

FFT – $1/n$ -Oktavanalyse – Wavelet

Für die meisten akustischen Untersuchungen ist eine reine Pegelanalyse unzureichend, denn nicht nur der Pegel, sondern auch die frequenzabhängige Verteilung des Pegels ist entscheidend für die Wahrnehmung eines Geräuschereignisses. Diese Application Note stellt verschiedene Analysen zur frequenzabhängigen Schallpegelbestimmung vor: die Fast Fourier Transformation (FFT), die Analyse mit einer Filterbank mit $1/n$ -Oktavfiltern und die Wavelet-Analyse. Es werden die Funktionsweise dieser Analysen und deren Vor- und Nachteile erläutert, wobei sowohl die Frequenz- als auch die Zeitauflösung der jeweiligen Analyse eine große Rolle spielen. Aus diesem Grund werden speziell die Analysen, die als Funktion der Zeit dargestellt werden, beschrieben.

Fast Fourier Transformation	1
$1/n$ -Oktavanalyse	3
Wavelet	4
Verwendung der Analysen in der ArtemiS SUITE	5
FFT-Analyse	5
$1/n$ -Oktavanalyse	6
Wavelet-Analyse	8
Vergleich der Analysemethoden	9

Fast Fourier Transformation

Die Fourier-Analyse beruht auf einem von J. B. Fourier formulierten, mathematischen Theorem. Die Aussage dieses Theorems kann wie folgt zusammengefasst werden: Jede periodische Signalform kann als Überlagerung diskreter periodischer Sinus- und Cosinusschwingungen mit unterschiedlicher Frequenz und Amplitude dargestellt werden. Eine praxistaugliche Umsetzung dieses Theorems findet sich in der diskreten Fourier-Transformation (DFT) und der Fast Fourier Transformation (FFT). Die Ergebnisse der DFT und der FFT liefern das diskrete Frequenzspektrum eines abgetasteten Zeitsignals. Die FFT ist eine im Rechenaufwand reduzierte Form der DFT.

Vor der Transformation muss das Signal zeitlich zerlegt (gefenstert) werden, dazu wird das ursprüngliche Signal in mehrere Blöcke mit jeweils N Abtastwerten aufgeteilt. Dies ist die sogenannte Fensterung. Bei einer gemittelten Analyse (**FFT (gemittelt)**) werden die Ergebnisse der einzelnen Blöcke gemittelt. Bei den zeitabhängigen Analysen (**FFT über Zeit** und **FFT über Drehzahl**) werden die Ergebnisse der einzelnen Blöcke hintereinander in einem Spektrogramm abgebildet. Eine gemittelte Analyse bietet sich für stationäre Signale an, während sich die zeitabhängige Analyse für nicht stationäre Signale eignet. Im Gegensatz zur $1/n$ -Oktavanalyse ist die FFT eine Analyse mit konstanter Bandbreite. In Abbildung 1 ist die Verteilung der Frequenzstützstellen der FFT-Analyse auf einer linearen und einer logarithmischen Frequenzachse schematisch dargestellt. Die Frequenzstützstellen auf der linearen Frequenzskala sind äquidistant verteilt, auf der logarithmischen Skala liegen sie bei hohen Frequenzen näher zusammen. Die Frequenzauflösung Δf ist über den gesamten Frequenzbereich gleich, sie ergibt sich aus der Abtastrate und der für die Analyse ausgewählten

$$\text{Blocklänge: } \Delta f = \frac{\text{Abtastrate}}{\text{Blocklänge}}$$

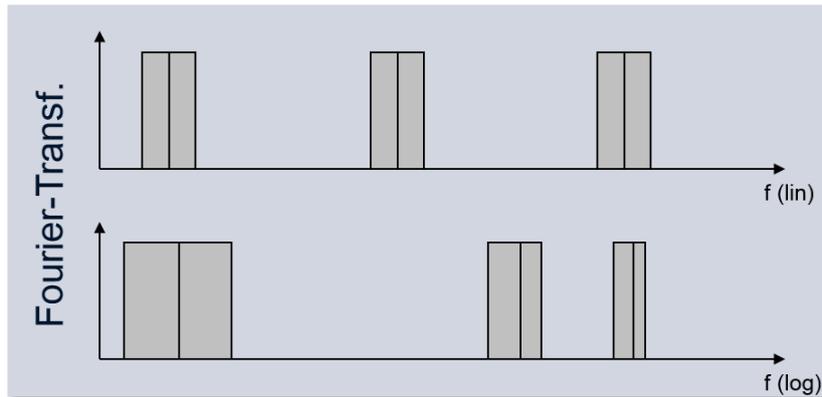


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Frequenzstützstellen der FFT-Analyse auf einer linearen und einer logarithmischen Frequenzskala

Aufgrund der konstanten Verteilung der Stützstellen zeigt die gemittelte FFT-Analyse von rosa Rauschen eine abfallende Kurve und die Analyse von weißem Rauschen eine frequenzunabhängige Kurve (siehe Abbildung 2).

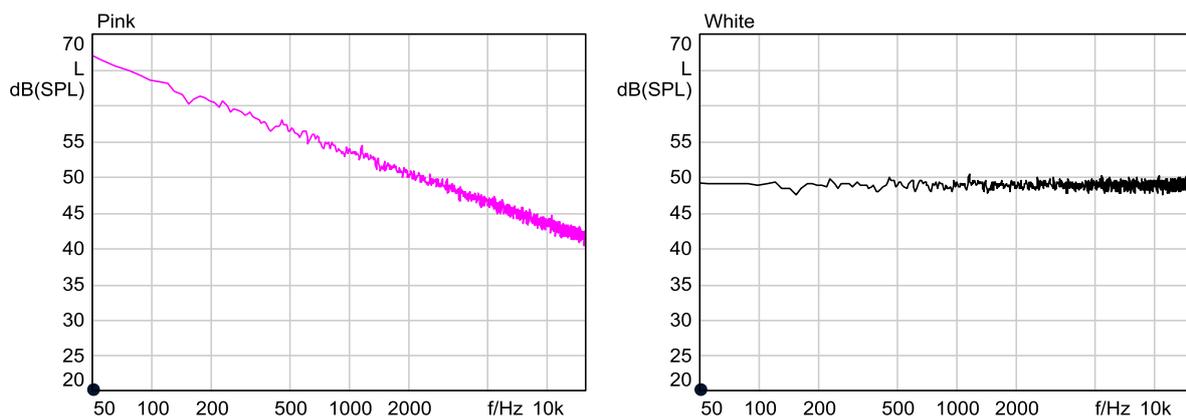


Abbildung 2: FFT-Analyse von rosa Rauschen (links) und weißem Rauschen (rechts)

$1/n$ -Oktavanalyse

Bei der $1/n$ -Oktavanalyse wird das zu analysierende Signal durch eine digitale Filterbank in Teilsignale aufgesplittet, bevor der Pegel bestimmt wird. Die Filterbank besteht aus mehreren parallel geschalteten $1/n$ -oktavnbreiten Filtern.

Ein Oktavfilter ist ein Filter, dessen obere Grenzfrequenz jeweils das Doppelte der unteren Grenzfrequenz beträgt, und $1/3$ -Oktavfilter (auch Terzfilter genannt, engl. 3rd octave filter) unterteilen die Oktavbänder nochmals in drei Teile usw. Die Oktavfilter bzw. $1/n$ -Oktavfilter besitzen also keine konstante absolute, aber eine konstante relative Bandbreite, d. h. die Frequenzbänder sind äquidistant auf einer logarithmischen Frequenzskala verteilt. Auf einer linearen Frequenzskala aufgetragen, nimmt die Filterbreite logarithmisch zu (siehe Abbildung 3).

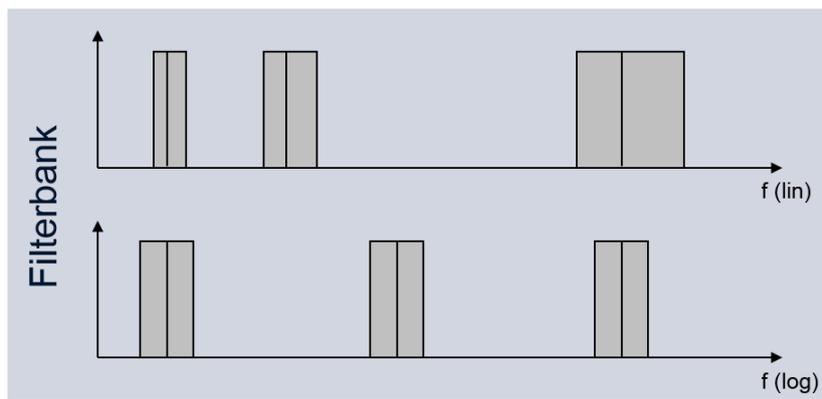


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Filterbreite auf einer linearen und einer logarithmischen Frequenzskala

Beispiele: Ein Oktavfilter mit einer Mittenfrequenz von 63 Hz ist 44 Hz breit, während ein Oktavfilter mit einer Mittenfrequenz von 16000 Hz eine Breite von 11360 Hz besitzt. Ein Terzfilter mit einer Mittenfrequenz von 63 Hz besitzt eine Breite von nur 14,5 Hz und ein Terzfilter mit einer Mittenfrequenz von 16000 Hz ist 3650 Hz breit.

Die Auswirkungen der zu hohen Frequenzen breiter werdenden Filter auf die Analyseergebnisse werden im Folgenden anhand von rosa und weißem Rauschen erläutert. Weißes Rauschen besitzt eine frequenzunabhängige spektrale Leistungsdichte, d. h. der Pegel ist über den gesamten Frequenzbereich konstant. Wird ein weißes Rauschen mit einer Filterbank aus $1/n$ -Oktavfiltern untersucht, zeigt das Diagramm eine ansteigende Kurve, weil zu höheren Frequenzen hin die Filterbreite ansteigt und somit mehr Energie auf ein Filterband entfällt (siehe Abbildung 4, rechts). Wenn mit derselben Filterbank rosa Rauschen untersucht wird, dessen Amplitude 3 dB pro Oktave zu hohen Frequenzen abfällt, ergibt sich approximativ die gleiche Leistung in jedem Filterband. Der Abfall der Leistung des rosa Rauschens zu hohen Frequenzen hin wird also durch die breiter werdenden Filter kompensiert. Die $1/n$ -Oktavanalyse von rosa Rauschen zeigt daher eine frequenzunabhängige Kurve (siehe Abbildung 4, links).

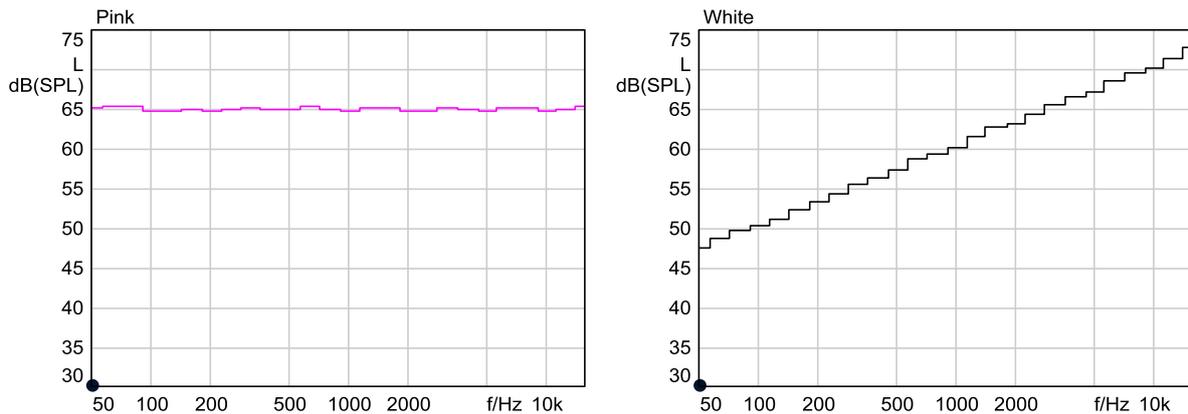


Abbildung 4: Terzpegelanalyse von rosa Rauschen (links) und weißem Rauschen (rechts)

Als Ergebnis einer $1/n$ -Oktavanalyse kann entweder ein gemitteltetes Spektrum oder auch ein zeit- bzw. drehzahlabhängiges Spektrogramm berechnet werden. In der ArtemiS SUITE stehen hierfür die Analysen **$1/n$ -Oktavspektrum**, **$1/n$ -Oktavspektrum (Spitzenwert)**, **$1/n$ -Oktavspektrum über Drehzahl** und **$1/n$ -Oktavspektrum über Zeit** zur Verfügung, jeweils mit dem Zusatz **FFT** und **Filter**¹. Bei den FFT-basierten Analysen werden die Teilbänder durch Addition der betreffenden Spektrallinien aus einem FFT-Spektrum berechnet und bei den filterbasierten Analysen werden die Teilbänder tatsächlich durch Filterung mittels digitaler Filter bestimmt. Im Gegensatz zu der kontinuierlichen Verarbeitung des Signals bei der Filtermethode erfolgt die Verarbeitung bei der FFT-Methode blockweise, d. h. das Signal wird vor der Analyse in Blöcke unterteilt. Da bei der Filtermethode keine Fensterung des Signals vorgenommen werden muss und so die dadurch entstehenden Artefakte vermieden werden, ist diese der FFT-Methode vorzuziehen.

Wavelet

Bei der Wavelet-Analyse² wird das Schallsignal mithilfe von kompakten Wellenpakten, sogenannten „Wavelets“, untersucht. Dazu werden in der ArtemiS SUITE die Impulsantworten von verschiedenen Bandpassfiltern als Wavelet-Analysefunktion verwendet.

Im Gegensatz zu der FFT mit konstanter Analysebandbreite besitzt die Wavelet-Analyse genau wie die $1/n$ -Oktavanalyse eine Frequenzauflösung mit konstanter relativer Bandbreite. Abbildung 5 verdeutlicht den Unterschied der Frequenz- und Zeitauflösung bei der FFT und Wavelet-Analyse.

Auf der x-Achse der Zeichnung ist die Zeit und auf der y-Achse die Frequenz aufgetragen. Eine schmale, hohe Box steht für eine hohe Zeitauflösung und eine niedrige Frequenzauflösung, während eine flache, breite Box eine gute Frequenzauflösung und eine niedrige Zeitauflösung symbolisiert. Bedingt durch die Zeit-Frequenz-Unschärfe ist die Fläche der „Zeit-Frequenz-Boxen“ in der Zeichnung immer gleich.

¹ Filterbasierte Analysen können nur ausgewählt werden, wenn die verwendete ArtemiS-SUITE-Lizenz über ASM 14 verfügt, ansonsten stehen nur die FFT-basierten Analysen zur Verfügung.

² Diese Analyse kann nur ausgewählt werden, wenn die verwendete ArtemiS-SUITE-Lizenz über ASM 17 verfügt.

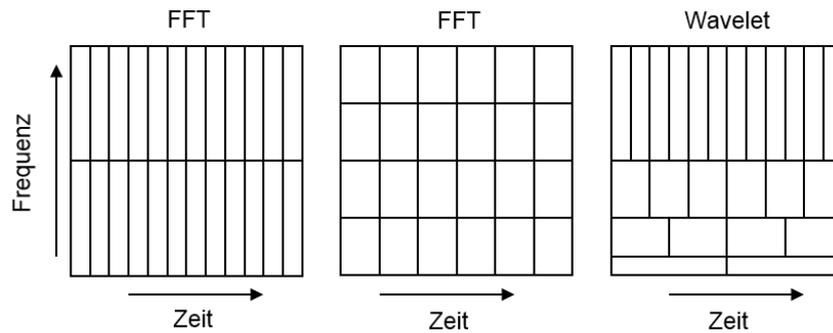


Abbildung 5: Frequenz- und Zeitauflösung bei der Wavelet-Analyse im Vergleich zur FFT

Die linke und die mittlere Grafik zeigen die Auflösung von FFT-Analysen mit unterschiedlicher Fensterlänge. Die linke Zeichnung zeigt die Auflösung einer FFT-Analyse mit kleiner Fensterlänge (d. h. hohe zeitliche Auflösung) und bedingt dadurch mit geringer Frequenzauflösung. Die FFT der mittleren Grafik besitzt eine größere Fensterlänge, also eine niedrigere Zeitauflösung, aber eine verbesserte Frequenzauflösung. Sowohl die Zeit- als auch die Frequenzauflösung ist bei der FFT für den gesamten Frequenzbereich konstant. Dies ist bei der Wavelet-Analyse nicht der Fall, wie die rechte Grafik in Abbildung 5 zeigt. Bei niedrigen Frequenzen liefert die Wavelet-Analyse eine hohe Frequenzauflösung verbunden mit einer niedrigen zeitlichen Auflösung. Zu hohen Frequenzen wird die Frequenzauflösung schlechter, aber die Zeitauflösung ist deutlich besser. Die Fläche der Boxen ist dabei immer identisch. Die Auflösung der Wavelet-Analyse entspricht in guter Näherung der Analyse im menschlichen Ohr.

Verwendung der Analysen in der ArtemiS SUITE³

FFT-Analyse

Abbildung 6 zeigt das Eigenschaften-Fenster der Analyse **FFT über Zeit**, das im Folgenden näher erläutert wird.

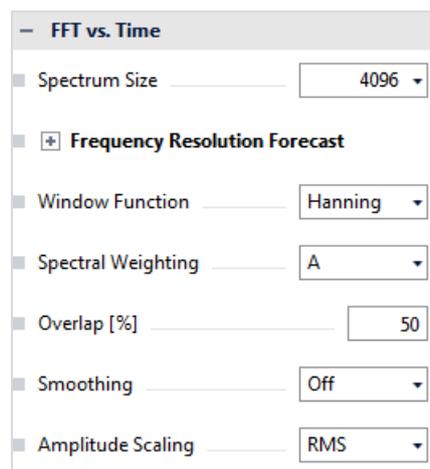


Abbildung 6: Eigenschaften-Fenster der Analyse **FFT über Zeit**

In der Auswahlbox **DFT-Länge** (engl. **Spectrum Size**) wird die Blocklänge der Analyse ausgewählt. Eine große Blocklänge bewirkt eine hohe Frequenzauflösung der FFT-Analyse, während eine kleine Blocklänge eine gute Zeitauflösung ermöglicht. Bedingt durch die zeitliche Fensterung unterliegt die FFT-Analyse einer Zeit-Frequenz-Unschärfe: Eine hohe Frequenzauflösung bewirkt auch immer eine

³ 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.

niedrige Zeitauflösung und umgekehrt. Aber durch die Einstellmöglichkeit der Fensterlänge können Sie individuell festlegen, welcher Aspekt für Ihre Anwendung wichtig ist. Eine Blocklänge von 4096 Abtastwerten entspricht bei einer Abtastrate von 44100 Hz einer zeitlichen Auflösung von 0,093 Sekunden. Die Frequenzauflösung liegt dann bei 10,77 Hz. Durch Vergrößern bzw. Verkleinern der Blocklänge wird die Frequenzauflösung bzw. die Zeitauflösung verbessert. Durch das Maximieren der Anzeige **Resultierende Frequenzauflösung** (engl. **Frequency Resolution Forecast**) können Sie sich die Frequenzauflösung für die momentan ausgewählte DFT-Länge für verschiedene Abtastraten anzeigen lassen.

In der nächsten Auswahlbox bestimmen Sie die gewünschte **Fensterfunktion** (engl. **Window Function**). Mit der Fensterfunktion kann eine zeitliche Gewichtung der Blockausschnitte durchgeführt werden, um den sogenannten Leakage-Effekt zu vermindern. Wie bereits beschrieben, muss das Zeitsignal für die FFT-Analyse in einzelne Blöcke zerschnitten werden. Bei der Analyse dieser Blöcke wird eine periodische Fortsetzung des Zeitsignals impliziert. Dies kann an den Rändern des Signalausschnitts zu Unstetigkeitsstellen führen, wenn innerhalb eines solchen Blocks kein ganzzahliges Vielfaches einer Periode enthalten ist. Diese Unstetigkeitsstellen bewirken im Spektrum Frequenzen, die im Originalsignal nicht vorhanden sind. Dieses Ausfließen der Signalenergie zu benachbarten Frequenzen der Originalfrequenz wird als Leakage-Effekt bezeichnet. Durch geeignete Fensterung mit Fensterfunktionen, die zum Rand hin gegen Null gehen, kann dieser Effekt reduziert werden. Da die Wahl der Fensterfunktion Auswirkungen auf das Ergebnis der Analyse hat, muss auch die Fensterfunktion passend zur Anwendung ausgewählt werden. Für viele Anwendungen eignet sich das Hanning-Fenster, weil es den Leakage-Effekt sehr gut reduziert. Andere Fensterfunktionen sind für spezielle Anwendungen optimiert. Zum Beispiel besitzt das Kaiser-Bessel-Fenster eine sehr gute Frequenzauflösung und sollte verwendet werden, um tonale Komponenten mit sehr unterschiedlichen Pegeln voneinander zu separieren.

Um die zeitliche Gewichtung der Fensterfunktionen auszugleichen, kann eine Überlappung der Fenster festgelegt werden. In der Auswahlbox **Überlappung[%]** (engl. **Overlap[%]**) kann die gewünschte Überlappung in Prozent eingetragen werden. Beim Hanning-Fenster wird häufig eine Überlappung von 50 % oder 66,67 % verwendet. Eine Überlappung von 50 % bewirkt einen amplitudenrichtigen Ausgleich der Fensterung, während eine Überlappung von 66,67 % die Leistung konstant hält.

In der Auswahlbox **Frequenzbewertung** (engl. **Spectral Weighting**) können Sie Filter für eine frequenzabhängige Gewichtung aktivieren bzw. deaktivieren. Mit diesen Filtern werden unterschiedliche Frequenzbereiche verschieden stark gewichtet. Die A-Bewertung wird für die Analyse von Luftschallsignalen häufig verwendet. Durch diese Gewichtung wird die frequenzabhängige Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs berücksichtigt, denn das A-Filter entspricht ungefähr der invertierten Hörschwelle einer normal hörenden Person.⁴

Mit der Funktion **Glättung** (engl. **Smoothing**) kann das berechnete FFT-Spektrum geglättet werden. Eine Glättung kann benutzt werden, wenn der spektrale Verlauf von Signalen z. B. zur Erstellung eines darauf basierenden nicht rekursiven Filters (FIR-Filters) berechnet werden soll.

Im Feld **Amplitudenskalierung** (engl. **Amplitude Scaling**) stehen die beiden Möglichkeiten **Effektivwert** und **Spitzenwert** (engl. **RMS** und **Peak**) zur Auswahl. Im ersten Fall zeigt jede FFT-Linie den Effektivwert der Schwingung an und im zweiten Fall wird der Spitzenwert berechnet, der bei einer Sinusschwingung um den Faktor $\sqrt{2}$ größer ist als der Effektivwert.

$1/n$ -Oktavanalyse

In Abbildung 7 ist das Eigenschaften-Fenster der Analyse **$1/n$ -Oktavspektrum über Zeit** dargestellt (links: FFT-basiert, rechts: filterbasiert).

In der ersten Auswahlbox beider Eigenschaften-Fenster wird die **Frequenzbandauflösung** der Analyse festgelegt (engl. **Band Resolution**). Es können Filter für Oktaven oder Bruchteile von Oktaven ausgewählt werden. Um die menschliche Wahrnehmung nachzubilden, sind die terzbreiten Filter ($1/3$ Octave) besonders gut geeignet, weil die Breite der Terzfilter oberhalb von 500 Hz ungefähr den Frequenzgruppen aus der Psychoakustik entspricht.

⁴ Die Verwendung und Auswirkungen der Frequenzbewertung sind in der Application Note „Frequenzbewertung von Luftschallsignalen“ beschrieben.

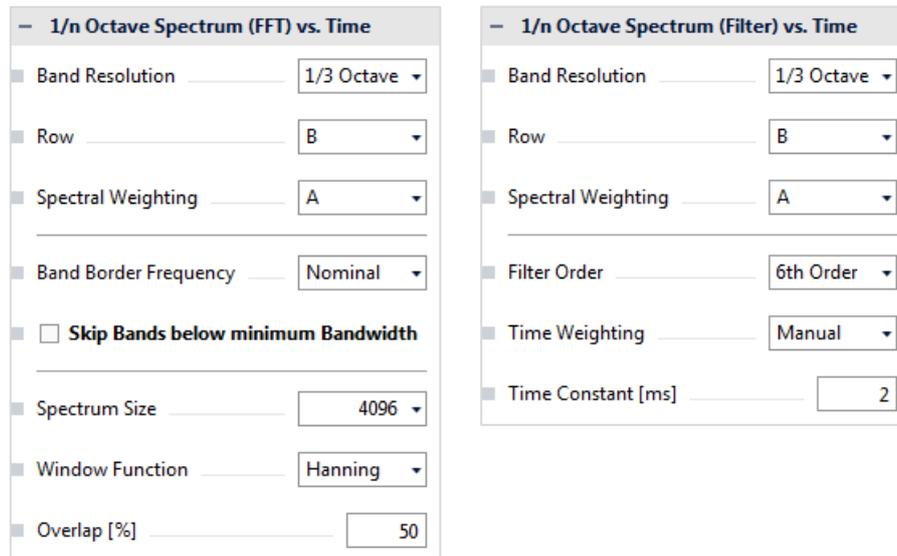


Abbildung 7: Eigenschaftens-Fenster der beiden Analysen $1/n$ -Oktavspektrum über Zeit (links: FFT-basiert, rechts: filterbasiert)

Neben der Filterbandbreite ist auch die Lage der Filter einstellbar: Im Auswahlfeld **Reihe** (engl. **Row**) kann eine von zwei Filterreihen ausgewählt werden, die um eine halbe Bandbreite gegeneinander verschoben sind. Reihe **B** ist so definiert, dass die 1-kHz-Marke der Mittenfrequenz eines Filters entspricht. Mit der Einstellung **A** entspricht die 1-kHz-Marke der Grenzfrequenz eines Filters. Üblicherweise findet Reihe **B** Verwendung.

In der Auswahlbox **Frequenzbewertung** (engl. **Spectral Weighting**) können Sie eine spektrale Bewertung der Analyse z. B. mit einem A-, B-, C- oder D-Filter aktivieren.

Die weiteren Einstellungsmöglichkeiten unterscheiden sich entsprechend der gewählten Berechnungsmethode.

Im Eigenschaftens-Fenster der filterbasierten Analyse können Sie im nächsten Abschnitt die Eigenschaften der Filter konfigurieren: Im Feld **Filterordnung** (engl. **Filter Order**) stehen Filter vierter und sechster Ordnung zur Auswahl. Die Filter sechster Ordnung (Tschebyscheff-Filter mit einer Welligkeit < 0,005 dB) entsprechen der ANSI-Norm S 1.11 und der IEC 61260. Die Terzfilter vierter Ordnung entsprechend der zurückgezogenen DIN 45652 und sind lediglich noch aus Kompatibilitätsgründen verfügbar. Grundsätzlich wird der Einsatz der Filter sechster Ordnung empfohlen, außer wenn Sie für die Vergleichbarkeit mit älteren Berechnungsergebnissen Filter vierter Ordnung verwenden müssen. Außerdem besteht die Möglichkeit, eine **Zeitbewertung** (engl. **Time Weighting**) festzulegen. Durch diese werden die Pegelkurven durch exponentielle Integration geglättet. Es stehen die Optionen **Schnell**, **Langsam**, **Impuls** und **Manuell** (engl. **Slow**, **Fast**, **Impulse**, **Manual**) zur Verfügung. Die Integrationszeit bei **Langsam** beträgt 1s und bei **Schnell** 125 ms. Mit der Einstellung **Impuls** wird ein Spitzenwertdetektor mit einer Integrationszeit von 35 ms und einer Abklingzeit von 1500 ms aktiviert. Durch die Auswahl von **Manuell** kann die Integrationszeit im Feld **Zeitkonstante [ms]** (engl. **Time Constant [ms]**) individuell ausgewählt werden. Je länger die Integrationszeit gewählt wird, umso stärker wird das Ergebnis geglättet. Um der menschlichen Signalverarbeitung Rechnung zu tragen, sollte eine Integrationszeit von 2 ms verwendet werden.

Die weiteren Einstellungsmöglichkeiten für die FFT-basierte Analysen werden im Folgenden beschrieben. Für die Einstellung der **Frequenzbandgrenzen** (engl. **Band Border Frequency**) stehen die drei Optionen **Nominal**, **Oktave** und **Dekadisch** zur Auswahl. Je nach gewählter Einstellung werden die Grenzen der Frequenzbänder unterschiedlich bestimmt, so dass sich die Analyseergebnisse minimal unterscheiden können. Für die Einstellung **Nominal** werden die Bandgrenzen aus genormten Tabellen entnommen. Für die Einstellung **Oktave** werden die Grenzen nach der Formel $f = 1\text{kHz} \cdot 2^{n/M}$ berechnet und für die Einstellung **Dekadisch** nach der Formel $f = 1\text{kHz} \cdot 10^{n/M}$. Hierbei steht M für den Bruchteil der Oktave/Dekade und n ist ein ganzzahliger Index.

Die Funktion **Bänder unterhalb der minimalen Bandbreite auslassen** (engl. **Skip Bands below minimum Bandwidth**) erlaubt es Ihnen, eine minimale Bandbreite in Abhängigkeit der Frequenzauflösung der FFT einzugeben. Alle Frequenzbänder, die diese minimale Bandbreite unterschreiten, werden nicht dargestellt. Diese Funktion bewirkt, dass Frequenzbänder, für die noch gar keine FFT-Stützstelle zur Verfügung steht, nicht dargestellt werden.

Darunter wird die für die Berechnung der FFT verwendete Fensterung konfiguriert. Dazu gehören die **DFT-Länge**, die **Fensterfunktion** und die **Überlappung** (engl. **Spectrum Size, Window Function, Overlap**). Diese Funktionen wurden bereits im vorherigen Abschnitt erläutert.

Wavelet-Analyse

Abbildung 8 zeigt das Eigenschaften-Fenster der Wavelet-Analyse in der ArtemiS SUITE.

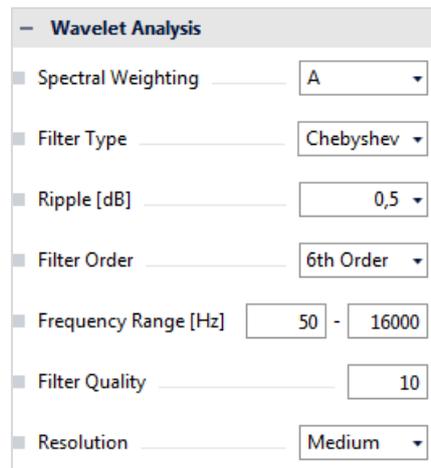


Abbildung 8: Eigenschaften-Fenster der Analyse **Wavelet**

In der ersten Auswahlbox kann, wie auch bei den anderen Analysen, eine spektrale **Frequenzbewertung** (engl. **Spectral Weighting**) ausgewählt werden, die das berechnete Spektrum gewichtet, z. B. mit einem A-, B-, C- oder D-Filter.

Darunter erfolgen Angaben zu dem Bandpassfilter, dessen Impulsantwort als Wavelet-Analysefunktion verwendet werden soll. Zu diesen Angaben gehören der **Filtertyp**, die **Filterordnung** und die **Filtergüte** (engl. **Filter Type, Filter Order, Filter Quality**). Auf diese Weise werden die Steilheit der Filterflanken und die Filterbreite festgelegt. Ein steiles, schmales Filter bedeutet eine hohe Frequenzauflösung, aber auch eine niedrige Zeitauflösung (und umgekehrt). Ist als Filtertyp ein Tschebyscheff-Filter ausgewählt worden, muss zusätzlich auch die **Welligkeit** (engl. **Ripple**) im Übertragungsbereich der Filter angegeben werden. Die Welligkeit beeinflusst bei Tschebyscheff-Filter die Steilheit der Flanken, bei konstanter Filterordnung ist der Abfall umso steiler, je größer die zugelassene Welligkeit ist.

Mit der Einstellung des zu analysierenden **Frequenzbereichs [Hz]** (engl. **Frequency Range [Hz]**) können Sie die Untersuchung auf den interessanten Bereich eingrenzen. Im letzten Auswahlfeld des Eigenschaften-Fensters kann die nötige **Auflösung** (engl. **Resolution**) festgelegt werden. Bei einer hohen Auflösung (engl. **High**) werden 128, bei der mittleren Auflösung (engl. **Medium**) 64 und bei der niedrigsten Auflösung (engl. **Low**) 32 Bandpassfilter für die Analyse des ausgewählten Frequenzbereichs verwendet. Eine höhere Anzahl von Bandpassfiltern führt neben der höheren Auflösung zu einer längeren Rechenzeit.

Wie bei der $1/n$ -Oktavanalyse wird bei der Berechnung der Wavelet-Analyse in der ArtemiS SUITE eine zeitliche Bewertung mittels einer exponentiellen Integration durchgeführt. Bei der Wavelet-Analyse wird hierzu aber keine feste, sondern eine frequenzabhängige Zeitkonstante T verwendet, mit

$$T = \frac{1}{\text{Mittelfrequenz des Bandpassfilters}}$$

Vergleich der Analysemethoden

Im Folgenden werden zwei Geräusche aus dem Automobilbereich untersucht. Zum einen ein Geräusch, das beim Schließen einer Autotür entsteht, und zum anderen ein Motorgeräusch mit einem deutlich wahrnehmbaren, hochfrequenten Pfeifen des Turboladers. Die Fahrzeughür erzeugt ein sehr kurzes, breitbandiges Geräusch. Im Gegensatz dazu besitzt das Motorgeräusch eine sehr ausgeprägte tonale Komponente. Um diese Geräusche sinnvoll zu analysieren, ist es nicht nur erforderlich, die richtige Analyse auszuwählen, zusätzlich müssen auch die richtigen Analyseparameter eingestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass die richtigen Analyseparameter nicht nur von der Art des Geräusches abhängen, sondern auch davon, welcher Aspekt des Geräusches genauer untersucht werden soll. Bei der Analyse des Türschließgeräusches bedeutet das, dass, obwohl das Geräusch sehr kurz ist, unter Umständen trotzdem eine lange Blocklänge für die FFT-Analyse ausgewählt wird, damit die einzelnen Frequenzen des Geräusches untersucht werden können.

Mithilfe der folgenden Abbildungen wird der Unterschied zwischen den Analysen und die Auswirkung bei Änderung der Einstellungsparameter deutlich. In Abbildung 9 sind Analyseergebnisse des Türschließgeräusches dargestellt. Das linke Diagramm zeigt jeweils eine $1/n$ -Oktavanalyse, das mittlere Diagramm eine FFT-Analyse und das rechte Diagramm eine Wavelet-Analyse. Der Unterschied zwischen Diagrammen oben und unten liegt in jeweils einem Analyseparameter, der für die Berechnung geändert wurde. Folgende Analyseparameter sind verwendet worden:

$1/n$ -Oktavspektrum (Filter) über Zeit:

Frequenzbandauflösung (Band Resolution):	Terz (oben) / $1/12$ Oktave (unten)
Frequenzbewertung (Spectral Weighting):	Keine
Filterordnung (Filter Order):	6. Ordnung
Zeitbewertung (Time Weighting):	Manuell
Zeitkonstante (Time Constant):	2

FFT über Zeit:

DFT-Länge (Spectrum Size):	512 (oben) / 4096 (unten)
Fensterfunktion (Window Function):	Hanning
Frequenzbewertung (Spectral Weighting):	Keine
Überlappung (Overlap):	75
Glättung (Smooth)	Aus

Wavelet-Analyse:

Frequenzbewertung (Spectral Weighting):	Keine
Filter-Typ (Filter Type):	Tschebyscheff
Welligkeit (Ripple):	0,5
Filterordnung (Filter Order):	6. Ordnung
Frequenzbereich (Frequency Range):	50 - 16000 Hz
Filtergüte (Filter Quality):	10
Auflösung (Resolution):	Mittel (oben) / Hoch (unten)

Der Vergleich der oberen Diagramme zeigt, dass sich die Frequenzauflösung der unterschiedlichen Analysen unterscheidet. Bei der FFT-Analyse ist die Frequenzauflösung über den gesamten Frequenzbereich gleich. Da die Frequenzachse aber logarithmisch dargestellt wird, wirkt die Frequenzauflösung der FFT-Analyse im tieffrequenten Bereich schlechter als bei hohen Frequenzen. Die Terzpegelanalyse (oben links) besitzt genau wie die Wavelet-Analyse (oben rechts) eine Frequenzauflösung, die auf der logarithmischen Frequenzachse konstant ist. Außerdem wird deutlich, dass die Ergebnisse der Analysen, die auf digitaler Filterung basieren (Terzpegelanalyse und Wavelet), bei tiefen Frequenzen eine leichte Verzögerung aufweisen. Dies wird durch die Einschwingvorgänge der digitalen Filter hervorgerufen, die bei tieffrequenten Filtern länger dauern. Ein solches Einschwingen findet bei der FFT-Analyse nicht statt, aus diesem Grund ist die Anzeige der tiefen Frequenzen in diesem Diagramm nicht verschoben.

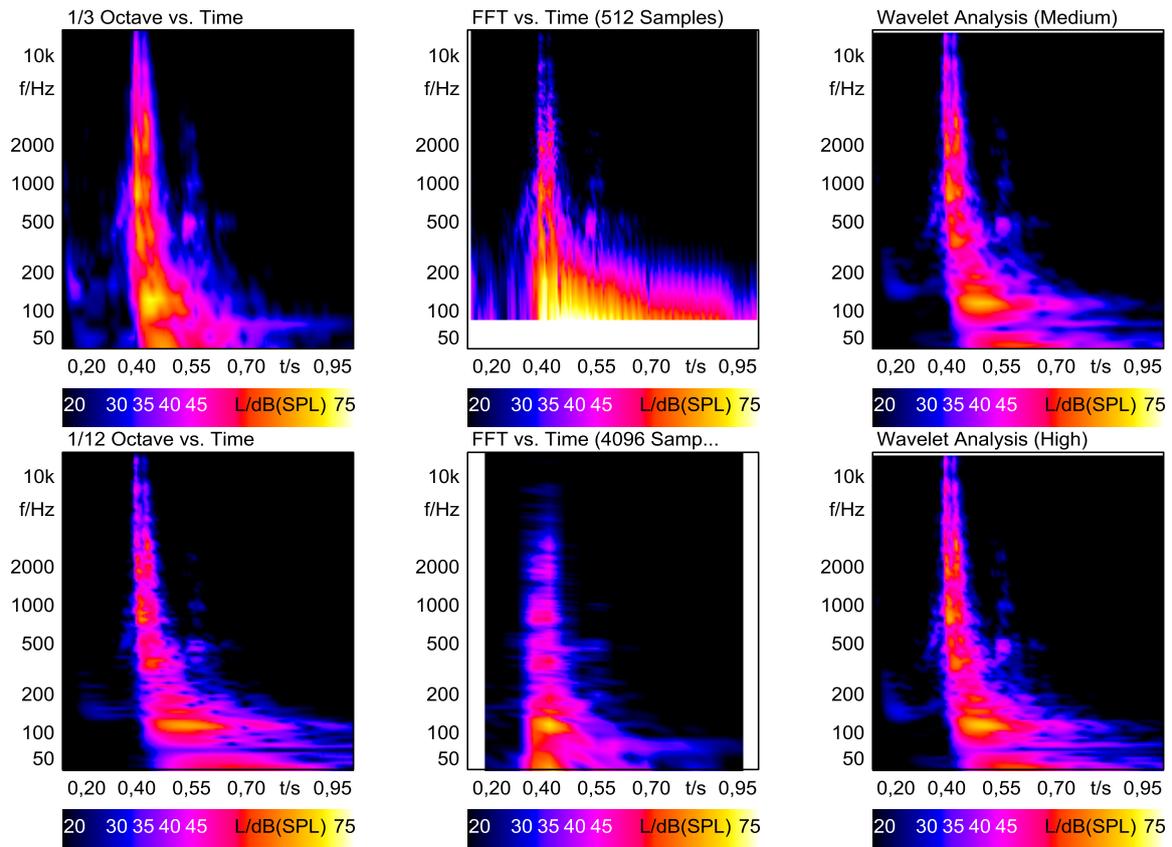


Abbildung 9: Analyseergebnisse eines Türschließgeräusches; Diagramme links: $1/n$ -Oktavspektrum (Filter) über Zeit (oben: Terz, unten: $1/12$ Oktave), Diagramme Mitte: FFT über Zeit (DFT-Länge oben: 512, unten: 4096), Diagramme rechts: Wavelet-Analyse (Auflösung oben: Mittel, unten: Hoch).

Der Unterschied zwischen den oberen und unteren Diagrammen ist die höhere Frequenzauflösung der unteren. Die Verbesserung der Frequenzauflösung hat aber gleichzeitig auch negative Auswirkungen. Bei der $1/n$ -Oktavanalyse (linke Diagramme) führt die Erhöhung der Auflösung von Terzen auf $1/12$ Oktaven gleichzeitig zu einem stärkeren zeitlichen Auseinanderdriften des Analyseergebnisses bei tiefen Frequenzen. Bei der FFT-Analyse (mittlere Diagramme) zeigt der Vergleich, dass die bessere Frequenzauflösung (besonders gut zu sehen im tieffrequenten Bereich) zu einer nur noch sehr eingeschränkten zeitlichen Auflösung führt. Die Auswirkung der geänderten Analyseparameter ist bei der Wavelet-Analyse nur sehr gering.

Insgesamt gibt die Wavelet-Analyse den Frequenz-Zeit-Verlauf des Türzuschlaggeräusches sehr gut wieder. Allerdings können auch den beiden anderen Analysen wichtige Details entnommen werden, wenn die Stärken und Schwächen der Analysen berücksichtigt werden. Welche Analyse letztendlich Verwendung findet, wird natürlich auch durch die individuellen Vorlieben und Gewohnheiten des Benutzers bedingt.

Ein Vorteil der FFT-Analyse, der bisher noch nicht erwähnt wurde, ist die deutlich kürzere Rechenzeit im Gegensatz zur Wavelet-Analyse. Wenn schnelle Analyseergebnisse von einer großen Datenmenge benötigt werden, würde dies für die Berechnung der FFT sprechen.

In Abbildung 10 sind die Analyseergebnisse eines Motorgeräusches mit einem tonalen Pfeifen dargestellt. Für die Analysen wurden dieselben Analyseparameter verwendet wie für das Türschließgeräusch in Abbildung 9 unten.

Der Vergleich der Ergebnisse in Abbildung 10 zeigt, dass für die Analyse dieser hochfrequenten, tonalen Komponente die FFT-Analyse mit einer Blocklänge von 4096 Abtastwerten besonders gut geeignet ist. Das Pfeifen des Turboladers zwischen 4 und 5 kHz ist bei dieser Analyse deutlich zu erkennen. Bei den beiden anderen Analysen ist die Frequenzauflösung bei hohen Frequenzen nicht ausreichend, um die tonale Komponente aufzulösen.

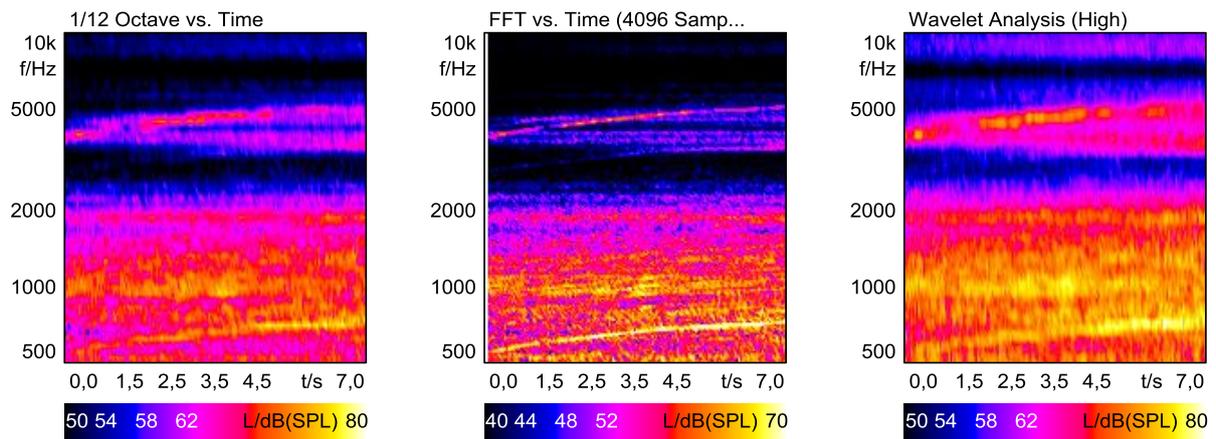


Abbildung 10: Analyseergebnisse eines Motorgeräusches; Diagramm links: **1/12-Oktavspektrum (Filter) über Zeit**, Diagramm Mitte: **FFT über Zeit** (DFT-Länge: **4096**), Diagramm rechts: **Wavelet-Analyse** (Auflösung: **Hoch**).

Haben Sie Fragen an den Autor? Schreiben Sie uns an:

imke.hauswirth@head-acoustics.de.

Wir freuen uns auf Ihre Rückmeldung!