# FFT- Praxis in NI DIAdem™

## Inhalt

# Was Sie schon immer über FFT wissen wollten...

Die FFT (Fast Fourier Transformation) ist eine sehr häufig angewendete mathematische Auswertefunktion, die zeitabhängige Schwingungsdaten in den Frequenzbereich transformiert. Mit Hilfe dieser Funktion kann man sehr einfach feststellen, wie stark die verschiedenen Frequenzen in einem Signal enthalten sind.

Leider wird die FFT nicht nur besonders oft, sondern aus Unwissenheit über die Hintergründe in der Praxis auch besonders oft falsch angewendet. Dabei mangelt es meist nicht am theoretischen Grundwissen. Begriffe wie Zeit- und Frequenzbereich, Amplitude, Phase, Abtastrate und Fensterfunktion sind den Anwendern bekannt. Wie dieses Grundwissen in der praktischen Anwendung eingesetzt werden muss, ist dann aber oft unklar.

Dieses Dokument soll die Fragen beantworten, die bei der Anwendung der FFT in der Praxis häufig gestellt werden und meist offen bleiben, weil man eigentlich nie Zeit hat, sich gründlich mit der Beantwortung zu beschäftigen. Der mathematische Hintergrund soll dabei nur eine untergeordnete Rolle spielen. Besonderes Gewicht wird auf praktische Beispiele gelegt, die zeigen sollen, was die FFT macht und wie sie sich unter den verschiedenen Randbedingungen verhält. Es soll gezeigt werden, wie man zu Ergebnissen kommt, die besser, genauer oder aussagekräftiger sind. Außerdem werden Methoden vorgestellt, wie man Ergebnisse beurteilen kann und frühzeitig Fehler erkennt.

# FFT-Grundlagen

Der klassische FFT-Algorithmus trägt den Namen Fast Fourier Transformation, weil er erheblich schneller rechnet als andere Fourier Transformationen. Er hat allerdings den Nachteil, dass die Anzahl der Werte eine Potenz von 2 sein muss (also 8, 16, 32,... , 1024,..., 65536,... ). In DIAdem wird ein neuer FT-Algorithmus verwendet, der nicht nur schneller ist als die klassische FFT, sondern auch mit beliebigen Wertezahlen arbeitet.

Da sich der Begriff FFT eingebürgert hat, wird auch diese Fourier Transformation als FFT bezeichnet.

Die FFT transformiert zeitabhängige Messdaten (Schwingungen) in den Frequenzbereich. Zunächst benötigt man Messdaten eines Schwingungssignals, die über einen Zeitraum mit konstanter Abtastrate erfasst werden. Aus diesen Daten errechnet die FFT einen Frequenzgang, der zeigt, wie stark die verschiedenen Frequenzen im Signal vertreten sind.

Für die folgenden Berechnungen ist es wichtig zu wissen, wie Abtastrate, Messdauer, Frequenzbereich und Auflösung zusammenhängen.

⇨ Der Frequenzbereich erstreckt sich immer von 0 bis zur halben Abtastrate. Wobei die halbe Abtastrate selber als Wert nicht mehr enthalten ist.

⇨ Im Frequenzbereich erhält man immer halb so viele Werte wie im ursprünglichen Zeitkanal. Man erhält pro Frequenz aber zwei Werte: Amplitude und Phase.

### Beispiel:

Bei einer Abtastrate von 1000 Hz und 500 Messwerten erhält man einen Frequenzkanal von 0 bis fast 500 Hz (genau bis 498 Hz) mit 250 Werten.

Wenn man die Abtastrate erhöht, erhält man einen Frequenzkanal mit höheren Frequenzen. Eine Messung mit 2000 Hz und 500 Messwerten ergibt 250 Frequenzen von 0 bis 1000 Hz.

Wenn man bei gleicher Abtastrate die Messdauer erhöht, erhält man einen Frequenzkanal mit mehr Werten. Eine Messung mit 1000 Hz und 1000 Werten ergeben 500 Frequenzen von 0 bis 500 Hz.

Daraus ergeben sich einige Grundsätze, die für die Frequenzanalyse entscheidend sind:

➪ Wenn man hohe Frequenzen untersuchen möchte, muss man entsprechend schnell abtasten. Aus technischen Gründen muss die Abtastrate mindestens 2,5-mal der höchsten wichtigen Frequenz im Signal entsprechen.

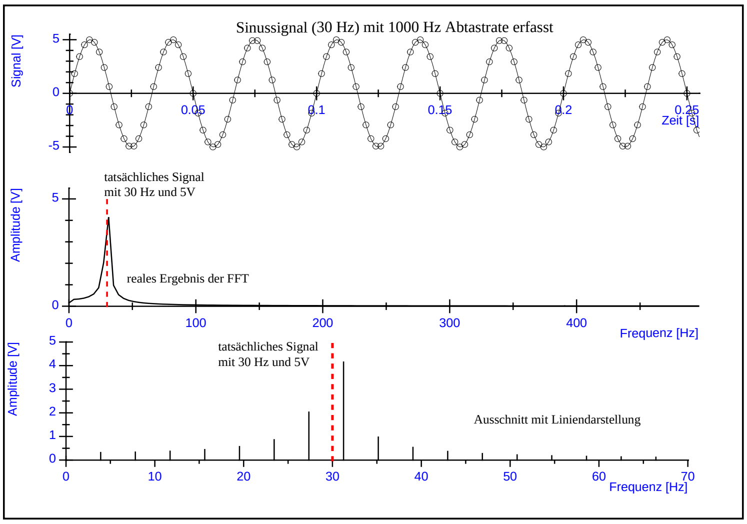
➪ Wenn man Frequenzen genau auflösen möchte, muss man entsprechend lange messen. Die nötige Messdauer ist gleich Eins dividiert durch gewünschte Frequenzauflösung.

## Ein einfaches Beispiel

Im folgenden Beispiel soll eine „saubere“ Sinusschwingung mit einer Amplitude von 5 Volt und einer Frequenz von 30 Hz analysiert werden. Die Erfassung des Signals erfolgt mit einer Abtastrate von 1000 Hz über einen Zeitraum von 0,255 Sekunden, wobei 256 Werte erfasst werden.

Als Ergebnis erwartet man einen Amplitudenfrequenzgang mit einer Spitze bei 30 Hz und einer Amplitude von 5V. Bei anderen Frequenzen sollten keine Amplituden vorhanden sein.

Das folgende Bild zeigt das tatsächlich erzielte Ergebnis dieser einfachen FFT.




Oberflächlich betrachtet entspricht das Ergebnis der Berechnung nicht den Erwartungen. Statt einer Amplitude von 5 Volt bei 30 Hz erhält man eine Reihe von Amplituden: Die größte liegt bei 31,25 Hz und hat einen Wert von ca. 4,15 Volt.

Bei genauerer Betrachtung des Bildes wird man zwei Details bemerken, die für die Abweichung vom erwarteten Wert verantwortlich sind.

➪ Das Zeitsignal (oben) enthält etwas mehr als sieben Schwingungen (ca. 7,6). Der FFT-Algorithmus geht aber von periodischen Signalen, die beliebig oft wiederholt werden könnten, aus. Das heißt, die FFT geht davon aus, dass das Signal nach dem letzten Wert wieder bei 0 beginnt, und steigt an. Die FFT berücksichtigt nicht, dass die Sinuskurve in Wirklichkeit mitten in einer Schwingung abgeschnitten wurde.

➪ Der Ausschnitt mit Liniendarstellung (unten) zeigt, dass die tatsächliche Frequenz von 30 Hz im Ergebnis gar nicht als Linie vorkommt. Die Frequenz muss deshalb durch benachbarte Frequenzen angenähert dargestellt werden. Die Frequenzachse ist in gleich große Abschnitte eingeteilt und man findet die Frequenz 30 Hz, wenn man die Linien zählt, nach etwa 7,6 Abschnitten.

Diese beiden Effekte scheinen zusammenzuhängen. Tatsächlich werden wir später noch sehen, dass die FFT immer genau die theoretisch erwartete Linie liefert, wenn die Sinuskurve exakt mehrmals im Messbereich enthalten ist. Mit etwas Geschick lässt sich demnach eine Abtastrate finden, bei der das gewünschte Ergebnis genau berechnet wird. In der Praxis, wenn beliebige Schwingungen gemessen werden, macht die Anpassung der Abtastung an die Frequenz eines bereits bekannten Sinus aber nur selten Sinn.

**Übrigens**: Wenn man die gleiche Berechnung mit Sinuskurven, die etwas andere Frequenzen haben oder nicht genau bei Null beginnen, durchführt, erhält man jedes Mal eine etwas anders geformte Spitze und etwas andere Amplituden.

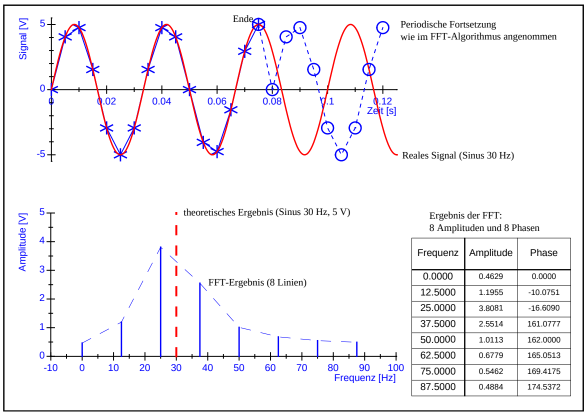
Grundsätzlich ist dabei die Summe aller Amplituden, die man berechnet, indem man die Qurdratwurzel aus der Summe aller Quadrate zieht, immer relativ genau fünf. Das bedeutet, dass die maximale Amplitude nie größer, sondern immer kleiner oder gleich der tatsächlichen Amplitude ist.

Die Summe der Amplituden schwankt immer etwas, weil die abgeschnittenen Reste der Sinuskurve immer unterschiedlich groß sind.

## Die FFT unter der Lupe

Um noch genauer zu beobachten, wie die FFT arbeitet, wird das Beispiel mit sehr wenigen Daten wiederholt. Die Abtastrate wird auf 200 Hz verringert und es werden nur 16 Werte erfasst.

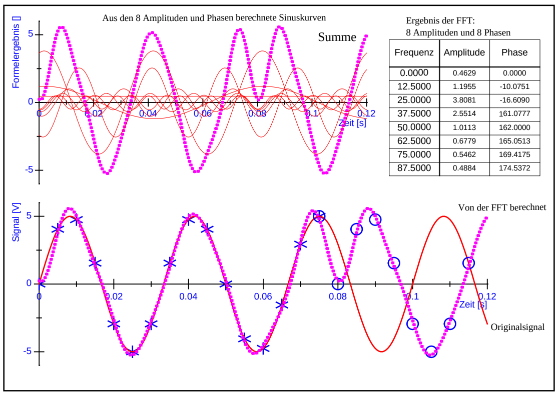
Das unten abgebildete Zeitsignal zeigt, dass die Schwingung mit so wenigen Daten nur unvollkommen dargestellt werden kann. Am Ende der Abtastung wird das Signal, wie schon im vorherigen Beispiel, mitten in der Schwingung abgeschnitten. Der FFT-Algorithmus setzt ein periodisches Signal voraus, das nach der Abtastung wieder von vorne beginnt. Die gestrichelte Linie mit den Kreisen zeigt den weiteren Verlauf, wie er von der FFT angenommen wird.




| Frequenz | Amplitude | Phase |
|---|---|---|
| 0.0000 | 0.4629 | 0.0000 |
| 12.5000 | 1.1955 | -10.0751 |
| 25.0000 | 3.8081 | -16.6090 |
| 37.5000 | 2.5514 | 161.0777 |
| 50.0000 | 1.0113 | 162.0000 |
| 62.5000 | 0.6779 | 165.0513 |
| 75.0000 | 0.5462 | 169.4175 |
| 87.5000 | 0.4884 | 174.5372 |

Bei 16 Messwerten liefert die FFT als Ergebnis 8 Amplituden und 8 Phasen. Das untere Diagramm zeigt die 8 Amplituden als senkrechte Linien (Spikes) an den zugehörigen Frequenzen. Die gestrichelte Kurve macht deutlich, dass die Ergebnisse der FFT eigentlich nicht mit einer durchgehenden Linie verbunden werden dürfen. Genaugenommen sagen die 8 Amplituden nur aus, dass sich das Signal aus genau diesen 8 einzelnen Komponenten zusammensetzt. Über die Frequenzen zwischen den 8 Linien sagt die FFT nichts aus.

Mit Hilfe der 8 Komponenten lassen sich 8 Sinuskurven berechnen, die zusammenaddiert eine Schwingung ergeben, die dem Eingangssignal entspricht. Genaugenommen handelt es sich hier übrigens nicht um Sinus-, sondern um Kosinus-Schwingungen.



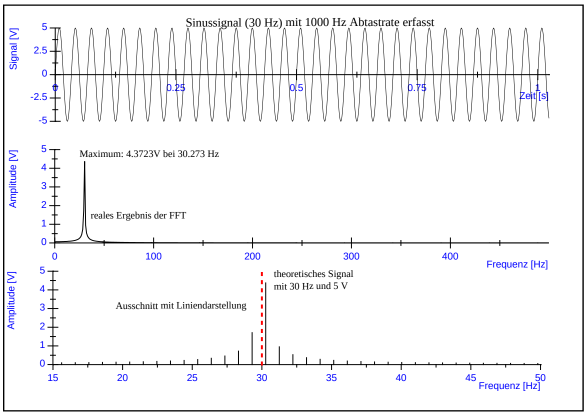

| Frequenz | Amplitude | Phase |
|---|---|---|
| 0.0000 | 0.4629 | 0.0000 |
| 12.5000 | 1.1955 | -10.0751 |
| 25.0000 | 3.8081 | -16.6090 |
| 37.5000 | 2.5514 | 161.0777 |
| 50.0000 | 1.0113 | 162.0000 |
| 62.5000 | 0.6779 | 165.0513 |
| 75.0000 | 0.5462 | 169.4175 |
| 87.5000 | 0.4884 | 174.5372 |

Das Bild zeigt im oberen Achsensystem die 8 berechneten Kurven (eine Konstante und 7 Kosinuskurven unterschiedlicher Frequenz) und gepunktet die Summe der 8 Kurven. Im unteren Achsensystem kann man gut erkennen, dass die von der FFT berechnete Schwingung die 16 mit Sternen gekennzeichneten Messwerte auf dem Originalsignal trifft. Anschließend wird die berechnete Schwingung aber periodisch wiederholt, sie kann dem Originalsignal nicht folgen. Es ist mathematisch auch völlig unmöglich für die 8 Frequenzen, die durch die Abtastrate fest vorgegeben sind, 8 Amplituden und 8 Phasen zu finden, die den Kurvenverlauf besser beschreiben als das Ergebnis der FFT. Die FFT kann hier also als einzige richtige Lösung für 16 Gleichungen mit 16 Unbekannten betrachtet werden.

## FFT mit vielen Stützstellen

Das Hauptproblem der FFT ist, wie wir gesehen haben, dass sie nicht die Frequenz berechnet, die ein gemessenes Signal hat, sondern sie berechnet für bestimmte vorgegebene Frequenzen, welchen Anteil sie am Gesamtsignal haben. Der Vergleich der beiden beschriebenen Versuche zeigt auch, dass eine höhere Anzahl von Messwerten normalerweise zu besseren Ergebnissen führt.

Um diese Vermutung zu testen, wird die erste Messung mit der vierfachen Messzeit wiederholt. Der Frequenzgang von 0 bis 500 Hz ist nun erheblich feiner unterteilt und die Originalfrequenz von 30 Hz wird genauer getroffen. Man kann erheblich genauer feststellen, in welchem Frequenzbereich das gemessene Signal die größte Amplitude hat.




Der Ausschnitt zeigt, dass eine Frequenz relativ dicht an der tatsächlichen Signalfrequenz liegt. Trotzdem ist die abgelesene maximale Amplitude etwa 12,5 Prozent kleiner als die theoretisch richtige Amplitude im Originalsignal. Dieser Ablesefehler hängt bei einem exakt sinusförmigen Signal nicht von der Anzahl der Messwerte, sondern nur davon ab, ob die richtige Frequenz zufällig sehr genau mit einer Frequenzlinie der FFT übereinstimmt oder nicht.

Dieser Versuch zeigt aber, dass durch Erhöhung der Wertezahl eine Verbesserung der Ergebnisse möglich ist. Es bleibt aber immer ein Restfehler, dessen Größe davon abhängt, ob die „richtige Frequenz" zufällig dicht an einer Frequenzlinie oder genau zwischen zwei berechneten Frequenzen liegt.

Bedenken Sie, dass Signale in der Praxis häufig nicht exakt sinusförmig sind und die Frequenz sich im Laufe der Messung ändern kann.

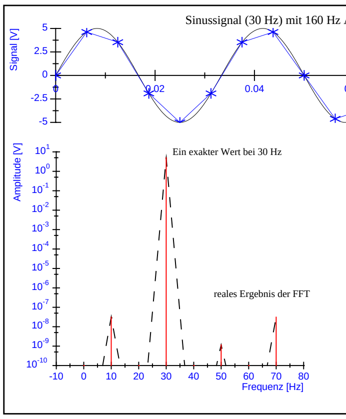
## Ein exaktes Ergebnis

Ein exaktes Ergebnis kann nur erzielt werden, wenn man die Abtastrate genau an die tatsächliche Frequenz anpasst. Die Abtastzeit muss dazu ein ganzzahliges Vielfaches der Schwingungszeit sein. Im folgenden Beispiel sollen genau 3 Schwingungen abgetastet werden, was bei 30 Hz genau 0,1 Sekunde dauert. Bei 16 Messwerten ergibt sich eine Abtastrate von 160 Hz.

Bei diesem Beispiel sollte man daran denken, dass es in der Praxis nicht möglich ist, die Frequenz vorher genau zu kennen. Normalerweise hat man es mit Mischungen der verschiedensten Frequenzen zu tun und die FFT wird eingesetzt um herauszufinden, wo diese Frequenzen liegen.

Das folgende Bild zeigt die FFT einer genau getroffenen Sinuskurve. Die 16 Abtastwerte beschreiben genau 3 Schwingungen. Der 17. Wert würde exakt bei 0,1 Sekunden und 0 Volt liegen. Das Signal kann ab diesem Wert periodisch wiederholt werden.

Bei 30 Hz ist eine Amplitude von 5 V berechnet worden. Alle anderen Amplituden liegen, wie die logarithmische Darstellung im unteren Achsensystem zeigt, unter $10^{-7}$, was bei der Genauigkeit der verwendeten Realzahlen praktisch gleich Null ist.



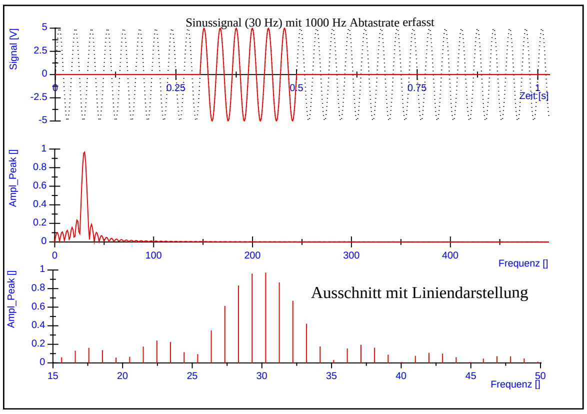

| Frequenz | Amplitude | Phase |
|---|---|---|
| 0.0000 | 0.0000000000 | 0.0000 |
| 10.0000 | 0.0000000315 | 90.0000 |
| 20.0000 | 0.0000000000 | 0.0000 |
| 30.0000 | 5.0000000005 | -90.0000 |
| 40.0000 | 0.0000000000 | 0.0000 |
| 50.0000 | 0.0000000012 | -90.0000 |
| 60.0000 | 0.0000000000 | 0.0000 |
| 70.0000 | 0.0000000309 | 90.0000 |

Dieses Bild zeigt noch einmal deutlich, dass die FFT-Ergebnisse als Spikes dargestellt werden sollten. Die gestrichelte Linie ist falsch, weil wirklich nur eine Amplitude bei genau 30 Hz von Bedeutung ist.

Nach diesem Ausflug in die Theorie einer exakten FFT soll nun im folgenden Kapitel gezeigt werden, wie Sie in der Praxis genauere Amplituden berechnen können.

## Signal nur kurzzeitig verfügbar

Es kommt immer wieder vor, dass eine gute Auflösung gewünscht wird, weil das Signal nur für eine sehr kurze Zeit auftritt. Für eine hohe Auflösung muss aber lange gemessen werden. Die Lösung könnte genau das sein.




Im obigen Bild ist die Sinusschwingung mit der Frequenz von 30 Hz nur etwa zu einem Fünftel der Messzeit vorhanden. Die FFT ermittelt nun zwar eine hohe Auflösung, die genaue Frequenz und Amplitude bleiben aber trotzdem verborgen.

Ergebnisse können nicht durch Anhängen von Nullen verbessert werden. Genauso wenig hilft es, ein kurzes Signal mehrmals aneinander zu hängen. Auch das führt zu keiner Verbesserung des Ergebnisses.

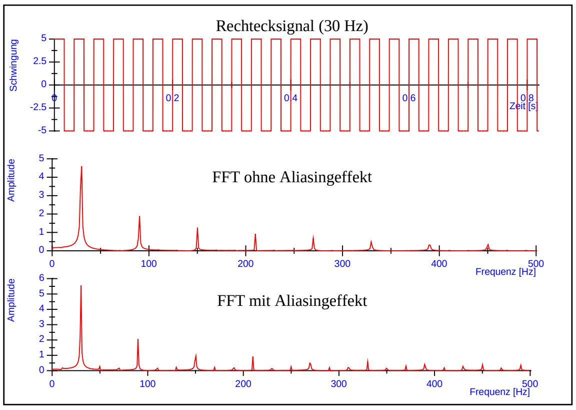
# Typische FFT-Ergebnisse

Es gibt einige FFT-Ergebnisse für bestimmte Standardsignale, die das Verhalten der FFT-Funktion kennzeichnen. Die Ergebnisse bei Sinuskurven haben wir bereits ausführlich betrachtet.

Die folgenden Beispiele sollen nun einige andere typische Ergebnisse zeigen.

## Rechteckschwingung

Rechteckschwingungen enthalten nicht alle Frequenzen, sondern neben der Hauptfrequenz nur Vielfache dieser Frequenz (3, 5, 7,...) mit jeweils abnehmender Amplitude.

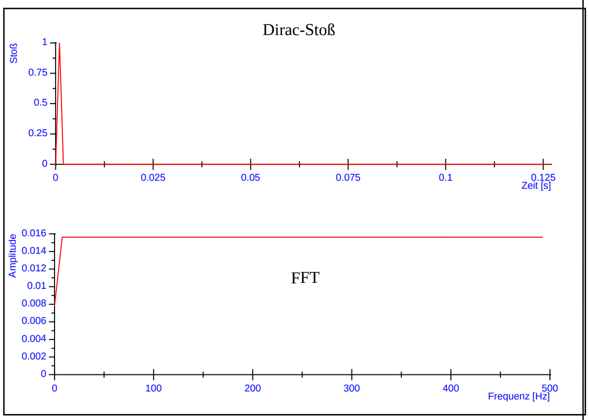



Da sich diese Reihe theoretisch bis ins Unendliche fortsetzt, gibt es bei Rechteckschwingungen grundsätzlich Aliasingeffekte, die weiter hinten in einem eigenen Kapitel ausführlich beschrieben werden.

Im mittleren Achsensystem sind die Effekte durch entsprechende Maßnahmen, wie eine höhere Abtastrate, Filter, Reduktion, verhindert worden.

## Dirac-Stoß

Ein wichtiges Signal für die FFT ist ein theoretisch unendlich kurzer Stoß.




Dieser ideale Stoß hat ein gleichmäßig verteiltes Spektrum. In späteren Beispielen werden wir sehen, dass man mit einem kurzen Stoß (Hammerschlag) eine Schwingung anregen kann, die alle Frequenzen enthält.

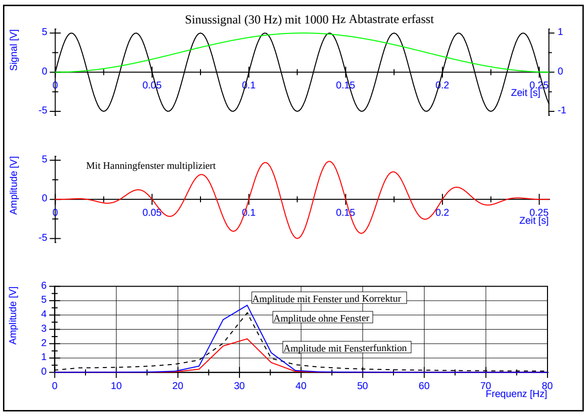
Ein typisches Beispiel für einen solchen Stoß ist das Anschlagen einer Stimmgabel. Der Stoß enthält alle Frequenzen. Die Stimmgabel schwingt dann nach dem Schlag mit ihrer Eigenfrequenz (Resonanz) weiter.

# FFT-Anwendung

In der Praxis ist die tatsächliche Frequenz eines Signals unbekannt. Normalerweise entspricht das Signal nicht einem reinen Sinus, sondern besteht aus einer Mischung verschiedener Signale. Diese Signale sind meist auch nicht völlig sinusförmig und völlig gleichmäßig über den Messzeitraum verteilt. Die Schwankungen im Ergebnis zwischen mehreren Messungen sind in der Regel größer als die systembedingten Abweichungen, die durch den FFT-Algorithmus verursacht werden, wenn er korrekt angewendet wird.

## Die Anwendung der Fensterfunktion

Das Hauptproblem einer FFT, dass einzelne Frequenzen nicht genau in die Abtastzeit passen und mitten in einer Schwingung abgeschnitten werden, hat nicht nur den Effekt, dass die „richtige“ Frequenz nicht berechnet werden kann, sondern auch, dass ein abrupter Sprung im Signal vorkommt. Sprünge im Signal führen aber zu einer Verfälschung der Amplituden. Ein kurzer Schlag hat keine spezielle Frequenz, sondern hebt alle Frequenzen gleichmäßig an. Ein einfaches Mittel gegen solche Sprünge ist die Verwendung einer Fensterfunktion.




Das Bild zeigt die einfache Sinuskurve aus dem ersten Beispiel. Im oberen Achsensystem ist auch die Kurve des Hanningfensters eingezeichnet, mit der die Rohdaten multipliziert werden. Das mittlere Achsensystem zeigt das Ergebnis: Die Kurve ist an den Rändern abgeflacht. Dadurch gibt es keinen Sprung zum Beginn der nächsten Periode.

Die Amplituden mit Fensterfunktion im unteren Achsensystem sind kleiner als die Amplituden der Rohdaten, weil das Signal durch die Verrechnung abgeflacht wurde. Wichtig ist dabei, dass die Amplituden in der Nähe der Originalfrequenz von 30 Hz nur gedämpft wurden, während alle Frequenzen die weiter entfernt liegen, praktisch gegen Null gehen.

Die durchschnittliche Dämpfung der Amplituden kann für jedes Fenster berechnet werden. Damit ist eine angenäherte Korrektur der Amplituden möglich.

Da die Fensterfunktion keinen Einfluss auf die berechneten Frequenzen hat, ist auch auf diese Weise keine exakte Berechnung der „richtigen“ Frequenz möglich. Die korrigierte größte Amplitude liegt aber deutlich dichter an der theoretischen Amplitude als bei der FFT ohne Fensterfunktion bzw. mit dem Rechteck-Fenster.

Bei der Korrektur gibt es zwei Varianten. Wenn man die Genauigkeit der größten Amplitude verbessern will, verwendet man die periodische Korrektur. Beim Hanning-Fenster beträgt der Faktor 2, weil die Amplitude bei einem exakt getroffenen Sinus genau halbiert wird. Bei nicht exakt passenden Frequenzen ist der Fehler aber etwa halb so groß wie beim Rechteck-Fenster. Die Summe der Amplituden, die z.B. bei Schallmessungen wichtig ist, stimmt dann aber nicht mehr.

Die Random-Korrektur korrigiert alle Amplituden „summenrichtig“. Der Faktor beträgt 1,63299 (Qurdratwurzel von 8/3) Die Summe aller Amplituden wird dabei erheblich genauer, weil der Randfehler hier vollkommen eliminiert ist.

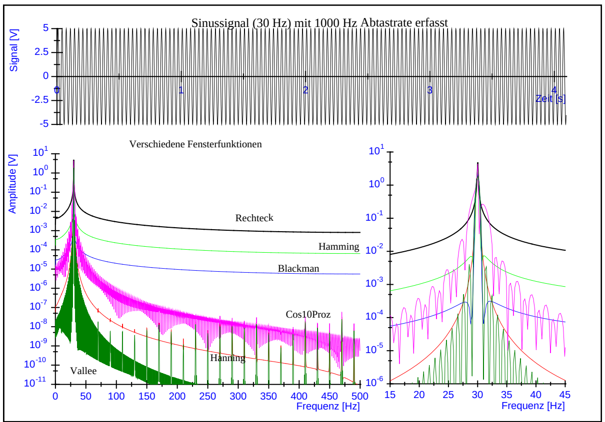
## Verschiedene Fensterfunktionen

In DIAdem gibt es eine ganze Reihe von verschiedenen Fensterfunktionen, die zu verschiedenen Ergebnissen führen. Es stellt sich nun die Frage, welche Fensterfunktion ist die Richtige. Wie Sie sicher schon vermuten, ist diese Frage nicht zu beantworten.

Jede Fensterfunktion hat ihre Besonderheiten. Mal werden die Störungen neben den hauptsächlich im Signal vorhandenen Sinusfrequenzen besser gedämpft, mal wird das Originalsignal möglichst wenig abgeändert. Weitere Informationen zum Verhalten der einzelnen Fensterfunktionen finden Sie in der DIAdem-Hilfe und in der Fachliteratur zur Frequenzanalyse.

Auf jeden Fall liefern die verschiedenen Fensterfunktionen auch verschiedene Ergebnisse, ohne dass dabei ein Ergebnis automatisch richtiger als das andere ist.

Für viele Anwendungen ist das Verhalten der verschiedenen Fensterfunktionen aber nur von akademischem Interesse. In der Praxis genügen die beiden Fenster Rechteck und Hanning vollkommen. Die Vielzahl von Fensterfunktionen in DIAdem hat aber trotzdem ihre Berechtigung. Man kann z.B. mehrere Fensterfunktionen alternativ ausprobieren und die Ergebnisse vergleichen. Dann ist schnell zu erkennen, welche Anteile am Ergebnis durch den Algorithmus beeinflusst werden und welche nicht. Außerdem gibt es genormte Standardanwendungen, die bestimmte Fenster vorschreiben, weil nur so reproduzierbare Ergebnisse möglich sind. Hier haben Wissenschaftler ein „optimales" Fenster konstruiert und nur genau dieses Fenster liefert dann die genormten Ergebnisse.




Dieses Bild zeigt eine Auswahl der in DIAdem verfügbaren Fensterfunktionen. Das Hanning-Fenster erreicht eine besonders große und über den ganzen Frequenzbereich gleichmäßig wachsende Dämpfung. Das Vallée-Fenster zeigt die stärkste Dämpfung, ist aber sehr ungleichmäßig. Jedes Fenster hat seine spezifischen Eigenschaften. Die Eigenschaften der Fensterfunktionen ändern sich bei unterschiedlichen Frequenzen teilweise erheblich.

Sehr gut kann man im unteren Bereich der Grafik (Vallee-Fenster) Störungen sehen, die nicht durch den Algorithmus, sondern durch Ungenauigkeiten der verwendeten Gleitkommazahlen vom Typ FLOAT entstehen.

Alle Fenster mit Ausnahme des Exponential-Fensters betonen die Mitte des Signals und schwächen die Ränder ab. Bei Signalen, die nicht über den ganzen Messzeitraum homogen gleichmäßig verlaufen, werden zu Beginn oder am Ende stattfindende Ereignisse, weggedämpft.

Ein typisches Beispiel ist ein Schlag, der zu Beginn der Messung stattfindet und zu einer abklingenden Schwingung führt. Hier verursacht ein Hanning-Fenster Fehler, die auch durch die Korrektur nicht behoben werden können. Ein solches Signal sollte, wenn überhaupt, nur mit dem Exponential-Fenster bearbeitet werden.

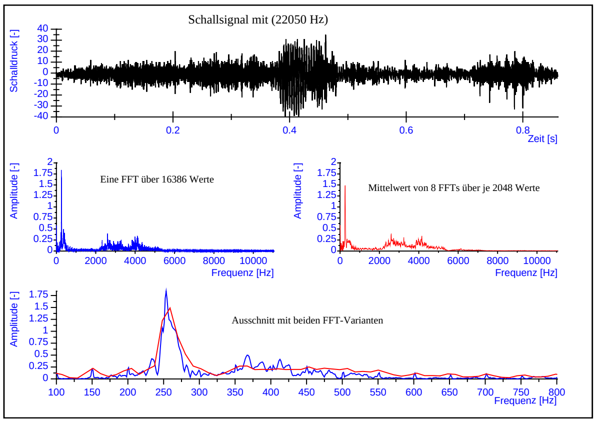
## Zeitintervalle

Messungen sind in der Praxis nie exakt wiederholbar. Die Messwerte sind immer etwas unterschiedlich. Daraus folgt, dass auch die Ergebnisse der FFTs immer etwas unterschiedlich ausfallen. Wenn man z.B. die Vibrationen misst, die ein Motor verursacht, können geringe Änderungen in der Drehzahl dazu führen, dass einmal die Frequenz der Drehzahl genau in der FFT als Linie vorkommt und eine Sekunde später zwischen zwei Linien liegt. Das kann durchaus zu Unterschieden in der Amplitude von 10 oder gar 20 Prozent führen.

Es kann sich daher lohnen, mehrere Messungen bzw. eine besonders lange Messung durchzuführen und mehrere Teilergebnisse miteinander zu vergleichen. Man sieht dann die Unterschiede der verschiedenen Teilmessungen und kann entscheiden, ob einzelne Ergebnisse wichtiger sind oder eine Mittelung über alle Ergebnisse zu einer besseren Darstellung der Gesamtschwingung führen.

### Mittelung mit Intervallen

Die Stabilität der Ergebnisse kann durch Mitteln mehrerer Messungen, verbessert werden. Dabei mittelt man entweder mehrere unabhängig erfolgte Messungen, oder man teilt die Daten einer entsprechend längeren Messung in mehrere Intervalle.




Dieses Bild zeigt ein mit 22100 Hz erfasstes Schallsignal. Es wurden 19000 Werte erfasst. Mit den Daten wurden zwei FFT-Berechnungen mit Hanning-Fenster durchgeführt. Das linke Achsensystem in der Mitte zeigt das Ergebnis einer großen FFT mit über 16386 Werten. Die Frequenzauflösung ist mit ca. 1,35 Hz sehr hoch. Das rechte Achsensystem in der Mitte zeigt das gemittelte Ergebnis von 8 FFT-Berechnungen mit je 2048 Werten. Die Frequenzauflösung liegt bei 10,7 Hz. Der grobe Verlauf beider Kurven ist ähnlich. Die Amplituden und die Form der Spitzen sind aber sehr unterschiedlich, was im unten abgebildeten Achsensystem gut zu erkennen ist.

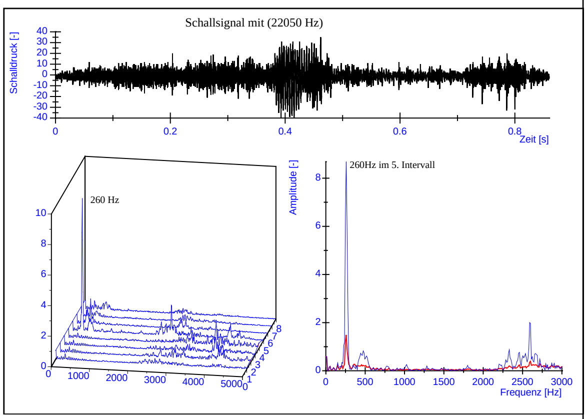
Da als Anzahl der Werte in der FFT nur Potenzen von 2 zulässig sind, wird ein Teil der Daten nicht berücksichtigt. Bei der Aufteilung in mehrere Intervalle, könnten deshalb mehr Werte berücksichtigt werden, weil man dichter an die Zahl von 19000 Werten herankommt. Es ist auch möglich, überlappende Intervalle zu berechnen, dann können alle Werte in die Rechnung eingehen, einige Werte werden aber doppelt berücksichtigt. Die Verwendung von überlappenden Intervallen hat bei Fensterfunktionen wie Hanning zusätzlich den Vorteil, dass kurzzeitig auftretende Schwingungen, die zufällig am Rand eines Intervalls abgeschwächt werden, im benachbarten Intervall umso stärker enthalten sind.

Für alle Varianten gibt es sinnvolle Anwendungsbereiche. Wenn z.B. ein Geräusch untersucht wird, bei dem es darauf ankommt, welche von zwei in der Frequenz dicht beieinander liegenden Lärmquellen den größeren Anteil am Gesamtgeräusch hat, ist eine Auswertung mit möglichst vielen Werten richtig. Im obigen Beispiel handelt es sich dagegen um Sprache, die, über eine Sekunde betrachtet, naturgemäß keine exakt konstanten Frequenzen enthalten kann. Die Spitze bei etwa 260 Hz ist also eher zufällig und kann in der nächsten Sekunde an anderer Stelle liegen.

Das Zeitsignal im oberen Achsensystem ändert sich über den Zeitraum von knapp einer Sekunde recht stark. Eine Geräuschanalyse sollte also entweder eine Mittelung über die ganze Zeit sein, wobei die vorkommenden Frequenzen nicht genau ermittelt werden können, oder eine Lokalisierung einer bestimmten Frequenz zu einem bestimmten Zeitpunkt der Messung. In beiden Fällen ist eine große FFT über möglichst viele Werte weniger sinnvoll. Für dieses Signal sind deshalb die gemittelte FFT oder eine Terz/Oktav-Analyse, wie wir noch sehen werden, der richtige Ansatz.

## Reihenauswertung mit Intervallen

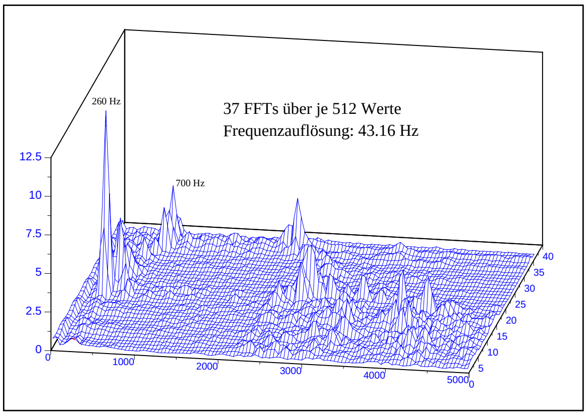
Das Geräuschsignal scheint zu verschiedenen Zeiten deutlich unterschiedliche Amplituden und offenbar auch Frequenzen zu enthalten. Um das genauer zu untersuchen, wird die FFT mit Intervallen ohne Mittelung durchgeführt. Das Ergebnis sind 8 Amplitudenfrequenzgänge zu unterschiedlichen Zeiten.




Das Ergebnis der Berechnung zeigt, dass die einzelnen Berechnungen im rechten unteren Achsensystem erhebliche Unterschiede aufweisen. Die größte Frequenz bei 260 Hz kommt z.B. nur sehr kurz im Intervall 5 vor (im Zeitsignal nach etwa 0,4 Sekunden). Da die Frequenz kurzzeitig sehr exakt auftritt, entsteht eine große, sehr schmale Amplitudenspitze.

Das Signal kann sich von einer Zehntelsekunde zur nächsten erheblich ändern. Es stellt sich also die Frage, ob es nicht sinnvoller ist, noch kürzere Zeiträume zu untersuchen. Das folgende Bild zeigt eine Auswertung mit 37 Intervallen, die je 512 Werte groß sind.

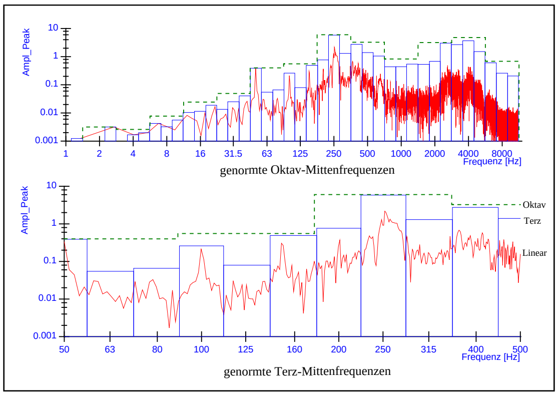
Hier zeigt sich ein grundsätzliches Dilemma der FFT. Je genauer man den Zeitpunkt bestimmen möchte, an dem eine bestimmte Frequenz auftritt, desto ungenauer wird die Frequenzauflösung. In diesem Beispiel liegt die Auflösung nur noch bei 43 Hz. Genauere Frequenzauflösungen erfordern, wie bereits erwähnt, grundsätzlich längere Messintervalle.




Für jede Anwendung muss ein Kompromiss zwischen genauer Zeitauflösung und genauer Frequenzauflösung gefunden werden.

## Terz/Oktav-Analyse

Die Beurteilung von Geräuschen umfasst normalerweise einen sehr großen Frequenzbereich, der sich z.B. von 20 Hz bis 20 kHz erstrecken kann, um den gesamten vom Menschen hörbaren Bereich abzudecken. Die FFT liefert nun zunächst äquidistante (gleichmäßig verteilte) Frequenzschritte, was relativ unpraktisch ist. Bei Geräuschen ist oft nicht die exakte Frequenz im Signal, sondern die Lautstärke in unterschiedlichen Frequenzbereichen wichtig. Dabei wird der ganze Frequenzbereich in genormte Bänder aufgeteilt. Die Oktav-Analyse teilt die Frequenzen in Oktaven (jeweils eine Verdopplung der Frequenz), die Terz-Analyse teilt die Frequenzen in Terzen. Drei Terzen bilden eine Oktav. Das folgende Bild zeigt die Terz/Oktav-Analyse zusammen mit der ursprünglichen Amplitude nach der FFT-Berechnung.




Das obere Achsensystem zeigt den gesamten Frequenzbereich des Signals. Durch die logarithmische Teilung der Frequenzachse wird die Bedeutung der niedrigeren Frequenzen angemessen hervorgehoben. Die gestrichelte Linie zeigt die Oktav-Analyse, die in jeder Oktav alle vorkommenden Amplituden addiert. Der ganze Frequenzbereich wird nun durch 13 Amplituden repräsentiert, deren Mittenfrequenzen übrigens an der Frequenzachse aufgetragen sind. Das untere Achsensystem zeigt einen Ausschnitt, bei dem die Mittenfrequenzen der Terzen an der Frequenzachse aufgetragen sind. Diese Mittenfrequenzen sind genormt und erlauben einen Vergleich unterschiedlicher Messungen.

Wie bereits erwähnt, werden Amplituden (Peak) addiert, indem die Quadrate zusammenaddiert und aus dem Ergebnis die Quadratwurzel gezogen wird. Jede der oben abgebildeten Terz/Oktav-Amplituden enthält die Summe aller einzelnen Amplituden in ihrem Band. Bei den ganz niedrigen Frequenzen gibt es nicht genügend FFT-Werte und einige Terzen bleiben unberücksichtigt.

Wie weiter oben gezeigt, erhält man unterschiedliche Ergebnisse, wenn man die FFT in mehreren Intervallen durchführt. Die Amplituden der einzelnen Terzen und Oktaven bleiben dagegen etwa gleich, weil die Summe der Amplituden in einem Frequenzband unabhängig von der Anzahl gleichbleibt. Im unteren Frequenzbereich kann es aber schneller vorkommen, dass die FFT keine oder zu wenige Amplituden für einzelne Frequenzbänder liefert. Das Ergebnis der Terz/Oktav-Analyse wird deshalb besser, wenn man mit großen Intervallen rechnet.

Da in jedem Oktav- bzw. Terz-Band die Summe der einzelnen Amplituden gebildet wird, ist die Größe des Bandes immer größer als die größte einzelne Amplitude.

## FFT-Funktionen

Die Berechnung der FFT erlaubt die Auswahl unter einer Reihe von verschiedenen FFT-Funktionen. Der Zusammenhang zwischen den Funktionen ist schnell erklärt:

Der FFT-Algorithmus ermittelt zunächst zwei Kanäle die als Realteil (R) und Imaginärteil (I) bezeichnet werden und hier nicht von Bedeutung sind. Aus Real- und Imaginärteil lassen sich Amplituden und die Phasenverschiebung bestimmen.

⇨ Die Amplitude, die als einziges Ergebnis der einfachen FFT wichtig ist, wird als Quadratwurzel ($R^2+I^2$) berechnet. Dieses Ergebnis wird als Peak-Amplitude bezeichnet. Alle bisherigen Beispiele zeigen Peak-Amplituden.

⇨ Neben der Peak-Amplitude ist auch die RMS-Amplitude von Bedeutung. Der RMS-Wert ist der „quadratische Integralmittelwert" einer Schwingung. Er kann direkt aus dem Zeitsignal berechnet werden. Eine typische Anwendung ist die Berechnung des RMS-Schalldrucks aus der gemessenen Schallschwingung. Bei reinen Sinusschwingungen entspricht der RMS-Wert genau der Amplitude dividiert durch Quadratwurzel von 2. Da die FFT Zeitsignale in Sinusamplituden zerlegt, gilt dieser Zusammenhang auch für die Ergebnisse der FFT.

⇨ Das Quadrat der Peak-Amplitude wird als Autospektrum bezeichnet und ist bei einigen Berechnungen ebenfalls von Bedeutung. Gleiches gilt für das Quadrat der RMS-Amplitude ($RMS^2$), das auch als Powerspektrum bezeichnet wird.

⇨ Eine weitere Berechnungsart ist die PSD-Amplitude (Power-Spektrum-Density), bei der das Powerspektrum durch den Abstand der Frequenzlinien dividiert wird.

**Zusammengefasst**:

Peak-Amplitude: $\sqrt{R^2+I^2}$

RMS-Amplitude: $\dfrac{\sqrt{R^2+I^2}}{\sqrt{2}}$

Autospektrum: $R^2+I^2$

Powerspektrum: $RMS^2 = \dfrac{R^2+I^2}{2}$

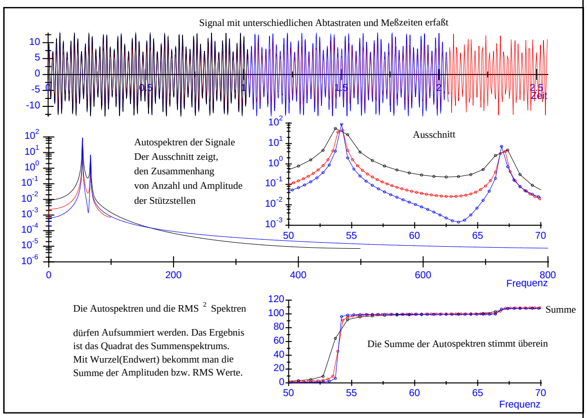
Powerspektrum-density: $PSD = \dfrac{R^2+I^2}{2 * \Delta F}$

## Wozu Autospektren?

Eine typische Frage lautet immer wieder: Wozu benötigt man diese verschiedenen FFT-Funktionen?

In der Praxis haben die verschiedenen Funktionen alle Ihre Berechtigung. Besonders wichtig ist, dass man weiß, welche Funktion verwendet wurde, da die Daten sonst eventuell falsch interpretiert werden.

Das folgende Beispiel zeigt eine typische Anwendung mit Autospektren. Es analysiert ein aus zwei Sinusfrequenzen zusammengemischtes Signal. Dabei werden die Ergebnisse von drei Messungen mit unterschiedlichen Abtastraten und Messdauern verglichen.




Das obere Achsensystem zeigt das Signal mit den verschiedenen Messdauern: Die rote Messung wurde besonders lange und die blaue mit besonders hoher Abtastrate durchgeführt.

Die beiden Achsensysteme in der Mitte zeigen sehr gut, dass vor allem neben und zwischen den beiden Signalfrequenzen große Unterschiede auftreten. Die Qualität der Ergebnisse hängt dabei auch vom Zufall ab. Die blaue Messung trifft die tatsächlichen Frequenzen der Sinuskurven relativ genau. Dadurch ist die abgelesene maximale Amplitude genauer.

Das untere Achsensystem zeigt, dass bei allen Unterschieden der Amplitudenverläufe trotzdem immer die gleiche Summe herauskommt. Die Summenbildung darf aber nur mit den beiden quadrierten FFT-Funktionen, Powerspektrum oder wie hier Autospektrum, erfolgen.

Bei Geräuschen kann man zwar oft eine große Anzahl von Spitzen im Spektrum sehen. Es ist aber sehr schwer abzuschätzen, welche Frequenzbereiche den größten Anteil am Gesamtpegel haben.

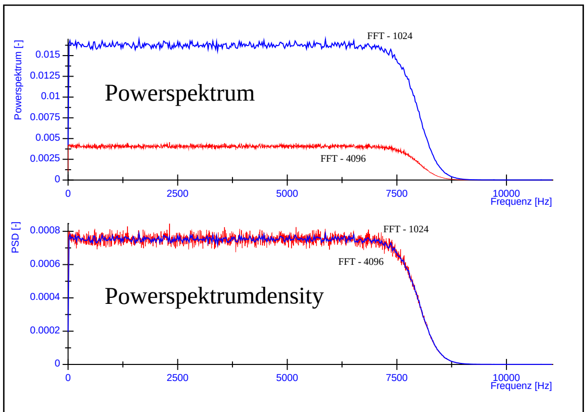
Die Summenkurve bietet hier eine sehr gute Übersicht über die Anteile der verschiedenen Bereiche eines Spektrums am Gesamtpegel.

## Wann ist ein PSD sinnvoll?

Die Funktion PSD ermittelt das Powerspektrum und dividiert die Amplituden durch den Abstand der Frequenzlinien. Das Ziel dieser Berechnung ist es, eine bessere Vergleichbarkeit von Spektren mit gleichmäßig verteilten Frequenzanteilen zu bekommen.

PSD ist nicht geeignet für Signale mit eindeutigen Sinusanteilen, wie im vorigen Beispiel für Autospektren.

Eine PSD wird immer dann eingesetzt, wenn man Messungen von gleichmäßigen Spektren vergleichen will und Abweichungen durch unterschiedliche Abtastraten und Messdauern vermeiden muss.




Das Bild zeigt gemittelte FFT-Ergebnisse eines gleichmäßigen Rauschens mit einem Tiefpass bei 8000 Hz. Dabei werden immer FFT-Berechnungen mit 1024 Werten (blau) und mit 4096 Werten (rot) gegenübergestellt.

Die Powerspektren im oberen Achsensystem zeigen unterschiedliche Amplituden. Da die Summen aller Amplituden immer gleich sind, müssen die einzelnen Amplituden bei der hochauflösenden Berechnung kleiner sein. Die blaue Kurve fasst immer vier Frequenzen der roten Kurve zusammen, wodurch diese Amplituden auch viermal so hoch sind wie die der roten Kurve.

PSD dividiert die Amplituden durch den Abstand der Frequenzlinien. Da dieser Abstand bei der blauen Kurve viermal so groß ist, haben beide PSD-Kurven etwa die gleiche Größenordnung.

PSD-Spektren werden nicht aufsummiert, um die Summenkurve zu erhalten, sondern integriert. Die Fläche unter der Kurve entspricht unabhängig von der Anzahl der Stützstellen immer dem Gesamtpegel.

# FFT mit zwei Zeitsignalen

In den bisherigen Beispielen wurde immer die FFT von einem einzelnen unabhängigen Zeitsignal untersucht. Es wurde also praktisch eine Schwingung beobachtet, ohne dabei zu berücksichtigen, was diese Schwingung verursacht hat.

In vielen technischen Bereichen, etwa bei mechanischen Schwingungen, ist es dagegen aufschlussreicher, Ursache und Wirkung zu beobachten, indem man das Antwortverhalten auf eine bestimmte Anregung ermittelt.

Eine besonders wichtige Analyse ist in diesem Zusammenhang die Übertragungsfunktion, die für jede Frequenz das Verhältnis von Ausgang zu Eingang ermittelt. Einfacher ausgedrückt: Auf der einen Seite des zu untersuchenden Systems wird eine Schwingung gesteckt, um auf der anderen Seite zu messen, was herauskommt. Das Verhältnis von Ausgang zu Eingang sollte immer gleich sein, auch wenn die Eingangsschwingung nicht jedes Mal genau gleich ist.

Die Übertragungsfunktion liefert eine genaue Aussage, bei welchen Frequenzen die Anregung gedämpft und bei welchen sie verstärkt wird. Bei Resonanzeffekten wird aus kleinen Anregungen oft schon eine besonders starke Schwingung.

## Übertragungsfunktion

Für Übertragungsfunktionen misst man immer zwei Signale: Die Anregung und das Ergebnis auf der anderen Seite des Systems. Beide Signale müssen gleichzeitig erfasst werden.

Schwingungen entstehen nicht aus sich heraus. Schwingungen müssen immer durch etwas ausgelöst werden.

Für genaue Analysen ist es wichtig zu wissen, wie die Anregung erfolgt ist.

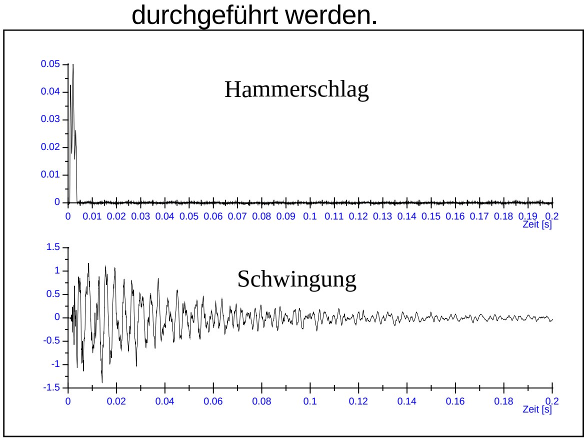
Die Anregung muss für die gewünschte Analyse geeignet sein. Anregungen sollten ein System im gesamten für die Analyse wichtigen Frequenzbereich möglichst gleichmäßig in Schwingung versetzen.

Sinusförmige Anregungen sind normalerweise ungeeignet, weil sie nur eine Frequenz enthalten. Wenn man eine mechanische Struktur mit einer einzelnen Frequenz angeregt, wird sie auch nur mit dieser einen Frequenz schwingen.

Es gibt zwei typische Anregungen.

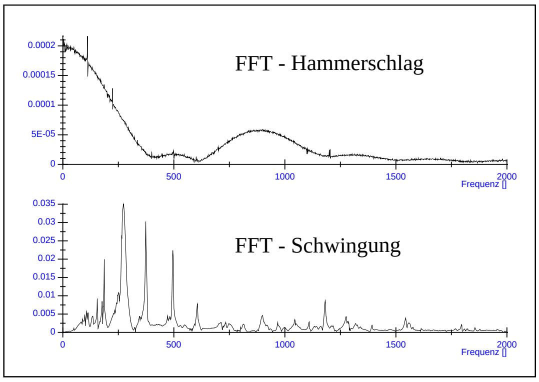
⇨ Rauschartige Anregungen enthalten alle Frequenzen etwa gleichmäßig. Sie haben zusätzlich den Vorteil, dass sie über einen längeren Zeitraum konstant vorliegen können. Der technische Aufwand für Rauschanregungen ist allerdings oft sehr hoch.

⇨ Schlagartige Anregungen enthalten ebenfalls alle Frequenzen. In der Praxis schlägt man z.B. mit einem Hammer möglichst kurz und trocken auf die Struktur und misst die Schwingung, die dadurch ausgelöst wird. Meistens wird die Beschleunigung auf dem Hammer und auf signifikant wichtigen Stellen der mechanischen Struktur gemessen. Natürlich muss der Hammer in der Größe zum zu testenden Objekt passen; normale Schwingungsmessungen sollen schließlich zerstörungsfrei durchgeführt werden.




Anregungen mit einem Hammerschlag sind relativ einfach durchzuführen. Nach dem Schlag kann die ausklingende Schwingung aber nur für einen begrenzten Zeitraum gemessen werden. Der Zeitraum sollte aber für alle relevanten Schwingungen ausreichen.

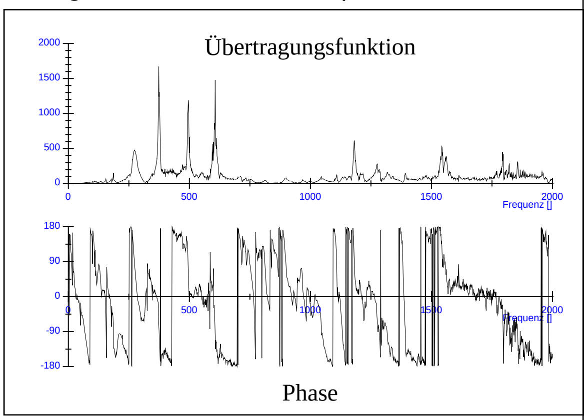
Das folgende Bild zeigt die FFT-Analysen von Signalen, die mit diesen beiden Anregungen erzeugt wurden.




Ein idealer Hammerschlag hätte alle Frequenzen vollkommen gleichmäßig angeregt. In der Praxis gelingt das natürlich nicht. Man kann aber gut sehen, dass in einem weiten Bereich alle Frequenzen mehr oder weniger stark vorkommen und deshalb auch im Schwingungssignal enthalten sind.

Die FFT der Schwingung zeigt nun bei welchen Frequenzen die Struktur stark und bei welchen sie nur wenig schwingt. Die größte Amplitude bei etwa 260 Hz ist aber nur deshalb so groß, weil hier die Anregung sehr stark ist. Die Resonanzfrequenzen bei schwacher Anregung, z.B. bei 600 Hz würden bei einer idealen Anregung deutlich größer ausfallen.

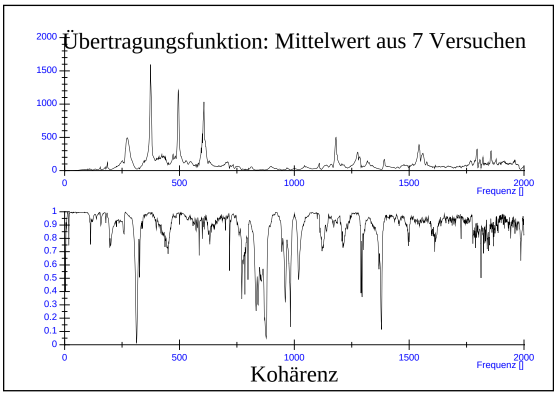
Die Übertragungsfunktion berechnet Amplituden, die proportional zur jeweiligen Anregung sind. Die Phasenverschiebung kann genutzt werden, um die Ergebnisse weiter zu interpretieren.




Bei den hier gezeigten Ergebnissen ist zunächst noch unklar, ob die gemessene Schwingung überhaupt durch die Anregung verursacht wurde. Bei Hammerschlägen kann man das noch ganz gut anhand der Zeitsignale beurteilen. Bei Rauschanregungen aber nicht. Hier hilft die Kohärenzfunktion.

Die Kohärenz benötigt mehrere nacheinander gemessene Zeitsignale. Bei Hammerschlägen wird die Aufzeichnung durch den Hammerschlag ausgelöst (analoger Trigger). Bei Rauschanregungen kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt gemessen werden.

Die Ergebnisse werden verglichen. Wenn bei einer Frequenz alle Amplituden und Phasen der Übertragungsfunktion genau übereinstimmen, ist die Kohärenz genau 1. Schlechte Übereinstimmungen tendieren gegen 0. Die Kohärenzfunktion zeigt dadurch sehr gut, welche Frequenzbereiche der Übertragungsfunktion brauchbare Ergebnisse darstellen. Nur Frequenzen, die reproduzierbare Übertragungswerte liefern, können sinnvoll ausgewertet werden.




Dieses Bild zeigt die gemittelten Ergebnisse aus sieben Versuchen. Die Kohärenz zeigt sehr unterschiedliche Qualitäten bei den unterschiedlichen Frequenzen.

Bei Frequenzen mit hohen Amplituden und damit starker Übertragung ist die Kohärenz meistens sehr gut. Bei Frequenzen mit geringer Übertragung ist dagegen die Kohärenz oft nicht gut, weil hier zufällige Störeinflüsse überwiegen. Wenn nichts übertragen wird, können auch Frequenz und Phase nicht übereinstimmen.

Wenn an Frequenzspitzen schlechte Kohärenzen auftreten, kann das bedeuten, dass hier eine Schwingung gemessen wird, die nicht durch die Hammeranregung, sondern durch Störanregungen verursacht wurde. Schwingungsmessungen sollten deshalb im Ruhezustand erfolgen und nicht beispielsweise bei laufendem Motor.

# Erfassung von Schwingungssignalen

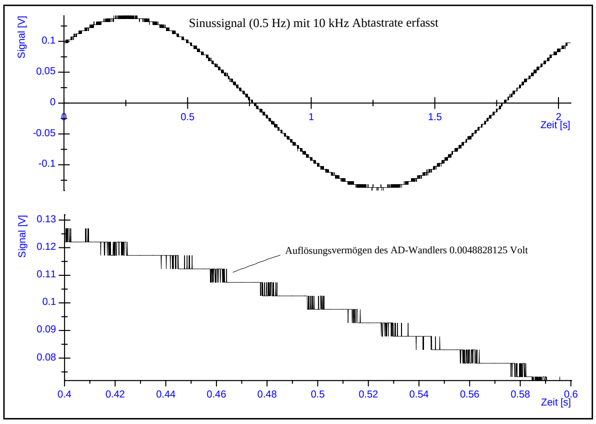
Entscheidende Bedeutung für die Qualität der Frequenzanalyse hat zunächst die Erfassung der Schwingungssignale. Wichtige Faktoren bei der Erfassung sind die Ausnutzung der Genauigkeit der Messausrüstung (Aufnehmer, Messverstärker, AD-Wandler), die Abtastrate, die Messdauer und der Zeitpunkt der Messung.

## Allgemeine Hinweise zur Erfassung von Messdaten

### Genauigkeit des AD-Wandlers

Jeder AD-Wandler hat eine definierte Genauigkeit, die sich normalerweise aus dem Spannungsbereich und der Auflösung ergibt. Sehr häufig bieten AD-Wandler eine Auflösung von 12 Bit und einen Spannungsbereich von -10 bis +10 V an. Der Spannungsbereich wird bei 12-Bit-Auflösung in 4096 Schritte von jeweils 0,0048828125 V geteilt. Die +10 V sind dabei normalerweise selber nicht mehr im Bereich enthalten.

Wenn Signale gemessen werden, die den Spannungsbereich nicht voll ausnutzen, wird ein Teil der Genauigkeit verschenkt. Das folgende Beispiel zeigt, wie die Ergebnisse aussehen können, wenn der Spannungsbereich schlecht ausgenutzt ist.




Die Schwingung erstreckt sich etwa von -0,15 bis +0,15 Volt. Von den 4096 verschiedenen Spannungen, die der AD-Wandler messen kann, werden nicht ganz 60 (ca. 1,5 Prozent) ausgenutzt.

**Achtung:** Die Stufen in der Kurve sind bei Daten von A/D-Wandlern immer vorhanden, man kann sie häufig nur nicht so genau erkennen.

Die Spannungsstufen fallen hier durch die hohe Abtastrate besonders gut auf.

Bei einer geringeren Abtastrate von etwa 10 Hz wären die Stufen dagegen nicht mehr sichtbar, die Ungenauigkeit aber genauso vorhanden. Der AD-Wandler bestimmt bei niedrigen Abtastraten nicht den Mittelwert über einen bestimmten Zeitraum, sondern pickt sich an einem Zeitpunkt den aktuellen Wert aus dem Signal. Im Übergangsbereich zwischen zwei Stufen bestimmt der Zufall, welche Stufe gemessen wird – unabhängig von der Genauigkeit der restlichen Messkette.

Zu diesen auflösungsbedingten Fehlern kommen noch weitere Fehler hinzu, die auf der Analogseite zwischen der Aufnahme des Signals bis zur tatsächlichen Digitalisierung auftreten. Es ist also bei weitem nicht sichergestellt, dass der AD-Wandler jedes Mal die „richtige“ Stufe erfasst.

Aus dem Messergebnis kann man noch einige weitere Hinweise ableiten:

- ⇨ Da die Werte im Übergangsbereich zwischen zwei Stufen hin und her springen, ist es möglich, durch Glätten eine Kurve mit scheinbar höherer Auflösung zu errechnen. Das macht aber nur Sinn, wenn der absolute Fehler der Messung klein genug ist.
- ⇨ Die hohe Abtastrate verhindert, dass die Steigung des Signals sinnvoll berechnet werden kann. Im obigen Signal gibt es nur die Steigungen Null, ein Schritt hoch und ein Schritt runter. Um Steigungen sinnvoll genau zu berechnen, muss man Werte in einem Abstand vergleichen, der sich über viele Stufen erstreckt. Bei AD-gewandelten Messdaten ist die Berechnung der Steigung (Differential) damit nur sehr selten möglich.
- ⇨ Die Genauigkeit der AD-Wandlung kann erheblich verbessert werden, wenn Sie einen Messverstärker oder einen AD-Wandler mit Verstärkung einsetzen. Das Signal kann nun an den AD-Wandler angepasst und dadurch der Messbereich besser ausgenutzt werden.

⇨ AD-Wandler mit 16-Bit-Auflösung können den Messbereich in 65536 Stufen aufteilen (16-mal mehr als der 12-Bit-Wandler).
Spezielle Messgeräte können häufig noch erheblich genauer messen. Die Genauigkeit wird dann nicht mehr in Bit-Auflösung angegeben, sondern in Dezimalstellen:

- 12 Bit entspricht 3½ Dezimalstellen
- 16 Bit entspricht 4½ Dezimalstellen

Es gibt Geräte, die z.B. 8½ Dezimalstellen genau messen können. Um Störeinflüsse des Rechners auszuschließen, sind diese AD-Wandler meist in einem separaten Gehäuse untergebracht. Meist wird auch nicht mehr zu einem „unendlich kurzen“ Zeitpunkt gemessen, sondern über einen Zeitraum integriert. Die Integration dauert oft genau 0,02 Sekunden (ein 50 Hz-Netzzyklus), weil so Netzstörungen herausgemittelt werden. Höhere Abtastraten sind dann nicht mehr möglich.

Bei Messgeräten lohnt sich oft ein Blick in die Technischen Daten, die Auskunft über die Genauigkeit und die möglichen Fehler beim Messen geben. Die Qualität einer Erfassungshardware spiegelt oft schon der Umfang der Technischen Daten wider.

### Kalibrierung der Messsignale

Ungenauigkeiten der AD-Wandlung sind technisch bedingt und nicht zu vermeiden. Deshalb ist es besonders wichtig, die möglichen Fehler abzuschätzen und sicherzustellen, dass die Genauigkeit den Anforderungen entspricht.

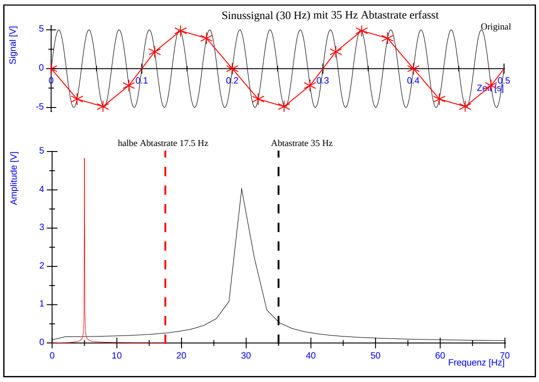
Der erste Schritt sollte die Bestimmung der nötigen Genauigkeit sein. Daraus ergibt sich, wie genau der AD-Wandler messen muss und welche Messverstärkung erforderlich ist.

Anschließend kann mittels Testmessung bekannter Größen festgestellt werden, ob die gewünschte Genauigkeit tatsächlich erreicht wird.

## Der Aliasing-Effekt

Ein großes Problem bei der Erfassung von Schwingungssignalen ist der Aliasing-Effekt. Hierbei handelt es sich um Fehlmessungen durch zu geringe Abtastraten bei der Digitalisierung. Der Aliasing-Effekt tritt immer auf, wenn eine Schwingung mit einer Frequenz, die größer ist als die halbe Abtastrate, im Signal enthalten ist.

Im folgenden Beispiel wird die bereits häufiger gezeigte Schwingung von 30 Hz mit einer Abtastrate von 35 Hz gemessen. Die rote Linie im oberen Achsensystem zeigt die Schwingung, die durch eine zu niedrige Abtastung vorgetäuscht wird. Die Frequenz der Schwingung ist offensichtlich falsch.




Die FFT beider Messungen zeigen, dass die tatsächlich vorhandene Frequenz durch die falsch gewählte Abtastrate verschoben wird. Bei einer Abtastrate von 35 Hz können nur Frequenzen bis 17,5 Hz richtig dargestellt werden. Alle Signalfrequenzen oberhalb dieser Grenze verschwinden nicht einfach, sondern tauchen irgendwo im Bereich zwischen 0 und 17,5 Hz wieder auf. Dabei gibt es eine einfache Regel: *Höhere Frequenzen werden an der Bereichsgrenze gespiegelt.*

Die Signalfrequenz (30 Hz) liegt 12,5 Hz oberhalb der Grenze von 17,5 Hz und erscheint deshalb 12,5 Hz unterhalb der Grenze bei 5 Hz. Wenn die Signalfrequenz genau bei der Abtastrate liegt, erscheinen die Messwerte wie bei einer Konstanten (0 Hz) und noch höhere Frequenzen (35 Hz bis 52,5 Hz) steigen wieder bis 17,5 Hz an. Diese Faltung lässt sich beliebig lange fortsetzen. Wenn der Signalaufnehmer (z.B. ein Mikrofon) dazu in der Lage ist, könnte im Signal eine Schwingung von 3502 Hz enthalten sein, die dann bei 2 Hz wieder auftaucht.

Nach der Digitalisierung ist es unmöglich, echte Frequenzen von durch den Aliasing-Effekt erzeugten Frequenzen zu unterscheiden. Deshalb muss vor der Digitalisierung sicher gestellt werden, dass im analogen Signal keine Frequenzen oberhalb der halben Abtastrate enthalten sind.

Wenn eine FFT kurz vor der halben Abtastrate noch größere Amplituden ermittelt, sollte man sich darüber im Klaren sein, dass kurz oberhalb dieser Frequenz ebenfalls Signale vorhanden sein dürften. Genauer gesagt, es ist nicht feststellbar, ob die beobachteten Amplituden richtig oder falsch sind. Auch bei noch so guten analogen Filtern sollte man das oberste Viertel der FFT immer mit großer Vorsicht betrachten.

Es gibt mehrere verschiedene Möglichkeiten, Aliasingeffekte zu vermeiden. Digitale Filter gehören zunächst nicht dazu, weil sie erst nach der Digitalisierung greifen. Da ist ein Aliasing-Effekt aber bereits im Signal enthalten.

Besonders beliebt als Störfrequenz ist die Netzfrequenz von 50 Hz (Netzbrummen), die häufig auf unterschiedlichen Wegen in das Signal gelangt. Bei niedrigen Abtastraten (fast immer Bruchteile von 50) bedeutet das, dass ein zufälliger Offset oder eine ganz niedrige Schwebung im Signal gemessen wird. Bei einer Abtastrate von 100 Hz bekommt man den Effekt, dass pro 50 Hz Schwingung genau 2 Werte gemessen werden. Die können, je nach Start der Messung, zufällig genau im Nulldurchgang liegen und nicht weiter stören oder entgegengesetzt auf den Schwingungsbäuchen liegen, was einen verrauschten Eindruck ergibt. Wenn man mit 100 Hz misst und bei verschiedenen Starts der Messung sehr unterschiedlich starkes Rauschen beobachtet, sollte man das mit einer höheren Abtastrate überprüfen. Das Netzbrummen taucht dann z.B. nach einer FFT genau bei 50 Hz als Spitze auf.

## Tiefpassfilter

Um höhere Frequenzen bereits im Analogsignal zu eliminieren, verwendet man häufig Tiefpassfilter, die deshalb auch als Antialiasingfilter bezeichnet werden. Dabei werden alle Frequenzanteile oberhalb einer Grenze mehr oder weniger gut herausgefiltert. Diese an sich beste Methode kann aber Probleme machen, wenn man ständig sehr unterschiedliche Messaufgaben mit verschiedenen Frequenzbereichen lösen muss.

Freiprogrammierbare Tiefpassfilter sind relativ teuer und nicht immer verfügbar. Häufig muss man auf eine Reihe von festen Filtern mit den dazu passenden Abtastraten zurückgreifen.

Eine ebenfalls häufig anzutreffende Variante sind Signalaufnehmer, die über Messverstärker mit bereits eingebauten Tiefpassfiltern verfügen. Auf dem Gerät oder im dazugehörenden Handbuch ist normalerweise der Frequenzbereich, mit dem man zu rechnen hat, angegeben. Oft kann zwischen verschiedenen Frequenzbereichen gewählt werden. Wenn ein Schwingungsaufnehmer z.B. einen Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 kHz hat, bedeutet das zwar, dass man höhere Frequenzen nicht messen kann. Andererseits muss man bei einer Abtastfrequenz von 2 kHz oder höher nicht mehr mit Aliasingeffekten rechnen.

Viele Signale können auch gar nicht beliebig schnell schwingen. Hier kann eine hinreichend große Abtastrate sicherstellen, dass keine Aliasingeffekte auftreten.

Es lohnt sich auf jeden Fall, die Frequenzbereiche von Aufnehmern und Filtern genau zu beachten.

**Achtung**: Einen Fehler sollte man unbedingt vermeiden. Wenn der Aufnehmer Frequenzen bis 1000 Hz liefert ist es falsch mit 1000 Hz Abtastrate zu messen. Die Rate muss bei mindestens 2500 Hz liegen.

## Überabtastung

Die heutigen Messgeräte, AD-Wandler und Rechner bieten oft so viel Kapazität, dass man sich nicht allzu viele Gedanken über optimale Abtastraten, und genaue Tiefpassfilter machen muss. Wenn man z.B. eine Schwingung im Bereich von 1 Hz messen will, der Aufnehmer aber einen Frequenzbereich von bis zu 100 Hz hat, kann man durchaus mit 250 Hz abtasten. Aliasing-Effekte sind im Signal nun nicht enthalten, man hat aber zunächst sehr viele Daten.

Eine Reduktion der Daten kann nun zum gewünschten Ergebnis führen. Hierzu kann auch ein digitaler Filter eingesetzt werden. Es kann auch einfach eine FFT über alle Daten durchgeführt werden, um aus dem Frequenzbereich von 0-100 Hz den gewünschten Bereich herauszuschneiden.

## Ermittlung der benötigten Abtastrate

Die notwendige Abtastrate muss, wie bereits erwähnt, mindestens 2,5-mal der höchsten wichtigen Frequenz entsprechen. Die höchste wichtige Frequenz kann, wie wir jetzt gesehen haben, die zu untersuchende Schwingung sein oder aber eine Störfrequenz, die im Signal enthalten ist. Gegebenenfalls sollte man testen, ob ein Problem mit 50 Hz-Störungen (Netzbrummen) vorliegt.

## Ermittlung spezieller Abtastraten

Ein großer Teil aller Messungen wird mit ganzzahligen Abtastraten (100, 200, 500, 1000,... ) durchgeführt. Da die Anzahl der Werte für eine FFT immer eine Potenz von 2 sein muss, ergeben sich 'krumme' Messdauern. Die Frequenzen der FFT liegen dann allerdings auch bei 'krummen' Werten, weil der Frequenzabstand mit 1 dividiert durch Messdauer berechnet wird.

Für viele Auswertungen wäre es besser, ganzzahlige Frequenzen aus der FFT ermitteln zu können. Die Peaksuche in DIAdem, die Frequenzen bei den größten Amplituden finden kann, liefert dann z.B. 0,5 Hz und nicht 0,46875 Hz. Um das zu erreichen, verwenden Sie Potenzen von 2 als Abtastrate. Bei einer Abtastrate von 512 Hz und einer Messdauer von genau einer Sekunde erhält man z.B. nach der FFT Frequenzen von 0 bis 255 in Schritten von genau einem Hertz.

Die Ermittlung spezieller Abtastraten beginnt nun mit der gewünschten Frequenzauflösung. Mit Eins durch Frequenzauflösung erhält man die benötigte Messdauer. Diese Messdauer muss nun durch die Abtastungen (Potenz von 2) dividiert werden. Daraus ergibt sich die Abtastrate, die natürlich mindestens der benötigten Abtastrate entsprechen muss.

### Beispiel:

Gefordert ist ein FFT-Ergebnis mit einer Auflösung von 0,1 Hz und einer maximalen Signalfrequenz von 250 Hz. Aus der Signalfrequenz ergibt sich eine benötigte Abtastrate von mindestens 625 Hz (2,5-mal Signalfrequenz).

Die Messdauer wird mit 1/0,1 berechnet, muss also genau 10 Sekunden betragen.

Da 10 Sekunden lang mit mindestens 625 Hz gemessen werden soll, muss nun die richtige Abtastrate ausgewählt werden. Bei 4096 Messwerten erhält man mit 4096/10 eine Abtastrate von 409,6 Hz. Da das noch nicht schnell genug ist, muss man in den 10 Sekunden 8192 Werte erfassen, was einer Abtastrate von 819,2 Hz entspricht.

Leider kann man solche Abtastraten nicht auf jeder beliebigen Hardware ganz genau einstellen.

## Mehrere Kanäle gleichzeitig

Bei der Messung mehrerer Kanäle stellt sich häufig die Frage, ob die Werte der verschiedenen Kanäle wirklich gleichzeitig erfasst werden.

Je nach verwendeter Hardware gibt es dabei erhebliche Unterschiede.

### Einfacher Multiplexer

Viele normale Multifunktionskarten verfügen über einen A/D-Wandler, der immer nur einen Kanal gleichzeitig wandeln kann. Ein Multiplexer beaufschlägt den A/D-Wandler nacheinander mit den Spannungen der gewünschten Kanäle, die nacheinander wiederholt gewandelt werden.

Wenn man z.B. 4 Kanäle mit je 1000 Hz messen möchte, arbeitet der A/D-Wandler mit der Summenabtastrate von 4000 Hz. Die Abtastung der Kanäle erfolgt jeweils mit einem Zwischenraum von 0,25 Millisekunden. Der vierte Kanal wird also mit einer Verspätung von 0,75 Millisekunden erfasst.

Bei Frequenzuntersuchungen, wie z.B. Übertragungsfunktionen, führt eine solche Verspätung zu Fehlern in der Phasenberechnung.

### Scan- und Samplefrequenz

Einige Multifunktionskarten bieten unterschiedliche Timer für die Scan- und die Samplefrequenz. Der Scan, also die Liste der gewünschten Kanäle, wird mit der eingestellten Abtastrate erfasst. Innerhalb des Scans wechselt der Multiplexer aber mit maximaler Rate von Kanal zu Kanal. Der zeitliche Abstand zwischen den Kanälen wird damit minimiert.

Eine Karte mit maximaler Abtastrate von 100 KHz würde damit im Beispiel einen Abstand von 0,01 Millisekunden von Kanal zu Kanal ermöglichen. Die Werte sind dann zwar immer noch nicht genau gleichzeitig erfasst, aber fast.

Für hohe Abtastraten in der Nähe der maximalen Rate der Karte hilft dieses Verfahren leider nicht weiter.

### Sample&Hold

Wenn man alle Kanäle exakt gleichzeitig (simultan) messen muss, setzt man häufig Karten mit Sample&Hold Schaltung ein.

Hierbei verfügt jeder Kanal über einen speziellen Messverstärker, der vor dem Multiplexer eingebaut ist. Diese Messverstärker erhalten vor der Erfassung eines Scans gleichzeitig ein Signal, das sie in den Track-Mode schaltet. In diesem Modus wird die aktuell anliegende Spannung „eingefroren". Anschließend werden die Verstärker in den Hold-Modus geschaltet und nacheinander über den Multiplexer abgetastet.

Mit Sample&Hold werden die Kanäle nun zwar nacheinander gewandelt, die Spannung entspricht aber der Spannung, die zu Beginn des Scans im Track-Modus festgehalten wurde.

A/D-Wandlerkarten mit Sample&Hold-Schaltung ermöglichen damit Simultanmessungen von mehreren Kanälen ohne Phasenverschiebung. Da diese Schaltung relativ aufwendig ist, sind solche Karten teurer.

### Mehrere A/D-Wandler

Um Kanäle gleichzeitig zu messen, können Sie auch Messkarten und Messgeräte mit mehreren A/D-Wandlern verwenden.

Bei Messgeräten mit einem A/D-Wandler pro Kanal erhält man immer gleichzeitig erfasste Kanäle.

Es gibt auch Messgeräte mit zwei oder vier A/D-Wandlern, die immerhin jeweils einige Kanäle gleichzeitig erfassen. In der Praxis reicht das oft aus.

## Vergleich mit Ergebnissen von FFT-Analysatoren

Um sicherzustellen, dass bei der Erfassung korrekte und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden, kann man unterschiedliche Erfassungssysteme miteinander vergleichen. Typischerweise wird man dabei kein zufälliges Signal verwenden, sondern z.B. einen Sinusgenerator, der beliebig oft ein exakt wiederholbares Signal liefert. Der Vergleich der Ergebnisse von einer PC-gestützten Messwerterfassung wie DIAdem und einem FFT-Analysator liefert auch unter diesen Bedingungen manchmal sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Die Gründe für Abweichungen zwischen den verschiedenen Systemen sind dabei weniger in der unterschiedlichen Qualität von A/D-Wandlern oder der Analogtechnik, sondern in einigen der bisher erwähnten Details zu suchen. Gerade bei sauberen Sinussignalen von Signalgeneratoren kommt es nicht auf hochgenaue A/D-Wandler und Filter an. Vielmehr ist es entscheidend, dass bei beiden Systemen die Abtastrate und die Messdauer genau übereinstimmen. Außerdem müssen die Fensterfunktion und gegebenenfalls die verwendete Korrektur übereinstimmen.

Bei vielen FFT-Analysatoren ist die genaue interne Arbeitsweise nicht auf den ersten Blick erkennbar. Um die Ergebnisse exakt reproduzieren zu können, muss man deshalb in der Dokumentation nachschauen oder die Anzeigen genau studieren.

Häufig wird man bei FFT-Analysatoren auf ganzzahlige Frequenzen stoßen, die wie bereits gezeigt, nur durch 'krumme' Abtastraten erreicht werden. Auch liefern Analysatoren oft eine geradzahlige Anzahl Frequenzen (z.B. 400 statt 512 Linien). Das wird nicht durch einen anderen FFT-Algorithmus erreicht, sondern die oberen 112 ebenfalls berechneten Frequenzen werden einfach nicht angezeigt. Das ist durchaus sinnvoll, da die Genauigkeit in diesem Bereich ohnehin geringer ist. Es kann sogar vorkommen, dass FFT-Analysatoren nur die untere Hälfte der berechneten Frequenzen anzeigen, sie arbeiten also intern mit einer doppelten Abtastrate. Das hat den Vorteil, dass ein großer Spielraum für analoge Tiefpassfilter entsteht.

Mehrkanalanalysatoren erfassen die Eingänge typischerweise simultan, ohne Phasenverschiebung.

Im Vergleich zur normalen PC-Messtechnik verfügen FFT-Analysatoren normalerweise über programmierbare analoge Tiefpassfilter, die Aliasing-Effekte automatisch ohne Eingriff des Bedieners verhindern. Wenn man statt sauberen Sinussignalen reale zufällig verteilte Schwingungssignale vergleicht, muss man beim Einsatz von PC-Messtechnik normalerweise selbst auf die Vermeidung der Aliasing-Effekte achten.

## Externe Takte bei drehzahlabhängigen Schwingungen

Die FFT liefert, wie bereits gezeigt, nur genaue Ergebnisse, wenn man ein Zeitsignal über einen längeren Zeitraum beobachtet. Das Signal muss in diesem Zeitraum möglichst gleichbleibend vorliegen. Bei drehzahlabhängigen Schwingungen muss man z.B. eine größere Anzahl von Umdrehungen beobachten, wenn man die Frequenzen und Amplituden, die eine Unwucht verursachen, genau analysieren möchte.

Hier kann man zu erheblich besseren Resultaten kommen, wenn man die Daten nicht über der Zeit, sondern über den Drehwinkel erfasst. Wenn auf einer Welle z.B. ein Drehgeber montiert ist, der 32 Impulse pro Umdrehung liefert, so kann man eine Erfassung mit externem Takt durchführen. Nun werden unabhängig von der Drehzahl immer genau 32 Werte pro Umdrehung erfasst. Alle drehzahlabhängigen Schwingungen sind dadurch in den Eingangsdaten für die FFT ganzzahlig enthalten (z.B. 16-mal in 512 Werten). Wie weiter ober gezeigt, werden Schwingungen, die ganzzahlig im Signal enthalten sind, durch die FFT scharf abgebildet. Durch den externen Takt mit einer Impulszahl, die eine Potenz von 2 sein muss, kann man drehzahlabhängige Schwingungen exakt analysieren, selbst wenn sich die Drehzahl ändert.

Da sich die Abtastrate nun mit der Drehzahl ändert, liefert die FFT als Ergebnis keine Amplituden über der Zeit sondern Amplituden über der Ordnung. Dabei liegen Schwingungen, die der Drehzahl entsprechen, bei der ersten Ordnung, Schwingungen, die dem Doppeltem der Drehzahl entsprechen, bei der zweiten Ordnung usw.

Bei Maschinen treten häufig Schwingungen auf, die genau der Drehzahl oder einem Vielfachen der Drehzahl entsprechen. Besonders stark werden diese Schwingungen, wenn diese mit Resonanzfrequenzen der Maschine zusammentreffen.

## Ermittlung der Parameter für externe Takte

Der Zusammenhang zwischen Umdrehungen, Auflösungen und den damit erreichbaren Ordnungsbereichen gilt analog zu den bereits beschriebenen Zusammenhängen mit zeitabhängigen Daten.

Der Ordnungsbereich erstreckt sich immer von 0 bis zur halben Anzahl von Messwerten pro Umdrehung.

Die Auflösung des Ordnungskanals entspricht immer 1/Anzahl der ausgewerteten Umdrehungen.

### Beispiel:

Bei einer Messung mit 64 Messwerten pro Umdrehung und 1024 Messwerten erhält man Ergebnisse bis zur 16.-Ordnung, die in Schritten von 0,03125 Ordnungen aufgeteilt sind. Wenn noch höhere Ordnungen ausgewertet werden sollen, müssen mehr Messwerte pro Umdrehung gemessen werden. Die Anzahl der gemessenen Umdrehungen ist ausschlaggebend für die Auflösung der Ordnungen.

Die 1.-Ordnung liegt bei vielen Maschinen und Motoren im Bereich um 3000 U/min, was 50 Hz entspricht. Da viele Resonanz-, Vibrations- oder Lärmprobleme deutlich höhere Frequenzen haben, sind oft hohe Ordnungen von Bedeutung.

Ein eigenes Thema ist in diesem Zusammenhang die Ordnungsanalyse. Dabei handelt es sich um die Untersuchung drehzahlabhängiger Schwingungen bei unterschiedlichen Drehzahlen. Ziel ist die nach Ordnungen aufgeschlüsselte Analyse der Schwingungen von Maschinen in verschiedenen Zuständen wie Hochfahren, Herunterfahren, unterschiedliche Betriebszustände.

# Spezialthema: Schallmessung

**Bei Schallmessungen geht es neben der Ermittlung der Lautstärke fast immer auch um die Frequenzen, die im Schallsignal enthalten sind. Normalerweise ist bei Schallsignalen der vom Menschen hörbare Bereich interessant. Bei Schallmessungen treten einige Besonderheiten auf, die verglichen mit anderen typischen Messgrößen ungewöhnliche Probleme bereiten.**

⇨ Der wahrnehmbare Frequenzbereich liegt bei Schall zwischen 16 und 20.000 Hz.

⇨ Der wahrnehmbare Lautstärkebereich (Schalldruck) liegt zwischen $10^{-4}$ und $10^{2}$ Pascal (N/m$^2$)

⇨ Bei der Bewertung von Lärmquellen ist eine reproduzierbare hohe absolute Genauigkeit gefordert.

Die gewaltigen Messbereiche erfordern bei der Schallmessung besondere Maßnahmen, die bei vielen anderen physikalischen Größen so extrem nicht nötig sind. Der Frequenzbereich erfordert hohe Abtastraten und große Datenmengen, um eine ausreichende Auflösung in den unteren Frequenzbereichen zu erhalten. Der Messbereich mit dem Faktor $10^6$ zwischen extrem laut und gerade noch hörbar ist von normalen A/D-Wandlern nicht zu bewältigen. Man benötigt deshalb spezielle Messverstärker, die das Mikrofonsignal so verstärken, dass es von normalen A/D-Wandlern sinnvoll aufgelöst werden kann.

Die hohe Genauigkeit bei der Messung von Schwingungsamplituden ist ebenfalls ungewöhnlich. Normalerweise sind bei Schwingungen nur die relativen Unterschiede der Amplituden zwischen verschiedenen Schwingungssignalen und verschiedenen Frequenzen wichtig. Bei Schallmessungen sind aber oft geringe Änderungen der Lautstärke von entscheidender Bedeutung, wenn es beispielsweise um Lärmschutzmaßnahmen geht.

Anspruchsvolle Messaufgaben erfordern anspruchsvolle Messtechnik. Im Bereich der Schallmessung gibt es seit langem Hersteller, die sich auf die Entwicklung von hochgenauer Schallmesstechnik spezialisiert haben.

⇨ Mikrofone mit linearen Frequenzgängen bei verschiedenen Lautstärken und genau definiertem Aufnahmewinkel

⇨ Messverstärker mit riesigen Messbereichen (z.B. Verstärkung 8 x 10 dB)

⇨ Messverstärker mit den für die Lärmbewertung wichtigen Bewertungsfiltern (z.B. A-Bewertung)

⇨ Messverstärker mit direkter Ermittlung des Lärmpegels in dB oder dB(A)

⇨ Tonbandgeräte mit hoher Abspielgenauigkeit (Gleichlauf und Lautstärke)

⇨ Kalibriergeräte um die Messkette zu überprüfen

Nur mit qualitativ hochwertiger Messtechnik lassen sich exakte Schallmessungen durchführen. Mit normalen Mikrofonen aus dem Audio-Bereich und Soundkarten im Rechner sind genaue quantitative Aussagen bei Schallmessungen nicht möglich. Das weiter oben als Beispiel genutzte Schallsignal wurde mit einer Soundkarte erfasst und kann nur für qualitative Bewertung der Frequenzen, aber nicht für genaue Aussagen zur Lautstärke genutzt werden.

## Schallsignale

Schallsignale werden normalerweise mit einem Mikrofon als Schalldruck in Pascal (N/m$^2$) gemessen. Das Schallsignal ist dabei eine Schwingung, die dem normalen Luftdruck überlagert ist. Die Angabe des Schalldrucks zu einem bestimmten Zeitpunkt ist deshalb relativ sinnlos. Interessant sind die Frequenz und die Amplitude der Schwingungen.

Eine relativ einfache Aussage zum Schallsignal ist auch ohne FFT möglich. Mit der Berechnung des Effektivwerts (RMS) des Schalldrucks erhält man eine erste Kenngröße zur Lautstärke eines Signals.

Der Effektivwert wird ermittelt, indem zunächst alle einzelnen Schalldrücke quadriert werden. Aus dem Mittelwert aller Quadrate (Summe dividiert durch die Anzahl) zieht man dann die Quadratwurzel. Die Abkürzung RMS steht für Root-Mean-Square (Wurzel aus dem Mittelwert der Quadrate). Bei einer reinen Sinusschwingung ist der RMS-Wert immer gleich der Amplitude der Schwingung dividiert durch Quadratwurzel aus 2.

Da Schalldrücke je nach Situation in völlig unterschiedlichen Größenordnungen auftreten, ist die Angabe des Schalldrucks in $N/m^2$ sehr unpraktisch. Deshalb wird zur Angabe des Schalldrucks eine logarithmische Skala verwendet. Um zu handhabbaren Größen zu gelangen, wird der Schalldruck auf eine Basisgröße bezogen. Bei Luftschall ist diese Basisgröße ein Schalldruck von $2*10^{-5}$ $N/m^2$, was einem gerade noch hörbaren Schallsignal entspricht. Die Berechnung lautet dann:

$$L = 20 * \log \frac{Schalldruck}{Basisgröße}$$

mit *L*=Schalldruckpegel

Dieser nun Schalldruckpegel genannte Wert wird in der Einheit dB (Dezibel) angegeben.

Schallsignale mit gleichem Schalldruck aber unterschiedlichen Frequenzen werden vom menschlichen Ohr unterschiedlich laut wahrgenommen. Ein Sinus-Ton mit 200 Hz wird z.B. nicht so laut empfunden, wie ein Sinus-Ton mit 2000 Hz mit dem gleichen Schallpegel. Es gibt verschiedene Verfahren, um RMS-Werte an das Hörempfinden anzupassen. Die gebräuchlichste Methode ist die A-Bewertung. Für die unterschiedlichen Frequenzen gibt es Korrekturwerte in dB, die zu den jeweiligen gemessenen RMS-Werten in dB addiert bzw. subtrahiert werden. Vom Sinus bei 200 Hz werden z.B. 10,9 dB abgezogen und zum Sinus bei 2000 Hz werden 1,2 dB hinzuaddiert. Die A-bewerteten Schalldruckpegel werden dann in dB(A) angegeben.

Bei 1000 Hz ist der Korrekturwert genau 0. Bei Kalibriermessungen wird deshalb normalerweise ein Signal mit 1000 Hz und einem Schalldruck (RMS) von 1 $N/m^2$ verwendet. Der Schalldruck entspricht dann 93,9794 dB oder dB(A).

Zur A-Bewertung kann das Signal über eine Kombination von Hoch- und Tiefpassfiltern gefiltert werden. Solche analogen Filter sind oft bereits in den Messverstärkern eingebaut. Es ist aber auch möglich, digitale Filter nach der Erfassung der Daten einzusetzen.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, das Signal mit der FFT in einzelne Frequenzen zu zerlegen. Für die Frequenzen gibt es Ausgleichsfunktionen mit den jeweiligen Korrekturwerten. Die Umrechnung erfolgt oft auch nach Terz- oder Oktav-Analysen, weil die Tabellen für Terzen und Oktaven zur Bewertung genormt sind.