

Berechnung psychoakustischer Parameter in der ArtemiS SUITE

Die Psychoakustik befasst sich mit dem Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen von Schall und der entsprechenden Hörempfindung. Dazu werden physikalische Parameter wie Schalldruckpegel, Frequenz und Modulationsgrad auf gehörgerechte Parameter abgebildet. Im Gegensatz zu den physikalischen Größen bilden diese auch psychoakustische Parameter genannten Größen die menschliche Empfindung linear ab. Das heißt, eine Verdoppelung der psychoakustischen Größe entspricht einer Verdoppelung der entsprechenden Hörempfindung.

Die ArtemiS SUITE¹ bietet die Möglichkeit zur Berechnung verschiedener psychoakustischer Parameter. Die vorliegende Application Note erklärt, wie die psychoakustischen Größen Rauigkeit, Schwankungsstärke und Tonhaltigkeit in der ArtemiS SUITE berechnet und verwendet werden:

| | |
|----------------------------------|----|
| Berechnung der Rauigkeit | 1 |
| Anwendung und Beispiele | 4 |
| Berechnung der Schwankungsstärke | 6 |
| Anwendung und Beispiele | 6 |
| Berechnung der Tonhaltigkeit | 7 |
| Psychoakustische Tonhaltigkeit | 7 |
| Anwendung und Beispiele | 7 |
| Tonhaltigkeit nach DIN 45681 | 9 |
| Anwendung und Beispiele | 9 |
| Hinweise | 10 |
| Literatur | 11 |

Die psychoakustischen Parameter Lautheit und Schärfe sind in der Application Note „Psychoakustische Analysen I“ beschrieben. Diese können Sie z. B. im Download Center unserer Internet-Seiten herunterladen: [Psychoakustische-Analysen-I-Application-Note.pdf](#)

Berechnung der Rauigkeit

Die Rauigkeit wird für die subjektive Beurteilung von Klangbildern sowie bei der gezielten Beeinflussung von Geräuschen eingesetzt. 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.

Der Eindruck von Rauigkeit entsteht, wenn innerhalb einer Frequenzgruppe eine zeitvariante Einhüllende vorliegt, z. B. Töne eine zeitliche Struktur durch die Änderung der Amplitude oder der Frequenz erhalten. Fallen diese Änderungen zeitlich sehr langsam aus (kleiner als 10 Hz), ist das Gehör in der Lage, diesen Änderungen zu folgen und es entstehen Empfindungen wie Schwebung und Schwankung. Mit zunehmender Schnelligkeit dieser Änderung entstehen Geräuschein drücke wie die so genannte R-Rauigkeit (um 20 Hz), um dann in die eigentliche Rauigkeit überzugehen, bei der das Gehör nicht mehr in der Lage ist, die zeitlichen Veränderungen aufzulösen. Geräusche mit Hüllkurvenschwankungen zwischen 20 und 300 Hz werden als rau empfunden. Oberhalb dieser Frequenzen werden bei reinen amplitudenmodulierten Tönen die Haupt- und Seitenlinien als einzelne Töne hörbar. Die Rauigkeit hängt von der Mittenfrequenz, der Modulationsfrequenz und vom Modulationsgrad ab. Vom Signalpegel ist die Empfindung der Rauigkeit nur schwach abhängig.

Mit steigendem Modulationsgrad steigt auch die Empfindung der Rauigkeit. Die Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz trägt einen Bandpasscharakter, d. h. zu niedrigen und zu hohen

¹ Die Beschreibungen in dieser Application Note beziehen sich auf die ArtemiS SUITE 9.2. Die allgemeine Vorgehensweise ist auch für andere Versionen gültig. Allerdings können sich Änderungen im Funktionsumfang und in der Benutzeroberfläche ergeben.

Modulationsfrequenzen nimmt die Rauigkeitsempfindung stark ab. Bei einer Beurteilung verschiedener amplitudenmodulierter Sinustönen, die jeweils eine Mittenfrequenz von 1 kHz und einen Modulationsgrad von 1 besitzen, aber unterschiedlich schnell moduliert sind, liegt das Maximum der Rauigkeitsempfindung bei einer Modulationsfrequenz von ca. 70 Hz. Bei niedrigeren Trägerfrequenzen verschiebt sich das Maximum zu niedrigeren Modulationsfrequenzen.

Rauigkeit wird durch amplitudenmodulierte Töne hervorgerufen, aber auch durch Frequenzmodulationen und durch amplitudenmoduliertes Rauschen. Die Einheit der Rauigkeit heißt asper. Einem Sinuston von 1 kHz mit einem Pegel von 60 dB, der mit einer Frequenz von 70 Hz und einem Modulationsgrad von 1 amplitudenmoduliert ist, wird die Rauigkeit 1 asper zugeschrieben.

Grundsätzlich können auch zwei tonale Komponenten, die innerhalb einer Frequenzgruppe des menschlichen Gehörs auftreten, eine Rauigkeitsempfindung beim Hörer hervorrufen. In der Nachrichtentechnik wird dies „Amplitudenmodulation ohne Träger“ genannt.

Der in der ArtemiS SUITE verwendete Algorithmus zur Berechnung der Rauigkeit basiert auf dem Gehörmodell nach Sottek [1]. Die Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** bildet die Signalverarbeitung des Hörvorgangs nach und bewertet die Rauigkeit von Signalen in ähnlicher Form wie das menschliche Gehör. Das Blockschaltbild in Abbildung 1 skizziert die Rauigkeitsberechnung auf der Basis des Gehörmodells.

Zuerst erfolgt eine Filterung des Zeitsignals, um den Einfluss von Außen- und Mittelohr zu berücksichtigen. Anschließend wird das Signal mit einer Filterbank aus parallel und überlappend angeordneten Bandpässen zerlegt. Der Abstand zwischen den Mittenfrequenzen benachbarter Filter ist auf der Tonheitsskala konstant. Die Anzahl der Bandpässe kann im Eigenschaften-Fenster der Analyse auf 24 bzw. 47 Filter eingestellt werden. Durch die Verwendung von 47 Bandpässen werden die natürlichen Hörvorgänge besser abgebildet. Dies führt aber gleichzeitig zu einer längeren Berechnungszeit. Nach der Filterung werden die Hüllkurven der Teilbandsignale mit Hilfe der Hilberttransformation ermittelt. Zur Berücksichtigung der Ruhehörschwelle werden die Erregungspegel reduziert (ca. 20 dB/Dekade für Frequenzen unter 500 Hz). In der nächsten Verarbeitungsstufe folgt eine Filterung mit Tiefpässen 3. Ordnung. Die Grenzfrequenz der Filter ist frequenzabhängig und beträgt bei 1 kHz etwa 120 Hz. Die Tiefpassfilterung trägt der Tatsache Rechnung, dass das Gehör dem Verlauf der Hüllkurvenschwankungen nicht beliebig schnell folgen kann. Danach werden die Hüllkurvenschwankungen nichtlinear verzerrt. Als nichtlineare Kennlinie wird eine Potenzfunktion mit einem Exponent von 0,125 verwendet. Dann erfolgt die Berechnung der Autokorrelationsfunktion. Anschließend lassen sich die Teilrauigkeiten durch die Filterung mit Hochpässen 3. Ordnung und einer Verstärkung $g_R(z)$ gewinnen. Sowohl die Grenzfrequenz der Hochpässe als auch die Gewichtung sind abhängig von der Frequenzlage des analysierten Teilbandes (bei 1 kHz ist die Grenzfrequenz ca. 120 Hz).

Die Hochpassfilterung ist notwendig, um die Abnahme der Rauigkeit für niedrige Modulationsfrequenzen zu berücksichtigen. Die Kombination der eingesetzten Hochpass- und Tiefpassfilter bildet die typische Bandpasscharakteristik bzgl. des Zusammenhangs zwischen Rauigkeit und Modulationsfrequenz ab. Die Gewichtung $g_R(z)$ berücksichtigt den Einfluss der Frequenzlage der Trägerfrequenz für die Rauigkeitsempfindung. Zusätzlich wird noch eine frequenzbänder-übergreifende Gewichtung durchgeführt, wie sie in [2] beschrieben ist. Diese gewichtet die Rauigkeit der Frequenzbänder, in denen eine hohe Rauigkeit vorliegt, stärker. Auf diese Weise wird eine Art Maskierungseffekt nachgebildet: Wenn in einem Frequenzband eine besonders hohe Rauigkeit herrscht, wird diese Rauigkeit die Rauigkeiten der benachbarten Frequenzbänder maskieren und muss aus diesem Grund stärker zur Gesamtrauigkeit beitragen als die Rauigkeiten der benachbarten Frequenzbänder.

Nach der Gewichtung wird abschließend die Gesamtrauigkeit durch die Integration der Teilrauigkeiten berechnet.

Eine detaillierte Beschreibung des Gehörmodells und der darauf basierenden Berechnung der Rauigkeit ist in [1], [2] und [3] zu finden.

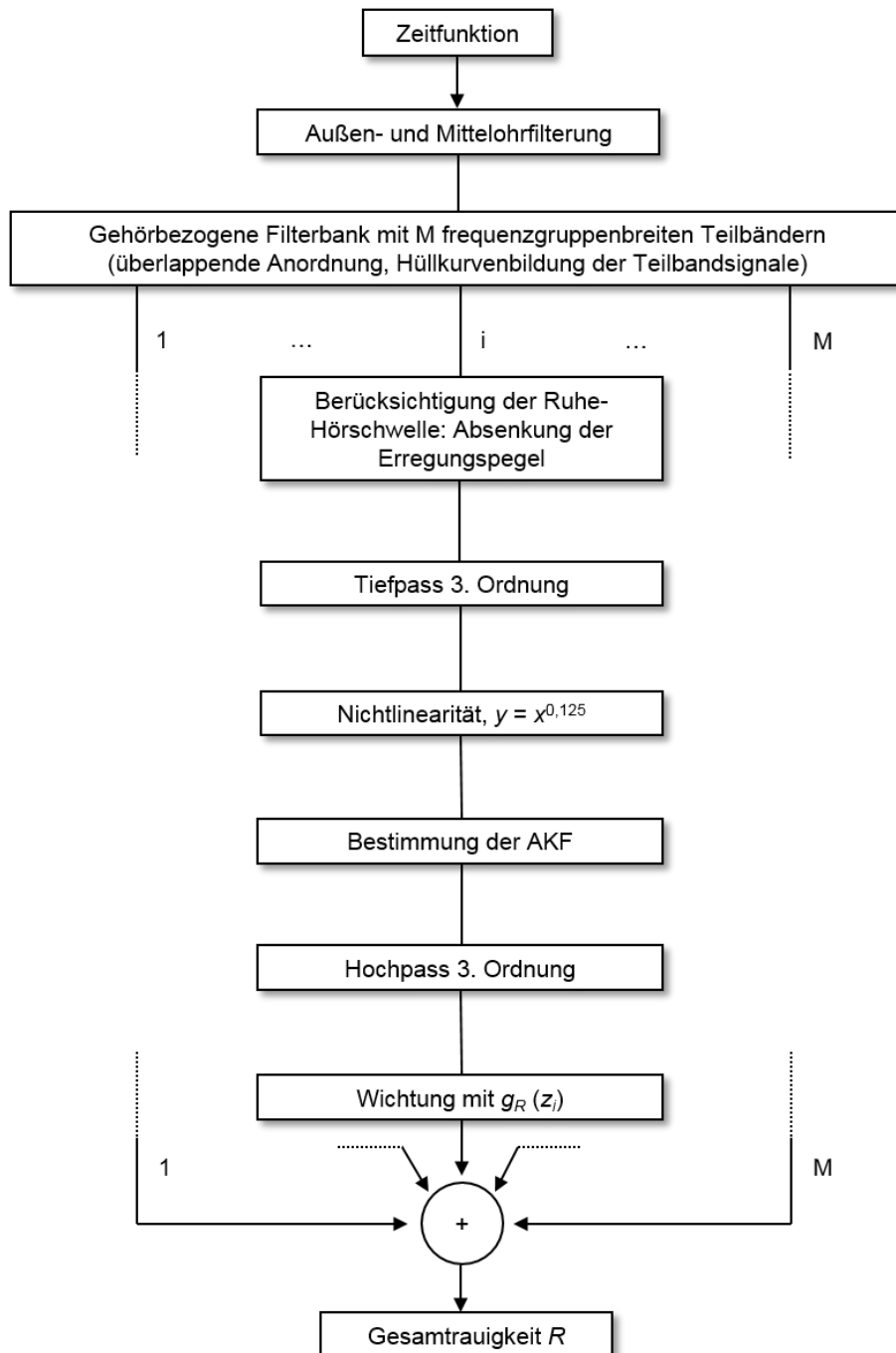


Abbildung 1: Blockschaltbild der Rauigkeitsberechnung auf der Basis des Gehörmodells nach Sottek (aus [3])

In der Literatur wird neben der Rauigkeit auch die R-Rauigkeit (auch α -Rauigkeit oder langsame Rauigkeit) beschrieben (z. B. in [4]). Die R-Rauigkeit tritt bei niedrigen Modulationsfrequenzen zwischen 15 und 45 Hz auf und hat ihr Maximum bei einer Modulationsfrequenz von ca. 20 Hz. Die R-Rauigkeit wird besonders häufig durch die Geräusche von Verbrennungsmotoren hervorgerufen. Diese Geräuschart ist durch das Auftreten von halben Motorordnungen charakterisiert. Wenn diese Motorordnungen ausgeprägt in einer Frequenzgruppe auftreten, wird das Motorgeräusch als „rau“ wahrgenommen. Aufgrund der Tatsache, dass bei einem Verbrennungsmotor die Verbrennungsvorgänge in jedem einzelnen Zylinder nicht exakt identisch sind (u. a. durch Variationen im Ansaugtrakt oder im Abgaskrümmen), treten bei Motoren neben den Hauptmotorordnungen auch halbe Motorordnungen auf. Das heißt, dass z. B. bei einem 4-Zylindermotor neben der 4. Motorordnung für

bestimmte Drehzahlen z. B. auch die 3,5. und/oder die 4,5. Motorordnung auftreten können. Bei einer angenommenen Motordrehzahl von 3000 U/min liegt die 4. Motorordnung bei 200 Hz, die 3,5. Motorordnung bei 175 Hz und die 4,5. Motorordnung bei 225 Hz. Je nach Amplitudenverhältnis der halben Motorordnung resultiert ein mehr oder weniger starker Modulationsgrad mit entsprechenden Auswirkungen auf das Klangbild.

Mit der Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** wird die R-Rauigkeit insofern berücksichtigt, als dass diese Analyse die Verschiebung des Maximums der Rauigkeitswahrnehmung bei niedrigen Trägerfrequenzen hin zu niedrigeren Modulationsfrequenzen in die Berechnung einbezieht. Zusätzlich kann die R-Rauigkeit auch mit Hilfe einer Modulationsanalyse in der ArtemiS SUITE erkannt werden. Diese Analyse bestimmt den Modulationsgrad in Abhängigkeit von Träger- und Modulationsfrequenz. Zum Thema Modulationsanalyse steht Ihnen eine separate Application Note zur Verfügung, die Sie im Download Center unserer Internet-Seiten herunterladen können.

Anwendung und Beispiele

In Abbildung 2 ist das Eigenschaften-Fenster der Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** (engl. **Roughness (Hearing Model) vs. Time**) dargestellt. Für diese Analyse können zwei Einstellungen konfiguriert werden. Wie bereits beschrieben, wird hier die **Auflösung** (engl. **Resolution**) vorgegeben, also die Anzahl der Bandpässe für das Gehörmodell. Bei der Einstellung **1/1 Bark** werden 24 Filter verwendet, bei der Einstellung **1/2 Bark** steigt die Anzahl auf 47 Filter. Außerdem kann mit der Option **Einschwingen unterdrücken** (engl. **Skip Analysis Start**) der Einschwingvorgang der digitalen Filter für die eingestellte Zeit (in Sekunden) ausgeblendet werden, so dass dieser nicht das Gesamtergebnis verfälscht. Die Aktivierung dieser Funktion ist besonders dann zu empfehlen, wenn eine Einzählwertberechnung durchgeführt werden soll.

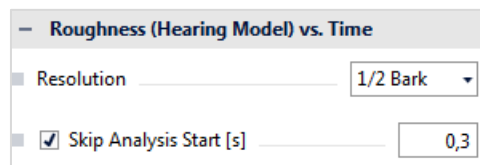


Abbildung 2: Eigenschaften-Fenster der Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit**

Für das Diagramm in Abbildung 3 wurde die Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** auf 3 synthetisch erzeugte Signale angewandt. Bei den Signalen handelt es sich um sinusförmig modulierte 1 kHz-Töne, die sich in Modulationsfrequenz und -grad unterscheiden.

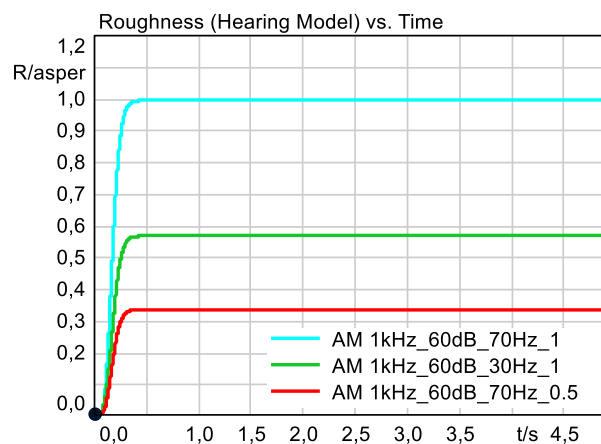


Abbildung 3: Ergebnisse der Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** von synthetischen Signalen

Die türkise Kurve ist das Ergebnis für einen 1 kHz-Ton, der mit einer Modulationsfrequenz $f_m=70$ Hz und einem Modulationsgrad $m=1$ sinusförmig moduliert ist und einen Pegel von 60 dB hat. Laut Definition der Rauigkeit ist diesem Signal eine Rauigkeit von 1 asper zugewiesen. Nach einer kurzen

Einschwingphase zeigt die Kurve diesen Wert. Die beiden anderen Signale unterscheiden sich vom Referenzsignal zum einen durch eine geringere Modulationsfrequenz ($f_m=30$ Hz; grüne Kurve), zum anderen durch einen geringeren Modulationsgrad ($m=0,5$; rote Kurve). Die Werte, die die Kurven nach der Einschwingzeit anzeigen, entsprechen denen in [5] angegebenen gut und die Rangreihenfolge wird korrekt wiedergegeben.

Im Vergleich dazu kommen bei technischen Geräuschen so große Rauigkeitswerte kaum vor. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Rauigkeitsanalyse von zwei elektrischen Kleinmotoren dargestellt.

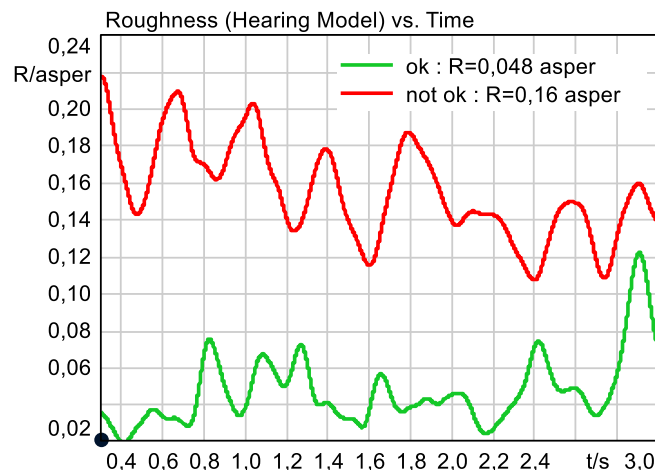


Abbildung 4: Ergebnisse der Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** von technischen Signalen

Die Geräusche der elektrischen Kleinmotoren enthalten jeweils ein Störgeräusch. Dieses Störgeräusch ist bei einem der beiden Geräusche sehr stark ausgeprägt (rote Kurve), so dass dieses als rau wahrgenommen wird und eine akustische Qualitätskontrolle nicht passieren würde. Das andere Geräusch enthält ein sehr viel weniger ausgeprägtes Störgeräusch (grüne Kurve). Die Ergebnisse zeigen, dass die Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** von technischen Signalen kleinere Werte liefert. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven und den resultierenden Einzahlwerten spiegelt jedoch den Höreindruck sehr gut wieder. Der angezeigte Einzahlwert des schlechteren Signals ist ungefähr dreimal so groß wie der Einzahlwert des besseren Signals. Um den Einschwingvorgang zu verfälschen, wurden mit Hilfe der Funktion **Einschwingen unterdrücken** die ersten 0,3 s der Analyse unterdrückt.

Grundsätzlich sollte bei der Rauigkeitsanalyse weniger der absolute Wert der Analyse-Ergebnisse berücksichtigt werden als vielmehr das Verhältnis der Ergebnisse zueinander.

Es gibt verschiedene Publikationen, in denen Rauigkeitsalgorithmen verglichen und auf unterschiedliche Geräusche angewendet werden. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Rauigkeitsanalyse auf der Basis des Gehörmodells gut mit den Ergebnissen aus Hörversuchen korrelieren (siehe [2], [6], [7]).

Berechnung der Schwankungsstärke

Die Empfindung Schwankungsstärke entsteht durch Signalschwankungen mit sehr geringen Modulationsfrequenzen. Das Maximum dieser psychoakustischen Größe liegt bei Modulationsfrequenzen um 4 Hz, vom Pegel ist diese Empfindung ähnlich wie die Rauigkeit nur schwach abhängig. Die Einheit vacil wird durch denselben Sinuston wie die Rauigkeit festgelegt, jedoch nunmehr mit einer Modulationsfrequenz von 4 Hz statt 70 Hz. Die Berechnung der Schwankungsstärke in der ArtemiS SUITE erfolgt in ähnlicher Weise wie bei der Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit**. Der Algorithmus zur Berechnung der Rauigkeit wurde entsprechend angepasst, sodass das Maximum der Schwankungsstärke bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz erreicht wird, und nicht wie bei der Rauigkeit bei 70 Hz.

Anwendung und Beispiele

Das Eigenschaften- Fenster der Analyse **Schwankungsstärke über Zeit** enthält genau wie die Analyse **Rauigkeit (Gehörmodell) über Zeit** das Feld **Auflösung** (engl. **Resolution**), in dem die Anzahl der Bandpässe für das Gehörmodell festgelegt wird. Außerdem kann auch hier mit der Option **Einschwingen unterdrücken** (engl. **Skip Analysis Start**) der Einschwingvorgang für die eingestellte Zeit (in Sekunden) ausgeblendet werden (siehe Abbildung 5).

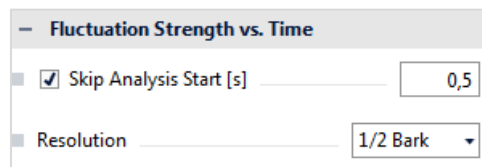


Abbildung 5: Eigenschaften-Fenster der Analyse **Schwankungsstärke über Zeit**

Im folgenden Beispiel wird die Schwankungsstärke von zwei Sprachsignalen berechnet. Flüssige gesprochene Sprache enthält ungefähr 4 Silben pro Sekunde [5]. Das heißt, Sprache ist ungefähr mit einer Frequenz von 4 Hz moduliert und besitzt somit eine hohe Schwankungsstärke. Damit Sprache gut verständlich ist, muss u. a. der Modulationsgrad groß genug sein. Wird in einer lauten Umgebung, z. B. einem Auto, gesprochen, reduziert das Störgeräusch den Modulationsgrad und die Sprache ist schwieriger zu verstehen.

In Abbildung 6 ist das Ergebnis der Schwankungsstärke-Analyse von zwei Sprachsignalen dargestellt. Die grüne Kurve zeigt die Schwankungsstärke von drei kurzen Sätzen, die in ruhiger Umgebung gesprochen wurden. Die rote Kurve zeigt die Analyse-Ergebnisse derselben Sätze, wenn sie in einem fahrenden Fahrzeug gesprochen werden.

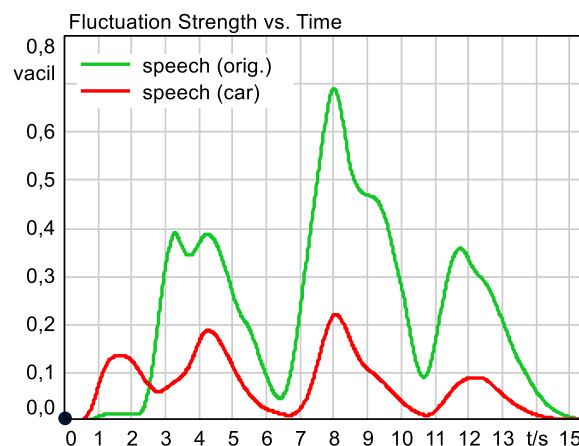


Abbildung 6: Schwankungsstärke von zwei Sprachsignalen (grüne Kurve: Sprache ohne Hintergrundgeräusch; rote Kurve: Sprache im Fahrzeuginnenraum eines fahrenden PKWs)

Bei beiden Kurven steigt die Schwankungsstärke während der Sätze an und geht in den Sprachpausen zurück. Allerdings erreicht die Schwankungsstärke der im Auto aufgenommenen Sprache deutlich geringere Werte. Die Schwankungsstärke der Sprache wird vermindert, weil das Hintergrundgeräusch die zeitlichen Schwankungen der Einhüllenden der Sprache reduziert und so der Modulationsgrad kleiner wird.

Dieses Beispiel zeigt, dass die Interpretation der Ergebnisse von psychoakustischen Analysen stark von der zu bewertenden Geräuschart abhängig ist. Modulierte, d. h. schwankende Geräusche erregen mehr Aufmerksamkeit als unmodulierte Geräusche. Sofern der Hörer an der Information interessiert ist, werden modulierte Geräusche nicht als lästig empfunden. Sind die Geräusche allerdings unerwünscht, werden modulierte Signale als lästiger empfunden als gleichlaute, unmodulierte Signale. Für Sprache ist eine hohe Schwankungsstärke von Vorteil. Die modulierten Geräusche z. B. einer Windkraftanlage wiederum werden häufig als lästig bewertet.

Berechnung der Tonhaltigkeit

Geräusche werden als tonal wahrgenommen, wenn einzelne Töne oder schmalbandiges Rauschen enthalten sind. Unerwünschte, tonale Geräusche werden als störender empfunden als vergleichbare Geräusche ohne tonale Komponenten. Im Gegensatz dazu kann eine Erhöhung der Tonalität bei erwünschten und angenehmen Geräuschen, wie Musik, zu einer Verbesserung der Geräuschqualität führen.

Die ArtemiS SUITE bietet Ihnen verschiedene Algorithmen für die Bestimmung der Tonhaltigkeit Ihrer Signale an: zum einen die psychoakustische Tonhaltigkeit basierend auf dem Gehörmodell nach Sottek und zum anderen die Tonhaltigkeit nach DIN 45681.

Psychoakustische Tonhaltigkeit

Die psychoakustische Tonhaltigkeit der ArtemiS SUITE basiert auf einem verbesserten Gehörmodell nach Sottek. Bei der Entwicklung der Algorithmen für diese Analyse standen folgende Anforderungen im Fokus: eine lineare Abbildung der menschliche Tonhaltigkeitsempfindung, eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Hörversuchen und die korrekte Detektion bei Geräuschen mit sich schnell ändernder Tonhaltigkeit.

Bei der Berechnung wird zunächst die psychoakustische Lautheit des Signals bestimmt und anschließend mittels der Autokorrelationsfunktion in Lautheit tonaler und Lautheit breitbandiger Komponenten getrennt. Die Lautheit der tonalen Komponente wird anschließend als Grundlage zur Berechnung der Tonhaltigkeit verwendet. Dieses wahrnehmungsbasierte Verfahren zur Berechnung der Tonhaltigkeit von Geräuschen ist zur Standardisierung in der ECMA-74 eingereicht und wird voraussichtlich in der fünfzehnten Edition dieses Standards als Anhang enthalten sein. Die Einheit der psychoakustischen Tonhaltigkeit basierend auf dem Gehörmodell lautet tuHMS (aus dem Englischen: tonality units according to the hearing model of Sottek).

Anwendung und Beispiele

Für die Berechnung der psychoakustischen Tonhaltigkeit können Sie eine der folgenden Analysen verwenden:

- **Spez. Tonhaltigkeit (Gehörmodell)**, engl. **Spec. Tonality (Hearing Model)**
- **Spez. Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Drehzahl**, engl. **Spec. Tonality (Hearing Model) vs. RPM**
- **Spez. Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit**, engl. **Spec. Tonality (Hearing Model) vs. Time**
- **Tonhaltigkeitsfrequenz (Gehörmodell) über Zeit**, engl. **Tonality (Hearing Model) Frequency vs. Time**
- **Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Drehzahl**, engl. **Tonality (Hearing Model) vs. RPM**
- **Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit**, engl. **Tonality (Hearing Model) vs. Time**

Die Analysen mit dem Präfix **Spez.** zeigen die spezifische Tonhaltigkeit über der Frequenz an (Frequenzauflösung: $\frac{1}{2}$ Bark). Die anderen Analysen bestimmen jeweils die höchste Tonhaltigkeit über alle Frequenzbänder und stellen diesen Wert dar, z. B. in Abhängigkeit von der Zeit. Die Analyse

Tonhaltigkeitsfrequenz (Gehörmodell) über Zeit gibt als Ergebnis die Frequenz der höchsten Tonhaltigkeit über der Zeit aus. Im Eigenschaftfenster dieser Analyse können Sie den gewünschten Schwellenwert in der Einheit tuHMS eingeben. Werte unterhalb dieser Schwelle werden für die Berechnung des Gesamtergebnisses nicht berücksichtigt, um aus Rauschen resultierende scheinbare Tonhaltigkeiten zu eliminieren.

In Abbildung 7 ist ein Beispiel für eine Tonhaltigkeitsanalyse dargestellt. Das Geräusch enthält ein Störgeräusch (Jaulen), das als tonal wahrgenommen wird. Die beiden oberen Diagramme (links: linker Kanal; rechts: rechter Kanal) zeigen die Analyse **Spez. Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit**, das untere linke Diagramm die Analyse **Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit** und das untere rechte Diagramm die Analyse **Tonhaltigkeitsfrequenz (Gehörmodell) über Zeit**.

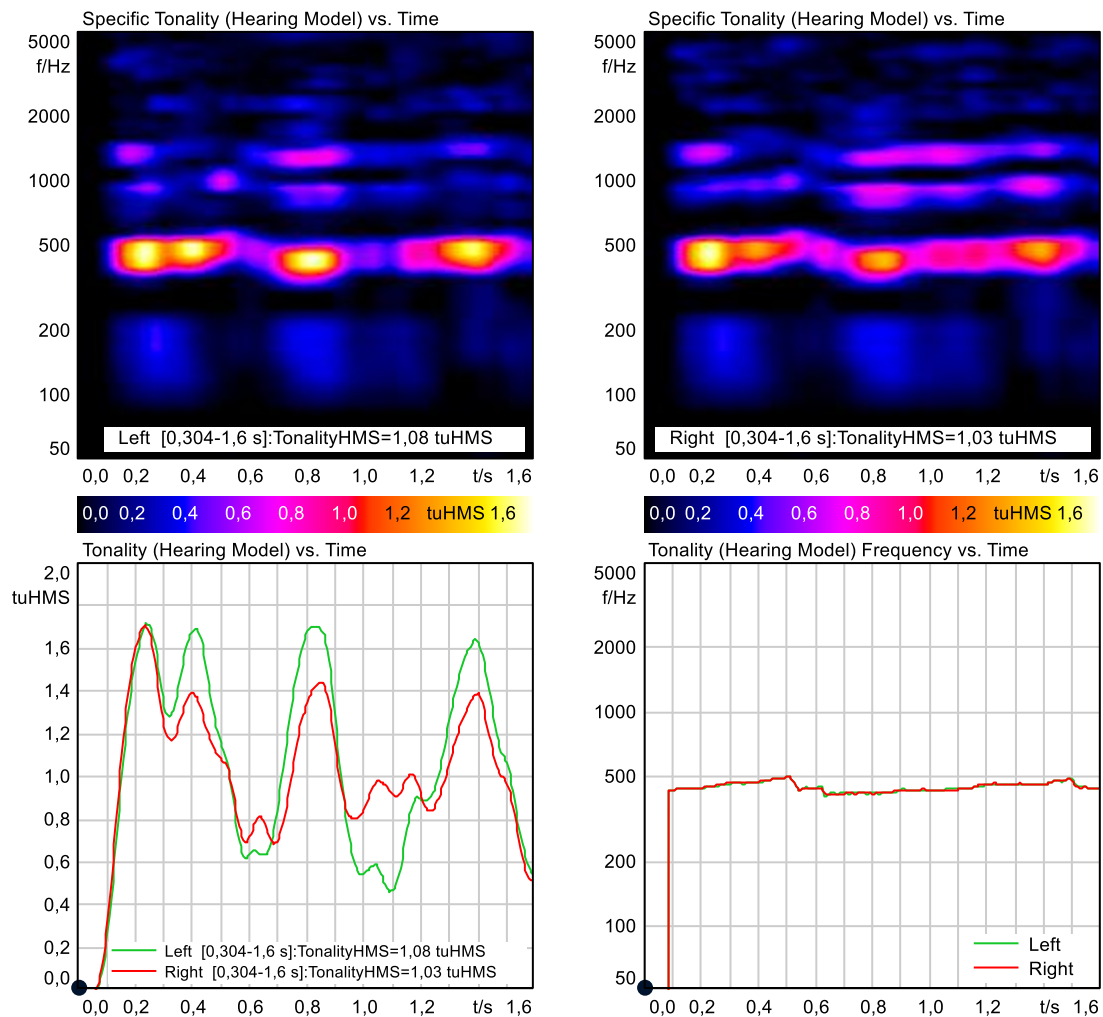


Abbildung 7: Oben: **Spez. Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit** (links: linker Kanal; rechts: rechter Kanal); unten links: **Tonhaltigkeit (Gehörmodell) über Zeit**; unten rechts: **Tonhaltigkeitsfrequenz (Gehörmodell) über Zeit**

In den Legenden (außer bei der Tonhaltigkeitsfrequenz-Analyse) ist jeweils der resultierende Einzelwert angegeben. Für die Berechnung dieses Wertes bleibt der Signalanfang unberücksichtigt, damit der Einschwingvorgang der digitalen Filter nicht das Gesamtergebnis verfälscht. In den eckigen Klammern ist angegeben, welcher Zeitraum in die Berechnung eingeflossen ist.

Tonhaltigkeit nach DIN 45681

Die Analyse **Tonhaltigkeit DIN 45681** dient der Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen entsprechend der DIN 45681. Diese Analyse ist keine psychoakustische Analyse im eigentlichen Sinne, da sie keine Ergebnisse erzeugt, die die menschliche Wahrnehmung linear wiedergeben. Dennoch wird die Analyse der Vollständigkeit halber im Folgenden kurz vorgestellt.

Die Norm enthält ein Verfahren (Programm) zur automatischen Ermittlung von Tönen und Tongruppen aus Schmalbandspektren. Die Analyse bestimmt die Differenz zwischen dem Tonpegel und dem Pegel des Rauschsignals in der umgebenden Frequenzgruppe, wobei zusätzlich ein frequenzabhängiges Verdeckungsmaß berücksichtigt wird. Aus der maximalen Differenz wird ein Tonzuschlag von 0 bis maximal 6 dB in 1-dB-Schritten vergeben:

| Pegeldifferenz | Tonzuschlag |
|----------------|-------------|
| > 12 dB | 6 dB |
| > 9 dB | 5 dB |
| > 6 dB | 4 dB |
| > 4 dB | 3 dB |
| > 2 dB | 2 dB |
| > 0 dB | 1 dB |
| ≤ 0 dB | 0 dB |

Im Diagramm dieser Analyse werden als Ergebnis folgende Angaben dargestellt:

- einzelne Töne und deren Pegeldifferenz als einzelne Spitzen im Spektrum
- Tongruppen und deren Pegeldifferenz als Rechtecke im Spektrum
- Tonzuschlag als Einzahlwert in der Titelzeile oder in der Legende
- Bei der Analyse **Tonhaltigkeit DIN 45681 über Zeit** bzw. **Drehzahl** wird zusätzlich eine mittlere Pegeldifferenz als Einzahlwert angegeben. Diese wird aus den maximalen Pegeldifferenzen der einzelnen Spektren energetisch gemittelt.

Anwendung und Beispiele

Die Pegeldifferenzen werden auf der Grundlage eines FFT-Spektrums bestimmt. Die für die Berechnung dieses Spektrums verwendete **DFT-Länge** und **Überlappung** (engl. **Spectrum Size** und **Overlap**) werden in den entsprechenden Feldern im Eigenschaften-Fenster der Analyse festgelegt (siehe Abbildung 8).

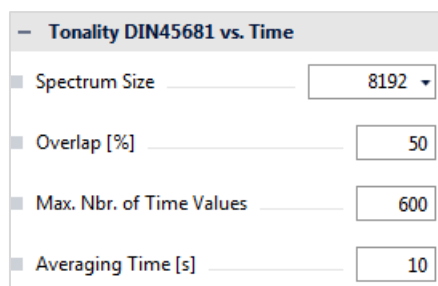


Abbildung 8: Eigenschaften-Fenster der Analyse **Tonhaltigkeit DIN 45681 über Zeit**

Nach der DIN 45681 sollte die Frequenzauflösung (Abtastrate/DFT-Länge) 4 % der Frequenzgruppenbreite nicht überschreiten. Das heißt, bei einer Frequenzauflösung von

$$\frac{\text{Abtastrate}}{\text{DFT - Länge}} = \frac{44100 \text{ Hz}}{8192} = 5,38 \text{ Hz}$$

entsprechen nur die Werte oberhalb einer Frequenzgruppenbreite von $\frac{5,38 \text{ Hz}}{0,04} = 134,5 \text{ Hz}$ (also oberhalb von 6 Bark) den Empfehlungen der DIN 45681.

Außerdem kann für die Analyse **Tonhaltigkeit DIN 45681 über Zeit** bzw. **Drehzahl** im Eigenschaften-Fenster eine gleitende Mittelung aktiviert werden. Sobald in dem Feld **Mittelungsdauer** (engl. **Averaging Time**) eine Zahl größer als Null eingetragen ist, wird eine Mittelung über die eingegebene Länge durchgeführt, um unkorrelierte Signalanteile zu unterdrücken.

In Abbildung 9 ist ein Beispiel für die Analyse **Tonhaltigkeit DIN 45681 über Zeit** dargestellt.

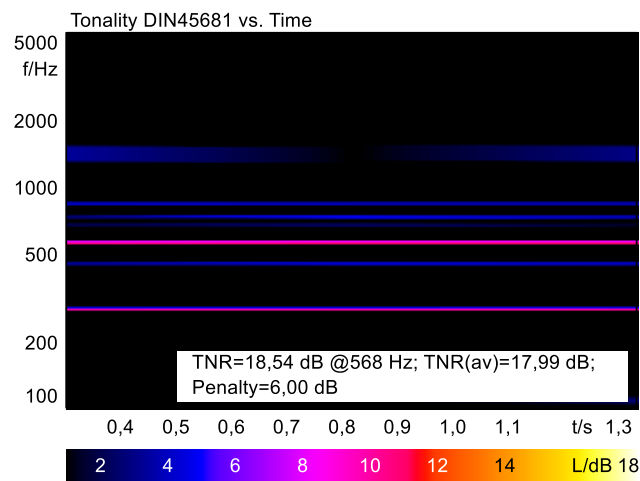


Abbildung 9: Analyse **Tonhaltigkeit DIN45681 über Zeit**

Die analysierte Geräusch-Datei besitzt mehrere tonale Komponenten, von denen die bei 568 Hz die stärkste ist und mit fast 18dB aus dem umliegenden Spektrum hervortritt. Wenn für dieses Geräusch ein Tonzuschlag bestimmt werden müsste, würde der maximale Tonzuschlag von 6 dB vergeben werden.

Hinweise

Für die Berechnung der in dieser Application Note vorgestellten Analysen mit einem Pool-Projekt benötigen Sie die folgenden ArtemiS SUITE Module: **ASM 00** ArtemiS SUITE Basic Framework (Code 5000) und **ASM 01** ArtemiS SUITE Basic Analysis Module (Code 5001). Außerdem benötigen Sie zur Berechnung der Rauigkeit und der psychoakustischen Tonhaltigkeit **ASM 16** ArtemiS SUITE Advanced Psychoacoustics Module (Code 5016), zur Berechnung der Schwankungsstärke **ASM 12** ArtemiS SUITE Psychoacoustics Module (Code 5012) und zur Berechnung der Tonhaltigkeit nach DIN 45681 **ASM 17** ArtemiS SUITE Advanced Analysis Module (Code 5017). Möchten Sie die Analysen mit einem Automatisierungs-Projekt bzw. einem Standardtest-Projekt berechnen, brauchen Sie ggf. andere Module. Ihr HEAD-acoustics-Ansprechpartner berät Sie gerne.

Haben Sie Fragen an den Autor?

Schreiben Sie uns an: imke.hauswirth@head-acoustics.de.

Wir freuen uns auf Ihre Rückmeldung!

Literatur

- [1] R. Sottek
Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör
Dissertation, RWTH Aachen, 1993
- [2] R. Sottek, P. Vranken, H.-J. Kaiser
Anwendung der gehörgerechten Rauigkeitsberechnung
Proc. DAGA '94, Dresden 1994, 1201-1204
- [3] R. Sottek
Gehörgerechte Rauigkeitsberechnung
Proc. DAGA '94, Dresden 1994, 1197-1200
- [4] N. Springer, R. Weber
Existenzbereich der R-Rauhigkeit
Proc. DAGA '94, Dresden 1994, 1221-1224
- [5] H. Fastl, E. Zwicker
Psychoacoustics, Facts and Models, Third Edition
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [6] F. Attia, A. Okker
*Unterscheidung zwischen Rauigkeitsmodellen und Übereinstimmung mit dem subjektiven
Gehöreindruck*
Proc. DAGA '95, Saarbrücken 1995, 843-846
- [7] M. Klemenz
Die Geräuschqualität bei der Anfahrt elektrischer Schienenfahrzeuge
Dissertation, RWTH Aachen, 2005