



Formelblatt mit Erläuterungen

1. Kugelformel

Die Leistungsdichte S ist gegeben durch:

$$S = E \cdot H \quad (\text{I})$$

mit: S = Leistungsdichte [W/m²]
E = Effektivwert der elektrische Feldstärke [V/m]
H = Effektivwert der magnetische Feldstärke [A/m]

Die Beziehung zwischen E und H ist gegeben durch:

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad (\text{II})$$

mit: Z₀ = Feldwellenwiderstand des freien Raumes [Ω]
Z₀ = 120 · π = 377 Ω

Die Leistungsdichte S bei einer kugelförmig abgestrahlten Leistung P im Abstand r ist gegeben durch:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{III})$$

mit: P = Abgestrahlte Leistung [W]
A = Kugeloberfläche [m²]
r = Radius der Kugel [m]

Mit obigen 3 Formeln kann die Leistung ausgedrückt werden als:

$$P = S \cdot A = E \cdot H \cdot A = \frac{E^2}{Z_0} \cdot A = \frac{E^2}{120 \cdot \pi} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{E^2 \cdot r^2}{30} \quad (\text{IV})$$

Aufgelöst nach der Feldstärke ergibt sich:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{r} \quad (\text{V})$$

Da die Sendeantenne als isotroper (punktförmiger) Strahler angenommen wird, ist der Radius r der Kugeloberfläche gleich der Entfernung d von der Sendeantenne zu dem Ort, wo die Feldstärke angegeben werden soll.

2. Zusammenstellung der Formeln

Massgebend für die Einhaltung der Grenzwerte durch Amateurfunkstationen ist die mittlere (wärmewirksame) Feldstärke pro 6-Minuten-Intervall an Orten, an denen sich Drittpersonen aufhalten können (OKA). Diese Feldstärke errechnet sich aus der mittleren Leistung am Senderausgang, minus die Kabel- und sonstigen Verluste, dem Antennengewinn und der Distanz. Zusätzlich kann bei Bedarf noch das vertikale Strahlungsdiagramm einer Antenne und eine Dämpfung von Betondecken und Wänden berücksichtigt werden. Aus Sicherheitsgründen wird die errechnete Feldstärke mit einem Bodenreflexionsfaktor von 1.6 multipliziert.

Die Berechnungsmethoden stützen sich auf die Studie „Messung und Berechnung der Immissionen elektromagnetischer Felder bei Amateurfunkanlagen“ (Projekt EFAM) welche zusammen mit dem Buwal unter Mitwirkung der Swisscom erarbeitet wurde (CT830-4 vom 8.6.1998).

Bestimmung der mittleren Leistung am Senderausgang P_m

Die mittlere Leistung am Senderausgang eines Senders pro 6-Minuten-Intervall hängt ab von der Leistung am Senderausgang im Dauerbetrieb und dem modulations- und aktivitätsabhängigen Duty-Faktor.

$$P_m = k \cdot P = AF \cdot MF \cdot P \quad (1)$$

mit:

P_m = mittlere Leistung am Senderausgang in Watt

k = Duty-Faktor

P = Leistung am Senderausgang in Watt

AF = Aktivitätsfaktor

MF = Modulationsfaktor

Im Sinne einer Standardisierung wurde in Anlehnung an die amerikanische Praxis der Federal Communications Commission (FCC) pro 6-Minuten-Intervall von einer Sende- und Empfangszeit von je 3 Minuten (50%) ausgegangen; dies ergibt einen Aktivitätsfaktor von 0.5. Im weiteren wurde berücksichtigt, dass die mittlere Leistung am Senderausgang bei Einseitenbandmodulation (SSB) 20% ($MF=0.2$), bei Morsetelegrafie (CW) 40% ($MF=0.4$) und bei Frequenzmodulation (FM) oder Fernschreibverkehr (RTTY) 100% ($MF=1$) der maximalen Leistung beträgt. Die mittlere Leistung am Senderausgang für einen 100 Watt Sender liegt bei SSB bei 10 Watt, bei Morsetelegrafie bei 20 Watt und bei FM / RTTY bei 50 Watt.

Bestimmung der Verluste zwischen Senderausgang und Antenne

Die Kabelverluste errechnen sich aus der spezifischen Dämpfung (dB/m) multipliziert mit der Länge des oder der Kabel. Zu addieren sind die Dämpfungen der Stecker (0.1 dB pro Stecker) und der eingeschluften Geräte (Wattmeter, Schalter, Filter, Antennentuner) für die relevante Frequenz. Die Dämpfung berechnet sich wie folgt:

$$a = a_1 + a_2 \quad (2)$$

mit:

a = Summe der Dämpfungen in dB

a_1 = Kabeldämpfung in dB

a_2 = Übrige Dämpfung (Stecker etc.) in dB

Der Dämpfungsfaktor in absoluten Zahlen ausgedrückt errechnet sich aus der totalen Dämpfung in dB wie folgt:

$$A = 10^{\left(\frac{-a}{10}\right)} \quad (3)$$

mit:

A = Dämpfungsfaktor

Bestimmung des Antennengewinns

Massgebend für die Berechnung der äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) ist der Gewinn der Antenne in dB_i gegenüber einem Punktstrahler. Dieser Gewinn ist 2.15 dB höher als der Gewinn gegenüber einem Dipol (dB_d). Bei fehlenden Angaben des Herstellers wurde ein Gewinn von 2.15 dB_i für Halbwellendipole, Vertikalstrahler und magnetische Loops, von 6 dB_i für 2 Element Quads und von 6.5 dB_i für 3 Element Yagis eingesetzt. Diese Werte gelten für die Hauptabstrahlrichtung der Antenne. Bei stark bündelnden Antennen kann die vertikale Winkeldämpfung der Antenne berücksichtigt werden. Der Antennengewinn ergibt sich wie folgt:

$$g = g_1 - g_2 \quad (4)$$

mit:

g = Totaler Antennengewinn in dB

g₁ = Antennengewinn in dB_i

g₂ = Vertikale Winkeldämpfung in dB

Der Antennengewinnfaktor in absoluten Zahlen ausgedrückt errechnet sich aus dem Antennengewinn in dB wie folgt:

$$G = 10^{\left(\frac{g}{10}\right)} \quad (5)$$

mit:

G = Antennengewinnfaktor

Bestimmung der massgebenden Sendeleistung P_S

Aus der mittleren Leistung am Senderausgang P_m multipliziert mit dem Verlustfaktor A und dem Antennengewinnfaktor G ergibt sich die massgebende Sendeleistung (EIRP) in der Hauptabstrahlrichtung.

$$P_S = P_m \cdot A \cdot G \quad (6)$$

mit:

P_S = Massgebende Sendeleistung (EIRP) in Watt

In der NIS-Verordnung wird die massgebende Sendeleistung ausschliesslich als ERP auf den Dipol bezogen. Da der Dipol einen Antennengewinn von 2.15 dB – entsprechend einem Antennengewinnfaktor von 1.64 – gegenüber einem isotropen Strahler hat, ist die resultierende massgebende Sendeleistung (ERP) um diesen Faktor reduziert.

$$P'_S = \frac{P_S}{1.64} \quad (7)$$

mit:

P'_S = Massgebende Sendeleistung (ERP) in Watt

Bestimmung der massgebenden Feldstärke E' am OKA

Aus der massgebenden Sendeleistung kann mit der Fernfeldformel (Kugelformel) die mittlere Feldstärke E im Fernfeld in der Distanz d von der Antenne (am OKA = Ort für den kurzfristigen Aufenthalt) errechnet werden. Mit Ausnahme der Langdrahtantennen und der Drahtdipole für die unteren Kurzwellenbänder wurde der Einspeisepunkt der Antenne als Bezugspunkt für die Distanz gewählt. Bei Langdrahtantennen und bei Drahtdipolen wurde der dem OKA nächstgelegene Teil der Antenne als Bezugspunkt genommen. In gewissen Fällen kann die Gebäudedämpfung mitberücksichtigt werden, falls sich Menschen sinnvollerweise nur hinter der Mauer aufhalten können. Der Gebäudedämpfungsfaktor in absoluten Zahlen ausgedrückt errechnet sich aus der Gebäudedämpfung in dB wie folgt:

$$A_G = 10^{\left(\frac{-a_G}{10}\right)} \quad (8)$$

mit:

A_G = Gebäudedämpfungsfaktor

a_G = Gebäudedämpfung in dB

Die mittlere Feldstärke im Abstand d vom OKA zur Antenne ergibt sich nun nach der folgenden Formel:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P'_S \cdot A_G}}{d} \quad (9)$$

mit:

E = mittlere Feldstärke in Volt pro Meter

d = Abstand OKA zur Antenne in Meter

Messungen haben ergeben, dass die Feldstärke im Nahfeld gelegentlich etwas höher war als die errechnete. In Anlehnung an die amerikanische Praxis (FCC) wurde die Formel durch den Bodenreflexionsfaktor $k_r = 1.6$ modifiziert. Die gemessenen Werte lagen dann durchwegs unter den mit der modifizierten Formel errechneten (Ausnahme: magnetische Loops). Die massgebende Feldstärke E' am OKA ergibt sich nun zu:

$$E' = k_r \cdot E = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P'_S \cdot A_G}}{d} \quad (10)$$

mit:

E' = Massgebende Feldstärke am OKA in Volt pro Meter

k_r = Bodenreflexionsfaktor ($k_r = 1.6$)

Leistungsänderungen um den Faktor 10 erhöhen respektive verringern die Feldstärke um den Faktor $\sqrt{10}$, also 3.2. Auch die Feldstärke von einem Dauerträger (wie normalerweise gemessen wird) ist 3.2 mal grösser als die Feldstärke beim Funkbetrieb in SSB (mittlere Leistung 10%).

Bestimmung des Sicherheitsabstandes d_S

Der Sicherheitsabstand wird berechnet indem die Formel (10) nach d aufgelöst wird und für E' der Immissionsgrenzwert gemäss NISV für die entsprechende Frequenz eingesetzt wird.

$$d_S = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_S \cdot A_G}}{E_{IGW}} \quad (11)$$

mit:

d_S = Sicherheitsabstand in Meter

E_{IGW} = Immissionsgrenzwert für die Feldstärke gemäss NISV in Volt pro Meter

3. Berechnungsbeispiel für eine hypothetische Sendeanlage mit einer Frequenz von 7 MHz

Gegeben ist ein Sender mit 100 Watt Ausgangsleistung. Es wird in CW und SSB gesendet (Modulationsfaktor MF = 0,4 für CW). Zwischen Sender und Antenne sind 15 m Koaxialkabel RG213 und 3 m Koaxialkabel RG58 eingebaut. Ein Antennentuner und 4 Stecker bewirken eine weitere Dämpfung. Als Antenne wird eine Fritzel-Antenne FB34 verwendet. Die FB34 ist ein 3 Element, 4 Band Beam. Auf 7 MHz verhält sich die Antenne wie ein Dipol mit einem Gewinn von $g_1 = 2.15$ dB_i. Die Distanz d vom Einspeisepunkt der Antenne (Yagi) zur nächsten Grundstücksgrenze beträgt 12.5 m.

Mittlere Leistung am Senderausgang: $P_m = AF \cdot MF \cdot P = 0.5 \cdot 0.4 \cdot 100 = 20.0$ W

Dämpfung durch 15 m Kabel RG213 (mit einer Dämpfung von 1.4 dB pro 100 m bei 7 MHz) und 3 m Kabel RG58 (3.9 dB/100 m bei 7 MHz): $a_1 = 15 \cdot \frac{1.4}{100} + 3 \cdot \frac{3.9}{100} = 0.33$ dB

Dämpfung durch Antennentuner (0.2 dB) und 4 Stecker (0.4 dB): $a_2 = 0.6$ dB

Summe der Dämpfungen: $a = a_1 + a_2 = 0.33 + 0.6 = 0.93$ dB

Dämpfungsfaktor: $A = 10^{\left(\frac{-a}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{-0.93}{10}\right)} = 0.807$

Antennengewinn der Fritzel-Antenne FB34 bei 7 MHz: $g_1 = 2.15$ dB_i

Vertikale Winkeldämpfung: nicht berücksichtigt: $g_2 = 0$ dB

Totaler Antennengewinn: $g = g_1 - g_2 = 2.15 - 0 = 2.15$ dB

Antennengewinnfaktor: $G = 10^{\left(\frac{g}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{2.15}{10}\right)} = 1.641$

Massgebende Sendeleistung (EIRP): $P_s = P_m \cdot A \cdot G = 20 \cdot 0.807 \cdot 1.641 = 26.49$ W

Massgebende Sendeleistung (ERP): $P'_s = P_s / 1.64 = 16.15$ W

Gebäudedämpfung: nicht berücksichtigt: $a_G = 0$ dB

$$\text{Gebäudedämpfungsfaktor: } A_G = 10^{\left(\frac{-a_G}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{-0}{10}\right)} = 1.0$$

Die mittlere Feldstärke E bei einem Abstand OKA zur Antenne von 12.5 m beträgt:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{d} = \frac{\sqrt{30 \cdot 26.49 \cdot 1.0}}{12.5} = 2.26 \text{ V/m}$$

Die massgebende Feldstärke E' am OKA bei einem Abstand OKA zur Antenne von 12.5 m beträgt:

$$E' = k_r \cdot E = 1.6 \cdot 2.26 = 3.61 \text{ V/m}$$

Bei einem Immissionsgrenzwert (IGW) von 32.4 V/m (für die Frequenz 7 MHz) beträgt der Sicherheitsabstand:

$$d_s = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{E_{\text{IGW}}} = \frac{1.6 \cdot \sqrt{30 \cdot 26.49 \cdot 1.0}}{32.4} = 1.39 \text{ m}$$