

# Detektion schwacher Signale mit einem Injection Locked Oszillator

Herbert Weidner, Am Stutz 3, 63864 Glattbach, Email: herbertweidner@gmx.de

**Zusammenfassung:** Ein Software-Ringoszillator mit einem Fangbereich von über  $\pm 5\%$  kann injizierte Signale mit  $\text{SNR} = -20 \text{ dB}$  regenerieren und noch schwächere Signale mit  $\text{SNR} = -27 \text{ dB}$  identifizieren. Injection-locking entspricht einer PLL erster Ordnung und ist immer stabil. Deshalb sind keine Berechnungen oder Abgleichmaßnahmen notwendig. Ein ILO ist sehr einfach zu implementieren: kein Phasendetektor, Varaktor oder Schleifenfilter.

**Einleitung:** NMR-Signale im Magnetfeld der Erde sind extrem schwach und können nur mit sehr schmalbandigen Filtern nachgewiesen werden. Bei großer Bandbreite lässt das Filter zu viele Störungen passieren und das Signal verschwindet im Rauschen. Ein Injection Locked Oszillator (ILO) niedriger Frequenz erreicht problemlos Bandbreiten kleiner als  $0,01 \text{ Hz}$  und besitzt den Vorteil, dass seine Frequenz – in gewissem Rahmen – der Signalfrequenz folgt.

Die Funktion eines ILO lässt sich einfach beschreiben: Ein Signal stört einen harmonischen Oszillator ähnlicher Frequenz. Wenn die Signalamplitude groß genug und die Frequenzdifferenz klein genug sind, kann das Signal den Oszillator synchronisieren. Dann stimmen beide Frequenzen überein und das Rauschen erzeugt eine variable Phasendifferenz. Als ILO geeignet sind Oszillatoren, deren Frequenz sich leicht beeinflussen lässt, weil Frequenzänderungen nur eine geringe Phasenverschiebung im frequenzbestimmenden Teil der Schaltung bewirken. Technisch ausgedrückt: Der [Gütefaktor](#) der frequenzbestimmenden Schaltungsteile soll so gering wie möglich sein. Deshalb eignen sich RC-Oszillatoren besser als Quarz- oder LC-Oszillatoren. Ein [Ring-Oszillator](#) ist noch vorteilhafter und wird nachfolgend eingesetzt.

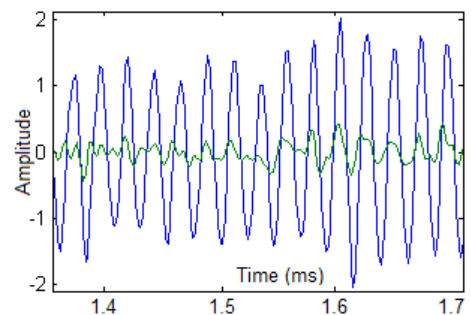


Abbildung 1: Vergleich von *Signal* und *ILO* im eingerasteten Zustand.

**Merkmale eines ILO:** Unterscheiden sich die Frequenzen von Signal und ILO zu sehr, zeigt das Spektrum der ILO-Ausgangsspannung die beiden Spektrallinien von Signal und Oszillator. Letztere ist umgeben von einer breiten Rauschbasis, verursacht durch die inhärenten Phasenschwankungen des Ring-Oszillators und die Störungen durch das zugeführte Signal.

Der Fangbereich (engl. lock-in range) ist der Frequenzbereich, aus dem heraus der eingerastete Zustand erreicht werden kann. Dieser Übergang zum synchronisierten Zustand kann einige Perioden des Signals in Anspruch nehmen.

Unter Haltebereich (engl. hold-in range) versteht man den Frequenzbereich in dem der ILO stabil bzw. eingerastet arbeitet. Seine Frequenz ist identisch mit der Signalfrequenz. Das Spektrum des ILO zeigt eine sehr schmale Spektrallinie, begleitet von einer Rauschbasis, die das Signal vorgibt. Der Haltebereich ist breiter als der Fangbereich.

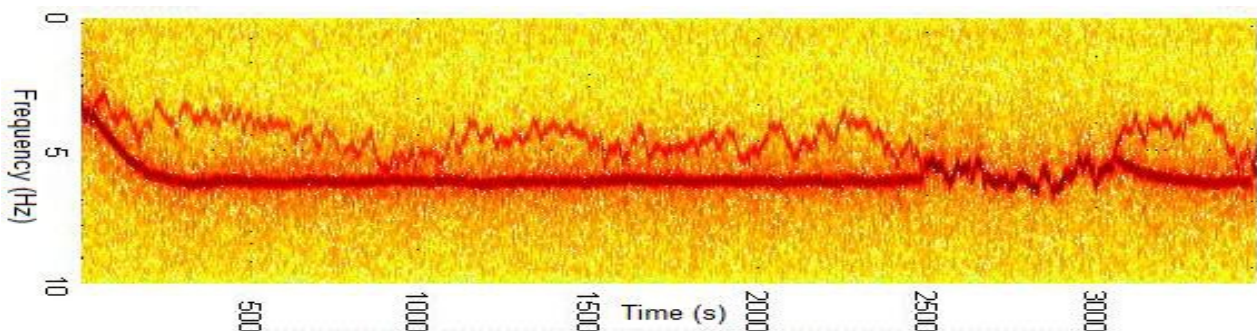


Abbildung 2: Zeitweise Synchronisation des ILO (unten) durch ein Signal variabler Frequenz.

Das Spektrogramm in Abb. 2 zeigt interessante Details: Ein schwaches Signal stark variabler Frequenz versucht, einen ILO zu "fangen". Zunächst misslingt die Synchronisation, weil die Signalfrequenz außerhalb des Fangbereichs liegt (ab Zeitpunkt 0 s). Der ILO strebt dann seiner voreingestellten, fast konstanten Frequenz bei etwa 6 Hz zu und ignoriert das Signal, weil dessen Frequenz außerhalb des Fangbereiches liegt. Der rötliche Farbsaum wird durch das starke Phasenrauschen des gestörten Ring-Oszillators erzeugt. Zum Zeitpunkt 2450 s erreicht die Signalfrequenz den Fangbereich, woraufhin der ILO synchronisiert. Von nun an sind beide Frequenzen identisch. An einem späteren Zeitpunkt (3040 s) überschreitet die Signalfrequenz den Haltebereich und der eingerastete Zustand endet.

Während des Zeitraums 2450 s bis 3040 s erkennt man an der intensiveren Farbe, dass die mittlere Amplitude des ILO steigt, solange der eingerastete Zustand aufrechterhalten bleibt. Gleichzeitig sinkt die Halbwertsbreite der Spektrallinie. Beides kann als Nachweis des eingerasteten Zustandes dienen.

**Programmierung des ILO:** Wenn das Signal in digitalisierter Form vorliegt, wird der Ringoszillator nicht als Hardware mit elektronischen Bauteilen sondern als Programm realisiert. Die Grundschialtung des Oszillators ist in [1] beschrieben und wird nachfolgend präzisiert. Ein ILO besitzt drei Steuereingänge und einen Ausgang:

- Der Wert „z“ ändert wie bei einem [VCO](#) in gewissen Grenzen die mittlere Frequenz eines Ring-Oszillators, wobei man den Wertebereich  $0 < z < 1$  beachten soll. Den Startwert von z wählt man so, dass der ILO möglichst schnell synchronisiert. Normalerweise ist der Frequenzbereich bekannt, in dem man das Signal sucht. Die Frequenz des Ring-Oszillators wächst annähernd proportional zu „z“. Bei einer Samplingfrequenz von 50 Hz lautet der Zusammenhang:  $f [Hz] = 7,9 \cdot z + 0,8$ . Bei höheren Genauigkeitsanforderungen im Bereich  $0,1 < z < 0,9$  gilt  $f [Hz] = -2,11 \cdot z^2 + 10 \cdot z + 0,29$ . Bei Verdopplung der Samplingfrequenz sind alle Koeffizienten in obigen Formeln zu verdoppeln.

- Der Wert „v“ legt die Soll-Amplitude des Ring-Oszillators *ohne Signal* fest. Wegen der begrenzenden Eigenschaft der Sigmoid-Funktion sollte die Amplitude kleiner als zwei sein. Darüber wird die Kurvenform verzerrt und die Frequenz weicht vom berechneten Wert ab. Wählt man eine zu geringe Amplitude, verringert sich die amplitudenstabilisierende Wirkung der Sigmoid-Funktion. Da das eingespeiste Signal die Amplitude des ILO vergrößert, werden die Schwingungen zu keinem Zeitpunkt vorübergehend aussetzen. Je geringer die programmierte Amplitude des Ring-Oszillators, desto breiter werden Fang- und Haltebereich. Eine Soll-Amplitude unter 0,5 hat sich bewährt. Der Wert von „v“ ist an den jeweils aktuellen Wert von „z“ anzupassen, der Zusammenhang lautet im Bereich  $0,1 < z < 0,9$ :  $v = -2,65 \cdot z^2 + 6,13 \cdot z - 7,7$  und hängt nicht ab von der Samplingfrequenz. Falls sich der Frequenzbereich auf Werte um  $z \approx 0,5$  beschränkt, genügt die Formel  $v = 3,44 \cdot z - 7$ .

- Der aktuelle Amplitude des Signals  $s(k)$  wird bei jedem Rechenschritt als „Störung“ zum berechneten Wert des Ring-Oszillators addiert und soll deshalb nicht zu groß sein. Mit  $A_{\text{Oszi}} / A_{\text{Signal}} \approx 10$  erzielt man gute Ergebnisse (siehe Abb. 1). Der Kern des MATLAB-Programm besteht aus wenigen Zeilen:

```
for k=2:size(y,1)
    b=v*(1/(1+exp(-y(k-1,3)))-0.5); y(k,1)=z*b+(1-z)*y(k-1,1)+s(k);
    b=v*(1/(1+exp(-y(k-1,1)))-0.5); y(k,2)=z*b+(1-z)*y(k-1,2);
    b=v*(1/(1+exp(-y(k-1,2)))-0.5); y(k,3)=z*b+(1-z)*y(k-1,3);
end, plot(y(:,3))
```

Der Kanal  $y(:,3)$  liefert eine rauschärmere ILO-Ausgangsspannung als der Kanal  $y(:,1)$ , weil der dazwischen liegende Kanal als Tiefpass wirkt.

**Messung des Fangbereichs:** In allen folgenden Beispielen wird der Wert für „z“ so gewählt, dass die Frequenz des Ring-Oszillators *ohne* Signal 4,00 Hz beträgt. Die Amplitude soll kleiner als 1 sein. Im Gegensatz zu einem Ringoszillator aus elektronischen Bauteilen ist die Spektrallinie des programmierten Ring-Oszillators rauscharm, es gibt auch keine Temperaturabhängigkeit.

Man speist sinusförmige Signale unterschiedlicher Frequenz ein und misst jeweils das Spektrum des ILO. Die blaue Kurve in Abb. 3 zeigt, welche Mindestamplitude ein ungestörtes Signal erreichen muss, um den Ring-Oszillator „einzufangen“. Ist das geschehen, erzeugt der ILO ein fast rauschfreies Signal, also eine scharfe Spektrallinie geringer Halbwertsbreite. Deshalb eignet sich ein ILO sehr gut zur Regeneration von schwachen verrauschten Signalen. Wenn das Signal frequenzmoduliert ist, folgt der ILO präzise allen Änderungen.

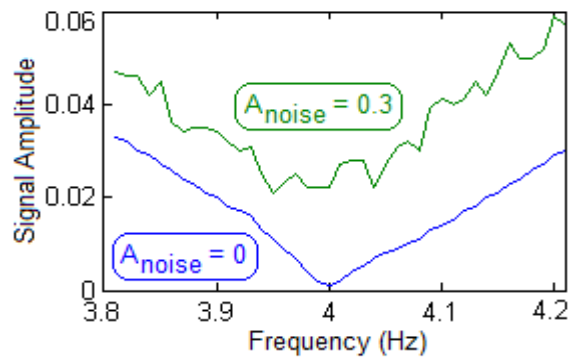


Abbildung 3: Minimale Signalamplitude als Funktion der Frequenz, um die Synchronisation zu erreichen. Ohne Signal erzeugt der Ringoszillator die Frequenz 4,00 Hz.

Die grüne Kurve in Abb. 3 zeigt die Fähigkeit des ILO, schwache Signale trotz eines wesentlich stärkeren Rauschpegels zu synchronisieren. Wenn die Signalfrequenz nicht genau bekannt ist und nicht mehr als 5% von der Sollfrequenz des ILO abweicht, darf die begleitende Rauschamplitude zwölfmal stärker sein als die Amplitude des Signals. Der ILO verbessert das SNR = -21 dB des Signals auf etwa SNR = 0 dB in seiner Ausgangsspannung. Mit zunehmendem Frequenzabstand muss die Signalamplitude steigen, um eine Synchronisation zu erreichen.

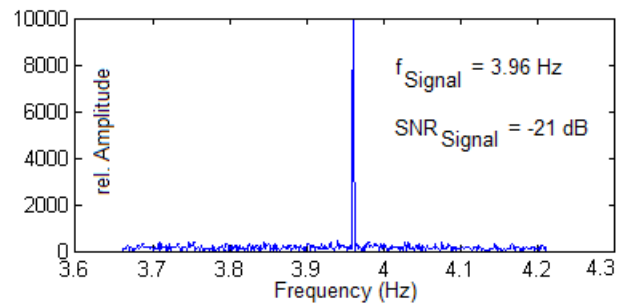
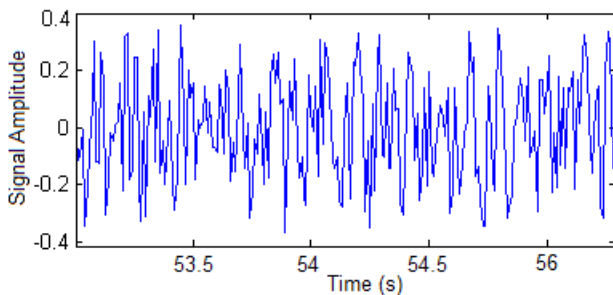


Abbildung 4: Links: Das eingespeistes Signal ( $A=0,03$ ) ist im stärkeren Rauschen ( $A=0,3$ ) nicht zu erkennen. Rechts: Der ILO ist synchronisiert, die Signalfrequenz ist klar erkennbar.

Frequenzänderungen von  $\pm 5\%$  kann der ILO problemlos folgen, bei größeren Schwankungen muss die mittlere Frequenz des Ring-Oszillators nachgeführt werden, um ein Abreißen der Synchronisation zu verhindern (siehe Abb. 2). Ein geeignetes Verfahren wird in einem anderen Artikel beschrieben.

**Die Grenzen der Empfindlichkeit:** Einem ILO gelingt es, im Rauschen schwache Signale zu entdecken und deren Frequenzen zu bestimmen. Im Gegensatz zu elektronischen Bauelementen nimmt ein Programm keinen Schaden, wenn der empfohlene Zahlenbereich überschritten wird. Viele Programme produzieren dann unsinnige Ergebnisse, nicht so der ILO. Obwohl dieser so programmiert ist, dass seine (ungestörte) Ausgangsamplitude etwa den Wert 0,5 hat, darf ein höheres Zusatzsignal aufgeprägt werden. Selbstverständlich kann man angesichts dieser Übersteuerung keine kohärente Sinusschwingung als Ausgangssignal des ILO erwarten. Trotzdem enthält das Spektrum sinnvolle Informationen.

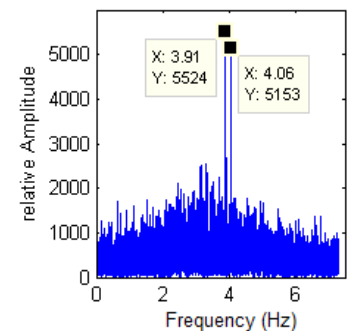


Abbildung 5: Spektrum der Ausgangsspannung des ILO bei stark verrauschtem Signal

Im nächsten Beispiel ist das Signal die Summe aus Rauschen (Amplitude

= 5) und zwei sinusförmigen Signalen der willkürlich gewählten Frequenzen  $f_1 = 3,91 \text{ Hz}$  und  $f_2 = 4,06 \text{ Hz}$ . Beide Amplituden haben den Wert 0,2. Dem ILO gelingt es, beide Signalfrequenzen simultan zu erfassen. Wie Abb. 5 zeigt, überragen die Peaks den Rauschuntergrund um mindestens das Doppelte. Das Ausgangssignal des ILO sieht ebenfalls aus wie Rauschen und enthält keine Andeutungen einer sinusförmigen Schwingung. Trotzdem findet das FFT-Programm genügend phasenrichtige Bruchstücke beider Signale und kann diese trotz  $\text{SNR} = -29 \text{ dB}$  korrekt identifizieren. Eine PLL-Schaltung würde das nicht schaffen. Auch wenn man eine andere Frequenzen im Bereich  $3,8 \text{ Hz} < f < 4,2 \text{ Hz}$  wählt, erhält man ein vergleichbares Spektrum wie in Abb 5.

Herbert Weidner (12. September 2020)