

## Signalauswertung in der Fertigungs- und Endkontrolle



### FÜR EINSTEIGER UND ERFAHRENE ANWENDER

*Die dynamischen Eigenschaften von Strukturen können mit Hilfe von Eigenfrequenzen, Dämpfungen und Eigenschwingformen beschrieben werden. Bei geeigneter Messung, Auswertung und Klassifizierung dieser Merkmale ist damit eine schnelle und automatische Gut-/Schlecht-Selektion von Bauteilen möglich.*

*Laservibrometer bieten für viele Anwendungen in der Fertigungs- und Endkontrolle erhebliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Körperschallsensoren, beispielsweise Beschleunigungsaufnehmern. Neben dem hohen Dynamikbereich und der großen Bandbreite der Vibrometer spielt dabei ihre berührungslose und damit rückwirkungsfreie Messtechnik eine entscheidende Rolle.*

*Für die Auswertung der akustischen Signale steht eine ganze Reihe leistungsfähiger Methoden zur Verfügung, die je nach Anwendungsbereich, Anregungsart und Komplexität der Aufgabe eingesetzt werden (siehe Tabelle auf Seite E 24). Im Folgenden werden die Grundlagen der Frequenzanalyse, verschiedene Varianten der Frequenzband-Analyse, Kurzzeit-Fourieranalyse sowie Ordnungsanalyse kurz vorgestellt und beschrieben.*

**Polytec GmbH**  
Polytec-Platz 1-7  
D-76337 Waldbronn  
Tel. +49 (0) 72 43 6 04-0  
Fax +49 (0) 72 43 6 99 44  
Lm@polytec.de

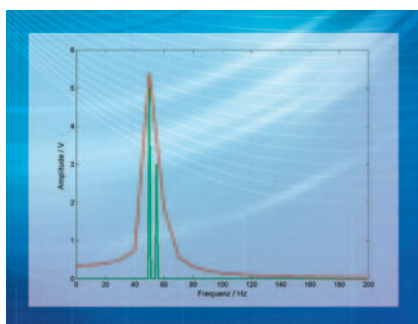
## Frequenzanalyse

In der Fertigungsendkontrolle basieren die häufigsten Verfahren zur automatischen Analyse akustischer Signale mittels digitaler Signalverarbeitung auf der Frequenzanalyse. Mit der diskreten Fourier-Transformation

$$S(f_n) = \frac{1}{Nf_\Delta} \sum_{k=0}^{N-1} s(t_k) e^{-j2\pi k/N}$$

wird ein Signal  $s(t_k) = s(kT_\Delta)$  mit  $N$  Abtastwerten auf  $N$  diskrete Frequenzen  $f_n = nf_\Delta$  abgebildet (Bild 1). Die Frequenzauflösung  $f_\Delta = f_A/N = 1/T = 1/NT_\Delta$  hängt ausschließlich von der Abtastfrequenz  $f_A$  und der Anzahl der Stützstellen  $N$ , und damit von der Messdauer  $T$ , ab. Wird eine zu kurze Messdauer gewählt, werden einzelne, nahe beieinander liegende Frequenzen nicht mehr aufgelöst, sondern als eine gemeinsame Frequenzlinie dargestellt (Bild 2).

Für reale Signale muss aus Symmetriegründen lediglich das Fourier-Spektrum  $S(f_n)$  für  $n = 0, 1, 2, \dots, N$  berechnet werden. Bei der Frequenzanalyse wird üblicherweise das Leistungsdichtespektrum  $|S(f_n)|^2$  analysiert; die Phase der einzelnen Frequenzen  $nf_0$  spielt keine Rolle.



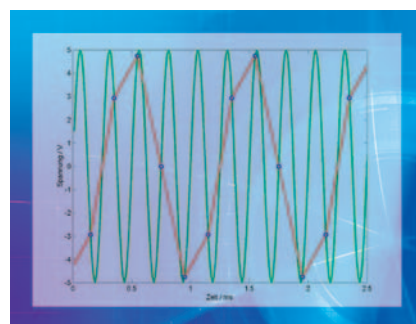
**Bild 2: Ergebnis der beiden Signale aus Bild 1; grün:  $f_A = 1$  Hz, rot:  $f_A = 10$  Hz**

Wegen der Periodizität des diskreten Fourier-Spektrums in  $N$ ,  $e^{\pm j2\pi kn/N} = e^{\pm j2\pi kn(k+\alpha N)/N}$ ,  $\alpha \in N$  kann es zur spektralen Überschneidung einzelner Teilspektren, dem so genannten Aliasing, kommen (Bild 3, 4). Dies lässt sich vermeiden, indem die Abtastfrequenz  $f_A$  gemäß dem Abtasttheorem von

Shannon mindestens doppelt so groß gewählt wird wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz  $f_{max}$ .

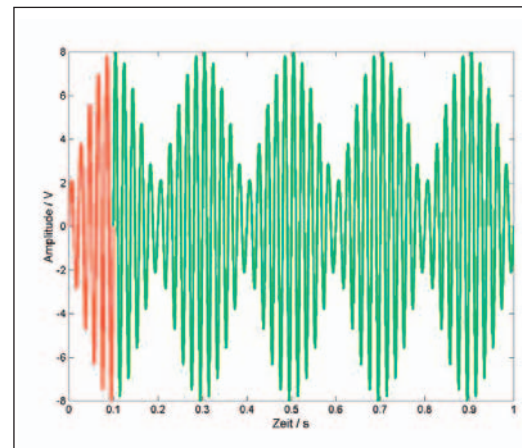
Da sich für reale Signale im Allgemeinen kein maximaler Frequenzanteil bestimmen lässt, muss das analoge Signal vor der Digitalisierung mit einem Tiefpassfilter bandbegrenzt werden. Reale Filter besitzen allerdings einen Übergangsbereich zwischen Durchlass- und Sperrbereich. Innerhalb des Übergangsbereiches werden Frequenzanteile jenseits der Grenzfrequenz  $f_C$  des Filters nicht vollständig gedämpft und können daher ebenfalls zu Artefakten führen.

Um diesem Verhalten Rechnung zu tragen, wird in der digitalen Signalverarbeitung üblicherweise ein Faktor von 2.56 gewählt und die Abtastfrequenz auf die Grenzfrequenz des gewählten Tiefpassfilters bezogen:  $f_A = 2.56 \cdot f_C$ . Ein weiterer Effekt bei der Berechnung des Fourier-Spektrums eines diskreten Signals ist das so genannte *Leakage*. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung des Signals kann es dazu kommen, dass das Eingangssignal abgeschnitten wird. Ein solches Signal kann nur dann korrekt mit der diskreten Fourier-Transformation (DFT) transformiert werden, wenn es periodisch fortsetzbar ist.



**Bild 3: Digitalisierung eines 4 kHz-Signals; grün: Abtastfrequenz 10 kHz, rot: Abtastfrequenz 5 kHz**

Im anderen Falle enthält es Frequenzen, die nicht zu den von der DFT berechneten diskreten Frequenzen gehören. Die DFT „näht“ diese Frequenzen durch die benachbarten Frequenzen an, dabei wird die Energie auf diese Frequenzen verteilt. Dies wird als Leck-Effekt (engl. *Leakage-Effect*) bezeichnet.



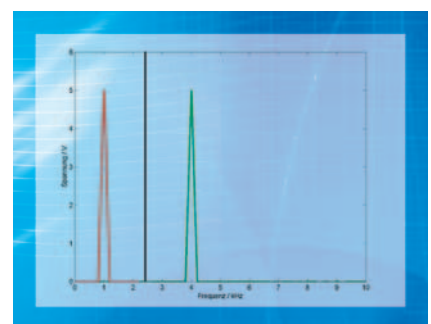
**Bild 1: Verlauf des Zeitsignals; rot: 0,1 s Messdauer; grün: 1 s Messdauer**

Er kann reduziert werden, wenn das diskrete Zeitsignal vor der Fourier-Transformation mit einer geeigneten Fensterfunktion (z.B. Hanning, Hamming) gewichtet wird.

In der Materialprüfung wird üblicherweise im Rahmen der Frequenzanalyse die Lage der Frequenzlinien im Spektrum direkt ausgewertet. Unabhängig davon, ob man die Bauteile impulsförmig oder mit einem Shaker kontinuierlich zu Schwingungen anregt, werden lediglich die charakteristischen Resonanzfrequenzen bestimmt, die dann einen Rückschluss auf den Zustand der Prüflinge ermöglichen.

## Frequenzbandanalyse

Anders als im Fall der Materialprüfung werden bei der Betriebsschwingungsanalyse primär nicht die Strukturresonanzen analysiert, sondern die – durch das Zusammenwirken beweg-



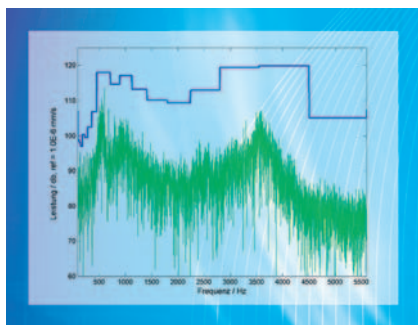
**Bild 4: Ergebnis der Frequenzanalyse der beiden Signale aus Bild 3; grün: wahre Frequenz, rot: Pseudofrequenz durch Aliasing**

licher Komponenten erzeugten – erzwungenen Schwingungen. Diese Schwingungsanteile hängen nicht nur von den Resonanzfrequenzen der Komponenten, sondern auch erheblich von der Bewegungsgeschwindigkeit (entspricht im Allgemeinen der Drehzahl) ab.

Bei einfachen Anwendungen, wie der Prüfung von Elektromotoren oder Lüftern, werden daher nicht die einzelnen Frequenzlinien analysiert, sondern Gruppen von Frequenzen in so genannte Frequenzbänder zusammengefasst. Gleiche Produkte mit ähnlichem Verhalten werden bei möglichst konstanter Drehzahl analysiert, und können auch bei geringfügig abweichenden Drehzahlen zuverlässig qualifiziert werden.

Bei der *Schmalbandanalyse* werden die Signalspektren lückenlos in aneinander gereihete Frequenzintervalle gleicher Bandbreite aufgeteilt, wobei die Bandmittenfrequenzen äquidistant angeordnet sind. Für jedes Frequenzband wird die Leistungsdichte bestimmt und das so genannte Schmalbandspektrum zur Analyse verwendet.

Im Gegensatz zur Schmalbandanalyse werden bei der *Proportionalbandanalyse* die Spektren in zusammenhängende Frequenzintervalle unterteilt, wobei die Bandbreite der Frequenzintervalle mit ansteigender Bandmittenfrequenz zunimmt. Hierbei gilt, dass das Verhältnis  $q_B$  der Bandbreiten  $B_i, B_{i+1}$  jeweils benachbarter Frequenzbänder konstant und gleich dem Verhältnis  $q_f$  der entsprechenden Bandmittenfrequenzen



**Bild 5:**  
**grün: Spektrum eines Signals,**  
**blau: Terzpegel des Spektrums**

$f_{m,i}, f_{m,i+1}$  ist. Gilt  $q_B = q_f = 2$ , werden die berechneten Frequenzbänder als Oktavbänder bezeichnet, die Analyse als *Oktavbandanalyse*. Diese Aufteilung der Frequenzbänder lehnt sich an das subjektive Empfinden des menschlichen Gehörs an, bei dem jeweils eine Verdopplung der physika-

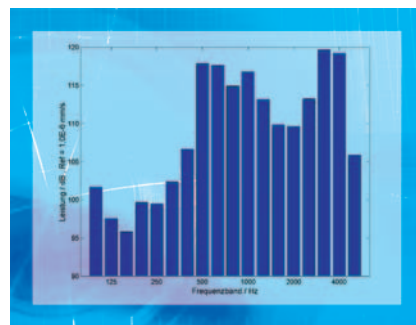
lischen Frequenz (Oktavsprung) als proportionale Frequenzerhöhung empfunden wird. Eine feinere Frequenzauflösung bietet die *Terzbandanalyse*, für die  $q_B = q_f = 2^{1/3}$  gilt.

Die *Modulationsanalyse* wertet die spektrale Zusammensetzung der Hüllkurven von Signalen aus, die durch Amplitudenmodulation entstehen, und basiert prinzipiell auf einer Frequenzanalyse des gleichgerichteten Signals.

Da jedoch unterschiedliche Trägerfrequenzen unterschiedlich moduliert sein können, werden hier üblicherweise mehrere Trägerfrequenzbänder analysiert. Neben der spektralen Analyse der Hüllkurven wird in der Modulationsanalyse zusätzlich der Modulationsgrad, also das Verhältnis zwischen der Trägerfrequenzamplitude zur Modulationsamplitude, bestimmt.

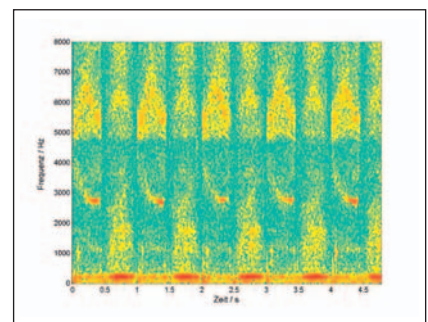
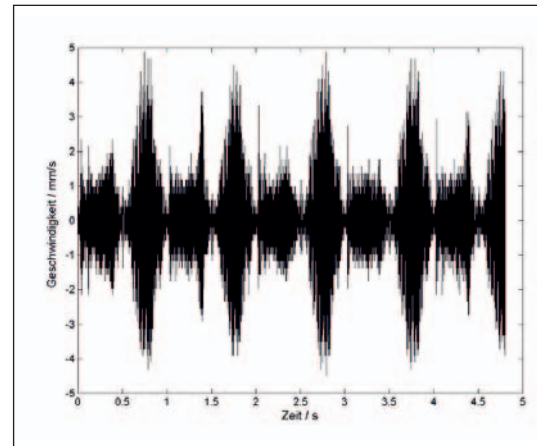
### Kurzzeit-Fourier-Analyse

Bei bestimmten Anwendungen, wie der Prüfung von Antrieben, Verstellern oder Dämpfern können, bedingt durch den mechanischen Aufbau, keine stationären Bedingungen erreicht werden. Das heißt, der Prüfling befindet sich bei unterschiedlichen Arbeitspunkten in unterschiedlichen Betriebszuständen. Hierdurch ändert



**Bild 6:**  
**Terzpegelspektrum aus Bild 5**  
**(logarithmische Frequenzachse)**

sich während des Betriebs kontinuierlich das Schwingungsverhalten. Einen ersten Eindruck dieses Verhaltens liefert die Analyse des *Pegelverlaufs*. Hierbei wird die mittlere Leistung nicht für das Gesamtsignal, sondern kontinuierlich für zusammenhängende Zeitabschnitte bestimmt.



**Bild 7: Fourier-Transformation;**  
**oben: Ausgangssignal;**  
**unten: Spektrum (Kurzzeit-FFT)**

Um jedoch eine detaillierte Analyse des Schwingungsverhaltens zu bestimmten Zeitpunkten durchführen zu können, wendet man häufig die *Kurzzeit-Fourier-Analyse* an (Bild 7).

Bei der Kurzzeit-Fourier-Analyse wird das diskrete Zeitsignal mit einer von einem Verschiebungsparameter abhängigen Fensterfunktion  $w(t_k - t_m)$  gewichtet und darauf die Fourier-Transformation angewandt:

$$S^{ST}(f_{m,n}) = \frac{1}{Nf_{\Delta}} \sum_{k=0}^{N-1} s(t_k) w^*(t_k - t_m) e^{-j2\pi k n / N}$$

$$m = 0, 1, \dots, M-1, M \leq N$$

Durch die Fensterfunktion  $w(t_k - t_m)$  wird immer nur ein zeitlicher Ausschnitt des Signals  $s(t_k)$  transformiert. Mit der Breite der Fensterfunktion ist die Zeitdauer des betrachteten Signalausschnitts festgelegt und damit auch die spektrale Bandbreite. Die Auflösung des Zeitdauer-Bandbreite-Produktes ist daher für alle Werte von  $n$  und  $m$  gleich; die Kurzzeit-Fourier-Transformation liefert eine konstante Zeit-Frequenz-Auflösung.



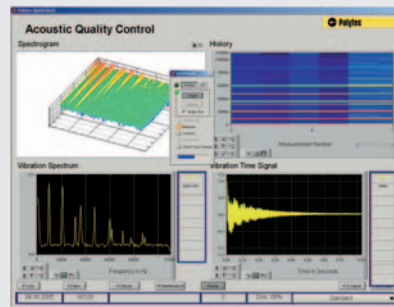
## Ordnungsanalyse

Bei hochwertigen Maschinen, beispielsweise Fahrzeugmotoren oder Getrieben, die über einen großen Arbeitsbereich geprüft und betrieben werden, liefert die Frequenzanalyse keine aussagekräftigen Ergebnisse. Solche Maschinen werden üblicherweise in einem oder mehreren Zyklen mit kontinuierlichem Hochlauf geprüft. Durch die permanente Änderung des Betriebszustandes ist eine Analyse von kurzzeitig auftauchenden Ereignissen mittels Kurzzeit-Fourier-Transformation nicht möglich. In solchen Fällen findet die *Ordnungsanalyse* Anwendung, bei der die Schwingungsamplitude – im Gegensatz zur Kurzzeit-Fourier-Transformation – auf die Drehzahl statt der Zeit bezogen wird, und ebenso auf die Ordnung (Vielfache der Drehzahl) statt der Frequenz.

### Zusammenfassung

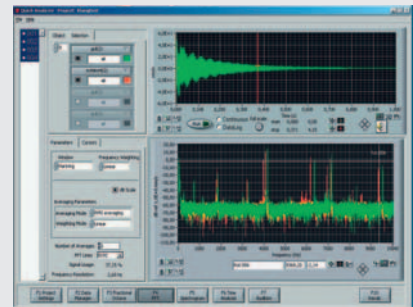
Leistungsfähige berührungslose Körperschallsensorik in Verbindung mit aufgabenspezifisch gewählter Signalanalyse ermöglicht heute eine prozessintegrierte 100 %-Qualitätsüberwachung von Komponenten und Produkten. Industrietaugliche Laservibrometer und die vielseitig konfigurierbare Prüfsoftware von Polytec bieten optimale Lösungen für effizientere Prozesse und zufriedенere Kunden.

[www.polytec.de/industrial](http://www.polytec.de/industrial)



### QuickCheck – Diagnosepaket für die akustische Güteprüfung

QuickCheck ist ein flexibles Werkzeug für akustische und vibrometrische Messungen im Rahmen von industriellen Güteprüfungen. Es wurde konzipiert als mehrkanalige, PC-basierte Prüfsoftware zur voll- oder teil-automatischen Prozessüberwachung und Fertigungskontrolle. Das QuickCheck-Diagnosepaket umfasst Software und Hardware zur Auswertung der Messsignale unterschiedlicher Schwingungssensoren, zur Steuerung des Prüfablaufs und zur Kommunikation mit dem Fertigungsleitsystem. Entsprechende Anwendungsbereiche in der Serienfertigung und in der prozessbegleitenden Entwicklung sind die objektive akustische Qualitätsprüfung, 100 %-Qualitätsprüfungen, Materialprüfung, Rissprüfung, Festigkeitsprüfung, Geräuschprüfung, Betriebsschwingungsanalyse und Fertigungsüberwachung.



### QuickAnalyzer – Signalanalyse für die akustische Güteprüfung

QuickAnalyzer ist ein flexibles Werkzeug für Machbarkeitsstudien zur Gut-Schlecht-Unterscheidung akustischer Signale in der Fertigungsumgebung. Die Messdaten werden nach Fehlerklassen gruppiert und die Gruppen in einem Analysenfenster übersichtlich dargestellt.

Verschiedene Standard-Auswertungsmethoden stehen zur Verfügung, die einfach durch Umschalten des Analysefensters gewählt werden.

Dies ermöglicht ein schnelles und effizientes Auffinden von Unterscheidungskriterien für Signale. QuickAnalyzer eignet sich somit besonders für Untersuchungen zur Gut-Schlecht-Beurteilung akustischer Signale in Forschung und Entwicklung.

Mehr Info unter  
[www.polytec.de/pna](http://www.polytec.de/pna)

| Anwendung                                       | Anregungsart                                      | Anregung                                     | Aufgabe                                 | Auswertung                                                                        |
|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Materialprüfung                                 | extern                                            | impulsförmig (z.B. Impulshammer)             | – Rissprüfung<br>– Resonanzprüfung      | – Frequenzanalyse                                                                 |
|                                                 |                                                   | kontinuierlich, periodisch (z.B. mit Shaker) | – Resonanzprüfung                       | – Frequenzanalyse                                                                 |
| Geräuschprüfung<br>Betriebs-schwingungs-analyse | Eigenanregung kontinuierlich gleichbleibend       | bei konstanter Geschwindigkeit               | – Motoren<br>– Lüfter<br>– Lager        | – Gesamtpegel<br>– Schmalbandanalyse<br>– Terzbandanalyse<br>– Modulationsanalyse |
|                                                 | Eigenanregung kontinuierlich nicht gleichbleibend | bei veränderlichen Betriebszuständen         | – Antriebe<br>– Versteller<br>– Dämpfer | – Pegelverlauf<br>– Kurzzeit-Fourieranalyse                                       |
|                                                 |                                                   | Hochlauf oder Auslauf                        | – Verbrennungsmotoren<br>– Getriebe     | – Ordnungsanalyse                                                                 |

## Polytec Grundlagen-Seminar

Alle Teile dieser Serie finden Sie als PDF-Datei unter [www.polytec.de/vib-university](http://www.polytec.de/vib-university)