

6 Dezibel-Anwendung bei der Funkwellen-Ausbreitung

6.1 Die Leistungsflussdichte

Bei Funkstrecken zwischen der Erde und einem Satelliten, egal ob Fernmelde-, Rundfunk- oder Amateurfunksatellit (Bild 57), oder beim von manchen Funkamateuren gepflegten Erde-Mond-Erde-Betrieb (Bild 58) breitet sich das Funksignal frei im Raum aus. Wenn wir uns die Ausbreitung des Signals etwa von einer Parabolantenne gewissermaßen in Zeitlupe vorstellen, so erkennen wir, dass es eine quadratisch mit dem Abstand zum Sender wachsende „Frontfläche“ erfasst. Dies bedeutet ein Ausdünnen der Energie pro Flächeneinheit, denn der Energiezufluss vom Sender bleibt ja konstant.

Obwohl das Vakuum und somit praktisch auch das Weltall über der die Erde umgebenden Ionosphäre ein Funksignal nicht dämpft, so wird es doch mit zunehmender Entfernung immer schwächer. Daher gibt es die identischen Begriffe

- Ausbreitungsdämpfung
- Freiraumdämpfung und
- Freiraum-Ausbreitungsdämpfung.

Die flächenbezogene Leistung wird als Leistungsflussdichte LFD (bzw. power flux density, PFD) oder auch als Strahlungsdichte bezeichnet. Die Grundeinheit ist W/m^2 .

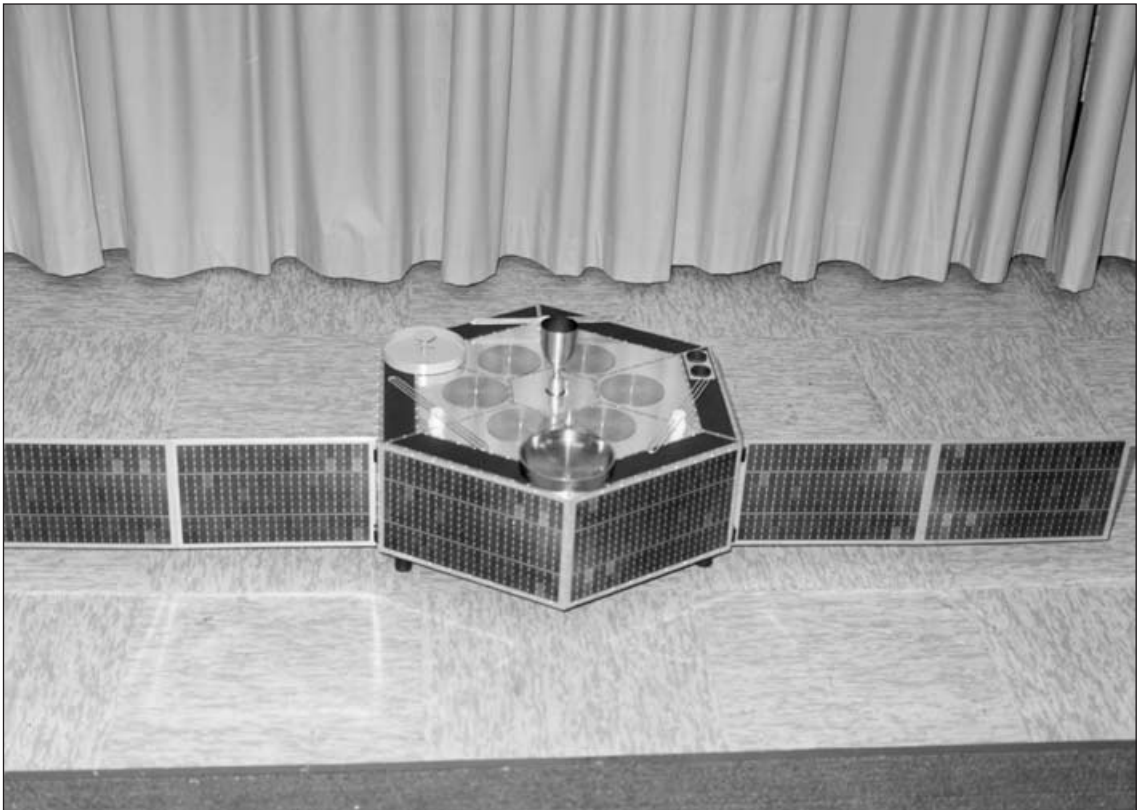
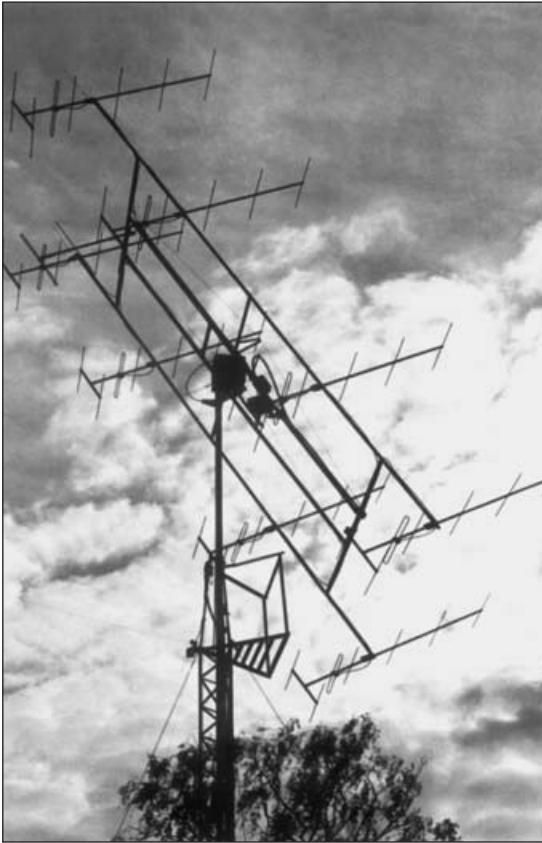


Bild 57: Modell des Amateurfunksatelliten OSCAR 40



In der Praxis arbeitet man fast nur mit einem Pegel in $\text{dB}(\text{W}/\text{m}^2)$, also bezogen auf $1 \text{ W}/\text{m}^2$. Eine eventuelle Umrechnung bedeutet daher keine Schwierigkeit (Bild 59). Natürlich überwiegen dabei in der Praxis negative Dezibel-Angaben.

6.2 Der Richtfaktor

Als Richtfaktor bezeichnet man den Gewinn einer als verlustfrei angenommenen Antenne gegenüber dem Kugelstrahler, ausgedrückt als pure Zahl (eben als Faktor). Dies deshalb, weil es hier ausnahmsweise zum Rechnen meist günstiger ist. Einige wichtige Richtfaktoren:

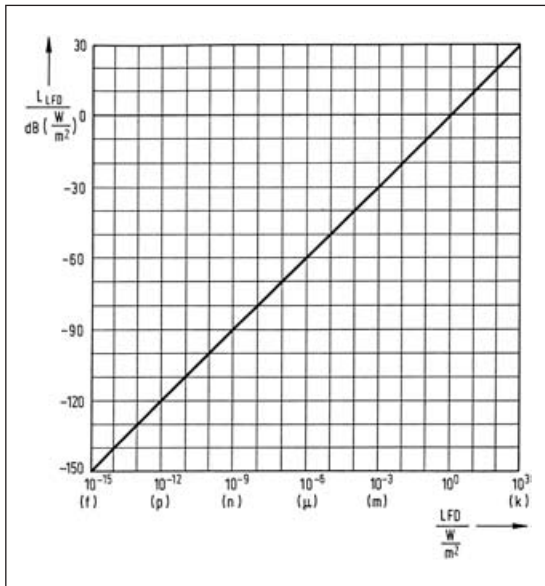
Kugelstrahler	1
sehr kurzer Dipol	1,5
Hertzscher Dipol (Elementardipol)	1,5
Halbwellendipol	1,64
Ganzwellendipol	2,41
sehr kurze Vertikalantenne	3
Viertelwellen-Vertikalantenne	3,28

Man beachte die doppelten Werte der Vertikalantennen gegenüber den Dipolen! Die kürzeren Antennen versprechen also mehr Gewinn!

In Gewinnangaben sind hingegen die Verluste einer Antenne berücksichtigt.

Merke:
Den Gewinn, der sich ohne Verluste (Antennenwirkungsgrad = 1) im Vergleich zum Kugelstrahler ergeben würde, bezeichnet man als Richtfaktor. Er wird in der Regel nicht in dB angegeben, weil das seine Anwendung oft erleichtert.

Bild 58: Die EME-Antennenanlage von DL2RSX für 2 m hat 21 dBi Gewinn.



6.3 Die Wirkfläche

Die absolute Leistung, welche eine Empfangsantenne einem elektromagnetischen Feld entnehmen kann, wird von der hypothetischen Wirkfläche bestimmt. Wichtig zu wissen: Der Gewinn allein reicht zur Bestimmung dieser absoluten Empfangsleistung nicht aus!

Bild 59: LFD-Pegel und LFD absolut [2]

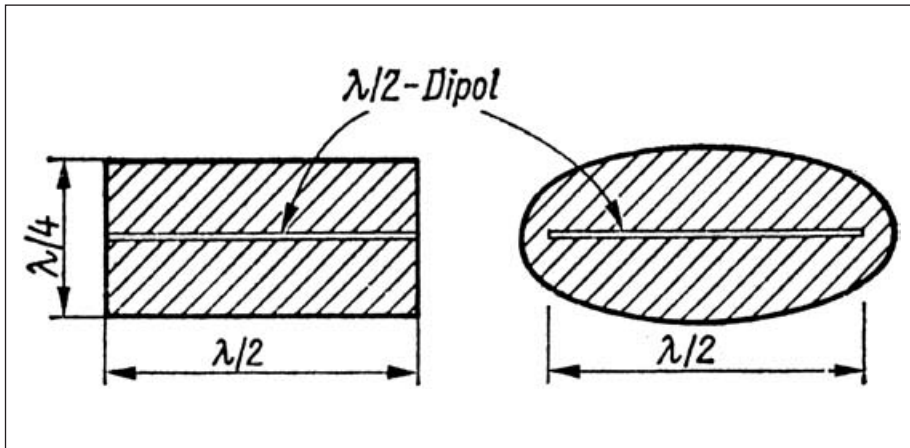


Bild 60: Zum Verständnis der Wirkfläche [4]

Man stellt sich unter der Wirkfläche eine senkrecht zur Einfallrichtung der Funkwellen liegende Fläche vor, welche die gleiche Leistung umfasst, die dem Feld von der Antenne bei Leistungsanpassung und Verlustfreiheit entzogen werden würde. Darum spricht man auch von Absorptionsfläche.

Die Wirk- oder Absorptionsfläche ist das Produkt aus quadrierter Wellenlänge mal Richtfaktor, geteilt durch 12,6. Sie allein bestimmt daher zusammen mit dem Antennenwirkungsgrad die Empfangsleistung, welche bekanntlich bei Leistungsanpassung maximal wird. Bild 60 erleichtert das Verständnis der Wirkfläche.

Merke:

Die Wirkfläche steigt mit dem Quadrat der Wellenlänge.

Aufgabe 86

Errechne die Wirkfläche eines Halbwelldipols für die Wellenlänge 80 m!

Lösung: $80 \text{ m} \times 80 \text{ m} \times 1,64/12,6 = 6400 \text{ m}^2 \times 0,13 = 833 \text{ m}^2$

Aufgabe 87

Errechne die Wirkfläche eines Halbwelldipols für die Wellenlänge 10 m!

Lösung: $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1,64/12,6 = 100 \text{ m}^2 \times 0,13 = 13 \text{ m}^2$

Der Unterschied ist gewaltig.

Aufgabe 88

Schätze die Wirkfläche der Antennenanlage in Bild 58 (Wellenlänge 2 m, Gewinn 21 dBi)!

Lösung: 21 dBi bedeutet rund 126 Richtfaktor, wir wollen wegen der Verluste für den Richtfaktor 170 annehmen und rechnen $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 170/12,6 = 4 \text{ m}^2 \times 7,2 = 54 \text{ m}^2$

Man kann neben dieser idealen Wirkfläche auch eine reale Wirkfläche errechnen, indem man statt des Richtfaktors gleich den Gewinn nimmt:

Aufgabe 89

Berechne die unübliche reale Wirkfläche der Antennenanlage in Bild 58 (Wellenlänge 2 m, Gewinn 21 dBi)!

Lösung: 21 dBi bedeutet rund 126, wir rechnen $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 126/12,6 = 4 \text{ m}^2 \times 10 = 40 \text{ m}^2$

Merke:

Der Gewinn allein sagt noch nichts über die absolute Empfangsleistung aus.

Merke:

Die absolute Empfangsleistung ergibt sich neben der Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte lediglich aus Wirkfläche und Wirkungsgrad.

Wichtig für die Praxis: Während sich der Gewinn einer Antenne tendenziell mit der Betriebsfrequenz

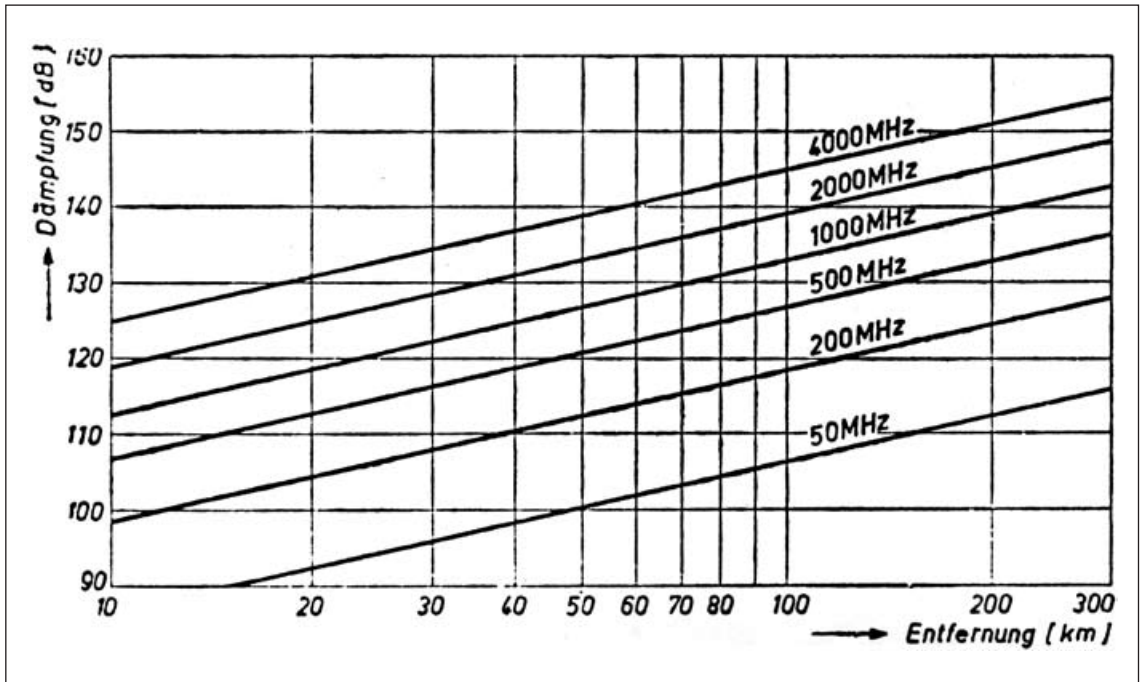


Bild 61: Verlauf der Ausbreitungsdämpfung über der Entfernung für sechs Signale

steigern lässt – man vergleiche Kurzwellenantennen mit Mikrowellenantennen –, gibt es in Form der quadrierten Betriebswellenlänge einen starken entgegengesetzten Einfluss in der Wirkflächenformel. Praktisch kommt es zu einer gewissen Kompensation: Mit steigender Frequenz gleicht ein steigender Richtfaktor das fallende Quadrat der Wellenlänge aus.

6.4 Die Ausbreitungsdämpfung

Betrachten wir nun Bild 61! Es ermöglicht die Bestimmung der Ausbreitungsdämpfung im freien Raum für sechs Frequenzen und Entfernungen bis 300 km. Wie wir sehen, nimmt diese – im Gegensatz zur Leistungsflussdichte, welche frequenzunabhängig ist – mit der Frequenz ab. Die Ursache ist uns bekannt: Es ist die quadratische Abhängigkeit der Wirkfläche auch unserer hypothetischen Isotropantenne, die hier als Bezugsantenne zugrunde liegt.

Das Diagramm beschreibt nicht die Dämpfung der Strecke allein, sondern den Wirkungsgrad des gesamten Systems Sendeantenne – Strecke

– Empfangsantenne. Dieser kann lediglich über den Antennengewinn verbessert werden. Je höher der Gewinn, umso mehr Energie wird auf den direkten Pfad zwischen den Antennen konzentriert, statt nutzlos im Raum „zerstreut“.

Die Bilder 62 und 63 liefern weitere grafische Informationen für relativ geringe Entfernungen. Der Unterschied liegt darin, dass bei Bild 62 wieder der Kugelstrahler, bei Bild 63 aber eine weitere Bezugsantenne, nämlich der Elementardipol oder Hertzsche Dipol zugrunde liegt. Diese hypothetische verlustlose Antenne zeichnet sich durch eine gleichförmige Stromverteilung und 1,76 dBi Gewinn aus, ist also bezüglich Gewinn zwischen Kugelstrahler und Halbwellendipol angesiedelt.

Aufgabe 90
 Wie groß ist die Ausbreitungsdämpfung bei Verwendung isotroper Strahler bei 150 MHz und 100 km Entfernung?
Lösung: Die Gerade zwischen 100 km und 150 MHz in Bild 62 schneidet die Dämpfungsachse bei 116 dB.

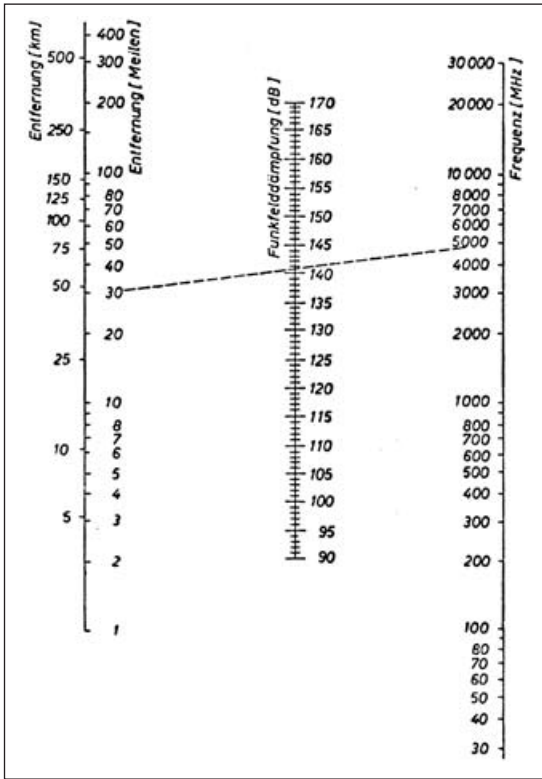


Bild 62: Diagramm zur Ermittlung der Ausbreitungsdämpfung auf Basis von isotropen Antennen. Als Beispiel wurde die Dämpfung bei 5 GHz für 30 Meilen Entfernung mit rund 141 dB ermittelt.

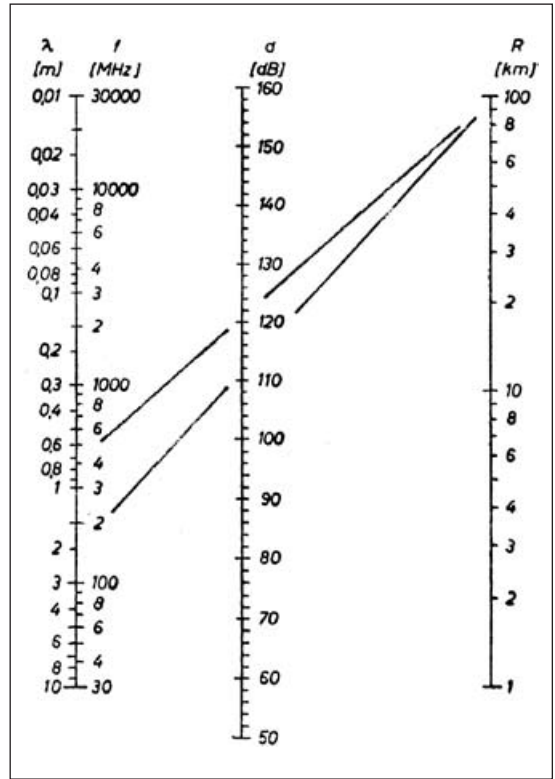


Bild 63: Diagramm zur Ermittlung der Ausbreitungsdämpfung auf Basis von Elementardipolen. Als Beispiele wurden die Dämpfungen bei 150 und 450 MHz für 100 km Entfernung mit rund 112 und 122 dB ermittelt.

Aufgabe 91

Wie groß ist die Ausbreitungsdämpfung bei Verwendung isotroper Strahler bei 450 MHz und 100 km Entfernung?

Lösung: Die Gerade zwischen 100 km und 450 MHz in Bild 62 schneidet die Dämpfungsachse bei 126 dB.

Aufgabe 92

Begründe die Abweichung der Ergebnisse gegenüber den in Bild 61 eingezeichneten identischen Fällen!

Lösung: Die Ausbreitungsdämpfung mit isotropen Antennen ist gegenüber Elementardipolen frequenzunabhängig um den Gewinn von Sende- und Empfangsantenne, also etwa 4 dB (exakt $2 \times 1,76 \text{ dB} = 3,52 \text{ dB}$) größer.

Unsere Diagramme enden zwar bei (einigen) 100 km. Für größere Entfernungen können wir die Dämpfungen nicht wie bei HF-Leitungen proportional erhöhen, sondern sollten rechnen:

$$a = 32,4 + 20 \log f + 20 \log R$$

a ... Ausbreitungsdämpfung mit isotropen Antennen in dB

f ... Frequenz in MHz

R ... Entfernung in km

Aufgabe 93

Errechne die Ausbreitungsdämpfung mit Kugelstrahlern bei 450 MHz über 100 km Entfernung!

Lösung: a in dB = $32,4 + 20 \log 450 + 20 \log 100 = 32 + 53,1 + 40 = 125,5$

Die Abweichung gegenüber unserer Diagrammablesung (Aufgabe 91) beträgt nur 0,5 dB und ist der Unsicherheit bei der grafischen Methode zuzuschreiben.

Aufgabe 94

Errechne die Ausbreitungsdämpfung mit Kugelstrahlern bei 450 MHz über 1000 km Entfernung!

Lösung: a in dB = $32,4 + 20 \log 450 + 20 \log 1000 = 32,4 + 53,1 + 60 = 145,5$

Die Verzehnfachung der Entfernung hat zu 20 dB Dämpfungszunahme geführt. Das gilt immer.

Aufgabe 95

Errechne die Ausbreitungsdämpfung mit Kugelstrahlern bei 450 MHz über 10.000 km Entfernung!

Lösung: a in dB = $32,4 + 20 \log 450 + 20 \log 10.000 = 32,4 + 53,1 + 80 = 165$

Die Verhundertfachung der Entfernung bedeutet 40 dB Dämpfungszunahme. Auch das gilt natürlich immer.

Aufgabe 96

Errechne die Ausbreitungsdämpfung mit Kugelstrahlern bei 12 GHz über 36.000 km Entfernung (geostationärer Rundfunksatellit)!

Lösung: a in dB = $32,4 + 20 \log 12.000 + 20 \log 36.000 = 32,4 + 82 + 91 = 205,4$

6.5 Die Streckendämpfung

Für die Praxis können die für Bezugsantennen errechneten Dämpfungswerte um die Gewinne der Antennen reduziert werden. Man könnte dann von Streckendämpfung sprechen.

Aufgabe 97

Errechne die Streckendämpfung im freien Raum bei 12 GHz über 36.000 km Entfernung mit 10 dBi Gewinn für die Sende- und 36 dBi Gewinn für die Empfangsantenne!

Lösung: a in dB = $32,4 + 20 \log 12.000 + 20 \log 36.000 - 10 - 36 = 32,4 + 82 + 91 - 10 - 36 = 159,4$

Weitere Einflüsse auf die Streckendämpfung liegen im Vorhandensein einer Atmosphäre/Ionosphäre um die Erde sowie nicht exakter Ausrichtung der Empfangsantenne (Polarisationsunterschiede oder Winkelabweichung). So verursacht beispielsweise Sprühregen bei 12 GHz etwa 0,25 dB/km Zusatzdämpfung.

Betrachtet man das Streckendämpfungs-Problem beim realen EME-Verkehr, so muss man natürlich die Dämpfung der Mondoberfläche einbeziehen sowie Hin- und Rückweg berücksichtigen. Die Dämpfung auf Hin- und Rückweg sowie durch Streuung und Absorption auf der Mondoberfläche beträgt im Perigäum (geringster Abstand des Mondes zur Erde) im 2-m-Band (144 MHz) beispielsweise typisch 252 dB. Diese „Niedrigdämpfungsphase“ im Perigäum dauert nur einige Tage. Im Apogäum arbeitet man unter bis zu 2 dB schlechteren Bedingungen.

EME-Betrieb läuft gut im 2-m-Band. Warum, wissen wir: Diese relativ niedrige Frequenz bedeutet eine große Wirkfläche.

Beeindruckend ist es, die EME-Strecke mit einer ebenso langen Richtfunkstrecke mit idealem Reflektor zu vergleichen. Diese ist nämlich um ca. 60 dB besser. Davon betreffen nur ca. 10 dB den Absorptionsverlust am Mond, die verbleibenden ca. 50 dB entstehen durch Streudämpfung und – vor allem – durch das Phasenlaufzeitgeschehen (QSB).

Machen wir mal eine typische EME-Rechnung auf: Gegeben seien 750 W Antenneneingangsleistung. Die Dämpfung der Übertragungsstrecke betrage, wie eben angeführt, 252 dB. Dann käme mit dem Isotropstrahler nur noch ein Hauch von Sendeleistung an, unheimlich tief im Rauschen vergraben und unauswertbar. Denn für 10 nV an 50 Ohm, mit denen gute Empfänger gerade noch etwas anfangen können, muss die Streckendämpfung unter Einbeziehung der Antennen rund 210 dB betragen.

Die Antennenanlagen der beiden EME-Partner müssen also gegenüber dem hier völlig untauglichen Kugelstrahler etwa 42 dB (252 dB - 210 dB) erwirtschaften. Das macht bei fairer Gleichver-

teilung etwa 21 dBi Gewinn pro Antennensystem.
Kennen wir diesen Wert nicht irgendwo her?

Übrigens: EME-Betrieb ist nicht etwa die Domäne eines elitären Mini-Zirkels unter den Funkamateuren. Etwa 500 Funkamateure weltweit sind „mondsüchtig“. Fast jeden Tag ist mindestens eine dieser Stationen zu hören.

EME-Fan wird man natürlich in erster Linie, um sich einer technischen Herausforderung zu stellen. Doch so schwierig diese Funkdisziplin zunächst auch erscheinen mag, bietet sie doch Vorteile gegenüber Betrieb auf anderen Verbindungswegen:

- EME-Funk ist unabhängig von den Vorgängen auf der Sonne, die den Kurzwellenfunk über etwa 10 MHz stark beeinflussen.
- Auch troposphärische Erscheinungen wirken sich nicht aus.
- Und schließlich sind Stationen in Tal-Lagen nicht benachteiligt.