

PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM FÜR FORTGESCHRITTENE

SIGNAL/RAUSCH-VERBESSERUNG

W. Richter

Inhalt	Seite
1. Versuchsziel	2
2. Einführung	2
2.1 Rauschen	2
2.2 Verminderung von Einstreuungen	4
2.3 Signal/Rausch-Verbesserung	8
2.3.1 Filter	8
2.3.2 Signalmittelung	10
2.3.3 Lock-In Verstärker	12
3. Fragen zur Vorbereitung	14
4. Aufgaben	15
4.1 Mittelung und Fouriertransformation	15
4.2 Theorem von Nyquist	15
4.3 Signalfilterung	16
4.4 Lock-In Technik	16
5. Literatur	17
6. Beschreibung des Messprogramms	18

1. Versuchsziel

Bei dem Versuch Signal/Rausch-Verbesserung werden verschiedenste Rausch- und Störquellen beschrieben, die einem Messsignal überlagert sein können. Im Versuch wird diskutiert, welche grundsätzlichen Methoden es zur Unterdrückung bzw. zur Beseitigung dieser Einflüsse gibt. Dabei werden unterschiedliche zeitliche Signalformen mit überlagertem Rauschen mittels der „Fast Fourier Transformationsmethode“ (FFT) analysiert und zusammen mit den Ein- und Ausgangssignalen diskutiert. Neben dem ‘Signal Averaging’ (Mittelung) werden grundlegende Filtertechniken wie Hoch-, Tief-, und Bandpass angewendet.

Das Lock-In Verfahren, eine weitere äußerst wichtige Methode zur Signal/Rausch-Verbesserung, kommt in einem zweiten Versuchsteil zur Anwendung. Dabei wird die Funktionsweise eines Lock-In Verstärkers dargestellt und es werden mögliche Einsatzbereiche aufgezeigt.

2. Einführung

2.1 Rauschen

Die meisten physikalischen Messungen benutzen mittlerweile elektronische Datenerfassung. Dabei stößt man oft bis an die Grenze der Messgenauigkeit vor. Die natürlichen Grenzen der Messgenauigkeit sind physikalisch durch die Unschärferelation und technisch durch das Rauschen der Elektronik gegeben. Neben den fundamentalen Rauschquellen, auf die im Folgenden noch näher eingegangen wird, gibt es Störungen, die von Einstreuungen aus der Umgebung der Messapparatur herrühren und die durch geeignete Verdrahtung und Abschirmung ausgeschaltet werden können. Hierbei handelt es sich meist nicht um stochastische Rauschsignale wie z.B. Störfelder von Elektromotoren oder das sogenannte „50 Hz-Netzbrummen“.

Im weitesten Sinn bezeichnet man als Rauschen jede Art von unerwünschte stochastischer Beimischung zum Messsignal. Im Folgenden sollen aber die von Umwelteinflüssen herrührende Störungen nicht weiter betrachtet werden, sondern nur das Rauschen, das eine fundamentale Eigenschaft jeder elektronischen Apparatur ist. Hierbei unterscheidet man 3 Typen von Rauschen: das **thermische Rauschen**, das **Schrotrauschen** und das **Funkelrauschen** (letzteres wird auch als 1/f-Rauschen bezeichnet).

Thermisches Rauschen

Das thermische Rauschen rührt von der statistischen Bewegung der Elektronen und anderer freier Ladungsträger her, die erst am absoluten Nullpunkt verschwindet. Eine Mittelung des thermischen Rauschens über einen genügend langen Zeitraum ergibt Null, weil es sich um statistische Fluktuationen handelt. In jedem Augenblick erhält man aber einen resultierenden Strom in einer Richtung. Für die zugehörige Rauschspannung u_R (Effektivwert) an einem Widerstand R gilt:

$$u_R^2 = 4kTRB \quad (1)$$

Mit k = Boltzmannkonstante, T = absolute Temperatur und B ist die Bandbreite des Messinstruments ($f_{\max} - f_{\min}$, die Differenz aus maximaler und minimaler verarbeiteter Frequenz). Das thermische Rauschen nimmt mit der Temperatur, dem Widerstand und der Bandbreite zu, es ist aber unabhängig von der Frequenz, oder anders ausgedrückt: es tritt bei allen Frequenzen auf. Deshalb wird es oft als "weißes Rauschen" bezeichnet.

Die Größe des thermischen Rauschens ist nicht unerheblich. Sie beträgt z.B. für einen 100 k Ω -Widerstand bei Zimmertemperatur 4 μ V, wenn das Rauschen mit einem Instrument mit 10 kHz Bandbreite gemessen wird. Diese Größe ist für sich genommen noch nicht erheblich, wenn jedoch der Widerstand den Eingang eines Verstärkers mit einer Verstärkung von 10⁵ bildet, so ergibt sich an Ausgang des Verstärkers fast ein halbes Volt.

Aus dem obigen Ausdruck erhält man die Rauschleistung durch Division mit R.

$$P_R = 4 kTB \quad (2)$$

Die Rauschleistung hängt nur von der Temperatur und der Bandbreite des Messinstruments ab.

Schrotrauschen

Das Schrotrauschen (shot noise) ist das Ergebnis der Quantelung der elektrischen Ladung. Der Ausdruck, der von Schottky für die Vakuumdiode abgeleitet wurde, lässt sich auf alle Übergänge anwenden:

$$i_R^2 = 2eIB \quad (3)$$

mit i_R = Effektivwert des Rauschstroms, e = Elektronenladung, I = Gleichstrom, B = Bandbreite.

Da das Schrotrauschen mit der statistischen Bewegung von Ladungsträgern zu tun hat, zeigen Röhren (einschließlich Sekundärelektronenvervielfacher), Dioden, Transistoren und alle derartigen Bauelemente diesen Effekt. In Transistoren sind die Ströme durch die Emitter-Basis- und die Kollektor-Basis - Dioden die Ursachen für das Schrotrauschen. Die Rauschleistung für das Schrotrauschen kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$P_R = i_R^2 R = 2eIRB \quad (4)$$

wobei R der Widerstand des betreffenden Übergangs ist.

Wie das thermische Rauschen, so ist auch das Schrotrauschen unabhängig von der Frequenz. Es ist also ebenfalls ein "weißes Rauschen". Der Unterschied zwischen thermischem Rauschen und Schrotrauschen ist, dass Letzteres mit dem Gleichstrom durch den Übergang verknüpft ist. Eine Reduzierung des Schrotrauschens kann also durch eine Erniedrigung des Stroms durch das Bauteil bewirkt werden.

Funkelrauschen

Da das Funkelrauschen mit abnehmender Frequenz zunimmt, wird es oft auch als 1/f-Rauschen bezeichnet. Für das 1/f-Rauschen sind vermutlich die Störstellen im Material und punktförmige Kontaktbereiche verantwortlich.

Mehrere Beobachtungen sind charakteristisch für dieses Rauschen, z.B. dass das 1/f-Rauschen in Halbleiterbauelementen größer ist als in Röhren und dass es oberhalb von 1 kHz i.a. nicht von Bedeutung ist. Eine wichtige Schlussfolgerung kann aus dem 1/f-Verhalten gezogen werden: Empfindliche Messungen sollten deshalb nicht statisch mit Gleichstrom, sondern mit Wechselstrom gemacht werden.

Umwelteinflüsse

Häufig sind nicht die fundamentalen Rauschquellen die Ursachen für Messprobleme. Vielmehr liegen die Schwierigkeiten in Einflüssen aus der Umgebung. Die häufigste Störquelle ist die 50 Hz-Stromversorgung, die als Netzbrummen bezeichnet wird. Oft spielen auch die höheren Harmonischen bei 100, 150 und sogar 200 Hz eine Rolle. Eine weitere Störquelle

ist das Radiofrequenzband von Mittelwellensendern. Da ein Leiter als Antenne für dieses Band wirkt, ist dies oft ein Problem. Auch die Störungen von nahe gelegenen Elektromotoren und die Strahlung von Monitoren werden oft von empfindlichen Apparaturen wahrgenommen. Ebenso können Röntgenapparaturen erheblich zum Umgebungsruschen beitragen. Abb. 1 fasst diese verschiedenen Rauschquellen zusammen und zeigt die Frequenzbereiche, die relativ frei von Rauschen sind.

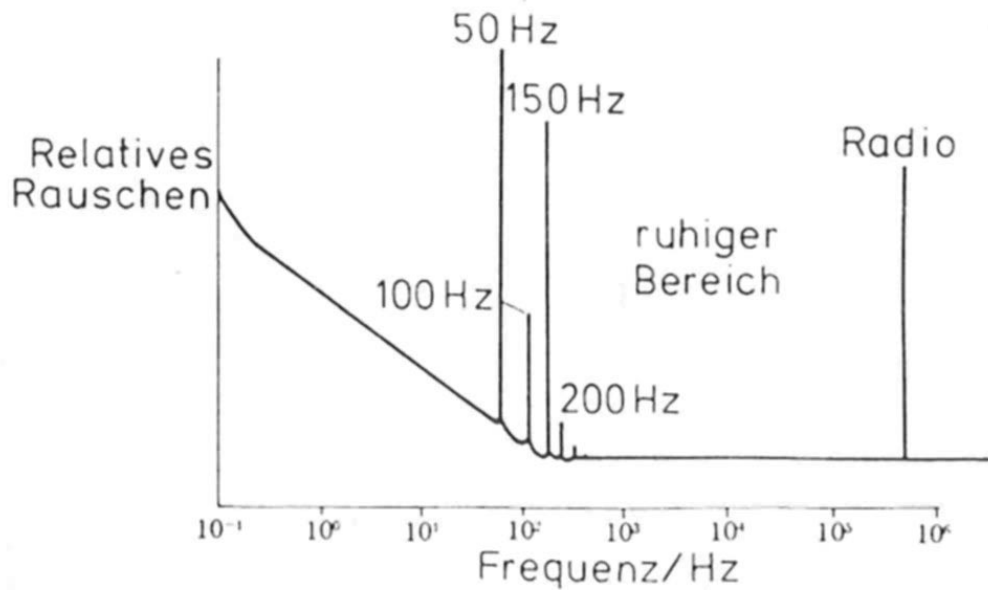


Abb.1 Rauschspektrum mit ruhigen "Bereichen" und Störzonen

2.2 Verminderung von Einstreuungen

Aus den vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich, dass man sich bemühen sollte, unerwünschte Signale vom Messsystem fernzuhalten. Es ist ebenso wichtig, unbeabsichtigte Einstreuungen zu vermeiden. Der Schaltkreis in Abb.:2 enthält eine Spannungsquelle und eine Last Z , die durch eine Streukapazität C an die Spannungsquelle gekoppelt ist. Die Streukapazität ist unerwünscht. Die Größe der Streuspannung an Z hängt von den relativen Größen von C und Z und von der Frequenz der Spannungsquelle ab. Wenn Z zunimmt, nimmt auch die eingestreute Störung zu, die möglicherweise weitere Stufen der Schaltung beeinflusst. Wenn die Last in ein leitendes Gehäuse eingebaut wird, wie in Abb. 2, kann das Problem verringert werden. Die Abschirmung wird geerdet und die Streukapazität wird an Masse gekoppelt. Diese Form von Abschirmung ist nicht unvernünftig, da Strahlungsenergie fast überall um uns herum in Form der 50 Hz-Stromversorgung existiert.

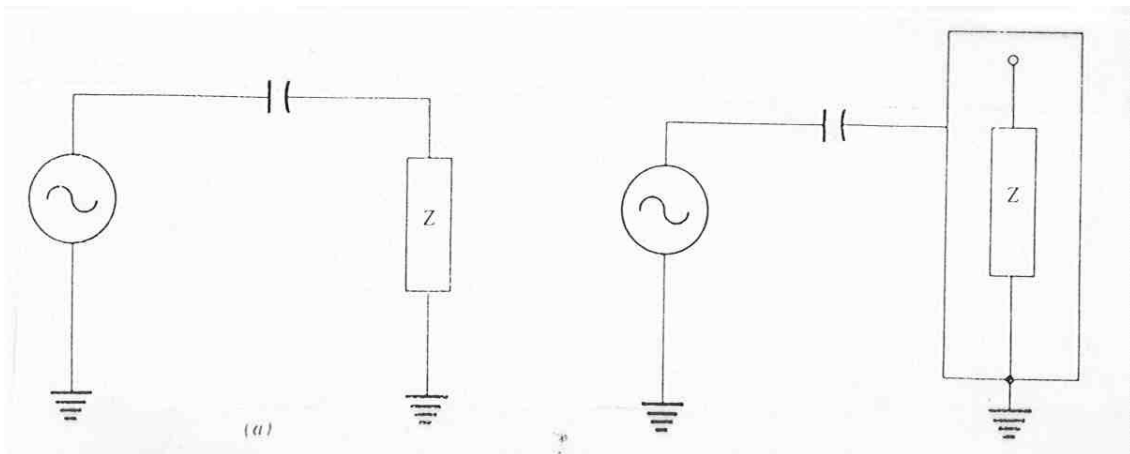


Abb. 2 Kapazitive Kopplung einer Quelle an eine Last: a) ungeschirmt
b) abgeschirmt, um Kopplung zu vermeiden:

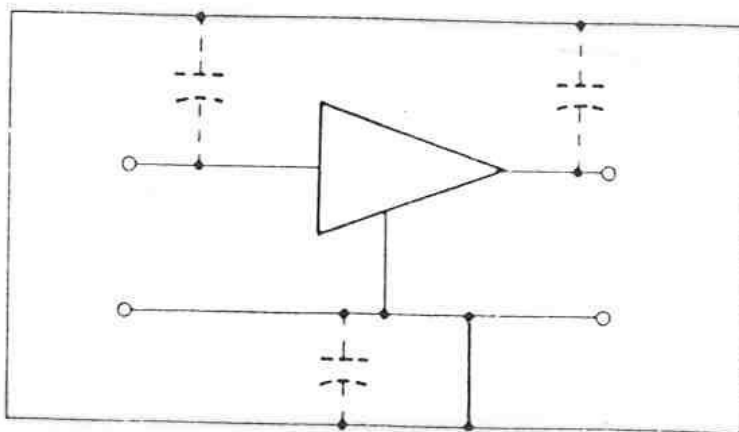


Abb. 3 Streukapazitäten zwischen Abschirmung und Verstärker. Die dicke Leitung ist eine Verbindung zwischen der Abschirmung und dem Masseanschluss des Verstärkers. Sie dient zur Eliminierung der kapazitiven Kopplung.

Die Abschirmung eines empfindlichen Teils der Apparatur, wie eines Verstärkers, behebt das Problem aber nur, wenn die Abschirmung richtig ausgeführt wird. Betrachten Sie den Verstärker im Gehäuse in Abb.3. Streukapazitäten existieren zwischen Eingang und Abschirmung, zwischen Ausgang und Abschirmung und zwischen Masse und Abschirmung. Die letztere ist am kritischsten, weil die Kapazität zwischen Masse und Gehäuse ein kapazitives Rückkopplungssystem bildet. Diese kapazitive Rückkopplung kann beseitigt werden, indem die Masse mit dem Gehäuse verbunden wird (dadurch wird die Streukapazität vollständig beseitigt).

Häufig sind mehrere Teile einer Apparatur miteinander verbunden. Das Problem liegt dann darin, wie das ganze System geerdet werden soll. Eine Methode ist in Abb. 4 gezeigt, in der eine Signalquelle, ein Verstärker und ein Detektor miteinander verbunden sind. Beachten

Sie, dass jedes Teil separat abgeschirmt ist, dass aber die Abschirmungen gemeinsam verbunden sind. Das ist der richtige Weg.

Weniger gute Wege zeigen die Abb. 5a und 5b. In Abb. 5a ist die Masseleitung des Verstärkers mit der Abschirmung verbunden. Da die Abschirmung nicht geerdet ist, besteht eine elektrostatische Kopplung zwischen Abschirmung und Erde. Dadurch können Störungen eingestreut werden. Ein komplizierteres Problem ist in Abb. 5b dargestellt. Hier sind die verschiedenen Abschirmungen nicht miteinander verbunden. Vielmehr wird jede zu einem anderen Erdpunkt geführt. Jegliche Potentialdifferenzen (die es immer gibt) werden elektrostatisch in das System eingeführt. Man nennt dies Erdschleifen. Sie ergeben sich immer, wenn sich mehr als ein gemeinsamer Erdungspunkt im System befindet. Oft bemerkt der Benutzer einer Apparatur nicht, dass das Chassis über die Stromversorgung an Erde liegt. Um diese Möglichkeit zu vermeiden, ist es ratsam, eine gemeinsame Verbindung zwischen allen Chassis herzustellen und von dieser gemeinsamen Verbindung eine einzige Leitung zur Netzerde zu ziehen.

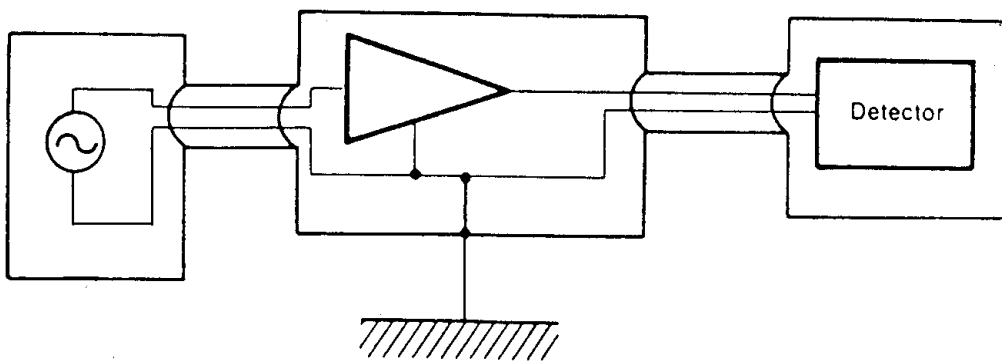


Abb. 4 Richtige Methode zur Abschirmung mehrerer Bauteile über einen gemeinsamen Erdpunkt.

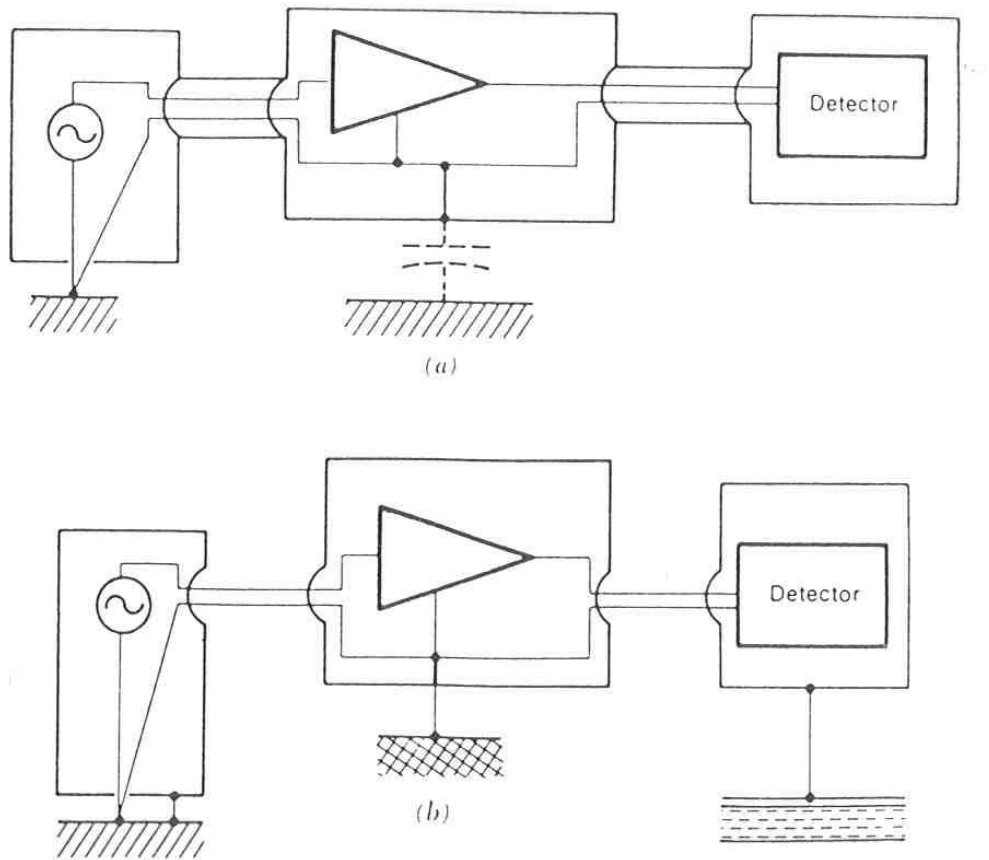


Abb. 5 Falsche Methoden zur Abschirmung:

- a) Erdung über die Sensorleitungen und zusätzlich ist die Masseleitung des Verstärkers mit der Abschirmung verbunden und bewirkt an dieser Stelle eine kapazitive Kopplung zur Erde.
- b) jedes Bauteil ist separat geerdet, wodurch Erdschleifen verursacht werden.

Koaxialkabel

Koaxialkabel (Abb. 6) werden häufig als abgeschirmte Kabel verwendet. Das konzentrische Drahtgeflecht umgibt den zentralen Draht vollständig. Oft wird übersehen, dass alle Abschirmungen gemeinsam geerdet werden müssen. Wenn dies nicht getan wird, kann in kritischen Situationen die elektrostatische Kopplung nur vergrößert werden. Wenn die verschiedenen Abschirmungen an verschiedenen Referenzpunkten geerdet werden, erhält man dieselbe Situation wie sie oben bei Abb. 5b beschrieben wurde. Manchmal werden Koaxialkabel an kritischen Stellen innerhalb eines Geräts benötigt, um eine bestimmte Leitung vor lokalen Störstrahlungen abzuschirmen. Eine besondere Rolle nehmen Transformatoren ein. Die von ihnen erzeugten magnetischen Felder haben i.a. eine kurze Reichweite. In jedem Leiter, der nicht abgeschirmt ist, kann durch das magnetische Wechselfeld ein Wechselspannungssignal induziert werden. Ein Weg, dies zu vermeiden, ist es, Transformatoren zu verwenden, die mit einem Material hoher magnetischer Permeabilität, wie z.B. Weicheisen, abgeschirmt sind. Alle Drähte, die mehr als ca. 10 mA Wechselstrom führen, sollten generell miteinander verflochten werden. Dadurch heben sich die magnetischen Felder gegenseitig auf. Noch

besser ist es, kritische Leitungen und Komponenten in genügendem Abstand von den Leitungen anzuordnen, die den Wechselstrom führen. Zum Teil kann es bei Platzproblemen eine Lösung sein, wenn die den Wechselstrom führenden Drähte senkrecht zu den kritischen Drähten angeordnet werden.

In diesem Abschnitt wurden eine Reihe von Tipps gegeben, wie Rauschen und Brummen minimalisiert werden kann. Dennoch gibt es Situationen, wo man sich unausweichlich mit dem Rauschen auseinandersetzen muss. Diesen Problemen ist der folgende Abschnitt gewidmet.

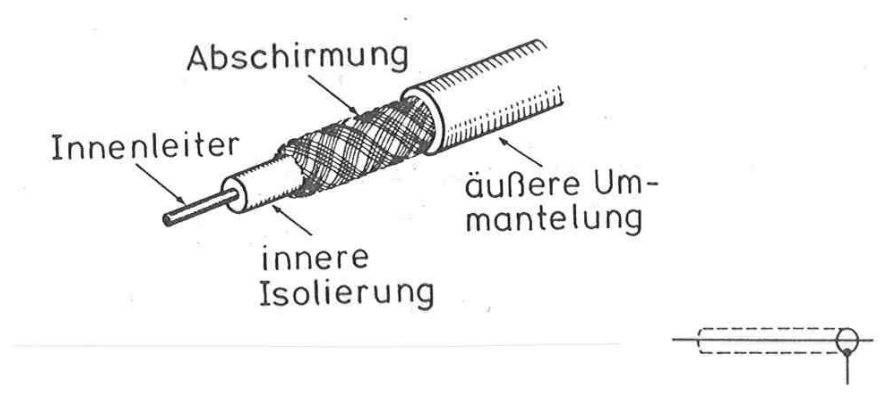


Abb. 6 Koaxialkabel. (Unten rechts: zugehöriges elektrisches Symbol)

2.3 Signal/Rausch-Verbesserung

2.3.1 Filter

Ein Weg zur Signal/Rausch-Verbesserung ist die Aufbereitung des Signals durch ein Filter. Voraussetzung ist, dass das Signal bei einer anderen Frequenz auftritt als das Rauschen. Das Prinzip der Filterung beruht auf einer starken Reduzierung der Bandbreite B . Aus Gl. (1) und (3) ergibt sich, dass das Rauschen damit linear mit der Bandbreite reduziert wird. Ferner wird der Einfluss von starken Störstrahlen aus der Umgebung durch geeignetes Filtern reduziert.

Die Aufgabe von Filtern besteht darin, bestimmte Frequenzen zu unterdrücken und andere durchzulassen. Es gibt 4 Haupttypen von Filtern: Tiefpass-, Hochpass-, Bandpass- und Bandsperrfilter. Die typischen Übertragungscharakteristiken dieser 4 Typen sind in Abb. 7 dargestellt.

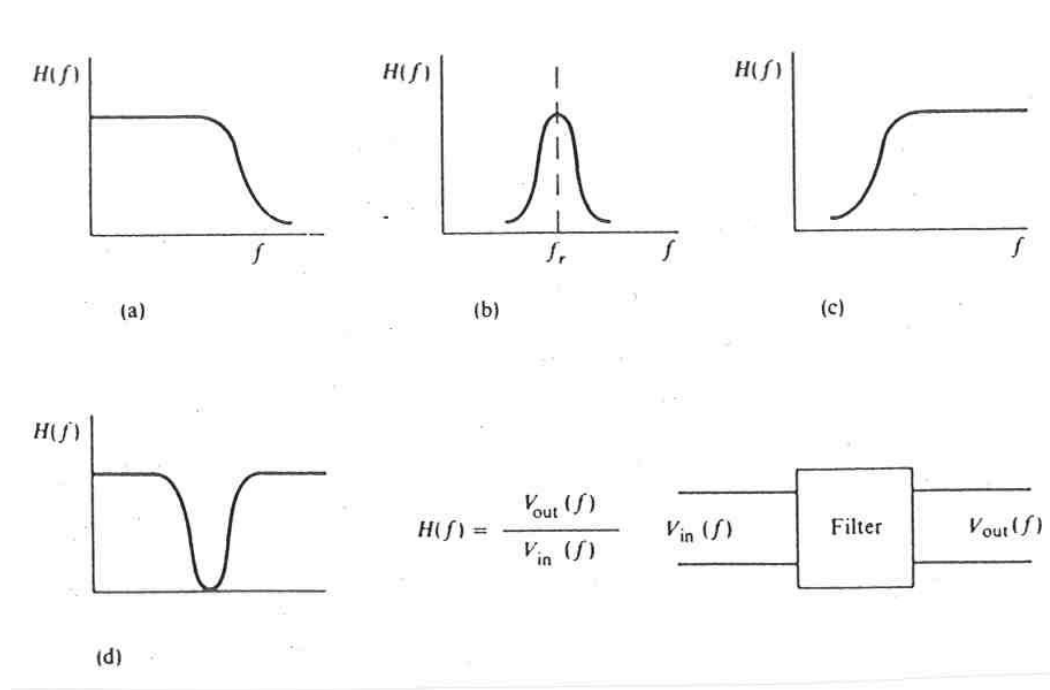


Abb. 7 Haupttypen von Filterübertragungsfunktionen und Schaltsymbol:
 a) Tiefpass, b) Bandpass, c) Hochpass ,d) Bandsperre

Weitere Filtertypen

Filter höherer Ordnung lassen sich meist nur mit aktiven Bauelementen realisieren. Man unterscheidet dabei verschiedene Schaltungsrealisierungen mit leicht unterschiedlichem Frequenzübertragungsverhalten.

Butterworth-Tiefpassfilter besitzen einen Amplituden-Frequenzgang, der möglichst lang horizontal verläuft und erst kurz vor der Grenzfrequenz scharf abknickt. Ihre Sprungantwort zeigen ein beträchtliches Überschwingen, das mit zunehmender Ordnung größer wird.

Tschebyscheff-Tiefpassfilter besitzen oberhalb der Grenzfrequenz einen noch steileren Abfall der Verstärkung. Im Durchlassbereich verläuft die Verstärkung jedoch nicht monoton, sondern besitzt eine Welligkeit konstanter Amplitude. Bei gegebener Ordnung ist der Abfall oberhalb der Grenzfrequenz umso steiler, je größer die zugelassene Welligkeit ist. Das Überschwingen der Sprungantwort ist noch stärker als bei den Butterworth-Filtern.

Bessel-Tiefpassfilter besitzen ein optimales Rechteck-Übertragungsverhalten. Die Voraussetzung hierfür ist, dass die Gruppenlaufzeit über einen möglichst großen Frequenzbereich konstant ist, d.h., dass die Phasenverschiebung in diesem Frequenzbereich proportional zur Frequenz ist. Allerdings knickt der Amplituden-Frequenzgang der Bessel-Filter nicht so scharf ab wie bei den Butterworth- und Tschebyscheff-Filtern.

Der Tschebyscheff-Tiefpass geht am steilsten vom Durchlass- in den Sperrbereich über. Dies erkaufte man sich durch die Welligkeit des Frequenzgangs im Durchlassbereich. Macht man die Welligkeit immer kleiner, geht das Tschebyscheff-Filter kontinuierlich in das Butterworth-Filter über. Beide Filter zeigen ein beachtliches Überschwingen der Sprungantwort. Bessel-Filter hingegen besitzen ein äußerst geringes Überschwingen. Trotz ihres ungünstigen Amplituden-Frequenzgangs wird man sie immer dann einsetzen, wenn es auf gutes Rechteckübertragungsverhalten ankommt.

Ein passiver RC-Tiefpass zeigt kein Überschwingen. Man erkaufte jedoch die geringe Verbesserung gegenüber dem Besselfilter mit einer beachtlichen Verschlechterung des Ampli-

tuden-Frequenzgangs. Außerdem ist die Verrundung der Ecken der Sprungantwort stärker als beim Besselfilter.

Anwendungsbeispiele für Filter

a) 50 Hz „Brummspannung“

In Abb.8 ist ein Signal bei 500 Hz von 50 Hz Brummen überlagert. Von einem Hochpass wird das 500 Hz-Signal durchgelassen, während das 50 Hz Brummen stark abgeschwächt wird. Einen ähnlichen Effekt kann man durch ein 50 Hz-Sperrfilter erzielen, bei dem selektiv die 50 Hz unterdrückt werden.

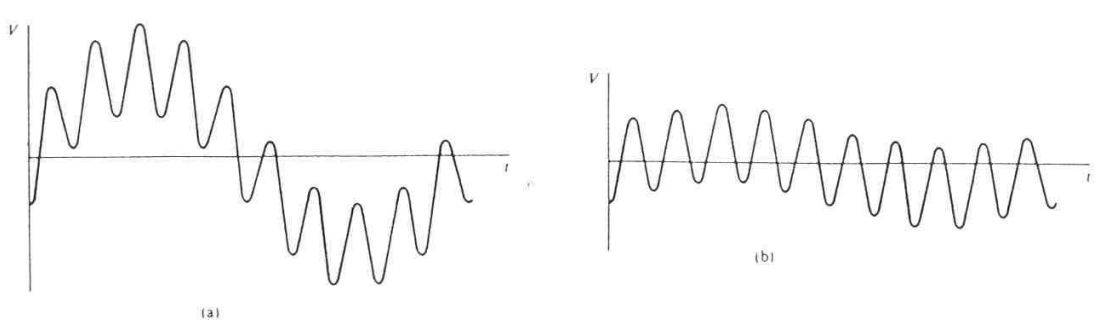


Abb. 8 a) Eingangssignal mit Brumm

b) gefiltertes Ausgangssignal

b) Breitbandiges Rauschen

Ein Signal einer bestimmten Frequenz sei von statistischem Rauschen großer Bandbreite überlagert. In diesem Fall lässt sich durch einen Bandpass, der selektiv das Signal durchlässt, eine erhebliche Signal/ Rausch-Verbesserung erzielen.

2.3.2. Signalmittelung

Die Signalmittelung (signal averaging) ist eine Methode, die besonders bei stark verrauschten Signalen sehr nützlich ist. Diese Methode kann angewendet werden, wenn die Bandbreiten des Signals und des Rauschens in der gleichen Größenordnung liegen. Dies würde die Anwendung von Filtern ausschließen. Die einzige Voraussetzung für die Signalmittelung ist, dass das Signal wiederholbar und seine Phase bekannt ist. Das Signal (und das Rauschen) wird in n Segmente zerlegt und in n Kanälen gespeichert. Dieser Prozess wird oft wiederholt und jeder neue Durchgang zum vorhandenen Speicherinhalt addiert. Dabei wächst das Signal proportional zur Zahl der Wiederholungen, während man beim Rauschen aufgrund dessen statistischer Natur dessen quadratischen Mittelwert addiert. Zum Beispiel ist nach 100 Wiederholungen das Signal 100-mal größer, während das Rauschen nur $\sqrt{100} = 10$ -mal größer geworden ist. Man hat also eine Signal/Rausch-Verbesserung um den Faktor 10 erzielt. Allgemein erhält man bei N Wiederholungen eine Signal/Rausch-Verbesserung von \sqrt{N} .

Abb. 9 zeigt, welche deutlichen Signal/Rausch-Verbesserungen auf diese Weise erzielt werden können.

Im Versuch übernimmt ein PC, in dem eine AD-Wandlerkarte eingebaut ist zusammen mit der Datenerfassungssoftware „LabView“ die Signalmittelung. Die charakteristischen Größen der Messanordnung sind: max. Eingangsspannung $\pm 5V$, 16 Bit Auflösung, max. Samplerate

250kHz. Dabei ist zu beachten, dass die maximale Frequenz, die mit dieser Anordnung tatsächlich detektiert werden kann, durch Aliasing und die entsprechende Nyquist-Frequenz begrenzt ist.

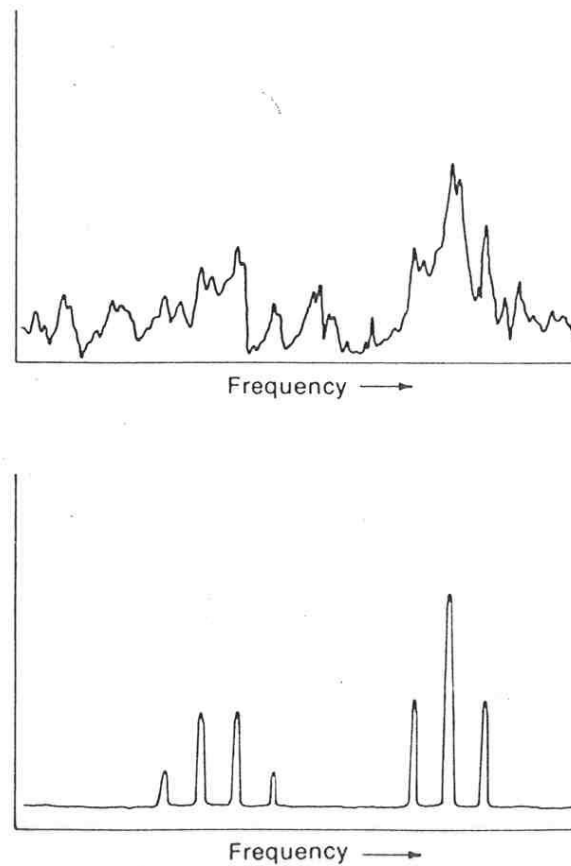


Abb. 9 Signal/Rausch-Verbesserung durch Mittelung.
 Oben: einzelner Durchgang. Unten: 100 Durchgänge

Digitales Filtern

Wenn man keinen analogen Filter zur Verfügung hat, besteht auch die Möglichkeit das Signal digital zu filtern. Dabei geht man folgendermaßen vor. Nach Aufnahme des Spektrums wird das Signal fouriertransformiert und mit einer Filterfunktion multipliziert. Danach erfolgt eine Rücktransformation, und man erhält das gefilterte Signal in der Zeitdomäne. Damit lassen sich sehr einfach die verschiedenen Filterfunktionen (z.B. Tiefpass-, Hochpass-, Bandpass-, Notch-Filter, ...) einstellen.

2.3.3 Lock-In Verstärker

(ausführliche Beschreibung in der Zusatzliteratur)

Eine sehr häufig angewandte Technik zur Signal/Rausch-Verbesserung ist die Verwendung eines Lock-In Verstärkers. Das zugrunde liegende Prinzip wird auch als phasenempfindliche Gleichrichtung bezeichnet. Voraussetzung für seine Anwendung ist, dass das Signal periodisch moduliert vorliegt (Effektmodulation). Die meisten Gleichstrommessungen können durch Choppfen (Zerhacken) periodisch gemacht werden, z.B. bei optischen Messungen durch eine rotierende Zerhackerscheibe, die den Lichtstrahl periodisch unterbricht.

Das Prinzipschaltbild des Lock-In Verstärkers ist in Abb. 10 dargestellt:

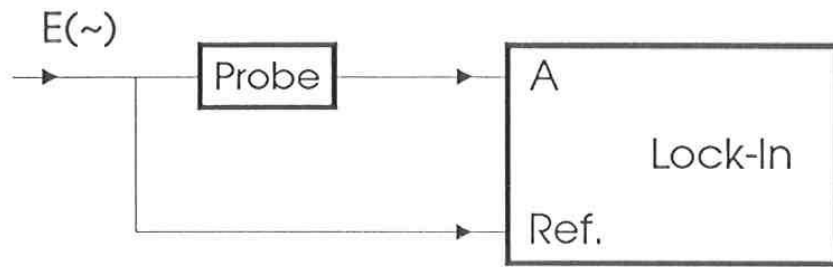


Abb. 10 Prinzipielle Schaltzeichnung und Anwendung des Lock-In Verstärkers.

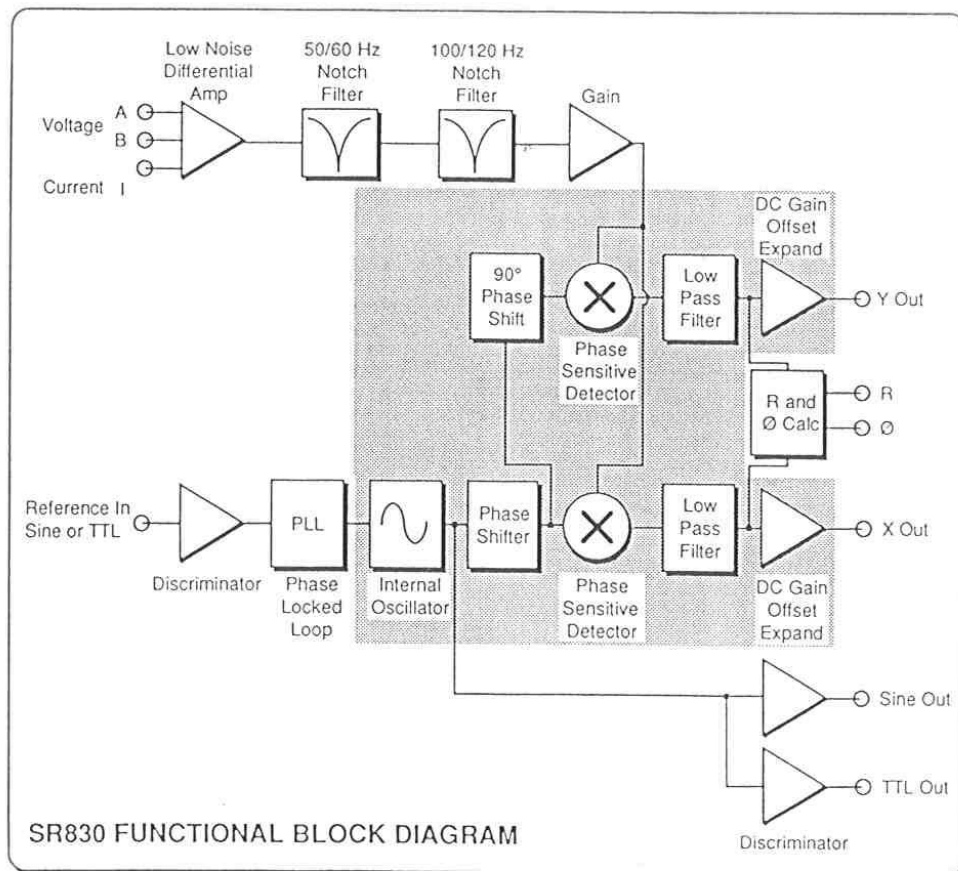
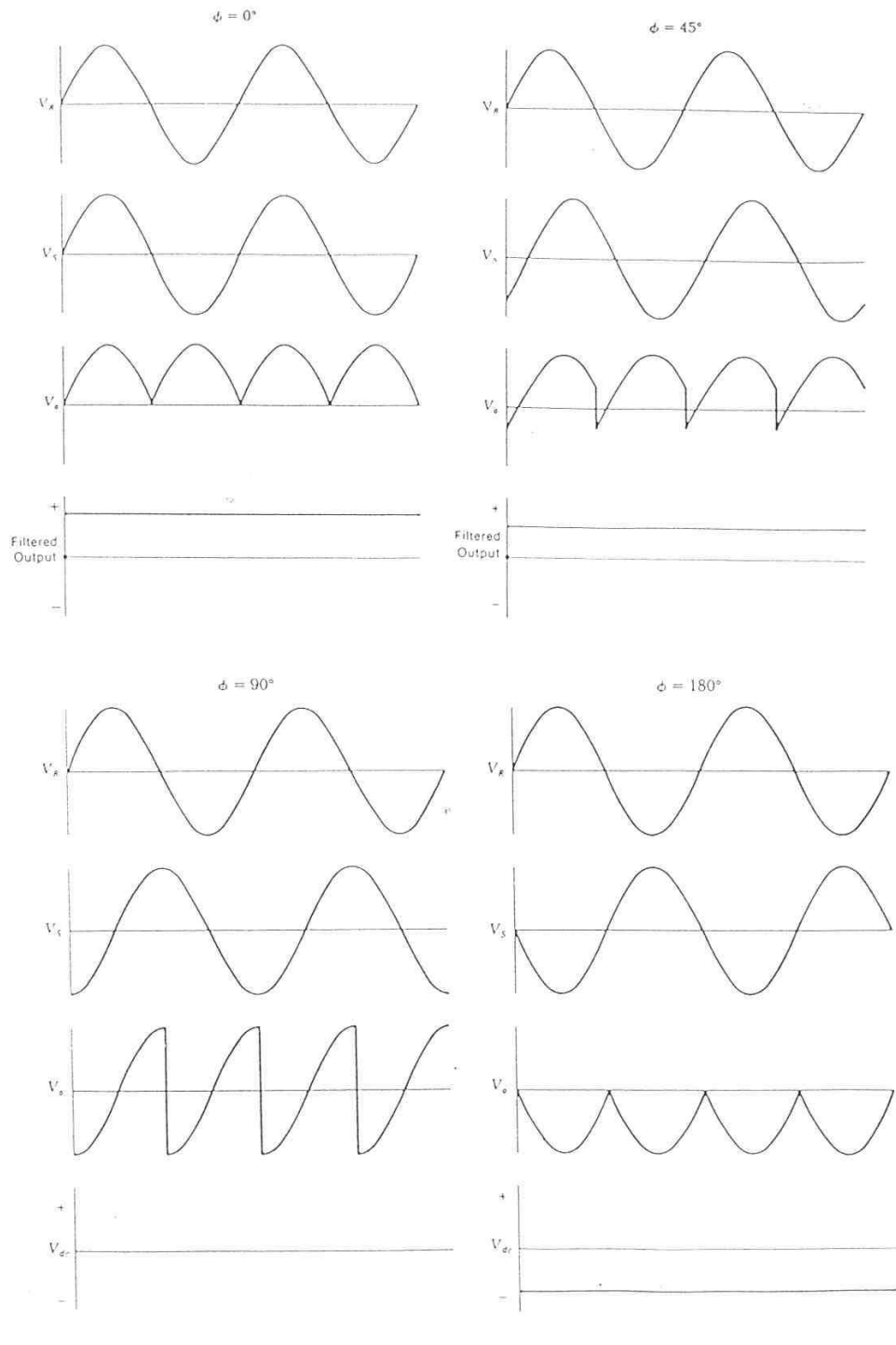


Abb. 11 Prinzipschaltbild des Lock-In Verstärkers.

**Abb. 12**

Referenzspannung V_R . Signal V_S , Ausgangsspannung V_0 und tiefpassgefilterte Ausgangsspannung beim Lock-In Verstärker für verschiedene Phasenverschiebungen ϕ zwischen V_R und V_S (hier ist das Ausgangssignal $V_0 = V_S \text{ sign}(V_R)$), wie es früher bei vielen analogen Lock-In Verstärkern realisiert wurde. Digitale Lock-In Verstärker arbeiten mit einer oberwellenfreien reinen Sinusreferenz, die intern erzeugt wird).

Die Probe wird mittels einer Eingangsgröße $E(\sim)$ periodisch angeregt, von der ein Teil für den Referenzeingang des Lock-In Verstärkers ausgekoppelt wird. Die Detektion des Signals erfolgt über den Eingang A des Lock-In Verstärkers.

Das Herzstück des Lock-In Verstärkers ist der sogenannte phasenempfindliche Gleichrichter (PSD). Der phasenempfindliche Gleichrichter bewirkt ein mit der Referenzspannung V_R synchrones Umpolen der Ausgangsspannung. Je nach Phasenverschiebung zwischen V_R und dem Signal V_S erhält man die in Abb. 12 dargestellten Ausgangsspannungen V_O . Durch den RC-Tiefpass am Ausgang des Lock-In Verstärkers wird schließlich die Ausgangsspannung geglättet.

Das Prinzip des Lock-In Verstärkers besteht darin, dass ein Gleichspannungssignal bei der Frequenz $f = 0$, wo es von sehr großem $1/f$ -Rauschen überlagert ist, auf die Modulationsfrequenz f_m transponiert wird. Hier ist das Rauschen aus den vorher diskutierten Gründen wesentlich geringer. Das modulierte Signal wird schmalbandig verstärkt und gleichgerichtet. Die Verstärkerbandbreite Δf kann so klein gewählt werden, wie es die Messzeit erlaubt (typische Werte $\Delta f = 1/(\pi\tau) = 10 \dots 0,01$ Hz).

3. Fragen zur Vorbereitung

- 1) Welche Arten von Rauschen gibt es und wodurch werden sie charakterisiert?
- 2) Welches sind die Hauptstöreinflüsse aus der Umgebung? Wie können sie eliminiert werden?
- 3) Was ist ein Koaxialkabel und wozu dient es?
- 4) Was versteht man unter Erdschleifen?
- 5) Welche Methoden zur Signal/Rausch-Verbesserung gibt es? Diskutieren Sie ihre Anwendbarkeit.
- 6) Erläutern Sie ausführlich das Lock-In Verfahren.
- 7) Wie ist die Größe dB definiert? Was bedeutet 0dB, 10dB, 20dB und 60dB und wo tritt die charakteristische Größe 3dB auf?
- 8) Welches sind die Haupttypen von elektronischen Filtern? Nennen Sie Verwendungsmöglichkeiten zur Signal/Rausch-Verbesserung. Was gibt die Ordnung eines Filters an?
- 9) Was besagt das Abtasttheorem?
- 10) Erklären Sie kurz die Fourier- und die Fast-Fourier-Transformation und deren Unterschiede hinsichtlich Rechenaufwand.

4. Aufgaben

Zur Vorbereitung vor Versuchsbeginn(schriftlich):

Wie lautet die Fourierentwicklung einer Dreiecksschwingung

$$y(t) = at \text{ für } -T/4 \leq t \leq T/4 \qquad y(t) = a(T/2-t) \text{ für } T/4 \leq t \leq 3T/4$$

und einer Rechteckschwingung

$$y(t) = a \text{ für } 0 \leq t \leq T/2 \qquad y(t) = -a \text{ für } T/2 \leq t \leq T.$$

Für die folgenden Messungen wird das Programm 'Signal/Rausch Versuch' (Beschreibung siehe Punkt 6) benötigt. Die Eingänge der AD-Wandlerkarte sind mit den Ausgängen '50Ω-Output' und 'Trigger' des Signalgenerators zu verbinden.

Vor Beginn der Messungen ist für jede Praktikumsgruppe ein neues Daten-Directory unter D:\daten\... anzulegen.

4.1 Mittelung und Fouriertransformation

- Bestimmen Sie experimentell die Fourierentwicklungskoeffizienten für die Signalfunktionen „Rechteck“ und „Dreieck“ und vergleichen Sie die experimentellen Daten mit der Theorie.
- Interpretieren Sie das Fourierspektrum der Sinus-Signalfunktion (ohne Rauschen).
- Zeigen Sie quantitativ am Beispiel einer verrauschten Signalfunktion (Rechteck oder Dreieck) wie die Abnahme des Rauschens von der Zahl der Mittelungen abhängt.
- Welchen Einfluss hat der Signal-Rausch Abstand der Oberwellen auf die zeitliche Signalform?
- Variieren Sie für eine feste Signalform die Bandbreite des Rauschens und stellen Sie die Resultate für einige typische Frequenzverläufe dar (Hinweis: Für kleine Bandbreiten ist zur Darstellung des zeitlichen Generatorsignals das Speicheroszilloskop zu verwenden).

Die Einstellungen auf der virtuellen Messoberfläche sind so zu wählen, dass für die jeweiligen Messaufgaben aussagefähige Resultate erzielt werden können. Versuchen Sie für jede Messaufgabe mit einer möglichst kleinen repräsentativen Zahl an Datenfiles bzw. Ausdrucken auszukommen. Nach Möglichkeit sind die erstellten Datenfiles sofort unter dem Menüpunkt „Filelisting“ mit Hilfe der Cursorfunktionen auszuwerten.

4.2 Theorem von Nyquist

- Variieren Sie für ein unverraushtes Sinussignal (Frequenz $\sim 1\text{kHz}$) die Abtastrate. Wie verändert sich die gemessene Frequenz in Abhängigkeit der Abtastrate? Variieren Sie in einer zweiten Messreihe bei konstanter Abtastrate die Frequenz des Funktionsgenerators. Stellen Sie die Ergebnis jeweils in einem Diagramm dar.

- b) Interpretieren Sie das Fourierspektrum für die Dreiecksfunktion, das man mit einer Abtastrate erhält, die zwischen der doppelten und der dreifachen Einstellfrequenz für die Dreiecksfunktion liegt.
- c) Erklären Sie die Problematik des „Aliasing“.

4.3 Signalfilterung

Verwenden Sie für diesen Versuchsteil ein Rechtecksignal mit einem moderaten Rauschanteil ($S/N = 10\text{dB}$, Frequenz $\sim 1\text{kHz}$, Bandbreite Noise: maximal)

- a) Stellen Sie verschiedene Filterkurven (Bessel-, Butterworth-, ...filter) als Tiefpassfilter dar und bestimmen Sie jeweils den 3dB-Punkt und die Steigung der Filterkurven für große Frequenzen (in dB/Oktave und dB/Dekade). Hinweis: Erhöhen sie dazu die Abtastrate auf den maximalen Wert. In der Nähe der halben Abtastfrequenz wird aus software-technischen Gründen das Fourierspektrum wie auch der Frequenzgang der Filter falsch dargestellt.
- b) Stellen Sie die Filterwirkung von verschiedenen Hoch- und Tiefpassfiltern auf das Rechtecksignal dar und interpretieren Sie die Form des gefilterten Signals mit Hilfe des zugehörigen Fourierspektrums. Bestimmen Sie für das Rechtecksignal die Grenzfrequenzen für den jeweiligen Filter, die nach Ihrer Meinung den besten Kompromiss zwischen Rauschunterdrückung und Signalverzerrung darstellen. Diskutieren Sie diese Problematik.
- c) Ermitteln Sie einen geeigneten Bandpassfilter 4. Ordnung, der das Rauschen, bei gleichzeitigem Erhalt der zeitlichen Form der Signalfunktion, weitestgehend minimiert.
- d) Welchen Einfluss hat die Ordnung des Filters?
- e) Stellen Sie mit einem analogen Filter (Modell „Ithaco 4302“) bei den gleichen Einstellungen wie bei der digitalen Bandpassfilterung unter c) die Filterwirkung und das zugehörige Fourierspektrum dar.
- f) Welche generellen Unterschiede bestehen zwischen „Filtern“ und Mittelung“?

Zu Einstellungen und Zahl der repräsentativen Datenfiles gilt das gleiche wie unter Punkt 4.1.

4.4 Lock-In Technik

Machen Sie sich mit den wichtigsten Einstellungen des Lock-In Verstärkers vertraut. Erklären Sie (schriftlich) den Zusammenhang zwischen dem eingebauten Tiefpassfilter und der einstellbaren Zeitkonstante des Lock-In Verstärkers. Was bedeuten die Einstellungen 6 ... 24 dB/Oct. am Gerät?

a) Lock-In Verstärker als Filter

Geben Sie jeweils ein Sinussignal und ein Dreieckssignal von 1Volt Spitze-Spitze auf den Eingang des Lock-In Verstärkers (Referenz vom Generator).

Interpretieren und erklären Sie bei jeweils abgeglichener Phase den Ausgangsmesswert.

Bestimmen Sie die Fourieramplituden für eine Rechteck- und eine Dreiecksschwingung und vergleichen Sie die Messwerte mit Ihren berechneten Amplituden.

b) Bandbreite des Lock-In Verstärkers

Geben Sie auf den Eingang des Lock-In Verstärkers ein Sinussignal (ca. 100 mV, $f = 1\text{kHz}$) und nehmen Sie das Ausgangssignal $|R|$ in Abhängigkeit von der Detektionsfrequenz für 2 Eingangsfiler auf. Mit der Referenzeinstellung „Intern“ können Sie die Referenzfrequenz am Lock-In Verstärker verändern.

1. Messung: Zeitkonstante = 30ms und 6dB/Oktave
2. Messung: - Parameter selbst wählen (möglichst nur eine der beiden Größen verändern) –

Bestimmen sie aus der Bandbreitenkurve die Zeitkonstante des Filters und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den eingestellten Werten am Lock-In Verstärker.

Welcher Zusammenhang existiert zwischen Ihren Messkurven und der Steilheit des Tiefpassfilters?

Bei den meisten Lock-In Verstärkern sind Grenzfrequenz (-3dB Punkt) und Steilheit nicht unabhängig einstellbar. Filter höherer Ordnung werden meist durch Hintereinanderschaltung von Filtern 1.Ordnung realisiert.

c) Lock-In Technik in der Praxis

Für eine Messung mit Lock-In Technik steht eine Leuchtdiode und eine Photodiode zur Verfügung. Schließen Sie den Funktionsgenerator an die Leuchtdiode an und verbinden Sie die Referenz ("Sync out" des Funktionsgenerators) mit dem Referenzeingang des Lock-In Verstärkers. Stellen Sie die Eingangsspannung der Leuchtdiode, das Messsignal von der Photodiode und das Ausgangssignal des Lock-In Verstärkers auf dem Oszilloskop dar.

Erklären Sie den Einfluss von Empfindlichkeit und Zeitkonstante auf das Ausgangssignal.

Welchen Einfluss hat das Raumlicht auf das Mess- und das Ausgangssignal?

Verändern Sie die Intensität der Leuchtdiode und schätzen Sie den Messbereichsumfang (in dB) für diese Messung ab. Vergleichen sie diesen Wert mit dem spezifizierten Dynamikumumfang des Lock-In Verstärkers.

5. Literatur

(1) A. James Diefenderfer, Principles of Electronic Instrumentation, Saunders Philadelphia, 1972.

(2) Klaus D. Kramer, Elektronikpraktikum, Düsseldorf, Bertelsmann 1973.

(3) U. Tietze, Ch. Schenk, Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, (aktuelle Auflage).

(4) Lock-In Basics, Firmenliteratur der Firma Stanford Research Systems (SRS), Seiten 3.1 bis 3.18 (siehe Zusatzliteratur)

6. Beschreibung des Messprogramms

Die Fast-Fourier Transformations-Routine (FFT) ist Teil der LabView Programmstruktur von National Instruments. Sie ist als sogenanntes *Virtuelles Messinstrument* (VI) mit Bedienmöglichkeiten auf der Bildschirmenebene realisiert.

Im Hauptmenü stehen folgende Messoptionen zur Verfügung:

- **Filtering**
- **Averaging**
- **Sampling**
- **File listing**

In allen Menüpunkten werden im oberen Bildschirmbereich jeweils das zeitliche Eingangssignal vom Generator und daneben das verarbeitete Signal nach der Routine ausgegeben. Im unteren Bildschirmbereich wird das Leistungsspektrum wie folgt dargestellt:

- Menüpunkt ‚Sampling‘: Spektrum des Eingangssignals
- Menüpunkte ‚Filterung‘ und ‚Averaging‘: Spektrum nach der Verarbeitung

Mit den Cursorfunktionen können Sie einzelne Punkte des Spektrums bzw. der Filterkurven (rot) direkt auslesen. Das Symbol „Schloss“ im Cursorbedienfeld ermöglicht das feste Einloggen des jeweiligen Cursors in die Messkurven. Falls bei der Auswertung mit dem Cursor die Spitze der Signale nicht richtig erfasst werden, muss die Frequenzachse stärker gespreizt werden.

Die Achsenwerte im Leistungsspektrum können je nach Messaufgabe frei gewählt werden

Die Datenspeicherung erfolgt spaltenweise im ASCII-Format und ist im jeweiligen Datenkopf des Filters beschrieben. Die erste Spalte enthält die Zeitwerte in ms. Die vierte Spalte enthält die Frequenzwerte für das Leistungsspektrum. Die Zahl der Datenpunkte in allen Spalten ist durch die eingestellte Zahl der Messpunkte (siehe unten: #s) gegeben. Mehrfaches Abspeichern des gleichen Files erhöht die Versionsnummer des gewählten Filenamens.

Beschreibung der Bedienelemente in den Menüpunkten

Averaging und Sampling

- **FS:** Abtastfrequenz (max. 250 kHz)
- **#s:** Zahl der dargestellten Messpunkt im Leistungsspektrum
- **Path to store:** D:\daten\<<Name des eigenen Directory>
- **Type of datafile:** [<freier Text>]

Filtering

- **Topology:** Art des verwendeten Filters
(wird mit roter Filterkurve dargestellt)
- **Typ:** Tief-, Hoch-, Bandpass, Bandsperre

- **Lower F_c :** - Grenzfrequenz bei Tief- oder Hochpass
- untere Grenzfrequenz bei Bandpass oder Bandsperre
- **Upper F_c :** - ohne Wirkung bei Tief- oder Hochpass
- obere Grenzfrequenz bei Bandpass oder Bandsperre
- **PB Ripple:** Interner Parameter für Restwelligkeit der Filter im Durchlassbereich (Default: 1). Nur bei Tschebyscheff- und Elliptic-Filter wirksam
- **SB Attenuation:** Interner Parameter für Filter-VI (Default: 60)

Die von National Instruments vorgegebenen Routinen für Tschebyscheff- und Elliptic-Filter erzeugen eine von der Restwelligkeit abhängige Grenzfrequenz (-3 dB Punkt), die nicht mit dem eingestellten Wert der Grenzfrequenz übereinstimmt.