

Formelsammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

Formel

**Technische Akustik**

**Formelsammlung**

2016

Jan Borgers

ammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

Formelsammlung

|                                                                     |          |
|---------------------------------------------------------------------|----------|
| 1. Grundlagen                                                       |          |
| • Bezugsgrößen für Schalldruck; Schallleistung                      | Seite 2  |
| • Filterkurven A-; B-; C-Gewichtung                                 | Seite 3  |
| • Terz-; Oktavfilter und deren Bandbreiten                          | Seite 5  |
| • Rauschsignale / Impulse                                           | Seite 7  |
| 2. Luftströmungswiderstand                                          |          |
| • Definition                                                        | Seite 10 |
| • Berechnung aus Faser- und Vlieseigenschaften                      | Seite 11 |
| • Luftströmungswiderstand perforierter, gelochter Folien und Platte | Seite 14 |
| 3. Luftschallabsorption /Luftschalldämpfung                         |          |
| • Schallkennimpedanz (Impedanzrohr ISO 10 534)                      | Seite 16 |
| • „Normierte“ Luftschallabsorption                                  | Seite 20 |
| • Hallraum (ISO 354)                                                | Seite 22 |
| • Bewertung des Absorptionsgrades nach ISO 11654                    | Seite 28 |
| 4. Luftschalldämmung /Luftschallisolation                           |          |
| • Schalldämmmass R basierend auf Schalleistung                      | Seite 31 |
| • Apamat                                                            | Seite 31 |
| • Decken-, Fensterprüfstand /LS-box                                 | Seite 31 |
| • Bewertetes Schalldämm-Maß                                         | Seite 34 |
| • Resonanz / Verlustfaktor / Speichermodule                         | Seite 36 |
| 5. Intensität / Schalleistung für die „Weiße Industrie“             | Seite 46 |
| 6. Kraftfahrzeugakustik                                             |          |
| • Schalldruckpegel und Ordnungsanalyse                              | Seite 48 |
| • Artikulationsindex                                                | Seite 49 |
| • Außengeräusch Vorbeifahrt ISO 362                                 | Seite 52 |
| Bauteil- und Fahrzeuganalyse; Benchmark mittels Geräuschsimulation  |          |
| • Mittlere äquivalente Luftschallabsorption einer KFZ-Karosserie    | Seite 53 |
| • Lautsprecher-simulation Reifen-, Motor-, Abgasmündungsgeräusch    | Seite 55 |
| • Karosserie Einfügedämmung                                         | Seite 58 |
| • Nachhallzeit im Fahrzeug                                          | Seite 59 |

#### 4. Luftschalldämmung / Luftschallisolation

Schallisolation ist, wenn die unten aufgeführten Fehler vermieden werden, grundsätzlich höher zu bewerten als Luftschallabsorption da durch Isolation eine deutlich höhere Minderung des Schalldruckpegels möglich ist. Jedoch kleinste „Fehlstellen“ in der „Tragwand“ oder dem aufgesetzten „Feder-Masse-System“ reduzieren die Isolationswirkung gewaltig.

Die untersuchten Systeme sind in der Regel Zwei-Massen-Systeme mit einer dazwischenliegenden Feder.

- Diese schwingungsfähigen Systeme besitzen einen „Unterkritischen Bereich“ d.h. Amplituden der „Eingangsseite“ und „Ausgangsseite“ sind gleich hoch.

- Gefolgt von einem „kritischen Bereich“, bei dem eine kleine Eingangsamplitude eine große Ausgangsamplitude hervorruft.

- Und einen „überkritischen Bereich“ bei dem die Eingangsamplitude mehr oder weniger stark gedämpft wird und somit eine kleinere Ausgangsamplituden erzeugen.

Eine Verdopplung der „Masse“ lässt die Schallisolation um 6 dB ansteigen (gilt für Einwandssysteme und Feder-Masse-Systeme).

Man muss allerdings mit zunehmenden Wandstärken mit Koinzidenzeinbrüchen im hörbaren Frequenzbereich rechnen.

Eine Verdopplung der „Federdicke“ (weichere Feder = kleinere Federkonstante) bei Feder-Masse-Systemen lässt die Schallisolation um ca. 6 dB ansteigen.

Dadurch lässt sich, genügend Bauraum vorausgesetzt, Gewicht einsparen.

Die Resonanzfrequenz  $f = \sqrt{\frac{c}{m}}$  des Systems mit  $c$  als Federkonstante [N/mm<sup>2</sup>] und  $m$  als Masse [kg] wird entsprechend kleiner.

**Die Isolationswirkung eines Feder-Masse-Systems kann nur dann vollständig wirksam werden, wenn:**

- in der „Tragschicht“ keine Spalte oder Löcher vorhanden sind. Selbst kleinste nicht abgedeckte Löcher reduzieren die Isolation erheblich (Schlüssellocheffekt).

- die „Tragschicht“ vollflächig mit Dämpfungsmaterial und Deckschicht bedeckt ist. Auch hier gilt, 1% Lochanteil in Deckschicht und Dämpfung reduzieren die Wirksamkeit des Feder-Masse-Systems bereits deutlich.

**Schalldämmmass R basierend auf Schalleistung**

$$R = 10 * \lg\left(\frac{W_{ein}}{W_{durch}}\right)$$

mit  $W_{ein}$  als auf die Wand auftreffende, einfallende Schalleistung und  $W_{durch}$  als durch die Wand hindurchgehende Schalleistung

Berechenbar nach dem Berger'schen Massegesetz; nur gültig für senkrechten Schalleinfall.

$$R = 20 * \lg\left(\frac{\omega * m''}{2 * \rho_0 * c}\right) - 3 \text{ dB}$$

Mit  $m''$  als flächenbezogener Masse der Wand,  $\omega = 2 * \pi * f$  als Kreisfrequenz der Schallschwingung und  $\rho_0 * c$  als Kennimpedanz der Luft.

Wirkung des Berger'schen Massegesetzes:

- Anstieg der Schalldämmung um 6 dB pro Oktave
- Anstieg der Schalldämmung um 6 dB je Verdoppelung der flächenbezogenen Masse  $m''$

Die Berechnung des Transmission Loss einwandiger Platten erfolgt nach dieser Gleichung:

$$R = 20 * \lg(m'') + 20 * \lg(f) - 47,2$$

Mit TL als Transmission Loss (Dämmmaß) [dB], „ $m''$ “ als flächenbezogene Masse [kg/m<sup>2</sup>] und „ $f$ “ als Frequenz [Hz]

Messungen von Einwand- und Mehrmassen-Systemen erfolgen in

- APAMAT
- Decken- Fensterprüfstand
- LS-Box

Im **APAMAT** wird hauptsächlich Insertion Loss (Einfügedämmung) auf Basis einer bekannten Blechplatte bestimmt. Die Pegeldifferenz aus (Probe + Blech) und (Blech) ergibt bei schallreflektierende Probenoberflächen die Einfügedämmung der Probe.

Im **Decken-, Fensterprüfstand** nach ISO 140

$$R_I = L_{P1} + 10 * \lg\left(\frac{1}{4}\right) - [L_{In} + 10 * \lg\left(\frac{S_m}{S}\right)]$$

$L_{P1}$  als mittlerer Schalldruckpegel im Senderaum

$$L_{P1} = 10 * \lg\left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{LEQ_i}{10}\right)}\right)$$

über „ $n$ “ Messpunkte energetisch gemittelter Schalldruckpegel  $LEQ$

$L_{In}$  als über die Messfläche gemittelte Schallintensitätspegel im Empfangsraum

$$L_{In} = 10 * \lg\left(\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{Ii}}{10}\right)}\right)$$

über „n“ Messpunkte energetisch gemittelte Schallintensität  $L_I$

$S_m$  als gesamter Flächeninhalt der Messfläche(n)

$S$  als Flächeninhalt des zu prüfenden Prüfobjekts

$\frac{S_m}{S}$  ergeben bei gleicher Flächengröße den Wert 1 und damit  $\lg\left(\frac{S_m}{S}\right) = 0$

Anmerkung:  $[10 * \lg(1/4) = -6,0206]$

Für Mikrofonpositionen im Hallraum ergeben sich folgende Bedingungen für die Korrektur des Schalldruckpegels im Hallraum:

| Mikrofonposition                                                   | Der Schalldruckpegel ist höher um: |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Im Freifeld mindestens 1 m vom Lautsprecher oder der Wand entfernt | 0 dB                               |
| Im Nahfeld ca. 1-2 mm vor der Wand                                 | 3 dB                               |
| Im Nahfeld ca. 1 mm vor einer Raumkante                            | 6 dB                               |
| Im Nahfeld ca. 1 mm vor einer Raumecke                             | 9 dB                               |

In der **LS-Box** wird die Intensitätsdifferenz aus (Box ohne Probe) und (Box mit Probe) gebildet.

Abschätzungen und Simulationsrechnungen werden in WinFLAG durchgeführt

Die Isolationswirkung unterschiedlich großer und wirksamer Feder-Masse-Systeme (Zweiwand Systeme) lässt sich wie folgt berechnen:

$$TL = 10 * \lg\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) - 10 * \lg\left(\sum_{i=1}^n A_i * 10^{\left(\frac{TL_i}{10}\right)}\right)$$

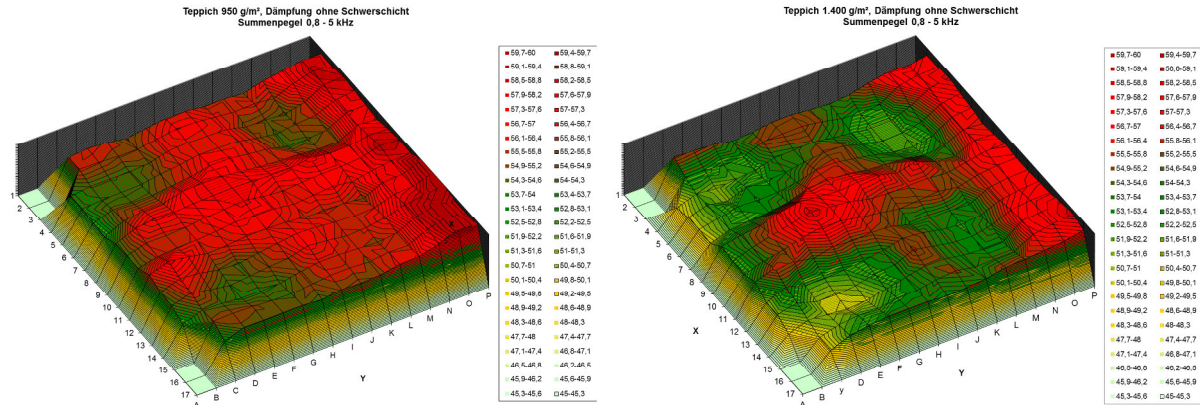
$$IL = 10 * \lg\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) - 10 * \lg\left(\sum_{i=1}^n A_i * 10^{\left(\frac{IL_i}{10}\right)}\right)$$

mit TL als Transmission Loss (Dämmmaß) [dB], IL als Insertion Loss (Einfügedämmung) [dB],  $(\sum_{i=1}^n A_i)$  als Gesamtfläche des Bauteils [m²],  $A_i * 10^{\left(\frac{TL_i}{10}\right)}$  als „Teil Transmission Loss“ [dB] und  $A_i * 10^{\left(\frac{IL_i}{10}\right)}$  als „Teil-Insertion Loss“ [dB] der „Teil-Fläche“  $A_i$ . Gilt natürlich auch in Frequenzspektren für einzelne Terzen oder Oktaven.

Im **Deckenprüfstand** können Einfügedämmung und Dämm-Maß mittels Intensitätsmethode bestimmt werden.

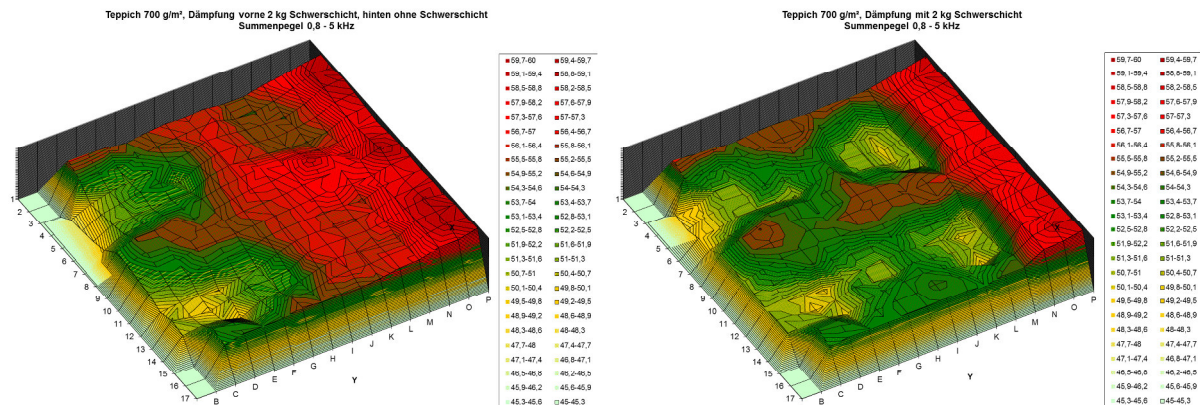
$$L_{Wn} = 10 * \lg\left(\sum_{i=1}^n A_i * 10^{\left(\frac{L_{ji}}{10}\right)}\right)$$

Formeln zum Transmission- und Insertion Loss siehe LS-Box



Teppich 900 g/m²

Teppich 1400 g/m²



Teppich 700 g/m² + Schwerfolie 2 kg/m² vorn

Teppich 700 g/m² + Schwerfolie 2 kg/m²

Da die sehr hohe Intensität im Bereich des unbedeckten Rücksitzblechs erhalten bleibt beträgt der Unterschied in der gesamten Schallintensität zwischen dem offenen Teppich 1400 g/m² und dem vollflächig mit Schwerfolie 2 kg/m² belegten Teppich nur 0,2 dB.

Bei verkleidetem Rücksitzblech betrüge die Einfügedämmung ca. 17 dB über 500-6300 Hz gerechnet.

| Bauteil                                       | L <sub>i</sub> 500 bis 6300 Hz | L <sub>i</sub> Differenz zum Blech |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Blech                                         | 85,2 dB                        | 0 dB                               |
| Teppich 900 g/m²                              | 81,4 dB                        | -3,8 dB                            |
| <b>Teppich 1400 g/m²</b>                      | <b>78,7 dB</b>                 | <b>-6,5 dB</b>                     |
| Teppich 700 g/m² + Schwerfolie 2 kg/m² vorn   | 79,6 dB                        | -5,6 dB                            |
| <b>Teppich 700 g/m² + Schwerfolie 2 kg/m²</b> | <b>78,5 dB</b>                 | <b>-6,7 dB</b>                     |

**Bewertetes Schalldämmmaß** nach ISO 717-1 (Messungen und deren Ergebnisse nach ISO 140 mit Messgenauigkeit 0,1 dB)

Der „Einzahlwert“ Bewertetes Schalldämm-Maß  $R_w$  wird wie folgt aus dem Schalldämm-Maß  $R$  berechnet:

Um die Ergebnisse von Messungen, durchgeführt nach ISO 140-xx in Terzbändern (oder Oktavbändern), gegeben auf 0,1 dB zu bewerten, wird die zutreffende Bezugskurve in Schritten von 1 dB gegen die Messwertkurve verschoben, bis die Summe der ungünstigen Abweichungen so groß wie möglich wird, jedoch nicht mehr als 32 dB bei Messungen in Terzbändern oder 10 dB bei Messungen in Oktavbändern.

Eine ungünstige Abweichung ist gegeben, wenn das Messergebnis niedriger als der Bezugswert ist. Nur ungünstige Abweichungen werden berücksichtigt.

Formel für Excel Tabellen:

$$= \text{wenn}(\text{versch. Bez. Wert} - R_i < 0; 0; \text{versch. Bez. Wert} - R_i)$$

mit *versch. Bez. Wert* als Wert der verschobenen Bezugskurve  
und  $R_i$  als Messwert aus Messung nach ISO 140-xx

Tabelle der Bezugswerte für die Luftschalldämmung

| Frequenz<br>Hz | Bezugswert<br>dB |             |
|----------------|------------------|-------------|
|                | Terzbänder       | Oktavbänder |
| 100            | 33               |             |
| 125            | 36               | 36          |
| 160            | 39               |             |
| 200            | 42               |             |
| 250            | 45               | 45          |
| 315            | 48               |             |
| 400            | 51               |             |
| <b>500</b>     | <b>52</b>        | <b>52</b>   |
| 630            | 53               |             |
| 800            | 54               |             |
| 1000           | 55               | 55          |
| 1250           | 56               |             |
| 1600           | 56               |             |
| 2000           | 56               | 56          |
| 2500           | 56               |             |
| 3150           | 56               |             |



Beispiele hierzu:

| Tür KFZ Absorptionsraum 2.2.2009 |         |                                |                                 | Objekt aus ISO 717-1 Seite 11 |         |                                  |                                 |
|----------------------------------|---------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------|----------------------------------|---------------------------------|
| Frequenz [Hz]                    | Ri [dB] | Bezugswerte verschoben um 1 dB | Ungünstige Abweichung           | Frequenz [Hz]                 | Ri [dB] | Bezugswerte verschoben um -22 dB | Ungünstige Abweichung           |
| 20                               | 5,7     | #NV                            | #NV                             | 20                            | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| 25                               | 13,3    | #NV                            | #NV                             | 25                            | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| 31,5                             | 15,9    | #NV                            | #NV                             | 31,5                          | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| 40                               | 19,4    | #NV                            | #NV                             | 40                            | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| 50                               | 17,4    | #NV                            | #NV                             | 50                            | 18,7    | #NV                              | #NV                             |
| 63                               | 23,7    | #NV                            | #NV                             | 63                            | 19,2    | #NV                              | #NV                             |
| 80                               | 24,7    | #NV                            | #NV                             | 80                            | 20      | #NV                              | #NV                             |
| 100                              | 30,9    | 34                             | 3,1                             | 100                           | 20,4    | 11                               | 0                               |
| 125                              | 35,8    | 37                             | 1,2                             | 125                           | 16,3    | 14                               | 0                               |
| 160                              | 39,1    | 40                             | 0,9                             | 160                           | 17,7    | 17                               | 0                               |
| 200                              | 36,7    | 43                             | 6,3                             | 200                           | 22,6    | 20                               | 0                               |
| 250                              | 39,3    | 46                             | 6,7                             | 250                           | 22,4    | 23                               | 0,6                             |
| 315                              | 40,7    | 49                             | 8,3                             | 315                           | 22,7    | 26                               | 3,3                             |
| 400                              | 48,6    | 52                             | 3,4                             | 400                           | 24,8    | 29                               | 4,2                             |
| 500                              | 50,9    | 53                             | 2,1                             | 500                           | 26,6    | 30                               | 3,4                             |
| 630                              | 55,4    | 54                             | 0                               | 630                           | 28      | 31                               | 3                               |
| 800                              | 58,1    | 55                             | 0                               | 800                           | 30,5    | 32                               | 1,5                             |
| 1000                             | 60,2    | 56                             | 0                               | 1000                          | 31,8    | 33                               | 1,2                             |
| 1250                             | 61      | 57                             | 0                               | 1250                          | 32,5    | 34                               | 1,5                             |
| 1600                             | 60,6    | 57                             | 0                               | 1600                          | 33,4    | 34                               | 0,6                             |
| 2000                             | 59,1    | 57                             | 0                               | 2000                          | 33      | 34                               | 1                               |
| 2500                             | 62,4    | 57                             | 0                               | 2500                          | 31      | 34                               | 3                               |
| 3150                             | 61,8    | 57                             | 0                               | 3150                          | 25,5    | 34                               | 8,5                             |
| 4000                             | 62,8    | #NV                            | #NV                             | 4000                          | 26,8    | #NV                              | #NV                             |
| 5000                             | 63,1    | #NV                            | #NV                             | 5000                          | 29,2    | #NV                              | #NV                             |
| 6300                             | 60,2    | #NV                            | #NV                             | 6300                          | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| 8000                             | 66,3    | #NV                            | #NV                             | 8000                          | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| 10000                            | 68      | #NV                            | #NV                             | 10000                         | #NV     | #NV                              | #NV                             |
| Korrekturwert                    |         |                                | Ungünstige Abweichung max 32 dB | Korrekturwert                 |         |                                  | Ungünstige Abweichung max 32 dB |
| 1                                |         |                                | 32                              | -22                           |         |                                  | 31,8                            |

