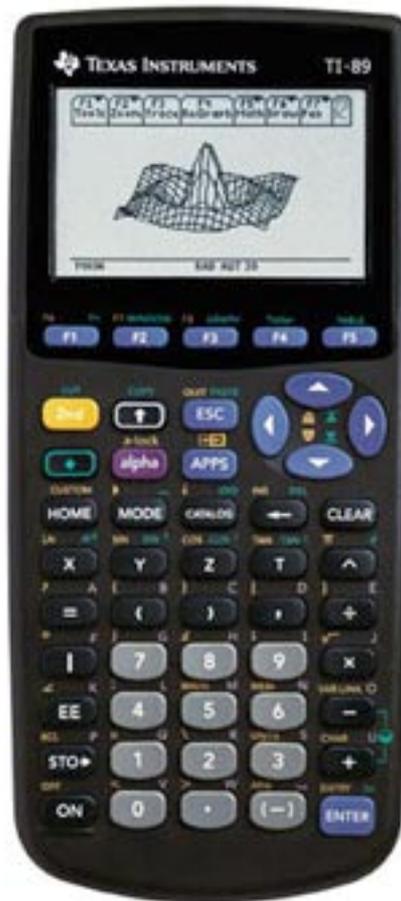


Pegelrechnung



SAE Hamburg – Script

Version 1.0

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Das internationale Einheitensystem (SI-System)	4
3. Pegel	5
4. Aussteuerungsmesser	7
5. Pegel und Schallwahrnehmung	7
6. Bewertete Pegelmessungen	8
7. Überlagerung von Sinussignalen	9
8. Klirrfaktor	9
9. Signal-Rausch-Abstand	10
10. Übungsaufgaben	10

1. Einleitung

Dieses Script soll eine Einführung in das Thema Pegelrechnung bieten und ist als Ergänzung zur entsprechenden SAE-Vorlesung gedacht. Die aktuelle Version dieses Skriptes steht jederzeit unter <http://www.neuss-tontechnik.de/> zum Download bereit.

Für Hinweise zu Fehlern in diesem Script bin ich sehr dankbar. Am unkompliziertesten ist es, eine kurze E-Mail an: christoph@neuss-tontechnik.de zu schicken.

2. Das internationale Einheitensystem (SI-System)

Name	Abk.	Definition	Dim.
Meter	m	„Das Meter ist die Länge des Weges, den das Licht in Vakuum im 1/299 792 458 ten Teil einer Sekunde zurücklegt.“	L
Kilogramm	kg	„Das Kilogramm ist die Masse eines internationalen Prototyps des Kilogramm. Er ist ein Platin-Iridium-Zylinder, der im BIPM in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird.“	M
Sekunde	s	„Die Sekunde ist die Zeitdauer von 9 192 631 770 Schwingungsperioden einer Strahlung, die dem Übergang zwischen den zwei Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandsniveaus eines Cs ¹³³ Atoms entspricht.“	T
Ampere	A	„Das Ampere ist der konstante Strom, der, wenn er in zwei unendlich ausgedehnten Leitern mit vernachlässigbarem Querschnitt, die sich im Vakuum in einem Meter Abstand voneinander befinden, fließt, eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N pro Längeneinheit erzeugt.“	I
Kelvin	K	„Das Kelvin ist der 1/273,16 te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers.“	Θ
Mol	mol	„Das Mol ist die Menge einer Substanz, die so viel elementare Bestandteile enthält, wie sich Atome in 0,012 kg von Kohlenstoff-12 befinden.“	N
Candela	cd	„Die Candela ist die Lichtstärke in einer gegebenen Richtung einer monochromatischen Strahlungsquelle der Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hertz und einer Strahlstärke in diese Richtung von (1/683) Watt pro Steradian.“	J

Abgeleitete Einheiten

Hertz	Hz	Frequenz	f
Coulomb	C	El. Ladung	Q
Volt	V	El. Spannung	U
Ohm	Ω	El. Widerstand	R
Siemens	S	El. Leitwert	G
Weber	Wb	Magn. Fluß	Φ
Henry	H	Induktivität	L
Tesla	T	Magn. Flußdichte	B
Pascal	Pa	Druck	p
Newton	N	Kraft	F
Joule	J	Energie, Arbeit	W
Watt	W	Leistung	P

Vielfache und Teile von Einheiten

T	Tera	Billion	10^{12}
G	Giga	Milliarde	10^9
M	Mega	Million	10^6
K	Kilo	Tausend	10^3
h	Hekto	Hundert	10^2
da	Deka	Zehn	10^1
d	Dezi	Zehntel	10^{-1}
c	Centi	Hundertstel	10^{-2}
m	Milli	Tausendstel	10^{-3}
μ	Mikro	Millionstel	10^{-6}
n	Nano	Milliardstel	10^{-9}
p	Piko	Billionstel	10^{-12}
f	Femto	Billiardstel	10^{-15}
a	Atto	Trillionstel	10^{-18}

3. Pegel

In der gesamten Elektrotechnik und damit auch in der Tontechnik wird mit einer Vielzahl verschiedener Pegel gearbeitet (Dies können zum Beispiel Schalldruckpegel, Leistungspegel oder Spannungspegel sein). Allen gemein ist, daß sie mit der Pseudo-Einheit dB (Dezibel - Ein Dezibel versteht sich als zehnter Teil eines Bel.) versehen werden, doch geschieht die Berechnung auf leicht verschiedene Art.

Absolute Pegel

Für einige Angaben wird das logarithmische Maß als Ersatz für die eigentlichen Einheiten benutzt. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn ein zu großer Bereich abgedeckt werden muß (z.B. Luftdruckschwankungen von μPa bis Pa). Die Logarithmus-Funktion dient hier zur Abschwächung der hohen Werte, wobei ein Bezugswert festgelegt wird, der die Verbindung zur ‚echten‘ Einheit darstellt. Der Pseudo-Einheit dB wird bei absoluten Angaben ein Kürzel für den Einheitenbezug nachgestellt (z.B. dB_{SPL} [SPL=Sound Pressure Level]).

Leistungspegel:

$$p_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} \qquad P_0 = 1\text{mW} \qquad [p_p] = \text{dBm}$$

Schalldruckpegel:

$$L_p = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \qquad p_0 = 20 \mu Pa \qquad [L_p] = dB_{SPL} \text{ (auch dB(A), dB(B), dB(C))}$$

für bewertete Messungen)

Spannungspegel, Tonstudioteknik:

$$p = 20 \cdot \lg \frac{U}{U_0} \qquad U_0 = 0,775V \qquad [p] = dBu$$

Spannungspegel, HiFi-Technik:

$$p = 20 \cdot \lg \frac{U}{U_0} \qquad U_0 = 1V \qquad [p] = dBV$$

Relative Pegel

Für die Darstellung von Pegeldifferenzen gibt es eine eigenständige Rechenvorschrift. Sie ähnelt der für absolute Pegelangaben, setzt jedoch zwei absolute Werte ins Verhältnis, ohne einen Bezugspegel zu nutzen. Die relativen Pegel werden in dB (oft auch dBr) angegeben.

Relativer Leistungspegel:

$$p_p = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}$$

Relativer Schalldruckpegel:

$$p = 20 \cdot \lg \frac{p_2}{p_1}$$

Relativer Spannungspegel:

$$p = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1}$$

Verstärkung um den Faktor	1	1,4 = $\sqrt{2}$	2	3,2 = $\sqrt{10}$	4	10	20	40	50	100	1000
entspricht einer Addition von ... dB	0	3	6	10	12	20	26	32	34	40	60

Verstärkungsfaktoren
für Spannung /
Schalldruck

4. Aussteuerungsmesser

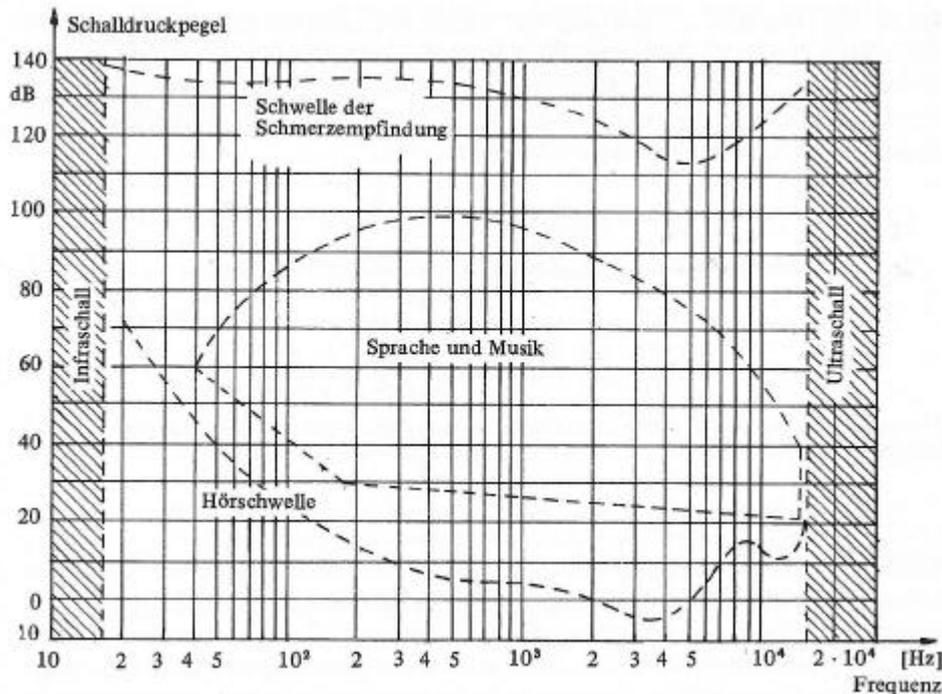
In der Studioteknik sind Aussteuerungsmesser wichtige Hilfsmittel um die Pegel am Eingang eines Gerätes optimal einzustellen. Ein zu niedriger Pegel verschlechtert den Signal-Rausch-Abstand (\rightarrow SNR), ein zu hoher Pegel hat Übersteuerungen der Elektronik und damit stärkere Verzerrungen zur Folge. Aussteuerungsmesser sollten so ausgelegt sein, daß ein optimaler Eingangspegel mit 0dB angezeigt wird. Von diesem Wert ausgehend werden andere Werte als relative Pegel angezeigt. Für verschiedene Einsatzgebiete gibt es festgelegte Bezugspegel.

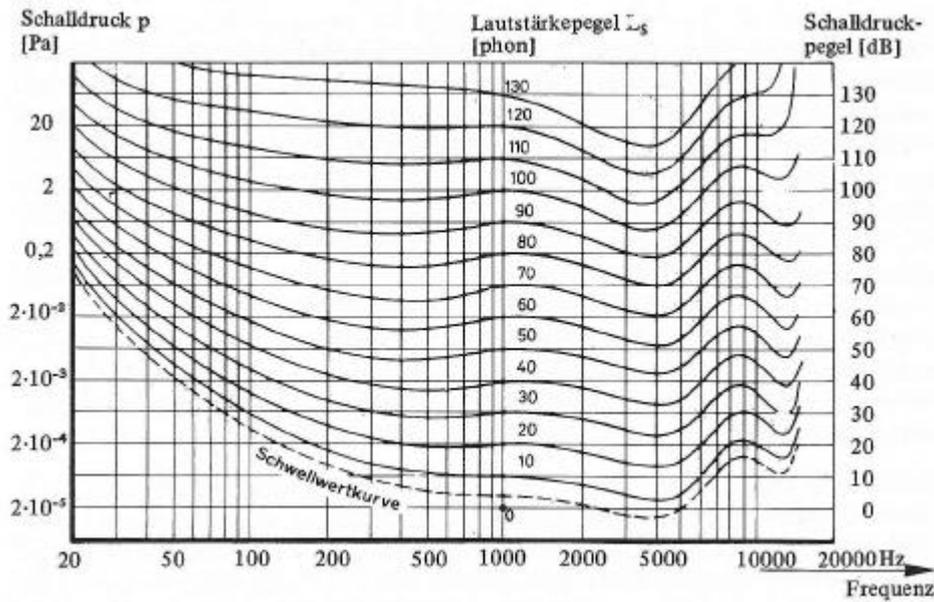
Festgelegte Bezugspegel:

Homerecordingpegel:	-10dBV = 0,32V
Studioreferenzpegel:	4dBu = 1,23V
Rundfunknormpegel:	6dBu = 1,55V

In der Praxis trifft man zwei verschiedene Arten von Aussteuerungsmessern an. Die erste ist das VU-Meter (Volume Unit Meter), das eine Ein- und Ausschwingzeit von etwa 35ms hat. Die zweite der Spitzenwertmesser (Peak Program Meter, PPM), der eine Einschwingzeit von 10ms und eine Rücklaufzeit von 3s (beides nach DIN) hat. VU-Meter eignen sich gut zur Darstellung der Subjektiven Lautheit eines Signals, während Spitzenwertmesser für technische Pegelüberwachung besser geeignet sind. Bei VU-Metern ist zu beachten, daß sie mit ca. +6dB Vorlauf eingemessen sind, damit Musiksingnale annähernd richtig dargestellt werden. Dieser Vorlauf hat zur Folge, daß Sinussingnale nicht richtig dargestellt werden und beim Einpegeln der Vorlauf berücksichtigt werden muß.

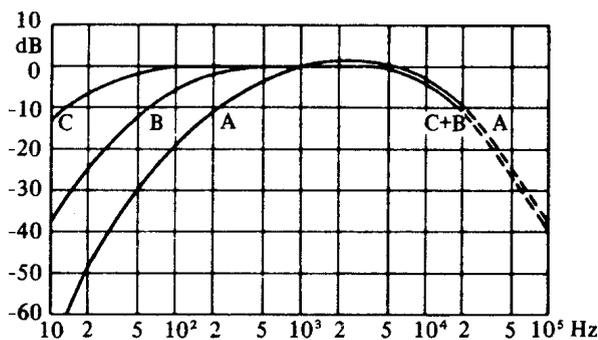
5. Pegel und Schallwahrnehmung





Das menschliche Gehör nimmt verschiedene Frequenzen unterschiedlich gut wahr. Der empfindlichste Bereich liegt in etwa zwischen 3 und 5kHz, während zu hohen und tiefen Frequenzen die Hörfähigkeit etwas abnimmt. Diesem Phänomen wird mit einer eigenständigen Einheit für den Lautstärkepegel Rechnung getragen. Der Lautstärkepegel wird in Phon angegeben. Er basiert auf den Kurven gleicher Lautstärkepegel für Sinustöne und entspricht bei 1kHz dem Schalldruck in dB_{SPL} . Die Hörschwelle liegt bei etwa 4phon und die Schmerzgrenze bei ca. 132phon. Eine Erhöhung des Lautstärkepegels um 10phon entspricht in etwa der doppelten Lautheit (wahrgenommene ‚Lautstärke‘).

6. Bewertete Pegelmessungen



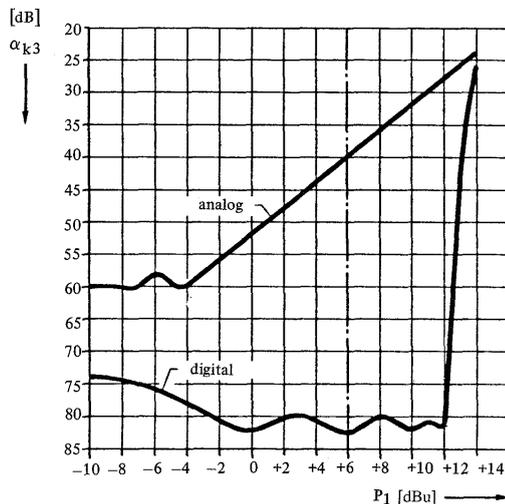
Aus den Kurven gleicher Lautstärkepegel wurde auch ein vereinfachtes Bewertungssystem für Schallpegelmessungen abgeleitet. Bei der Messung von ‚Lärm‘ werden die Schalldruck-Messgeräte mit Bewertungskurven belegt, die in etwa einen Ausgleich der Kurven gleicher Lautstärkepegel zur Folge haben. Je nach Pegelbereich wird eine von drei Bewertungskurven gewählt. Die Ergebnisse der Messungen werden dann in $dB(A)$, $dB(B)$ oder $dB(C)$ angegeben.

7. Überlagerung von Sinussignalen

Bei der Überlagerung von Sinussignalen ist für die Berechnung nicht nur der Pegel, sondern auch die Phasenlage der Signale zu beachten. In der Tabelle sind beispielhaft vier Phasenwerte für zwei Sinussignale mit gleichen Frequenzen angegeben. Bei abweichenden Frequenzen ist die Addition nicht mehr so leicht zu berechnen.

Signal	Phasendifferenz	Pegeländerung
Sinussignale gleicher Frequenz und Spannung	0°	+6 dB
	90°	+3 dB
	120°	0 dB
	180°	-∞ dB (Auslöschung)

8. Klirrfaktor



Bei der Übertragung von Signalen entstehen in praktisch allen Geräten zusätzliche, im ursprünglichen Signal nicht vorhandene, Frequenzanteile. Diese bezeichnet man als nichtlineare Verzerrungen. Das Verhältnis vom Effektivwert dieser Verzerrungen zum Effektivwert des Gesamtsignals bezeichnet man als Klirrfaktor. Er wird in % angegeben.

Der Klirrpegel bei der Aufzeichnung von Signalen verhält sich bei analoger Tonbandaufzeichnung ganz anders als bei digitaler Aufzeichnung. Bei analogem Tonband steigt der Klirrpegel relativ langsam an, während bei digitaler Aufzeichnung eine langsame Abnahme bis zur Aussteuerungsgrenze und dann ein sprunghafter Anstieg erfolgt.

Dies sollte man bei der Aussteuerung beachten. Ein Digitalgerät darf niemals übersteuert werden. Bei analogen Geräten wird dagegen der leichte Anstieg des Klirrfaktors als positive Eigenschaft ausgenutzt (z.B. Röhrenzerren, Bandsättigung).

9. Signal-Rausch-Abstand

In allen tontechnischen Systemen tritt neben den informationstragenden Signalen auch Rauschen auf. Der Signal-Rausch-Abstand (Signal/Noise Ratio) ist als relativer Pegel zwischen Signalleistung und Rauschleistung definiert.

$$SNR(dB) = 10 \cdot \lg \frac{P_s}{P_r} \quad P_s: \text{Signalleistung, } P_r: \text{Rauschleistung}$$

10. Übungsaufgaben

1. Geben Sie den Spannungspegel für 2,5 V in dBV an.
2. Geben Sie den Spannungspegel für 2,5 V in dBu an.
3. Geben Sie den Schalldruckpegel für 130mPa an.
4. Geben Sie den Leistungspegel für 2W an.
5. Wie groß ist der relative Spannungspegel bei einer Änderung von 1V auf 3,2V?
6. Wie groß ist der relative Spannungspegel bei einer Änderung von 3,2V auf 1,7V?
7. Wie groß ist der relative Leistungspegel bei einer Änderung von 1mW auf 5mW?
8. Welche Leistung ergibt sich, wenn man die Ausgangsleistung einer Endstufe von 300W um 6dB erhöht?
9. Wie hoch ist der Schalldruck an der Schmerzgrenze (132dB_{SPL})?
10. Welcher Schalldruck (in Pa!) ergibt sich, wenn der Schalldruck mit einem Pegel von 112dB_{SPL} verdoppelt wird?
11. Welcher Signal-Rausch-Abstand ergibt sich, wenn ein Signal mit einer Leistung von 36mW zu 10% von Rauschen überlagert wird?