

Dezibels

Warum sich Akustiker
in der Wüste am wohlsten fühlen



Kennung: kwhdba.01.01

Datum: 07.10.2018

Status: Entwurf

Inhalt

1	Einleitungen	3
1.1	Einführung	3
1.2	Das Wüste des Aufsatzes – die Rückbesinnung in der Wüste	3
2	Die Welt der Pegel	5
2.1	Vom Ursprung her vollkommen ... Leistungspegel.....	5
2.2	Pegel Macchiato	5
2.3	Absolute Pegel.....	8
2.3.1	Vereinbarte Pegelbezüge.....	8
2.3.2	Konsistenz-Prüfungen	9
3	Nachlässigkeiten in der Akustik.....	13
3.1	Der energieäquivalente Schalldruckpegel	13
3.2	Schalldruck einer Kugelwelle.....	15
3.3	Impedanzkorrektur.....	17
4	Hinweise für die Praxis der Verwaltungsakustik	19
5	Anhang: Tabellen und Diagramme	21
6	Verweise.....	25
7	Formelzeichen	26
8	Über „Bella Acustica – De Bello Acustico“	27

1 Einleitungen

1.1 Einführung

Wenn im Folgenden vom Akustik gesprochen wird, ist eigentlich die Sparte dieser Wissenschaft gemeint, die sich mit dem menschlichen Hören, insbesondere dem Lärm und seiner Beurteilung beschäftigt. Zu dieser Akustik gehört der Schallimmissionsschutz, die so genannte Verwaltungsakustik, die Psychoakustik und der Lärmschutz; Dazu gehört auch die Akustik der Tonstudios, Beschallungstechnik usw. In dieser Akustik sind Angaben in Dezibel unvermeidliche Tradition.

Die Wurzel dieser Tradition ist das WEBER-FECHTNERSCHE Gesetz, das besagt, dass sich die *subjektiv* empfundene Stärke von Sinneseindrücken proportional zum Logarithmus der *objektiven* Intensität des physikalischen Reizes verhält, siehe. beispielsweise <https://de.wikipedia.org/wiki/Weber-Fechner-Gesetz>. (Wikipedia, kein Datum)

Es lassen sich beinahe alle Messgrößen als Dezibel angeben. Voraussetzung dafür ist, dass man die Messgröße selbst durch Division durch eine Setzung ihrer selbst dividiert und damit dieses Verhältnis zu ihrer Bezugsgröße mit der Basis 10 logarithmieren kann. Das Ergebnis sind zunächst Angaben in Bel. Eine Multiplikation mit dem Faktor 10 ergibt dann die Angabe in Dezibel.

Anmerkung

Die Angaben von ‚Pegel‘ in Dezibel folgt in der Akustik also ähnlichen Regeln, wie der Hektoliter statt Liter beim Bier, das Millibar beim Luftdruck oder das Hektar bei der Flächenangabe in der Geographie.

Es geht im Folgenden um Dezibel und die Darstellung von Messgrößen im sogenannten Pegelraum. Es geht vor allem um die Bezugsgrößen der Messwerte und darum, die Tücken dabei aufzuzeigen - insbesondere im Zusammenspiel der Bezugsgrößen, wenn zusammengesetzte Messgrößen ‚dezibelisiert‘ werden.

1.2 Das Wüste des Aufsatzes – die Rückbesinnung in der Wüste

Die – hier gemeinte – Akustik hat ihre eigene Sprache entwickelt, eine Art Umgangssprache. So wie umgangssprachlich eine eher undeutliche Aussprache, das Verschlucken von Wortendungen und unvollständige Sätze weit verbreitet sind, werden in der Akustik Kenngrößen unscharf bezeichnet, Zahlen-Formeln statt Gleichungen geschrieben und Normen und Richtlinien als wissenschaftliche Erkenntnisquellen benutzt.

Unter den stets unterschwellig vorhandenen Einflüssen der Sozialwissenschaften, des politischen Umfelds und letztlich auch der Rechtsprechung zeigt diese Akustik die Tendenz,

selbst zu einer weichen Wissenschaft zu werden. Also zu einer Wissenschaft, die eher durch Paradigmen und Mehrheitsentscheidungen Wahrheiten findet, statt in Demut vor der Natur ihren Erkenntnisgewinn voranzutreiben.

Das hier als „Dezibelisierung“ bezeichnet Stilmittel ist ein zentrales Element der ‚umgangssprachlichen‘ Ausdrucksweise. Es wird gleichermaßen dazu genutzt, scheinbar populär verständlich Ergebnisse akustischer Betrachtungen darzustellen, und Unsicherheiten oder gar Unschärfen zu verschleiern.

Der Gesetzgeber in seinen Verordnungen zur Berechnung des Lärms und die Rechtsprechung bei ihrer Auslegung und Interpretation von Ergebnissen erlauben sich wie in sonst keiner Wissenschaft ein Urteil auch über ‚harte‘ Gesetze der Akustik. Sie und mischen sich sogar viral in die Begriffs- und Modellbildung ein. Dieser Virus schleicht sich bereits über Jahrzehnte in das Denken der „Akustiker“. Als ‚Akustiker‘ muss man diese Sprache sprechen, sonst wird man nicht verstanden. Aber man braucht Abwehrkräfte, die man am besten aus einer sporadischen Rückbesinnung auf die Grundlagen gewinnt. Man kann zur Rückbesinnung durchaus in die Wüste gehen und sich dort auch wohlfühlen ...

Anmerkung

Das musste einmal gesagt werden.

2 Die Welt der Pegel

2.1 Vom Ursprung her vollkommen ... Leistungspegel

Das Dezibel (bzw. das Bel) ist zunächst ein Leistungsverhältnis. Ein Bezug wird nicht benötigt. Durch die Verhältnisbildung regelt sich alles automatisch. Eine implizite Bedingung für diese einfache Vollkommenheit ist, dass die Leistung grundsätzlich positiv definit ist. Wäre eine der beiden Leistungen 0 oder negativ, scheitert das Logarithmieren.

Natürlich ist dies stets eine notwendige Bedingung für die Darstellung eines Messwerts als Pegel; er darf nicht 0 oder negativ werden. (Es sei denn, die Messgröße ist negativ definit und der Bezugswert ebenfalls notwendigerweise negativ.)

Hat beispielsweise eine Punktschallquelle eine Leistung von 100 W und eine zweite eine Leistung von 200 W, ist die Leistung der zweiten Punktschallquelle 3 dB größer als die der ersten.

Anmerkung

Das sind eigentlich 3,01029996... dB, wird hier - wie immer in der Akustik - vernachlässigt. Benutzt man diese Näherung in einer Pegelrechnung, ist dies also mit einem Fehler im Bereich 0,01 dB ‚infiziert‘. Man sollte deshalb dann schon allein deswegen davon Abstand nehmen, solche Pegel mit mehr als höchstens 2 Stellen hinter dem Komma anzugeben.

$$10 \lg \left(\frac{200 \text{ W}}{100 \text{ W}} \right) = 3 \text{ dB} \quad \text{Gl. 1}$$

2.2 Pegel Macchiato

Der Schalldruck ist eine Führungsgröße in der auf den Menschen bezogenen Akustik, weil das Ohr ein Schalldrucksensor ist. Nach dem oben Gesagten kann es keine Schalldruckverhältnispegel geben. Der Schalldruck ist eine Feldgröße und kann deshalb die notwendige Bedingung des Positiv-Definit nicht erfüllen.

Für die Schallschnelle, im Sinne einer ‚acoustical correctness‘ der gleichberechtigte Partner des Schalldrucks, gilt dies ebenfalls.

Anmerkung

Schalldruck und Schallschnelle sind Feldgrößen des Schallfelds in Gasen und Flüssigkeiten, denn ihr Produkt ist für eine ebene Volumenwelle in diesen Medien die Intensität, kennzeichnet also die Energie, die pro Zeit- und Flächeneinheit in Ausbreitungsrichtung der Welle fließt.

Für die Feldgrößen ist also eine Pegelbildung nicht möglich.

Anmerkung

Dies ist eine eher populär-akustisch verkürzende Betrachtungsweise. Natürlich ist die Schnelle ein Vektor. Man könnte also Schnelleverhältnispegel als Verhältnis der stets positiven Beträge der beiden Vektoren betrachten. Dann muss man aber auch den Schalldruck als einen Spezialfall des Spannungstensors betrachten. Und dann wird die Diskussion in ein schweres Fahrwasser geleitet, das weit über den Fokus dieses Aufsatzes hinausgeht.

Dennoch gibt es sie, die Schalldruckpegel. Sie sind der Mittelpunkt des Pegelraum in der Hörakustik.

Die einfachste Möglichkeit zu erzwingen, dass Größen positiv definit sind, ist ihre Quadratur. Deshalb gibt es Verhältnispegel des Schalldruckquadrats und des Schnellequadrats. Und gerade die sind eigentlich gemeint, wenn man von Schalldruck- oder Schallschnellepegel spricht.

Falsch ist die Definition des Schalldruckverhältnispegels in Gl. 2, auch wenn man sie häufig so sieht. Diese Gleichung würde es ja zulassen, dass das zu logarithmierende Druckverhältnis negativ werden kann.

$$L = 20 \lg \left(\frac{p_2}{p_1} \right) \text{dB} \quad \text{Gl. 2}$$

Richtig dagegen ist Gl. 3.

$$L = 10 \lg \left(\frac{p_2^2}{p_1^2} \right) \text{dB} \quad \text{Gl. 3}$$

Anmerkung

Dies scheint marginal zu sein. Ein Programmierer sollte aber bei der Pegelbildung nie ‚20 mal‘ umsetzen, auch die Gleichungen in Normen und Richtlinien so formulieren. Auf lange Sicht zieht er den Kürzeren, weil seine Prozeduren Fehler liefern.

Schalldruck- und Schallschnellepegel sind eigentlich Pegel der Verhältnisse von Quadraten der zugrundeliegenden Feldgrößen: nicht vom Ursprung her vollkommen, sondern ein wenig ‚macchiato‘.

Anmerkung

Latte Macchiato (mit einem Espresso ‚beflecktes‘ Glas heiße Milch) oder Cafè Macchiato (mit Milch ‚befleckter‘ Espresso) ist ja nichts Schlechtes, aber eben weder Milch noch Kaffee.

Von Kenngrößen, die von Quadraten der Feldgrößen direkt abhängen, lassen sich natürlich ohne Probleme Verhältnispegel bilden. Das gilt beispielsweise für Schalldruck- (Gl. 4) und Schallschnelle-Exposition (Gl. 5).

$$E_p = \int_{\text{Dauer}} p^2(t) dt \quad \text{Gl. 4}$$

$$E_v = \int_{\text{Dauer}} v^2(t) dt \quad \text{Gl. 5}$$

Für die Intensität einer ebenen longitudinalen Welle in Gl. 6 lassen sich ebenfalls Verhältnispegel angeben, obwohl sie nicht von den Quadraten der Kenngrößen abhängen, sondern von ihrem Produkt.

$$I(t) = p(t) v(t) \quad \text{Gl. 6}$$

Anmerkung

In einer ebenen Welle bedarf die Tatsache, dass sowohl Schnelle als auch Intensität eine vektorielle Größe ist, keiner weiteren Betrachtung, vgl. die Ableitung in Gl. 7

$$\underline{I} = p \underline{v} \Rightarrow I \underline{e}_v = p v \underline{e}_v \Rightarrow I = p v \quad \text{Gl. 7}$$

Beide Kenngrößen stehen in einem festen Zusammenhang: Schalldruck und Schallschnelle (ihr Betrag) wechseln gleichzeitig das Vorzeichen und sorgen für die Erfüllung der Bedingung Positiv-Definit. Ihr Verhältnis, die Schallkennimpedanz Z_{air} , ist konstant, s. Gl. 8.

$$p = Z_{air} v \quad \text{Gl. 8}$$

Intensitätsverhältnispegel ebener Wellen sind deshalb wie Schalleistungspegel ‚vom Ursprung her vollkommen‘.

Dies gilt nicht allgemein. Schon bei Kugelwellen ist das Verhältnis nicht mehr konstant; auch die Phase zwischen Schalldruck und Schallschnelle ist nicht mehr null; die Feldgrößen sind nicht gleichzeitig positiv oder negativ.

Anmerkung

In der Akustik werden auch nicht-akustische Kenngrößen dezibilisiert. Es lassen sich so scheinbar einfache Pegelgleichungen schreiben, um komplexe Zusammenhänge aufzuzeigen.

$$L = 10 \lg \left(\frac{A B}{C} \right) \text{dB} = 10 \lg(A) \text{dB} + 10 \lg(B) \text{dB} - 10 \lg(C) \text{dB} \quad \text{Gl. 9}$$

Dies kann u. U. zu Unklarheiten führen: Auch wenn für $\left(\frac{A B}{C} \right)$ alle Bedingungen zur Formulierung eines Pegels gelten, muss das nicht für A, B, C alleine gelten.

2.3 Absolute Pegel

2.3.1 Vereinbarte Pegelbezüge

Bisher wurden Pegel als logarithmierte Verhältnisse von positiven Größen eingeführt. Dies ist in der auf den Menschen bezogenen Akustik eher unüblich. Durch Vereinbarung einer Bezugsgröße für die jeweilige Messgröße werden ‚absolute‘ Pegelgrößen eingeführt. Eigentlich sind die Pegel natürlich nicht ‚absolut‘; Wegen der bekannten Bezugsgröße lässt sich aber immer der ‚wahre‘ Messwert einer Kenngröße berechnen.

Tabelle 1 stellt die häufig benutzten Bezugsgrößen zusammen.

	1	2	3	4
	Kenngröße	Bezugsgröße	Setzung	Bemerkung
1	Schall(Leistung)	W_0	1 pW	Dies ist auch außerhalb der Akustik üblich.
3	Schalldruck	p_0^2	$(20 \mu\text{Pa})^2$	Der Bezug hat eine als p_0 lange Tradition.
4	Schallschnelle	v_0^2	$25 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$	Setzung zur Erhaltung der Konsistenz der Bezugsgrößen
5	Schalldruckexposition	E_{p0}	$400 \mu\text{Pa}^2 \text{s}$	Berücksichtigt den Bezug für den Schalldruckpegel.
6	Schallschnelleexposition	E_{v0}	$25 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	
7	Schallintensität	I_0	$1 \frac{\text{pJ}}{\text{m}^2 \text{s}}$	Folgt aus der Bezugsgröße der Schallleistung
8	Dauer	τ_0	1 s	Dauer! Nicht etwa Zeit. Nur die Dauer ist positiv definit.
9	Kennimpedanz der Luft	$Z_{air,0}$	$400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}$	Der Konsistenz geschuldet

Tabelle 1 Pegel-Bezugsgrößen einiger Kenngrößen

Es scheint zunächst formal unabweisbar, dass man diese Setzungen in eindeutiger Weise vornehmen kann und damit ‚absolute‘ Pegel so bilden kann, dass die eindeutig, ja ein-eindeutig sind: also die Pegelrechnung in beiden Richtungen zuverlässig definiert ist.

Aber der Schein trügt. Denn auch für die Bezugsgrößen müssen die Beziehungen zwischen den Kenngrößen gelten. Diese Beziehungen sind physikalische Zusammenhänge und sind einer willkürlichen Setzung nicht zugänglich.

2.3.2 Konsistenz-Prüfungen

Es muss als beispielsweise wegen Gl. 6 die Beziehung in Gl. 10 gelten

$$I_0 = p_0 v_0 \text{ bzw. } I_0^2 = p_0^2 v_0^2 \quad \text{Gl. 10}$$

Es muss also gelten

$$v_0^2 = \frac{I_0^2}{p_0^2} = \frac{\left(1 \frac{\text{pJ}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)^2}{(20 \mu\text{Pa})^2} = 10^{-12} \frac{1 \left(\frac{\text{Nm}}{\text{m}^2 \text{s}}\right)^2}{\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)^2} = \frac{1 \text{ pm}^2}{400 \text{ s}^2} = \left(\frac{1 \mu\text{m}}{20 \text{ s}}\right)^2 = 25 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \quad \text{Gl. 11}$$

Die Bezugsgrößen von v_0^2 , p_0^2 und I_0 passen also zueinander.

Es muss aber auch für ebene Wellen wegen Gl. 8 die Beziehung in Gl. 12 gelten

$$p_0 = Z_{air} v_0 \text{ bzw. } p_0^2 = Z_{air}^2 v_0^2 \quad \text{Gl. 12}$$

Offensichtlich folgt daraus eine Bestimmungsgleichung für die Kennimpedanz Z_{air} der Luft fest, nach Gl. 8 für eine ebene longitudinale Welle gilt. Die Setzungen für v_0^2 , p_0^2 legen deshalb das $Z_{air,0}^2$ bzw. das $Z_{air,0}$ fest.

$$Z_{air,0} = \frac{p_0}{v_0} = \frac{20 \mu\text{Pa}}{\frac{1 \mu\text{m}}{20 \text{ s}}} = 400 \frac{\text{Pa s}}{\text{m}} = 400 \frac{\text{Pa s}}{\text{m}} = 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \quad \text{Gl. 13}$$

Die Kennimpedanz ist aber eine Kenngröße der Luft, die sich aus gasdynamischen Grundgleichung ableiten lässt. Diese Kenngröße ist abhängig von der Temperatur und vom Druck, von der Luftzusammensetzung (Anteil Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf usw.). Es genügt hier völlig, diese Einflüsse auf die Abhängigkeit von der (Umgebungs-)Temperatur T_a und (Umgebungs-)Druck p_a zu beschränken. Es gilt dann für die Schallkennimpedanz Gl. 14.

$$Z_{air} = \rho c \quad \text{bzw.} \quad Z_{air}(p_a, T_a) = \rho(p_a, T_a) c(p_a, T_a) \quad \text{Gl. 14}$$

Setzt man wieder Bezugsgrößen ein folgt

$$Z_{air,0} = \rho_0 c_0 \quad \text{Gl. 15}$$

ρ_0 und c_0 sind der Druck und die Schallgeschwindigkeit, die die Luft aufweisen muss, wenn das System der Bezugsgrößen konsistent sein soll. Druck und die Schallgeschwindigkeit

werden in der Regel nicht ‚dezibelisiert‘. Es werden also keine Bezugsgrößen benötigt und sie sind auch nicht eingeführt. Aus Gl. 14 bzw. Gl. 15 folgt aber eine Bedingung für die Bezugsatmosphäre Air_0 mit den Kenngrößen und nach Gl. 16.

$$Z_{air}(Air_0) = (\rho c)_{Air_0} = 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}} \quad \text{Gl. 16}$$

Die Konsistenz der Bezugsgrößen lässt sich also dann und nur dann erreichen, wenn das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit gerade die Bezugsgröße der Kennimpedanz erreicht. Für den Luftdruck auf Meereshöhe zeigen die Abbildung 1 und Abbildung 2 die wichtigsten Zusammenhänge im interessanten Temperaturbereich (Quelle: Tabellen in Wikipedia, <https://wahiduddin.net>). Die Schallgeschwindigkeit steigt, die Dichte fällt mit der Temperatur, siehe Abbildung 1. Entscheidend ist aber Abbildung 2; Dort ist zu entnehmen, dass die geforderte Kennimpedanz von 400 N s/m bei ca. 40°C erreicht wird.

Dies sind Temperaturen, die eine Wüste über Tag erreicht werden. Die Überschrift des Aufsatzes hat also Berechtigung: Ist man in der Wüste, erreicht man die die Bedingung der Bezugsatmosphäre $Z_{air,0}$.

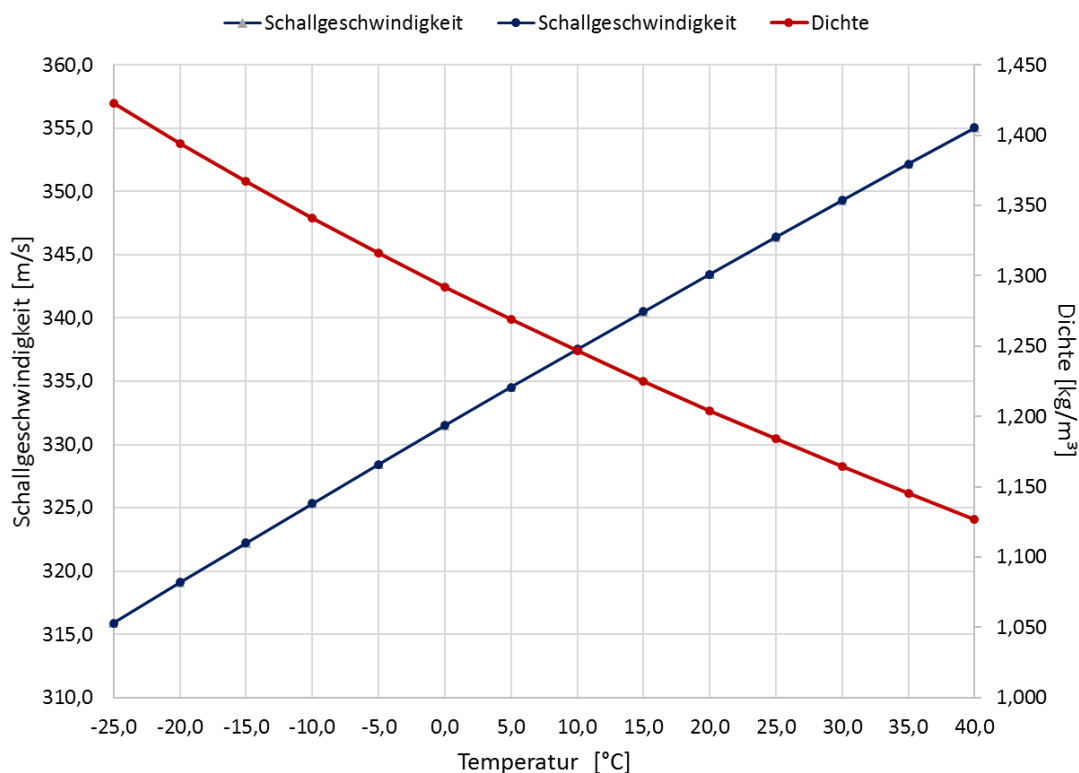


Abbildung 1 Abhängigkeiten der Schallgeschwindigkeit und der Dichte von der Temperatur auf Meereshöhe in trockener Luft

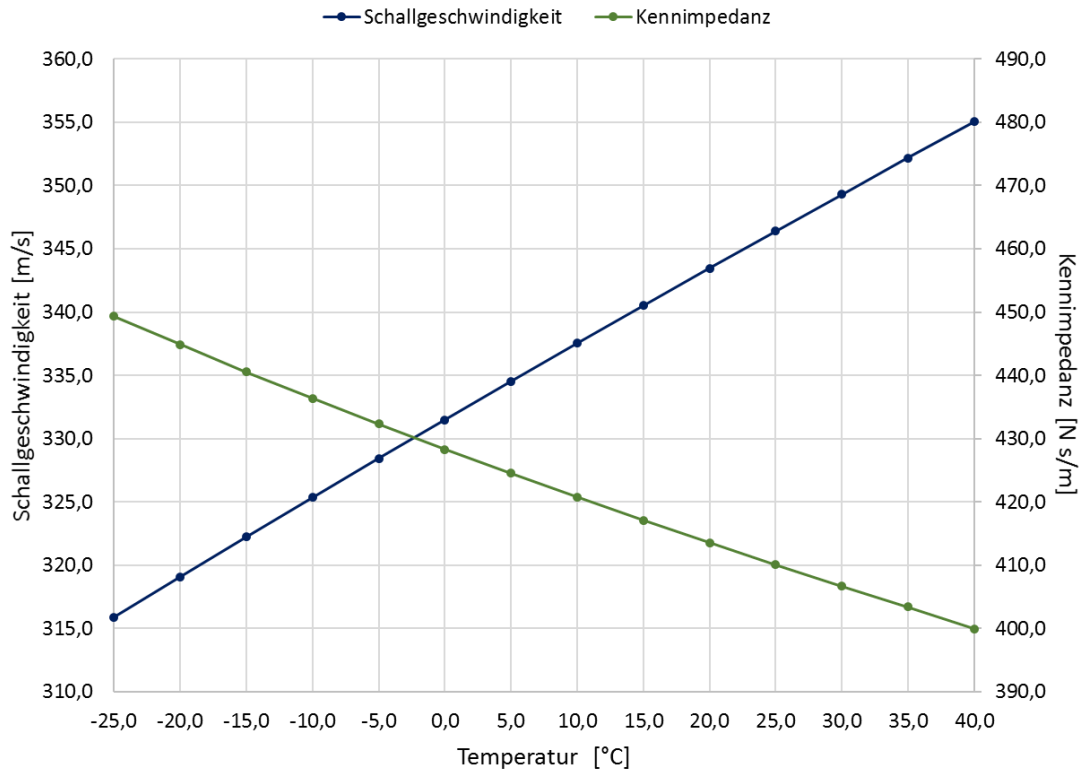


Abbildung 2 Abhängigkeiten der Schallgeschwindigkeit und der Kennimpedanz von der Temperatur auf Meereshöhe in trockener Luft

Natürlich kann man diese Impedanz bei anderem Umgebungsdruck bei anderen Temperaturen erreichen. Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit der Kennimpedanz bei verschiedenen Höhen und bei unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit. Bei 500 m Höhe ist die Bezugsatmosphäre im Winter bei 2°C bis 4°C die Regel. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit steigt mit der Temperatur, weil dann die Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann und deshalb die Luft leichter wird.

Im Anhang, Kapitel 5, werden Tabellen und Diagramme vorgehalten, die eine näherer Analyse erlauben. Die Werte wurden mit [2] ermittelt. (Shelquist Engineering, kein Datum)

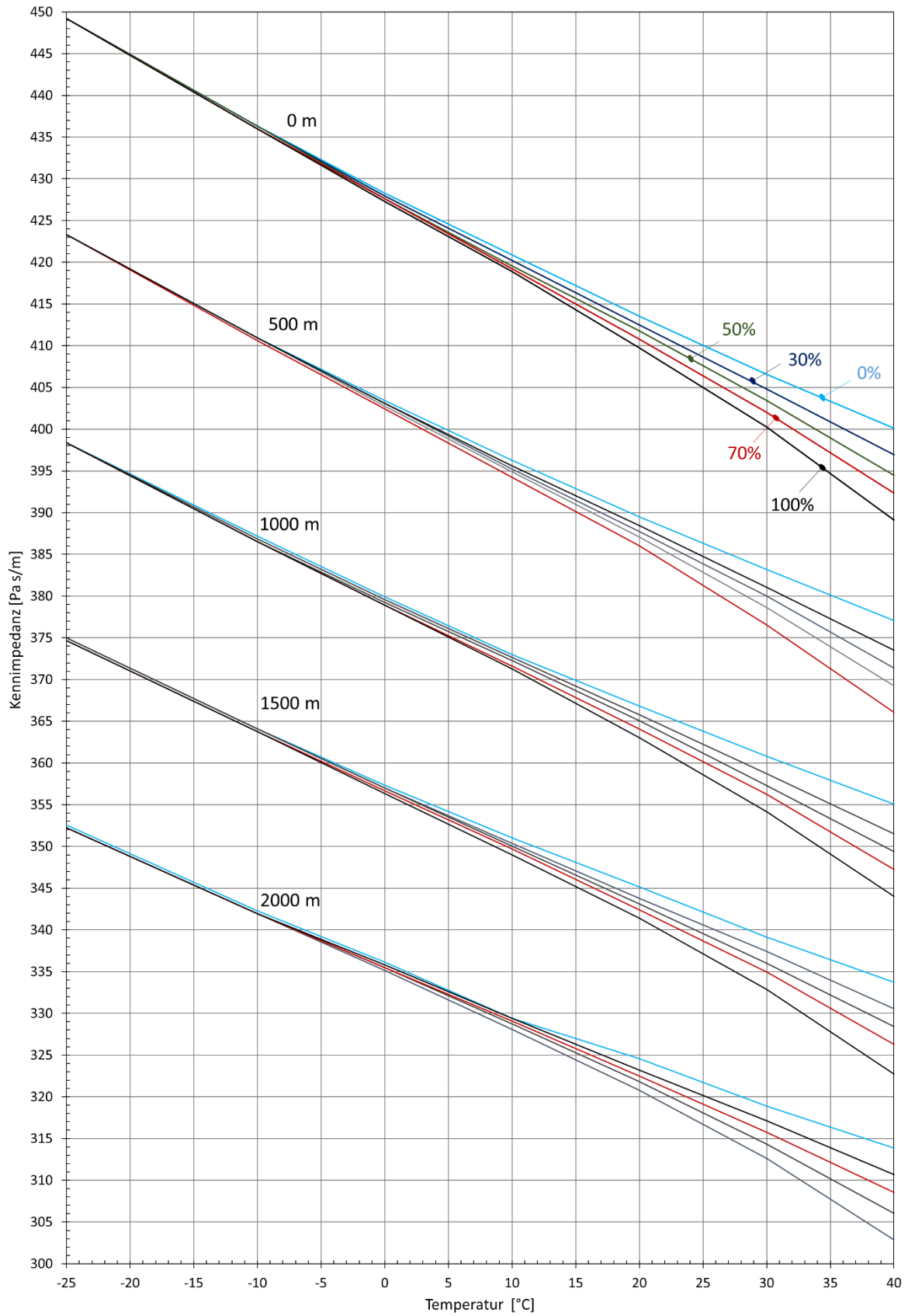


Abbildung 3 Kennimpedanz der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur
Parameter Höhe über NN und relative Luftfeuchtigkeit

3 Nachlässigkeiten in der Akustik

3.1 Der energieäquivalente Schalldruckpegel

Das System der Bezugsgrößen ist bei der Dezibelisierung eine Quelle von Nachlässigkeiten. An dem folgenden Beispiel in Gl. 17 wird ein Akustiker zunächst keinen Anstoß nehmen; Die Gleichung sieht so vertraut aus.

$$L_{Aeq}(1\text{ m}) = L_{WA} - 11\text{ dB} \quad \text{Gl. 17}$$

Der L_{WA} ist der A-bewertete Schallleistungspegel einer Punktschallquelle, der L_{Aeq} ist der A-bewertete energieäquivalente Schalldruckpegel in 1 m Abstand; Die 11 dB stammen von der so genannten geometrischen Dämpfung, die die Verteilung der Energie auf die Kugeloberfläche einer Kugel mit dem Radius von 1 m berücksichtigt.

$$\begin{aligned} L_{Aeq}(1\text{ m}) &= \left[10\lg\left(\frac{W_A}{W_0}\right) - 10\lg\left(4\pi \frac{r_{1\text{m}}^2}{r_0^2}\right) \right] \text{dB} \\ &= 10\lg\left[\frac{W_A}{4\pi r_{1\text{m}}^2} \frac{r_0^2}{W_0}\right] \text{dB} \\ &= 10\lg\left[\frac{\frac{W_A}{4\pi r_{1\text{m}}^2}}{\frac{W_0}{r_0^2}}\right] \text{dB} \\ &= 10\lg\left[\frac{I_A(1\text{ m})}{I_0}\right] \text{dB} \\ &= L_{I,A} \end{aligned} \quad \text{Gl. 18}$$

In der ausführlicher mit Bezugsgrößen geschriebenen Gl. 18 sei r_0 die Bezugsgröße für den Abstand.

Anmerkung

Ein Abstand ist per Definition positiv definit, der so gebildete Pegel deshalb ‚vollkommen‘. Die Bezugsgröße ist deshalb tatsächlich r_0 und nicht r_0^2 .

Wenn man die Frage beantworten möchte, welche Bezugsgröße zum Pegel $L_{Aeq}(1\text{ m})$ gehört, könnte man aus der Begriffsbildung erwarten, es sei p_0 . Die zur leichten Nachvollziehbarkeit schrittweise entwickelte Umformung löst auf, dass $L_{Aeq}(1\text{ m})$ ein Intensitätspegel ist! Natürlich mit der Bezugsgröße I_0 .

Die Intensität beschreibt den Fluss der Energie pro Zeiteinheit durch eine Flächeneinheit: Eigentlich der Betrag der vektoriellen Intensität, wenn der Fluss orthogonal durch die Fläche tritt.

Die textliche Definition des $L_{Aeq}(1\text{ m})$ enthält aber ‚Schalldruckpegel‘, allerdings verziert mit dem Attribut ‚energieäquivalent‘. Gl. 18 ist also noch nicht die vollständige Analyse. Es fehlt noch die Berechnung eines Schalldrucks aus der Intensität. Dabei kommt unausweichlich die Impedanz über das OHMSche Gesetz Gl. 8 ins Spiel, um die Schnelle aus Gl. 10 zu eliminieren.

Man könnte interpretieren, dass mit $L_{Aeq}(1\text{ m})$ der Schalldruckpegel einer Kugelwelle in 1 m Abstand von der Punktschallquelle gemeint ist, die die Energie pro Zeit- und Flächeneinheit transportiert. Dies ist aber ausgeschlossen, da die Kugelwellen-Impedanz von der Wellenlänge abhängt. Diese Wellenlängenabhängigkeit lässt sich mit der Frequenzabhängigkeit der A-Bewertung nur dann verbinden, wenn man das (Energie-)Spektrum der Quelle kennt. Gl. 17 gilt aber allgemein.

Man kann $L_{Aeq}(1\text{ m})$ nur so interpretieren, dass diese Größe der Schalldruckpegel einer ebenen Welle ist, die die gleiche Energie pro Zeit- und Flächeneinheit transportiert, wie in 1 m Abstand durch die Einheitsfläche auf der Kugeloberfläche tritt. Dann kann man die Umrechnung in Gl. 18 fortsetzen.

$$\begin{aligned}
 L_{Aeq}(1\text{ m}) &= L_{I,A} \\
 &= 10\lg\left[\frac{\{p v\}_{\text{ebene Welle}}}{I_0}\right] \text{ dB} \\
 &= 10\lg\left[\frac{p_{\text{ebene Welle}}^2}{Z_{\text{air}} I_0}\right] \text{ dB} \\
 &= 10\lg\left(\frac{p_{\text{ebene Welle}}^2}{p_0^2}\right) \text{ dB} - 10\lg(Z_{\text{air}} I_0 p_0^2) \text{ dB} \\
 &= 10\lg\left(\frac{p_{\text{ebene Welle}}^2}{p_0^2}\right) \text{ dB} - \left(10\lg\left(\frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{air},0}}\right) + 10\lg(I_0 p_0^2 Z_{\text{air},0})\right) \text{ dB} \\
 &= 10\lg\left(\frac{p_{\text{ebene Welle}}^2}{p_0^2}\right) \text{ dB} - 10\lg\left(\frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{air},0}}\right) \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Gl. 19

Anmerkung

$$\text{Es gilt } I_0 p_0^2 Z_{\text{air},0} = 1.$$

Die Interpretation des in Gl. 17 über die Schalleistung und die geometrische Ausbreitungsdämpfung bis zur Einheitskugel definierten energieäquivalenten A-bewerteten Schalldruckpegels einer Punktschallquelle ist nur scheinbar trivial. Es ist die Einführung des Schalldrucks einer ebenen Welle erforderlich, um die ‚Energieäquivalenz‘ auf einen Schalldruckpegel zu erreichen.

3.2 Schalldruck einer Kugelwelle

Der Schalldruck einer ebenen Welle ist eine Hilfsgröße. Dieser äquivalente Schalldruck ist keineswegs der Schalldruck, der in 1 m Abstand von der Kugelschallquelle gemessen wird. Der tatsächliche Schalldruck einer Kugelwelle hängt von der Wellenlänge ab, bzw. vom Betrag des Wellenvektors $k = |\underline{k}|$.

$$P_{\text{ebeneWelle}} = \rho c v_{\text{ebeneWelle}} \quad \text{Gl. 20}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{Kugelwelle}} &= \rho c \left(\frac{k^2 r^2}{1 + k^2 r^2} + j \frac{k r}{1 + k^2 r^2} \right) v_{\text{Kugelwelle}} \\ &= \rho c (B e^{j\varphi}) v_{\text{Kugelwelle}} \end{aligned} \quad \text{Gl. 21}$$

Gl. 20 und Gl. 21 stellen die Berechnung des Schalldrucks aus gegebener Schnelle für die ebene Welle und für die Kugelwelle gegenüber. Für den Fall, dass beide Wellen dieselbe Schnelle aufweisen, beschreibt der Betrag B das Verhältnis des Schalldrucks der Kugelwelle zum Schalldruck der ebenen Welle. φ ist der Winkel zwischen Schallschnelle und Schalldruck der Kugelwelle.

Gl. 21 zeigt, dass für große Abstände und große Wellenzahlen (hohe Frequenzen) der Schalldruck einer Kugelwelle in den der ebenen Welle übergeht. Für diese Fälle entspricht der energieäquivalente Schalldruckpegel nach Gl. 17 dem tatsächlich vorhandenen und messbaren Schalldruckpegel. Für kleine Abstände und kleinen Wellenzahlen ist das nicht so. Im Folgenden soll dieser Sachverhalt quantitativ dargestellt werden.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch den relativen Schalldruck der Kugelwelle (B) in 1 m Abstand ($r = 1$ m) von der Quelle über der Frequenz f $\left(f = \frac{kc}{2\pi} \right)$ bei vorgegebener

Schallgeschwindigkeit $\left(c = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$. In Abbildung 4 ist ebenfalls der Winkel zwischen Schalldruck und Schallschnelle der Kugelwelle bei gleichen Bedingungen eingetragen.

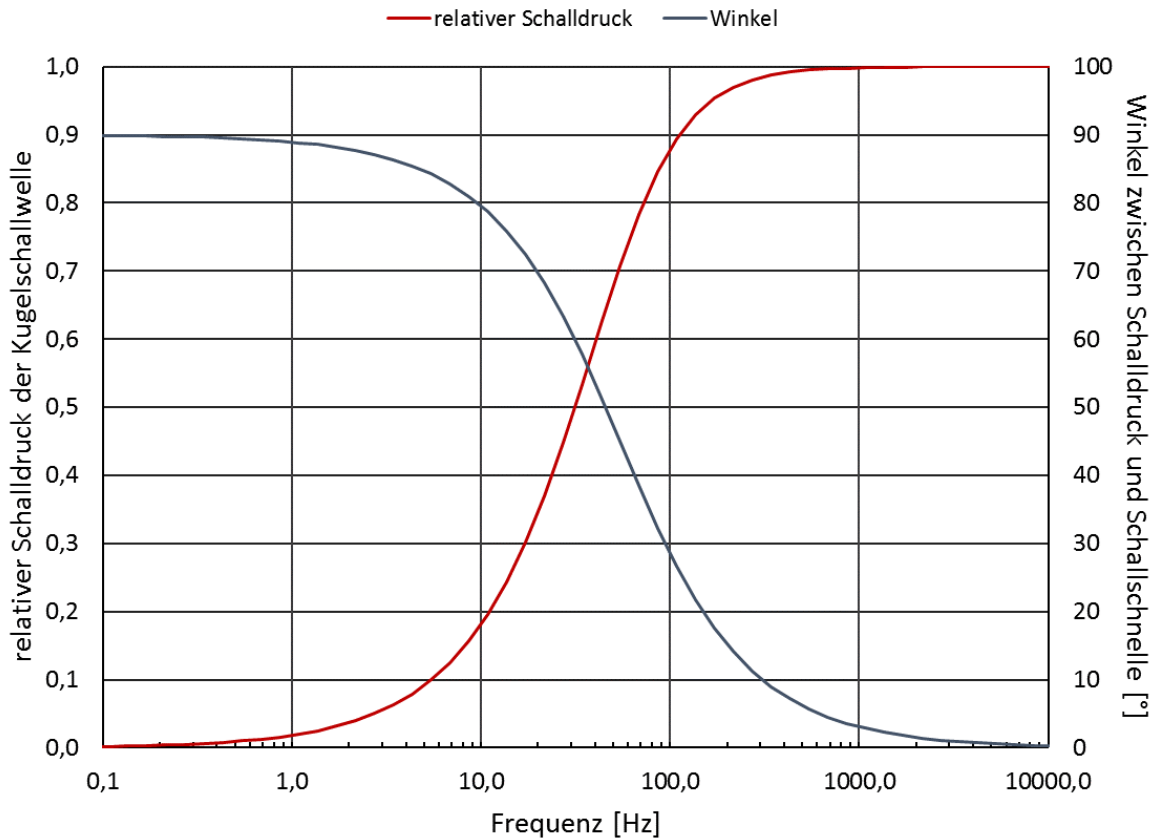


Abbildung 4 Verhältnis des Schalldrucks einer Kugelschallquelle in zum Schalldruck einer ebenen Welle und Winkel zwischen Schalldruck und Schallschnelle der Kugelwelle in Abhängigkeit der Frequenz in 1 m Abstand von der Quelle (auf der Einheitskugel)

Aus Abbildung 4 lässt sich entnehmen, dass sich der Schalldruck der ebenen Welle ab ca. 1000 Hz praktisch nicht mehr vom Schalldruck der Kugelschallquelle in 1 m Abstand unterscheidet. Für tiefere Frequenzen ist das bei weitem nicht mehr der Fall. Schon bei 100 Hz ist der Schalldruck der Kugelschallquelle um ca. 10% kleiner. Es folgt die wichtige Erkenntnis, dass der energieäquivalente Schalldruckpegel im Allgemeinen keine Messgröße, sondern eine selbst eine Ersatzgröße.

3.3 Impedanzkorrektur

Es kommt ein weiterer Aspekt hinzu. In Gl. 19 ist es zwar gelungen, einen energieäquivalenten Schalldruckpegel einzuführen und ihn aus dem Schalleistungspegel zu berechnen. Dies gelingt aber natürlich auf Kosten der Berücksichtigung der Impedanz.

$$A_{\text{impedanz}} = 10 \lg \left(\frac{Z_{\text{air}}}{Z_{\text{air},0}} \right) \text{ dB} \quad \text{Gl. 22}$$

In Gl. 22 ist dieser Einfluss als Impedanzkorrektur A_{impedanz} eingeführt. Die Impedanzkorrektur ist abhängig von der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und von der Dichte (Höhe über NN) der Luft, in die die Schalleistung abgestrahlt wird.

In gewisser Weise kommt also wieder die Wüste ins Spiel. An einem schwülen Sommertag auf einer Alm ist die Kennimpedanz durchaus 20% kleiner sein als $Z_{\text{air},0}$: die Impedanzkorrektur beträgt dann mehr als 1 dB.

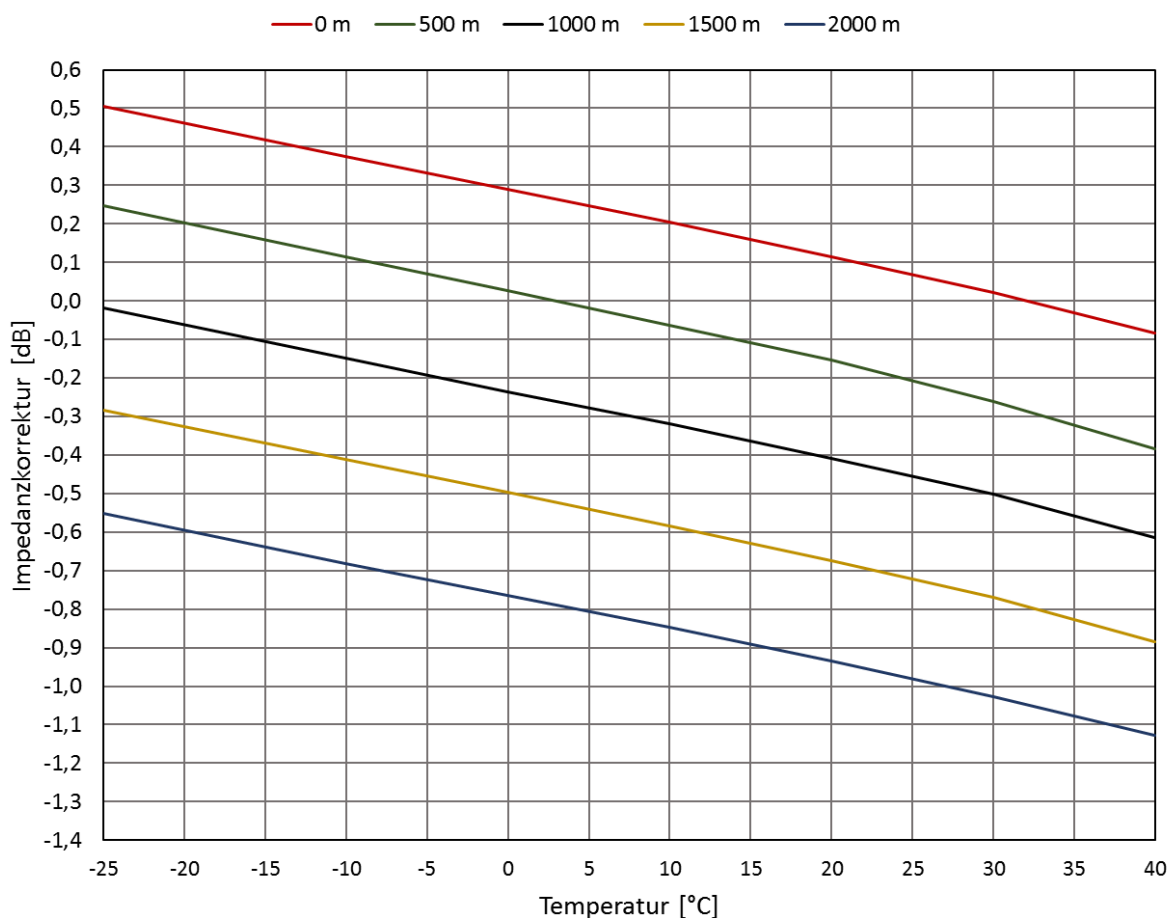


Abbildung 5 Impedanzkorrektur in Abhängigkeit von der Temperatur
Parameter Höhe über NN

Abbildung 5 und Abbildung 6 dokumentieren exemplarisch die Impedanzkorrektur für ausgewählte Randbedingungen.

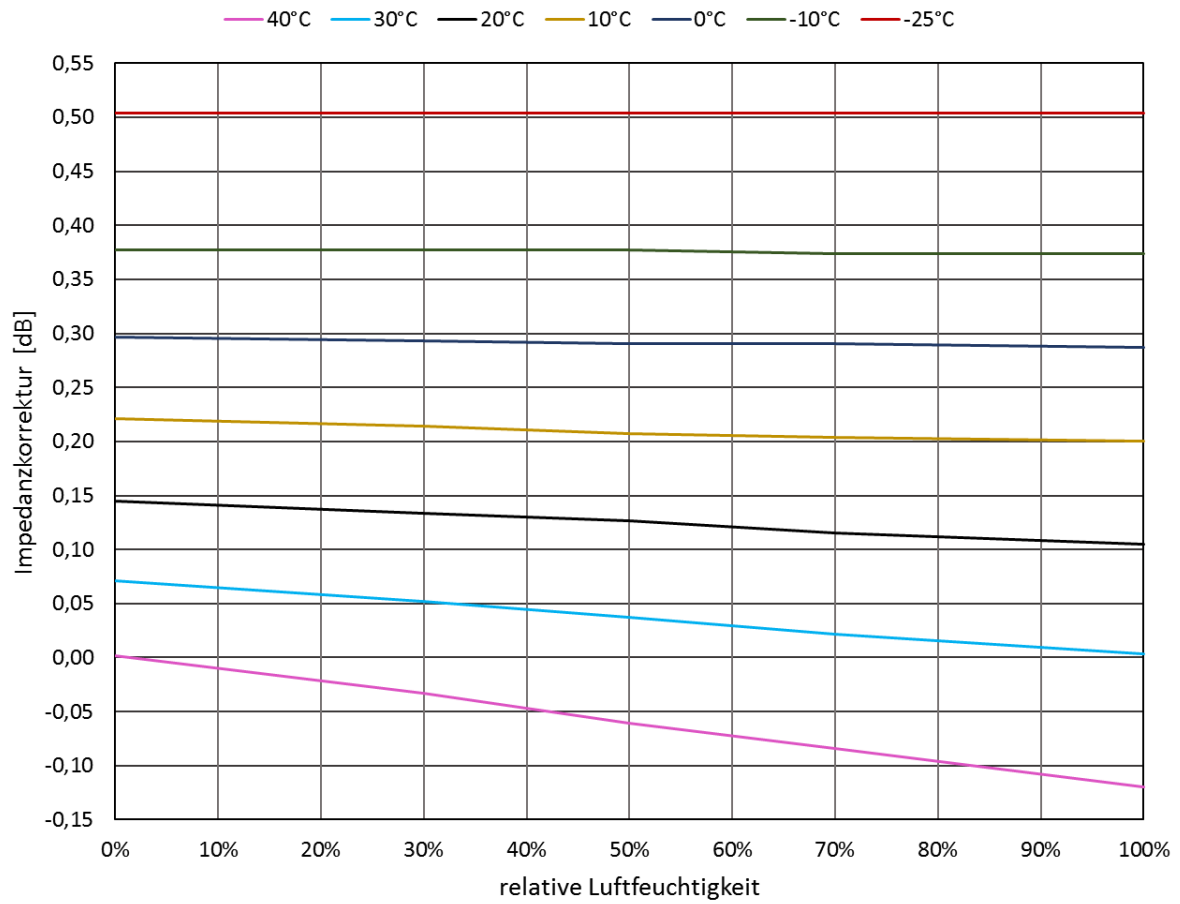


Abbildung 6 Impedanzkorrektur in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit bei 0 m Höhe

4 Hinweise für die Praxis der Verwaltungsakustik

Die Korrektur durch die Impedanz wird in den meisten Ausführungen und Stellungnahmen in der Verwaltungsakustik schlicht vernachlässigt und nicht diskutiert.

Auch die DIN ISO 9613-2 kennt keine Impedanzkorrektur. Dies ist auch nach dem eigenen Verständnis dieser Norm nicht erforderlich, weil sie für sich selbst nur in Anspruch nimmt, ein Vorhersageverfahren für Langzeit-Mittelungspegel mit der Genauigkeitsklasse 2 zu beschreiben. Es darf also unterstellt werden, dass die Impedanzkorrektur insgesamt in ihren Unsicherheiten untergeht. Beispielsweise in der DIN EN ISO 17201-1 findet man allerdings explizit die Impedanzkorrektur.

Im Regelfall ist die Impedanzkorrektur, wenn man sie als Unsicherheit betrachtet, klein gegenüber der Unsicherheit anderer Terme in den technischen Modellen. Im strengen Sinnen ist aber die Impedanzkorrektur selbst keine Unsicherheit und ein systematischer, vorauszuberechnender Einfluss. Die Unsicherheit der Impedanzkorrektur besteht in der Unsicherheit der Eingangsgrößen wie Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck und maßgebliche Luftfeuchtigkeit.

Bei der Jagd nach dem letzten Zehntel-Dezibel in der Verwaltungsakustik sollte und kann die Impedanzkorrektur durchaus eine Rolle spielen; insbesondere dann, wenn man die Höhe über Meeresspiegel einer Quelle mit einer bestimmten Leistung berücksichtigen kann. Dies gilt für Quellen, die stets das gleiche Energiedargebot unabhängig von der Höhe haben; z. B. bei Schießgeräuschen. Dort bestimmt die Munition den Umsatz in akustische Energie. Welcher Schalldruck dazugehört, regelt die Impedanz. Deshalb sind Immissionspegel von Schüssen mit der gleichen Waffe und der gleichen Munition auf hochliegenden Schießplätzen – in der Schweiz liegen einige auf über 1500 m Höhe über NN - im Mittel 1 dB niedriger als auf Schießplätzen im Küstenbereich.

In Datenblättern von geräuschemittierenden Maschinen findet man häufig Angaben zum Schalleistungspegel, allerdings ohne die Information, in welcher Höhe die Schalleistungsmessung durchgeführt wurde. Beispielsweise bei der Geräuschprognose einer Windkraftanlage wird dies ignoriert.

Es ist deshalb sachgerecht, in den einschlägigen Vorschriften zur Bestimmung der Typ-Schalleistung einzuführen, dass Quellhöhe über NN und der Umgebungsdruck, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit angegeben werden, damit man sachgerecht eine Impedanzkorrektur berücksichtigen kann. Besser noch wäre klare Regelung, dass alle

Schalleistungspegel unter den Bedingungen der Bezugsatmosphäre anzugeben sind. Jede Messung sollte darauf umgerechnet werden.

5 Anhang: Tabellen und Diagramme

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Temperatur	Schallgeschwindigkeit	Dichte der Luft																								
2			0 m					500 m					1000 m					1500 m					2000 m				
3			0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%
4	°C	m/s	kg/m ³																								
5	40	355,1	1,127	1,118	1,111	1,105	1,096	1,062	1,046	1,040	1,031	1,052	1,000	0,990	0,984	0,978	0,969	0,940	0,931	0,925	0,919	0,909	0,884	0,853	0,862	0,869	0,875
6	30	349,3	1,164	1,159	1,155	1,151	1,146	1,097	1,088	1,084	1,078	1,091	1,033	1,027	1,023	1,020	1,014	0,971	0,966	0,962	0,959	0,953	0,913	0,895	0,900	0,904	0,908
7	20	343,5	1,204	1,201	1,199	1,196	1,193	1,134	1,129	1,127	1,124	1,131	1,068	1,065	1,063	1,060	1,057	1,005	1,001	0,999	0,997	0,994	0,945	0,934	0,937	0,939	0,941
8	10	337,5	1,247	1,245	1,243	1,242	1,241	1,174	1,171	1,170	1,168	1,172	1,105	1,104	1,103	1,101	1,100	1,040	1,038	1,037	1,036	1,034	0,976	0,972	0,974	0,975	0,976
9	0	331,5	1,292	1,291	1,290	1,290	1,289	1,217	1,216	1,215	1,214	1,216	1,146	1,145	1,144	1,143	1,143	1,078	1,077	1,077	1,076	1,075	1,014	1,011	1,012	1,012	1,013
10	-10	325,4	1,341	1,341	1,341	1,340	1,340	1,263	1,263	1,263	1,262	1,263	1,190	1,189	1,188	1,188	1,188	1,119	1,119	1,119	1,118	1,118	1,052	1,051	1,051	1,051	1,051
11	-25	315,9	1,422	1,422	1,422	1,422	1,422	1,340	1,340	1,340	1,340	1,340	1,261	1,261	1,261	1,261	1,261	1,187	1,187	1,187	1,186	1,186	1,116	1,115	1,115	1,115	1,115

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Temperatur	Schallgeschwindigkeit	Kennimpedanz in Luft																								
2			0 m					500 m					1000 m					1500 m					2000 m				
3			0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%
4	°C	m/s	Pa s/m																								
5	40	355,1	400,1	396,9	394,5	392,3	389,1	377,1	371,4	369,3	366,1	373,5	355,1	351,5	349,4	347,2	344,0	333,7	330,6	328,4	326,3	322,7	313,9	302,9	306,1	308,5	310,7
6	30	349,3	406,6	404,8	403,4	402,0	400,3	383,2	380,0	378,6	376,5	381,1	360,8	358,7	357,3	356,3	354,2	339,2	337,4	336,0	335,0	332,9	318,9	312,6	314,4	315,8	317,2
7	20	343,5	413,5	412,5	411,8	410,8	409,7	389,5	387,8	387,1	386,0	388,5	366,8	365,8	365,1	364,1	363,0	345,2	343,8	343,1	342,4	341,4	324,6	320,8	321,8	322,5	323,2
8	10	337,5	420,9	420,2	419,6	419,2	418,9	396,3	395,3	394,9	394,2	395,6	373,0	372,6	372,3	371,6	371,3	351,0	350,4	350,0	349,7	349,0	329,4	328,1	328,8	329,1	329,4
9	0	331,5	428,3	428,0	427,6	427,6	427,3	403,4	403,1	402,8	402,4	403,1	379,9	379,6	379,2	378,9	378,9	357,4	357,0	357,0	356,7	356,4	336,1	335,1	335,5	335,5	335,8
10	-10	325,4	436,3	436,3	436,3	436,0	410,9	410,9	410,9	410,9	410,6	410,9	387,2	386,8	386,5	386,5	386,5	364,1	364,1	364,1	363,7	363,7	342,3	341,9	341,9	341,9	341,9
11	-25	315,9	449,2	449,2	449,2	449,2	449,2	423,3	423,3	423,3	423,3	423,3	398,3	398,3	398,3	398,3	398,3	375,0	375,0	375,0	374,7	374,7	352,5	352,2	352,2	352,2	352,2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	Temperatur	Schallgeschwindigkeit	Impedanzkorrektur																								
2			0 m					500 m					1000 m					1500 m					2000 m				
3			0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%	0%	30%	50%	70%	100%
4	°C	m/s	dB																								
5	40	355,1	0,002	-0,033	-0,061	-0,084	-0,120	-0,256	-0,322	-0,347	-0,385	-0,298	-0,518	-0,561	-0,588	-0,614	-0,654	-0,786	-0,828	-0,856	-0,885	-0,932	-1,053	-1,208	-1,163	-1,128	-1,098
6	30	349,3	0,071	0,052	0,037	0,022	0,003	-0,187	-0,222	-0,238	-0,263	-0,210	-0,448	-0,473	-0,490	-0,503	-0,528	-0,717	-0,739	-0,757	-0,771	-0,798	-0,984	-1,071	-1,046	-1,027	-1,008
7	20	343,5	0,144	0,134	0,126	0,115	0,105	-0,116	-0,135	-0,143	-0,154	-0,127	-0,376	-0,388	-0,397	-0,409	-0,421	-0,640	-0,657	-0,666	-0,675	-0,688	-0,908	-0,958	-0,944	-0,935	-0,926
8	10	337,5	0,221	0,214	0,207	0,204	0,200	-0,041	-0,052	-0,055	-0,063	-0,048	-0,304	-0,308	-0,312	-0,319	-0,323	-0,567	-0,575	-0,580	-0,584	-0,592	-0,843	-0,861	-0,852	-0,847	-0,843
9	0	331,5	0,297	0,293	0,290	0,290	0,287	0,037	0,034	0,030	0,026	0,034	-0,224	-0,228	-0,232	-0,235	-0,235	-0,490	-0,494	-0,494	-0,498	-0,502	-0,755	-0,768	-0,764	-0,764	-0,760
10	-10	325,4	0,377	0,377	0,377	0,374	0,374	0,117	0,117	0,117	0,114	0,117	-0,142	-0,145	-0,149	-0,149	-0,149	-0,409	-0,409	-0,409	-0,413	-0,413	-0,677	-0,681	-0,681	-0,681	-0,681
11	-25	315,9	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504	0,246	0,246	0,246	0,246	0,246	-0,018	-0,018	-0,018	-0,018	-0,018	-0,281	-0,281	-0,281	-0,284	-0,284	-0,548	-0,552	-0,552	-0,552	-0,552

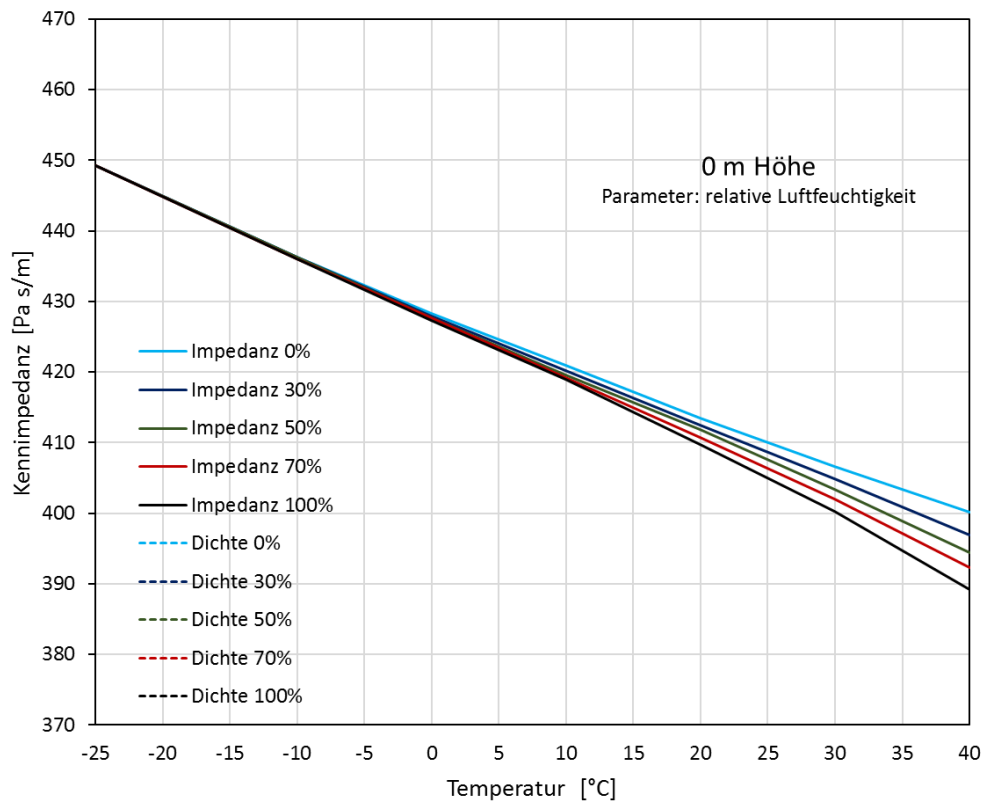


Abbildung 7 Kennimpedanz und Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur auf Meereshöhe

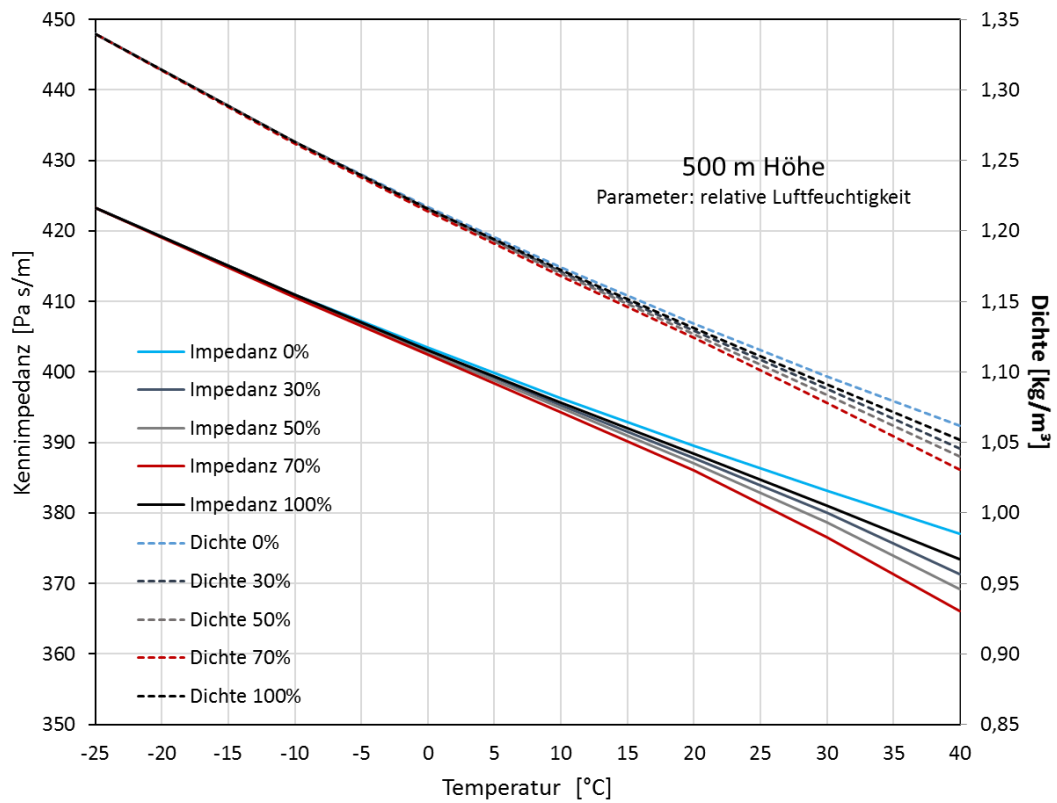


Abbildung 8 Kennimpedanz und Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur in 500 m Höhe

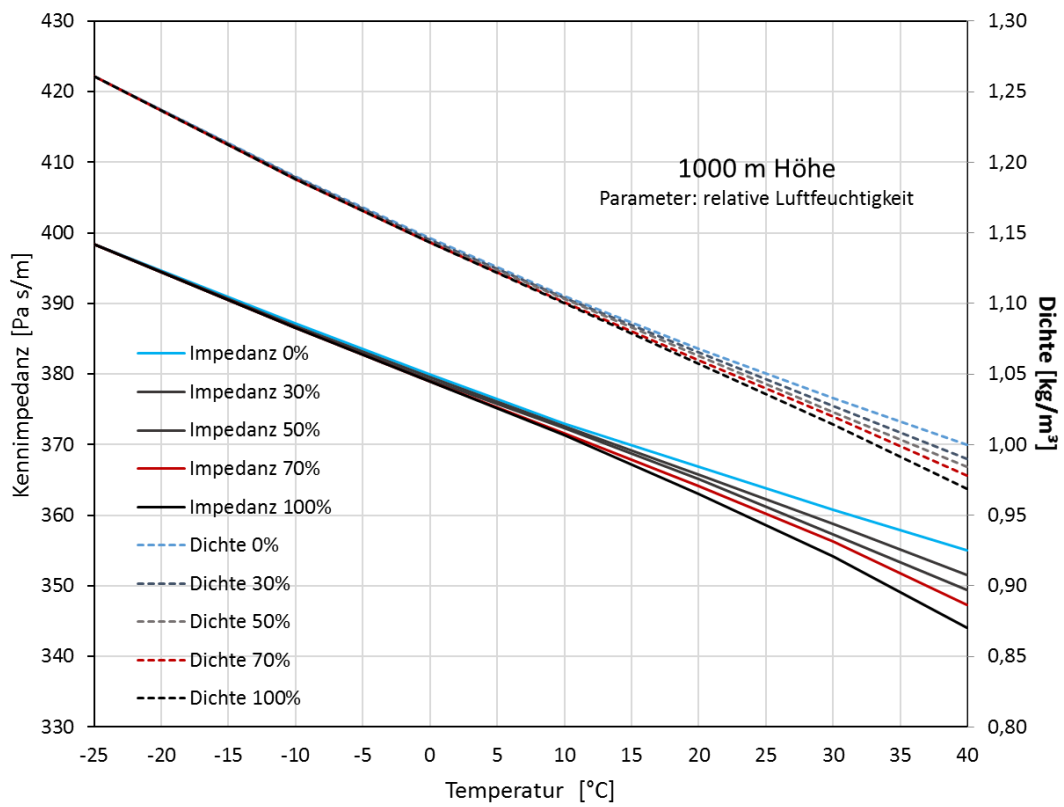


Abbildung 9 Kennimpedanz und Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur in 1000 m Höhe

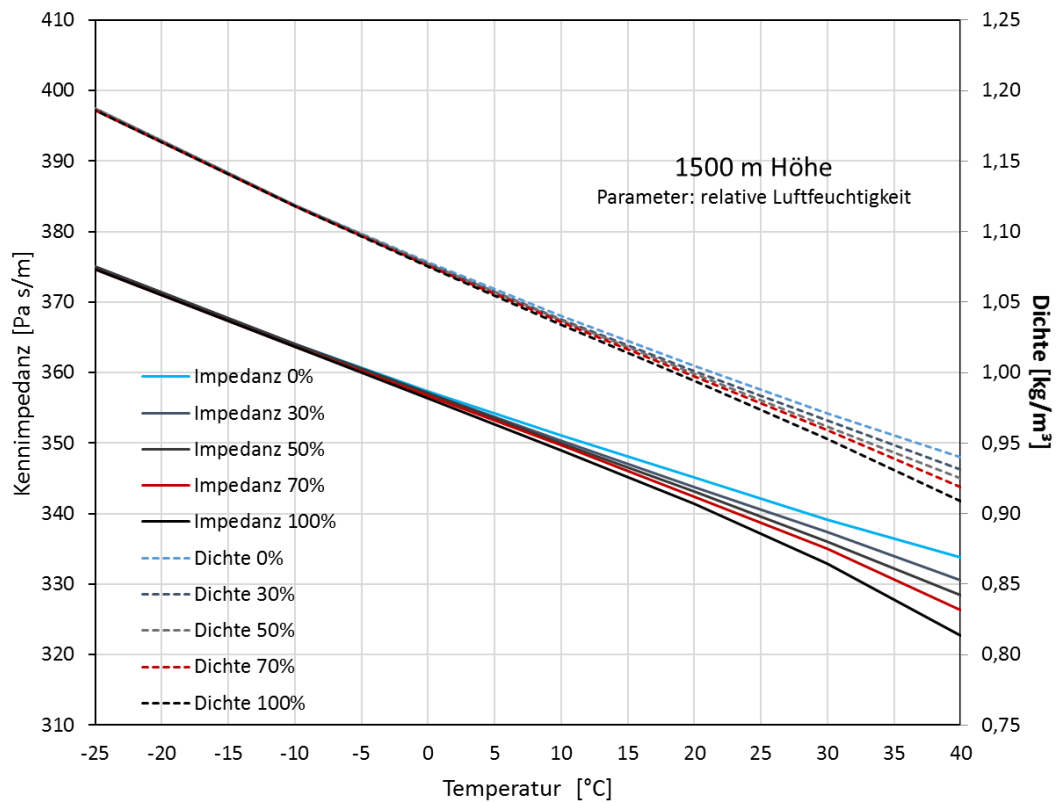


Abbildung 10 Kennimpedanz und Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur in 1500 m Höhe

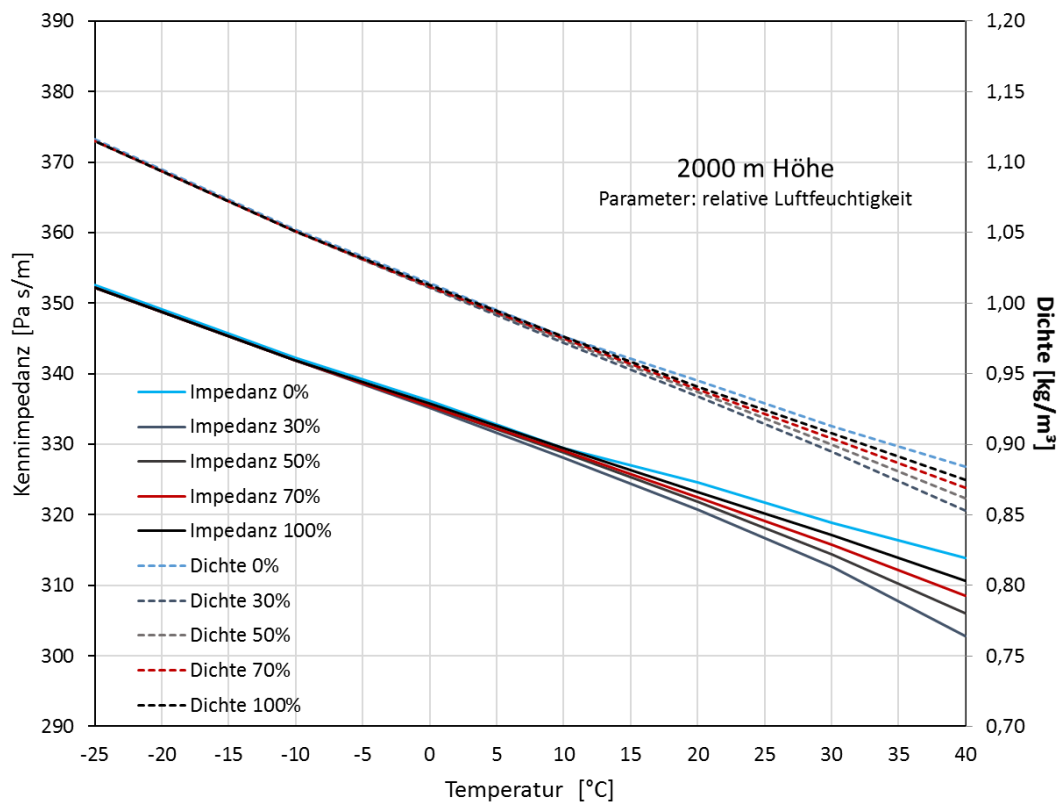


Abbildung 11 Kennimpedanz und Dichte in Abhängigkeit von der Temperatur in 2000 m Höhe

6 Verweise

- [1] IEC 61672-1, CEI 61672-1:2013-09, Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications
- [2] Shelquist Engineering, Density Altitude Calculator – using relative humidity
https://wahiduddin.net/calc/calc_da_rh.htm
- Cervus Consult Bibliography. (2014). *Normen & Richtlinien {NR{Organisation(en)}{Nummer}{Jahr/Ausgabe}}*.
(kein Datum). *DIN 45687 Akustik — Software-Erzeugnisse zur Berechnung der Geräuschimmissionen im Freien — Qualitätsanforderungen und Prüfbestimmungen*. Beuth Verlag.
- DIN CEN TS 17935. (2003). *DIN CEN TS 17935 Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 5: Produktspezifische Merkmale; In-situ-Werte der Schallreflexion und der Luftschalldämmung*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag.
- (kein Datum). *DIN EN ISO 17201-1: Akustik — Geräusche von Schießplätzen — Teil 1 Messung der Quelldaten von Mündungsknallen*. Norm.
- (kein Datum). *DIN EN ISO 17201-2: Akustik — Geräusche von Schießplätzen — Teil 2 Schätzung der Quelldaten von Mündungsknallen (ISO/DIS 17201-2:2004)*. Norm.
- (kein Datum). *DIN EN ISO 17201-3 : Akustik — Geräusche von Schießplätzen — Teil 3 „Richtlinie für die Ausbreitungsrechnung“*. Norm.
- DIN ISO 9613-2. (1999). *DIN ISO 9613-2 Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth-Verlag.
- HARMONOISE. (kein Datum). *Harmonised Accurate and Reliable Methods for the EU - Directive on the Assessment and Management of Environmental Noise, WP 3: Engineering mod-els, PROGRAMMING THE POINT-TO-POINT PROPAGATION MODEL*. EU Directive, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Département.
- (2013). *IEC 61672-1 Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications (CEI 61672-1:2013-09)*. Norm.
- (kein Datum). *ISO 13474 Acoustics — Framework for calculating a distribution of sound exposure levels of impulsive sound events for the purposes of environmental noise assessment, FDIS*. Norm.
- (kein Datum). *ISO 1996-1:2003-08, “Akustik - Beschreibung, Messung und Beurteilung von Umgebungslärm - Teil 1: Grundlegende Größen und Beurteilungsverfahren*. Norm.
- (kein Datum). *ISO 1996-2: Akustik - Beschreibung, Beurteilung und Messung von Umweltlärm - Teil 2: Bestimmung des Umgebungslärmpegels, Ausgabe 2007-03*.
- Shelquist Engineering. (kein Datum). Abgerufen am 30. 7 2016 von Density Altitude Calculator – using relative humidity: https://wahiduddin.net/calc/calc_da_rh.htm
- Wikipedia. (kein Datum). *Weber-Fechner-Gesetz*. Abgerufen am 2016 von <https://de.wikipedia.org/wiki/Weber-Fechner-Gesetz>.

7 Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung	Bemerkung
c	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Schallgeschwindigkeit	
E	---	Exposition	Allgemeine Exposition
E_p	Pa^2s	Schalldruck-Exposition	
E_v	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Schallschnelle-Exposition	
f	Hz	Frequenz	
j		imaginäre Einheit	
k	$\frac{1}{\text{m}}$	Betrag des Wellenzahlvektors	
p	Pa	(Schall)-Druck	
v	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	(Schall)-Schnelle	
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	(Luft)-Dichte	
r	m	Abstand	vom Mittelpunkt der Kugelwelle
T	K	Temperatur	
t	s	Zeit	
τ	s	Dauer	Zeitdifferenz $t_2 - t_1$ eines Zeitpaares t_1, t_2 mit $t_2 > t_1$
W	w	(Schall)-Leistung	
Z	---	Impedanz	Verhältnis zweier Feldgrößen, deren Produkt eine Leistung ist
Z_{air}	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}}$	(Schall)-Kennimpedanz der Luft	

8 Über „Bella Acustica – De Bello Acustico“



**Eine Sammlung von Aufsätzen
zu ausgewählten Themen der Akustik
aus der ganz persönlichen Sicht des Autors**

	Prolog Die Schöne und der Krieg	kwhdba.00.01 2018-10-03	E
	Dezibels Warum sich Akustiker in der Wüste am wohlsten fühlen	kwhdba.01.01 2018-10-07	E
	Bewertungen Wie die Ohren hören sollten	kwhdba.02.01 2016-11-09	E
	Zeit begreifen Zeitbegriffe	kwhdba.03.00 2016-11-12	F
	Rote Rosen Prognosen mit dem Schallwetter	kwhdba.04.00 2016-11-12	I
	Pegelsalat Zur systematischen Kennzeichnung von Schallpegeln	kwhdba.05.00 2016-11-12	F
	Vom Harten und Weichen Bodenreflexionen im Freien	kwhdba.06.00 2016-11-12	I
	Atmosphärische Störungen Über Messungen im Freien	kwhdba.07.00 2016-11-21	F
	Projectile Sound To Whom It May Concern	kwhdba.08.01 2018-08-22	E
	Überreichweiten Über Zonen abnormaler Hörbarkeit	kwhdba.09.1 2018-09-17	E
	Götzenverehrung DIN ISO 9613	kwhdba.10.0 2018-10-06	K

Stand	I	Idee	erste Skizze	---	E	Entwurf	kurz vor druckreif	web
	F	Fragmente	erste Abschnitte oder Kapitel	---	D	Druck	Druckversion	web
	K	Konzept	Konzept ohne Sprachprüfung	web				

Impressum

Autor
Urheberrecht
Zitierhinweis
Verfügbarkeit
Kontakt



Karl-Wilhelm Hirsch
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>
Hirsch, K.-W.: „Bella Acustica – De Bello Acustica“, [Titel], [Kennung]
www.kwhirsch.de
post@kwhirsch.de