

**DIN 38455**

ICS 13.140; 17.140.99

Einsprüche bis 2022-12-21

**Entwurf****Berechnung der Hörempfindung Rauigkeit**

Calculation of the auditory sensation roughness

Calcul de la sensation auditive rugosité

**Anwendungswarnvermerk**

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-10-21 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter [www.din.de/go/entwuerfe](http://www.din.de/go/entwuerfe) bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter [www.entwuerfe.normenbibliothek.de](http://www.entwuerfe.normenbibliothek.de), sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an [nals@din.de](mailto:nals@din.de) möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter [www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe](http://www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe) oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter [www.dke.de/stellungnahme](http://www.dke.de/stellungnahme) abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 41 Seiten

DIN/VDI-Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS)

## Inhalt

|                                                                                                                                     | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Vorwort . . . . .                                                                                                                   | 4     |
| Einleitung . . . . .                                                                                                                | 5     |
| 1 Anwendungsbereich . . . . .                                                                                                       | 6     |
| 2 Normative Verweisungen . . . . .                                                                                                  | 6     |
| 3 Begriffe . . . . .                                                                                                                | 6     |
| 4 Symbole und Abkürzungen . . . . .                                                                                                 | 7     |
| 5 Modell zur Berechnung der Rauigkeit . . . . .                                                                                     | 9     |
| 5.1 Übersicht . . . . .                                                                                                             | 9     |
| 5.2 Außen- und Mittelohrfilterung . . . . .                                                                                         | 11    |
| 5.3 Auditorische Filterbank . . . . .                                                                                               | 13    |
| 5.4 Segmentierung . . . . .                                                                                                         | 15    |
| 5.5 Berechnung der spezifischen Lautheit . . . . .                                                                                  | 15    |
| 5.5.1 Gleichrichtung . . . . .                                                                                                      | 15    |
| 5.5.2 Berechnung blockweiser Effektivwerte . . . . .                                                                                | 15    |
| 5.5.3 Nichtlineare Signalverarbeitung . . . . .                                                                                     | 16    |
| 5.5.4 Berücksichtigung der Hörschwelle . . . . .                                                                                    | 17    |
| 5.6 Berechnung der Rauigkeit . . . . .                                                                                              | 18    |
| 5.6.1 Hüllkurvenberechnung . . . . .                                                                                                | 18    |
| 5.6.2 Skaliertes Leistungsspektrum der Hüllkurven . . . . .                                                                         | 19    |
| 5.6.3 Rauschunterdrückung . . . . .                                                                                                 | 19    |
| 5.6.4 Gewichtung in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz . . . . .                                                              | 21    |
| 5.6.5 Optionale Entropiegewichtung . . . . .                                                                                        | 26    |
| 5.6.6 Berechnung der spezifischen Rauigkeit . . . . .                                                                               | 27    |
| 5.7 Berechnung binauraler Rauigkeitswerte . . . . .                                                                                 | 29    |
| 5.8 Berechnung repräsentativer Größen . . . . .                                                                                     | 29    |
| Anhang A (informativ) Vergleich der in psychoakustischen Experimenten ermittelten mit<br>berechneten Werten der Rauigkeit . . . . . | 30    |
| Anhang B (informativ) Perzeptive und messtechnische Beurteilung der Rauigkeit technischer<br>Geräusche . . . . .                    | 39    |
| Literaturhinweise . . . . .                                                                                                         | 40    |

## Bilder

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild 1 — Grundlegende Struktur des Gehörmodells zur Berechnung der Rauigkeit . . . . .                                                                                                                                             | 10 |
| Bild 2 — Isophonen (DIN ISO 226:2003), die als Zielkurven für die Optimierung des Filters für<br>die Außen- und Mittel-/Innenohrfilterung verwendet wurden . . . . .                                                               | 11 |
| Bild 3 — Betrag der Übertragungsfunktion des Außen- und Mittel-/Innenohrfilters nach<br>Tabelle 1 . . . . .                                                                                                                        | 12 |
| Bild 4 — Exemplarische Darstellung des Tiefpassfilters für $z = 9$ ( $\Delta f = 185,27$ Hz) . . . . .                                                                                                                             | 14 |
| Bild 5 — Nichtlineare Funktion zwischen spezifischer Lautheit und Schalldruck (bezogen auf<br>$\tilde{p}_0 = 20$ $\mu$ Pa) entsprechend Gleichung (18) . . . . .                                                                   | 16 |
| Bild 6 — Schwellwert der spezifischen Lautheit als Funktion der Frequenz . . . . .                                                                                                                                                 | 17 |
| Bild 7 — Veranschaulichung der Wirkungsweise der Gewichtungsfunktion $w(l,k)$ . . . . .                                                                                                                                            | 20 |
| Bild A.1 — Berechnete Rauigkeiten amplitudenmodulierter Sinustöne für verschiedene<br>Trägerfrequenzen und verschiedene Modulationsfrequenzen im Vergleich zu den von<br>Fastl und Zwicker in [6] veröffentlichten Daten . . . . . | 31 |
| Bild A.2 — Abhängigkeit der Rauigkeit für dreieckförmige Einhüllendenformen . . . . .                                                                                                                                              | 32 |
| Bild A.3 — Berechnete Rauigkeit (in asper) für die nach Oetjen et al. [11] ermittelten<br>Geräuschpaare gleicher Rauigkeit (siehe Bild A.2) . . . . .                                                                              | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Bild A.4 — Berechnete relative Rauigkeiten amplitudenmodulierter Breitbandrauschsignale für verschiedene Modulationsfrequenzen im Vergleich zu den von Fastl und Zwicker in [6] veröffentlichten Daten . . . . .                                                                                                         | 34 |
| Bild A.5 — Berechnete relative Rauigkeiten von frequenzmodulierten Sinustönen für verschiedene Modulationsfrequenzen im Vergleich zu den von Fastl und Zwicker in [6] veröffentlichten Daten . . . . .                                                                                                                   | 35 |
| Bild A.6 — Berechnete relative Rauigkeiten von frequenzmodulierten Sinustönen für verschiedene Schalldruckpegel im Vergleich zu den von Fastl und Zwicker in [6] veröffentlichten Daten. Zusätzlich ist die von Fastl und Zwicker [6] hergeleitete, idealisierte Abhängigkeit vom Schalldruckpegel dargestellt . . . . . | 36 |
| Bild A.7 — Berechnete relative Rauigkeiten von frequenzmodulierten Sinustönen für verschiedene Frequenzhöbe im Vergleich zu den von Fastl und Zwicker in [6] veröffentlichten Daten . . . . .                                                                                                                            | 37 |
| Bild A.8 — Vergleich der von Vogel [12] ermittelten Abhängigkeit der wahrgenommenen Rauigkeit vom Modulationsgrad mit berechneten Ergebnissen . . . . .                                                                                                                                                                  | 38 |
| Bild B.1 — Vergleich der in einem Hörversuch mittels Größenschätzung bewerteten Rauigkeit mit der berechneten Rauigkeit für verschiedene technische Geräusche . . . . .                                                                                                                                                  | 39 |

## Tabellen

|                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1 — Filterkoeffizienten des Außen- und Mittel-/Innenohrfilters . . . . .                                                                                                        | 12 |
| Tabelle 2 — $M = 8$ Schwellwerte und Exponenten für die nichtlineare Funktion in Gleichung (18) . . . . .                                                                               | 16 |
| Tabelle 3 — Schwellwert der spezifischen Lautheit (in $\text{sone}_{\text{HMS}}/\text{Bark}_{\text{HMS}}$ ) als Funktion der Frequenzgruppe $z$ in $\text{Bark}_{\text{HMS}}$ . . . . . | 17 |
| Tabelle 4 — Korrekturwerte $E(\theta)$ . . . . .                                                                                                                                        | 23 |
| Tabelle 5 — Parameter für die Gewichtungsfunktion . . . . .                                                                                                                             | 24 |
| Tabelle B.1 — Beschreibung der technischen Geräusche aus Bild B.1 . . . . .                                                                                                             | 39 |

## **Vorwort**

Dieses Dokument wurde vom Unterausschuss NA 001-01-02-08 UA „Psychoakustische Messtechnik“ des Arbeitsausschusses NA 001-01-02 AA „Geräuschimmission — Ermittlung, Bewertung, Beurteilung“ des Normenausschusses Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI erarbeitet.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN ([www.din.de](http://www.din.de)) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

## Einleitung

Die Hörempfindung Rauigkeit beschreibt gemeinsam mit der Hörempfindung Schwankungsstärke die Wahrnehmung zeitlicher Variationen von Schallen. Dabei erfasst die Schwankungsstärke langsame Variationen (typischerweise unter 20 Hz) während die Hörempfindung Rauigkeit durch schnellere Variationen bis zu etwa 300 Hz hervorgerufen wird. Beispielsweise tritt für einen amplitudenmodulierten 1 kHz Sinuston das Maximum der Hörempfindung Schwankungsstärke bei einer Modulationsfrequenz um 4 Hz und das Maximum der Hörempfindung Rauigkeit bei einer Modulationsfrequenz um 70 Hz auf. Beide Hörempfindungen können sowohl durch Amplitudenmodulation als auch durch Frequenzmodulation hervorgerufen werden. Periodische Modulationen erzeugen in der Regel stärkere Empfindungen von Schwankungsstärke oder Rauigkeit als stochastische Variationen.

Der Eindruck von Rauigkeit entsteht, wenn innerhalb einer Frequenzgruppe eine zeitvariante Einhüllende vorliegt, z. B. Töne eine zeitliche Struktur durch Änderungen der Amplitude oder der Frequenz erhalten. Fallen diese Änderungen zeitlich sehr langsam aus (z. B. kleiner als 10 Hz), ist das Gehör in der Lage, diesen Änderungen zu folgen und es entstehen Empfindungen wie Schwebung oder Schwankung. Hüllkurvenschwankungen mit Frequenzen zwischen 20 Hz und 300 Hz werden als rau empfunden, da hier das Gehör nicht mehr in der Lage ist, die zeitlichen Veränderungen aufzulösen. Die Rauigkeit hängt von der Mittenfrequenz, der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$ , dem Modulationsgrad  $m$  und auch vom Schalldruckpegel ab. Frequenzmodulierte Töne erzeugen eine ähnliche Rauigkeit wie amplitudenmodulierte Töne.

Die Einheit für die Rauigkeit ist „asper“ (von lat. aspera „rau“). Als Bezugssignal mit der Rauigkeit  $R = 1$  asper wurde ein sinusförmig amplitudenmodulierter 1 kHz Ton mit  $m = 1$ ,  $f_{\text{mod}} = 70$  Hz und einem Schalldruckpegel von 60 dB gewählt.

Rauigkeiten entstehen beispielsweise durch eine multiplikative Verknüpfung von zwei Schwingungen – beispielsweise bei einem Zahnrad mit Unwucht die Zahnfrequenz und die Umdrehungsfrequenz – oder durch die Überlagerung von mehr als zwei Tönen mit geringem Frequenzabstand. In der Praxis entstehen Rauigkeiten häufig bei rotierenden Bauteilen (Motoren, Getriebe, Lüfter).

Die Rauigkeit findet bei der Beurteilung von Klangbildern sowie bei der gezielten Beeinflussung von Geräuschen Anwendung. Mit ansteigender Rauigkeit werden Immissionsgeräusche als zunehmend auffällig und in der Regel als zunehmend aggressiv und lästig empfunden, ohne dieses z. B. in einer Veränderung der Lautheit oder des A-bewerteten Schalldruckpegels anzuzeigen. Darüber hinaus kann die Rauigkeit gezielt zur Gestaltung von Produktgeräuschen und insbesondere von Warnsignalen und Hinweistönen eingesetzt werden, um den akustischen Charakter eines Produktes den Erwartungshaltungen -bzw. bei Geräuschen gemäß deren funktionalen Intentionen- passend zu gestalten (kraftvoll, sportlich, warnend).

## 1 Anwendungsbereich

In diesem Dokument wird ein Modell zur Berechnung von Rauigkeitswerten, welche den Ausprägungen der wahrgenommenen Rauigkeit weitgehend entsprechen, beschrieben. Darüber hinaus wird die Abhängigkeit der Rauigkeit synthetischer Geräusche von relevanten Signaleigenschaften dargestellt. Die mit dem Modell berechneten Rauigkeitswerte für diese synthetischen Geräusche zeigen die Anwendbarkeit des Modells für die verschiedenen Abhängigkeiten. Zusätzlich wird die Rauigkeit technischer Geräusche behandelt sowie Anwendungshinweise gegeben.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 1320:2009-12, *Akustik — Begriffe*

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

### 3.1

#### **Rauigkeit**

***R***

Hörempfindung, die durch Amplituden- oder Frequenzvariationen des Schallsignals mit Modulationsfrequenzen zwischen 20 Hz und 300 Hz hervorgerufen wird

### 3.2

#### **Hörempfindung**

nicht weiter unterteilbares Attribut des auditiv Wahrgenommenen, auf das getrennt geachtet werden kann

[QUELLE: DIN 1320:2009-12]

### 3.3

#### **Lautheit**

***N***

Hörempfindung, welche auf einer Skala „leise/laut“ skaliert wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Lautheit wird in sone angegeben.

**BEISPIEL** Einer frei fortschreitenden monofrequenten Welle mit der Frequenz 1 kHz und dem Schalldruckpegel 40 dB ( $p_0 = 20 \mu Pa$ ), die frontal auf die Zuhörer trifft, ist die Lautheit 1 sone zugeordnet. Ein Schall, welcher von den Zuhörern als  $n$ -mal so laut wie derjenige mit 1 sone bezeichnet wird, erhält die Lautheit  $n$  sone zugeordnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: In Anlehnung an DIN 1320:2009-12.

[QUELLE: DIN 45631, DIN 45631/A1:2010-03]

### **3.4**

#### **Tonheit**

**$z$**

gehörbezogenes Maß der Frequenz, welches derselben mittels einer nicht linearen Transformation derart zugeordnet ist, dass alle Frequenzgruppen auf der Tonheitsskala Abschnitte gleicher Breite bilden

[QUELLE: DIN 1320:2009-12]

### **3.5**

#### **Frequenzgruppe**

dasjenige Frequenzband, innerhalb dessen das Gehör bei der Bildung der Lautheit die Schallintensität bzw. bei der Bildung der Mithörschwelle eines Sinusschalls die Störschallintensität integriert

[QUELLE: In Anlehnung an DIN 1320:2009-12]

### **3.6**

#### **Modulation**

Vorgang bei dem ein niederfrequentes Signal, der Modulator, ein Signal mit höherer Frequenz, den Träger, verändert

Anmerkung 1 zum Begriff: Bei der Amplitudenmodulation ändert sich die Amplitude des Trägers gemäß dem Amplitudenverlauf des Modulators, bei der Frequenzmodulation folgt die Frequenz des Trägersignals der Amplitude des Modulators, während die Amplitude des Trägers konstant bleibt.

## **4 Symbole und Abkürzungen**

In dieser Tabelle sind die Symbole und Abkürzungen aufgeführt, die von dem Berechnungsverfahren in Abschnitt 5 verwendet werden.

|                                          |                                                                                                          |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $N'(l,z)$                                | Zeitabhängige spezifische Lautheit (nach Sottek) ( $\text{sone}_{\text{HMS}}/\text{Bark}_{\text{HMS}}$ ) |
| $z$                                      | Tonheit ( $\text{Bark}_{\text{HMS}}$ )                                                                   |
| $l, l'$                                  | Zeitindex der Blöcke, Zeitindex der Blöcke nach Resampling                                               |
| $p(n)$                                   | Schalldruck (Pa)                                                                                         |
| $n, n', \tilde{n}$                       | Zeitindex des Schalldrucksignals, Zeitindex nach Segmentierung, Zeitindex nach Unterabtastung            |
| $N'_S(f)$                                | Spezifische Lautheitsschwelle                                                                            |
| $f$                                      | Frequenz (Hz)                                                                                            |
| $F(z)$                                   | Mittenfrequenz der Frequenzgruppe $z$ (Hz)                                                               |
| $\Delta f(z)$                            | Frequenzgruppenbreite (Hz)                                                                               |
| $B$                                      | Anzahl der überlappenden Frequenzgruppenfilter                                                           |
| $h_z(t), h_z(n)$                         | Impulsantwort des auditorischen Filters (zeitkontinuierlich, zeitdiskret)                                |
| $h_{\text{TP},z}(t), h_{\text{TP},z}(n)$ | Äquivalenter Tiefpass des auditorischen Filters (zeitkontinuierlich, zeitdiskret)                        |
| $M$                                      | Filterordnung                                                                                            |
| $\varepsilon(t), \varepsilon(n)$         | Sprungfunktion (zeitkontinuierlich, zeitdiskret)                                                         |
| $f_a, \tilde{f}_a$                       | Abtastrate des Schalldrucksignals (Hz), Abtastrate nach Unterabtastung (Hz)                              |
| $p_{\text{FG},z}(n)$                     | Bandpasssignale nach auditorischem Filter                                                                |
| $p_{l,z}(n')$                            | Bandpasssignale nach Segmentierung                                                                       |
| $s_b, \tilde{s}_b$                       | Blockgröße (Anzahl der Abtastwerte), Blockgröße nach Unterabtastung                                      |
| $s_v, \tilde{s}_v$                       | Verschiebung (Anzahl der Abtastwerte), Verschiebung nach Unterabtastung                                  |

|                                          |                                                                                                         |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $p_{G,l,z}(n')$                          | Bandpasssignale nach Segmentierung und Gleichrichtung                                                   |
| $\tilde{p}(l,z)$                         | Effektivwert der segmentierten Bandpasssignale                                                          |
| $c_N$                                    | Kalibrierwert der (spezifischen) Lautheit ( $\text{sone}_{\text{HMS}}/\text{Bark}_{\text{HMS}}$ )       |
| $\tilde{p}_0$                            | Bezugswert des Schalldrucks (Effektivwert) $\tilde{p}_0 = 20 \mu\text{Pa}$                              |
| $p_{H,l,z}(\tilde{n})$                   | Hüllkurven der Bandpasssignale                                                                          |
| $\Phi_{H,l,z}(k)$                        | Skaliertes Leistungsspektrum von $p_{H,l,z}(\tilde{n})$                                                 |
| $\varphi_{H,l,z}(m), \varphi_{H,l,z}(0)$ | Autokorrelationsfunktion von $p_{H,l,z}(\tilde{n})$ (unskaliert), Energie von $p_{H,l,z}(\tilde{n})$    |
| $\bar{\Phi}_{H,l,z}(k)$                  | Gemittelte skalierte Leistungsspektren                                                                  |
| $s(l,k)$                                 | Summierte gemittelte skalierte Leistungsspektren                                                        |
| $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$                  | Skalierte Leistungsspektren nach Rauschunterdrückung                                                    |
| $w(l,k)$                                 | Gewichtungsfunktion zur Rauschunterdrückung                                                             |
| $\tilde{w}(l,k)$                         | Hilfsfunktion zur Berechnung von $w(l,k)$                                                               |
| $\tilde{s}(l)$                           | Median von $s(l,k)$                                                                                     |
| $\delta = 10^{-10}$                      | Additive Konstante zur Vermeidung von Nullstellen im Nenner                                             |
| $i$                                      | Nummerierung der Maxima von $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$                                                     |
| $k_{p,i}(l,z)$                           | Index des $i$ -ten Maximums von $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$                                                 |
| $C = (c_0, c_1, c_2)^T$                  | Vektor mit Koeffizienten zur Frequenzkorrektur                                                          |
| $\hat{\Phi}_{H,l,z}$                     | Vektor mit drei Einträgen von $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$ um ein Maximum                                    |
| $K$                                      | Indexmatrix für quadratische Fehlerkorrektur                                                            |
| $f_\Delta$                               | Frequenzauflösung von $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$                                                           |
| $\rho(\tilde{f}_{p,i}(l,z))$             | Zusätzlicher Korrekturterm der Frequenzschätzung                                                        |
| $\theta$                                 | Ganzzahlige Schritte von $\rho(\tilde{f}_{p,i}(l,z))$                                                   |
| $E(\theta)$                              | Differenz von exakter Modulationsfrequenz und Index des Maximums                                        |
| $\beta(\theta)$                          | Theoretischer Fehler nach Anwendung einer Fehlerkorrektur                                               |
| $A_i(l,z)$                               | Amplitude des $i$ -ten Maximums von $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$                                             |
| $\tilde{A}_i(l,z)$                       | Amplitude des $i$ -ten Maximums von $\hat{\Phi}_{H,l,z}(k)$ nach Gewichtung hoher Modulationsfrequenzen |
| $G_{l,z,i}(f_{p,i}(l,z))$                | Gewichtungsfunktion der Modulationsfrequenzen                                                           |
| $r_{\max}(z)$                            | Maximum der Gewichtungsfunktion im Band $z$                                                             |
| $f_{\max}(z)$                            | Frequenz des Maximums der Gewichtungsfunktion im Band $z$                                               |
| $f_p(i_{\max})$                          | Modulationsgrundfrequenz                                                                                |
| $w_{\text{peak}}$                        | Gewichtungsfaktor der Maxima                                                                            |
| $\hat{A}(i)$                             | Amplitude der Maxima nach Anwendung von $w_{\text{peak}}$                                               |
| $A(l,z)$                                 | Summe der Amplituden nach Gewichtung niedriger Modulationsfrequenzen                                    |
| $d(n), d_S(n',l)$                        | Drehzahlsignal, segmentiertes Drehzahlsignal                                                            |
| $E(l,z)$                                 | Shannon-Entropie                                                                                        |
| $A_E(l,z)$                               | Amplituden nach Gewichtung mit Shannon-Entropie                                                         |
| $R'_{\text{est}}(l_{50},z)$              | Unkalibrierte Schätzung für die zeitabhängige spezifische Rauigkeit                                     |

|                                  |                                                                                      |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $l_{50}$                         | Zeitindex nach Interpolation auf eine Rate von 50 Hz                                 |
| $c_R$                            | Kalibrierwert der (spezifischen) Rauigkeit (asper/Bark <sub>HMS</sub> )              |
| $\hat{R}'(l_{50},z)$             | Ungeglättete zeitabhängige spezifische Rauigkeit (asper/Bark <sub>HMS</sub> )        |
| $\bar{R}'_{\text{est}}(l_{50})$  | Quadratischer Mittelwert von $R'(l_{50},z)$                                          |
| $\bar{R}'_{\text{est}}(l_{50})$  | Linearer Mittelwert von $R'(l_{50},z)$                                               |
| $R'(l_{50},z)$                   | Zeitabhängige spezifische Rauigkeit (asper/Bark <sub>HMS</sub> )                     |
| $R'_{\text{binaural}}(l_{50},z)$ | Binaurale zeitabhängige spezifische Rauigkeit (asper/Bark <sub>HMS</sub> )           |
| $R(l_{50})$                      | Zeitabhängige Rauigkeit (asper)                                                      |
| $R'(z)$                          | Spezifische Rauigkeit als Mittelwert von $R'(l_{50},z)$ (asper/Bark <sub>HMS</sub> ) |
| $R$                              | Einzahlwert der Rauigkeit (asper)                                                    |

## 5 Modell zur Berechnung der Rauigkeit

Im Folgenden wird das Verfahren zur Berechnung der Rauigkeit beschrieben. Das Verfahren berechnet die zeitabhängige spezifische Rauigkeit monaural. Bei binauralen Signalen werden monaurale zeitabhängige spezifische Rauigkeiten für jeden Kanal getrennt berechnet und anschließend kombiniert. Aus diesen kombinierten Werten werden entsprechend 5.8 repräsentative Größen berechnet.

**ANMERKUNG** Für den Fall, dass nur wesentliche Rauigkeitsanteile eines Signals in einem definierten Frequenzbereich bestimmt werden sollen, kann dies durch eine digitale Bandpassfilterung der Eingangssignale vor der Rauigkeitsberechnung erfolgen. Zur Dokumentation ist dann außer den Einzahlwerten der Rauigkeit, sowie ggfs. den Rauigkeitswerten als Funktion der Zeit, zusätzlich eine eindeutige Angabe der verwendeten Filterparameter notwendig.

### 5.1 Übersicht

Bild 1 zeigt die grundlegende Struktur des Gehörmodells zur Berechnung der Rauigkeit. Als Zwischenergebnis wird dabei auch die spezifische Lautheit  $N'(l,z)$  nach dem Gehörmodell berechnet.<sup>1</sup> Die Größe  $z$  bezeichnet hierbei die Nummer des Bandes der Frequenzgruppe<sup>2</sup> und  $l$  den Zeitindex nach der Blockverarbeitung.

- 
- 1 Die Lautheit wird in diesem Berechnungsmodell entsprechend des psychoakustischen Gehörmodells nach Sottek berechnet. Dieses Verfahren bietet einige Vorteile gegenüber bestehenden Normen zur Berechnung der Lautheit. Diese Vorteile sind in [7] beschrieben (siehe auch 5.5.3). Entsprechend wird für die Lautheit die Einheit sone<sub>HMS</sub> en: sone according to the hearing model of Sottek) verwendet, um eine Abgrenzung von anderen Definitionen der Lautheit sicherzustellen.
  - 2 Die Frequenzgruppen werden entsprechend einer in [7] im Detail dokumentierten Funktion berechnet, die eine bessere Anpassung an die experimentell ermittelten Bandbreiten der Frequenzgruppen (Tabelle von Zwicker [6]) erzielt als andere existierende Gleichungen. Dadurch entsprechen die daraus berechneten Mittenfrequenzen nicht exakt den Werten aus der Bark-Tabelle. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Bezeichnung Bark<sub>HMS</sub> (en: Bark according to the hearing model of Sottek) für diese Werte verwendet.

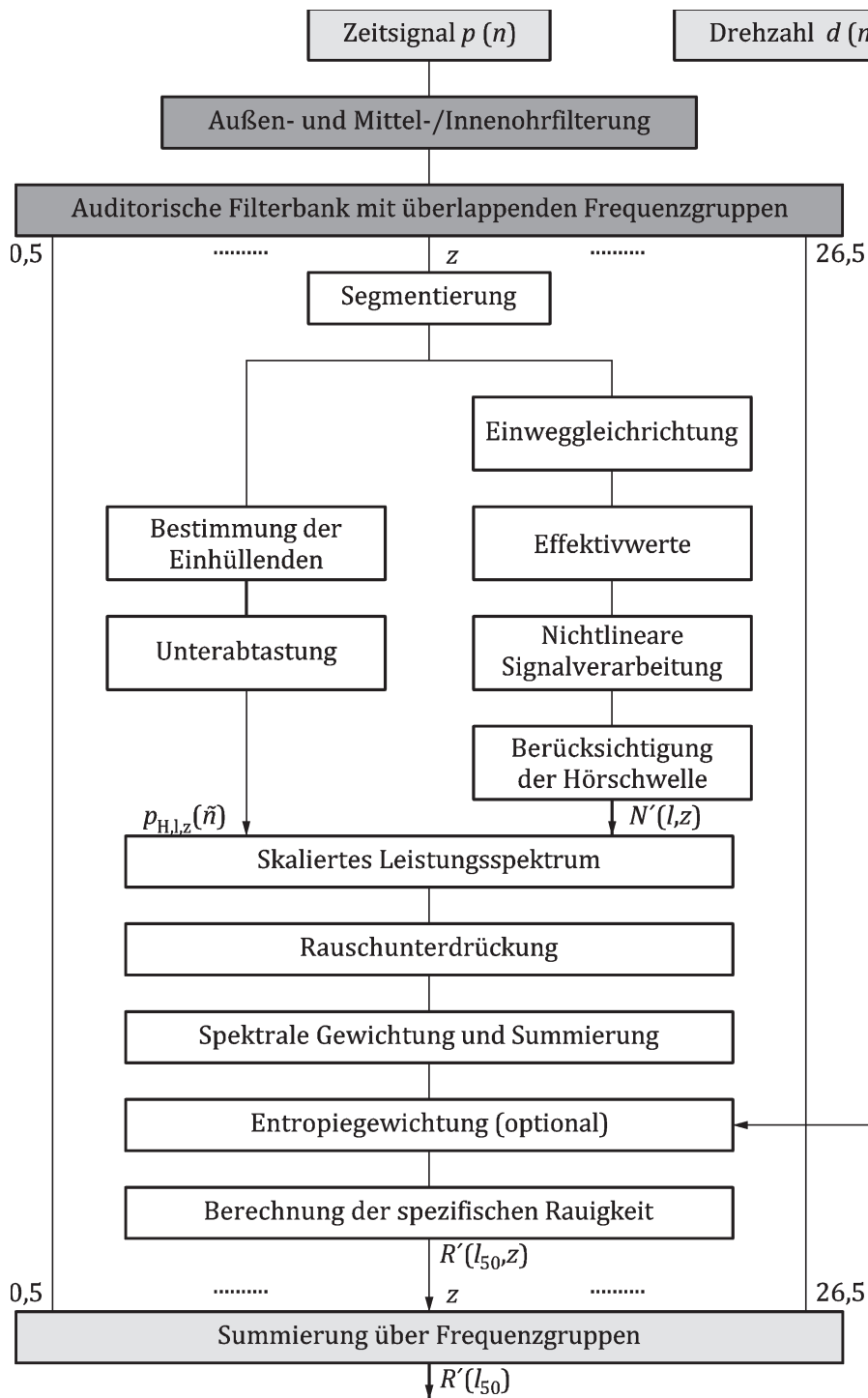
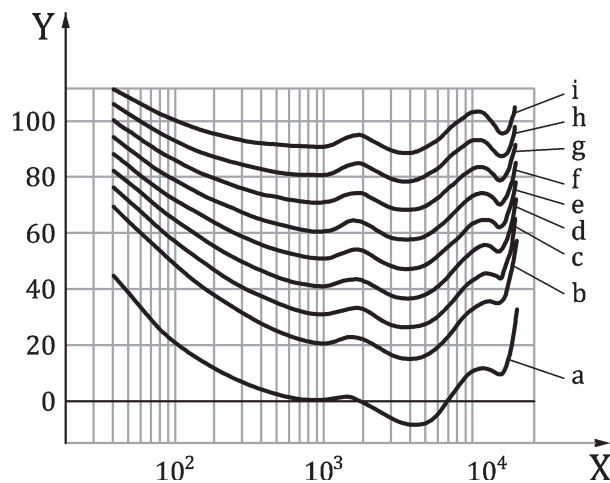


**Bild 1 — Grundlegende Struktur des Gehörmodells zur Berechnung der Rauigkeit**

Weiterhin wird die Einhüllende des Signals (in der jeweiligen Frequenzgruppe) ermittelt und daraus, zusammen mit der ermittelten Lautheit, die Rauigkeit berechnet, wie in Bild 1 illustriert ist. Im Folgenden werden zunächst die verschiedenen Schritte des Gehörmodells erklärt. Das zeitdiskrete Eingangssignal  $p(n)$  enthält Schalldruckwerte. Es wird eine Abtastfrequenz von  $f_a = 48 \text{ kHz}$  angenommen. Sollte das Eingangssignal in einer anderen Abtastrate vorliegen, so wird die Abtastrate zunächst zu 48 kHz konvertiert.

## 5.2 Außen- und Mittelohrfilterung

In einem ersten Vorverarbeitungsschritt wird das Eingangssignal  $p(n)$  entsprechend des Übertragungsverhaltens von Außen- und Mittel-/Innenohr gefiltert. Die Übertragungsfunktion des Filters wird so gewählt, dass die Filterung zusammen mit einem Verarbeitungsschritt zur Nachbildung der nichtlinearen Wahrnehmung von Lautheit im Verhältnis zum Schalldruckpegel (siehe 5.5.3) sowie eines internen spezifischen Lautheitsschwellwerts  $N'_S(z)$  zur Berücksichtigung der Ruhehörschwelle (siehe 5.5.4), die Kurven gleicher Lautheit nachbildet. Das Außen- und Mittel-/Innenohrfilter wurde in Kombination mit dem internen spezifischen Lautheitsschwellwert auf die Isophonen entsprechend des Standards DIN ISO 226:2006-04 optimiert. Die Hörschwellenkurve wurde entsprechend DIN ISO 226: 2006-04 verwendet. Diese Kurve entspricht auch den Daten der Hörschwelle, die in DIN EN ISO 389-7 veröffentlicht wurden. Die zur Optimierung des Filters verwendeten Kurven gleicher Lautheit sind in Bild 2 dargestellt.



### Legende

Y Schalldruckpegel [dB]

X Frequenz [Hz]

a Ruhehörschwelle

b 20 phon

c 30 phon

d 40 phon

e 50 phon

f 60 phon

g 70 phon

h 80 phon

i 90 phon

**Bild 2 — Isophonen (DIN ISO 226:2003), die als Zielkurven für die Optimierung des Filters für die Außen- und Mittel-/Innenohrfilterung verwendet wurden**

Der Betrag der Übertragungsfunktion des ermittelten Filters ist in Bild 3 dargestellt. Aus numerischen Gründen ist es empfehlenswert, dieses Filter höherer Ordnung als Hintereinanderschaltung von  $K = 8$  Filtern  $H_k(f)$  zweiter Ordnung zu implementieren. Die Filterfunktion  $H(f)$  ergibt sich zu

$$H(f) = \prod_{k=1}^K H_k(f). \quad (1)$$

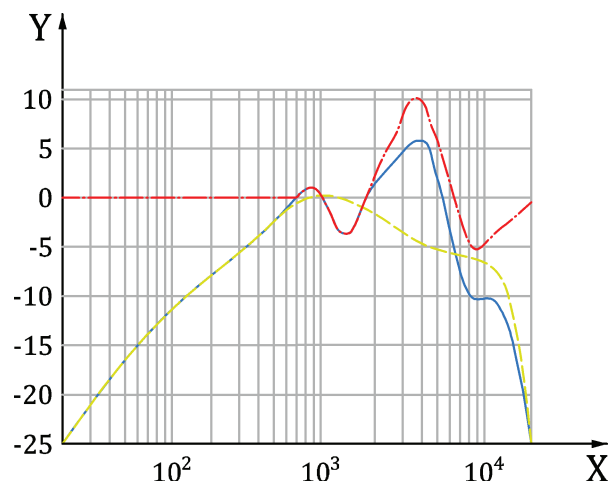
Die Implementierung der Filter zweiter Ordnung  $H_k(f)$  kann unter Verwendung der rekursiven Gleichung

$$y(n) = \sum_{m=0}^2 b_{mk} x(n-m) - \sum_{m=1}^2 a_{mk} y(n-m) \quad (2)$$

mit dem Eingangssignal  $x(n)$  und dem Ausgangssignal  $y(n)$  erfolgen. Die entsprechenden Filterkoeffizienten  $a_{mk}$  und  $b_{mk}$  wurden in einem Curve-Fitting-Prozess berechnet und sind in Tabelle 1 angegeben. Hierbei beschreiben die ersten fünf Filter den Einfluss des Außenohrs, die weiteren drei Filter den Einfluss von Innen-/Mittelohr.

**Tabelle 1 — Filterkoeffizienten des Außen- und Mittel-/Innenohrfilters**

| Außen- und Mittel-/Innenohrfilter |           |            |            |            |            |
|-----------------------------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| $k$                               | $b_{0k}$  | $b_{1k}$   | $b_{2k}$   | $a_{1k}$   | $a_{2k}$   |
| 1                                 | 1,015 896 | -1,925 299 | 0,922 118  | -1,925 299 | 0,938 014  |
| 2                                 | 0,958 943 | -1,806 088 | 0,876 439  | -1,806 088 | 0,835 382  |
| 3                                 | 0,961 372 | -1,763 632 | 0,821 788  | -1,763 632 | 0,783 160  |
| 4                                 | 2,225 804 | -1,434 650 | -0,498 204 | -1,434 650 | 0,727 599  |
| 5                                 | 0,471 735 | -0,366 092 | 0,244 145  | -0,366 092 | -0,284 120 |
| 6                                 | 0,115 267 | 0,000 000  | -0,115 267 | -1,796 003 | 0,805 838  |
| 7                                 | 0,988 029 | -1,912 434 | 0,926 132  | -1,912 434 | 0,914 161  |
| 8                                 | 1,952 238 | 0,162 320  | -0,667 994 | 0,162 320  | 0,284 244  |



**Legende**

- Y            Amplitude [dB]
- X            Frequenz [Hz]
- Außen- und Mittel-/Innenohr
- - - - - Außenohr
- - - - - Mittel-/Innenohr

**Bild 3 — Betrag der Übertragungsfunktion des Außen- und Mittel-/Innenohrfilters nach Tabelle 1**

Das Ergebnis ist das gefilterte Signal  $p_{am}(n)$ .

### 5.3 Auditorische Filterbank

Eine, aus überlappenden, asymmetrischen Filtern bestehende auditorische Filterbank, modelliert die frequenzabhängigen Bandbreiten der Frequenzgruppen und die Frequenz-Orts-Transformation des Innenohrs. Die Form der auditorischen Filter entspricht parametrisierbaren Gammaton-Filtern [4]. Das Filter hat bei der Mittenfrequenz  $F(z)$  einen Verstärkungsfaktor von 0 dB. Die Bandbreite wurde so gewählt, dass sie der äquivalenten Rechteckbandbreite entspricht (siehe auch [5]). Das inkonstante Verhältnis der Filterbank von Bandbreite zu Frequenz erzeugt eine hohe Frequenzauflösung bei niedrigen Frequenzen und eine hohe Zeitauflösung bei hohen Frequenzen, mit einem kleinen Produkt von Zeit- und Frequenzauflösung für alle Frequenzen. Dies ermöglicht beispielsweise die Wahrnehmung von kurzzeitigen, niederfrequenten Ereignissen.

Die Mittenfrequenzen  $F(z)$  (in Hz) und dazugehörigen Bandbreiten  $\Delta f(z)$  (in Hz) der Filterbank werden berechnet als

$$F(z) = \frac{\Delta f(f=0)}{c} \sinh(cz) \quad (3)$$

und

$$\Delta f(z) = \sqrt{(\Delta f(f=0))^2 + (cF(z))^2}, \quad (4)$$

mit  $B = 53$  Frequenzbändern  $z$ , die von 0,5 bis 26,5  $\text{Bark}_{\text{HMS}}$  mit einer Schrittweite von  $\Delta z = 0,5 \text{ Bark}_{\text{HMS}}$  ausgewählt werden. Es werden die Werte  $\Delta f(f=0) = 81,9289 \text{ Hz}$  und  $c = 0,1618$  verwendet. Diese Funktionen ergeben eine bessere Anpassung an die Bark-Tabelle von Zwicker [6] als andere existierende Gleichungen, wie in [7] im Detail dokumentiert ist.

Die Impulsantworten der auditorischen Filter werden als modulierte Tiefpassfilter definiert ( $j$  ist die imaginäre Einheit,  $t$  bezeichnet die Zeit in Sekunden).

$$h_z(t) = 2 \cdot \text{Re} \left( h_{\text{TP},z}(t) \cdot \exp(j2\pi F(z)t) \right). \quad (5)$$

mit der Tiefpassfunktion

$$h_{\text{TP},z}(t) = \varepsilon(t) \cdot \frac{1}{(M-1)!} \cdot \frac{1}{\tau(z)} \cdot \left( \frac{t}{\tau(z)} \right)^{M-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau(z)}\right) \quad (6)$$

mit der Filterordnung  $M$  und der Sprungfunktion  $\varepsilon(t)$ . Das Ausrufezeichen bezeichnet die Fakultät.  $\tau(z)$  ist eine Zeitkonstante, mit folgendem Zusammenhang zu  $\Delta f(z)$ :

$$\tau(z) = \frac{1}{2^{2M-1}} \cdot \binom{2M-2}{M-1} \cdot \frac{1}{\Delta f(z)}. \quad (7)$$

Als diskrete Näherung des verwendeten Tiefpassfilters mit der Filterordnung  $M = 5$  wird die Funktion,

$$h_{\text{TP},z}(n) = \varepsilon(n) \cdot \frac{(1-d)^M}{\sum_{i=1}^{M-1} e_i d^i} n^{M-1} d^n, \quad (8)$$

mit  $d = \exp\left(-\frac{1}{f_a \tau(z)}\right)$  verwendet.<sup>3</sup> Dafür gelten die Koeffizienten  $e_0 = 0, e_1 = 1, e_2 = 11, e_3 = 11, e_4 = 1$ .

---

<sup>3</sup> Mit  $f_a = 48 \text{ kHz}$