.

Die hier dargelegte Sichtweise trägt der Tatsache Rechnung, dass der gesamte Kosmos und auch wir selbst aus einer Ansammlung von Atomen bestehen. Während bei den unterschiedlichen Elementen die Größe und damit das Gewicht der Atomkerne unterschiedlich sind, ist die Masse aller einzelnen Elektronen gleich. Die sich fortpflanzende ellipsenförmigen Verschiebung gegenüber dem Atomkern, der nicht masselosen Elektronen-„Schalen", braucht eine gewisse Zeit. Die Frage nach der Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen beantwortet sich dadurch von selbst. Die „Anstoßgeschwindigkeit" muss wegen der, wenn auch kleinen Masseträgheit der Elektronen endlich sein! Sie kann weder schneller und nur begrenzt langsamer als 3 mal 10 hoch 8 Meter pro Sekunde sein. Insofern hat Albert Einstein Recht. Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen und damit des Lichtes ist eine Konstante! Die weitere Frage, auf welche Weise die elektromagnetischen Wellen das Vakuum durchdringen können, ist ebenfalls leicht zu beantworten: Es gibt kein Vakuum! Es gibt nur ein Auseinanderrücken der Atome! Wissenschaftler wollen errechnet haben, dass zwischen den Planeten und Sternen immer noch ca. 200 Atome pro Kubikmeter existieren. Dazwischen existieren aber noch die geheimnisvollen Kräfte der Massenanziehung, also der Gravitation, die Zentrifugalkräfte, und auch die elektrischen und magnetischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte usw. Es gibt also keinen absolut luftleeren Raum und damit auch kein Vakuum!

Die Antennentechnik so zu betrachten, hat dem Verfasser sehr bei der Entwicklung von Antennen geholfen. Er kann verstehen, dass sich vorwiegend mathematisch orientierte Leser erst mit dieser Sichtweise anfreunden müssen. Sie ist sicher ungewöhnlich, aber sie ist in sich logisch und mit den sonstigen Gegebenheiten der Elektronik vereinbar. Auf die Besonderheiten verschiedener Antennensysteme und die damit verbundenen Entfernungs- und Gewinnüberlegungen usw. sollte bei diesem Beitrag bewusst nicht eingegangen werden. Genau so wenig auf die heute so beliebten Simulations-Programme. Zu diesen Programmen hat der Verfasser allerdings ein gespaltenes Verhältnis. Zum einen, weil überlieferte historische Fehler immer noch vorhanden sind (s. o.) und daher weitere nicht auszuschließen sind. Weiterhin können die Programme die verschiedenen Umweltbbedingungen, den erheblichen Verlustbeitrag der Wickelkapazität und den Proximity-Effekt bei Antennenverlängerungsspulen von Mobilantennen nicht berücksichtigen, usw. Es kommt hinzu, dass man die Ergebnisse nur selten auf Richtigkeit überprüfen kann. Damit soll aber nicht festgestellt werden, dass man die Simulationen überhaupt nicht mehr verwenden kann.

Zum Verschiebungsstrom, Quelle [4]

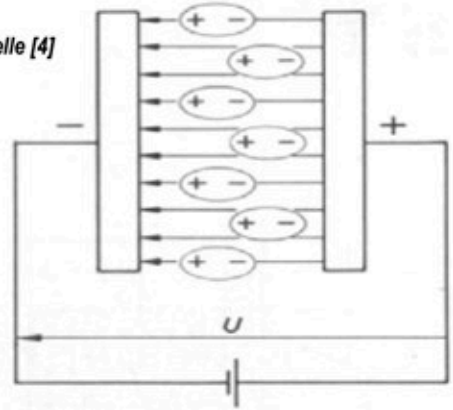

Abb. 6.2.

Dieser Vorgang wird als *dielektrische Polarisation* bezeichnet.
Wird die angelegte Spannung *U* umgepolt, wechseln auch die Molekulardipole ihre Richtung.

6.1.3. Verluste im Dielektrikum

Liegt eine Spannung mit stetig wechselnder Polarität (Wechselspannung) an den Platten, erfolgt der Richtungswechsel der Molekulardipole in jeder Periode dieser Wechselspannung zweimal. Ein bei dieser Ladungsträgerverschiebung entstehender Strom wird *Verschiebungsstrom* genannt. Je größer die Frequenz der angelegten Spannung ist, um so größer ist der Verschiebungsstrom. Ein kleiner Teil der zur Verschiebung der Molekulardipole erforderlichen elektrischen Arbeit wird in Wärme umgewandelt. Diese Wärme ist gewissermaßen verloren *(Verlustwärme)* und muß aus dem Dielektrikum abgeführt werden[2]).

Dass es über die Betrachtungsweise des Verfassers hinaus, aber in der Tat noch weitere, ergänzende Aspekte in Bezug zur Antennentechnik gibt, steht außer Frage.

Einige wichtige mathematische Beziehungen im Zusammenhang mit Antennen, kann der geneigte Leser u. a. in [2] und [3] nachlesen.

Arno Weidemann, DL9AH, Radio- und Fernsehtechnikermeister, Blücherstr. 69, 44866 Bochum,
Tel./Fax: 02327/10454

Quellen:

[1] Arno Weidemann: „QRV mit der Gelsenkirchener Mobilantenne“, CQ-DL 5/2004, Seite 350 ff.
[2] Arno Weidemann: „Die Theorie der Gelsenkirchener MobilantenAntenne“, CQ-DL 6/2004, Seite 418 ff.
[3] Arno Weidemann: „Der Wirkungsgrad von Antennen“, CQ-DL 1/2006.
[4] Zum Verschiebestrom: „Grundlagen der Elektronik“, Auflage: 1973, S. 90, Verlag H. Stamm GmbH, Köln