# Das Dezibel – Definition und Anwendung*

Uwe Siart
tutorien@siart.de

13. Juni 2014 (Version 2.39)

**Zusammenfassung**

Der vorliegende Aufsatz möchte die Definition und die Anwendung der Quasi-Einheit »Dezibel« (dB) in verschiedenen Bereichen verdeutlichen. Dazu werden die Eigenschaften dieser Einheit anhand ihrer Anwendung in der Elektrotechnik aufgezeigt. Dies führt unmittelbar auf die Begründung der Pegelmaße dBµV, dBu und dBm. Anschließend folgt eine Erklärung der Bedeutungen des Abstandsmaßes dBc und des dBi in der Antennentechnik sowie der akustischen Lautstärkepegelmaße phon und dB(A) und der Angabe der Radarreflektivität in dBz. An mehreren Stellen wird zudem der Versuch unternommen, häufig wiedergegebene Fehlinterpretationen und Missverständnisse aufzuklären. Die neueste Version ist unter dem URL http://www.siart.de/lehre/dezibel.pdf erhältlich.

**Inhaltsverzeichnis**



*Die Abschnitte 1 bis 3.2 dieses Aufsatzes sind ein Auszug aus: Detlefsen, J.; Siart, U.: *Grundlagen der Hochfrequenztechnik*. 4. Auflage. München: Oldenbourg, 2012.

## 1 Einführung

In der Hochfrequenz- und Nachrichtentechnik hat sich zur Behandlung von Verstärkungen, Dämpfungen und Signalpegeln die Quasi-Einheit *Dezibel* (dB) als nützliches Hilfsmittel erwiesen. Die Grundidee ist hierbei, Verstärkungen (oder allgemein Verhältnisse von Leistungen oder Spannungen[1]) nicht direkt sondern logarithmiert anzugeben. Das Dezibel ist keine echte Einheit sondern vielmehr nur der Hinweis, dass der angegebene Zahlenwert der dekadische Logarithmus eines Verhältnisses ist. Das Dezibel kann aber dann zur echten Einheit werden, wenn ein Bezugswert fest vereinbart wird und eine physikalische Größe in Vielfachen dieses Bezugswertes angegeben wird. Wir kommen unten darauf zurück.

Die Einführung der Logarithmierung hat mehrere Vorteile. In Nachrichtensystemen bewegen sich die Signalpegel in der Regel über viele Größenordnungen. Durch die Logarithmierung werden diese weiten Schwankungsbereiche auf Zahlenwerte abgebildet, die wesentlich einfacher zu handhaben sind. Außerdem können allgemeine Nachrichtensysteme stets als Kettenanordnung mehrerer Teilsysteme verstanden werden. Dazu gehören schaltungstechnische Komponenten, also Verarbeitungs- und Verstärkerstufen, ebenso wie Leitungen und Funkstrecken. Beim Durchlaufen der einzelnen Stufen erfährt das Nachrichtensignal jeweils eine Änderung seiner Leistung. Bei der Berechnung der gesamten Leistungsänderung sind die Verstärkungen der an der Kette beteiligten Einzelstufen zu multiplizieren. Wegen der Eigenschaft

$$\log_n(x \cdot y) = \log_n x + \log_n y \tag{1}$$

des Logarithmus kann diese Multiplikation jedoch durch eine einfache Addition ersetzt werden, falls die Verstärkungen nicht direkt, sondern deren Logarithmen verwendet werden. Ebenso kann eine Division wegen

$$\log_n\left(\frac{1}{y}\right) = -\log_n y \tag{2}$$

durch eine Subtraktion ersetzt werden, sodass

$$\log_n\left(\frac{x}{y}\right) = \log_n x - \log_n y\ . \tag{3}$$

## 2 Definition

Zur Erläuterung der Vorgehensweise ist in Abb. 1 auf der nächsten Seite ein einzelner Vierpol als Mitglied einer Übertragungskette zusammen mit den Spannungen, Leistungen und Widerständen an seinen beiden Toren dargestellt. Wir setzen zur Vereinfachung voraus, dass an beiden Toren ausschließlich Wirkleistungsfluss vorliegt. Mit der Eingangsleistung $P_1$ und der Ausgangsleistung $P_2$ lassen sich dann die Größen

$$G = \frac{P_2}{P_1} \qquad \text{Gewinn} \tag{4a}$$

$$a = \frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{G} \qquad \text{Dämpfung} \tag{4b}$$

[1] Spannungsverhältnisse sind jedoch nur eingeschränkt als Maß für Verstärkungen geeignet (siehe dazu Anmerkung 1 auf Seite 4).

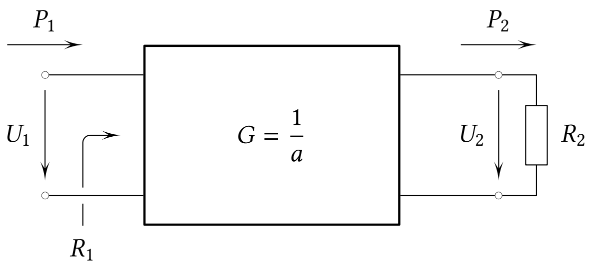



**Abb. 1:** Zur Definition von Gewinn $G$ und Dämpfung $a$

definieren. Wir wollen von Anbeginn deutlich die Begriffe *Gewinn* und *Dämpfung* unterscheiden. Mit Gewinn oder Verstärkung verbindet man allgemein die Vorstellung, dass $P_2 > P_1$ sei. Formal darf aber auch $G < 1$ sein. In diesem Fall spricht man jedoch häufiger von einer Dämpfung. Deshalb führen wir zusätzlich die Dämpfung $a = 1/G$ als den Kehrwert der Verstärkung ein.

Um nun einerseits große Pegelbereiche und andererseits die Kettenschaltung einfacher behandeln zu können, arbeitet man seltener mit den direkten Verhältnissen (4) sondern mit deren Zehnerlogarithmen und man definiert

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{G}{\mathrm{dB}} &= 10 \cdot \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \\ \frac{a}{\mathrm{dB}} &= 10 \cdot \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) = -\frac{G}{\mathrm{dB}}\,. \end{aligned}} \qquad \begin{aligned} (5a) \\ (5b) \end{aligned}$$

Um zu verdeutlichen, dass es sich um die logarithmierten Verhältnisse handelt, führt man den
dB Zusatz *Dezibel* (dB) ein[2]. Aus der Definition (5) wird jedoch sofort klar, dass es sich nicht um eine echte Dimension handelt.

Wir wollen nun voraussetzen, dass in einer gegebenen Kettenschaltung alle Tore angepasst sind, weil nur dann eine Multiplikation der Einzelverstärkungen und damit auch die im Folgenden besprochene Addition der korrespondierenden logarithmierten Werte zulässig ist. Liegt zusätzlich am Eingang und am Ausgang des betrachteten Systems das gleiche Impedanzniveau $R_2 = R_1$ vor, kann der Leistungsgewinn auch durch das Spannungsverhältnis berechnet werden und es ergibt sich

$$\frac{G}{\mathrm{dB}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{{U_2}^2/R_2}{{U_1}^2/R_1}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2_{R_1=R_2} = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_{R_1=R_2} . \tag{6}$$

Man beachte, dass bei Berechnung des Gewinns in dB aus dem Spannungsverhältnis $U_2/U_1$ vor dem Logarithmus der Faktor 20 entsteht, im Gegensatz zum Faktor 10 bei Berechnung aus dem Leistungsverhältnis $P_2/P_1$. Dieser Unterschied ergibt sich aus der Eigenschaft

$$\log_n(x^a) = a \cdot \log_n x \tag{7}$$

des Logarithmus und der Tatsache, dass die Leistung proportional zum Quadrat der Spannungsamplitude ist. Die Berechnung von $G$ aus $U_2/U_1$ oder aus $P_2/P_1$ führt also *nicht* zu unterschiedlichen dB-Werten. Es gibt daher auch keinen Grund zur Unterscheidung zwischen »Spannungs-

[2]Das Dezibel (der zehnte Teil eines Bel) ist benannt nach dem Physiologen Alexander Graham Bell (1847–1922), der 1876 ein elektromagnetisches Telefon erfand.

dB« und »Leistungs-dB«, wie häufig zu hören ist. Die Angabe von $G$ oder $a$ in Dezibel ist eindeutig. Sie bedarf wegen (6) keiner Zusatzangabe darüber, ob sie aus einem Spannungs- oder aus einem Leistungsverhältnis berechnet wurde. Ein Unterschied ergibt sich lediglich bei der Berechnung von Spannungsverstärkung $G_U = U_2/U_1$ und Leistungsverstärkung $G_P = P_2/P_1$ aus der Verstärkung in Dezibel. Wegen $G_P = G_U{}^2$ ergeben sich hier verschiedene Werte. Die Umkehrung von (6) lautet

$$G_U = \frac{U_2}{U_1} = 10^{G/20\,\mathrm{dB}} \qquad \text{Spannungsverstärkung} \tag{8a}$$

$$G_P = \frac{P_2}{P_1} = 10^{G/10\,\mathrm{dB}} \qquad \text{Leistungsverstärkung}\ . \tag{8b}$$

Für den praktischen Umgang mit logarithmischen Verstärkungen ist es nützlich, einige Werte auswendig zu kennen (Tabelle 1). Aus diesen lassen sich dann Zwischenwerte durch Multiplikation der linearen Werte und durch korrespondierende Addition der logarithmierten Werte ableiten.

**Anmerkung 1** Der häufig anzutreffende Irrtum, es sei zwischen »Spannungs-dB« und »Leistungs-dB« zu unterscheiden, rührt vermutlich unter anderem von der Unterscheidung zwischen Spannungsverstärkung und Leistungsverstärkung her. Wenn das Impedanzniveau unverändert ist, hängen Spannungsverstärkung und Leistungsverstärkung fest zusammen und führen auf den gleichen Wert in dB. In allen anderen Fällen ist zu bedenken, dass nur die Signal*leistung* als physikalische Erhaltungsgröße eine sinnvolle Grundlage für die Begriffe »Verstärkung« und »Dämpfung« darstellt, weil die Signalspannung unabhängig von der Signalleistung durch bloße Impedanztransformation angehoben oder abgesenkt werden kann. Betrachtet man nur die Signalspannung und lässt man das Impedanzniveau außer Acht, dann gelangt man beispielsweise zu der (offensichtlich trügerischen) Aussage, dass ein 1:10-Übertrager eine Spannungsverstärkung von 20 dB aufweist, obwohl er als rein reaktives Netzwerkelement die durchgehende Wirkleistung im idealen Fall nicht verändert und im realen Fall aufgrund seiner Verluste sogar verkleinert. Wenn also Spannungsverstärkung und Leistungsverstärkung zu unterschiedlichen dB-Werten führen, dann nur deshalb, weil sich außer der Signalleistung auch das Impedanzniveau verändert hat und in (6) der Faktor $R_1/R_2 \neq 1$ ist. In diesem Sinne ist der Begriff der Spannungsverstärkung eigentlich unnötiges Beiwerk, das nur dann sinnvoll gebraucht werden kann, wenn ein konstantes Impedanzniveau vorliegt.

**Beispiel 1** Gesucht wird der zur Leistungsverstärkung $G_P = 30$ gehörende Wert in dB. Es ist

$$G_P = 30 = 3 \cdot 10\ ,$$

also

$$\frac{G_P}{\mathrm{dB}} = 4{,}77 + 10 = 14{,}77\ .$$

**Tabelle 1:** Einige ausgewählte Verstärkungswerte in Dezibel. Aus ihnen können weitere Werte durch Multiplikation abgeleitet werden.

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $G_P$ | 1/1000 | 1/100 | 1/10 | 1/5 | 1/3 | 1/2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 100 | 1000 |
| $a_P$ | 1000 | 100 | 10 | 5 | 3 | 2 | 1 | 1/2 | 1/3 | 1/5 | 1/10 | 1/100 | 1/1000 |
| $G$ (in dB) | −30 | −20 | −10 | −7 | −4,77 | −3 | 0 | 3 | 4,77 | 7 | 10 | 20 | 30 |
| $a$ (in dB) | 30 | 20 | 10 | 7 | 4,77 | 3 | 0 | −3 | −4,77 | −7 | −10 | −20 | −30 |

**Beispiel 2** Welche Spannungsverstärkung $G_U$ hat ein Verstärker mit 20 dB Verstärkung?

Zur Beantwortung dieser Frage ist – entgegen einer weit verbreiteten Meinung – *keine* Zusatzangabe darüber notwendig, ob die Angabe »20 dB« von der Spannungsverstärkung $G_U$ oder von der Leistungsverstärkung $G_P$ abgeleitet ist. Vielmehr ist zu beachten, dass $G_U = \sqrt{G_P}$ (bei gleichem Impedanzniveau) ist. Mit etwas Übung identifiziert man sofort die Leistungsverstärkung zu $G_P = 100$ (wegen $10\,\lg(100) = 20$) und damit die Spannungsverstärkung zu $G_U = 10$. Es sei nocheinmal betont, dass beide Werte $G_U = 10$ und $G_P = 100$ über das Impedanzniveau fest zusammenhängen. Beide Werte ergeben bei Auswertung von (6) den gleichen Wert $G = 20\,\text{dB}$.

**Beispiel 3** In einem Sender mit 2700 W Ausgangsleistung wird ein Oberwellenfilter betrieben, welches im Durchlassbereich eine Einfügungsdämpfung von 0,45 dB aufweist. Wie hoch ist die Verlustleistung in diesem Filter?

Die Verstärkung $G$ dieses Filters beträgt −0,45 dB. Mit (8b) erhalten wir die Leistungsverstärkung

$$G_P = 10^{-0{,}45\,\text{dB}/10\,\text{dB}} = 0{,}9\ .$$

Das heißt, es werden 90 % der Eingangsleistung zum Ausgang übertragen, während die restlichen 10 % der Eingangsleistung die Verlustleistung bilden. Nachdem die Ausgangsleistung 2700 W beträgt, werden

$$\frac{2700\,\text{W}}{0{,}9} = 3000\,\text{W}$$

am Filtereingang aufgewendet. Die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsleistung ergibt die Verlustleistung in Höhe von

$$3000\,\text{W} \cdot (1 - 0{,}9) = 3000\,\text{W} - 2700\,\text{W} = 300\,\text{W}\ .$$

Neper

Gelegentlich findet sich in der Literatur noch eine Bezugnahme auf die heute als veraltet geltende Quasi-Einheit *Neper* (Np), daher soll hier kurz die Beziehung zwischen dem Neper und dem Dezibel dargelegt werden[3]. Das Neper ist ebenso wie das Dezibel keine echte Einheit sondern ein Verhältnismaß. Im Unterschied zum Dezibel nimmt das Neper jedoch explizit Bezug auf die Darstellung einer Dämpfung durch eine Exponentialfunktion in der Form

$$\frac{U_2}{U_1} = \mathrm{e}^{-a_\mathrm{B}}\ , \tag{9}$$

welche auf die Eigenschaften von sich auf Leitungen ausbreitenden Spannungs- oder Stromwellen zurückzuführen ist. Dabei bezeichnet man den Zahlenwert von $a_\mathrm{B}$ als die Betriebsdämpfung in Neper, also

$$\frac{a}{\text{Np}} = a_\mathrm{B} = -\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)\ . \tag{10}$$

Die entsprechende Angabe der Dämpfung $a$ in Dezibel erhält man gemäß (5) und (6) durch

$$\frac{a}{\text{dB}} = -20 \cdot \lg\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = -20 \cdot \lg\left(\mathrm{e}^{-a_\mathrm{B}}\right) = a_\mathrm{B} \cdot 20 \cdot \lg(\mathrm{e})\ . \tag{11}$$

Aus dem Vergleich von (10) und (11) folgt unmittelbar der Zusammenhang

$$\frac{a}{\text{dB}} = \frac{a}{\text{Np}} \cdot 20 \cdot \lg(\mathrm{e}) \approx \frac{a}{\text{Np}} \cdot 8{,}686 \tag{12}$$

und damit $1\,\text{Np} \approx 8{,}686\,\text{dB}$ oder $1\,\text{dB} \approx 0{,}115\,\text{Np}$.

[3] Das Neper ist benannt nach dem schottischen Mathematiker John Napier (1550–1617), der die Logarithmen eingeführt hat.

## 3 Anwendung

### 3.1 Pegelrechnung

Das Dezibel ist abgeleitet vom Verhältnis zweier Größen und ist daher ohne Dimension. Wenn jedoch eine feste Bezugsgröße vereinbart wird, können auf diese Weise auch dimensionsbehaftete Größen logarithmisch angegeben werden. Häufige Bezugswerte sind 1 µV für Spannungspegel und 1 mW für Leistungspegel. Die Bezugsgröße deutet man durch einen Zusatz an und

dBµV
dBm

verwendet die Einheit dBµV für Spannungen, bezogen auf 1 µV und die Einheit dBm für Leistungen, bezogen auf 1 mW. Im Gegensatz zum Dezibel handelt es sich bei dBµV und dBm um *echte* Einheiten in dem Sinne, dass sie einen absoluten Spannungswert beziehungsweise eine absolute Leistung bezeichnen[4]. Wir definieren also den Spannungspegel $L_U$ und den Leistungspegel $L_P$ wie folgt:

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{L_U}{\mathrm{dB\mu V}} &= 20 \cdot \lg\left(\frac{U}{U_0}\right) \qquad \text{mit} \qquad U_0 = 1\,\mu\mathrm{V} \qquad (13a) \\ \frac{L_P}{\mathrm{dBm}} &= 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) \qquad \text{mit} \qquad P_0 = 1\,\mathrm{mW} \qquad (13b) \end{aligned}}$$

Die unterschiedlichen Vorfaktoren 10 und 20 bewirken wieder, dass sich bei gegebener Verstärkung sowohl der Spannungspegel wie auch der Leistungspegel um den selben Wert ändern. Dadurch wird der Zusammenhang $P \sim U^2$ (bei festem Impedanzniveau) berücksichtigt. Zur Umrechnung der logarithmischen Pegel in die Spannung $U$ und in die Leistung $P$ sind (13a) und (13b) nach $U$ und $P$ aufzulösen. Es ergibt sich

$$\boxed{\begin{aligned} U &= 1\,\mu\mathrm{V} \cdot 10^{L_U/20\,\mathrm{dB\mu V}} \qquad (14a) \\ P &= 1\,\mathrm{mW} \cdot 10^{L_P/10\,\mathrm{dBm}}\,. \qquad (14b) \end{aligned}}$$

Ein Vorteil der Einführung von logarithmischen Pegeln ist die einfache Berechnung von absoluten Pegeln in Übertragungsketten. Dem Zahlenwert des Eingangspegels ist lediglich der Zahlenwert der Verstärkung (in dB) hinzuzuaddieren. Dabei ist es wegen der Definition (13) gleichgültig, ob mit Spannungs- oder Leistungspegeln gerechnet wird. Wir wollen dies am Beispiel des Spannungspegels zeigen.

Die Ausgangsspannung $U_2$ eines Vierpols ist mit der Spannungsverstärkung nach (8a) gegeben durch

$$U_2 = U_1 \cdot 10^{G/20\,\mathrm{dB}} = 1\,\mu\mathrm{V} \cdot 10^{L_{U1}/20\,\mathrm{dB\mu V}} \cdot 10^{G/20\,\mathrm{dB}}\,, \qquad (15)$$

wobei noch der Ausdruck (14a) zur Umrechnung des Eingangsspannungspegels $L_{U1}$ in die Eingangsspannung $U_1$ verwendet wurde. Die Anwendung von (13a) zur Berechnung des Ausgangs-

[4] Siehe dazu auch Anmerkung 3 auf Seite 9

spannungspegels $L_{U2}$ ergibt schließlich

$$\frac{L_{U2}}{\mathrm{dB\mu V}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{U_2}{1\,\mathrm{\mu V}}\right) = 20 \cdot \lg\left(10^{L_{U1}/20\,\mathrm{dB\mu V}} \cdot 10^{G/20\,\mathrm{dB}}\right)$$
$$= 20 \cdot \lg\left(10^{L_{U1}/20\,\mathrm{dB\mu V}}\right) + 20 \cdot \lg\left(10^{G/20\,\mathrm{dB}}\right) = \frac{L_{U1}}{\mathrm{dB\mu V}} + \frac{G}{\mathrm{dB}}\ , \quad (16)$$

womit die oben gemachte Behauptung bewiesen ist. Die Rechnung mit dem Leistungspegel ist äquivalent und wird hier nicht gesondert durchgeführt. Es ergeben sich die Zahlenwertgleichungen

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{L_{U2}}{\mathrm{dB\mu V}} &= \frac{L_{U1}}{\mathrm{dB\mu V}} + \frac{G}{\mathrm{dB}} \\ \frac{L_{P2}}{\mathrm{dBm}} &= \frac{L_{P1}}{\mathrm{dBm}} + \frac{G}{\mathrm{dB}} \end{aligned}} \qquad \begin{aligned} &(17a) \\ &(17b) \end{aligned}$$

zur Berechnung der Pegel am Ausgang einer Übertragungskette. Hier wird noch einmal deutlich, dass durch die Einführung des Dezibel die Pegelberechnung in Übertragungsketten auf einfache Additionen oder Subtraktionen zurückgeführt wird. Solange das Impedanzniveau gleich bleibt, erfahren die Zahlenwerte für $L_U$ und $L_P$ entlang einer Vierpolkette stets die gleichen Änderungen. Falls die Impedanz bekannt ist, kann zwischen Spannung und Leistung direkt umgerechnet werden. In der Praxis ist es daher üblich, in diesem Fall die Unterscheidung zwischen Spannungs- und Leistungspegel fallen zu lassen und statt dessen nur vom Signalpegel schlechthin zu sprechen. Eine häufige Bezugsimpedanz im Bereich häuslicher Rundfunkempfangsanlagen ist $Z_\mathrm{L} = 75\,\Omega$. Unter dieser Vorgabe kann mit $P = U_\mathrm{eff}^2/Z_\mathrm{L}$ die Entsprechung

$$1\,\mathrm{\mu V}\big|_{75\,\Omega} = 0\,\mathrm{dB\mu V}\big|_{75\,\Omega} \mathrel{\widehat{=}} -108{,}8\,\mathrm{dBm}$$

gefunden werden. Bei anderen Impedanzen ergeben sich entsprechend andere Umrechnungen. Weil sich – wie oben gezeigt – die Zahlenwerte von Spannungs- und Leistungspegel stets um den gleichen Wert ändern, genügt es, die (feste) Differenz zwischen beiden Werten nur einmal zu berechnen. Zweckmäßigerweise wählt man dabei einen der beiden Werte zu Null. In Abb. 5 auf Seite 22 ist der Zusammenhang zwischen Spannungs- und Leistungspegel für ausgewählte Impedanzniveaus in Form eines Nomogramms gezeigt. Dort wird auch grafisch deutlich, dass sowohl Spannungs- als auch Leistungspegelskalen der gleichen Längeneinheit folgen, dass eine Dekade auf der Leistungsskala einer Änderung um 10 dB und eine Dekade auf der Spannungsskala einer Änderung um 20 dB entsprechen und dass sich die Spannungspegelskalen für verschiedene Impedanzen nur durch die relative Verschiebung gegenüber der Leistungspegelskala unterscheiden.

**Beispiel 4** Wir haben oben bereits gefunden, dass bei 75 Ω dem Spannungspegel 0 dBµV (Effektivwert) ein Leistungspegel von −108,8 dBm entspricht. Daraus folgt nun der feste Zusammenhang

$$\frac{L_P}{\mathrm{dBm}} = \frac{L_U}{\mathrm{dB\mu V}} - 108{,}8\ ,$$

falls das Impedanzniveau 75 Ω beträgt. Beträgt der Spannungspegel auf einer 75-Ω-Leitung also beispielsweise 100 dBµV, so hat das Signal eine Leistung von (100 − 108,8) dBm = −8,8 dBm. Mit dieser Eigenschaft erweist sich das Dezibel auch bei der Berechnung von Rauschpegeln als besonders nützlich (siehe Abschnitt 3.2).

**Beispiel 5** Welchen Spannungspegel $L_U$ und welchen Leistungspegel $L_P$ liefert ein 75-Ω-Antennenverstärker, der eine Verstärkung von 17 dB hat, wenn er am Eingang einen Spannungspegel von 40 dBµV erhält?

Laut (17) werden durch den Verstärker sowohl Spannungs- als auch Leistungspegel um 17 dB erhöht. Zur Übung sei hier kurz der entsprechende lineare Verstärkungswert berechnet. Wenn man die Entsprechungen

$$G = 20\,\mathrm{dB} \quad \widehat{=} \quad G_P = 100$$
$$G = -3\,\mathrm{dB} \quad \widehat{=} \quad G_P = 0{,}5$$

kennt, so kann man wegen 17 dB = 20 dB − 3 dB sehr leicht auch die Entsprechung

$$G = 17\,\mathrm{dB} \quad \widehat{=} \quad G_P = 100 \cdot 0{,}5$$

finden. Der Verstärker hat also eine Leistungsverstärkung von $G_P = 50$ oder eben eine Spannungsverstärkung von $G_U = \sqrt{50}$. Mit Hilfe der logarithmischen Pegeleinheiten ergibt sich für den Ausgangsspannungspegel

$$L_U = (40 + 17)\,\mathrm{dB\mu V} = 57\,\mathrm{dB\mu V}\,,$$

was bei 75 Ω einem Leistungspegel von

$$L_P = (57 - 108{,}8)\,\mathrm{dBm} = -51{,}8\,\mathrm{dBm}$$

entspricht. Der zur Spannung 40 dBµV gehörende Eingangsleistungspegel ist um 17 dB kleiner als der Ausgangsleistungspegel und beträgt daher −68,8 dBm.

**Anmerkung 2** Im Zusammenhang mit der logarithmischen Angabe von Spannungs- und Leistungspegeln ist häufig die falsche Behauptung anzutreffen, sie seien auf eine bestimmte Impedanz bezogen. Richtig ist dagegen: Ein Spannungspegel $L_U$ (in dBµV) entspricht genau einer Spannung $U$ (in V) und ein Leistungspegel $L_P$ (in dBm) entspricht genau einer Leistung $P$ (in W). Die Impedanz $R$ ist dabei völlig unerheblich und legt als Proportionalitätsfaktor in $U_{\mathrm{eff}}^2 = P \cdot R$ nur die Zahlenwertdifferenz zwischen Spannungspegel und Leistungspegel fest. Ursache für diesen weit verbreiteten Irrtum ist möglicherweise die Tatsache, dass die Nennimpedanz in der Hochfrequenztechnik (aus anderen Gründen) als *Bezugsimpedanz* bezeichnet wird. Die Abhängigkeit von Dämpfung und Verstärkung von dieser Bezugsimpedanz hat ihren Grund jedoch *nicht* darin, dass diese Impedanz in irgendeiner Weise in die Definition von Spannungspegel und Leistungspegel eingeht. Vielmehr ist es so, dass die Spannungs- und Leistungsübertragungsfunktion eines Zweitores selbstverständlich von den Impedanzen abhängen, zwischen denen es betrieben wird. Daher hat ein Verstärker oder ein Dämpfungsglied nur dann seine Nennverstärkung oder -dämpfung, wenn Generator- und Lastimpedanz den dieser Spezifikation zugrundeliegenden Wert haben.

dBu Die in der Tontechnik verbreitete Einheit dBu bezeichnet ebenfalls einen Spannungspegel, jedoch mit dem Bezugswert $U_0 = 775\,\mathrm{mV}$. Dies ist der Effektivwert der Spannung, welcher an einem Widerstand von 600 Ω die Wirkleistung 1 mW umsetzt. Eine Konsequenz dieser Festlegung ist, dass der Spannungspegel in dBu und der Leistungspegel in dBm den gleichen Zahlenwert besitzen, wenn das Impedanzniveau 600 Ω beträgt. Die Werte 600 Ω und 1 mW begründen also lediglich die Wahl des Bezugswertes 775 mV. Ansonsten ist die Angabe der Spannung in der Einheit dBu ebenso unabhängig vom Impedanzniveau 600 Ω und von der Leistung 1 mW wie die Angabe in der Einheit Volt und sie kann ebenso wie die Einheit dBµV zur Angabe von Spannungspegeln verwendet werden.

### 3.2 Rauschpegel

Die Thermodynamik lehrt, dass durch die thermische Bewegung der Ladungsträger in Leitern oder Halbleitern an den Klemmen des Bauelements eine Rauschleistung von

$$N = k \cdot T \cdot \Delta f \tag{18}$$

verfügbar ist. Dabei ist $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$ die Boltzmann-Konstante, $T$ die Temperatur in Kelvin und $\Delta f$ die Rauschbandbreite. Weil die Raumtemperatur $T = 300\,\mathrm{K}$ sehr häufig als

Rauschtemperatur auftritt, ist es sinnvoll, die Rauschleistung bei dieser Temperatur und $\Delta f = 1\,\mathrm{Hz}$ zu kennen. Dabei ergibt sich

$$10 \cdot \lg\left(\frac{1{,}38 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J/K} \cdot 300\,\mathrm{K} \cdot 1\,\mathrm{Hz}}{1\,\mathrm{mW}}\right)\,\mathrm{dBm} = -173{,}83\,\mathrm{dBm} \approx -174\,\mathrm{dBm}\ .$$

Es lohnt sich, diesen Zahlenwert zu kennen, weil damit sehr schnell die Rauschleistung bei Raumtemperatur auch für andere Bandbreiten bestimmt werden kann. Nachdem die Bandbreite $\Delta f$ in (18) als Faktor auftritt, kann die Erhöhung der Bandbreite wie eine Verstärkung behandelt werden, sodass zum Zahlenwert −174 lediglich der Wert von

$$10 \cdot \lg\left(\frac{\Delta f}{\mathrm{Hz}}\right)$$

hinzuzuaddieren ist.

**Beispiel 6** Die verfügbare thermische Rauschleistung eines ohmschen Widerstandes auf Raumtemperatur ($T = 300\,\mathrm{K}$) bei einer Rauschbandbreite von 10 MHz ist

$$L_N = (-174 + 70)\,\mathrm{dBm} = -104\,\mathrm{dBm}\ ,$$

weil

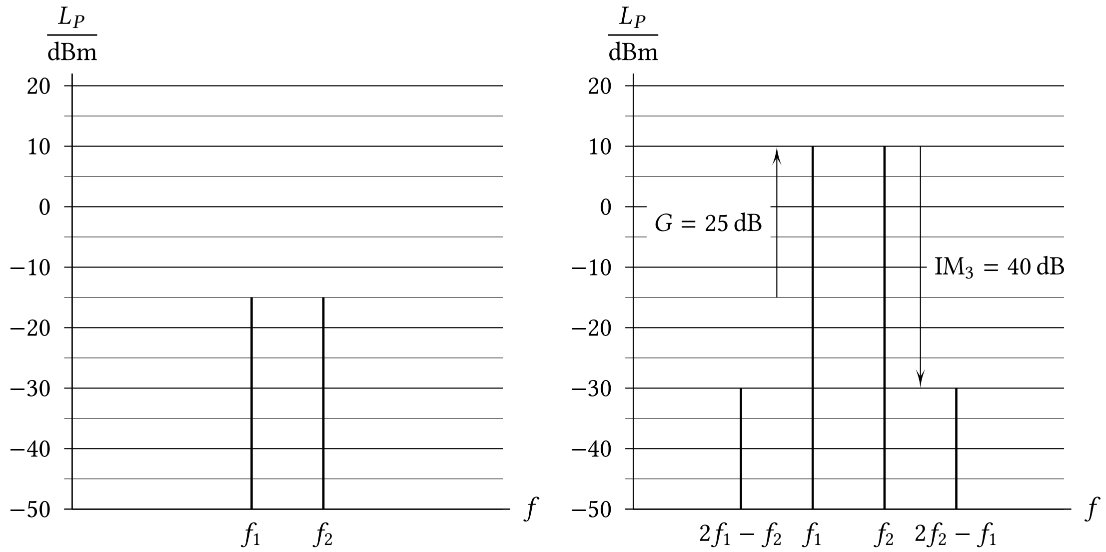
$$10 \cdot \lg\left(\frac{10\,\mathrm{MHz}}{1\,\mathrm{Hz}}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{1 \cdot 10^7\,\mathrm{Hz}}{1\,\mathrm{Hz}}\right) = 70\ .$$

Die Erhöhung der Rauschbandbreite von 1 Hz auf 10 MHz hebt also den Rauschleistungspegel −174 dBm entsprechend dem Faktor $10^7$ um 70 dB an.

**Anmerkung 3** Beispiel 6 zeigt, dass die Bezeichnung »echte Einheit« bei Pegelgrößen ein wenig relativiert werden muss, da die logarithmischen Pegelgrößen zwar (einer Einheit gleich) den Absolutwert einer physikalischen Größe angeben, wegen der Logarithmierung aber nicht wie mit linearen Einheiten gerechnet werden kann. Beispielsweise ist die Angabe einer spektralen Leistungsdichte in der Einheit dBm/Hz zwar allgemein üblich, jedoch bei strenger Betrachtung mathematisch unsinnig, denn der Zahlenwert dieser Größe ist nicht proportional zur Bandbreite in Hz, so wie es die Schreibweise »dBm pro Hertz« der Einheit vorgibt. So folgt aus der Angabe »−40 dBm/Hz« eben nicht, dass sich in einer Bandbreite von 5 Hz die Leistung −200 dBm befindet ($-40\,\mathrm{dBm/Hz} \neq -200\,\mathrm{dBm}/5\,\mathrm{Hz}$). Vielmehr muss dem Zahlenwert −40 der dem Faktor 5 entsprechende Zahlenwert von $10\lg(5) = 7$ hinzuaddiert werden, sodass bei einer spektralen Leistungsdichte von −40 dBm/Hz mit einer Bandbreite von 5 Hz eine Leistung von $(-40 + 7)\,\mathrm{dBm} = -33\,\mathrm{dBm}$ erfasst wird.

### 3.3 Leistung relativ zum Träger

Bei Signalanteilen, deren Leistungspegel in einem direkten Zusammenhang mit dem Pegel eines Nutzsignales steht (in der Regel der Träger oder ein Testsignal), wird der Pegel häufig in Bezug auf diesen Nutzsignalpegel angegeben. Dieses wird gekennzeichnet durch die Einheit
dBc dBc. Der Zusatz »c« steht dabei für »carrier«, die englische Bezeichnung für »Träger«. Ein Beispiel, bei dem ein solcher relativer Bezug üblich ist, ist in Abb. 2 dargestellt. Abbildung 2a zeigt das Eingangssignalspektrum eines Verstärkers bei Anregung mit zwei Frequenzanteilen gleicher Leistung. Beide Anteile treten am Ausgang mit höherer Leistung wieder auf. Zusätzlich entstehen durch die Nichtlinearität des Verstärkers zwei Intermodulationsprodukte 3. Ordnung, welche in unmittelbarer Nähe der beiden Eingangsfrequenzen liegen (Abb. 2b). Da deren Leistungspegel vom Pegel der beiden Nutzanteile abhängt, wird er mit Bezug auf die Nutzanteile




**(a)** Eingangssignalspektrum

**(b)** Ausgangssignalspektrum

**Abb. 2:** Beispiel für das Eingangssignalspektrum und das resultierende Ausgangssignalspektrum eines Verstärkers zur Bestimmung des Intermodulationsabstandes in dBc. Es findet eine Anregung mit zwei Frequenzanteilen gleicher Leistung statt. Durch die Nichtlinearität entstehen zwei Intermodulationsprodukte 3. Ordnung, welche ebenfalls identische Leistung haben. Deren Pegel wird mit Bezug auf die Nutzsignalleistung spezifiziert.

spezifiziert. Im Beispiel von Abb. 2 hat der Verstärker einen Gewinn von 25 dB, da er den Pegel der beiden Nutzanteile um diesen Wert anhebt. Ferner ist der Leistungspegel der Intermodulationsprodukte am Ausgang um 40 dB niedriger als der Pegel der verstärkten Eingangssignale. Man sagt daher, der Intermodulationsabstand 3. Ordnung ($\text{IM}_3$) betrage 40 dB oder der Pegel der Intermodulationsprodukte sei −40 dBc.

### 3.4 Das Dezibel in der Antennentechnik

Weil die in die Klemmen einer Antenne eingespeiste Sendeleistung $P_\text{S}$ grundsätzlich nicht genau gleichmäßig in alle Richtungen (isotrop) abgestrahlt werden kann, erzeugt eine reale Antenne im Allgemeinen in mindestens einer Abstrahlrichtung eine höhere Strahlungsleistungsdichte als ein (fiktiver) isotroper Strahler. Würde die Sendeleistung $P_\text{S}$ isotrop abgestrahlt und im Abstand $r$ gleichmäßig auf eine Kugel mit der Oberfläche $4\pi r^2$ verteilt, dann ergäbe sich im Fernfeld bei einem Abstand $r$ von der Antenne die richtungsunabhängige Strahlungsleistungsdichte

$$S_{*,\text{i}}(r) = \frac{P_\text{S}}{4\pi r^2} \,. \tag{19}$$

Der *Gewinn* einer Antenne in Richtung $(\vartheta, \varphi)$ ist der Faktor, um den sich die tatsächlich erzeugte Strahlungsleistungsdichte $S_*(r, \vartheta, \varphi)$ von der Strahlungsleistungsdichte $S_{*,\text{i}}(r)$ unterscheidet, die im gleichen Abstand bei isotroper Abstrahlung der gleichen Sendeleistung entstehen würde, also

$$G(\vartheta,\varphi) = \left.\frac{S_*(r,\vartheta,\varphi)}{S_{*,\mathrm{i}}(r)}\right|_{r=\mathrm{const}} \quad . \tag{20}$$

dBi

Der Gewinn wird in der Regel mit diesem Bezug auf den isotropen Strahler und logarithmisch in der Quasi-Einheit dBi angegeben, wodurch auf die Logarithmierung und die isotrope Abstrahlung als Vergleichsgröße hingewiesen wird (engl.: decibels above isotropic). Es ist also

$$\boxed{\frac{G(\vartheta,\varphi)}{\mathrm{dBi}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{S_*(r,\vartheta,\varphi)}{S_{*,\mathrm{i}}(r)}\right)_{r=\mathrm{const}} \quad .} \tag{21}$$

EIRP

Mit Hilfe des Reziprozitätstheorems der Elektrodynamik kann gezeigt werden, dass die Wirkfläche einer Antenne im Empfangsbetrieb ebenfalls um den Faktor $G$ größer ist als die Wirkfläche $\lambda_0^2/(4\pi)$ eines isotropen Strahlers [1, 2]. Die um den Faktor $G$ erhöhte Sendeleistung $P_\mathrm{S}$ bezeichnet man als *effektiv isotrop abgestrahlte Leistung* (engl.: effective/equivalent isotropic radiated power, EIRP), denn diese Leistung müsste isotrop abgestrahlt werden, um im Fernfeld die gleiche Strahlungsleistungsdichte zu erhalten, wie bei Abstrahlung der Leistung $P_\mathrm{S}$ mit dem Antennengewinn $G$. Daher berechnet sich der *Leistungspegel der EIRP* mit der Zahlenwertgleichung

$$\frac{\mathrm{EIRP}}{\mathrm{dBm}} = \frac{P_\mathrm{S}}{\mathrm{dBm}} + \frac{G}{\mathrm{dBi}} \ . \tag{22}$$

**Beispiel 7** Welchen Gewinn hat eine Antenne, die bei einer eingespeisten Sendeleistung von $P_\mathrm{S} = 1{,}2\,\mathrm{kW}$ in ihrer Hauptstrahlrichtung im Abstand von $r = 8\,\mathrm{km}$ eine elektrische Feldstärke von $|E_0| = 67\,\mathrm{mV/m}$ (Spitzenwert) erzeugt?

Ein isotroper Strahler würde im gleichen Abstand die Strahlungsleistungsdichte

$$S_{*,\mathrm{i}}(r) = \frac{P_\mathrm{S}}{4\pi r^2} = \frac{1200\,\mathrm{W}}{4\pi\cdot(8000\,\mathrm{m})^2} = 1{,}5\,\mu\mathrm{W/m^2}$$

erzeugen. Die besagte Antenne erzeugt jedoch aufgrund von Bündelung der Sendeleistung in Hauptstrahlrichtung $(\vartheta_\mathrm{max},\varphi_\mathrm{max})$ eine gegenüber dem isotropen Strahler erhöhte Strahlungsleistungsdichte von

$$S_*(r,\vartheta_\mathrm{max},\varphi_\mathrm{max}) = \frac{|E_0|^2}{2\cdot Z_\mathrm{F0}} = \frac{(0{,}067\,\mathrm{V/m})^2}{2\cdot 377\,\Omega} = 6\,\mu\mathrm{W/m^2} \ .$$

Wegen

$$\frac{G(\vartheta_\mathrm{max},\varphi_\mathrm{max})}{\mathrm{dBi}} = 10\cdot\lg\left(\frac{S_*(r,\vartheta_\mathrm{max},\varphi_\mathrm{max})}{S_{*,\mathrm{i}}(r)}\right)_{r=\mathrm{const}} = 10\cdot\lg\left(\frac{6\,\mu\mathrm{W/m^2}}{1{,}5\,\mu\mathrm{W/m^2}}\right) = 10\cdot\lg(4) = 6$$

hat sie also einen Gewinn von 6 dBi und die effektiv isotrop abgestrahlte Leistung ist $\mathrm{EIRP} = 4P_\mathrm{S} = 4{,}8\,\mathrm{kW}$. Dies entspricht einem Leistungspegel von EIRP = 66,8 dBm, der um 6 dB (Faktor 4) höher ist als der Sendeleistungspegel von $L_{P_\mathrm{S}} = 10\lg(1{,}2\,\mathrm{kW}/1\,\mathrm{mW})\,\mathrm{dBm} = 60{,}8\,\mathrm{dBm}$.

### 3.5 Das Dezibel in der Akustik

Im Bereich der Akustik müssen ebenso wie in der Elektrotechnik Pegelbereiche über mehrere Größenordnungen hinweg behandelt werden. Daher wird in der Akustik das Dezibel ebenso vorteilhaft zur Bezifferung der Schallintensität verwendet, wie in der Signalverarbeitung. Zur Erläuterung der wichtigsten Kenngrößen einer Schallwelle betrachten wir ein einfaches homogenes Schallwellenfeld mit der zeitlichen Periode $T$ (Periodendauer) und der örtlichen Periode $\lambda$ (Wellenlänge), welches sich geradlinig entlang der Koordinate $x$ ausbreitet. Die Auslenkung $\xi$ der Gasmoleküle (der *Schallausschlag*) gehorcht dann der Lösung der eindimensionalen Wellengleichung

$$\xi(t,x) = \hat{\xi} \cdot \sin(\omega t - kx) \tag{23}$$

mit der maximalen Auslenkung $\hat{\xi}$, der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi/T$ und der Wellenzahl $k = 2\pi/\lambda$. Von der Auslenkung (23) lässt sich die Orts- und Zeitabhängigkeit

$$p(t,x) = p_0 + \hat{p} \cdot \cos(\omega t - kx) \tag{24}$$

des *Schalldrucks* $p$ ableiten [5]. Dabei sind $p_0$ der Gleichdruck und

$$\hat{p} = \rho \cdot c \cdot \omega \cdot \hat{\xi} \tag{25}$$

die *Schalldruckamplitude*.

**Anmerkung 4** Im Bereich der Tontechnik ist es üblich, die Amplitude $\hat{p}$ des Wechseldruckes als den »Schalldruck« zu bezeichnen [3]. Weil aber der Druck in einer Schallwelle nicht konstant ist, sondern entsprechend (24) vom Ort und von der Zeit abhängt, soll im Rahmen dieses Aufsatzes klar unterschieden werden zwischen dem Schalldruck $p(x,t)$ als dem momentanen Gesamtdruck in einem Schallwellenfeld und der Amplitude $\hat{p}$ des darin enthaltenen Wechseldruckes $\hat{p} \cdot \cos(\omega t - kx)$. In diesem Sinne werden in Tabelle 2 auf Seite 14 Aussagen über den Schalldruck dann als falsch bezeichnet, wenn eigentlich die Schalldruckamplitude gemeint ist. In einem Umfeld, in dem klar und unmissverständlich vereinbart ist, dass mit »Schalldruck« nicht der Gesamtdruck $p$ sondern die Amplitude $\hat{p}$ des Wechseldruckes gemeint ist, sind diese Aussagen natürlich richtig.

Das Ausbreitungsmedium ist gekennzeichnet durch die Schallgeschwindigkeit $c$ und durch seine Dichte $\rho$. Durch einfache Differenziation der Auslenkung (23) nach der Zeit $t$ erhält man die Geschwindigkeitsamplitude der Gasmoleküle

$$\hat{v} = \omega \cdot \hat{\xi} \ , \tag{26}$$

die so genannte *Schallschnelle*. Die Schallschnelle ist die maximale Geschwindigkeit, welche die Gasmoleküle während ihrer lokal begrenzten Schwingbewegung erreichen. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit, welche die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwelle in ihrer Ausbreitungsrichtung darstellt. Den Quotienten aus Schalldruckamplitude und maximaler Schallschnelle bezeichnet man als die *Schallimpedanz*

$$Z = \frac{\hat{p}}{\hat{v}} = \rho \cdot c \ . \tag{27}$$

Die Energiestromdichte einer Schallwelle (Energie pro Zeit und Fläche in $\mathrm{J/(m^2s)} = \mathrm{W/m^2}$) bezeichnet man in der Akustik als *Schallintensität*. Sie ergibt sich aus den Kenngrößen des Wellenfeldes zu

$$I = \frac{1}{2}\hat{p} \cdot \hat{v} = \frac{\hat{p}^2}{2Z} \ . \tag{28}$$

In ähnlicher Weise wie bei den in (13) eingeführten Spannungs- und Leistungspegeln führt man für die logarithmische Angabe der Schallintensität einen Bezugswert $I_0$ ein. Der *Schallintensitätspegel* $L_I$ (in dB) ist festgelegt durch

$$\boxed{\frac{L_I}{\mathrm{dB}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad \text{mit} \qquad I_0 = 1 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{W/m^2}\ .} \tag{29}$$

Wegen des Zusammenhanges (28) berechnet sich der *Schalldruckpegel* $L_p$ aus der Schalldruckamplitude $\hat{p}$ zu

$$\boxed{\frac{L_p}{\mathrm{dB}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{\hat{p}}{\hat{p}_0}\right)^2 = 20 \cdot \lg\left(\frac{\hat{p}}{\hat{p}_0}\right)\ .} \tag{30}$$

Schallintensitätspegel und Schalldruckpegel hängen über die Schallimpedanz $Z$ fest zusammen. Diese wiederum ist als Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit temperatur-, druck- und medienabhängig. Solange $Z$ jedoch konstant ist, ändern sich Schallintensitätspegel und Schalldruckpegel stets um den gleichen Zahlenwert (vergleiche Abschnitt 3.1). Diese Sachverhalte werden leider häufig durcheinandergeworfen und falsch wiedergegeben. Weil die abgestrahlte Gesamtleistung divergiert und sich mit wachsendem Abstand $r$ von der Schallquelle auf eine mit $r^2$ wachsende Gesamtfläche verteilt, nimmt aufgrund der Energieerhaltung die Schallintensität $I$ auch in einem verlustfreien Medium bei zunehmender Entfernung proportional zu $1/r^2$ ab. Daraus folgt, dass die Schalldruckamplitude $\hat{p}$ wegen $\hat{p} \sim \sqrt{I}$ proportional zu $1/r$ abnimmt. Beides hat zur Folge, dass sowohl der Schallintensitätspegel $L_I$ als auch der Schalldruckpegel $L_p$ um 20 dB je Abstandsdekade abnehmen. Falsch ist jedoch die häufig anzutreffende Aussage, der Schallintensitäts*pegel* nehme proportional zu $1/r^2$ ab. Die Pegel sind logarithmische Größen und es liegt wiederum an der Eigenschaft (1) des Logarithmus, dass die Multiplikation der Schallintensität $I$ mit einem Faktor (hier: ${r_2}^2/{r_1}^2$) auf eine Zahlenwert*differenz* beim zugehörigen Schallintensitätspegel $L_I$ abgebildet wird (hier: $-20$ dB je Abstandsdekade oder $-6$ dB bei Abstandsverdoppelung). In Tabelle 2 auf der nächsten Seite sind einige dieser stetig wiederkehrenden aber falschen Formulierungen korrigiert.

Ebenfalls über den Zusammenhang (28) findet man, dass der zu $I_0$ korrespondierende Bezugsdruck

$$\hat{p}_0 = \sqrt{2 \cdot I_0 \cdot \rho \cdot c} = \sqrt{2 \cdot I_0 \cdot Z} \tag{31}$$

ist. Wählt man $\hat{p}_0$ entsprechend (31), dann haben der Schalldruckpegel und der Schallintensitätspegel den gleichen Zahlenwert[5]. Für Luft im Normzustand ($T_0 = 273{,}15\,\mathrm{K}$, $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa}$) erhält man $\hat{p}_0 = 2{,}8 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{Pa}$, was einem Effektivwert von $\hat{p}_{0,\mathrm{eff}} = 2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{Pa}$ entspricht [5].

Im Gegensatz zu den bisher eingeführten physikalischen Kenngrößen einer Schallwelle ist die Bewertung ihrer *Lautstärke* dem subjektiven Empfinden unterworfen, welches außer vom Individuum auch von der Frequenz abhängt. Bei der Einführung eines Maßes für die Lautstärke

[5]Der in (30) eingeführte Bezugsdruck $\hat{p}_0$ für die Schalldruckamplitude $\hat{p}$ ist nicht zu verwechseln mit dem im Schalldruck (24) enthaltenen Gleichdruck $p_0$.

**Tabelle 2:** Häufig gebrauchte falsche Formulierungen im Zusammenhang mit Schallgrößen

| Falsche Formulierung | Richtige Version |
|---|---|
| *Der Schalldruck nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r$ ab.** | Die Schalldruckamplitude nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r$ ab.* |
| *Die Schalldruckamplitude nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r^2$ ab.* | Die Schalldruckamplitude nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r$ ab. |
| *Der Schalldruckpegel nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r^2$ ab.* | Die Schalldruckamplitude nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r$ ab. |
| | Die Schallintensität nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r^2$ ab. |
| | Der Schalldruckpegel nimmt bei zunehmender Entfernung um 20 dB je Entfernungsdekade ab. Bei Verdoppelung des Abstandes nimmt er um 6 dB ab. |
| *Der Schallintensitätspegel nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r^2$ ab.* | Die Schallintensität nimmt bei zunehmender Entfernung mit $1/r^2$ ab. |
| | Der Schallintensitätspegel nimmt bei zunehmender Entfernung um 20 dB je Entfernungsdekade ab. Bei Verdoppelung des Abstandes nimmt er um 6 dB ab. |

*Siehe Anmerkung 4 auf Seite 12.

phon

spielen daher die durchschnittlichen Eigenschaften des menschlichen Gehörs eine wesentliche Rolle. Als Maß für die Lautstärke eines beliebigen Tones verwendet man den Schalldruckpegel, den ein rein harmonischer Ton (Sinuston) der Frequenz 1 kHz haben müsste, damit er als gleich laut *empfunden* wird. Um zu verdeutlichen, dass es sich hierbei um die empfundene Lautstärke und nicht um den tatsächlichen Schalldruckpegel handelt, verwendet man für den Lautstärkepegel anstelle des Dezibel die Einheit phon. Der Schalldruckpegel $L_p = 0\,\mathrm{dB}$ entspricht bei 1 kHz (in etwa) der Hörgrenze, $L_p = 130\,\mathrm{dB}$ ist die Schmerzschwelle. Dem entsprechend reicht der Wertebereich des Lautstärkepegels von 0 phon bis 130 phon, wobei der Zahlenwert des zugehörigen Schalldruckpegels im Allgemeinen ein anderer ist. Der in den Eigenschaften des menschlichen Gehörs begründete nichtlineare Zusammenhang zwischen empfundener Lautstärke, Frequenz und tatsächlichem Schalldruckpegel ist im Hörflächendiagramm in Form der Kurven gleicher Lautstärkepegel (Isophonen) dokumentiert. Dort wird jedem Wertepaar aus Frequenz und Schalldruckpegel über die Isophonen ein Lautstärkepegel zugeordnet.

Eine Abstraktion des Hörflächendiagramms stellen vier standardisierte Bewertungskurven mit den Bezeichnungen A–D dar, welche den tatsächlichen Frequenzgang der menschlichen Lautstärkeempfindung in Abhängigkeit der Frequenz und des Lautstärkepegels schematisieren. Es handelt sich dabei um die Betragsfrequenzgänge $|H_\mathrm{x}(\mathrm{j}\omega)|$ von vier Modellfiltern mit den

Übertragungsfunktionen

$$H_{\mathrm{A}}(s) = \frac{7{,}397\,05 \cdot 10^{9} \cdot s^{4}}{(s + 129{,}4)^{2} \cdot (s + 76655)^{2} \cdot (s + 676{,}7) \cdot (s + 4636)}\ , \tag{32a}$$

$$H_{\mathrm{B}}(s) = \frac{5{,}991\,85 \cdot 10^{9} \cdot s^{3}}{(s + 129{,}4)^{2} \cdot (s + 76655)^{2} \cdot (s + 995{,}9)}\ , \tag{32b}$$

$$H_{\mathrm{C}}(s) = \frac{5{,}917\,97 \cdot 10^{9} \cdot s^{2}}{(s + 129{,}4)^{2} \cdot (s + 76655)^{2}}\ , \tag{32c}$$

$$H_{\mathrm{D}}(s) = \frac{91\,104{,}32 \cdot s \cdot (s^{2} + 6532 \cdot s + 4{,}0975 \cdot 10^{7})}{(s + 1776{,}3) \cdot (s + 7288{,}5) \cdot (s^{2} + 21514 \cdot s + 3{,}8836 \cdot 10^{8})}\ , \tag{32d}$$

wobei »x« die Bezeichnungen A–D repräsentiert. Die Bezugsgröße ist dabei wiederum die Lautstärkeempfindung bei der Frequenz 1 kHz, weshalb die Betragsfrequenzgänge aller Modellfilter bei dieser Frequenz den Wert 1 oder 0 dB haben (siehe Abb. 3 auf der nächsten Seite). Der nach diesen Kurven *bewertete Schalldruckpegel* $L_{p\mathrm{x}}$ ergibt sich aus dem Schalldruckpegel $L_p$ nach der Zahlenwertgleichung

$$\frac{L_{p\mathrm{x}}(\omega)}{\mathrm{dB(x)}} = \frac{L_p(\omega)}{\mathrm{dB}} + \frac{|H_{\mathrm{x}}(\mathrm{j}\omega)|}{\mathrm{dB}}\ . \tag{33}$$

Man erkennt, dass zu niedrigen Frequenzen hin ein immer höherer Schalldruckpegel notwendig ist, um die gleiche Lautstärkeempfindung hervorzurufen. Liegt der Angabe des Lautstärkepegels beispielsweise eine Gewichtung des Schalldruckpegels entsprechend der Kurve A zugrunde, so kennzeichnet man dies durch die Verwendung der Einheit dB(A) anstelle des phon. Beide Pegeleinheiten phon und dB(A) berücksichtigen auf unterschiedliche aber ähnliche Weise den Frequenzgang des menschlichen Gehörs, der zu einem nichtlinearen frequenz- und pegelabhängigen Zusammenhang zwischen Lautstärkepegel und Schalldruckpegel führt.

dB(A)

Dieser nichtlineare und nur empirisch bestimmbare Zusammenhang zwischen Lautstärkepegel (einer Empfindung) und Schalldruckpegel (einer das Schallfeld kennzeichnenden physikalischen Größe) ist auch der Grund dafür, dass für die Lautstärke kein geschlossen darstellbares Abstandsgesetz angegeben werden kann, wie das für den Schalldruck oder die Schallintensität und deren Pegel der Fall ist. Lediglich näherungsweise gilt die Faustformel, dass eine Verringerung des Schalldruckpegels (und damit auch des Schallintensitätspegels) um 10 dB als Halbierung der Lautstärke empfunden wird. Da der Schallintensitätspegel bei Freiraumausbreitung mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle mit 20 dB je Dekade abnimmt, tritt eine Abnahme um 10 dB bei einer Abstandsvergrößerung um den Faktor $\sqrt{10} \approx 3{,}16$ ein. Führt man diese Näherung fort, so lässt sich überschlägig sagen, dass sich die Lautstärke halbiert, wenn sich der Abstand um einen Faktor 3–4 vergrößert.

**Anmerkung 5** Der Zahlenwert des bewerteten Schalldruckpegels liegt trotz seiner Bezeichnung sehr viel näher am Zahlenwert des Lautstärkepegels in phon als am Zahlenwert des Schalldruckpegels im Schallwellenfeld. Die Bezeichnung »bewerteter Schalldruckpegel« ist üblich und auch formal richtig [3]. Das Ergebnis der Bewertung ist jedoch im Grunde ein Maß für den Lautstärkepegel und nicht mehr für den Schalldruckpegel. Man könnte daher den »x-bewerteten Schalldruckpegel« seiner eigentlichen Bedeutung folgend (und deshalb aus Sicht des Autors

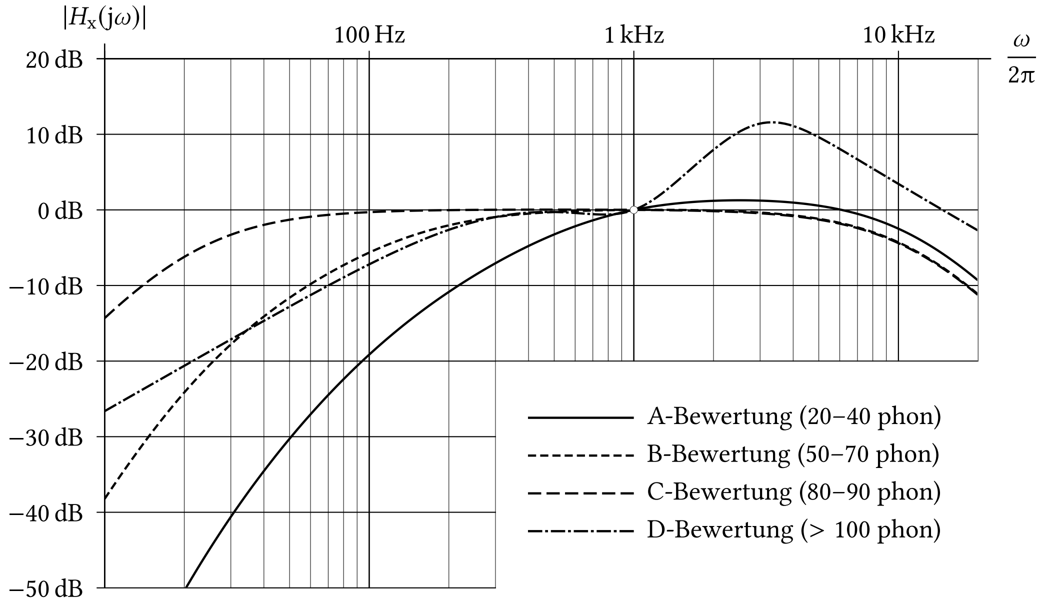



**Abb. 3:** Bewertungskurven zur Berücksichtigung des Frequenzganges des menschlichen Gehörs als Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Lautstärkepegel im Frequenzbereich 10 Hz bis 20 kHz

weniger irreführend) ebenso als »Lautstärkepegel entsprechend der Bewertungskurve x« bezeichnen. Falsch wird die Aussage sicher dann, wenn der Hinweis auf die Bewertung völlig entfällt und eine beispielsweise in dB(A) angegebene Größe beiläufig einfach als »Schalldruckpegel« bezeichnet wird.

**Beispiel 8** Welche Änderung ergäbe sich für die Ordinatenskala in Abb. 3, wenn anstelle von $|H_x(j\omega)|$ der Wert von $|H_x(j\omega)|^2$ in dB aufgetragen würde?

Es ergäbe sich keine Änderung, siehe Abschnitt 2. Der Wert von $|H_x(j\omega)|^2$ entspricht der Leistungsübertragungsfunktion der Filter, daher würde auf der Ordinate der Zahlenwert von $10\lg|H_x(j\omega)|^2$ aufgetragen. Dieser ist jedoch identisch mit dem Zahlenwert von $20\lg|H_x(j\omega)|$, der bei der logarithmischen Darstellung des Betrages $|H_x(j\omega)|$ der Spannungsübertragungsfunktion aufgetragen wird.

## 3.6 Das Dezibel in der Radarmeteorologie

Eine elementare Methode der Radarmeteorologie ist die Messung der Reflektivität $Z$ der Auflösungszellen eines Pulsradars und der anschließende Rückschluss von diesen Messwerten auf die in den Auflösungszellen herrschende Niederschlagsrate $R$. Weil die Zahlenwerte von $Z$ ebenfalls mehrere Größenordnungen überstreichen, wird auch hier das Dezibel als Quasi-Einheit benutzt. Zur Einführung dieser meteorologischen Einheit soll hier zunächst die Bedeutung des Parameters $Z$ und des verwendeten Bezugswertes $Z_0$ erläutert werden. Ausgangspunkt sei die monostatische Radargleichung

$$\frac{P_E}{P_S} = \frac{G^2 \cdot \lambda_0^2}{(4\pi)^3 r^4} \cdot \sigma \,, \tag{34}$$

welche das Verhältnis zwischen Empfangsleistung $P_E$ und Sendeleistung $P_S$ in Abhängigkeit des Antennengewinns $G$, der Signalwellenlänge $\lambda_0$, des Zielabstands $r$ und des Rückstreuquer-

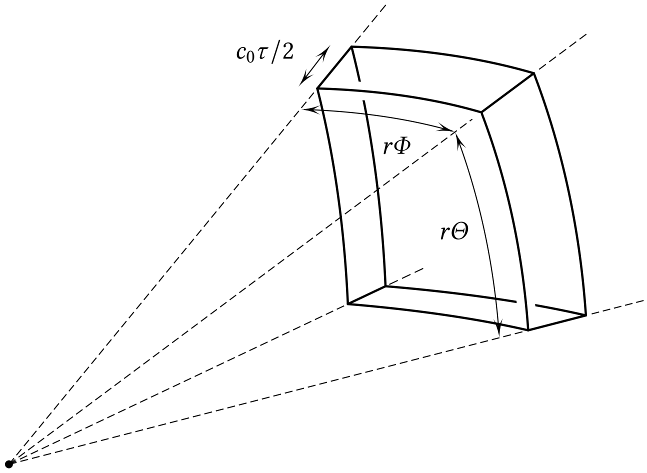



**Abb. 4:** Zur näherungsweisen Berechnung des Volumens $V$ einer Auflösungszelle beim Wetterradar

schnitts $\sigma$ des Zieles angibt [10]. In der Radarmeteorologie entsteht die Rückstreuung typischerweise jedoch nicht durch ein einzelnes Ziel sondern durch eine Vielzahl von Hydrometeoren (beispielsweise Regentropfen, Hagelkörner oder Schneeflocken) innerhalb jeder Auflösungszelle. Das Volumen $V$ einer Auflösungszelle ist näherungsweise

$$V \approx \frac{\pi}{4}(r \cdot \Theta)(r \cdot \Phi)\frac{c_0\tau}{2}\ , \tag{35}$$

wobei $\tau$ die Dauer eines einzelnen Radarimpulses und $\Theta$ und $\Phi$ die Halbwertsbreiten des Antennendiagramms darstellen. Eine sich im Abstand $r$ befindliche und von den Koordinatenflächen der Kugelkoordinaten begrenzte Auflösungszelle wird damit näherungsweise als Quader mit den Kantenlängen $r\Theta$, $r\Phi$ und $c_0\tau/2$ betrachtet (Abb. 4). Der Faktor $\pi/4$ berücksichtigt die elliptische Form des Strahlquerschnitts. Zur Berechnung des gesamten Rückstreuquerschnitts einer Auflösungszelle modellieren wir die Hydrometeore als Kugeln mit der relativen Permittivität $\varepsilon_\mathrm{r}$ und nehmen ferner an, dass ihr Durchmesser $D$ deutlich kleiner als die Radarwellenlänge $\lambda_0$ sei[6]. In diesem Fall befinden wir uns im Bereich der Rayleigh-Streuung, sodass der Rückstreuquerschnitt eines einzelnen Tropfens durch

$$\sigma(D) = \frac{\pi^5}{\lambda_0^4}\left|\frac{\varepsilon_\mathrm{r}-1}{\varepsilon_\mathrm{r}+2}\right|^2 \cdot D^6 \tag{36}$$

gegeben ist [7]. Führt man zur Beschreibung der statistischen Streukörperverteilung die Tröpfchengrößenverteilung $N(D)$ ein, welche die Häufigkeit des Tröpfchendurchmessers $D$ pro infinitesimalem Volumen $\mathrm{d}V$ angibt, dann ist $N(D)\,\mathrm{d}D$ die Volumendichte der Tröpfchen mit Durchmesser $D$. Damit ist dann

$$\mathrm{d}\sigma' = \sigma(D) \cdot N(D)\,\mathrm{d}D \tag{37}$$

[6] Beispielsweise arbeiten die Wetterradarsysteme des Deutschen Wetterdienstes im C-Band mit einer Trägerfrequenz von $f = 5{,}64\,\mathrm{GHz}$, was einer Wellenlänge von $\lambda_0 = 5{,}32\,\mathrm{cm}$ entspricht.

die volumenbezogene Dichte des Rückstreuquerschnitts, der von Tröpfchen mit dem Durchmesser $D$ herrührt und

$$\eta = \int_0^\infty \mathrm{d}\sigma' = \int_0^\infty \sigma(D) \cdot N(D)\,\mathrm{d}D \tag{38}$$

der gesamte volumenbezogene Rückstreuquerschnitt. Setzt man hier den Rückstreuquerschnitt entsprechend dem Rayleigh-Modell (36) ein, so erhält man für $\eta$ den Ausdruck

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda_0^{\,4}} \cdot |K|^2 \cdot \int_0^\infty D^6 \cdot N(D)\,\mathrm{d}D = \frac{\pi^5}{\lambda_0^{\,4}} \cdot |K|^2 \cdot Z \tag{39}$$

mit $|K|^2 = |(\varepsilon_\mathrm{r} - 1)/(\varepsilon_\mathrm{r} + 2)|^2$ und

$$\boxed{Z = \int_0^\infty D^6 \cdot N(D)\,\mathrm{d}D\ .} \tag{40}$$

Nimmt man vereinfachend an, dass $\eta$ innerhalb einer Auflösungszelle mit dem Volumen nach (35) konstant sei, dann ist der gesamte Rückstreuquerschnitt einer Auflösungszelle $\sigma = \eta \cdot V$ und damit ergibt sich aus (34) die *meteorologische Radargleichung*

$$\frac{P_\mathrm{E}}{P_\mathrm{S}} = \frac{G^2 \cdot \lambda_0^{\,2} \cdot \Theta \cdot \Phi \cdot c_0 \tau}{1024 \cdot \ln 2 \cdot \pi^2 \cdot r^2} \cdot \eta\ , \tag{41}$$

wobei noch ein Faktor $1/(2 \ln 2)$ zur Berücksichtigung der Verkleinerung von $V$ durch das zweimalige Durchlaufen der Antennencharakteristik unter Annahme einer gaußförmigen Charakteristik eingeführt wurde. Berücksichtigt man ferner, dass $\pi^2/(\Theta \cdot \Phi)$ in etwa gleich dem Antennengewinn $G$ ist, dann erhält man durch Einsetzen von (39) und (40) die geläufige Form

$$\boxed{\frac{P_\mathrm{E}}{P_\mathrm{S}} = \frac{\pi^5 \cdot G \cdot c_0 \tau}{1024 \cdot \ln 2 \cdot r^2 \cdot \lambda_0^2} \cdot |K|^2 \cdot Z\ .} \tag{42}$$

Der Wert von $|K|^2$ ist wie $\varepsilon_\mathrm{r}$ abhängig von der Materialart, der Temperatur und der Frequenz. Für Wasser bei 10 °C und $\lambda_0 = 10\,\mathrm{cm}$ ist er in etwa 0,93. Der Parameter $Z$ heißt *Radar-Reflektivität* und ist entsprechend seiner Definition (40) das sechste Moment der Tröpfchengrößenverteilung $N(D)$ [6]. Er hat in (42) die Dimension $\mathrm{m}^6/\mathrm{m}^3$, in der Meteorologie wird er jedoch üblicherweise in der Einheit $\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3$ angegeben. Weil er, wie oben erwähnt, mehrere Größenordnungen überstreichen kann, wird er häufig in Bezug auf $Z_0 = 1\,\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3 = 1 \cdot 10^{-18}\,\mathrm{m}^6/\mathrm{m}^3$

dBz und logarithmiert angegeben, was durch den Zusatz dBz gekennzeichnet wird. Es ist damit

$$\boxed{\frac{z}{\mathrm{dBz}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \qquad \text{mit} \qquad Z_0 = 1\,\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3\ .} \tag{43}$$

Ergänzend sei noch erwähnt, dass zwischen der Reflektivität $Z$ und der Niederschlagsrate $R$ ein teilweise empirischer Zusammenhang besteht, der durch die Zahlenwertgleichung

$$\frac{Z}{\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3} = a \cdot \left(\frac{R}{\mathrm{mm/h}}\right)^b \tag{44}$$

mit $a \in [200; 600]$ und $b \in [1,5; 2]$ beschrieben wird. Mit den häufig zutreffenden Werten $a = 200$ und $b = 1{,}6$ bezeichnet man (44) als *Marshall-Palmer-Beziehung*.

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|---|---|---|
| $D$ | m | Tröpfchendurchmesser |
| $G$ | 1 | Gewinn |
| $G$ | 1, dBi | Antennengewinn bezogen auf isotrope Abstrahlung |
| $G_P$ | 1 | Leistungsverstärkung |
| $G_U$ | 1 | Spannungsverstärkung |
| $H(s)$ | 1 | Übertragungsfunktion |
| $I$ | $\mathrm{W/m^2}$ | Schallintensität |
| $I_0$ | $\mathrm{W/m^2}$ | Bezugs-Schallintensität |
| $N$ | W | Rauschleistung |
| $N(D)$ | $1/(\mathrm{m^3 m})$ | Tröpfchengrößenverteilung |
| $P$ | W | Leistung |
| $P_0$ | W | Bezugsleistung |
| $P_1$ | W | Eingangsleistung |
| $P_2$ | W | Ausgangsleistung |
| $P_\mathrm{E}$ | W | Empfangsleistung |
| $P_\mathrm{S}$ | W | Sendeleistung |
| $R$ | mm/h | Niederschlagsrate |
| $R$ | Ω | Widerstand |
| $R_1$ | Ω | Eingangswiderstand |
| $R_2$ | Ω | Ausgangswiderstand |
| $S_*$ | $\mathrm{W/m^2}$ | Strahlungsleistungsdichte |
| $T$ | K | Temperatur |
| $T$ | s | Periodendauer |
| $U$ | V | Spannung |
| $U_0$ | V | Bezugsspannung |
| $U_1$ | V | Eingangsspannung |
| $U_2$ | V | Ausgangsspannung |
| $Z$ | $\mathrm{kg/(m^2 s)}$ | Schallimpedanz |
| $Z$ | $\mathrm{m^6/m^3}$ | Radar-Reflektivität (Reflektivitätsfaktor) |
| $Z_0$ | $\mathrm{m^6/m^3}$ | Bezugs-Radar-Reflektivität |
| $Z_\mathrm{L}$ | Ω | Leitungswellenwiderstand |

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|---|---|---|
| $a_{\mathrm{B}}$ | Np | Betriebsdämpfung |
| $c$ | m/s | Schallgeschwindigkeit |
| $c_0$ | m/s | Lichtgeschwindigkeit im Vakuum |
| $f$ | 1/s | Frequenz |
| $k$ | J/K | Boltzmann-Konstante |
| $k$ | rad/m | Wellenzahl |
| $p$ | Pa | Schalldruck |
| $p_0$ | Pa | Gleichdruck |
| $\hat{p}$ | Pa | Schalldruckamplitude |
| $\hat{p}_0$ | Pa | Bezugsdruck |
| $r$ | m | Abstand |
| $r, \vartheta, \varphi$ | m, rad, rad | Kugelkoordinaten |
| $t$ | s | Zeit |
| $\hat{v}$ | m/s | Schallschnelle |
| $x$ | m | Längenkoordinate |
| $z$ | dBz | logarithmierte Radar-Reflektivität (Bezug: $Z_0 = 1\,\mathrm{mm}^6/\mathrm{m}^3$) |
| $\Delta f$ | 1/s | Bandbreite |
| $\Theta, \Phi$ | rad | Halbwertsbreite, Antennenöffnungswinkel |
| $\eta$ | $\mathrm{m}^2/\mathrm{m}^3$ | volumenbezogener Radarrückstreuquerschnitt |
| $\lambda$ | m | Wellenlänge |
| $\lambda_0$ | m | Wellenlänge im Vakuum |
| $\xi$ | m | Schallausschlag |
| $\rho$ | $\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3$ | Dichte |
| $\sigma$ | $\mathrm{m}^2$ | Radarrückstreuquerschnitt |
| $\omega$ | rad/s | Kreisfrequenz |
| | | *– Zahlen –* |
| e | 1 | Eulersche Zahl $\mathrm{e} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!}$ |
| j | 1 | imaginäre Einheit ($\mathrm{j}^2 = -1$) |
| $\pi$ | 1 | Ludolfsche Zahl |
| | | *– Pegelgrößen –* |
| $L_I$ | dB | Schallintensitätspegel (Bezug: $I_0 = 1 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{W}/\mathrm{m}^2$) |
| $L_N$ | dBm | Rauschpegel (Bezug: $P_0 = 1\,\mathrm{mW}$) |
| $L_P$ | dBm | Leistungspegel (Bezug: $P_0 = 1\,\mathrm{mW}$) |
| $L_U$ | dBµV | Spannungspegel (Bezug: $U_0 = 1\,\mu\mathrm{V}$) |
| $L_p$ | dB | Schalldruckpegel (Bezug: $\hat{p}_{0,\mathrm{eff}} = 2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{Pa}$) |
| $L_{p\mathrm{x}}$ | dB(x) | x-bewerteter Schalldruckpegel |
| | | *– Operatoren –* |
| $\log_n(x)$ | | Logarithmus von $x$ zur Basis $n$ |
| $\ln(x)$ | | Logarithmus von $x$ zur Basis e (natürlicher Logarithmus) |
| $\lg(x)$ | | Logarithmus von $x$ zur Basis 10 (dekadischer Logarithmus) |

## Literatur


[1] C. A. Balanis: *Antenna Theory. Analysis and Design.* 3rd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

[2] R. E. Collin: *Antennas and Radiowave Propagation.* New York: McGraw-Hill, 1985.

[3] *DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder.* Deutsche Gesellschaft für Akustik e. V. Berlin, März 2006. URL: http://www.dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf (besucht am 19. 05. 2011).

[4] J. Detlefsen und U. Siart: *Grundlagen der Hochfrequenztechnik.* 4. Aufl. München: Oldenbourg, 2012.

[5] P. Dobrinski, G. Krakau und A. Vogel: *Physik für Ingenieure.* 7. Aufl. Stuttgart: Teubner, 1988.

[6] G. Hendrantoro and I. Zawadzki: "Derivation of Parameters of $Y$-$Z$ Power-Law Relation From Raindrop Size Distribution Measurements and Its Application in the Calculation of Rain Attenuation From Radar Reflectivity Factor Measurements". In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* AP-51.1 (January 2003), pp. 12–22.

[7] A. Ishimaru: *Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering.* Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

[8] T. Oguchi: "Electromagnetic Wave Propagation and Scattering in Rain and Other Hydrometeors". In: *Proceedings of the IEEE* 71.9 (September 1983), pp. 1029–1078.

[9] R. Olsen, D. Rogers, and D. Hodge: "The $aR^b$ Relation in the Calculation of Rain Attenuation". In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* AP-26.2 (March 1978), pp. 318–329.

[10] M. I. Skolnik: *Introduction to Radar Systems.* Auckland: McGraw-Hill, 1980.

[11] O. Zinke und H. Brunswig: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik.* Hrsg. von A. Vlcek. 4. Aufl. Bd. 1. Berlin: Springer, 1990.

[12] E. Zwicker: *Psychoakustik.* Berlin: Springer, 1982.

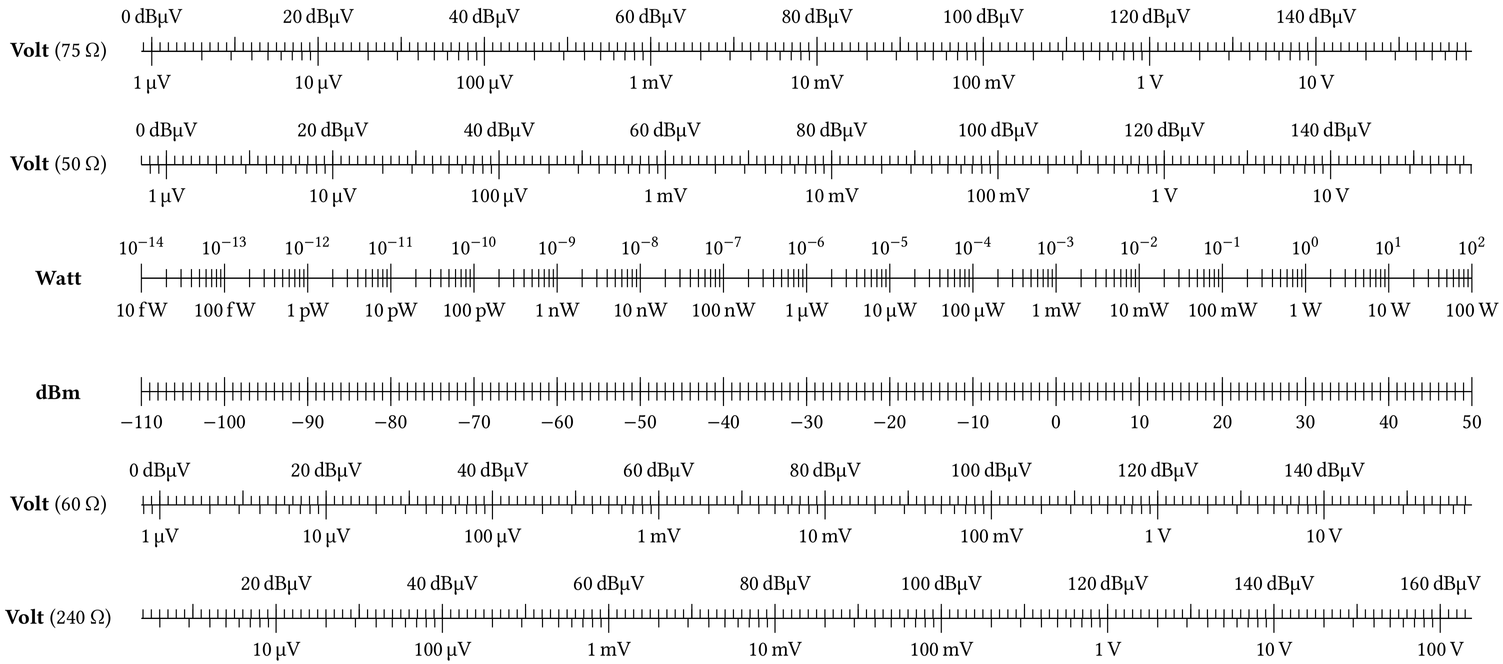



**Abb. 5:** Nomogramme zur Umrechnung zwischen Spannungspegel (Effektivwert) und Leistungspegel. Auf den beiden mittleren Skalen ist der Leistungspegel in Watt und in dBm aufgetragen. Die übrigen Skalen zeigen die zugehörigen Spannungspegel in Volt und in dBµV bei verschiedenen Impedanzniveaus. Die Leistungsskalen können für sich alleine auch zur Umrechnung zwischen Watt und dBm benutzt werden. Ebenso ist jede Spannungsskala ein Nomogramm zur Umrechnung zwischen Volt und dBµV, wobei das Impedanzniveau irrelevant ist.