

Modulationsanalyse in der ArtemiS SUITE¹

Die Modulationsanalyse der ArtemiS SUITE liefert Spektren der Einhüllenden von Teilbändern des analysierten Signals. Damit können die Frequenz, die Stärke und der zeitliche Verlauf von Amplitudenmodulationen in einem Signal bestimmt werden. Während bei den psychoakustischen Parametern Rauigkeit und Schwankungsstärke lediglich bestimmte Modulationsfrequenzen untersucht und auch gleich beurteilt werden, umfasst die Modulationsanalyse einen breiten Frequenzbereich, der den Bereich der Rauigkeit und Schwankungsstärke miteinschließt.

Amplitudenmodulation	1
Modulationsanalyse in der ArtemiS SUITE	2
Anwendungsbeispiele	4
Zusammenfassung	7
Anhang	7
Frequenzmodulation	7
Berechnungsschritte bei der Modulationsanalyse	8

Amplitudenmodulation

Ein Dauerton, dessen Amplitude um einen Mittelwert $\hat{p}_{\text{Träger}}$ sinusförmig schwankt, ist ein sinusförmig amplitudenmoduliertes Signal. Der Schalldruck $p_a(t)$ eines derartigen Sinustons berechnet sich nach folgender Formel: $p_a(t) = \hat{p}_{\text{Träger}} \cdot (1 + m \cdot \sin(2\pi f_{\text{mod}} \cdot t)) \cdot \sin(2\pi f_{\text{Träger}} \cdot t)$

f_{mod} : Modulationsfrequenz
 $f_{\text{Träger}}$: Trägerfrequenz
 m : Modulationsgrad

Für eine nicht sinusförmige Amplitudenmodulation muss die erste Sinusfunktion der Formel ersetzt werden. Durch Ersetzen des zweiten Sinus kann die Form des Trägersignals verändert werden. Der Modulationsgrad m bestimmt die Stärke der Modulation und wird aus dem Verhältnis von Wechselanteil zum Gleichanteil des Signals berechnet. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung eines sinusförmig amplitudenmodulierten Signals.

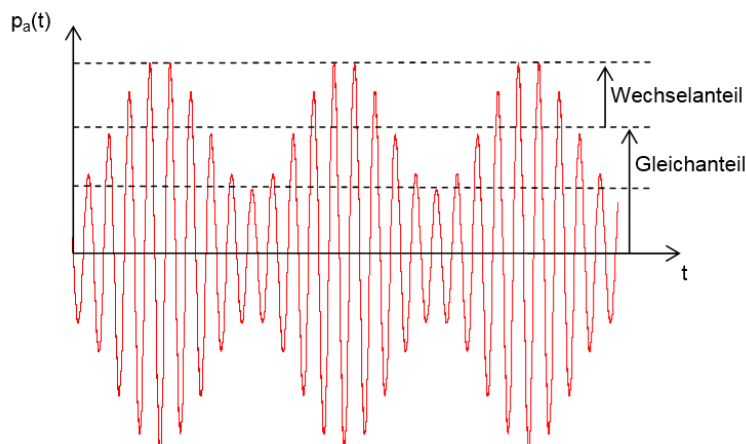


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines amplitudenmodulierten Sinustons

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

Modulationsanalyse in der ArtemiS SUITE

In der ArtemiS SUITE stehen verschiedene Analysen zur Untersuchung der Modulation von Schallsignalen zur Verfügung². Die folgende Tabelle stellt diese Analysen vor.

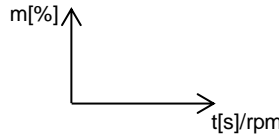
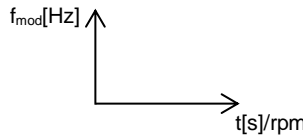
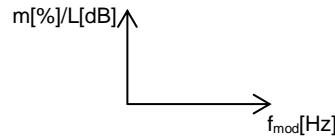
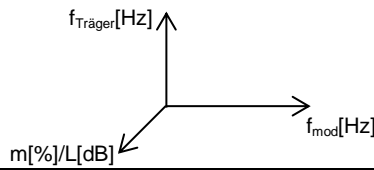
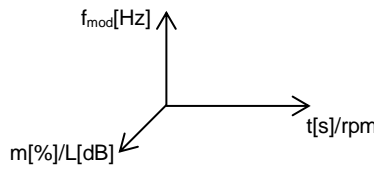
Name der Analyse (engl.)	Name der Analyse (de.)	Beschreibung
Degree Of Modulation vs. Time / RPM	Modulationsgrad über Zeit / Drehzahl	2D-Analyse des Modulationsgrades eines wählbaren Frequenzbereichs über der Zeit bzw. der Drehzahl 
Modulation Frequency vs. Time / RPM	Modulationsfrequenz über Zeit / Drehzahl	2D-Analyse der Modulationsfrequenz eines wählbaren Frequenzbereichs über der Zeit bzw. der Drehzahl 
Modulation Spectrum	Modulationsspektrum	2D-Analyse des Modulationsgrades eines wählbaren Frequenzbereichs über der Modulationsfrequenz 
Modulation Spectrum vs. Band	Modulationsspektrum über Frequenzband	3D-Analyse des Modulationsgrades über der Modulations- und Trägerfrequenz 
Modulation Spectrum vs. Time / RPM	Modulationsspektrum über Zeit / Drehzahl	3D-Analyse des Modulationsgrades eines wählbaren Frequenzbereichs über der Zeit bzw. der Drehzahl und der Modulationsfrequenz 

Tabelle 1: Beschreibung der verschiedenen Modulationsanalysen in der ArtemiS SUITE

Im Eigenschaften-Fenster der jeweiligen Analyse können die Einstellungen für die Modulationsuntersuchung konfiguriert werden. Die einstellbaren Parameter sind für die oben aufgeführten Analysen

² Die Modulationsanalysen stehen in der ArtemiS SUITE nur zur Verfügung, wenn die verwendete Lizenz ASM 17 umfasst. Für die drehzahlabhängige Analyse der Modulation benötigen Sie zusätzlich ASM 13.

sehr ähnlich. Abbildung 2 zeigt das Eigenschaften-Fenster der Analyse **Modulationsspektrum über Zeit** (engl. **Modulation Spectrum vs. Time**). Diese Analyse besitzt das umfangreichste Eigenschaften-Fenster und wird im Folgenden näher erläutert.

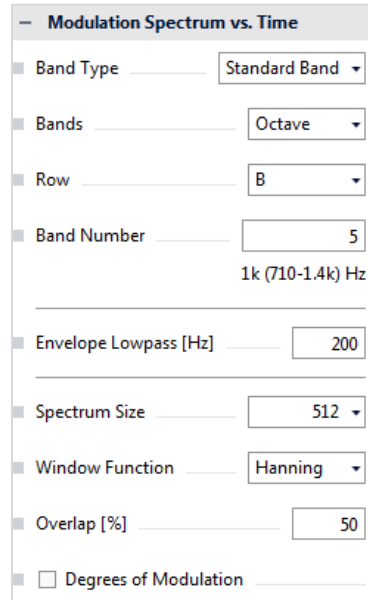


Abbildung 2: Eigenschaften-Fenster der Analyse **Modulationsspektrum über Zeit**

Im oberen Teil des Eigenschaften-Fensters legen Sie Typ, Bandbreite und Lage eines Filters fest. Wählen Sie diese Parameter so, dass der Teil Ihres Signals, den Sie auf Modulationen untersuchen möchten, innerhalb dieses Filter³ liegt:

In der ersten Auswahlbox wählen Sie den **Bandtyp** (engl. **Band Type**) aus. Hier stehen die Bandtypen **Standard-Band**, **Feststehendes Band** oder **Mitlauf-Band** (engl. **Standard Band**, **Fixed Band**, **Tracking Band**) zur Verfügung.

Bei der Auswahl **Standard-Band** können Sie zusätzlich die Breite des verwendeten **Frequenzbandes** (engl. **Bands**) festlegen. Zur Auswahl stehen **Terz**, **Oktave**, **Frequenzgruppe** oder **Gesamte Bandbreite** (engl. **1/3 Octave**, **Octave**, **Critical Bands**, **Full Bandwidth**). Außerdem spezifizieren Sie durch die Auswahlboxen **Reihe** und **Frequenzbandnummer** (engl. **Row** und **Band Number**) die Lage des gewünschten Frequenzbandes. Bei der Einstellung **A** werden die Frequenzbänder so verteilt, dass die Frequenzbandgrenze eines Filters bei 1 kHz liegt. Bei der Einstellung **B** hingegen erfolgt die Verteilung so, dass ein Band mit einer Mittenfrequenz von 1 kHz vorhanden ist. Durch die Einstellung **A** und **B** können die Filter also um eine halbe Bandbreite gegeneinander verschoben werden.

Bei der Auswahl **Feststehendes Band** können Sie das gewünschte Frequenzband durch die Angabe der Mittenfrequenz im Feld **Frequenz** und der **Güte** konfigurieren (engl. **Frequency** und **Quality**).

Bei der Auswahl **Mitlauf-Band** erfolgt die Angabe als **Mitlaufordnung** und **Güte** (engl. **Tracking Order** und **Quality**).

Im unteren Teil des Eigenschaften-Fensters kann im Feld **Einhüllenden-Tiefpass** (engl. **Envelope Lowpass**) die maximale Frequenz der Einhüllenden eingegeben werden. Die Grenzfrequenz dieses Filters sollte so gewählt werden, dass sie etwas oberhalb der Modulationsfrequenz liegt, bis zu der die Analyse berechnet werden soll.

Außerdem müssen die Parameter für die FFT-Analyse der Einhüllenden eingestellt werden (**DFT-Länge**, **Fensterfunktion** und **Überlappung**, engl. **Spectrum Size**, **Window Function** und **Overlap**).

³ Wenn Sie den gesamten Frequenzbereich eines Signals untersuchen möchten, verwenden Sie die 3D-Analyse **Modulationsspektrum über Frequenzband** (engl. **Modulation Spectrum vs. Band**).

Durch Anwählen der Funktion **Modulationsgrad** (engl. **Degrees of Modulation**) erfolgt die Anzeige des Ergebnisses als Modulationsgrad in der Einheit %. Bei der Deaktivierung dieser Funktion wird der Pegel der Einhüllenden direkt angezeigt.

Die Eigenschaften-Fenster der anderen Modulationsanalyse entsprechen dem oben gezeigten, verfügen aber über weniger Einstellungsmöglichkeiten, z. B. fehlt bei der Analyse **Modulationsgrad über Zeit** die Checkbox **Modulationsgrad**, da diese Analyse immer den Modulationsgrad in der Einheit % bestimmt.

Anwendungsbeispiele

Abbildung 3 zeigt die unterschiedlichen Modulationsanalysen eines Schallsignals, das durch einen Verbrennungsmotor im Leerlauf erzeugt wurde. Außerdem ist auch eine zeitabhängige FFT-Analyse dargestellt.

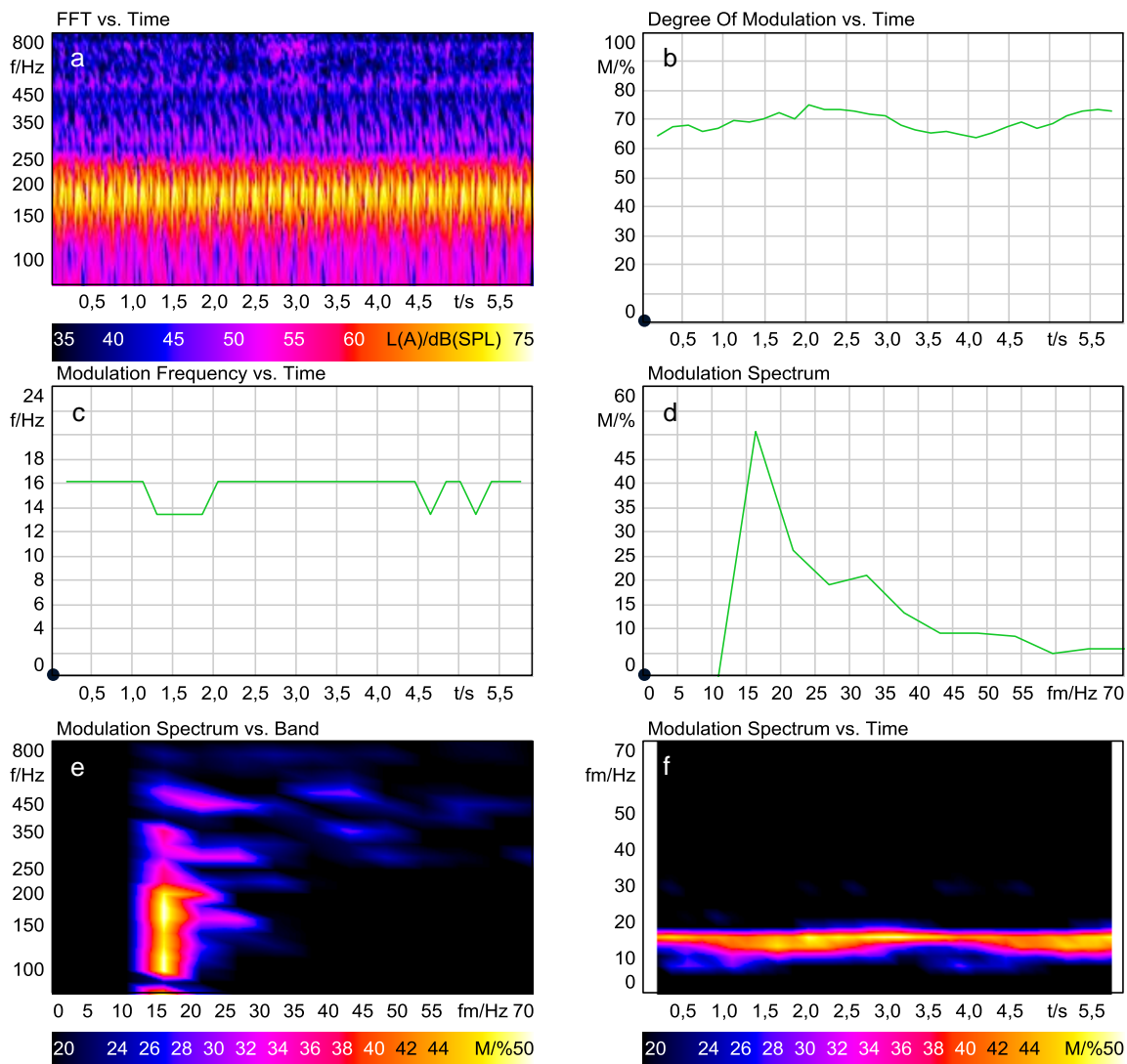


Abbildung 3: a) **FFT über Zeit**, b) **Modulationsgrad über Zeit** des Oktavbandes um 180 Hz, c) **Modulationsfrequenz über Zeit** des Oktavbandes um 180 Hz, d) **Modulationsspektrum** des Oktavbandes um 180 Hz, e) **Modulationsspektrum über Terzbänder**, f) **Modulationsspektrum über Zeit** des Oktavbandes um 180 Hz

In der Darstellung der FFT-Analyse (Abbildung 3a) ist zu erkennen, dass das Frequenzband zwischen 140 und 230 Hz deutlich moduliert ist. Aus diesem Grund wurde für die Modulationsanalysen, die nur ein bestimmtes Frequenzband untersuchen, das Oktavband um 180 Hz (125 bis 250 Hz) ausgewählt.

Für die Analyse **Modulationsspektrum über Frequenzband** wurde die Einteilung in Terzbänder gewählt.

Abbildung 3b stellt das Ergebnis der Analyse **Modulationsgrad über Zeit** dar. Das Oktavband um 180 Hz ist mit einem Modulationsgrad von ca. 70 % moduliert. Der Modulationsgrad ist über die gesamte Dauer des Signals relativ konstant.

In Abbildung 3c ist zu erkennen, dass das Signal hauptsächlich mit einer Modulationsfrequenz von ungefähr 16 Hz moduliert ist. Dies zeigt auch Abbildung 3d, in der die Modulationsfrequenzen und die dazugehörigen Modulationsgrade für das Oktavband um 180 Hz aufgetragen sind. Zusätzlich dazu zeigt diese Abbildung, dass das Signal auch mit anderen Frequenzen moduliert ist. Allerdings ist der Modulationsgrad für diese Modulationsfrequenzen deutlich geringer als der für die Modulationsfrequenz von 16 Hz. In Abbildung 3e wird durch ein Spektrogramm veranschaulicht, welche Trägerfrequenz mit welchen Modulationsfrequenzen moduliert ist. Die Farbe gibt die Stärke der Modulation an. Auch in diesem Diagramm liegt die wichtigste Modulationsfrequenz bei ungefähr 16 Hz. Die zeitliche Veränderung der Modulationsfrequenz und des Modulationsgrads ist in Abbildung 3f dargestellt. Da das ausgewählte Beispielsignal über die gesamte Signallänge relativ konstant moduliert ist, weist auch das Diagramm nur eine kleine zeitliche Schwankung auf.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der Modulationsanalysen eines Geräusches, das bei ca. 3000 Umdrehungen pro Minute in einer Fahrzeugkabine aufgenommen wurde.

Die Analyse **FFT über Zeit** (Abb. 4a) zeigt, dass in dem Signal einzelne Motorordnungen deutlich hervortreten. Der Abstand zwischen den drei lautesten Ordnungen liegt bei ca. 20 Hz. Die Modulationsanalyse zeigt deshalb bei einer Modulationsfrequenz von ca. 20 Hz und den entsprechenden Harmonischen ein Maximum an. Für die Analysen 4b, 4c, 4d und 4f wurde das Oktavband um 250 Hz untersucht.

Die vorliegenden Modulationsfrequenzen zwischen 20 und 45 Hz sind in Fahrzeuginnengeräuschen besonders häufig zu finden und können mit den verschiedenen Modulationsanalysen in der ArtemiS SUITE zuverlässig gefunden und dargestellt werden.

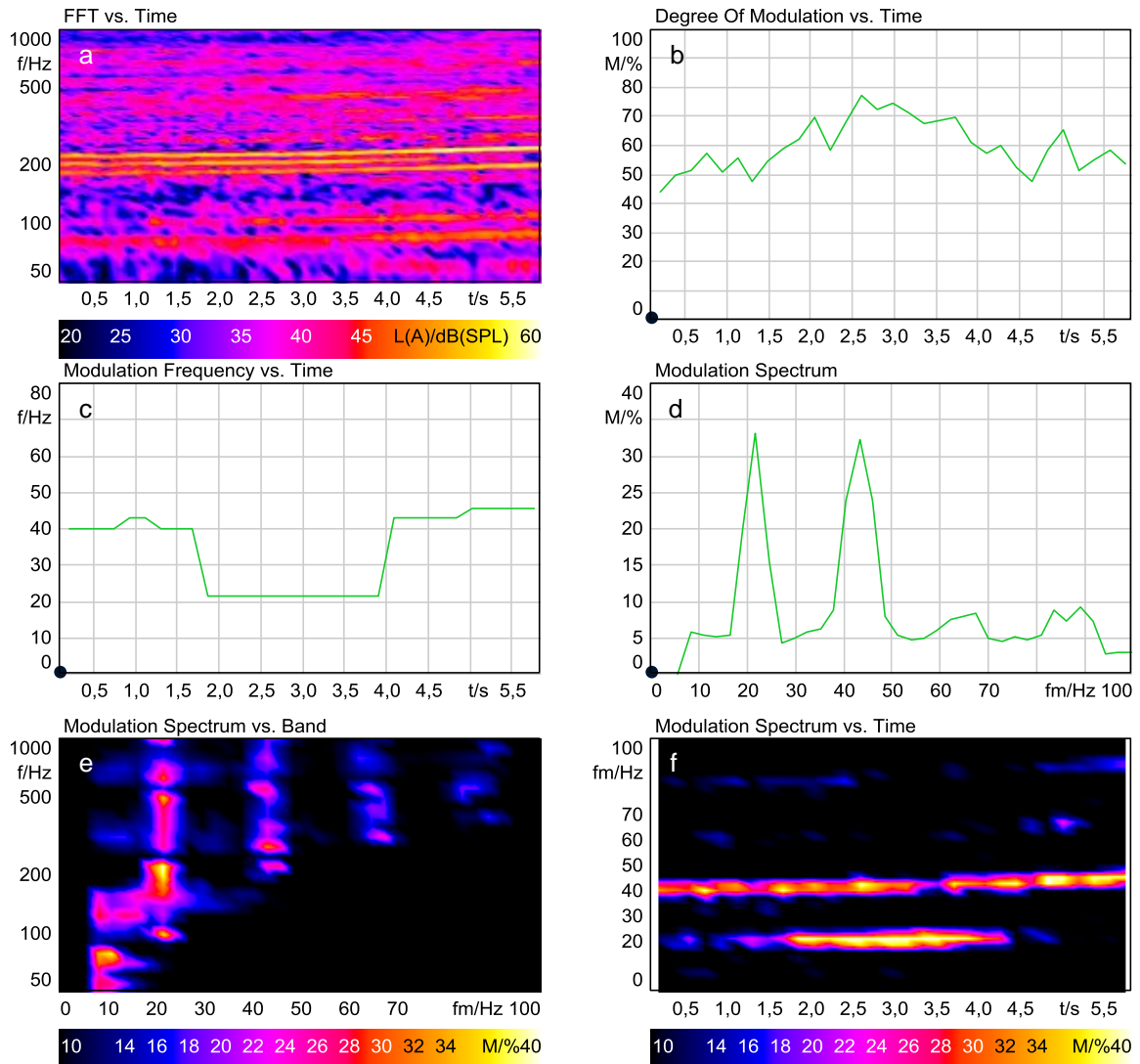


Abbildung 4: a) **FFT über Zeit**, b) **Modulationsgrad über Zeit** des Oktavbandes um 250 Hz, c) **Modulationsfrequenz über Zeit** des Oktavbandes um 250 Hz, d) **Modulationsspektrum** des Oktavbandes um 250 Hz, e) **Modulationsspektrum über Terzbänder**, f) **Modulationsspektrum über Zeit** des Oktavbandes um 250 Hz

Zusammenfassung

Wird z. B. durch eine zeitabhängige FFT-Analyse oder das Anhören eines Signals festgestellt, dass das Signal moduliert ist, ist zunächst die Berechnung der Analyse **Modulationsspektrums über Frequenzband** sehr sinnvoll. Diese Analyse gibt einen Überblick über die Modulationsfrequenzen im gesamten Frequenzbereich, außerdem kann zusätzlich der Modulationsgrad abgelesen werden. Ist dem Anwender bereits bekannt, welcher Frequenzbereich Modulationen enthalten könnte, ist die Analyse **Modulationsspektrum** hilfreich. Diese Analyse zeigt dem Benutzer Modulationsgrad und Modulationsfrequenz eines bestimmten Frequenzbereiches des Eingangssignals an. Mit dieser Analyse kann z. B. ein Qualitätstest durchgeführt werden, wenn ein Produkt eine bekannte Schwachstelle besitzt, die sich durch Modulationen in einem bestimmten Frequenzbereich äußert.

Bei der Analyse von Signalen, die sich zeitlich schnell ändern, empfiehlt sich die Verwendung der zeit- bzw. drehzahlabhängigen Analysen (**Modulationsgrad über Zeit/Drehzahl, Modulationsfrequenz über Zeit/Drehzahl, Modulationsspektrum über Zeit/Drehzahl**). Mithilfe dieser Analysen können Veränderungen der Modulation aufgezeigt werden. Ein möglicher Anwendungsfall ist die Modulationsanalyse der Geräuschaufnahme eines Motorhochlaufs. Um Signale mit Drehzahlinformation zu analysieren, bietet sich die Verwendung von Ordnungsfiltren an Stelle der frequenzabhängigen Filter an. Die Filterart kann im Eigenschaften-Fenster der jeweiligen Analyse ausgewählt werden.

Die unterschiedlichen Modulationsanalysen, die in der ArtemiS SUITE zur Verfügung stehen, ermöglichen Ihnen, jeweils die für Ihre Schallsignale geeignete Untersuchung durchzuführen.

Haben Sie Fragen an den Autor?

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

Wir freuen uns auf Ihre Rückmeldung!

Anhang

Frequenzmodulation

Ist anstelle der Amplitude die Frequenz eines Signals moduliert, spricht man von frequenzmodulierten Signalen. In Abbildung 5 ist links die zeitabhängige FFT-Analyse eines frequenzmodulierten Sinustons dargestellt. Auch ein solches Signal kann mit den in der ArtemiS SUITE zur Verfügung stehenden Modulationsanalysen untersucht werden. Allerdings muss die Interpretation der Analyseergebnisse sehr sorgfältig erfolgen.

Für die Modulationsanalyse wird das Signal, wie oben bereits beschrieben, in verschiedene Frequenzbänder zerlegt. In Abhängigkeit vom untersuchten Frequenzbereich unterscheiden sich die Ergebnisse der Analyse. Für ein frequenzmoduliertes Signal ist dies in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Wenn ein frequenzmoduliertes Signal in einzelne Frequenzbänder zerlegt wird, entstehen amplitudenmodulierte Signale, die mit den Modulationsanalysen in der ArtemiS SUITE untersucht werden können. Die Modulationsfrequenz der Amplitudenmodulation entspricht der der Frequenzmodulation oder einem Vielfachen.

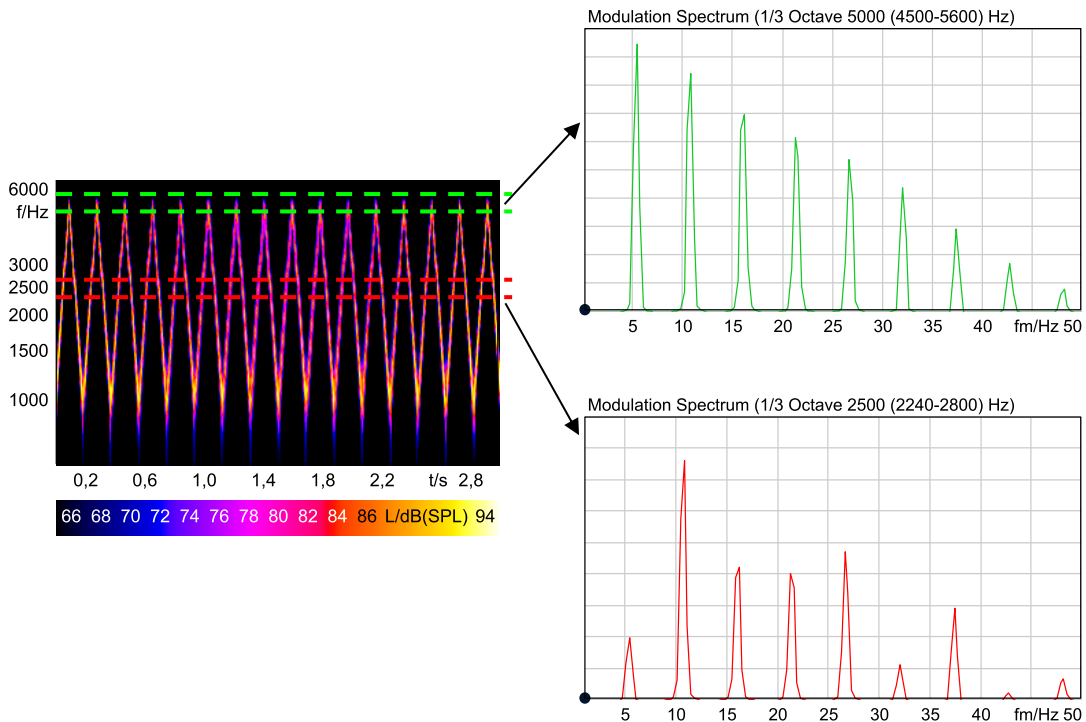


Abbildung 5: Modulationsanalyse eines frequenzmodulierten Sinustons

Das Modulationsspektrum des in Abbildung 5 grün markierten Frequenzbereichs (Terzband um 5000 Hz) enthält als Hauptkomponente die Modulationsfrequenz der Frequenzmodulation von ca. 5,5 Hz. Die Analyse des rot markierten Bereichs (Terzband um 2500 Hz) zeigt als Hauptkomponente eine Modulationsfrequenz von ca. 11 Hz, also das doppelte der eigentlichen Modulationsfrequenz der Frequenzmodulation. Um erkennen zu können, welches Frequenzband für die Modulationsanalyse geeignet ist, empfiehlt es sich, neben der Modulationsanalyse bei einem frequenzmodulierten Signal immer auch eine zeitabhängige FFT-Analyse durchzuführen, die einem die nötigen Informationen zur Interpretation der Ergebnisse der Modulationsanalyse liefert.

Berechnungsschritte bei der Modulationsanalyse

Wie bereits erwähnt ist die Modulationsanalyse eine spektrale Untersuchung der Einhüllenden des Zeitsignals. In Abbildung 6 ist die Vorgehensweise für diese Analyse schematisch dargestellt. Darunter werden die einzelnen Berechnungsschritte kurz erläutert.

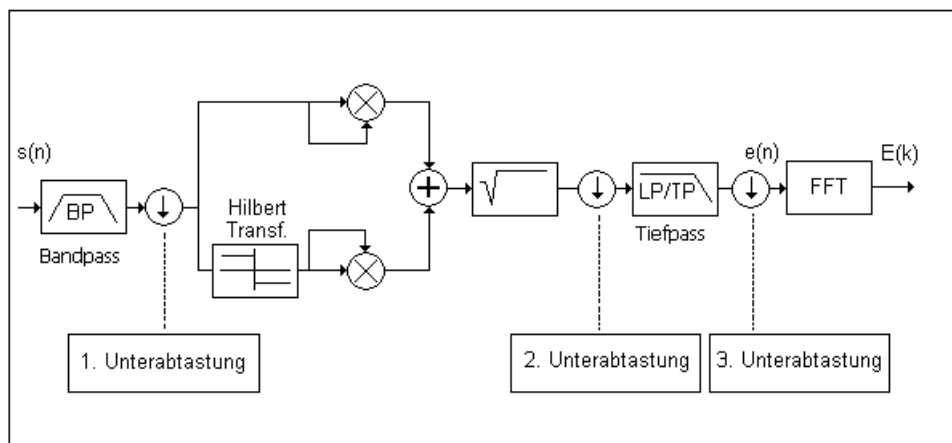


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Modulationsanalyse in der ArtemiS SUITE

Im ersten Schritt wird eine Filterung des Eingangssignals mit einem IIR-Bandpass durchgeführt, um den im Eigenschaften-Fenster ausgewählten Frequenzbereich zu extrahieren. Es kann eine bestimmte Oktave, Terz oder Frequenzgruppe ausgewählt werden. Zur Filterung wird ein Butterworth-Filter 4. Ordnung verwendet. Falls durch diese Filterung hohe Frequenzanteile entfernt wurden, kann eine erste Unterabtastung erfolgen, da je nach Frequenzlage des ausgewählten Frequenzbereichs die Abtastrate verringert werden kann.

Diese Unterabtastung dient der Rechenzeitverkürzung, vor allem jedoch erhöht sie die Qualität der folgenden Hilbert-Transformation. Diese Transformation errechnet aus dem Eingangssignal den Imaginärteil der entsprechenden komplexen Hüllkurve. Der Realteil der Hüllkurve ist durch das Eingangssignal selbst gegeben. Im nächsten Berechnungsschritt wird die Einhüllende des Signals bestimmt, die dem Betrag der komplexen Hüllkurve entspricht. Das heißt, die Quadrate des Realteils (das Bandpasssignal) und des Imaginärteils (das Ausgangssignal des Hilbert-Transformators) werden aufaddiert und aus dem Ergebnis wird die Quadratwurzel berechnet.

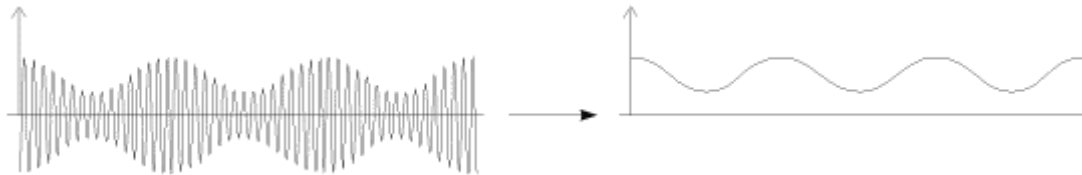


Abbildung 7: Bildung der Einhüllenden

Die Einhüllende wird dann entsprechend der Bandbreite des gewählten Frequenzbereichs weiter unterabgetastet und durch einen Tiefpass gefiltert. Dazu wird ein Tiefpass zweiter Ordnung benutzt, dessen Grenzfrequenz im Eigenschaften-Fenster ausgewählt werden kann (**Einhüllenden-Tiefpass**, engl. **Envelope Lowpass**). Diese Frequenz sollte so gewählt werden, dass sie oberhalb der Modulationsfrequenz liegt, bis zu der die Analyse berechnet werden soll. Entsprechend der Grenzfrequenz dieses Tiefpassfilters wird das Signal noch mal unterabgetastet.

Als letzter Schritt der Modulationsanalyse wird dann eine FFT-Analyse der Einhüllenden durchgeführt. Im Eigenschaften-Fenster der Analyse kann der Benutzer die **DFT-Länge**, die **Fensterfunktion** und die **Überlappung** (engl. **Spectrum Size**, **Window Function** und **Overlap**) für diese FFT-Analyse auswählen. Durch diese Wahl kann z. B. die Zeit- bzw. die Frequenzauflösung der Analyse beeinflusst werden.