Schwingungsmessung

Eine lebendige Einführung mit dem Mess-System VibroMatrix

IDS Innomic Gesellschaft für Computer- und Messtechnik mbH

VibroMatrix Trainingshandbuch

Version 1.0.62 12.06.2009
Autor Dipl.-Ing. Thomas Olschewski
IDS Innomic Gesellschaft für Computer- und Messtechnik mbH
Zum Buchhorst 25
D-29410 Salzwedel

Inhalt

1. Einleitung

Wenn das Geschirr im Schrank klappert, weil tonnenschwere LKWs auf der Straße vorbei donnern, oder wenn es im eigenen Auto dröhnt, weil die Radlager verschlissen sind, dann werden Schwingungen als störend empfunden. Wenn der Schlagbohrer aber in den Beton eindringt wie in Butter, freut sich wiederum der Heimwerker über den geringen Kraftaufwand.

Das Schwingungsverhalten von Maschinen und Anlagen soll also für unterschiedliche Ziele optimiert werden. Schwingungsmessung erleichtert maßgeblich die Gestaltung des Schwingungsverhaltens. Mit Instrumenten des Messsystems VibroMatrix kann der Istzustand sofort angezeigt, der Erfolg von konstruktiven oder verfahrenstechnischen Maßnahmen gleich kontrolliert werden.

Zur Charakterisierung von Schwingungen werden unterschiedliche Messgrößen und Kennwerte verwendet. Dieses Dokument zeigt Ihnen die gebräuchlichsten Größen. Damit es nicht langweilig wird, kombinieren wir die Erläuterungen mit Livemessungen auf Ihrem Computerbildschirm.

Als Messprogramm setzen wir die Trainingsversion von VibroMatrix ein. Diese ist auf www.vibromatrix.de kostenfrei herunterlad- und einsetzbar.

1.1. VibroMatrix installieren

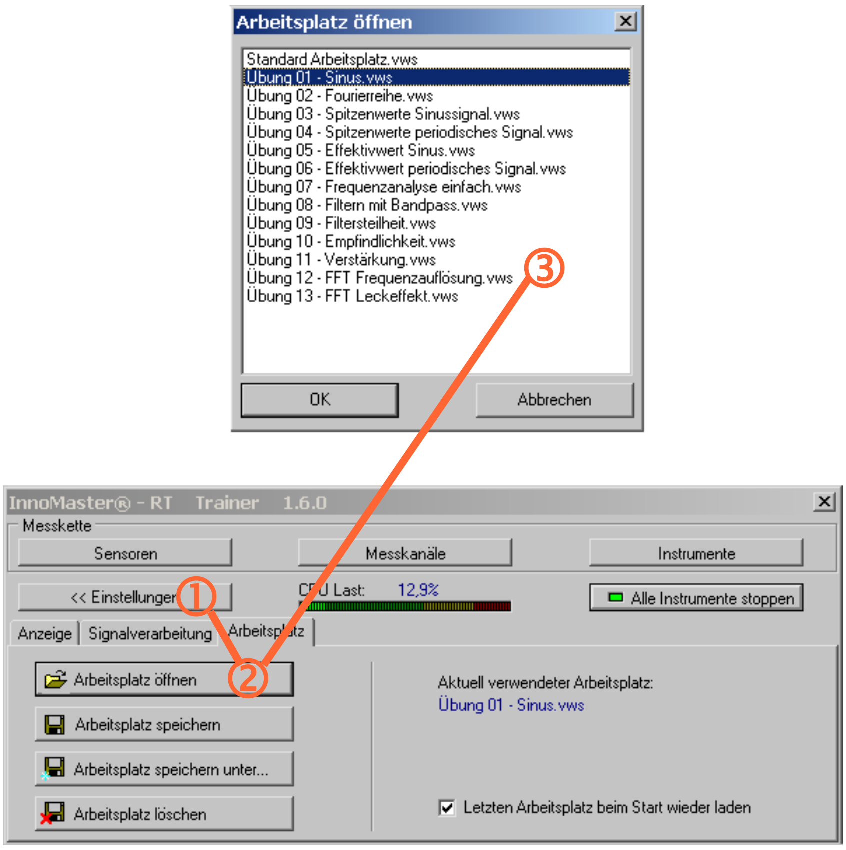
Auf der Webseite www.vibromatrix.de finden Sie prominent einen Link auf das VibroMatrix-Installationsprogramm. Die VibroMatrix_Setup.exe ist derzeit nur etwa 5 MB groß, enthält dennoch das komplette Mess-System mit allen Modulen.

Die Software steht Ihnen ohne weitere Bürokratie zur Verfügung. Weder brauchen Sie sich zu registrieren oder die Software über das Internet zu aktivieren. Einfach nur installieren und loslegen.

Starten Sie also die VibroMatrix_Setup.exe und folgen Sie den Anweisungen auf dem Bildschirm. Je nach Konfiguration Ihres Rechners können Administratorrechte für die Installation notwendig sein. Die Installation dauert nur wenige Augenblicke, dann sind die 5 MB auf Ihrem Rechner verteilt.

1.2. VibroMatrix benutzen

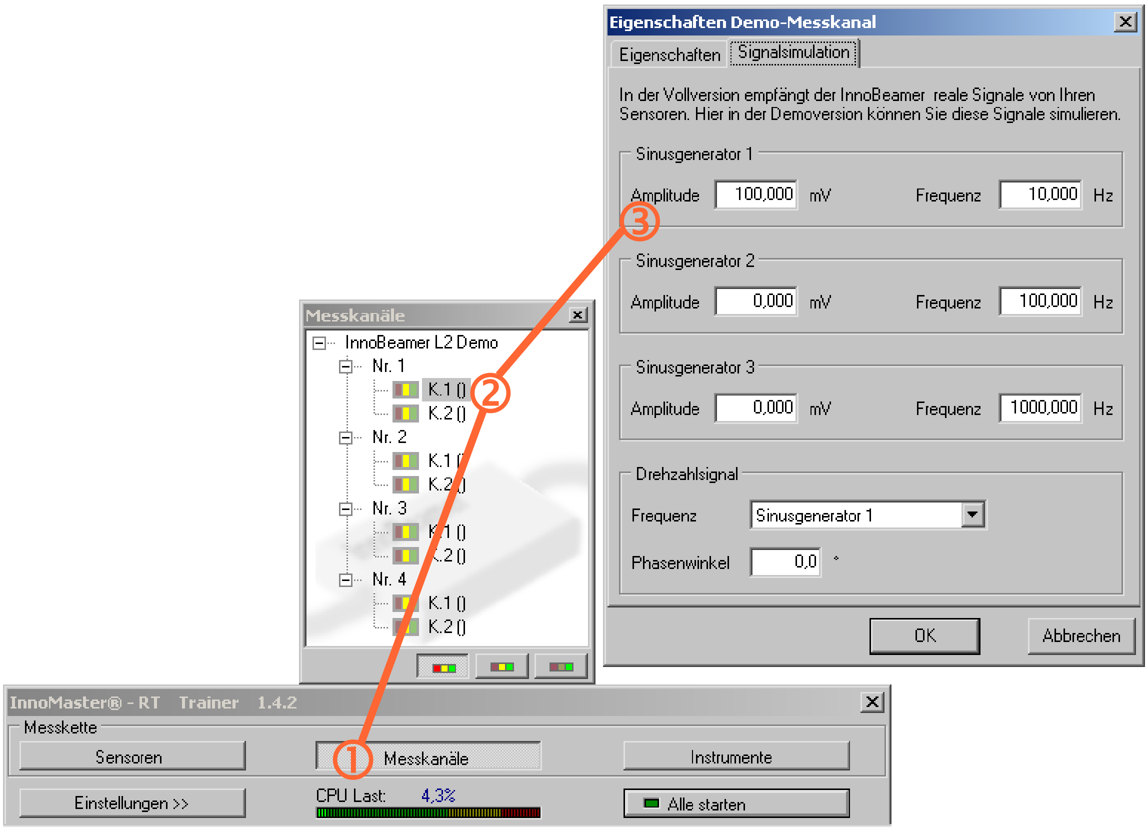
Nach der Installation finden Sie VibroMatrix im Startmenü unter Programme. Das zentrale Programm heißt InnoMaster RT Trainer. In VibroMatrix können die unterschiedlichsten Software-Instrumente zeitgleich betrieben werden. Die Anordnungen und Konfigurationen der Instrumente werden in Arbeitsplätzen gespeichert. Zu den Übungen finden Sie in diesem Dokument den jeweiligen Arbeitsplatz genannt. Hier haben wir für Sie die Instrumente passend zum Thema arrangiert und konfiguriert.



Wie kommen Sie an die Arbeitsplätze? Sie laden diese im InnoMaster mit Einstellungen – Arbeitsplätze – Arbeitsplatz öffnen.

Signalsimulation

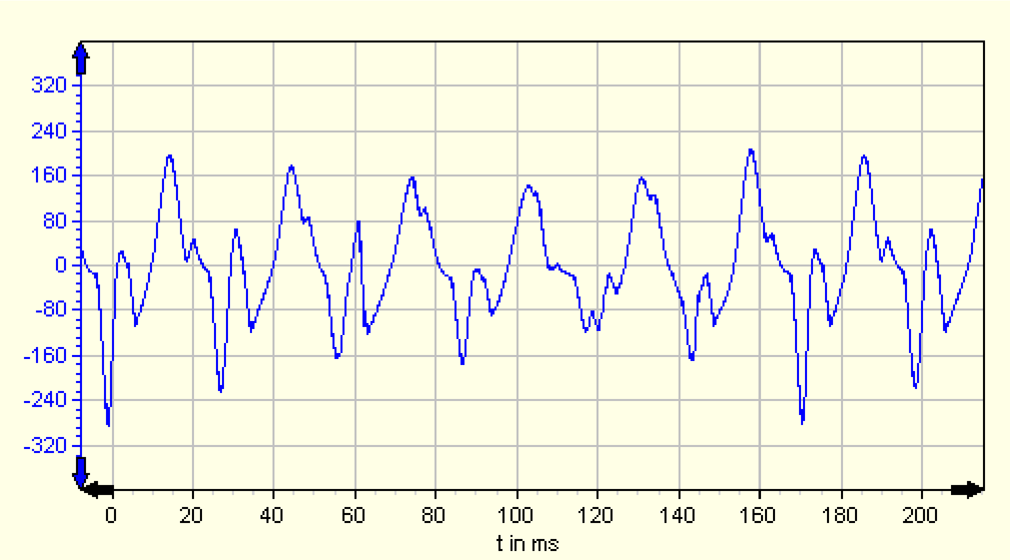
Die in die Instrumente eingespeisten Signale werden auch aus dem InnoMaster RT Trainer heraus generiert. Sie können diese Signale selbst beeinflussen und sofort die Auswirkung in den Instrumenten sehen. In der aufgeklappten Liste mit den Messkanälen doppelklicken Sie einen Messkanal. Nun erscheint ein Fenster, in dem 3 Signalgeneratoren eingestellt werden können. Einer ist bereits mit Standardwerten aktiv. In den Übungen nennen wir Ihnen Werte für die Signalgeneratoren, damit bestimmte Effekte in Erscheinung treten.



2. Grundlagen Sinusfunktion

2.1. Grundbaustein Sinusfunktion

Wenn man das von einem Schwingungssensor abgegebene Signal sichtbar macht, dann meint man im ersten Augenblick nichts Signifikantes sehen zu können. Schauen wir uns das folgende Signal an. Es wurde mit dem InnoScope gewonnen.



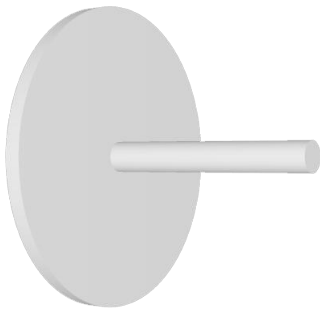
Zunächst sieht man: Es treten Beschleunigungen von mehr als ±200 m/s² auf. Es scheint auch eine Art Regelmäßigkeit zu geben, mit der bestimmte Muster immer wiederkehren. Wo kommt das her? Und wie lässt sich das beschreiben?

Glücklicherweise lässt sich alles auf einen einzigen Baustein zurückführen – die Sinusfunktion. Eine Sinusfunktion lässt sich mit wenigen Kennwerten beschreiben. Mit Kenntnissen darüber kommt man schon sehr weit in der Schwingungsmessung. Daher wollen wir uns diesen Sinus näher betrachten.

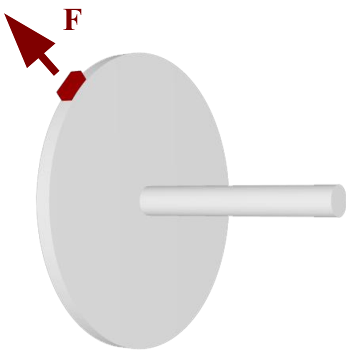
2.2. Sinusförmige Vibration durch Unwucht

Schauen wir uns die Sinusfunktion an einem technischen Beispiel an. Wenn Sie sich einen Satz neuer Winterreifen auf die Felgen Ihres Fahrzeuges aufziehen lassen, dann ist für ordentliche Laufruhe ein Auswuchten des Rades angebracht. Was passiert da eigentlich?

Wenn ein Körper um eine Achse rotiert, dann wirkt auf jedes Masseteilchen des Körpers eine Fliehkraft. Wenn die Masse symmetrisch um die Rotationsachse verteilt ist, dann findet jedes Masseteilchen auf einer Seite der Rotationsachse ein gleichgroßes Masseteilchen auf der anderen Seite. Die Fliehkräfte dieser gegenüberliegenden Masseteilchen wirken entgegengesetzt und kompensieren sich. Das ist der ideal ausgewuchtete Zustand.



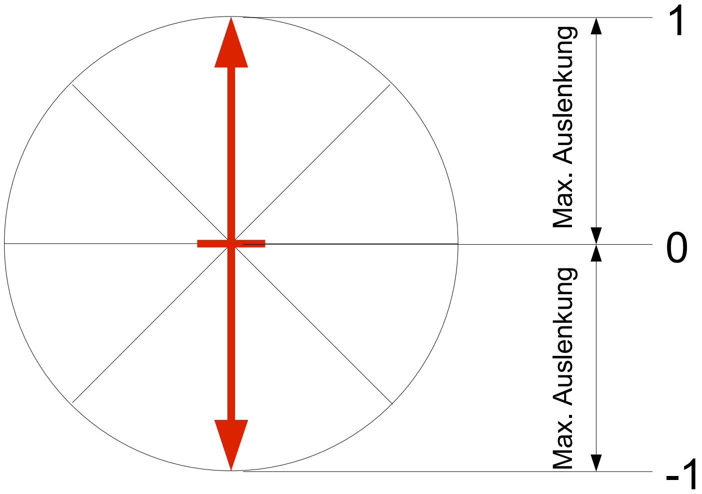
Finden jedoch einige Masseteilchen keine Entsprechung auf der gegenüberliegenden Seite, wird sich eine resultierende Fliehkraft ergeben.



Diese Fliehkraft rotiert mit dem rollenden Reifen und wird periodisch Ihr Fahrzeug anheben und absenken, so dass Sie auf dem Fahrersitz eine Vibration spüren werden.

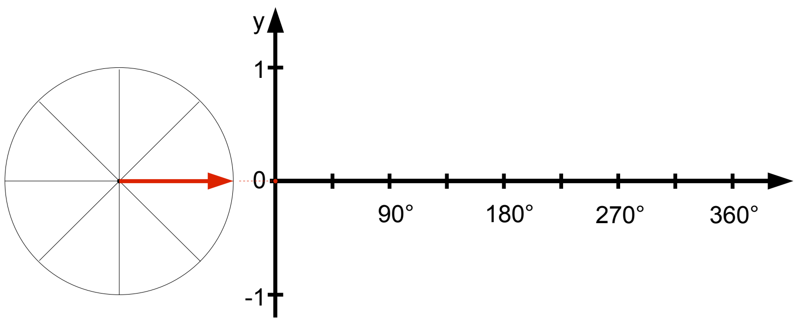
Wie hoch diese Kraft und damit das Maß der Vibration ist, hängt von der Geschwindigkeit ab. Je schneller Sie fahren, um so stärker treten unwuchtbedingte Schwingungen auf.

Schauen wir uns den Verlauf der Kraft und damit der Fahrzeugbewegung in vertikaler Richtung für 8 Positionen einer Umdrehung genau an. Während dieser Umdrehung soll die Geschwindigkeit gleich hoch, die Fliehkraft also gleich groß sein.

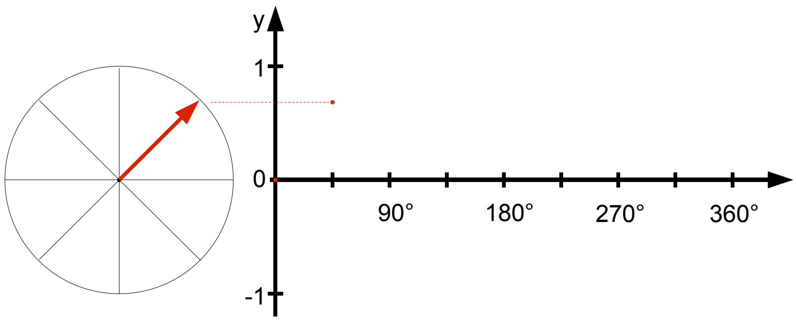


Damit wir unsere Erkenntnisse weiter verallgemeinern können, messen wir die Bewegung nicht in Millimetern sondern relativ zur höchsten Auslenkung. Zwischen den beiden höchsten Auslenkungen setzen wir die Nulllinie fest. Unten ist -1 und oben ist +1.

Wir nehmen weiterhin an, dass die Fliehkraft sofort eine Bewegungsänderung in die gleiche Richtung erzeugt, in die auch die Fliehkraft zeigt.

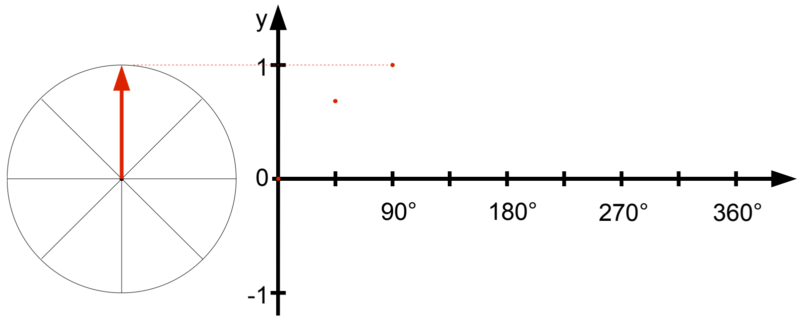


Im ersten Bild befinden wir uns noch auf der Nulllinie. Hier soll auch unser Startwinkel Null sein und wir zeichnen in unsere Grafik ein: Bei Winkel 0° haben wir eine vertikale Kraftwirkung und damit vertikale Bewegung von 0. Die Kraft wirkt nur in horizontaler Richtung.

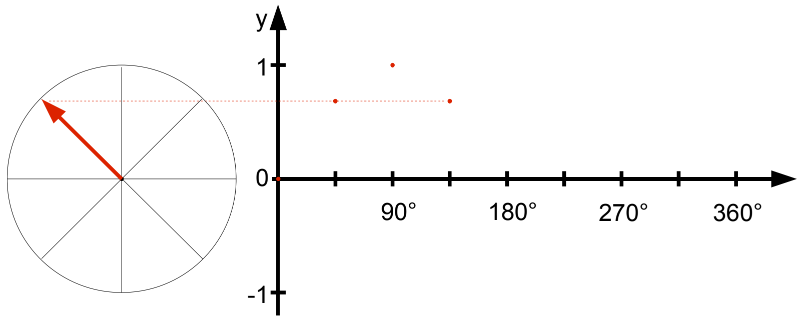


An der nächsten Position, beim Winkel von 45°, nehmen wir wieder Maß. Nun haben wir schon den 2. Punkt. Mal sehen wie es weiter geht.

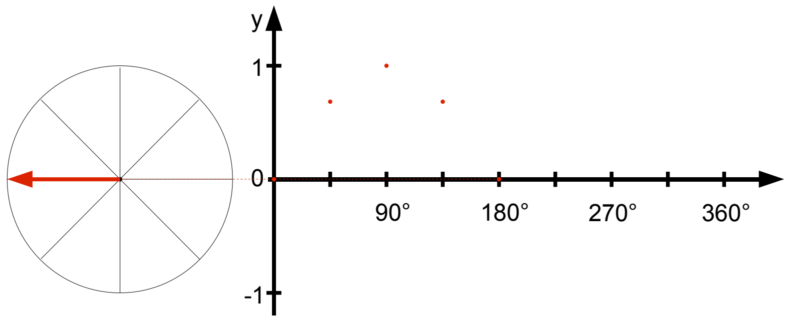
Wir haben uns nun insgesamt 90° weitergedreht. Die Bewegung erfolgt mit voller Kraft in vertikaler Richtung. Unser Sitz wurde nun auf den höchsten Punkt angehoben.



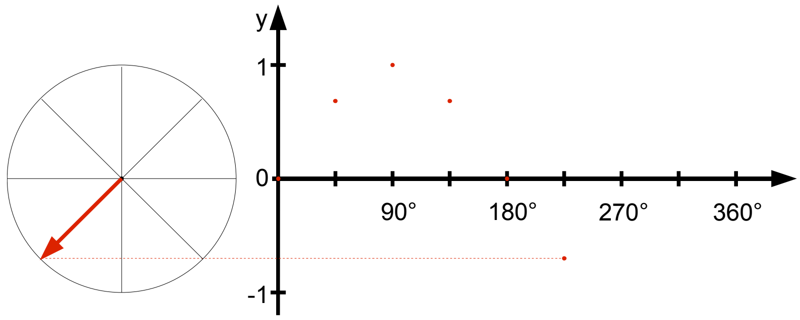
Es geht wieder abwärts. Wir zeichnen unseren Punkt ein.



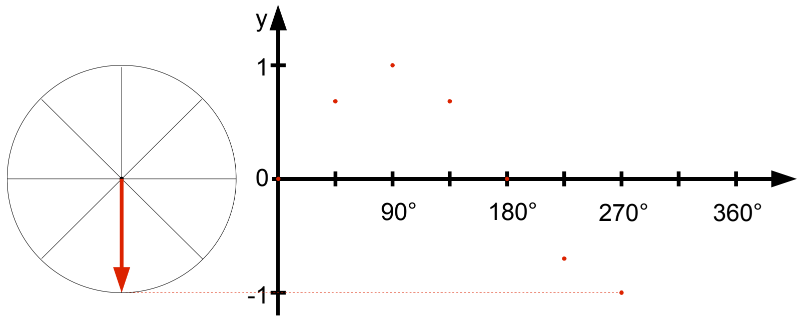
Bei 180° befinden wir uns wieder auf der gleichen Höhe, wie am Startpunkt. Die Kraftwirkung und damit auch die Bewegung in vertikaler Richtung ist wieder Null.



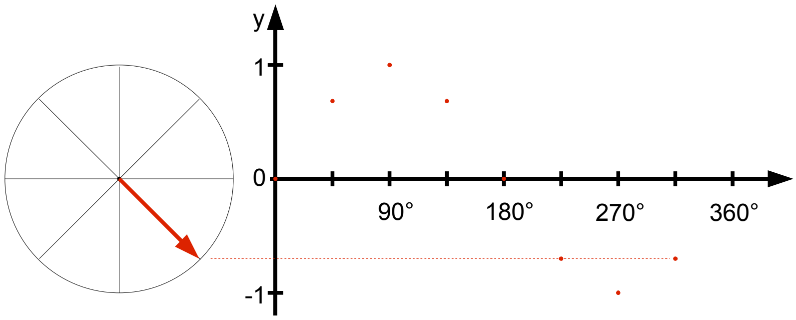
Es geht weiter abwärts, wir zeichnen unseren Punkt ein.



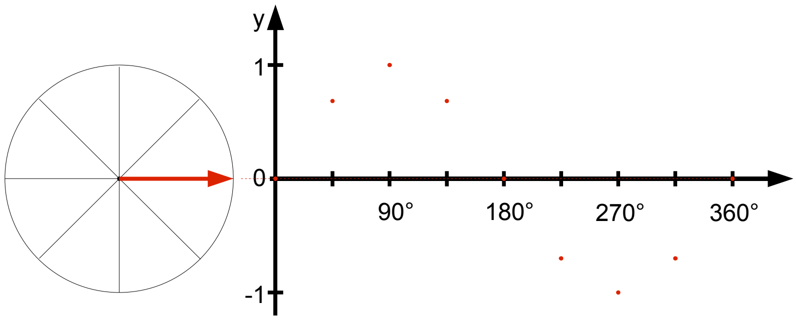
Nun sind wir am tiefsten Punkt angelangt. Die Fliehkraft zieht nun unseren Sitz mit voller Kraft nach unten.



Die Fliehkraft läuft weiter um.



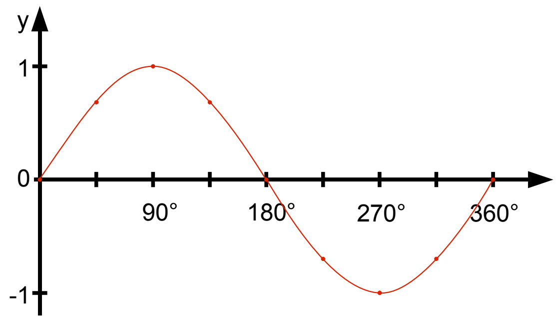
Und schließlich haben wir unseren Ausgangspunkt wieder erreicht. Eine Umdrehung ist geschafft. Verbinden wir die Punkte und schauen uns den Verlauf an.



Das, was wir als vertikale Bewegung über die verschiedenen Winkel einer vollen Umdrehung erhalten haben, ist die Sinusfunktion.

Wenn wir in gleicher Geschwindigkeit weiterdrehen würden, würde sich einfach alles wiederholen. Daher ordnet man die Sinusfunktion auch den periodischen Funktionen zu.

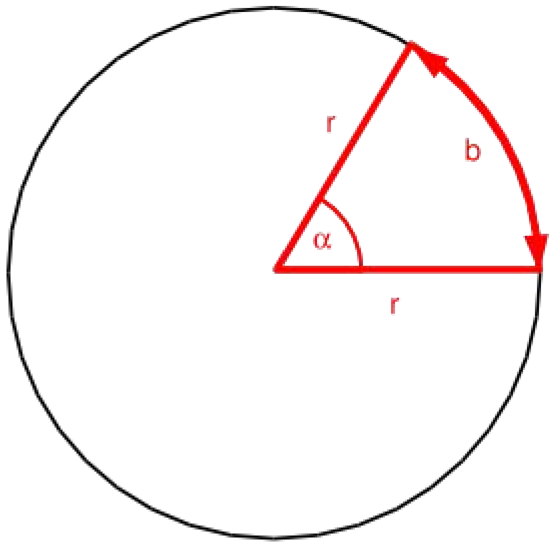
Die Funktion wechselt zwischen einem positivem und einem negativem Maximum. In der Technik nennt man derartige Signale Wechselsignale.



Sinus heißt im Lateinischen übrigens Bogen. Ein passender Name – wenn man sich die Sinusfunktion ansieht.

Ach ja, das Auswuchten. Nun, man kann durch Schwingungsmessung feststellen, wo fehlende Masse hinzuzufügen ist, damit alle Masseteilchen wieder rotationssymmetrisch verteilt sind. Das sehen Sie dann an den kleinen Ausgleichsmassen an Ihrer Felge.

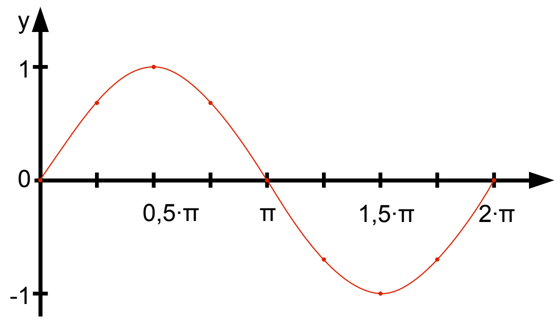
2.3. Gradmaß und Bogenmaß



Für unsere Fahrt mit ungewuchteten Rädern haben wir für die Winkelangaben das Gradmaß verwendet. Diese sind sehr anschaulich. Ein Viertelkreis sind 90°, ein Halbkreis 180° und ein Vollkreis 360°.

Für viele Berechnungen ist jedoch das Bogenmaß günstiger zu verwenden, auch wenn es nicht so anschaulich ist. Das Bogenmaß ist dafür einheitenlos. Es beschreibt in einem Kreis von 1 m Radius den Winkel, den 1 m Bogenlänge erreichen würde.

Ist der Radius r = 1 m und auch die Bogenlänge b = 1 m, dann ist der Winkel α etwa 57° groß. Viel interessanter ist aber das Bogenmaß, wenn der Winkel genau 180°, also einem Halbkreis entspricht. In diesem Fall beträgt b = 3,141 ..., nämlich Pi. Pi ist eine Zahl, die noch niemand auf die letzte Kommastelle genau bestimmt hat. Man kürzt sie einfach mit dem passenden griechischen Buchstaben π ab.

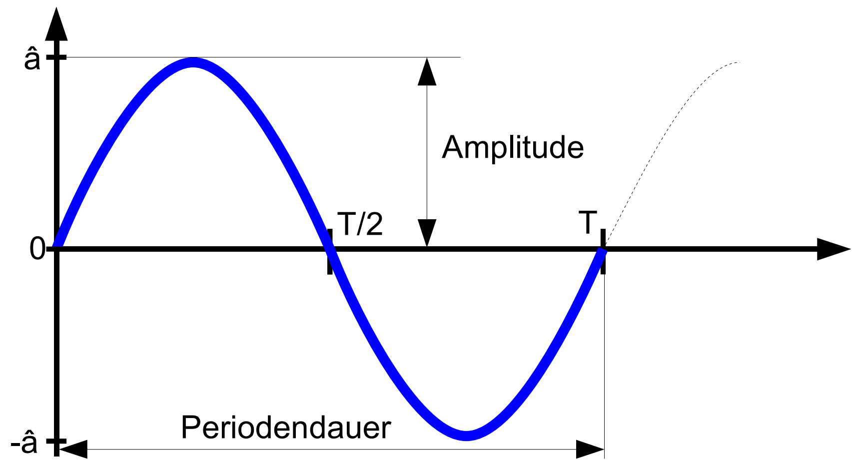


180° entspricht 1·π, 360° sind demzufolge 2·π. Und so könnten wir die Sinusfunktion auch so zeichnen.

2.4. Sinusfunktion in der Schwingungsmessung

In der Technik verwenden wir einige Parameter um unterschiedliche Sinussignale zu charakterisieren. Im vorherigen Beispiel hatten wir die gemessene Bewegung einfach auf ihre höchste Auslenkung bezogen. Tatsächlich wird man jedoch auch gern Angaben als absolute Werte haben wollen. In unserem Beispiel würde dann eine doppelt so hohe Unwucht auch doppelt so hohe Auslenkungen erreichen. Mathematisch würde das bedeuten, die Sinusfunktion mit einem Faktor zu versehen. Den Faktor könnten wir â nennen.

Aus $y = \sin(x)$ wird dann $y = \hat{a} \cdot \sin(x)$



In diesem Fall pendelt die Sinusfunktion nicht mehr zwischen +1 und -1, sondern zwischen +â und -â. Die maximale Auslenkung â wird als Amplitude bezeichnet.

Der nächste Aspekt betrifft die Argumente auf der x-Achse. Natürlich hätten wir statt der Winkel auch die Zeit messen können, die wir für die eine Umdrehung benötigt haben. Dann hätten wir die vertikalen Auslenkungen nicht für bestimmte Winkel eingetragen, sondern für die seit Start der Umdrehung vergangene Zeit. Wie wir wissen, entspricht eine Umdrehung einer Periode in der Sinusfunktion. Die dafür verbrauchte Zeit nennen wir Periodendauer T.

So ein Autorad kann sich schneller oder langsamer drehen. Zählt man die Umdrehungen des Rades, also die Perioden der Sinusfunktion für eine bestimmte Zeitdauer, erhält man die Frequenz f.

Als Bezugsdauer für die Periodenzählung wird oft 1 Sekunde gewählt. Dreht sich das Rad also in 1 Sekunde fünfmal herum, haben wir eine Frequenz von 5 Hz. Hz steht für Hertz und ist nichts weiter als eine Abkürzung für 1/Sekunde, also 1/s. Die Einheit Hz sagt allgemein aus, wie oft ein sich wiederholender Vorgang pro Sekunde stattfindet. Im Falle der Sinusfunktion ist dieser Vorgang die eine Periode. 5 Hz heißt also, dass innerhalb 1 Sekunde 5 Perioden einer Sinuskurve aufgetreten sind.

Und wie lang war dann eine Periode? Nun, wenn innerhalb 1 Sekunde, etwas 5x stattgefunden hat, dann ist die Dauer 1/5 Sekunde.

Die Periodendauer ist der Kehrwert der Frequenz:

$T = 1/f$

Und die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer:

$f = 1/T$

Wenn sich unser Rad einmal im Kreis gedreht hat, ist die Dauer einer Periode um. Die zurückgelegten 360° können wir im Bogenmaß auch als 2·π ansehen. Die Winkelgeschwindigkeit (Drehwinkel pro Zeiteinheit) beträgt dann

$$\frac{2\cdot\pi}{T}$$

oder als Winkelfrequenz ausgedrückt:

$2\cdot\pi\cdot f.$

Der Wert 2·π·f ist statt unter Winkelfrequenz mehr als Kreisfrequenz bekannt und wird mit dem griechischen Buchstaben Omega ω versehen. Die Kreisfrequenz ω ist ein mathematisches Konstrukt und wird gern in Formeln zur Abkürzung verwendet. Ihre Verbreitung entspringt einfach dem Wunsch, das 2·π·f kürzer schreiben zu können. Die

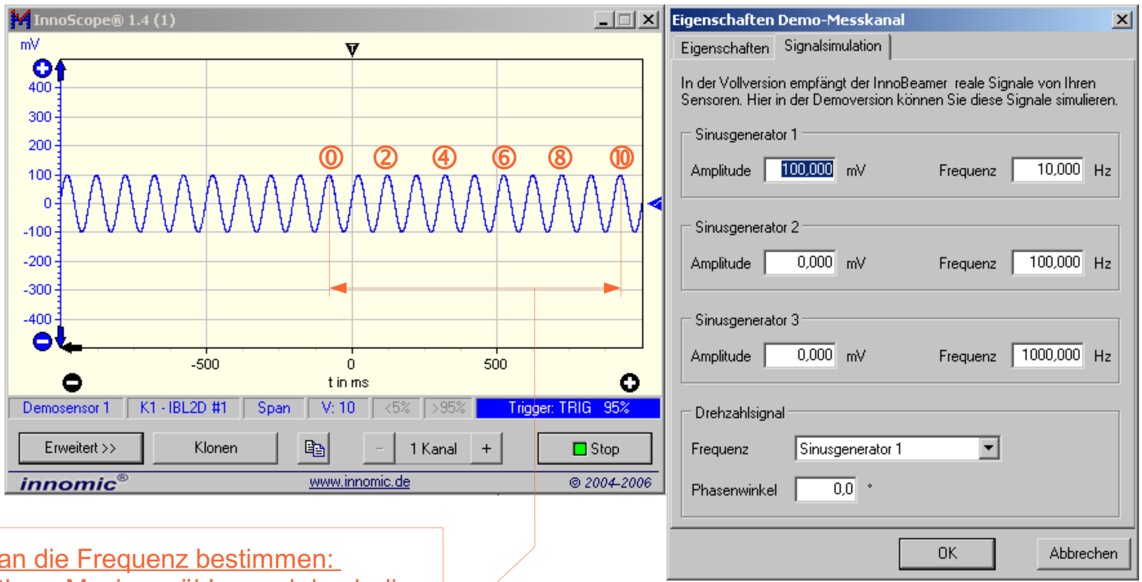
Kreisfrequenz wird uns noch begegnen, wenn wir Schwingbeschleunigung, -geschwindigkeit und -weg ineinander umrechnen.

Jetzt schauen wir uns das live an.

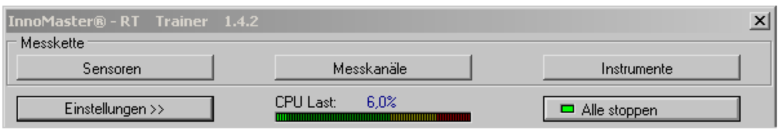
2.5. Übung 1: Amplitude und Frequenz eines Sinussignals

Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 1. Es startet das InnoScope mit einem Sinussignal. Stören Sie sich nicht an der Messgröße Spannung. Wir simulieren zunächst einfache Spannungssignale in Millivolt. Den Bezug zu mechanischen Größen schaffen wir später.

Öffnen Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal (S.3). Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.



So kann man die Frequenz bestimmen:
Einige sichtbare Maxima zählen und durch die Zeitdauer teilen.



Zu Beginn steht die Amplitude des Sinusgenerators 1 auf 100 mV und die Frequenz auf 10 Hz. Im InnoScope sehen Sie, wie das Signal auch exakt die 100 mV Linie erreicht. Um den Triggerzeitpunkt 0 ms sehen Sie sowohl 1000 ms davor als auch danach. D.h. vor 0 ms ist ein Zeitabschnitt von 1 Sekunde dargestellt und danach auch. Zählen Sie die Maxima des Signals von 0 bis zum rechten Rand, werden Sie 10 Stück finden. Das entspricht 10 Hz, gerade dem im Sinusgenerator 1 eingestellten Wert.

Verändern Sie in der Signalsimulation die Amplitude des Testsignals, testen Sie z.B. auch 200, 300 und 400 mV. Sie sehen, wie das InnoScope nach einer kurzen Einschwingzeit die neuen Werte korrekt darstellen. Ebenfalls können Sie die Frequenz variieren. Ob 5 Hz oder 20 Hz, beim Zählen der Maxima werden Sie wieder eine glatte Übereinstimmung finden.

2.6. Sinusfunktion als Grundbaustein periodischer Signale

Neben dem Sinussignal gibt es in der Technik eine Reihe anderer periodischer Signale: Dreieck, Rechteck, Sägezahn usw. sind weitere Signalformen. Interessanterweise lassen sich alle periodischen Signale auf eine Reihe von Sinussignalen zurückführen. Das Sinussignal ist die sozusagen die Mutter aller periodischen Signale.

Das mathematische Verfahren zur Bestimmung der passenden Sinusfunktionen nennt sich Fourierreihenentwicklung und wurde vom französischen Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier hergeleitet.

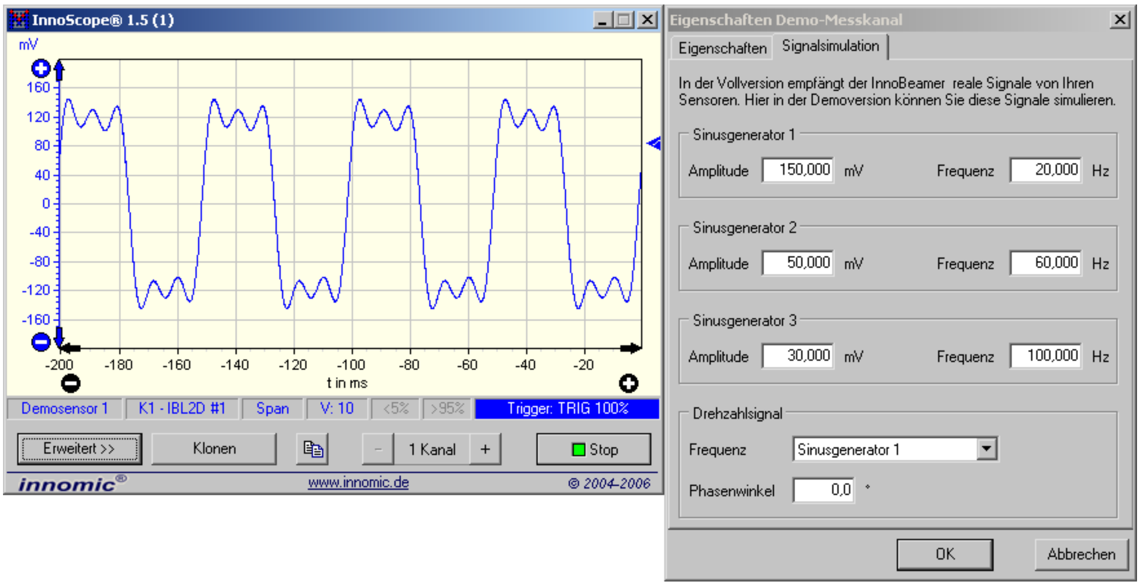
Und so sieht die Reihe für ein Rechtecksignal aus.

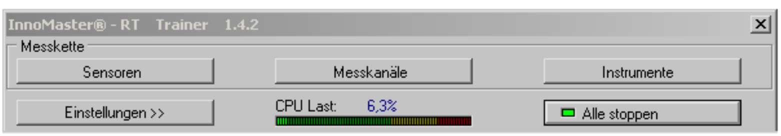
$$y = \sin(x) + \frac{1}{3}\sin(3x) + \frac{1}{5}\sin(5x) + \ldots$$

Das testen wir gleich aus.

2.7. Übung 2: Rechtecksignal annähern mit Sinussignalen

Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 2. Es startet das InnoScope mit einem Sinussignal. Wenn Sie die Signalsimulation für den ersten Kanal öffnen, sieht ihr Bildschirm etwa so aus.





Wir haben einfach die die ersten 3 Glieder der o.g. Fourierreihe eingegeben. Zur Grundschwingung von 150 mV bei 20 Hz geben wir im zweiten Glied ein Signal mit 1/3 Amplitude bei 3facher Frequenz. Dann ergänzen wir noch das Glied mit 1/5 Amplitude bei 5facher Frequenz. Bei jedem zusätzlichen Glied nähert sich das Sinussignal weiter einem Rechtecksignal an. Für ein perfektes Rechtecksignal wären allerdings unendlich viele Glieder notwendig.

Egal, wie ein periodisches Signal aussieht, es ist nichts als eine Reihe von Sinussignalen.

3. Grundlagen zu Schwingungskennwerten

Bei der Einführung der Sinusfunktion mittels unwuchtigem Autorad (S.4) haben wir den Verlauf für eine Umdrehung zwar in allen Einzelheiten erkundet. In der Technik werden derartige Beschreibungen jedoch höchstens für interessante Einzelereignisse vorgenommen. Ansonsten sind die Signale viel zu unregelmäßig und die Datenfülle ist immens. Bei 10 kHz wechselt das Signal 10 000 x in der Sekunde hin und her. Um den Verlauf von nur einer Sekunde darzustellen, könnte man einen Roman schreiben.

Da greift man in der Technik doch lieber zu kurzen griffigen Beschreibungen, welche die wichtigsten Eigenschaften charakterisieren - die Kennwerte.

Zahlreiche Normen zur Schwingungsmessung verwenden derartige Kennwerte. Zum Beispiel wird verbreitet die DIN ISO 10816 verwendet, um Schwingungen an rotierenden Maschinen zu messen und zu bewerten. Hier finden sich folgende Kennwerte:

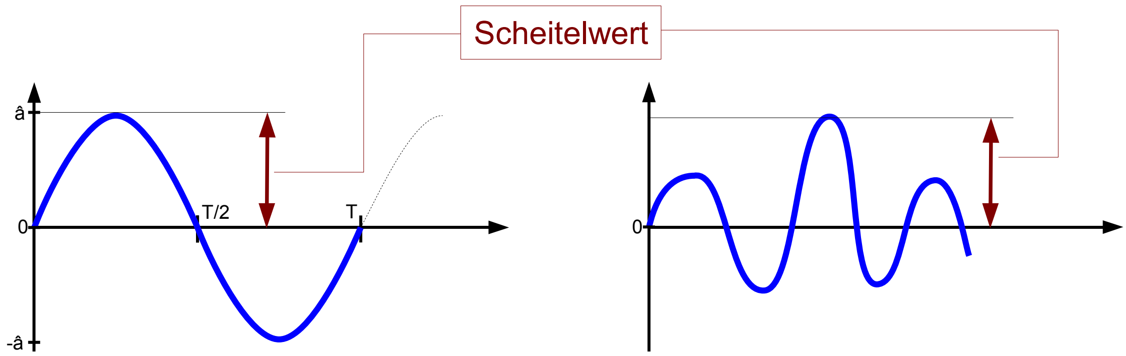
- Scheitelwert 0-p, auch genannt Betragsmaximalwert
- Schwingungsbreite p-p, auch genannt Spitze-Spitze-Wert
- Effektivwert

3.1. Scheitelwert, Betragsmaximalwert

In der Technik geht es zunächst oft um Maximalwerte. Wird die maximale Belastung meines Bauteils erreicht oder nicht? Werden maximale Auslenkungen des Schwingweges erreicht, so dass ein vibrierendes Teil irgendwo anschlägt?

Diese Auskunft gibt der Scheitelwert 0-p. Warum 0-p? 0 steht für die Nulllinie und p steht für peak (engl. Spitze). Der Scheitelwert bezeichnet also den Abstand von der Nulllinie bis zur maximalen Auslenkung des Signals von der Nulllinie.

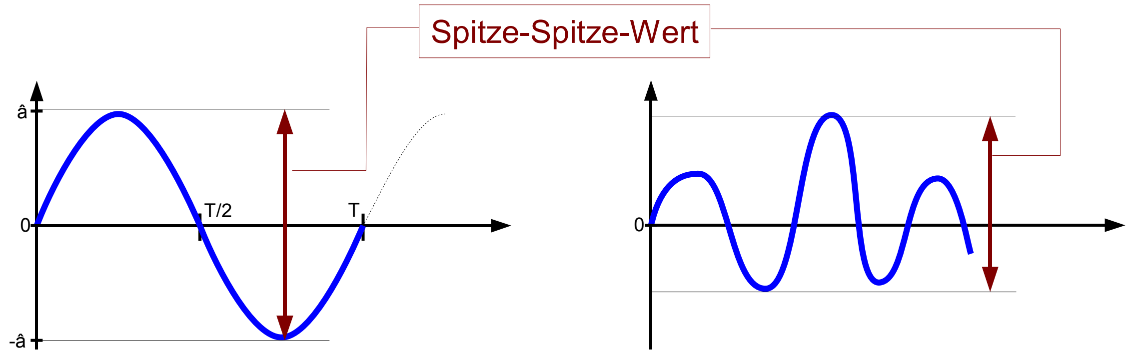
Bei einem reinen Sinussignal ist das einfach. Der Scheitelwert entspricht der Amplitude (S.8). Im englischsprachigen Raum wird von peak value gesprochen. Beim Sinussignal ist der Spitzenwert in positiver Richtung betragsmäßig gleich groß zu dem in negativer Richtung.



Sinussignal *Allgemeines Schwingungssignal*

3.2. Schwingungsbreite, Spitze-Spitze-Wert

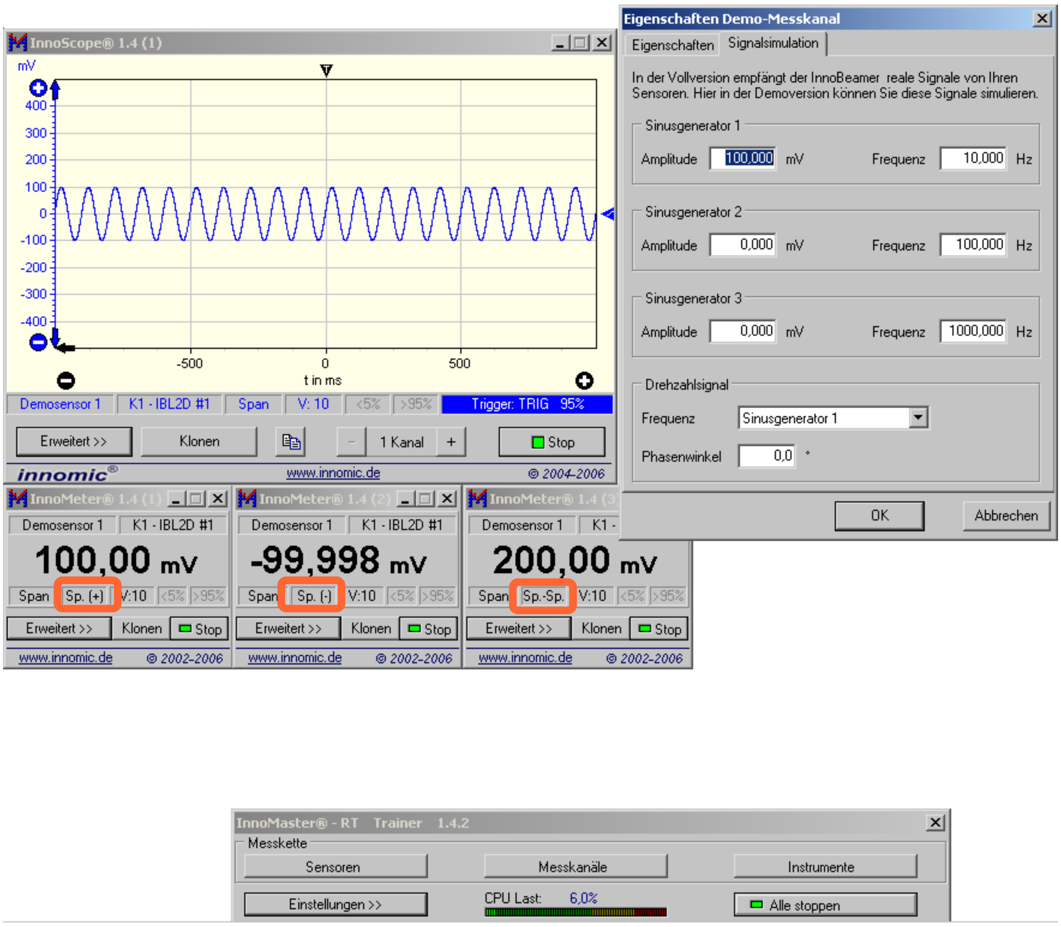
Ebenfalls ein interessanter Wert ist die Schwingungsbreite p-p. Wofür steht p-p? Für peak to peak, also Spitze zu Spitze. Der Spitze-Spitze-Wert kennzeichnet den Abstand vom Spitzenwert in positiver Richtung zum Spitzenwert in negativer Richtung. Bei einem reinen Sinussignal ist der Spitze-Spitze-Wert immer doppelt so groß wie der Scheitelwert.



Sinussignal *Allgemeines Schwingungssignal*

3.3. Übung 3: Spitzenwerte beim Sinussignal

Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 3. Es startet das InnoScope mit einem Sinussignal sowie 3 InnoMeter, welche Ihnen die Kennwerte anzeigen. Öffnen Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal, wir wollen ein wenig experimentieren. Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.



Links oben arbeitet das InnoScope, welches den Signalverlauf im Zeitbereich darstellt. Darunter sind 3 InnoMeter angeordnet, welche in VibroMatrix Schwingungskennwerte als numerischen Wert darstellen. Der aktuell eingestellte Kennwert wird in der Statusleiste der InnoMeter dargestellt.

Wir sehen den 0-p Wert[1] in positiver und in negativer Richtung. Zusammengefasst ergibt sich für den p-p Wert das Doppelte.

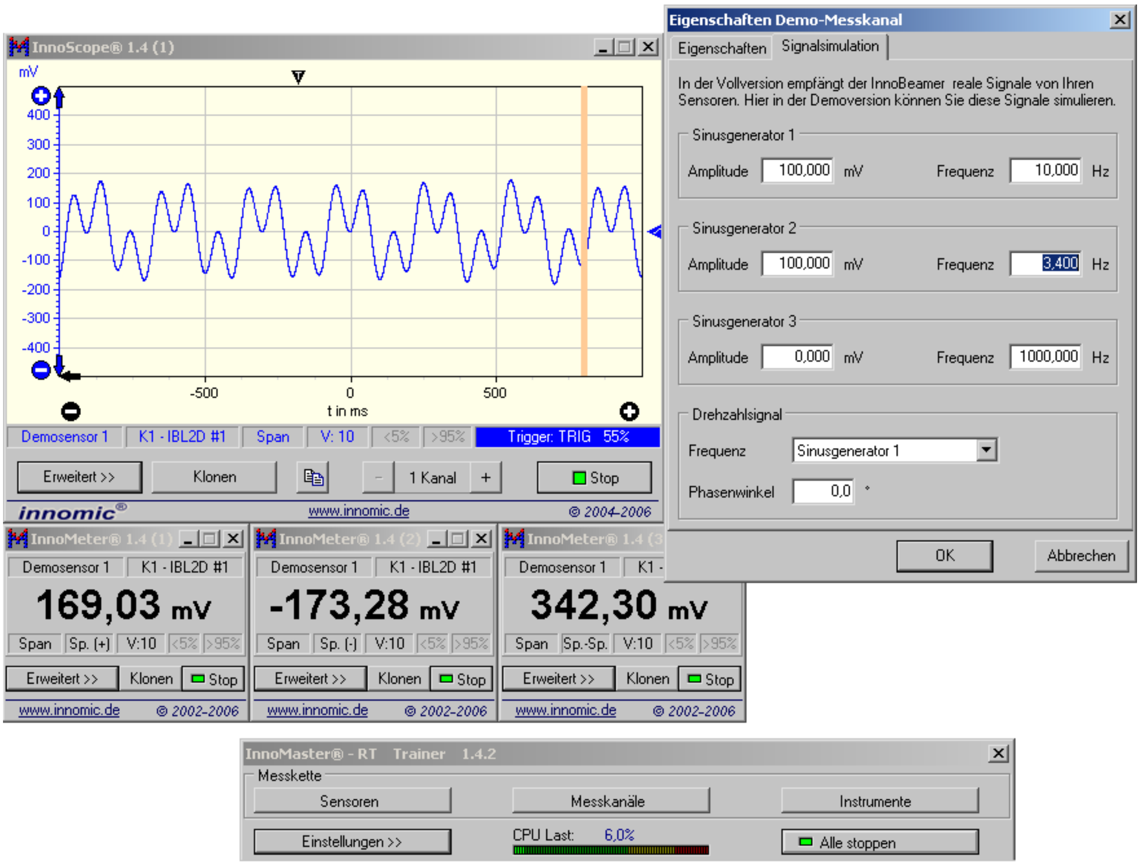
Verändern Sie in der Signalsimulation die Amplitude des Testsignals. Zu Beginn steht die Amplitude des Sinusgenerators 1 auf 100 mV, testen Sie z.B. auch 200, 300 und 400 mV. Sie sehen, wie alle Instrumente nach einer kurzen Einschwingzeit die neuen Werte korrekt darstellen.

Das Einschwingen ist durch den abrupten Wechsel von einem Schwingungssignal zum anderen bedingt und ein üblicher technischer Vorgang bei Schaltvorgängen.

3.4. Übung 4: Spitzenwerte bei anderen periodischen Signalen

In seltenen Fällen sehen Schwingungssignale so schön sinusförmig aus, wie in der vorangegangenen Übung. Oft tritt ein Gemisch von Schwingungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude auf. Das werden wir mit zwei unserer Sinusgeneratoren simulieren.

Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 4. Wir bekommen wieder die Instrumente aus dem vorherigen Versuch angezeigt. Wenn Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal öffnen, sieht Ihr Bildschirm etwa so aus.



1 Ein InnoMeter zeigt -99,998 statt -100 an. Warum ist das so? Wir haben in den Simulator einige Beschränkungen realer Messtechnik mit eingebaut. Diese sorgen für geringfügige Abweichungen zur Theorie, wie man sie in der Praxis auch erleben wird.

Die Kennwerte in den InnoMetern schwanken nun ab und zu und im InnoScope sehen Sie, wie das Signal mal die 200 mV Grenze erreicht, dann aber auch wieder darunter fällt. Das Signalgemisch wechselt also nach einigen Sekunden seinen Spitzenwert.

Zeitfenster

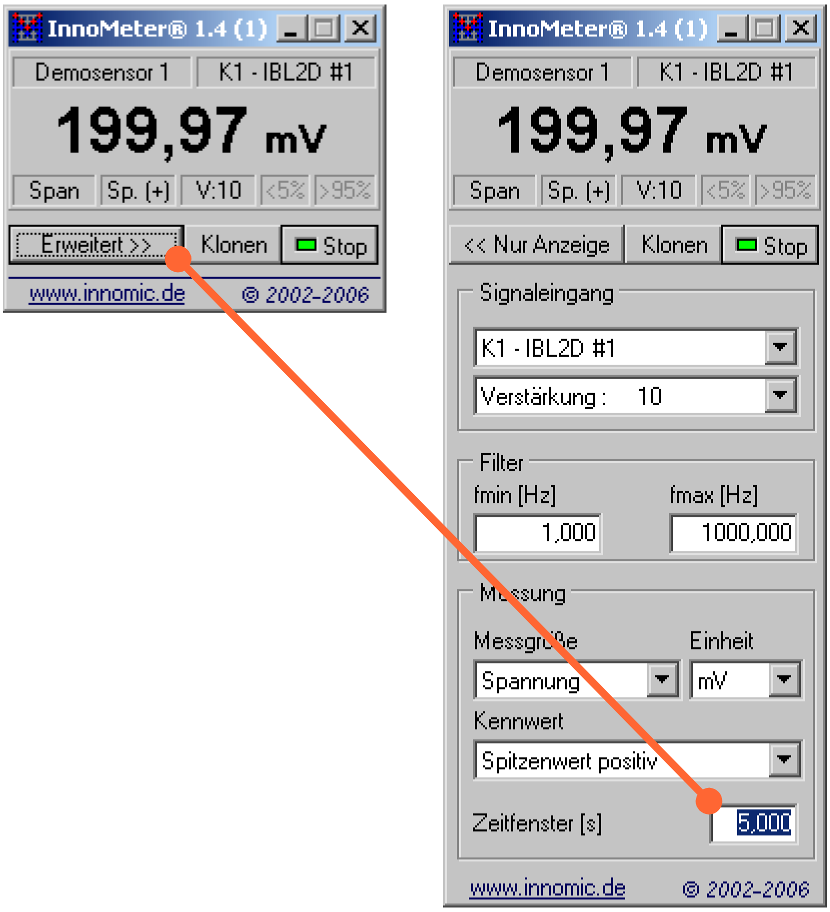
Auf die Anzeige der Spitzenwerte haben wir jedoch noch Einfluss durch das so genannte Zeitfenster. Das Zeitfenster gibt an, wie lang der Zeitausschnitt ist, für den ein Kennwert gebildet wird. Bei derartigen Situationen können Sie entscheiden, worauf es Ihnen ankommt. Wollen Sie schnelle Änderungen im Spitzenwert verfolgen, wählen Sie ein kleines Zeitfenster. Sind Sie nur an allmählichen Änderungen interessiert, wählen Sie ein großes Zeitfenster.

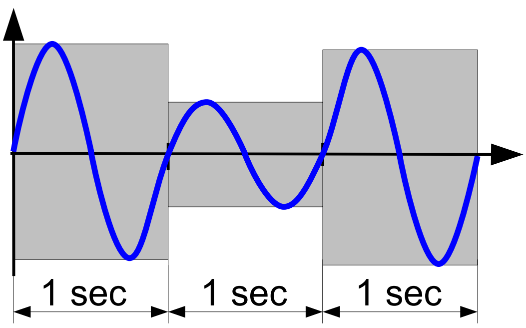
Wo ist das Zeitfenster einstellbar?

Klicken Sie im ersten InnoMeter auf Erweitert >>. Das Bedienfeld des InnoMeters klappt heraus. Falls es nicht ganz auf den Bildschirm passt, ziehen Sie das Fenster ein wenig nach oben.

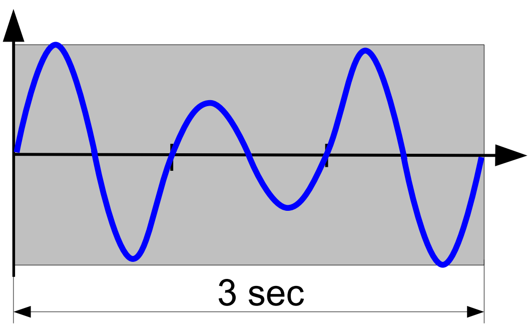
Im Bedienfeld befindet sich in den Einstellungen das Eingabefeld Zeitfenster [s]. Tragen Sie hier 5,000 ein.

Nun ist steht die Anzeige des Spitzenwerts wieder still. Kurzzeitige Änderungen wirken sich durch das längere Zeitfenster nicht mehr aus.





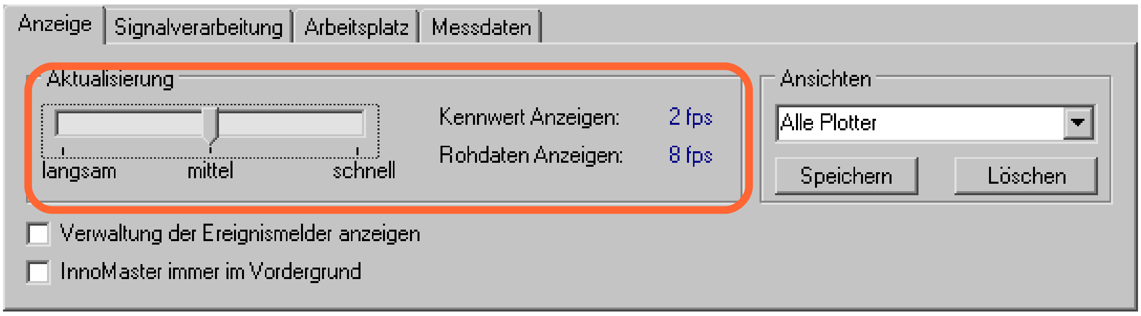
Bei kleinem Zeitfenster kommen Schwankungen schneller zum Tragen.



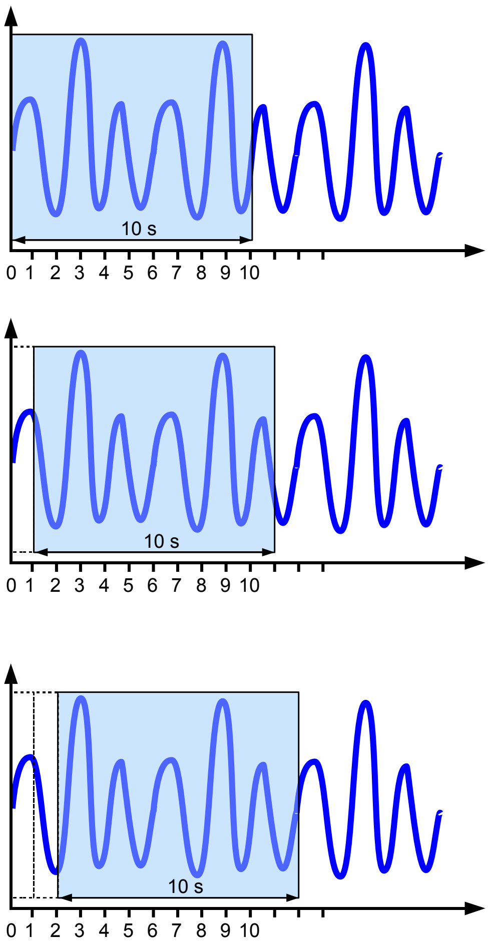
Längere Zeitfenster für die Spitzenwertbildung erfassen kurzzeitige Schwankungen nicht.

Überlappung

Wenn ein langes Zeitfenster, z.B. 10 Sekunden eingestellt wird, wird dann auch nur alle 10 Sekunden ein neuer Messwert angezeigt? Nicht bei VibroMatrix. Die Anzeigegeschwindigkeit wird zentral im InnoMaster eingestellt und arbeitet unabhängig vom Zeitfenster. Auch wenn das Zeitfenster 10 Sekunden beträgt, wird die Anzeige häufiger aktualisiert, z.B. 1x in der Sekunde.



Ist das denn sinnvoll? Gibt es denn etwas jede Sekunde zu aktualisieren, wenn das Zeitfenster 10 Sekunden beträgt? Ja, denn VibroMatrix arbeitet mit Überlappung.



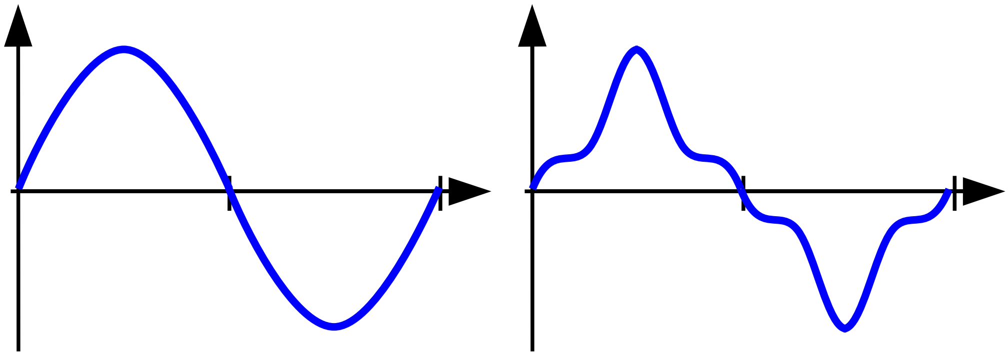
Das Zeitfenster von 10 Sekunden wird immer um einen Anzeigetakt verschoben und dann ein neuer Kennwert gebildet. Es werden nicht wieder die vollen 10 Sekunden des Zeitfensters abgewartet bis zur nächsten Anzeige. Der neue Kennwert wird aus den 9 letzten Sekunden der vergangenen Messung und einer zusätzlich eingelesenen Sekunde gebildet. Das sind in der Summe wieder 10 Sekunden. Aber die Zeitfenster überlappen sich.

Von einer Messung zur nächsten sind in unserem Beispiel 9 Sekunden Zeitsignal identisch. Aber für 1 Sekunde gibt es unterschiedliche Daten. Und diese eine Sekunde kann bereits den Kennwert – über das gesamte Zeitfenster gesehen – verändern. Daher wird der Kennwert unabhängig von der Länge des Zeitfensters aktualisiert.

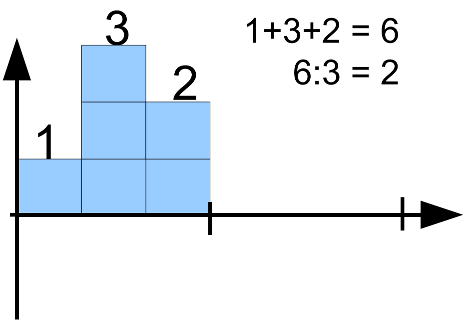
Genauso verhält es sich bei der später erläuterten FFT. Hier kann die Überlappung sogar eingestellt werden. Als Einheit wird Prozent verwendet. Der Bezugswert 100% entspricht der Länge des Zeitfensters. In unserem Beispiel haben wir eine Überlappung von 90%: 9 Sekunden Überlappung bei 10 Sekunden Fensterlänge.

3.5. Übung 5: Quadratischer Mittelwert, Effektivwert

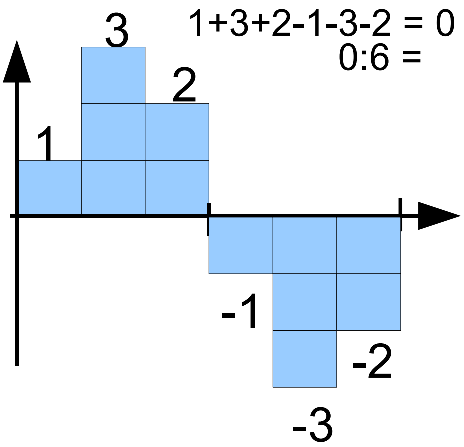
Der Spitzenwert allein beschreibt ein periodisches Wechselsignal noch nicht ausreichend. Schwingungssignale können gleiche Spitzenwerte haben und trotzdem höchst unterschiedlich aussehen.



Also suchte man noch einen zweiten Wert zur Charakterisierung, eine Art Mittelwert. Sie kennen den arithmetischen oder auch linearen Mittelwert? Klar, damit hat doch der Lehrer den Notendurchschnitt errechnet. Der Schüler bekam im Schuljahr die Noten 1, 3, 2 und hatte dann am Ende eine glatte 2. Was hatte der Lehrer errechnet? Die Summe aller Noten gebildet und dann durch die Anzahl geteilt, fertig war die Endnote.



Genau das funktioniert bei periodischen Wechselsignalen nicht, weil dieses Signal zwischen positiven und negativen Werten wechselt. Das lineare Mittel für ein periodisches Signal sähe aus wie in der Grafik rechts.

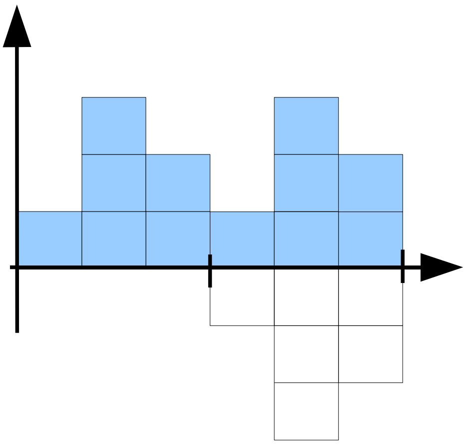


Positive und negative Werte heben sich auf, zum Schluss erhalten wir Null. Der lineare Mittelwert ist daher in der Schwingungsmessung als Kennwert ungeeignet.

Wie kann man dann einen Mittelwert gewinnen? Die Lösung lautet: Die negativen Anteile des Signals müssen zunächst zu positiven Werten werden. Dafür bieten sich 2 Operationen an.

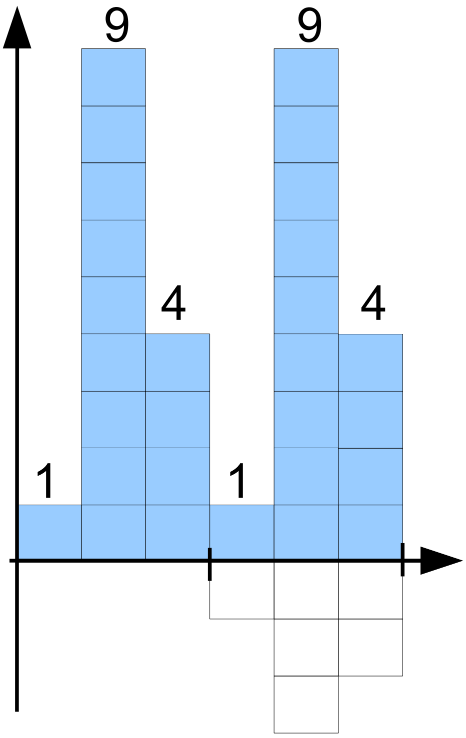
1. Betragsbildung
2. Quadrieren

Betragsbildung ist einfach: Positive Werte bleiben positiv, negative Werte werden positiv. Technisch nennt man diese Operation auch Gleichrichtung. Die negativen Werte werden einfach nach oben geklappt.



Wenn man nun wieder den arithmetischen Mittelwert bildet, kommt es zu akzeptablen Ergebnissen. Der Kennwert wird wegen der vorhergehenden Gleichrichtung auch als Gleichrichtwert bezeichnet. Er sei der Vollständigkeit halber aufgeführt. In der Elektrotechnik hat er eine geringe Bedeutung, in der Messung von mechanischen Schwingungen ist dem Autor keine Bedeutung bekannt.

Also wenden wir uns der zweiten Operation zu, die aus negativen Werten positive erzeugt, dem Quadrieren. Damit sähe unser Beispielsignal wie rechts dargestellt aus.



Wir summieren mal: 1+9+4+1+9+4 = 28. Wie beim arithmetischen Mittelwert wird auch wieder durch die Anzahl der Werte geteilt: 28 : 6 = 4,67.

Ein Problem bleibt noch. Wir haben eine quadratische Messgröße. Hatten wir vorher Schwingwege in mm gemessen, haben wir nach dieser Operation mm^2. Das kann doch nicht richtig sein. Daher folgt eine letzte Operation. Aus dem Ergebnis ziehen wir wieder die Quadratwurzel. Wurzel aus 4,67 ergibt ca. 2,16. Und die Einheit ist auch wieder korrekt, die mm^2 würden wieder zu mm werden.

Gratulation. Wenn Sie bis jetzt die Lust nicht verloren haben, haben Sie gerade im Kopf einen quadratischen Mittelwert bestimmt. Nichts anderes macht Messtechnik. Nur eben schneller. Sogar die Kästchen, die wir in den Grafiken gesehen haben, werden verwendet. Allerdings sind diese im Computer sehr klein, so dass beliebige Signalformen mit großer Genauigkeit nachgebildet werden können.[2]

2 Die korrekte mathematische Definition für den Effektivwert wollen wir nicht unerwähnt lassen:

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t)\, dt}$$

Sie beschreibt die Schritte, welche wir oben mit dem Notenbeispiel durchgeführt haben. Auch wer mit Integralrechnung noch nicht Berührung kam, erkennt die einzelnen Operationen:

- a^2 für das Quadrieren
- das angedeutete S steht für die Summation
- das Teilen durch die Anzahl der Elemente wird mit 1/T beschrieben
- zum Schluss erfolgt das Bilden der Quadratwurzel mit √

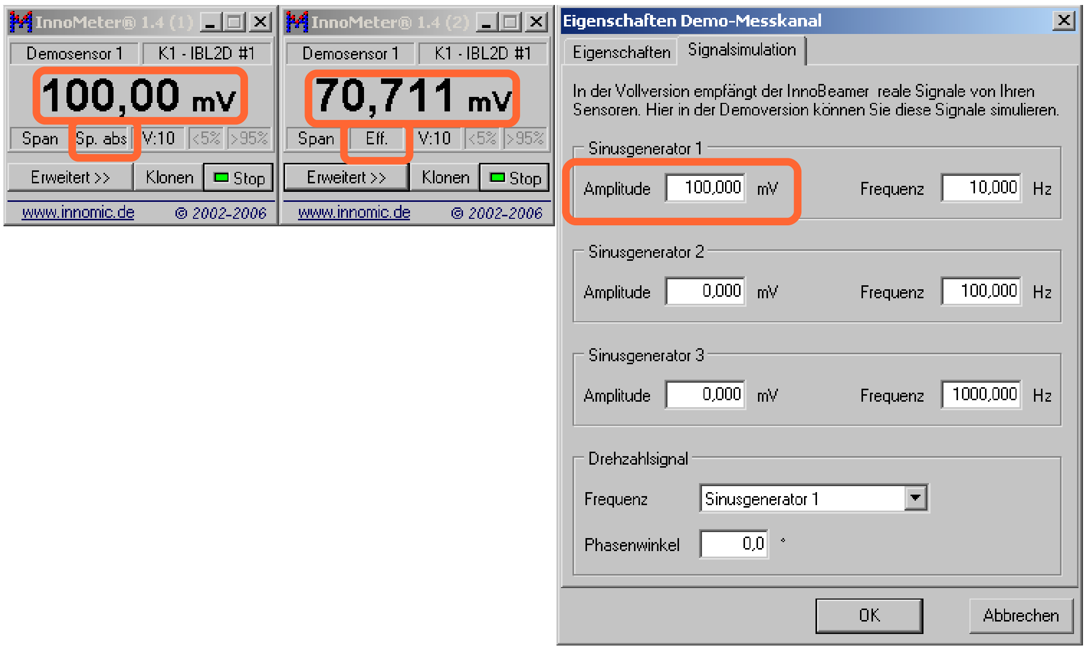
Nun haben wir neben dem Spitzenwert einen zweiten wichtigen Kennwert zur Charakterisierung von Schwingungssignalen, den quadratische Mittelwert. Englisch übrigens wird er root mean square genannt, oft abgekürzt mit r.m.s. oder RMS. Eingebürgert hat sich für den quadratischen Mittelwert zudem die Bezeichnung Effektivwert.

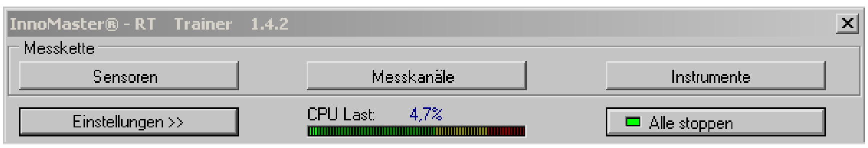
Den Namen Effektivwert haben die Elektrotechniker geprägt. Eine sinusförmige Wechselspannung mit einem Effektivwert x erzeugt in einem Toaster die selbe Heizleistung, wie eine Gleichspannung mit dem Wert x. Sie ruft also den gleichen Effekt hervor.

Für verschiedene periodische Wechselsignale gibt es feste Beziehungen zwischen Spitzenwert und dem Effektivwert. Für ein Sinussignal gilt z.B. folgende Beziehung:

$$Spitzenwert \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = Effektivwert \quad \text{also etwa} \quad Spitzenwert \cdot 0{,}707 = Effektivwert$$

Das wollen wir doch gleich überprüfen. Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 5. Es werden 2 InnoMeter angezeigt. Der linke misst den Spitzenwert, der rechte den Effektivwert. Öffnen Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal. Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.





Was passiert? Es werden in der Signalsimulation 100 mV als Amplitude eingespeist. Folgerichtig werden 100 mV als Spitzenwert im linken InnoMeter angezeigt. Im rechten InnoMeter sehen Sie den Effektivwert dazu. Es werden noch ein paar Stellen mehr angezeigt, nämlich 70,711. Wenn Sie einen Taschenrechner zur Hand nehmen und nachrechnen (100 : 2 √), werden Sie auf 70,710678118654752440084436210485 kommen, also rund 70,711. Genau das zeigt Ihnen der rechte InnoMeter an.

3.6. Übung 6: Effektivwerte eines Schwingungsgemischs

Die mathematische Beziehung[3] $Spitzenwert \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = Effektivwert$

gilt allerdings nur für reine Sinussignale. Für andere Signalformen ist die Verwendung dieser Beziehung nicht mehr zulässig. Das gilt schon, wenn 2 Sinussignale unterschiedlicher Frequenz als Gemisch zusammenwirken.

Im Arbeitsleben könnten Sie mit einfach gestrickter Messtechnik in Berührung kommen. Diese ist nicht imstande, den Effektivwert für Signale abweichend vom reinen Sinussignal zu bilden. Alles, was diese Geräte machen, ist den Spitzenwert zu messen und dann mit 0,707 zu multiplizieren. Für reine Sinussignale funktioniert das. Die kommen bei realen, mechanisch schwingenden Systemen allerdings selten vor, was heißt, dass diese einfachen Messgeräte bei den meisten Messungen unrichtige Werte liefern.

Korrekterweise sollten solche Geräte zusätzlich gekennzeichnet sein, vielleicht als Sinus-Effektivwertmessgerät. In Marketingabteilungen nimmt man es aber häufig mit solchen Details nicht zu genau und „vergisst" mal schnell darauf hinzuweisen.

Daraufhin waren die Produzenten von Effektivwertmesstechnik, die nicht nur bei Sinus- sondern auch allen anderen Signalformen funktioniert, gezwungen, zur Abgrenzung eine zusätzliche Bezeichnung zu wählen: Echter Effektivwert oder auch true r.m.s.

Wir werden ausprobieren, was die InnoMeter anzeigen. Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 6. Es werden wieder die 2 InnoMeter angezeigt. Der linke misst den Spitzenwert, der rechte den Effektivwert. Öffnen Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal. Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.

3 Warum ist das so? Woher kommt diese Beziehung? Das lässt sich herleiten. Wenn Sie uns glauben, überspringen Sie diese Fußnote einfach. Für alle anderen: Wir starten mit unserer Definition des Effektivwerts:

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t)\, dt}$$

Quadrieren wir die Gleichung und setzen wir für die allgemeine Funktion *a(t)* unsere zu betrachtende Funktion ein, nämlich eine Sinusfunktion mit der Amplitude $\hat{a}$ und der Kreisfrequenz ω: $a(t)=\hat{a}\sin(\omega t)$.

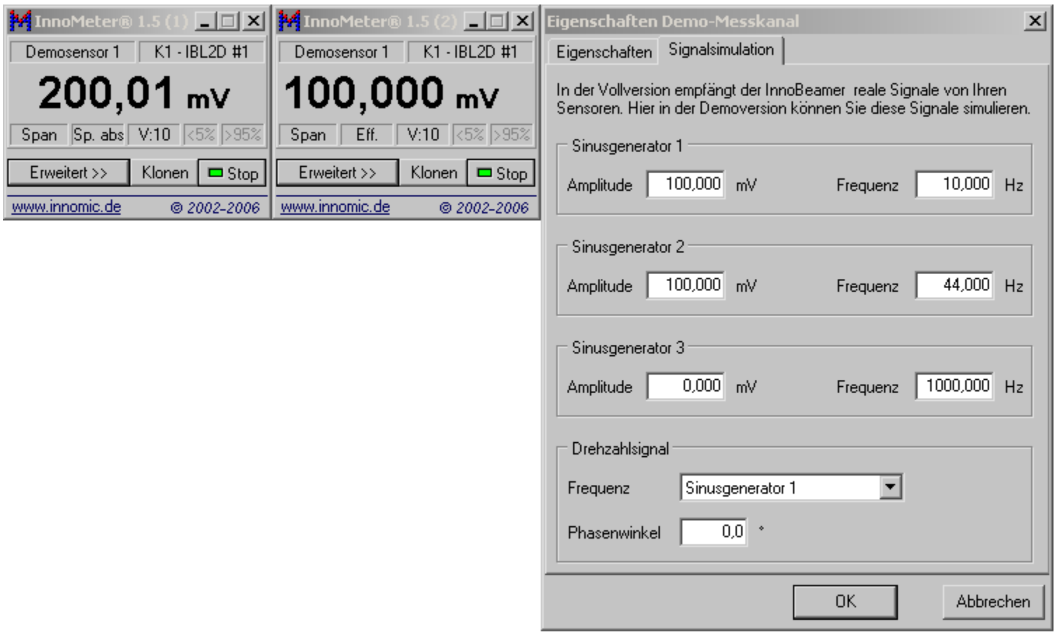
$$a_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (\hat{a} \cdot \sin(\omega t))^2\, dt$$

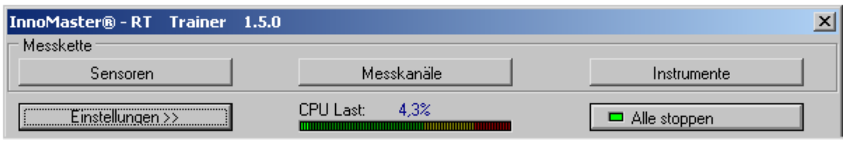
Unter Berücksichtigung von $\sin^2(\omega t) = (1-\cos(2\omega t))/2$ erhalten wir dann bei Bildung der Stammfunktion

$$a_{eff}^2 = \frac{1}{2T} \hat{a}^2 \left[t - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t) \right]_0^T$$

Als Zeitdauer T verwenden wir eine volle Periodendauer der Sinusfunktion. Nach Einsetzen der Grenzen und mit dem Wissen um $\sin(2\omega T) = 0$ erhalten wir schließlich

$$a_{eff}^2 = \frac{\hat{a}^2}{2} \quad \text{und damit} \quad a_{eff} = \frac{\hat{a}}{\sqrt{2}}$$

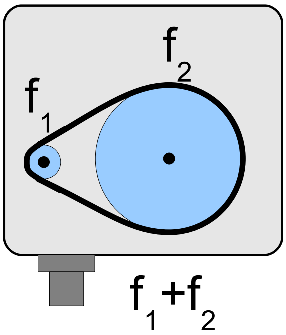




Wir haben nun ein zweites Signal, 100 mV bei 44 Hz. Auf einmal verdoppelt sich der Spitzenwert auf 200 mV. Der Effektivwert verdoppelt sich nicht, sondern steigt nur auf 100 mV. Der Faktor zwischen beiden Werten ist nicht mehr 0,707 sondern 0,5.

4. Grundlagen zu Frequenzen

Nachdem wir uns mit Kennwerten beschäftigt haben, welche die Höhe der Schwingungssignale betreffen, wenden wir uns nun den Schwingfrequenzen zu. Kleine Wiederholung: Die Schwingfrequenz gibt an, wieviel Perioden eines Schwingungssignals pro Zeiteinheit auftreten. Die Einheit ist Hertz (Hz) und gibt an, wieviel Perioden pro Sekunde auftreten.



In der Technik treten Schwingungssignale oft als Gemisch von Sinussignalen unterschiedlicher Frequenz auf. Ist z.B. ein Rotor mit einem Getriebe verbunden, laufen Antrieb und Rotor mit unterschiedlichen Drehzahlen. Schwingungen beider Drehzahlen wirken zusammen und ergeben ein Schwingungsgemisch. Ein am Getriebekasten angebrachter Sensor misst dieses Schwingungsgemisch.

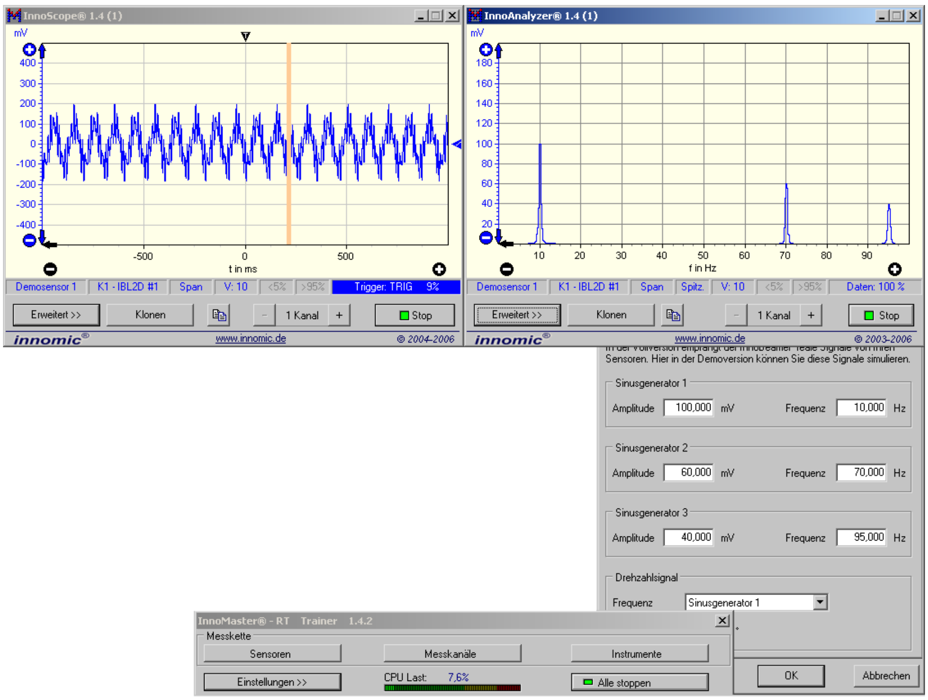
Einen einzelnen Frequenzkennwert anzugeben ist dann schwierig. Es ist jedoch möglich, den gesamten Frequenzbereich zu analysieren, um die Einzelfrequenzen wieder zu finden oder auch für eine Messung störende Frequenzbereiche auszublenden.

4.1. Übung 7: Einfache Frequenzanalyse

Ein leistungsfähiges Instrument, um die Bestandteile eines Gemischs von Sinussignalen wieder in die Einzelkomponenten aufzuspalten, ist der InnoAnalyzer.

Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 7. Sie bekommen links das Zeitsignal im InnoScope und rechts die Frequenzanalyse im InnoAnalyzer angezeigt.

Öffnen Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal. Tragen Sie für den Sinusgenerator 2 eine Amplitude von 60 mV und eine Frequenz von 70 Hz ein. Für den Signalgenerator 3 tragen Sie 40 mV bei 95 Hz ein. Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.

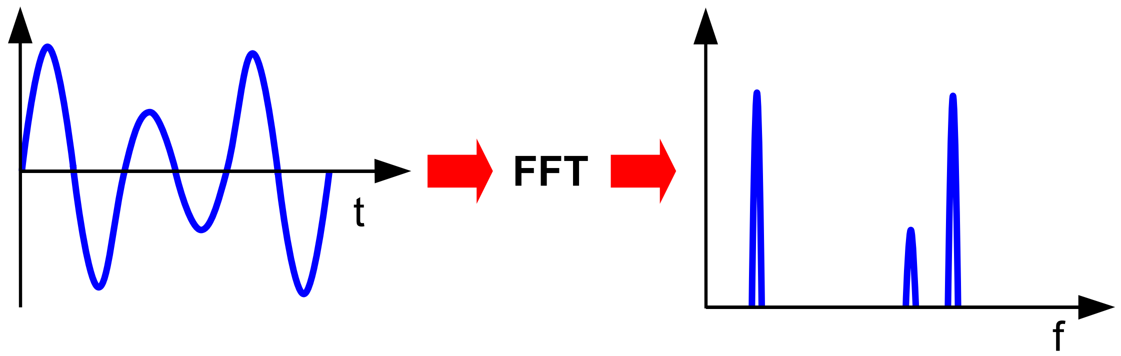


Wir haben nun ein Gemisch aus nur 3 Sinussignalen erzeugt und - Hand aufs Herz - das Ergebnis sieht im InnoScope ganz schön unübersichtlich aus. Durch bloßes Anschauen des Signals im Zeitbereich ließen sich seine Bestandteile höchstens abschätzen.

Hier greift für Sie der InnoAnalyzer ein. Mit seiner Hilfe können Sie leicht bestimmen, welche Einzelfrequenzen im Signal vorkommen und in welcher Höhe sie zum Gemisch beitragen. Um auf das Beispiel mit dem Getriebe zurück zu kommen: Um zu wissen, ob Komponenten vor dem Getriebe oder danach den Hauptanteil der Gesamtschwingungen verursachen, führen Sie einfach eine Frequenzanalyse mit dem InnoAnalyzer durch.

Wenn Sie die Darstellung im InnoScope und im InnoAnalyzer sehen, werden Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede feststellen. Beiden Instrumenten gemeinsam ist die Darstellung der Amplitude auf der y-Achse. Die x-Achse zeigt hingegen im InnoScope eine Zeitachse, im InnoAnalyzer eine Frequenzachse.

Die Darstellung des InnoScope nennt man auch den Zeitbereich. Der InnoAnalyzer hingegen zeigt die Signale im Frequenzbereich. Beiden Bereiche stehen in Beziehung und können ineinander überführt werden. Die Umwandlungsmethode, die im InnoAnalyzer eingesetzt wird, heißt Fouriertransformation, genauer gesagt Fast Fourier Transformation, abgekürzt mit FFT. Für das InnoScope muss dagegen keine Transformation stattfinden, die aus dem Sensor eintreffenden Daten befinden sich bereits im Zeitbereich.



Zeitbereich **Transformation** **Frequenzbereich**

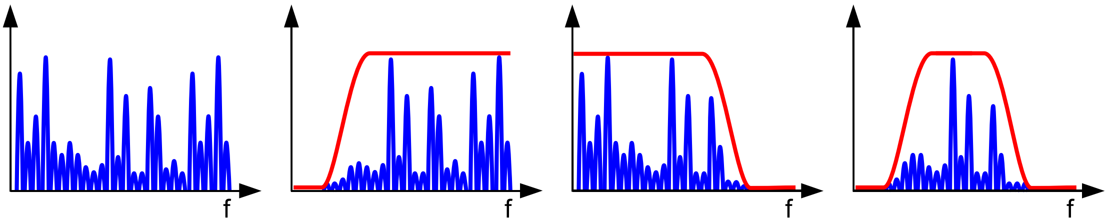
Frequenzanalyse mit FFT geht der Ruf von Kompliziertheit voraus. Das muss nicht so sein. In diesem Beispiel haben wir die automatischen Einstellmechanismen des Inno-Analyzer verwendet. Sie bestimmen nur den zu analysierenden Frequenzbereich, alle weiteren notwendigen Parameter bestimmt der InnoAnalyzer selbst.

4.2. Übung 8: Frequenzbereiche unterdrücken mit Filtern

Möchte man Schwingungsanteile aus einem Gemisch entfernen, welche für die anstehenden Untersuchungen nicht von Bedeutung oder gar störend sind, setzt man Filter ein.

- Filter, welche Frequenzen oberhalb einer sogenannten Grenzfrequenz durchlassen (passieren lassen), heißen Hochpass.
- Filter, die umgekehrt nur Frequenzen unterhalb einer Grenzfrequenz durchlassen, heißen Tiefpass.
- Wirken beide mit geeigneten Grenzfrequenzen zusammen, bilden sie einen Bandpass.

Die nachfolgende Darstellungsmethode kennen Sie aus dem InnoAnalyzer. Die unterdrückende Wirkung der Filterarten lässt sich am besten im Frequenzbereich zeigen.

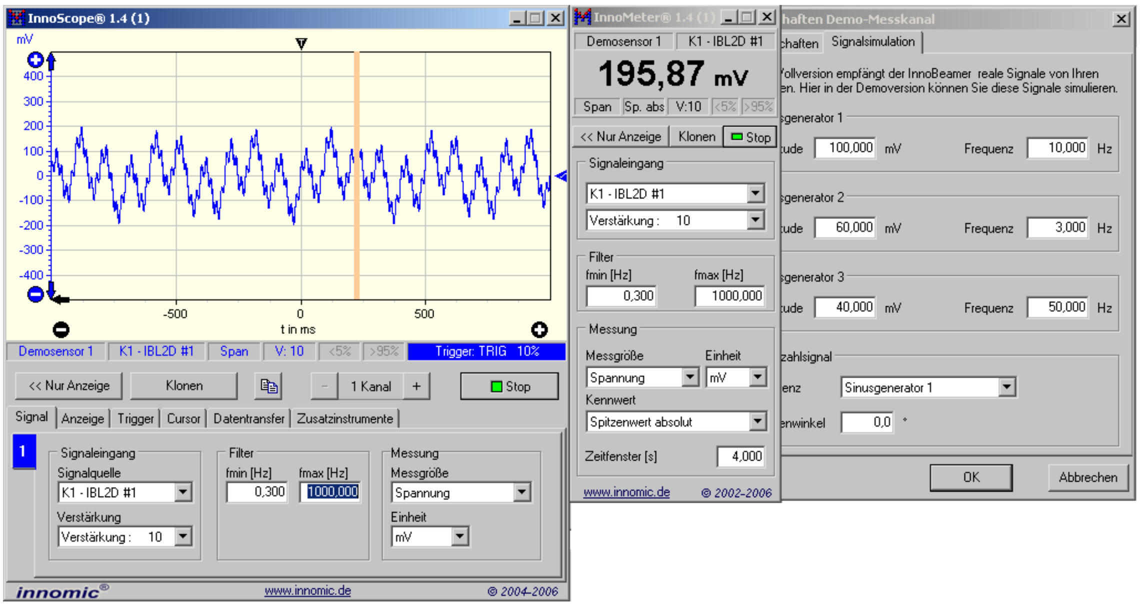


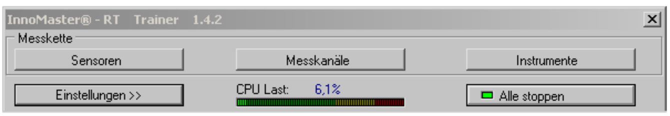
Ungefiltert **Hochpass** **Tiefpass** **Bandpass**

Wo es notwendig ist, sind die Instrumente von VibroMatrix mit 2 frei einstellbaren Filtern ausgestattet, welche als Bandpass arbeiten. Wir schauen uns mit 2 Instrumenten an, wie die Filter auf das Schwingungsgemisch wirken.

Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 8. Sie bekommen links das Zeitsignal im InnoScope und rechts ein InnoMeter mit Spitzenwertanzeige dargestellt.

Öffnen Sie zusätzlich die Signalsimulation für den ersten Kanal. Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.



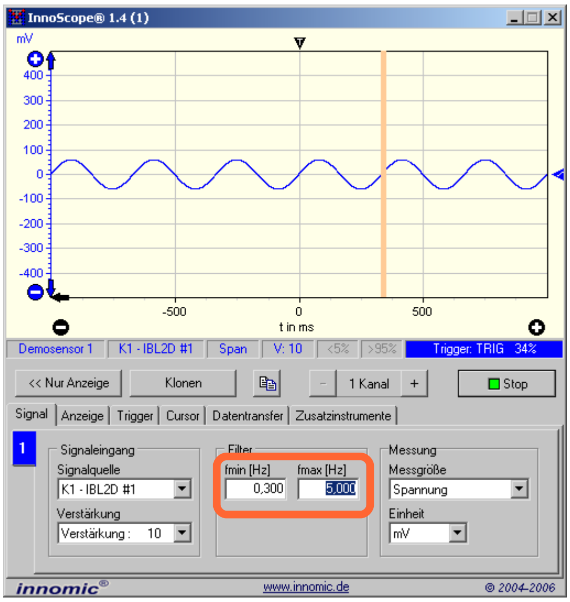


Sowohl InnoScope als auch InnoMeter besitzen Einstellfelder namens fmin und fmax. Mit fmin legen Sie die minimale Frequenz fest, welche Sie sehen wollen, mit fmax die maximale. Wir werden nun nacheinander die 3 Frequenzen aus dem Gemisch herausfiltern und die übrigen beiden als Störfrequenz ausblenden.

So sieht es im InnoScope aus:

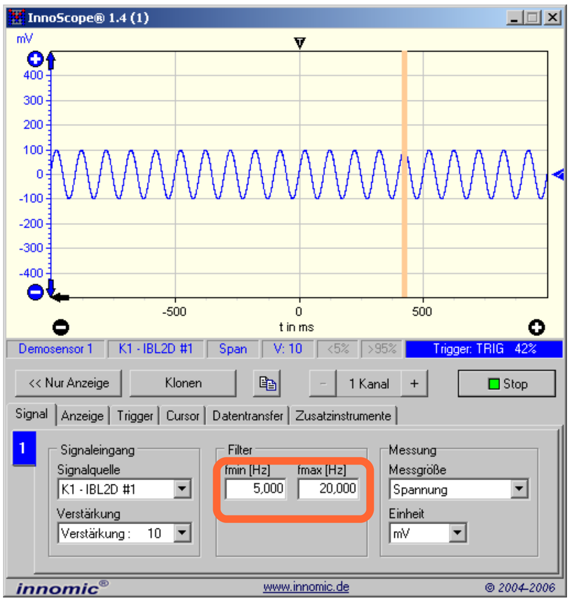
Bandpass 0,3 .. 5 Hz

- 3 Hz Signal wird durchgelassen
- 10 Hz und 50 Hz werden gesperrt



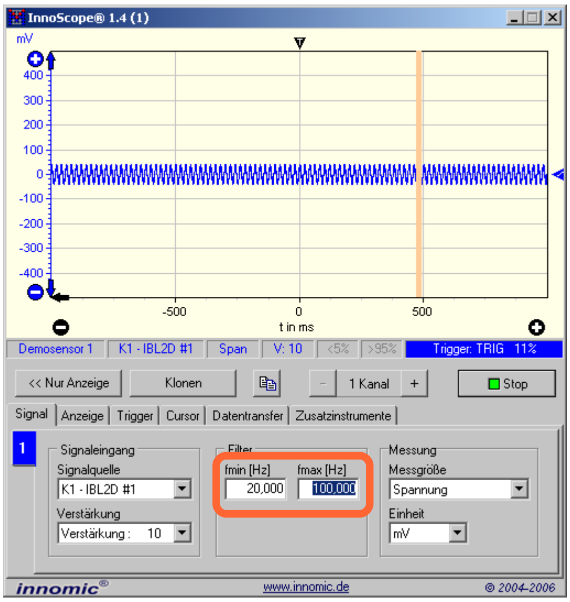
Bandpass 5 .. 20 Hz

- 10 Hz Signal wird durchgelassen
- 3 Hz und 50 Hz werden gesperrt

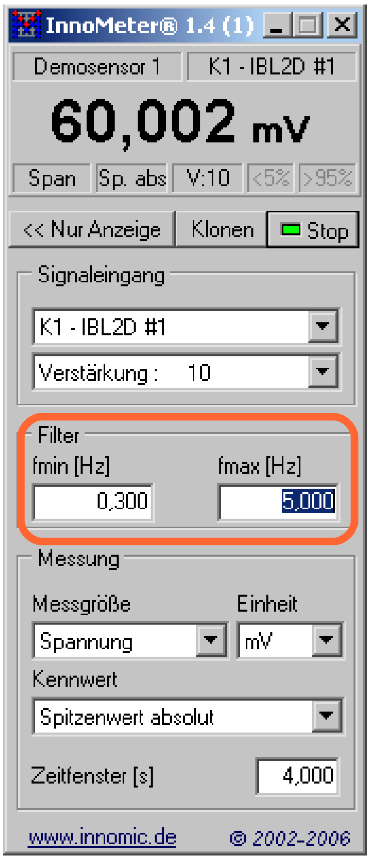


Bandpass 20 .. 100 Hz

- 50 Hz Signal wird durchgelassen
- 3 Hz und 10 Hz werden gesperrt

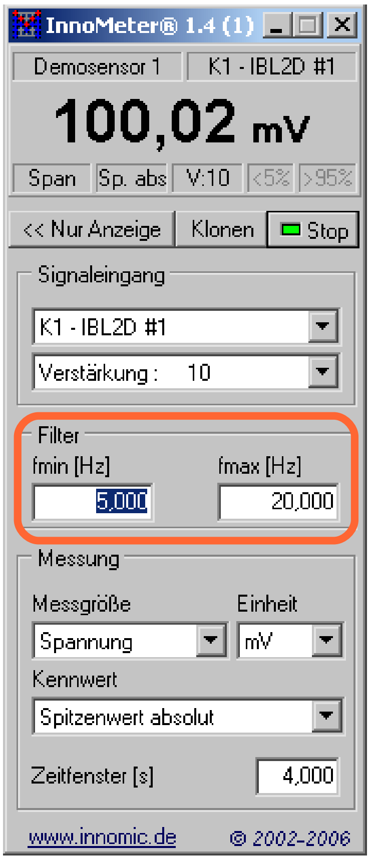


Im InnoMeter können die Einzelfrequenzen ebenfalls herausgefiltert werden.



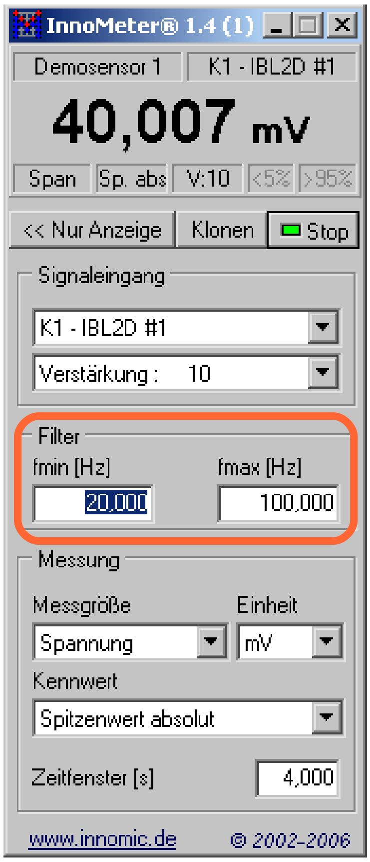
Bandpass 0,3 .. 5 Hz

- 3 Hz Signal wird mit seinen eingestellten 60 mV Amplitude durchgelassen
- 10 Hz und 50 Hz werden gesperrt



Bandpass 5 .. 20 Hz

- 10 Hz Signal wird wird mit seinen eingestellten 100 mV Amplitude durchgelassen
- 3 Hz und 50 Hz werden gesperrt



Bandpass 20 .. 100 Hz

- 50 Hz Signal wird wird mit seinen eingestellten 40 mV Amplitude durchgelassen
- 3 Hz und 10 Hz werden gesperrt

4.3. Übung 9: Filtersteilheit

Filter sind durch einige Eigenschaften charakterisiert. Die ersten haben Sie bereits kennengelernt: die Grenzfrequenz. Dieser Wert gibt an, ab welcher Frequenz die Filterwirkung beginnt.

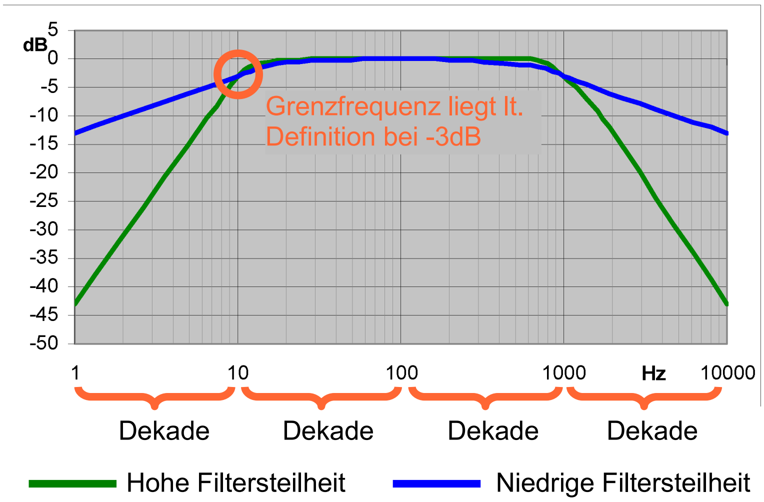
Daneben gibt es die Steilheit. Filter haben die Eigenschaft, nicht unendlich steil zu sein. Wenn Sie die Grenzfrequenz für ein Tiefpassfilter auf 10 Hz setzen, dann kann nicht erwartet werden, dass das Signal bereits bei 10,001 Hz nicht mehr messbar ist. Das Filter wird vielmehr erst mit zunehmender Frequenz seine dämpfende Wirkung auf höhere Frequenzanteile entfalten.

Eine Einheit zur Charakterisierung ist dB pro Dekade. Die Angabe 20 dB/Dekade bedeutet: bei 10 facher Grenzfrequenz wird nur noch 1/10 der ursprünglichen Amplitude durchgelassen, bei 100 facher Grenzfrequenz ist es nur noch 1/100.

40 dB/Dekade: bei 10 facher Grenzfrequenz wird nur noch 1/100 der ursprünglichen Amplitude durchgelassen, bei 100 facher Grenzfrequenz ist es nur noch 1/10000.

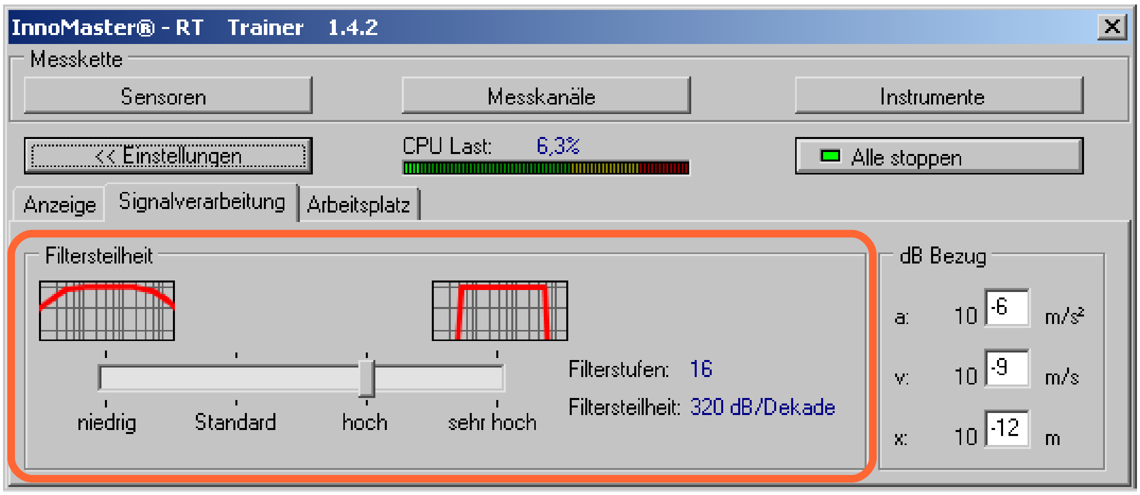
60 dB/Dekade: bei 10 facher Grenzfrequenz wird nur noch 1/1000 der ursprünglichen Amplitude durchgelassen, bei 100 facher Grenzfrequenz ist es nur noch 1/1000000.

In VibroMatrix können Sie die Filtersteilheit zentral im InnoMaster steuern. Klappen Sie die Einstellungen des InnoMaster auf und wählen Sie Signalverarbeitung.



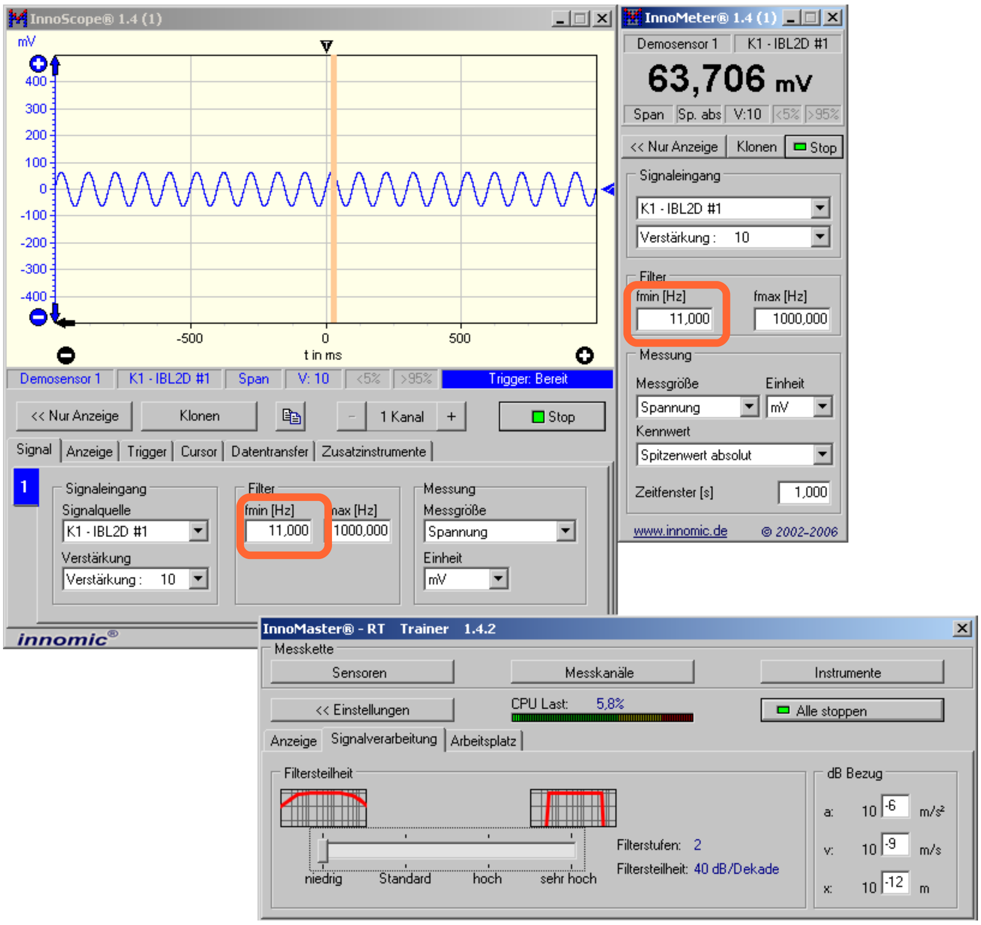
In dieser Grafik hat das blau eingezeichnete Filter eine Steilheit von 10 dB/Dekade und das grün eingezeichnete eine Steilheit von 40 dB/Dekade.

Die dB Skala mag etwas gewöhnungsbedürftig sein. 0 dB steht für Faktor 1. Hier wird das Signal ungedämpft durchgelassen. Werte unter 0dB bedeuten Dämpfung des Signals, Werte über 0dB bedeuten Verstärkung. -20dB steht z.B. für 1/10 von 0dB und +20 dB bedeuten das 10fache von 0dB.



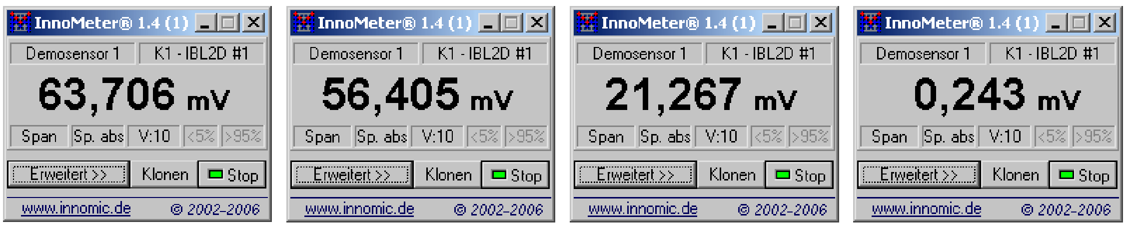
Ändern Sie hier die Filtersteilheit, reagieren alle geöffneten Instrumente sofort darauf.

Was bedeutet Filtersteilheit nun praktisch? Wir wollen uns das Verhalten anschauen. Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 9. Sie bekommen links das Zeitsignal im InnoScope und rechts ein InnoMeter mit Spitzenwertanzeige dargestellt. Klappen Sie zudem die Signalverarbeitung im InnoMaster aus.



In diesem Versuch ist der erste Sinusgenerator auf 100 mV Amplitude bei 10 Hz konfiguriert. Wie im InnoScope und im InnoMeter zu sehen ist, haben wir eine Grenzfrequenz von 11 Hz für das Hochpassfilter eingestellt. Alle Signale mit niedrigeren Frequenzen, so auch unser Testsignal mit 10 Hz sollten theoretisch verschwinden.

Zu Beginn ist die Filtersteilheit auf Niedrig gestellt. Die 100 mV des Testsignals werden zwar nicht mehr komplett durchgelassen, jedoch noch ein erheblicher Teil. Mit steigender Filtersteilheit wird dieser Wert kleiner.



Niedrig **Standard** **Hoch** **Sehr hoch**

Wird die Filtersteilheit auf Sehr hoch gestellt, ist das 10 Hz Signal nahezu verschwunden. Wenn nun steilere Filter viel eher wirksam werden, warum soll es dann überhaupt noch die anderen Filter geben? Dafür gibt es mehrere Gründe.

- Bestimmte Normen verlangen Filter mit einer bestimmten Steilheit, z.B. 40 dB/Dekade. Vorgegebene Grenzwerte für Messungen nach dieser Norm basieren auf diesen Einstellungen. Wenn Sie vergleichbar zur Norm messen wollen, dann sind gleiche Einstellungen notwendig.

- Bei impulshaften Vorgängen sind hohe Filtersteilheiten hinderlich, weil sie länger zum Einschwingen benötigen. Dieses Verhalten ist insbesondere bei zeitlich integrierten Messgrößen zu beobachten, d.h. wenn aus Beschleunigung noch Geschwindigkeit und Weg gebildet werden.

5. Wie kommen die m/s² auf den Bildschirm?

5.1. Überblick

Bisher haben wir immer Spannungssignale simuliert und auch Spannungssignale gemessen. Wie kommen aber andere Messgrößen in die VibroMatrix-Instrumente, z.B. Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit oder Schwingweg? Vom schwingenden Messobjekt bis zur Anzeige, welche Stufen werden durchlaufen?

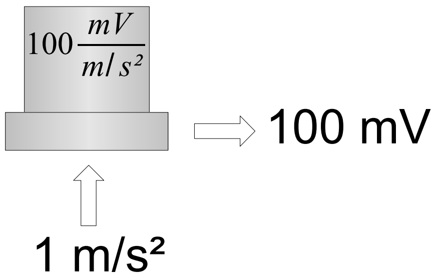
5.2. Am Anfang: Der Sensor

Ein Sensor allgemein wandelt das Signal einer physikalische Größe in ein Signal einer einfacher zu handhabenden Größe um. Das ist oft eine elektrische Größe, weil diese sich einfach transportieren oder messen lässt. Bei VibroMatrix werden piezoelektrische Beschleunigungssensoren mit integriertem Verstärker eingesetzt. Diese wandeln sich verändernde Beschleunigungen zu einem Spannungssignal. Das Elegante bei der Piezomesstechnik: Wir brauchen nur einen einzigen Proportionalitätsfaktor, um die Beziehung zwischen Beschleunigung und elektrischer Größe zu beschreiben. Dieser Faktor heißt Spannungsübertragungsfaktor oder auch Empfindlichkeit. Der Wert gibt an, wieviel Spannung abgegeben wird, wenn eine Beschleunigung bestimmter Größe auf den Sensor einwirkt. Als Bezugseinheit für die Beschleunigung verwendet man 1 m/s² oder auch 1 g (Erdbeschleunigung).

Als Einheit für die Empfindlichkeit werden daher mV/g oder mV/m/s² verwendet. Achtung: Beide Einheiten[4] liegen etwa um den Faktor 10 auseinander, auch wenn Sie die gleiche Empfindlichkeit beschreiben. Diesen Wert finden Sie gewöhnlich in Ihrem Sensorkennblatt.

$$1\frac{mV}{g}=1\frac{mV}{9{,}81\cdot m/s^2}\approx\frac{1}{10}\frac{mV}{m/s^2}$$

Fassen wir das bildlich zusammen:



Wir haben einen Sensor mit einer Empfindlichkeit von 100 mV/m/s². Im Beispiel wirkt 1 m/s² Beschleunigung auf den Sensor ein. Folglich entsteht an seinem Ausgang eine Spannung von 100 mV.

Frage: Wenn wir am Ausgang 333 mV messen, wie groß war dann die einwirkende Beschleunigung?[5]

4 Warum arbeitet man eigentlich mit der Bezugsbeschleunigung von 1 g, die überhaupt nicht im wohlgeordneten SI-Einheitensystem vorgesehen ist? Wir Techniker brauchen das nicht, leider aber technikferne Branchen/Abteilungen, wie das Marketing. Der Empfindlichkeitswert in mV/g erscheint 10fach größer als der in mV/m/s², obwohl ein- und dasselbe Verhalten beschrieben wird. Marketingleute wollen Dinge gern größer erscheinen lassen, als sie bei näherer Betrachtung eigentlich sind. Und so schlagen wir Techniker uns mit beiden Einheiten herum und müssen aufpassen, was gefragt ist, um nicht plötzlich einen Faktor 10 in den Messwerten zu haben.

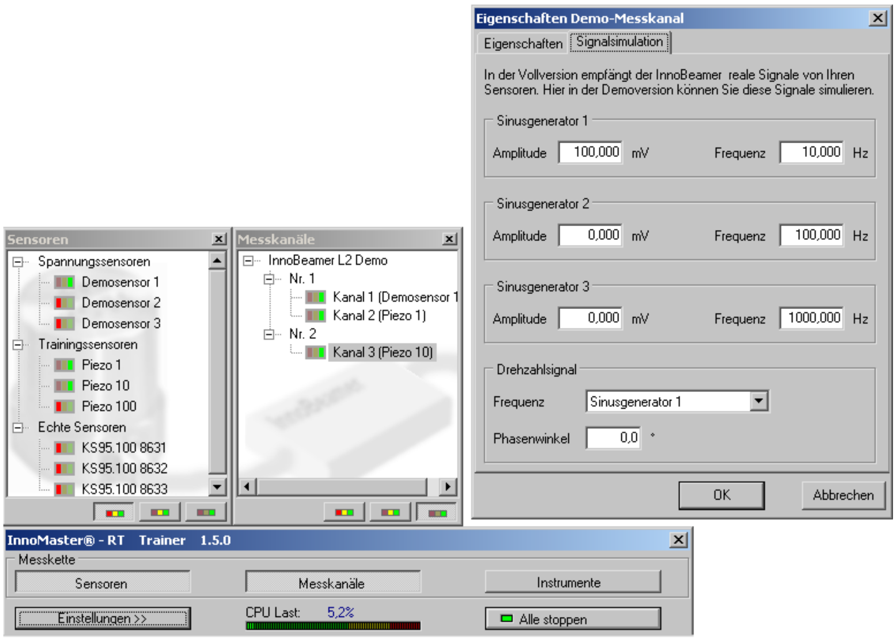
Es ist wie in anderen Bereichen des Lebens, nehmen Sie die Leistungsangaben für PKW: 100 PS klingt einfach besser als 74 kW.

Wohlwollender lässt sich auch ein anderer Grund finden. Was ist 1 m/s² ? Ist das viel? Ist das wenig? Kann man sich zunächst nichts darunter vorstellen. Was aber ist 1 g? Die Erdbeschleunigung. Lässt man einen Körper hier auf dem Planeten Erde fallen, beschleunigt er mit 1g (Luftreibung vernachlässigt). Da hat man erst mal eine Vorstellung.

5 $a = U/B_{ua}$ = 333 mV/(100 mV/m/s²) = 3,33 m/s² mit a ... Beschleunigung, U ... Spannung, B_{ua} ... Empfindlichkeit

Übung 10: Empfindlichkeit

Schauen wir uns das in VibroMatrix an. Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 10. Oben sehen Sie 3 InnoMeter unten den InnoMaster mit aufgeklappter Sensor- und Messkanalliste.



Der Sensorliste ist zu entnehmen, dass 3 Sensoren im Einsatz sind, ihr Indikator leuchtet grün. In der Messkanalliste sehen Sie, welcher Sensor mit welchem Messkanal verknüpft ist. Jedes der InnoMeter misst auf einem dieser Messkanäle. Der gemessene Kennwert, der eingestellten Frequenzbereich in allen InnoMetern ist gleich. Ebenso wird in alle Messkanäle das gleiche Spannungssignal von 100 mV Amplitude bei 10 Hz eingespeist.

Woher kommen nun die Unterschiede? Dem ersten Messkanal ist kein Schwingungssensor zugeordnet, so misst das linke InnoMeter auch einfach nur das Spannungssignal, wie es die Signalsimulation verlässt, eben die eingestellten 100 mV. Dies dient als Brücke für die zurückliegenden Versuche, in denen wir noch ohne Schwingungssensoren operierten.

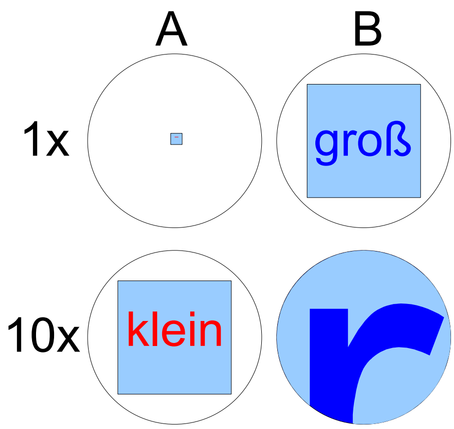
Dem zweiten Messkanal ist der Sensor Piezo 1 zugeordnet. Dieser Sensor besitzt eine Empfindlichkeit von 1 mV/m/s². Wollen Sie sich überzeugen? Dann führen Sie einen Doppelklick auf den Sensor Piezo 1 in der Sensorliste aus. Im sich öffnenden Dialogfeld sehen Sie die eingestellte Empfindlichkeit. Durch die Empfindlichkeit von 1 mV/m/s² werden die eingespeisten 100 mV nun zu 100 m/s² umgerechnet. Das sehen Sie im mittleren InnoMeter.

Dem dritten Kanal ist der Sensor Piezo 10 zugeordnet. Dieser Sensor besitzt eine Empfindlichkeit von 10 mV/m/s². Diese Empfindlichkeit führt mit den eingespeisten 100 mV zur Anzeige von 10 m/s² im rechten InnoMeter.

Verknüpfen Sie nun den Sensor Piezo 100 mit dem Messkanal 1 und sehen Sie, was passiert. Wie funktioniert das? Nun, schließen Sie zunächst alle Dialogfelder für die Sensor- oder Messkanaleigenschaften (Signalsimulation). Dann ziehen Sie mit der linken Maustaste den Sensor Piezo 100 aus der Sensorliste hinüber zur Messkanalliste und lassen ihn auf dem Eintrag Kanal 1 fallen. Nun zeigt das linke InnoMeter einen Wert von 1 m/s² an. Warum?[6]

5.3. Messverstärker und Digitalisierung

Oft muss das aus einem Sensor stammende Messsignal von der Amplitude her noch angepasst werden auf nachfolgende elektronische Einrichtungen. Diese arbeiten optimal in einem bestimmten Spannungsbereich, z.B. -10V .. +10V. Ist das eintreffende Spannungssignal zu klein, verringert sich die Genauigkeit. Ist das eintreffende Signal zu groß, wird das Signal über 10V und unter -10V abgeschnitten.



Vergrößerung 1x:
Objekt A ist nicht zu erkennen
Objekt B ist insgesamt zu erkennen
Vergrößerung 10x:
Objekt A ist nun zu erkennen
Objekt B ist im Detail sichtbar, aber Bildbereiche sind abgeschnitten

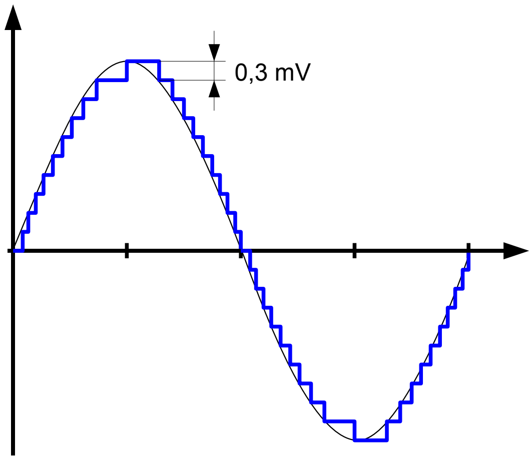
Genauso finden Sie es in der Natur vor, z.B. beim menschlichen Auge. Sie sind in der Lage, Strukturen von 1 mm aufzulösen. Was passiert, wenn die zu untersuchenden Strukturen aber nur 0,1 mm groß sind und Sie das Objekt nur mit eingeschränkter Genauigkeit sehen können? Dann nehmen Sie eine Lupe mit Vergrößerungsfaktor 10 und schauen sich diese kleinen Strukturen an. In der Lupe werden aus 0,1 mm wieder 1 mm.

Untersuchen Sie ein größeres Objekt mit Vergrößerungsfaktor 10, sehen Sie es nicht mehr in seiner Gesamtheit, es werden Teile im Bildbereich abgeschnitten. In diesem Fall, verringern Sie die Vergrößerung. Sie sehen nun weniger Details, haben aber mehr Übersicht.

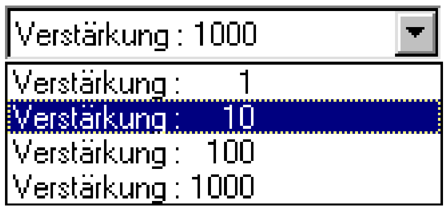
Es bedarf also einer größenmäßigen Anpassung, um sowohl kleine als auch große Objekte zu untersuchen. Ebenso ist es bei Schwingungssignalen. Beschleunigungen können in Amplituden von 0,00001 m/s² (Gebäudeschwingungen) bis zu 200 000 m/s² (Schläge Stahl auf Stahl) vorliegen. Diese hohe Spanne erfordert entsprechend angepasste Messtechnik. Die erste Anpassung wird über einen Sensor passender Empfindlichkeit getroffen. Die zweite Anpassung wird flexibel im InnoBeamer vorgenommen, durch den Verstärker. Der Verstärker ist sozusagen die einstellbare Lupe für Messsignale.

6 Ein kurzer Blick in die Sensoreigenschaften vom Sensor "Piezo 100" offenbart uns eine Empfindlichkeit von 100 mV/m/s². Mit der eingespeisten Spannung von 100 mV erhalten wir:

$a = U/B_{ua} = 100 \text{ mV}/(100 \text{ mV/m/s}^2) = 1 \text{ m/s}^2$



Das "Auge" bei VibroMatrix ist dagegen der Analog/Digital-Wandler, der in der USB-Box InnoBeamer sitzt. Dieses Gerät beziffert eintreffende Spannungswerte mit Zahlenwerten. Dies kann der A/D-Wandler nicht beliebig fein erledigen. Genau gesagt kann der A/D-Wandler im InnoBeamer L2 z.B. nur alle 0,3 mV einen Zahlenwert vergeben. Trifft das Messsignal nun mit einer Amplitude kleiner als 0,3 mV ein, kann der A/D-Wandler das Signal überhaupt nicht erkennen, trifft es mit 3 mV ein, kann er es auflösen, aber nur mit 10 Werten. Es entstehen sogenannte Quantisierungsfehler. Eine Auflösung mit nur 10 Stufen ist recht grob, denn eigentlich stehen dem A/D-Wandler 65536 Werte zur Verfügung. Die kommen aber nur dann zum Einsatz, wenn der A/D-Wandler ein Signal erhält, welches seiner vollen Skala, also den ±10V entspricht.



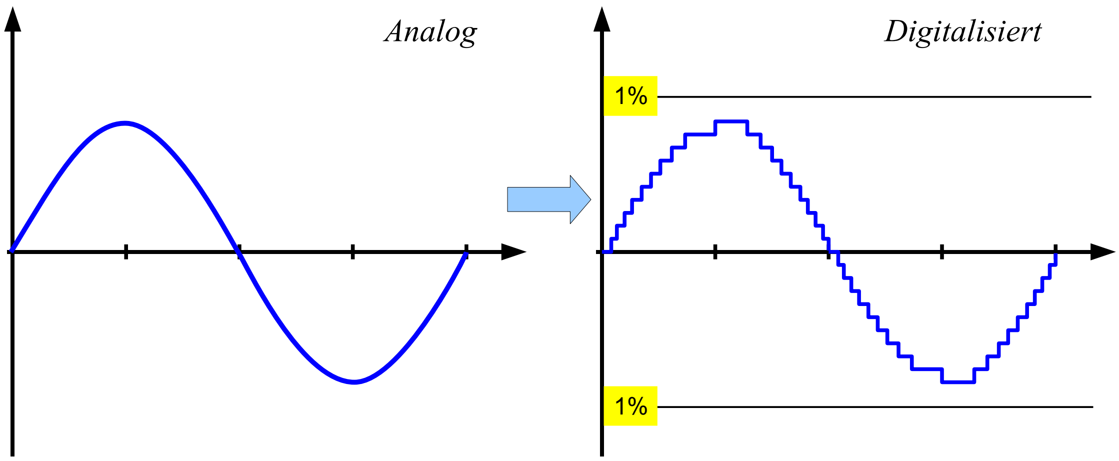
Hier kommt der Verstärker zum Einsatz. Ist das Signal zu klein für den A/D-Wandler, wird es vorher mit dem Verstärker passend vergrößert. Alle VibroMatrix Instrumente zeigen den Zustand eines zu kleinen Messsignals mittels einer LED an: <1% Und ebenso weisen alle VibroMatrix Instrumente für jeden Messkanal eine Liste mit Verstärkungen auf, welche den Verstärker im InnoBeamer steuert. Leuchtet also die <1% LED während der Messung, ist es ratsam, die Verstärkung zu erhöhen. Befindet sich das Messobjekt in Ruhe, ist es völlig unproblematisch, dass diese LED leuchtet, denn es wird nur signalisiert, dass gegenwärtig ein nur kleines Messsignal anliegt.

Aber auch der umgekehrte Fall ist möglich: Das Messsignal aus dem Sensor beträgt bereits 1 V und der Verstärker wird auf Faktor 1000 geschaltet. Entsteht nun gefährliche Hochspannung von 1000 V? Nein, es kommt zu einem Effekt namens Übersteuerung. Der Verstärker besitzt noch einige Volt Reserve über dem Messbereich ±10V, aber bei spätestens ±15V ist Schluss: Das Messsignal wird einfach an den Spitzen abgeschnitten. Damit ist keine korrekte Messung mehr möglich.

Dieser Zustand bzw. eine bedenkliche Nähe zu diesem Zustand wird in allen VibroMatrix-Instrumenten durch die Übersteuerungs-LED >95% gekennzeichnet.

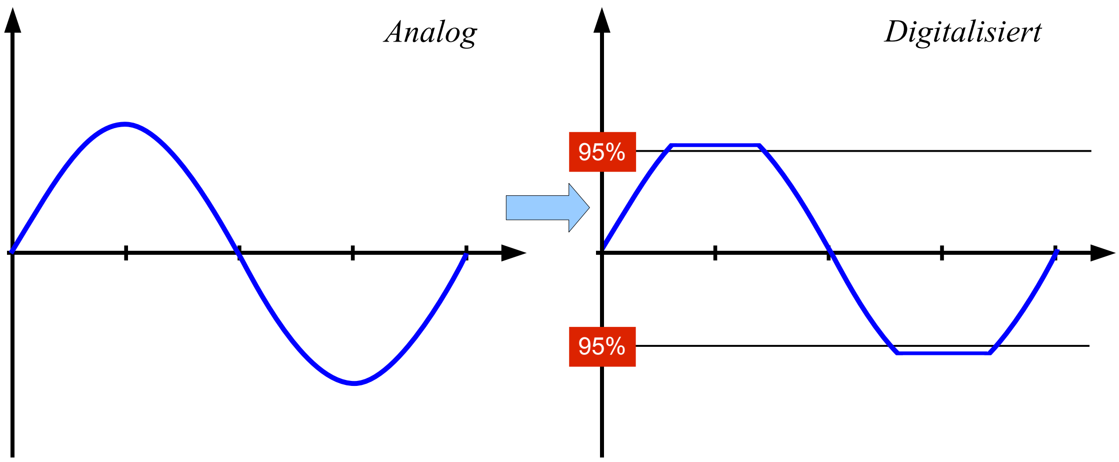
Problem 1: Zu kleine Aussteuerung

Ein zu niedriges Signal verursacht Quantisierungsfehler[7]. Abhilfe: Verstärkung erhöhen.



Problem 2: Zu hohe Aussteuerung

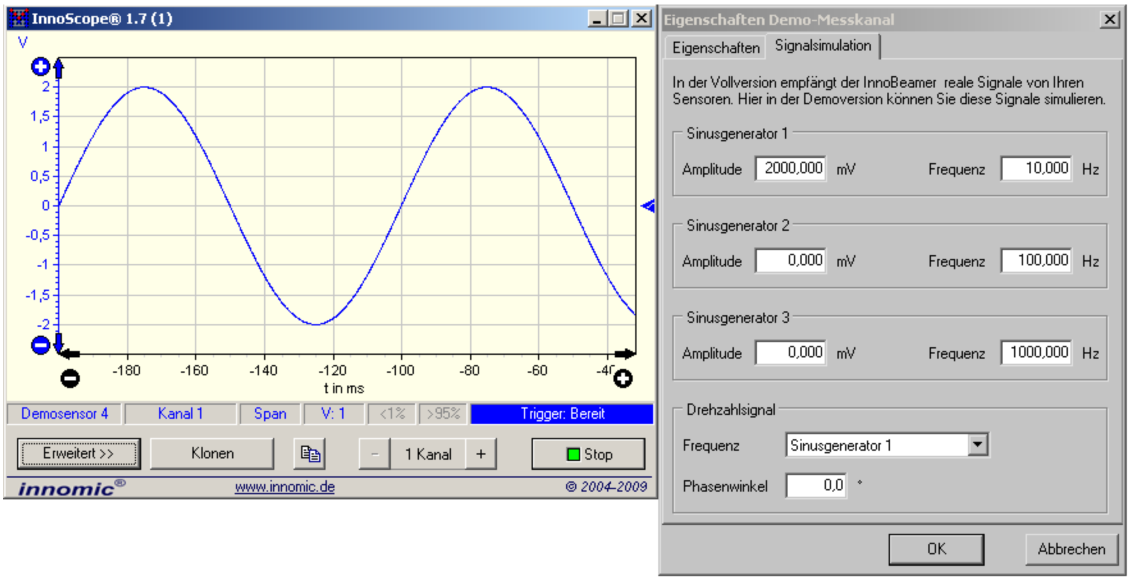
Ein zu hohes Signal führt zur Übersteuerung und wird über dem Messbereich abgeschnitten. Abhilfe: Verstärkung verringern.

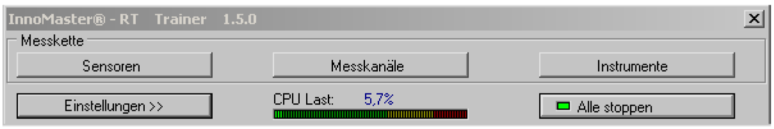


Übung 11: Verstärkung

Dies wollen wir uns im Versuch anschauen. Öffnen Sie im InnoMaster RT Trainer den Arbeitsplatz Übung 11. Öffnen Sie zudem die Signalsimulation für den ersten Kanal. Ihr Bildschirm sieht dann etwa so aus.

7 Die Darstellung ist zur Verdeutlichung übertrieben gezeichnet. In VibroMatrix gibt es nahe der 1% Grenze noch eine ausreichende Reserve von 650 Quantisierungsschritten und nicht nur 20, wie es die Grafik nahelegt.



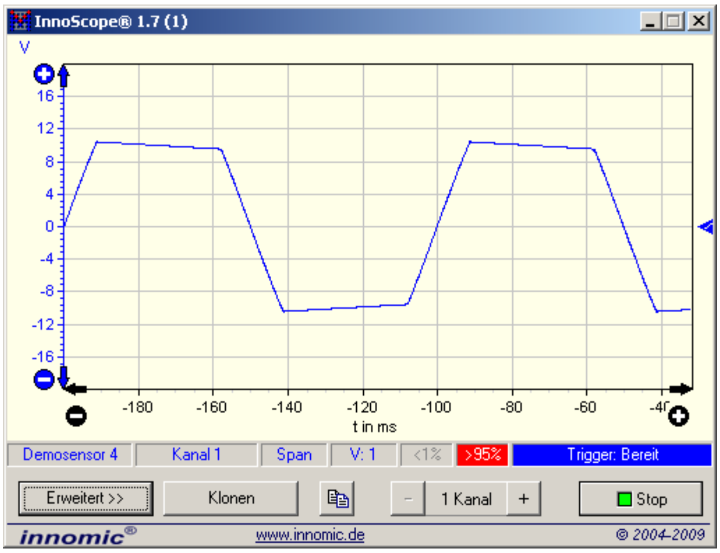


Wir schauen uns das Messsignal mit dem InnoScope an und beobachten hier auch gleich die LEDs für Über- und Untersteuerung.

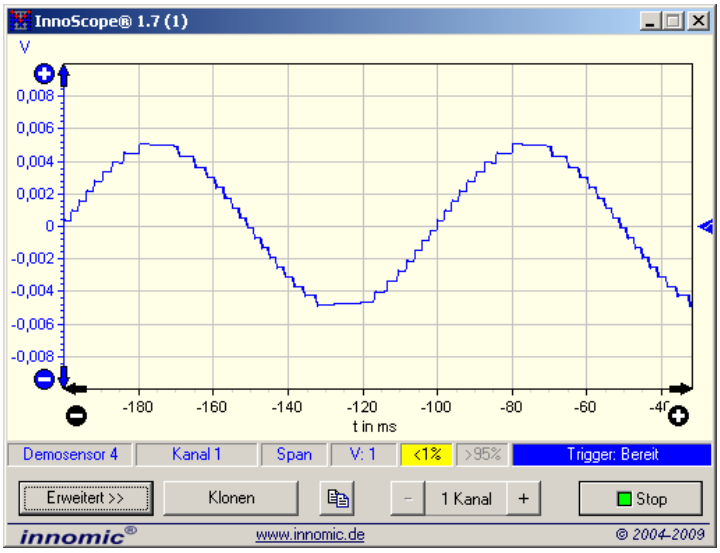
Wie erwähnt liegt der Eingangsspannungsbereich der InnoBeamer bei ±10V. Die <1% LED spricht demnach bei einem Eingangssignal mit einem Betrag von <100 mV an, die Übersteuerungs-LED >95% bei einem Betrag von >9500 mV. Beim Start simulieren wir ein Signal von 2000 mV, liegen also mitten im Messbereich und alles ist in Ordnung – keine der LEDs ist aktiv.

Ändert man die Amplitude in der Signalsimulation auf 90 mV, erscheint nach wenigen Sekunden die <1% LED. Bei Änderung der Amplitude auf 10 000 mV spricht dagegen die LED >95% an. Obwohl das Signal hier noch in Ordnung ist, wird eine gefährliche Nähe zur Übersteuerung erreicht.

Und wie sieht ein abgeschnittenes Signal aus? Geben Sie einfach mal 20 000 mV als Amplitude in die Signalsimulation ein. Oder öffnen Sie den Arbeitsplatz Übung 11a. Die Spitzen des Sinussignals sind abgeschnitten. Dass der Schnitt nicht waagerecht erfolgt, liegt an den immer aktivierten Filtern des InnoScopes. Natürlich warnt hier die Übersteuerungs-LED >95%.

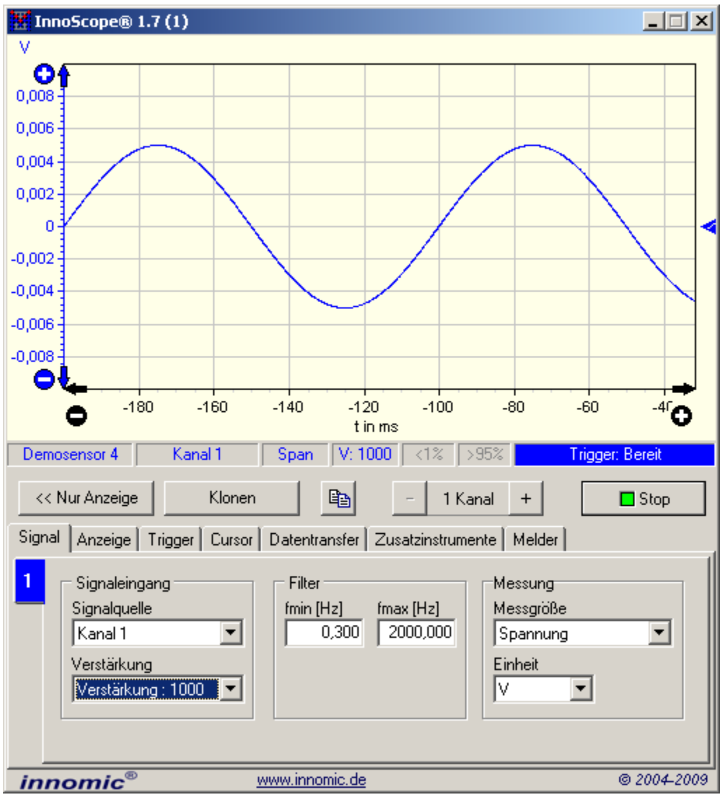


Möchten Sie Quantisierungsfehler im InnoScope durch zu geringe Aussteuerung sehen? Öffnen Sie einfach Arbeitsplatz Übung 11b. Es sind deutlich die Schritte des A/D-Wandlers zu erkennen. Die Messung kann immer noch ausreichend genau sein. Aber der Quantisierungsfehler spielt bereits eine signifikante Rolle. Die <1% LED macht auf diese Gefahr aufmerksam.

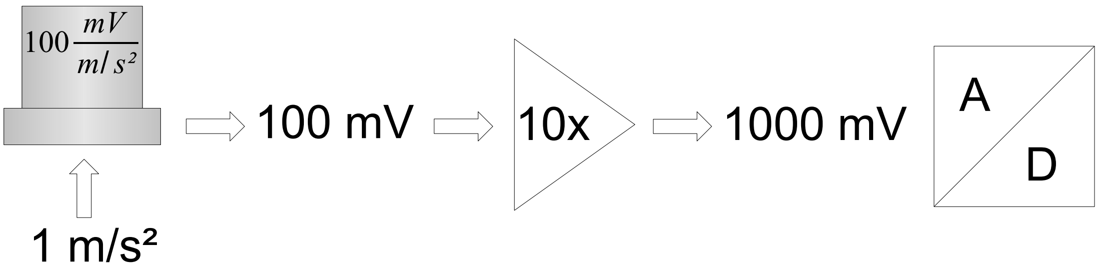


Abhilfe ist vorhanden: Stellen Sie einfach im InnoScope die Verstärkung auf 1000. Schon werden aus den eingespeisten 5 mV am A/D Wandler anliegende 5000 mV. Das passt wieder wunderbar, alle LEDs verlöschen und das Signal wird sehr sauber gemessen und dargestellt.

Wie Sie bemerken, verändert das angezeigte Signal sich nicht im Pegel. Der Faktor 1000, welcher durch die Verstärkung ins Spiel kommt, wird durch VibroMatrix automatisch wieder in den Messdaten korrigiert.



Die Messkette, welche ein Schwingungssignal in VibroMatrix somit durchläuft ist daher beispielhaft folgende:



1 m/s² wirken auf den Sensor ein. Durch die Sensorempfindlichkeit von 100 mV/s² werden daraus 100 mV. Für eine bessere Ausnutzung des A/D-Wandler Messbereichs wird das Signal mit Faktor 10 verstärkt. Nun kommen hier 1000 mV an. Das Signal wird mit hoher Qualität digitalisiert und der Datenstrom für weitere Berechnungen an die VibroMatrix-Instrumente geleitet.

Jetzt, da wir die Beziehung zwischen der Schwingungsgröße, Signalspannung und Verstärkung kennen gelernt haben, wollen wir in den folgenden Versuchen mechanische Schwingungsgrößen wie Schwingbeschleunigung, Schwinggeschwindigkeit und Schwingweg einsetzen.

6. Frequenzanalyse mit FFT

6.1. Überblick

Den Zweck der Frequenzanalyse oder auch Schwingungsanalyse hatten wir schon in den Grundlagen besprochen: Ein Gemisch von Schwingungen soll wieder in seine Einzelteile zerlegt werden. Die Einzelteile sind Sinussignale unterschiedlicher Frequenz und Amplitude. Die Frequenzanalyse zeigt uns Frequenz und Amplitude aller Einzelschwingungen an.

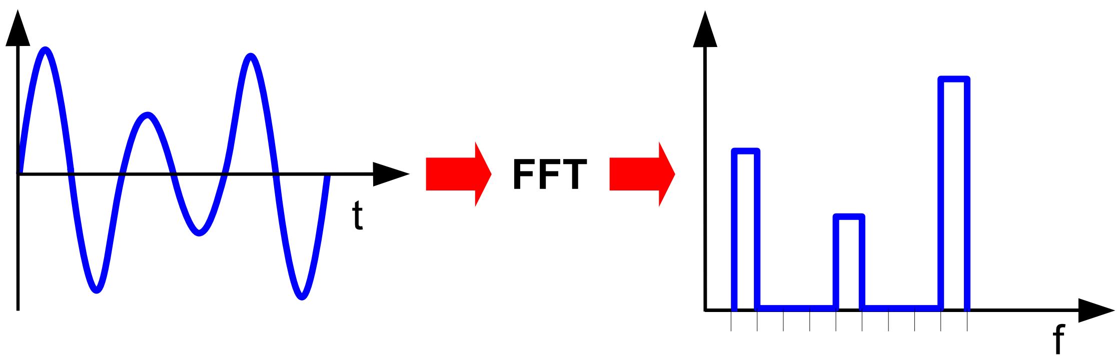
Um dies zu erreichen, gibt es verschiedene technische Verfahren. Seit dem Zeitalter der digitalen Signalverarbeitung hat die rechnerisch durchgeführte Fast Fourier Transformation FFT an Verbreitung gewonnen.

Wie so oft in der praktischen Anwendung sind Techniken bestimmten Beschränkungen unterworfen. Welche das bei der FFT sind und wie man seine Messbedingungen ausreichend günstig gestaltet, wollen wir hier näher beleuchten.

Wir werden dazu den Bereich der erweiterten FFT-Einstellungen im VibroMatrix-Instrument InnoAnalyzer anfassen. Es sei erwähnt, dass der InnoAnalyzer auch 2 Automatikmodi bietet, wo man sich nicht weiter mit diesen Details auseinandersetzen muss. Jedoch erhöht der nachfolgende Abschnitt auch das Verständnis dafür, wie die Automatikmodi funktionieren.

6.2. Bedingung 1: Ausreichend lang messen

Um aus einem Signalgemisch die Einzelkomponenten ermitteln zu können, wird zunächst ein Stück des Signals im Zeitbereich benötigt. Es ist nun der FFT zueigen, dass die Auflösung für die einzelnen Frequenzpunkte durch die Länge des aufgezeichneten Signals bestimmt wird.



Man könnte die Amplitude an jedem beliebigen Frequenzpunkt bestimmen, wenn man unendlich lang misst. Mit unendlich langen Vorgängen möchte man sich zu Lebzeiten ungern abgeben, daher muss die Messdauer begrenzt werden, z.B. auf 1 Sekunde.

Führen Sie ein Zeitsignal mit 1 Sekunde Länge der Frequenzanalyse zu, können Sie eine Auflösung von 1 Hz erreichen. Sie bekommen dann exakte Werte für die Frequenzen 0 Hz , 1 Hz, 2 Hz usw.

Und was ist mit Schwingungen zwischen diesen Frequenzen? Was ist z.B. mit einer Schwingung bei 1,6 oder 2,4 Hz? Diese Schwingungen bilden sich zum großen Teil in den benachbarten Linien ab. Eine Schwingung bei 1,6 Hz wird zum Teil der Linie bei 1 Hz und zum Teil der Linie bei 2 Hz zugeschlagen. Sie werden mit den gegebenen

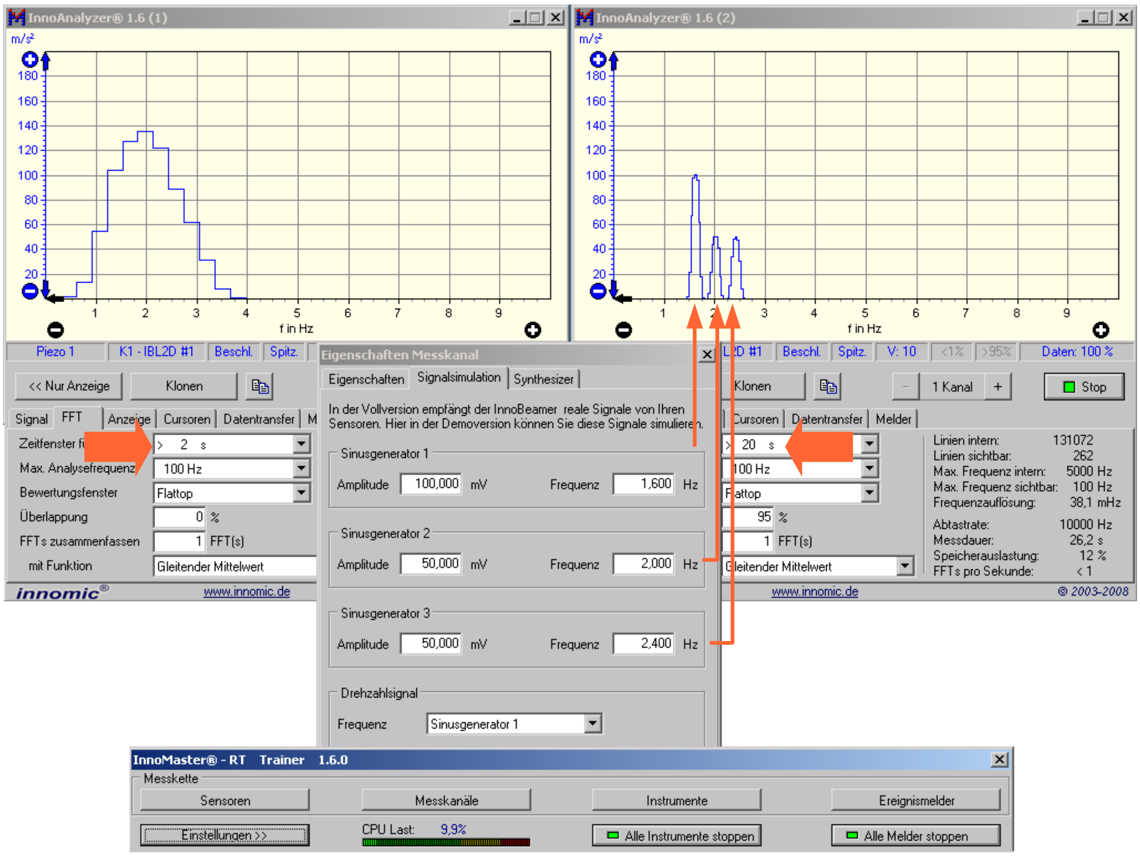
Messbedingungen nicht unterscheiden können, ob eine Amplitude nun genau bei 2,0 Hz liegt oder aber vielleicht bei 1,6 oder 2,4 Hz. Vielleicht sind auch hohe Amplituden bei allen 3 dieser Frequenzen vorhanden - Sie sehen dies aber nicht.

Das klingt etwas wie Erbsenzählerei, aber rechnet man die Frequenzen von Hz in Drehzahlen [1/min] um, dann bedeuten 1,6 Hz = 96 1/min und 2,4 Hz = 144 1/min. Diese Unterschiede in der Drehzahl können für Maschinenbauer schon bedeutsam sein.

Wie kommt man also an diese Zwischenwerte? Ganz einfach: Die Messdauer für das Zeitsignal muss erhöht werden. Mit 10 Sekunden Messdauer erhöht sich die Frequenzauflösung bereits auf 0,1 Hz. Jetzt haben Sie tatsächlich Werte für 1,6 oder 2,4 Hz.

Übung 12: FFT mit unterschiedlich langen Zeitsignalen

Zeit, um das zu testen. Öffnen Sie den Arbeitsplatz Übung 12. Sie erhalten 2 InnoAnalyzer. Beide werden mit dem selben Signal gespeist. Die Werte für Amplituden und Frequenzen sind im Eigenschaftsfenster des Messkanals zu sehen.



Im linken InnoAnalyzer wird eine Messdauer von etwa 2 Sekunden verwendet, im rechten von ca. 20 s. Zwar dauert es im rechten Fenster etwas länger, bis das Signal analysiert ist. Jedoch können wir hier klar die Einzelfrequenzen von 1,6 Hz, 2,0 Hz und 2,4 Hz erkennen und auch die Amplitude ablesen.

Nachfolgend eine kleine Tabelle von Messdauern und Auflösungen bei der Frequenzanalyse:

Messdauer	**Frequenzauflösung**
0,1 s	10,00 Hz
1,0 s	1,00 Hz
10,0 s	0,10 Hz
100,0 s	0,01 Hz

Also: Wenn Sie eine hohe Auflösung in der Frequenzachse erreichen wollen, muss zunächst das Schwingungssignal eine ausreichende Zeit lang messbar sein. Bei periodischen Bewegungen, wie einem mit konstanter Drehzahl rotierenden Teil, ist das der Fall.

Wo kann denn die Messdauer für die Frequenzanalyse in VibroMatrix beeinflusst werden?

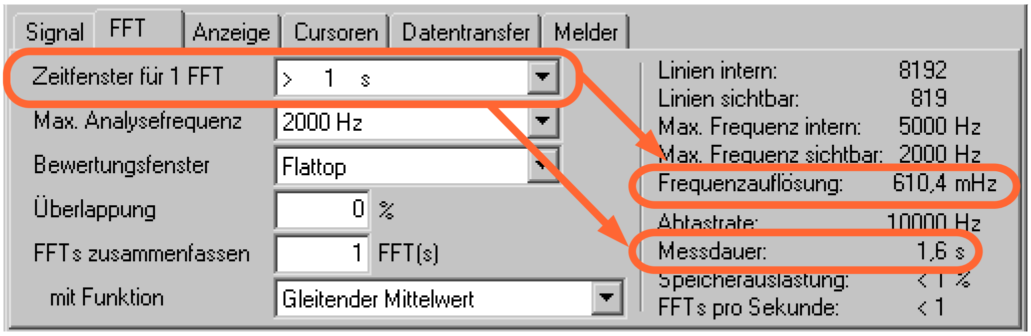
Diese Einstellung ist direkt zugänglich, wenn Sie in den Signaleinstellungen den FFT-Modus Erweiterten Einstellungen für FFT wählen.

Dann wird eine Bedientafel FFT sichtbar. In dieser Bedientafel finden Sie das Eingabefeld Zeitfenster für 1 FFT.

1 FFT deshalb, weil sich mehrere FFT-Analysen auch rechnerisch verknüpfen lassen, z.B. mit Mittelwertbildung. Die Frequenzauflösung erhöht sich jedoch durch solche Verfahren nicht. Da ist entscheidend, wie lange das Zeitsignal für die einzelne FFT vorhanden ist.

Nun fragt man sich vielleicht, warum als Zeitfenster nur solche "diffusen" Angaben wie > 1 s zur Auswahl stehen. Warum z.B. nicht genau 1,0 Sekunden? Dies hat mit dem inneren Mechanismus der FFT-Berechnung zu tun. Die Fast Fourier Transformation ist ein Spezialfall der Diskreten Fouriertransformation (DFT). Damit sie richtig *fast* wird, also schnell, muss die Anzahl der zugeführten Messwerte eine Potenz von 2 sein. Mit 2

Werten, mit 4, 8, 16, ... 8192, 16384, usw. kann die FFT besonders effizient berechnet werden. Diese Effizienz nutzen wir in VibroMatrix. Daher ergeben sich zusammen mit der Abtastrate bisweilen Zeitfenster für die FFT, die eben nicht genau auf volle Sekundenwerte fallen. Das aber ist kein Problem, denn in VibroMatrix werden Ihnen die Werte zur tatsächlichen Messdauer und zur Frequenzauflösung ebenfalls angezeigt.



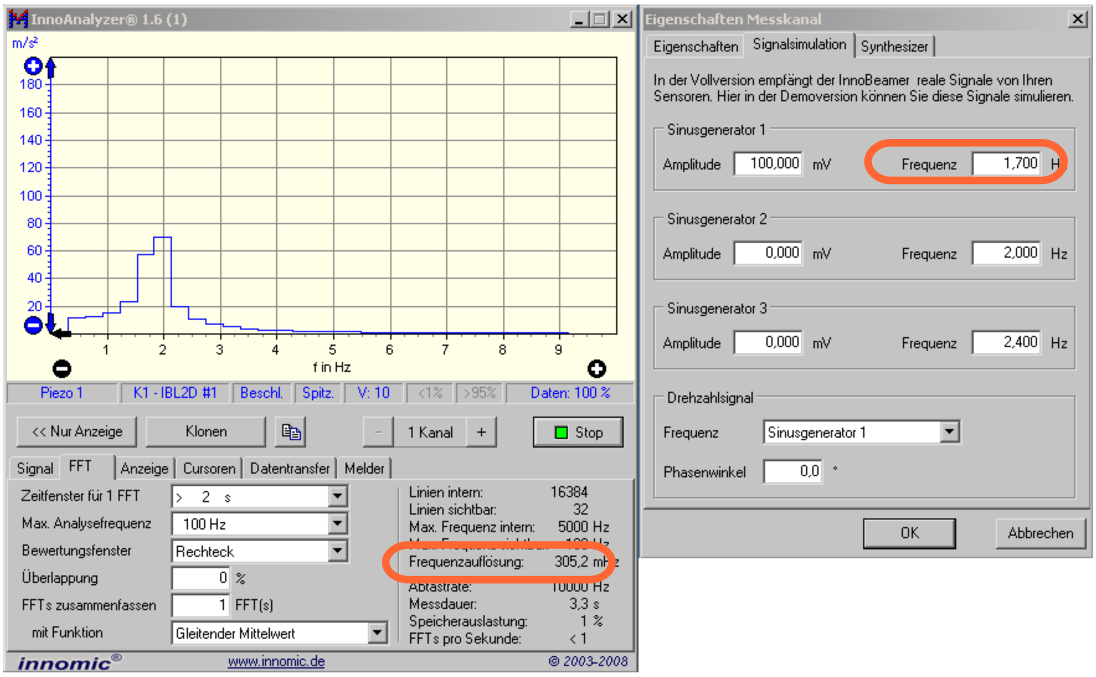
6.3. Bedingung 2: Die passende Fensterfunktion

Die geheimnisumwitterten Fensterfunktionen finden sich in nahezu jedem FFT-Analysator. Worum geht es? Um den Leckeffekt. Wie bitte?

Der Reihe nach. Wir hatten eingangs festgestellt, dass wir bei endlicher Messdauer auch nur eine endliche Frequenzauflösung erhalten. Nochmal unser Beispiel: Wir messen 1 Sekunde und haben 1 Hz Frequenzauflösung. Ganz exakt abgebildet werden Schwingungen bei 1 Hz, bei 2 Hz, bei 3 Hz usw. Wie aber erscheint eine Schwingung in dieser Frequenzanalyse, die z.B. bei 1,6 oder 2,4 Hz auftritt?

Wir untersuchen das in Übung 13. Sie sehen einen InnoAnalyzer mit einer Frequenzauflösung von 305,2 mHz also 0,3052 Hz.

Übung 13: Der Leckeffekt

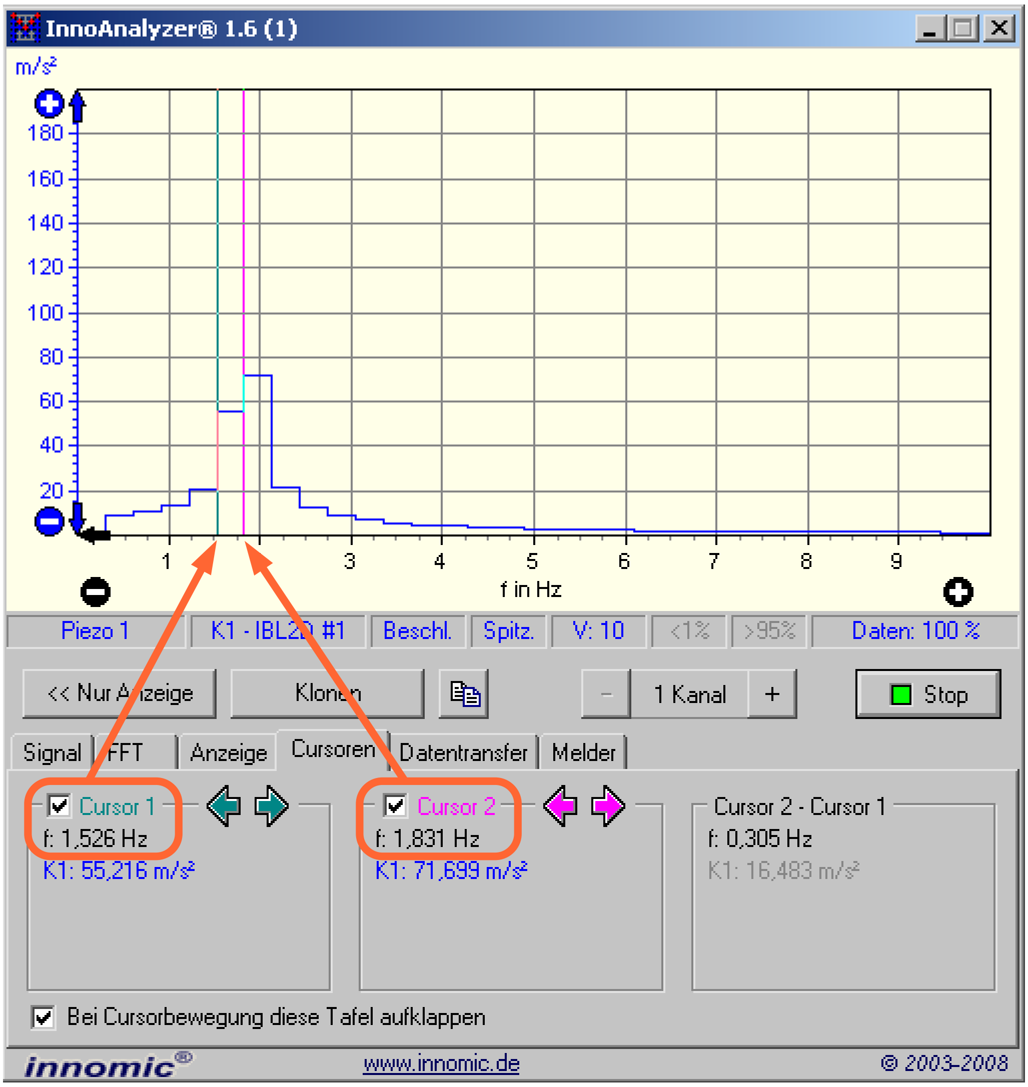


Wir haben also exakte[8] Darstellungen bei

Faktor	Frequenz
1	0,305 Hz
2	0,610 Hz
3	0,916 Hz
4	1,221 Hz
5	1,526 Hz
6	1,8312 Hz
...	

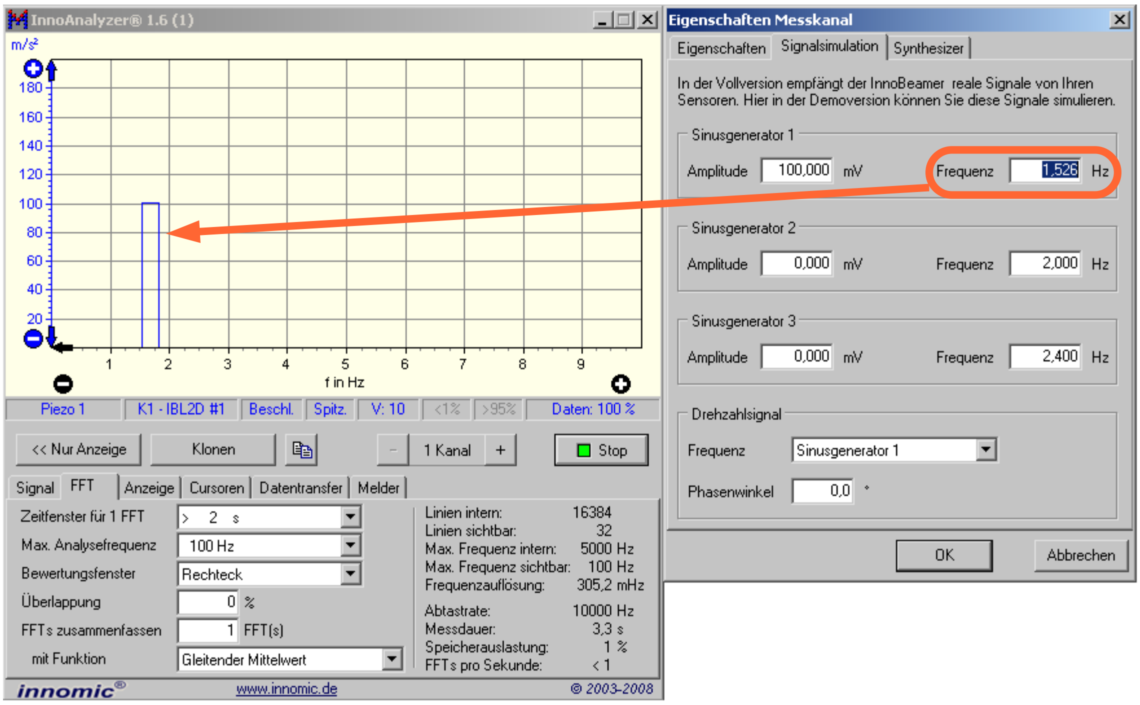
Eingespeist wird ein Signal von 1,7 Hz. Dieses passt auf keines der Vielfachen von 305,2 mHz. Die 1,7 Hz liegen am nächsten zum 6fachen der Frequenzauflösung, und daher hat das Signal in der Frequenzanalyse auch ein Maximum bei 1,8312 Hz. Danach wäre der zweitnächste Punkt das 5fache, also 1,526 Hz. Daher findet sich ein kleinerer Teil dieser Schwingfrequenz an diesem Punkt.

8 3 Stellen nach dem Komma genügen hier.



So geht es immer weiter. Das Signal läuft förmlich nach unten hin aus und so heißt dieses Phänomen bezeichnenderweise auch Leckeffekt.

Probieren Sie mal Folgendes: Verstellen Sie das eingespeiste Signal auf ein Vielfaches unserer Frequenzauflösung, z.B. auf 1,526 Hz. Das Ergebnis sehen Sie im nächsten Bild.



Eine reine Darstellung mit Leckeffekt Null. In der Praxis können wir uns jedoch die Schwingfrequenzen nicht so hinzimmern, wie wir sie brauchen. Wir müssen messen, was kommt. Die Fensterfunktionen helfen uns, die schädlichen Eigenschaften des Leckeffekts zu mindern.

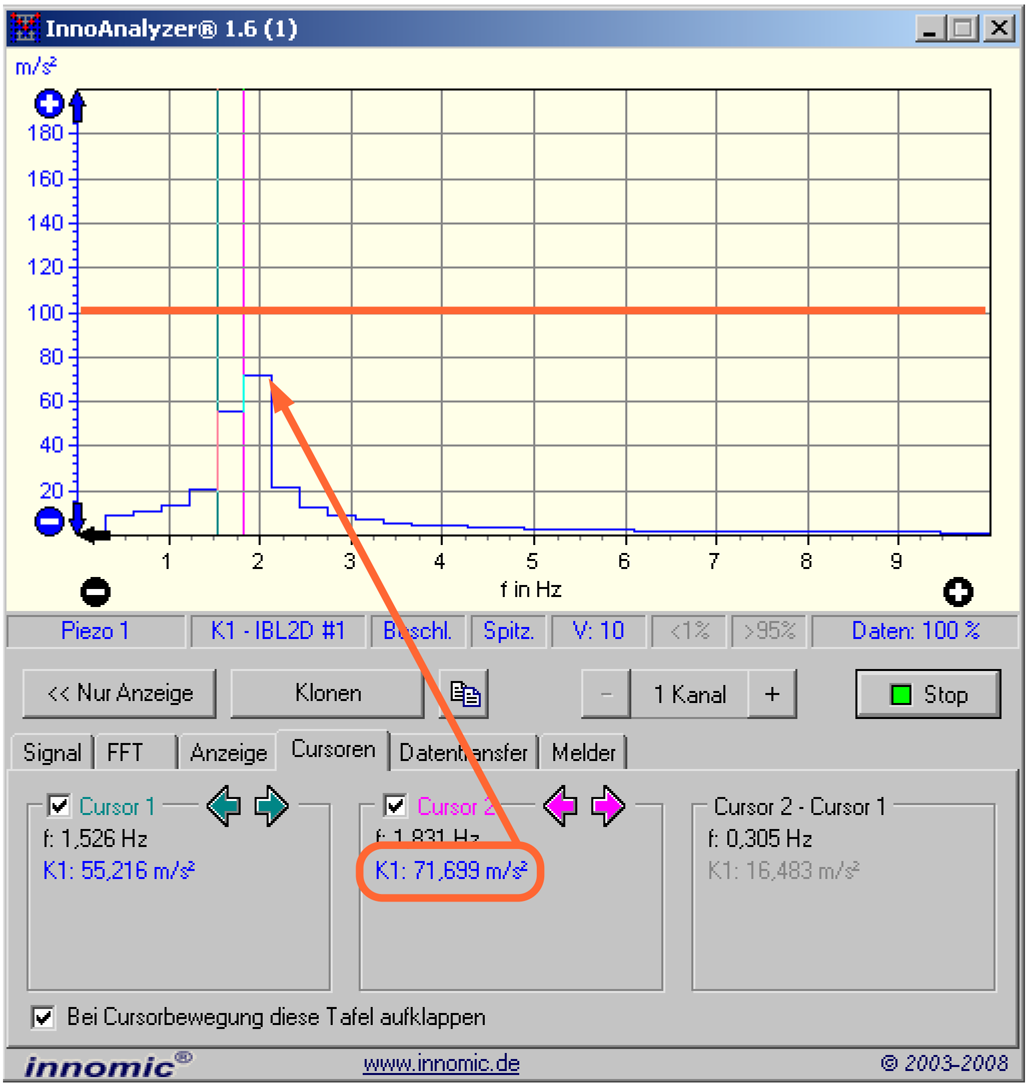
Wie kann man sich Fensterfunktionen vorstellen? Nun, wir geben der FFT nicht mehr direkt das im Zeitbereich aufgenommene Messsignal zur Verarbeitung, sondern verändern dieses Stück Zeitsignal. Alle Messwerte werden noch einmal mit einer mathematischen Funktion (der Fensterfunktion) multipliziert. Dieses Ergebnis wird dann in die Frequenzanalyse gegeben.

Multipliziert man alle Messwerte mit 1, belässt man das Signal, wie es ist. Man spricht dann von einem Rechteck-Fenster.

Es sei vorausgeschickt, dass wir mit keiner der Fensterfunktionen alle schädlichen Auswirkungen des Leckeffekts werden beseitigen können. Wenn die Schwingfrequenz nicht auf ein Vielfaches der Frequenzauflösung fällt, werden wir keine so saubere Darstellung erreichen wie die obige.

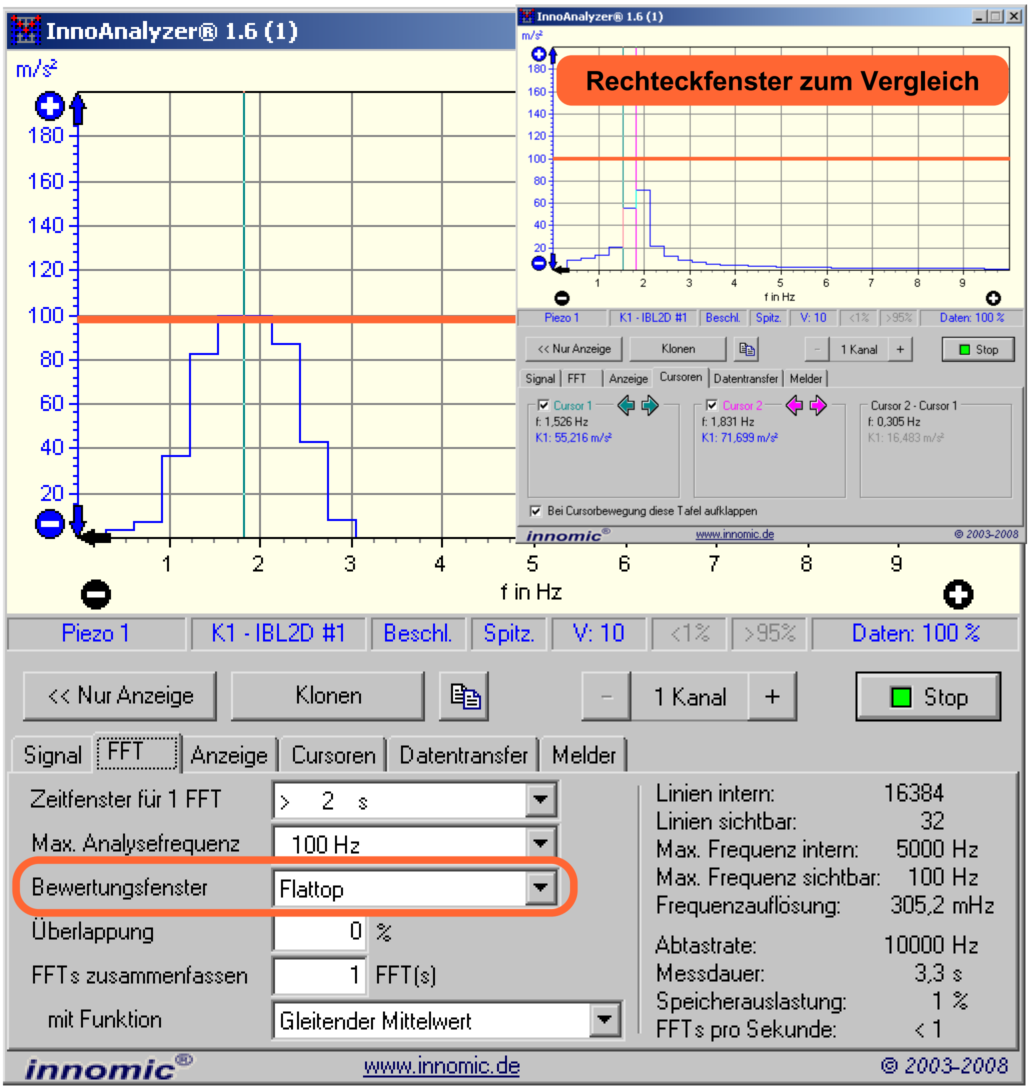
Amplitude rekonstruieren mit Flattop-Fenster

Ein Manko des Leckeffekts ist, dass sich die Energie des Signals nicht mehr auf einer einzelnen Frequenzlinie konzentriert. Dadurch werden geringere Amplituden angezeigt, als vorhanden. Nehmen wir doch noch einmal unsere Übung 13 und stellen die Schwingfrequenz wieder auf 1,7 Hz.



Wir speisen das Signal mit einer Amplitude ein, welche rechnerisch mit 100 m/s² hätte dargestellt werden müssen. Tatsächlich hat die höchste Amplitude aber nur den Wert 71,699 m/s².

Korrekte Amplituden für einzelne Frequenzen bekommt man gut mit dem Flattop-Fenster dargestellt.



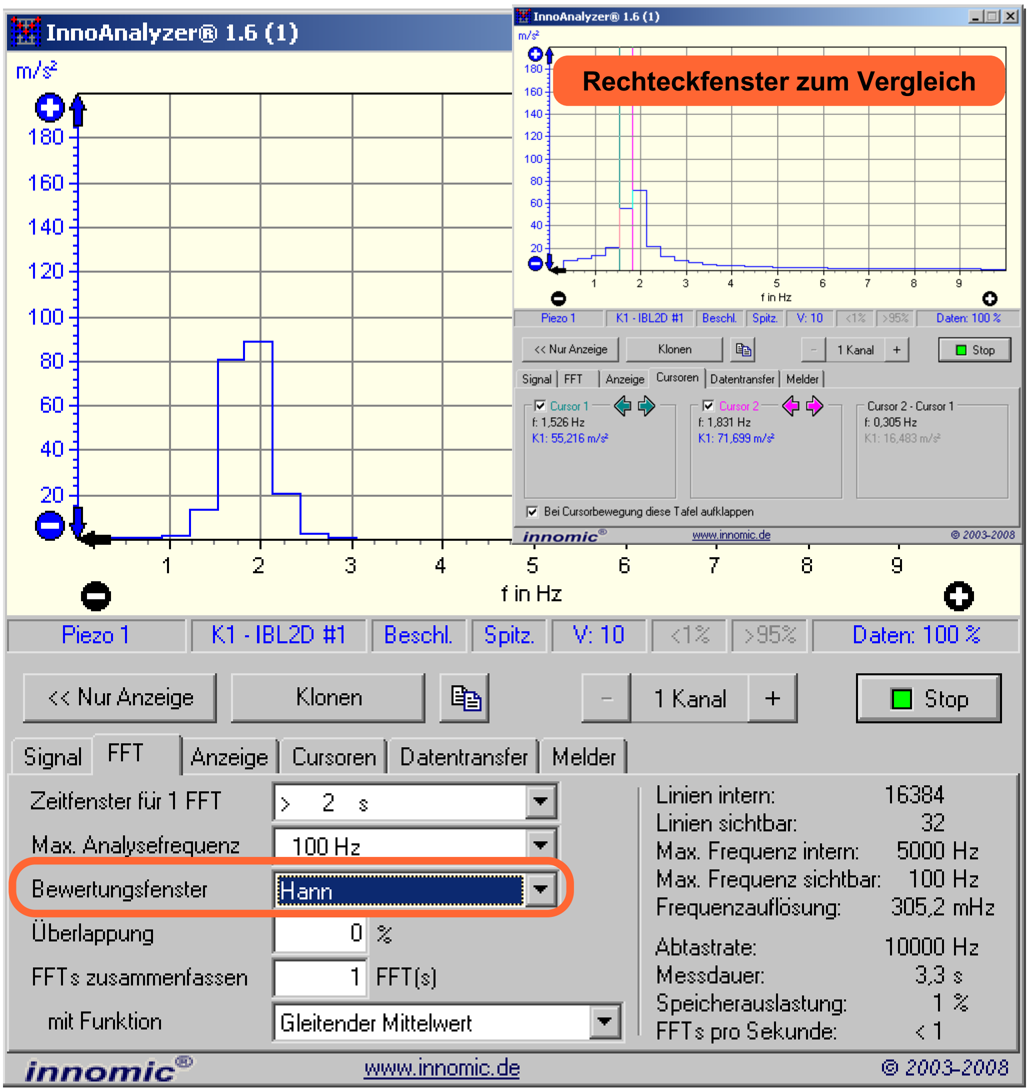
Zwar verläuft die Darstellung immer noch über die benachbarten Frequenzlinien. Jedoch erreicht die Frequenzlinie mit der maximalen Amplitude auch tatsächlich die eingespeisten 100 m/s².

Im FFT-Modus Automatik für periodische Vorgänge, optimierte Amplitudengenauigkeit ist daher auch das Flattop-Fenster eingestellt.

Frequenzen restaurieren mit Hann-Fenster

Das Hann-Fenster wird oft (sogar in ISO Normen) fälschlicherweise als Hanning-Fenster bezeichnet. Das Fenster wurde nach dem Mathematiker Julius von Hann benannt. Zufällig gibt es noch eine Fensterfunktion, die ähnlich lautet, nämlich Hamming. Das vermischte sich im Sprachgebrauch und Hann wird oft zu Hanning.

Das Hann-Fenster sorgt dafür, dass die Schwingfrequenz des Signals möglichst in der Hauptlinie erscheint und die Amplituden in den Seitenlinien minimiert werden.



Zwar verläuft die Darstellung immer noch über die benachbarten Frequenzlinien. Gegenüber dem Rechteck-Fenster ist der Leckeffekt jedoch schon deutlich gemindert und nur noch wenige Seitenlinien weisen sichtbare Amplituden auf.

Im FFT-Modus Automatik für periodische Vorgänge, optimierte Frequenzgenauigkeit ist daher auch das Hann-Fenster eingestellt.

6.4. Automatikmodi im InnoAnalyzer

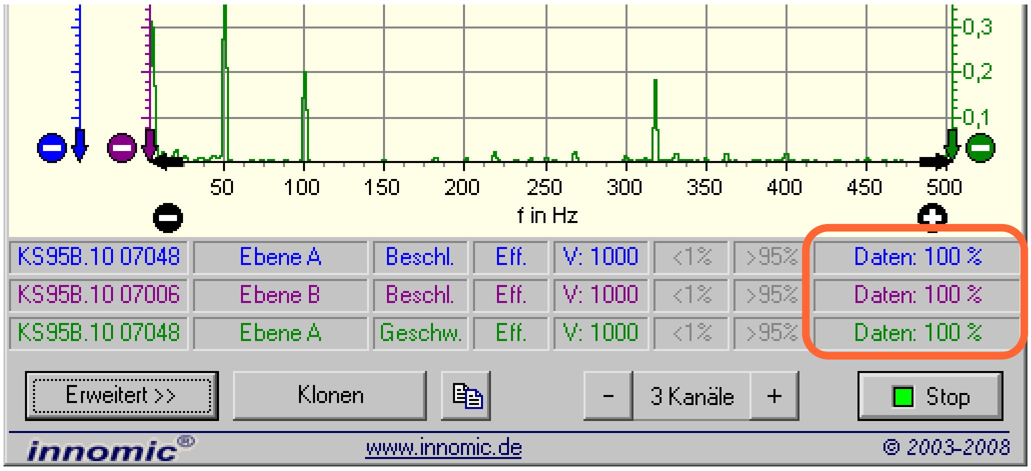
Der InnoAnalyzer kennt 2 Automatikmodi für die Frequenzanalyse,

- Automatik für periodische Vorgänge, optimierte Frequenzgenauigkeit
- Automatik für periodische Vorgänge, optimierte Amplitudengenauigkeit

Wie besprochen liegen den Modi das Hann- bzw. das Flattop-Fenster zugrunde. Aber auch die Messdauer stellt sich automatisch ein. Der InnoAnalyzer wählt die Messdauer automatisch derart, dass alle auf dem Monitor darstellbaren Linien auch mit einer errechneten Frequenzlinie belegt werden. Mehr Linien zu errechnen, als darstellbar sind, macht keinen Sinn und weniger Linien führen zu sichtbaren Treppenstufen.

Der Anwender wählt sich einfach den Frequenzbereich, den er sehen möchte durch Zoomen oder Verschieben der Frequenzachse, und bekommt die FFT automatisch in optimaler Darstellung. Wenn eine besonders hohe Auflösung gewählt wird, indem nur eine kleiner Ausschnitt der Frequenzachse eingestellt wird, führt das natürlich zu verlängerten Messzeiten. Das wurde auf S.39 erläutert.

Durch das bereits erläuterte Überlappungsverfahren (S.17) werden jedoch schon Messwerte dargestellt, bevor das Zeitsignal vollständig eingelesen wurde. Inwieweit ein vollständiges Zeitsignal vorliegt, zeigt eine Fortschrittsanzeige rechts in der Statusleiste eines Kanals an.



Wenn also die Werte in der Frequenzanalyse sich scheinbar erheben, dann ist dies ein Resultat der vorweggenommenen Auswertung, bevor das Signal komplett eingelesen wurde. Erst wenn die Fortschrittsanzeige 100% anzeigt, ist das Messsignal vollständig in die FFT eingegangen.

Die automatische Einstellung führt jedoch auch zu einem Stop/Start der Frequenzanalyse, wenn die Frequenzachse verschoben oder gezoomt wird. Der Grund: Die FFT-Parameter für die optimale Anzeige werden neu berechnet und die FFT neu aufgebaut.

Wer frei in der FFT die Frequenzachse zoomen und verschieben möchte, ohne dass die Messung unterbrochen wird, der greift zu den erweiterten Einstellungen und bestimmt die FFT-Parameter selbst.

6.5. Tipps für die FFT

- Für die gewollte Frequenzauflösung ausreichend lange messen. Bei periodischen Schwingungen, wie von rotierenden Teilen, sollte das kein Problem sein.
- Die korrekten Amplituden einzeln hervortretender Frequenzlinien können mit dem Flattop-Fenster sehr gut ermittelt werden.
- Trennschärfe zwischen einzelnen Frequenzen bringt das Hann-Fenster oder auch eine weitere Erhöhung der Messdauer.

An dieser Stelle endet unsere Einführung. Für die Messpraxis halten wir weitere Schulungsmaterialien bereit.

Ihr VibroMatrix Team