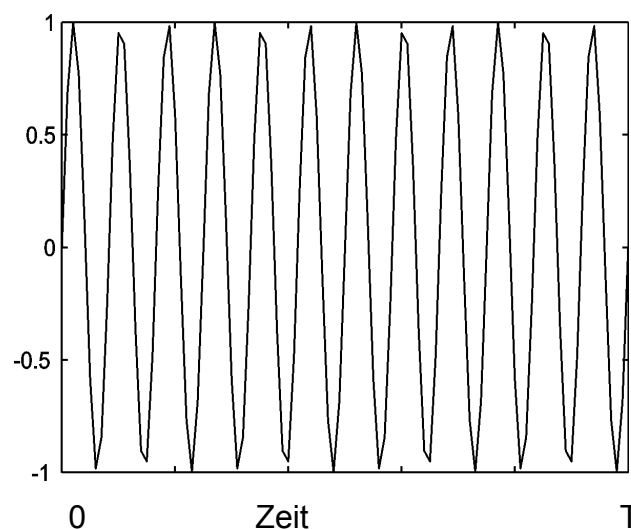


Prinzip der Lock-In-Detektion am Beispiel eines ESR-Signals

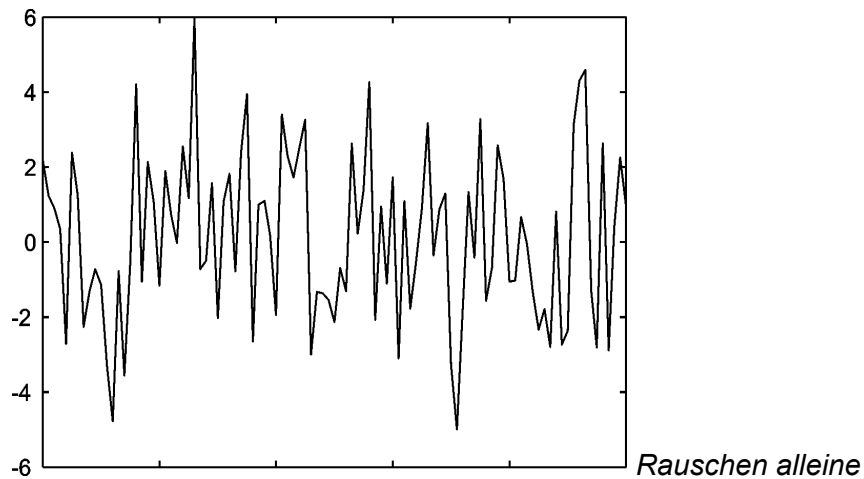
Nur allzu häufig meinen Physiker, ganz kleine Signale messen zu müssen, Signale die kleiner sind als das immer vorhandene Rauschen. Es gibt dann einige Methoden und Geräte, dennoch das begehrte Signal herauszukitzeln, eines davon ist der **analoge Lock-In-Verstärker**. Ein solcher kommt in einer einfachen Ausführung beim ESR-Versuch zum Einsatz. *Es lohnt sich, das Prinzip zu verstehen.*

Wir beginnen mit einem ideal rauschfreien Signal:

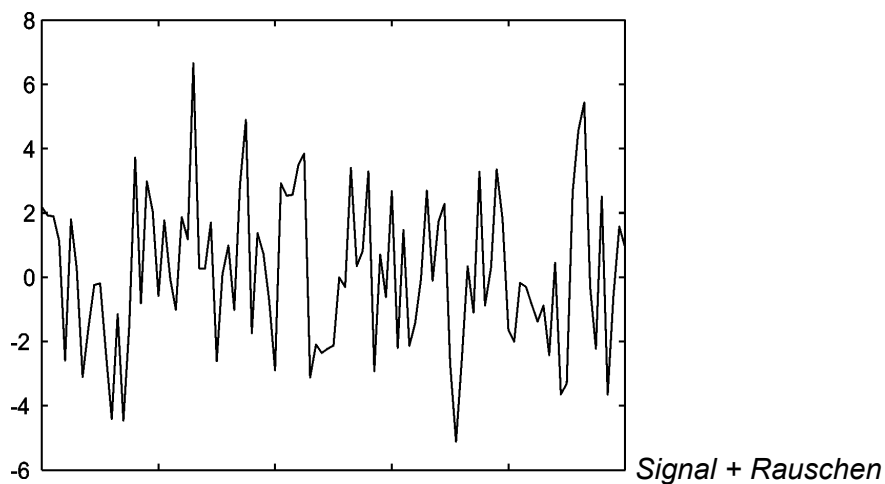


Die sinusförmige Modulation des Signals wird „künstlich“ durch eine **geeignete Modulation des beobachteten physikalischen Effekts** erzielt. Beispiele sind die Modulation des statischen Magnetfeldes bei der magnetischen Resonanz oder die Modulation der Messlichtstärke bei optischer Absorption. Die Modulation geschieht in der Regel bei fester Frequenz, sie kann sinus-, aber auch rechteckförmig, usw. sein. Üblicherweise ist im Lock-In der Bequemlichkeit halber gleich ein Funktionsgenerator eingebaut. Es gibt aber immer einen sogenannten Referenz-Eingang, wo dem Lock-In ein Synchronisationssignal einer externen Modulationsquelle mitgeteilt werden kann.

Wie eingangs erwähnt tritt gewöhnlich das Rauschen zum Signal hinzu:

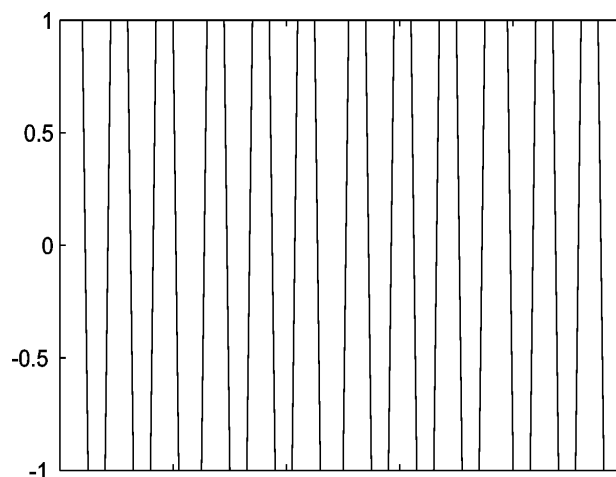


Wir haben das Rauschen größer angesetzt als das reine Signal, so dass die gemessene Summe von beiden auch nicht viel anders aussieht als das Rauschen alleine:



Dem Lock-In gelingt es nun, die Amplitude des eigentlichen Signals (1. Bild) aus diesem Chaos herauszufischen. Dazu erzeugt der Lock-In intern ein Schalt-Signal, welches mit der Modulation phasensynchron ist. Bei externer Modulationsquelle wird dieses Schalt-Signal mit Hilfe des Synchronisationssignals am Referenzeingang erzeugt. Wichtig ist, dass das Schalt-Signal immer phasenstarr an die Modulation angekoppelt wird.

Das Schalt-Signal sieht so aus:



Es ist ein bipolares Rechtecksignal, hier **in Phase mit dem modulierten Signal** im ersten Bild gezeichnet. Dieses „in Phase“ kann durch einem Phasenschieber im Lock-In eingestellt werden.

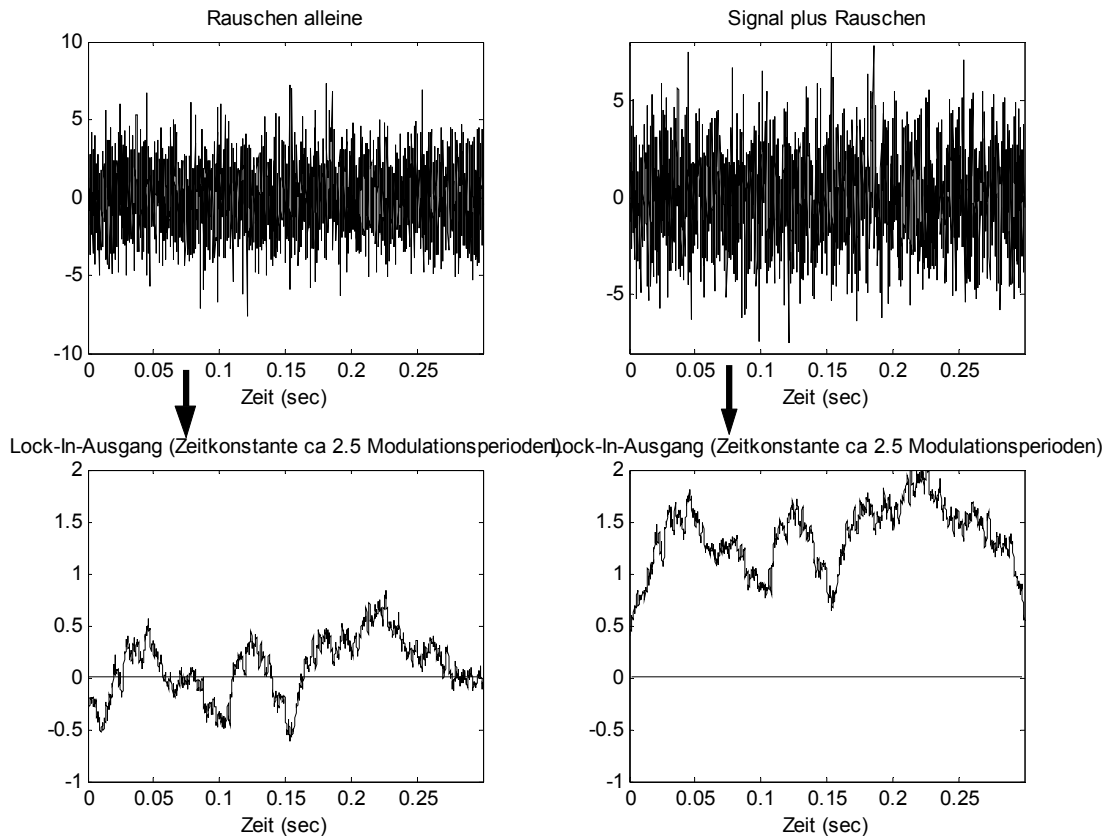
Der Lock-In macht nun nichts weiter, als das gemessene Signal (3. Bild) mit diesem Schalt-Signal fortwährend zu **multiplizieren** und das Ergebnis über eine gewisse Zeit analog zu **mitteln**. Diese Mittelungszeit wird am Gerät üblicherweise schlicht als **Zeitkonstante** bezeichnet. Es ist ein laufender Mittelwert, Multiplikationsergebnisse, die älter als einige Zeitkonstanten sind, tragen nicht mehr zum momentanen Mittelwert bei. Es ist klar, dass zur sinnvollen Funktion die Mittelung über einige Perioden der Modulation erfolgen muss, d.h. die Zeitkonstante darf nicht zu kurz eingestellt werden. Der Mittelwert erscheint üblicherweise auf einem Zeigerinstrument und kann an einer Ausgangsbuchse registriert werden.

Würde man das rauschfreie Signal aus Abb. 1 mit dem Schaltsignal multiplizieren, so würden die negativen Halbwellen ins Positive geklappt. Dies entspricht einer Gleichrichtung. Die Integration liefert dann einen konstanten positive Wert. Würde sich die Phase des Messsignals verschieben, so würde dieser Wert abnehmen. Der Lock-In wird deshalb auch **phasenempfindlicher Gleichrichter** genannt.

Es ist auch ohne weiteres klar, dass bei diesem Verfahren ein um Null schwankender Wert herauskommt, wenn nur Rauschen am Eingang eingespeist wird. Ebenso ein im Mittel positiver (oder negativer, bei 180° Phasenverschiebung des Schaltsignals) Wert, wenn ein echtes Signal im Rauschen enthalten ist.

Das ist das Lock-In-Prinzip.

In einer Simulation wurde die Multiplikation für das oben gezeigte Rauschen sowie für das Signal plus Rauschen (Bild 3) über eine Zeitspanne von 300 msec durchgeführt. Als Mittelungszeit oder Zeitkonstante wurde 20 msec gewählt, was gut 2 Signalperioden (120 Hz) entspricht. Das Ergebnis sieht so aus:

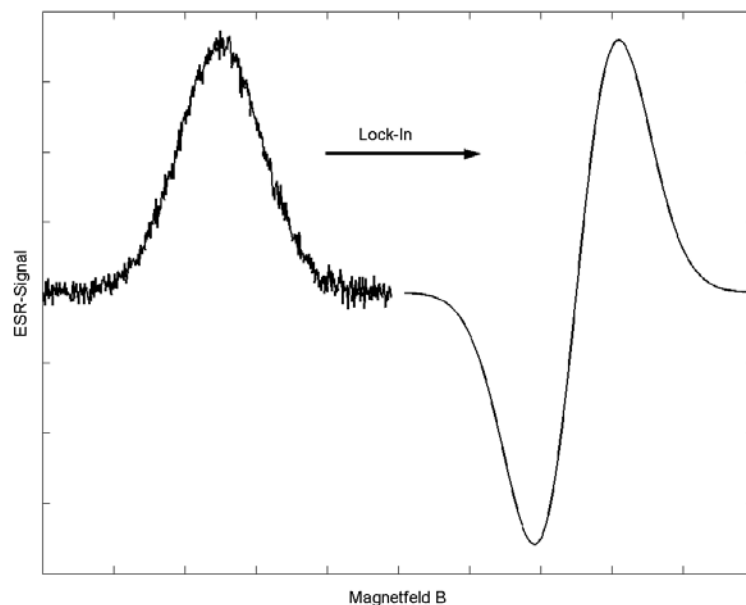


Die Ausgangssignale entsprechen demjenigen Anteil des Eingangssignals, der mit der Modulation in Phase liegt, gleichgerichtet und über die Zeitkonstante gemittelt. Deshalb schwankt das Ausgangssignal beim reinen Rauschen um Null, das mit Messsignal um $\sqrt{2}$. Der verbliebene niederfrequente Anteil des Rauschens ist dem Rohsignal nicht ohne weiteres anzusehen und verblüfft häufig den Experimentator.

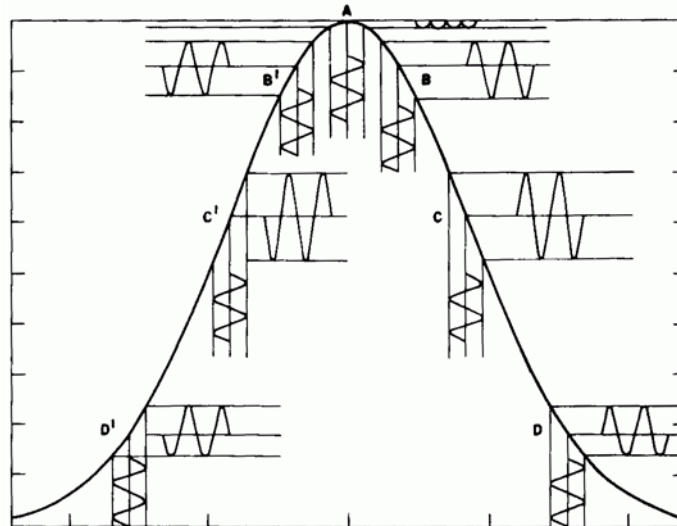
Aus dem geschilderten Funktionsprinzip erkennt man, dass die **relative Phase zwischen Schalt-Signal und dem zu detektierenden Signal am Eingang sehr wichtig ist**. Sind beide in Phase, so hat man maximales Ausgangssignal, bei 180° das negative davon und bei 90° verschwindet dasselbe. Letzterer Fall erschwert die Suche nach einem Signal. Die Phasenverschiebung zwischen dem Modulationsgenerator und dem modulierten Anteil des Messsignals ist i.A.

unbekannt. Jeder in der Nachweisschaltung liegende Verstärker kann eine Phasenverschiebung bewirken. Da es immer sein kann, dass man beim erfolglosen Signal-Suchen ausgerechnet bei 90° gemessen hat, empfiehlt es sich immer noch einmal mit um 90° weiter gedrehtem Phasenknopf zu messen. Die „richtige“ Phase Φ wird bei sichtbarem Signal so eingestellt, dass man Φ so lange variiert, bis bei $\Phi+90^\circ$ das Signal verschwindet. Das geht leichter, als einfach nur zu maximieren.

Die Modulationstechnik verändert in der Regel die Form des Messsignals. Als Beispiel betrachten wir ein ESR-Gerät was die durch die magnetische Resonanz bewirkte Absorption der Hochfrequenz als Funktion des statischen Magnetfeldes B nachweist. Ohne Lock-In habe dieses Signal Gauß-Form, mit Lock-In kommt (bei kleiner Modulation) dessen Ableitung heraus:



Das folgende Bild erklärt, wie das kommt:



Aufgetragen ist die HF-Absorption gegen B, diesmal ohne Rauschen. Die senkrecht liegenden Sinus-Züge stellen die zeitliche Modulation von B dar. Der Mittelwert von B verändert sich üblicherweise so langsam, dass er in diesem Bild als senkrechte Linie erscheint (um die der sich der Sinus windet). Die Punkte A-D' stellen also ausgewählte Momentaufnahmen bei „Fahren“ (neudeutsch: „Sweepen“) von B dar. Bei jedem Punkt ist die Antwort des Detektionskanals waagerecht aufgemalt. Es handelt sich dabei schlicht um die Projektion des Modulationsfeldes auf die Resonanzkurve. Man erkennt, dass bei den Wendepunkten C und C' das modulierte Messsignal entgegengesetzte Phase hat. Der Lock-In macht dort also entgegengesetzte Ausschläge. Außerdem ist sein Ausgangssignal dort am größten. C und C' entsprechen also den Extremwerten der Ableitungsstruktur. Der Rest ist ohne weiteres zu verstehen. Interessant ist noch die Stelle A: Dort besitzt das modulierte Messsignal die doppelte Frequenz, was am Lock-In-Ausgang Null ergibt. D.h., beim Nulldurchgang der Lock-In-Signals herrscht maximale Resonanzabsorption.

Die geschilderten Erscheinungen sind einigermaßen universell, unabhängig von der tatsächlichen Messgröße und obwohl es eine Vielzahl von weiterführenden Lock-In-Techniken gibt.

Für Elektronik-Begeisterte: Der „elementare“ Lock-In des ESR-Versuchs besitzt einen sehr einfachen phasenempfindlichen Gleichrichter, dessen Funktion mit den entsprechenden Programmen (Pspice, CircuitMaker, etc., siehe K. Betzler: Elektronikpraktikum) leicht simuliert werden kann:

