

Pulsed Operation And Noise

Applikationsschrift AN02

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Einleitung

Dieses Papier behandelt die oft gestellte Frage, ob und wie stark die Sensor-Empfindlichkeit durch Takten der Stromversorgung oder durch Anwendung der RFbeam RSW (Rapid Sleep Wakeup) Technologie beeinflusst wird.

Die hier genannten Überlegungen gelten weitgehend auch für das Sampling der Sensorsignale. Durch Einsetzen der Datenblatt-Werte sind die Angaben für Sensoren der K-LCx und K-MCx Serie mit RSW Technologie gültig.

Dieses Dokument behandelt vorwiegend den Einfluss des Taktens (Sampling) und nur am Rande die Herkunft der verschiedenen Ursachen des Rauschens.

Grundlagen

Widerstandsrauschen (Thermal Noise)

Jedes Rauschen eines elektronischen Systems wird vom Widerstandsrauschen überlagert. Dieses wird durch die thermischen Bewegungen von Ladungen erzeugt. Die allgemeine Gleichung (2) gilt für die normierte Bandbreite (Rechteckfenster) von 1Hz.

Es handelt sich also um das minimal mögliche Rauschen, zu welchem das Rauschen der verschiedenen Systemkomponenten hinzukommt.

$$P_N = N_T \cdot B_N = k \cdot T \cdot B_N \quad [\text{dBm}] \quad (1)$$

$$N_T = -174 \text{ dBm/Hz} \quad \text{at } T = 300^\circ\text{K} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung der Mess-Bandbreite ergibt sich ein Noise Floor von

$$N_{TB} = -174 \text{ dBm} + 10 \cdot \log B \quad \text{at } T = 300^\circ\text{K} \quad (3)$$

N_T : Rauschzahl (Johnson / Thermal Noise power density)

P_N : Thermische Rauschleistung

k : $1,38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ\text{K}$ (Boltzmann Konstante)

B_N : (3dB Bandbreite)

N_{TB} : Noise Floor bei Bandbreite B_N

Die Rauschleistung ist proportional zur Bandbreite.

Signal / Rauschabstand (S/N Ratio, SNR)

Der S/N Abstand ist das Verhältnis von Signalleistung zu Rauschleistung.

$$\text{SNR} = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{V_{\text{rms signal}}}{V_{\text{rms noise}}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (4)$$

Generell kann das SNR durch Verstärkung der Signale nicht verbessert werden. Liegt die Rauschzahl des Verstärkers oberhalb derjenigen des Eingangssignals, wird das SNR sogar verschlechtert.

Die wirksame Methode zur Optimierung des Signal/Rauschverhältnisses ist die Eingrenzung der Bandbreite auf die maximal erforderliche Signalfrequenz mittels Filterung.

Die Wirksamkeit eines solchen Filters ist im Kapitel '100% Einschaltdauer' gezeigt.

AN-02 Pulsed Operation and Noise

1/f Rauschen

1/f Rauschen wird auch als Flicker-Rauschen und Rosa-Rauschen bezeichnet. Das Flicker-Rauschen nimmt mit zunehmender Frequenz ab bis zur Eckfrequenz, wo das Flicker-Rauschen in das Weisse Rauschen übergeht. Oft sind auch mehrere 1/f Rauschquellen mit unterschiedlichen Eckfrequenzen wirksam.

Die Hauptquelle für diese Art Rauschen in Radar Transceivern sind die Mischer-Dioden und der Oszillator. Die Eckfrequenz liegt bei ca. 500 Hz. Damit liegen die Dopplerfrequenzen in Anwendungen für Bewegungsmelder (Türöffner, Sicherheitsanlagen usw) genau im 1/f Frequenzband.

Daraus ergibt sich, dass für solche Anwendungen mit tiefen Doppler Frequenzen das 1/f Rauschen bei tiefen Frequenzen dominant ist und die Aliasing Effekte durch Tastung des Sensors weitgehend vernachlässigt werden können.

Oszillator, Verstärker und andere Bauteile in der Signalkette verfügen ebenfalls über 1/f Rauschkomponenten, allerdings mit deutlich höheren Eckfrequenzen und kleinerer Steilheit. Die Verschlechterung des SNR durch Tastung fällt damit für Anwendungen mit höheren Dopplerfrequenzen deutlich weniger deutlich ins Gewicht als in Gleichung (9).

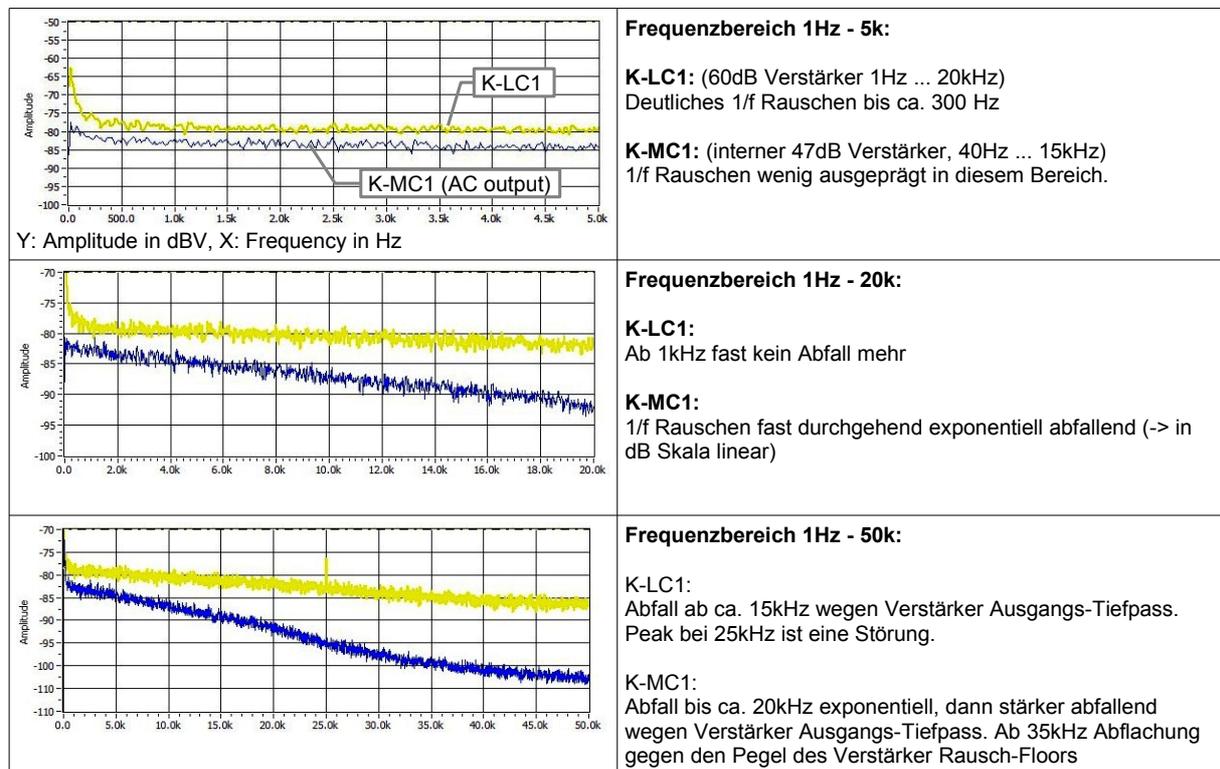


Fig. 1: Gemessenes 1/f Rauschen mit K-LC1a und K-MC1 Sensoren. Ein 1/f Verhalten liegt mit unterschiedlichen Steigungen fast über den gesamten Frequenzbereich bis 50kHz vor

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Abtastfrequenz und Tastverhältnis

In Stromspar Applikationen möchte man den Sensor nur so kurz wie möglich einschalten. Dazu ist eine ausreichende Bandbreite vor dem Schaltelement notwendig (Tiefpass LP1 in Fig. 4). Da diese Bandbreite grösser gewählt werden muss als die Doppler Signalbandbreite, ist man zwangsläufig mit einer Unterabtastung und damit mit dem Aliasing Effekt konfrontiert.

Abtastfrequenz

Die Abtastfrequenz f_s muss so gewählt werden, dass die gewünschte obere Grenzfrequenz des Dopplersignals erfasst werden kann. ($f_{\text{Doppler}} = 44\text{Hz pro km/h}$ oder 158Hz pro m/s). Laut dem Abtast-Theorem von Shannon muss dazu die Abtastfrequenz mindestens doppelt so gross wie die höchste Doppler-Signalfrequenz f_N gewählt werden.

$$f_s > 2 \cdot f_N \quad (5)$$

mit f_s = Abtastfrequenz, f_N = Nyquist Frequenz = höchste erlaubte Signalfrequenz.

Einschaltdauer

Die kürzest mögliche Einschaltdauer T_p wird durch die Hochlaufzeit des Sensors und die Bandbreite des Sensor Ausgans (LP1 in Fig. 4) bestimmt.

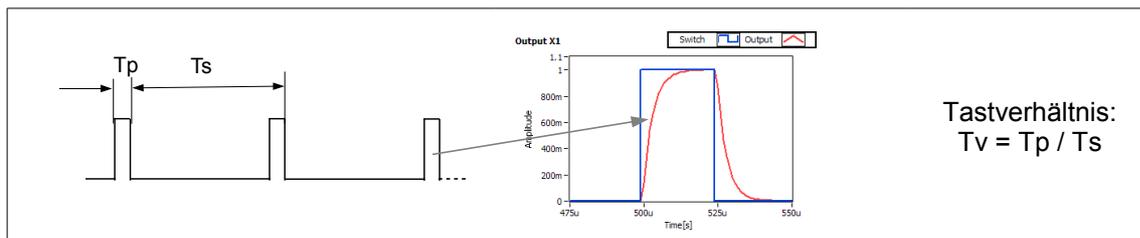


Fig. 2: Einschaltzeit und benötigte Bandbreite

Unter Vernachlässigung der Hochlaufzeit (ca. $1\mu\text{s}$) kann $T_{p\text{min}}$ über die "Unschärferelation der Nachrichtentechnik" bestimmt werden.

$$B \cdot T \geq 1/2 \quad (6)$$

mit B = Bandbreite, T = Impulsdauer.

Damit wird

$$T_p \geq \frac{1}{2B} \quad (7)$$

Je kleiner T_p gewählt wird, desto grösser ist die benötigte Bandbreite am Eingang. Dadurch erhöht sich der Rauschanteil durch den Aliasing Effekt, wie im folgenden Kapitel beschrieben.

→ Bei der Wahl der minimalen Einschaltzeit muss ein Kompromiss eingegangen werden zwischen Stromersparnis und dem Verlust an Empfindlichkeit wegen des schlechteren SNR.

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Aliasing Effekt

Der Aliasing Effekt entsteht durch Verletzung des Abtasttheorems mit einer Frequenz unterhalb der Nyquist Frequenz:

$$fn = fs/2 \quad (8)$$

Eine Verletzung des Abtasttheorems wird auch als Rückfaltung (Aliasing) der höherfrequenten Signalanteile in den Bereich $\leq fn$ beschrieben. Dies gilt sowohl für Nutzsignale als auch für das Rauschen. Das rückgefaltete Rauschen addiert sich dann zu dem bereits von 0 bis fn vorhandenen Rauschen und verschlechtert das Signal SNR.

Die Signalanteile $> fn$ werden bis zur Eingangs-Bandbreite von 50kHz in das Band 0 bis fn gefaltet: 2.5kHz .. 5kHz, 5kHz .. 7.5kHz bis 47.5kHz .. 50kHz.

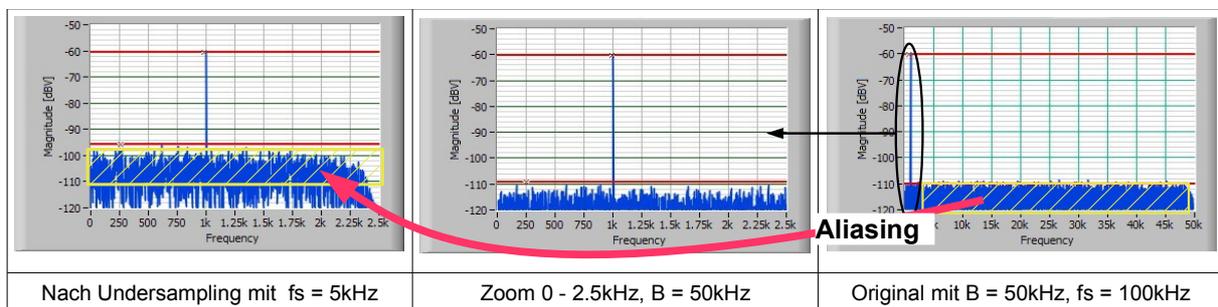


Fig. 3: Aliasing Effekt durch Untersampling mit $fs = 5\text{kHz}$

Durch Unterabtastung bei Weisssem Rauschen wird der Noise Floor um ΔNF angehoben:

$$\Delta NF = 10 \cdot \log\left(2 \cdot \frac{B}{fs}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{B}{fn}\right) \text{ dB} \quad (9)$$

mit $B = \text{Signal-Bandbreite}$, $fn = \text{Nyquist Frequenz}$, $fs = \text{Abtastfrequenz}$

Tastverhältnis und Rauschen

Mit zunehmendem Tastverhältnis $Tv = Tp / Ts$ erhöht sich die Wirksamkeit der oberen Grenzfrequenz des Ausgangsfilters, da das Filter während der Impulszeit wirksam ist und damit das Rauschen integriert.

Betrachten wir den Extremfall $Tv = 1$, also keine Tastung, ist das Ausgangsfilter LP2 in Fig. 4 voll wirksam. Mit abnehmendem Tv nimmt der Rauschpegel aufgrund des oben geschilderten Aliasing Effekts zu:

$$\Delta NF = 10 \cdot \log(1/Tv) = 10 \cdot \log(Ts/Tp) \text{ dB} \quad (10)$$

mit $Ts = \text{Abtastrate}$, $Tp = \text{Einschaltdauer}$

Tp sollte nach Formel (7) gross genug gewählt werden, um die Amplitude des Nutzsignals nicht zu beschneiden.

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Allgemeines Beispiel

Das Beispiel zeigt ein System, bei welchem das Sensorsignal im Tastverhältnis 1/10 betrieben werden soll. Die Taktung kann über die Sensorspeisung erfolgen (sofern die Signalkette bis zum Punkt X1 in (Fig. 4) **die erforderliche Bandbreite aufweist**) oder auch über den RSW Eingang bei RFbeam Sensoren der K-MC Serie.

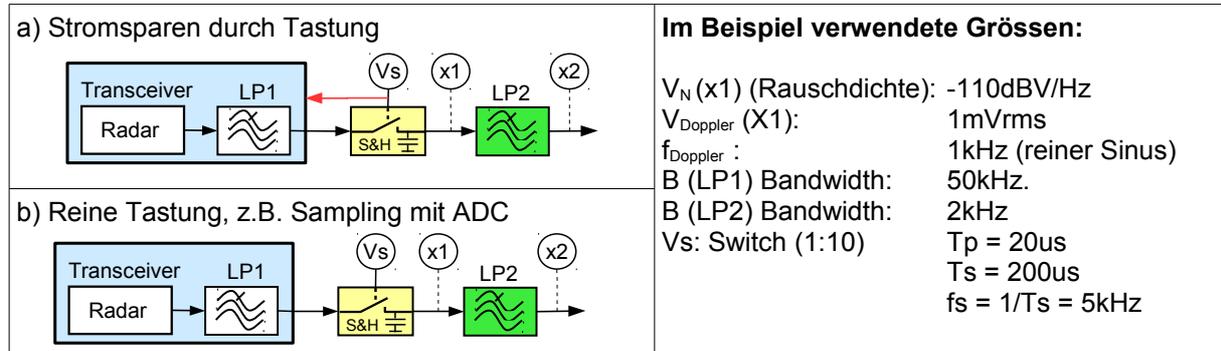


Fig. 4: Symbolisches Schema

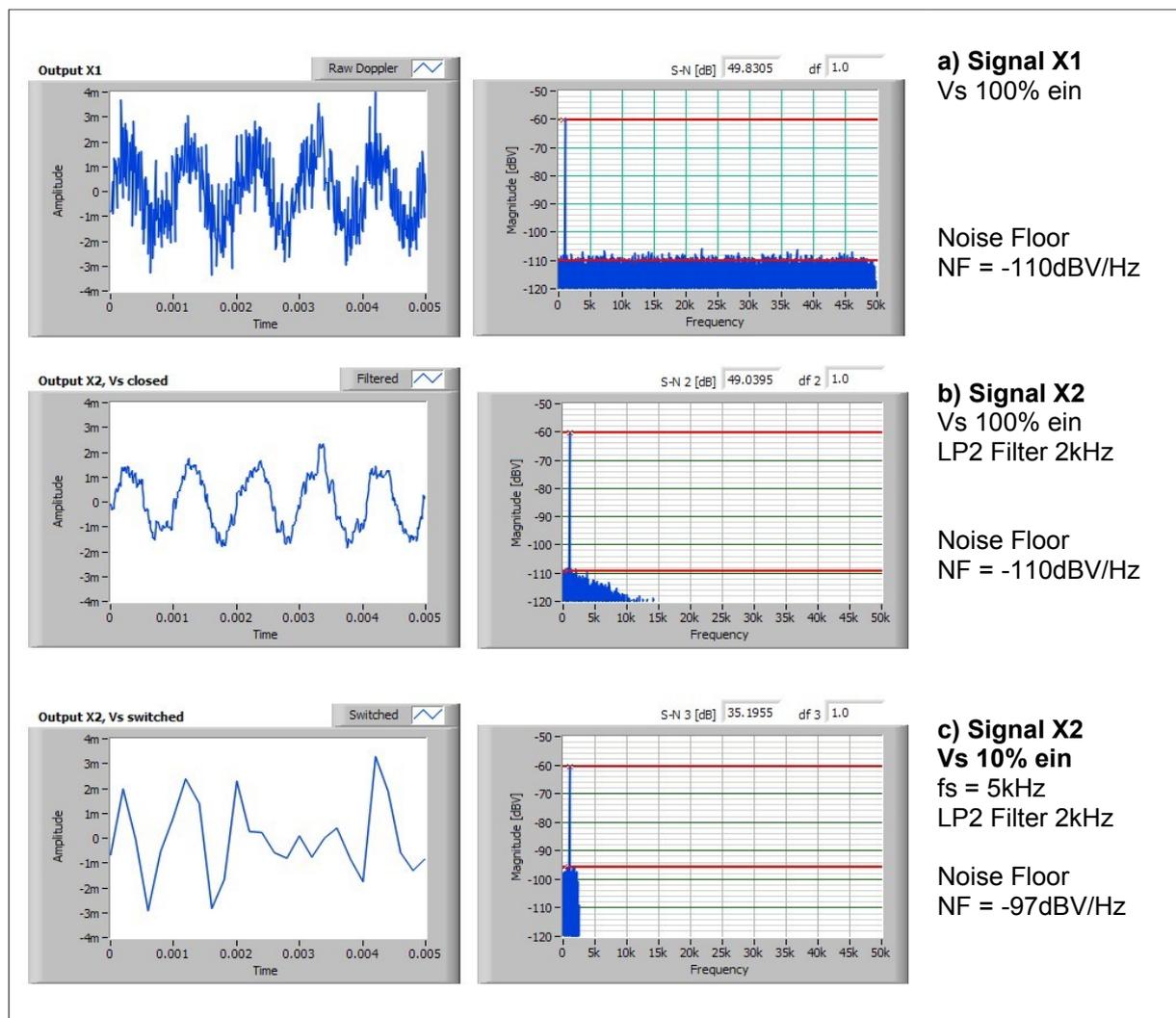


Fig. 5: SNR hängt von Tastfrequenz und Tastverhältnis ab. FFT mit $df = 1\text{Hz}$

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Diskussion der Ergebnisse

Im Niederfrequenzbereich wird vorwiegend mit Amplituden Pegeln gerechnet, während im Hochfrequenzbereich vorwiegend Leistungspegel verwendet werden. Dopplersignale liegen typischerweise im Niederfrequenzbereich unter 100kHz, so dass an dieser Stelle Amplitudenpegel verwendet werden.

Zusammenfassung

- Der Noise Floor bleibt in der beobachteten Bandbreite bei X1 und X2 (Fig. 4) identisch.
- Die Signalamplitude bleibt in allen Varianten konstant, da die Signalfrequenz immer innerhalb der Bandbreiten liegt.
- Das 2kHz Tiefpassfilter hat keinen Einfluss auf den Noise Floor innerhalb der Bandbreite (Fig. 5b).
- Der Noise Floor steigt bei Tastung mit $f_s = 5\text{kHz}$ um 13dB (Fig. 5c)

100% Einschaltdauer

Eingangssignal X1:

LP1 Filter Bandbreite: 50kHz

Rauschpegel: $V_N = -110\text{dBV/Hz}$

-> Rauschpegel: $V_{NB} = -110\text{dBV} + 10 \cdot \log(50\text{kHz}/1\text{Hz}) \text{ dB} = -63\text{dBV}$

Signalpegel: $V_S = -60\text{dBV}$ (-> 1mV_{rms})

Unter Verwendung von Formel (4) erhalten wir das Signal/Rauschverhältnis:

$$\boxed{SNR = V_S - V_{NB} = -60\text{dBV} - (-63\text{dBV}) = 3\text{dB}} \quad f_{\text{signal}} = 1\text{kHz}, B = 50\text{kHz} \quad (11)$$

Ausgangssignal X2:

LP2 Filter Bandbreite: 2kHz

Rauschpegel: $NF = -110\text{dBV/Hz}$

-> Rauschpegel: $V_{NB} = -110\text{dBV} + 10 \cdot \log(2\text{kHz}/1\text{Hz}) \text{ dB} = -77\text{dBV}$

Signalpegel: $V_S = -60\text{dBV}$ (= 1mV_{rms})

Wegen der tiefen Bandbreite des Filters LP2 wird Rauschenergie gefiltert und damit das SNR um $10 \cdot \log(50\text{kHz}/2\text{kHz}) = 14\text{dB}$ verbessert:

$$\boxed{SNR = V_S - V_{NB} = -60\text{dBV} - (-77\text{dBV}) = 17\text{dB}} \quad f_{\text{signal}} = 1\text{kHz}, B = 2\text{kHz} \quad (12)$$

10% Einschaltdauer

Um die Signalbandbreite $B = 2\text{kHz}$ zu erhalten, muss dieses Signal mit mindestens $f_s > 2 \cdot B = 4\text{kHz}$ (Nyquist Theorem) abgetastet werden. Dies ergibt ein Sampling Intervall von

$$\boxed{T_{s_{\text{max}}} = 1/f_s = 250\mu\text{s}} \quad (13)$$

Im Beispiel in Fig. 5c haben wir $T_s = 200\mu\text{s}$ gewählt. Für 10% Einschaltdauer bzw ein Tastverhältnis 1/10 wird $T_p = 20\mu\text{s}$.

Im Stromsparbetrieb muss T_p gross genug sein, damit der Sensor hochgefahren ist das Ausgangssignal den Tiefpass LP1 durchlaufen hat. In unserem Beispiel (Fig. 4) vernachlässigen wir die Hochlaufzeit (ca. $1\mu\text{s}$) und betrachten nur die minimale Impulsbreite T_p gemäss Formel (7).

$$\boxed{T_{p_{\text{min}}} > \frac{1}{(2 \cdot B_{LP1})} = 10\mu\text{s}} \quad , \text{ gewählt } T_p = 20\mu\text{s} \quad (14)$$

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Beeinflussung Noise Floor durch Tastung

Ohne Tastung:

Im Beispiel haben wir eine Bandbreite $B_{LP1} = 50\text{kHz}$ gewählt. Da die Rauschamplitude proportional zur Bandbreite ist, ergibt sich

$$V_{NB} = NF \cdot B = -110\text{dBV/Hz} + 10 \cdot \log(50\text{kHz}/1\text{Hz})\text{dB} = -63\text{dBV} \quad \text{an X1 mit } B = 50\text{kHz} \quad (15)$$

Mit Tastung:

Wird nun dieses Signal mit der Sampling Rate f_s abgetastet, steht nach dem Sampling eine Bandbreite

$B_{X1S} = f_s/2 = 1/2 \cdot T_s = f_{\text{NYQUIST}} = 2.5\text{kHz}$
zur Verfügung.

Das bedeutet eine Unterabtastung, bezogen auf die Eingangsbandbreite von $B = 50\text{kHz}$. Damit werden alle Frequenzanteile oberhalb von $f_{\text{NYQUIST}} = 2.5\text{kHz}$ in den Frequenzbereich $0 \dots 2.5\text{kHz}$ gefaltet (Aliasing Effekt**). In unserem Beispiel betrifft dies nur das Rauschen.**

Dadurch erhöht sich der Noise Floor NF um
 $10 \cdot \log(B / B_{X1S}) = 10 \cdot \log(50\text{kHz} / 2.5\text{kHz}) = 13\text{dB}$

$$NF_{X1S} = NF_{X1} + \log B / B_{X1S} = -110\text{dB/Hz} + 13\text{dB} = -97\text{dBV/Hz} \quad \text{an Punkt X1} \quad (16)$$

und es ergibt sich eine Rauschamplitude von

$$V_{NBS} = NF_{X1S} \cdot B_{X1S} = -97\text{dBV/Hz} + 10 \cdot \log(2.5\text{kHz}/1\text{Hz})\text{dB} = -63\text{dBV} \quad \text{an X1, } B = 2.5\text{kHz} \quad (17)$$

Dies ist genau der Wert wie vor der Tastung, allerdings wirksam in der Bandbreite 2.5kHz.

Das Signal/Rauschverhältnis beträgt wie in Gleichung (11)

$$SNR = V_S - V_{NB} = -60\text{dBV} - (-63\text{dBV}) = 3\text{dB} \quad f_{\text{signal}} = 1\text{kHz}, B = 2.5\text{kHz} \quad (18)$$

Allerdings hat jetzt eine Filterung mit $LP2 = 2\text{kHz}$ des Signal aus Formel (18) keine merkbare Wirkung mehr, da das SNR nur noch um $10 \cdot \log(2.5\text{kHz}/2\text{kHz}) = 0.09\text{dB}$ verbessert werden kann.

Der Vergleich von Formel (12) mit Formel (18) zeigt:

Die Tastung hat unser SNR um $17\text{dB} - 3\text{dB} = 14\text{dB}$ verschlechtert.

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Pulsed Operation mit RSW

Voraussetzung für eine optimale Nutzung der Stromsparfunktion mittels RSW ist eine zeitlich starre Beziehung zwischen der Ansteuerung am /Enable Eingang und der Abtastung des Ausgangssignals.

Abtastung des Ausgangssignals

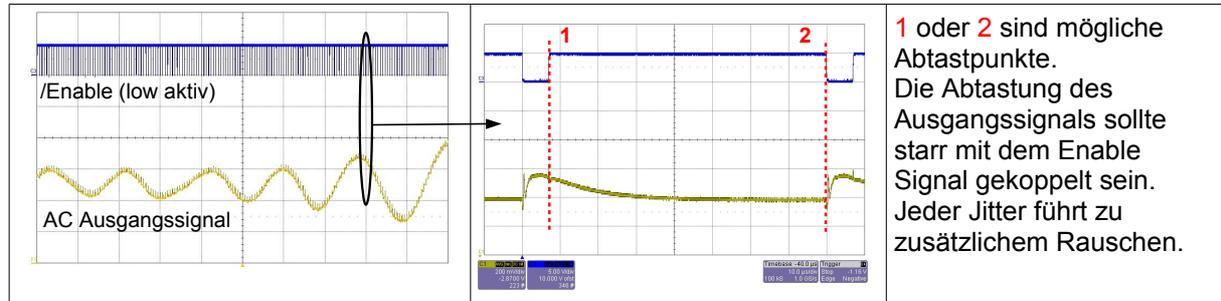


Fig. 6: Abtastzeitpunkte bei RSW

Abtastfrequenz und Tastverhältnis

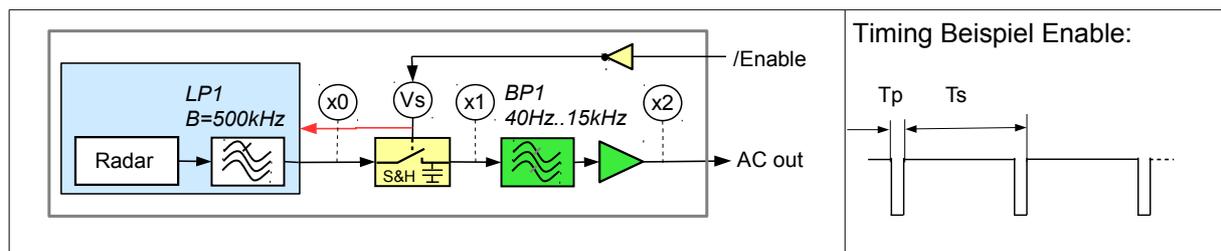


Fig. 7: RSW Prinzip in K-MCx Sensoren

Die K-MCx Sensoren verfügen über interne Sample&Hold (S&H) Strukturen, so dass die Bandbreiten an den Punkten (x0) und (x2) in Fig. 7 nicht beeinflusst werden können.

Einfluss der Abtastfrequenz

Die meisten RFbeam Transceiver besitzen eine „RSW“ (Rapid Sleep Wakeup) Möglichkeit. Die oben geschilderten Effekte bezüglich Aliasing treffen auch für RSW zu. Die interne ZF Bandbreite am RSW Eingang beträgt rund $B = 500\text{kHz}$. Bei einer Tastfrequenz $f_s = 20\text{kHz}$ ergibt sich nach Formel (9):

$$\Delta NF = 10 \cdot \log\left(2 \cdot \frac{500\text{kHz}}{20\text{kHz}}\right) = 17\text{dB} \quad (19)$$

Aufgrund des abfallenden Rauschpegels bei hohen Frequenzen ($1/f$ Verhalten) ist 17dB sehr konservativ. Realistischerweise kann mit maximal 12dB Verlust an SNR gerechnet werden. Bei längeren Einschaltzeiten wird das Ausgangsfilter des AC Ausgangs ($B=15\text{kHz}$) auch für das Rauschen wirksam, so dass das SNR verbessert werden kann.

Formel (19) geht davon aus, dass die Impulszeit die Bedingung gemäss Formel (14) erfüllt:
 $T_p > 1/(2 \cdot 500\text{kHz}) = 1\mu\text{s}$.

Im Folgenden wird gezeigt, dass eine **Verlängerung der Einschaltzeit deutliche Verbesserungen** des SNR bewirkt.

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Einfluss der Einschaltzeit

Mit abnehmendem $T_v = T_p/T_s$ nimmt der Rauschpegel gegenüber dem stationären Betrieb gemäss Formal (10) zu. In unserem Beispiel mit $T_v = 0.1$ ergibt sich

$$\Delta NF = 10 \cdot \log(50\mu s / 5\mu s) = 10\text{dB} \tag{20}$$

Wird in (20) die aufgrund der Bandbreite minimal zulässige Einschaltzeit 1 μ s eingesetzt, erhalten wir wiederum 17dB, wie vorher in Gleichung (19) gezeigt.

Reales RSW Beispiel

Das Beispiel zeigt den Rauschpegel ohne und mit Stromsparfunktion. Messbedingungen:

- Sensor Typ: K-MC1
- Abtastfrequenz: 20kHz
- Tastverhältnis: 0.1 ($T_p = 5\mu s$, $T_v = 50\mu s$)
- Ausgangssignal: gemessen am AC Ausgang

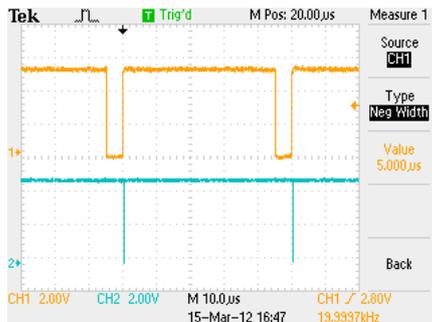


Fig. 8 zeigt die Ansteuerung des /Enable Signals eines K-MC1 Modul (Kanal oben) mit $T_p = 5\mu s$. Die Abtastung erfolgt nach Abschluss des Samplings (Kanal unten).

Wichtig ist ein starres Zeitverhältnis zwischen dem /Enable Signal und der Abtastung. Jeder Jitter zwischen /Enable und Abtastung erhöht das Rauschen und verschlechtert damit das SNR.

Fig. 8: /Enable und /Abtastsignal

Fig. 9 oben: FFT (8192 Punkte) und unten das Zeitsignal samt Abtastpunkten. Der Horizontale Cursor dient als Referenz für den mittleren Rauschpegel bei Dauerbetrieb. Wie nach Gleichung (20) erwartet bewirkt die Tastung mit 10% Tastverhältnis ein zusätzliches Rauschen von etwa 10dB. Rechts im Bild sieht der Sensor ist ein reales Signal von 1kHz.

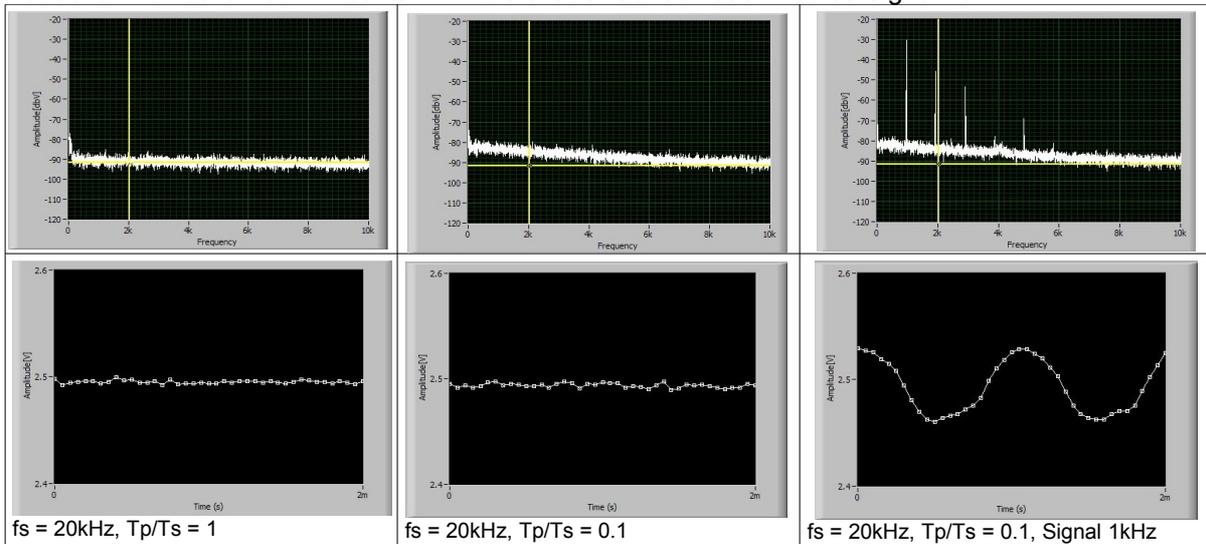


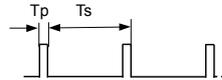
Fig. 9: Rauschen mit 100% und 10% Tastverhältnis. Oben: FFT, unten: Zeitsignal

AN-02 Pulsed Operation and Noise

Zusammenfassung

Definition Tastverhältnis

$$Tv = Tp / Ts$$



(21)

T_p = Einschaltzeit, T_s = Abtastintervall = $1/f_s$

Minimale Abtastfrequenz

$$f_s > 2 \cdot f_N$$

(22)

mit f_s = Abtastfrequenz, f_N = Nyquist Frequenz = höchste erlaubte Signalfrequenz.

Minimale Einschaltzeit

$$Tp \geq \frac{1}{2B} + Ton$$

(23)

mit T_p = Impulszeit, B = Bandbreite am Sampling Eingang (bei K-MCx: 500kHz), $Ton < 4\mu s$ bei K-MCx

Rauschen und Tastverhältnis

$$\Delta NF = 10 \cdot \log(1/Tv) = 10 \cdot \log(Ts/Tp) \quad [\text{dB}]$$

(24)

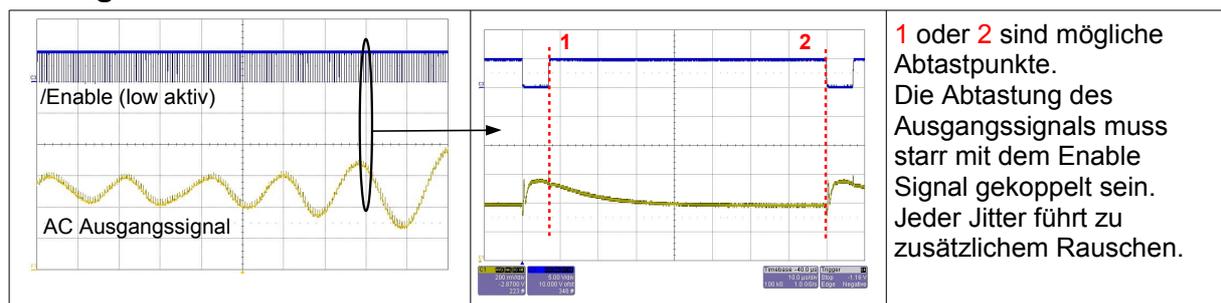
mit NF = Noise Floor, Tv = Tastverhältnis, Ts = Abtastrate, Tp = Einschaltdauer

Signal-Rauschabstand

$$SNR = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{rms_{signal}}}{V_{rms_{noise}}}\right) \quad [\text{dB}]$$

(25)

Timing



1 oder 2 sind mögliche Abtastpunkte. Die Abtastung des Ausgangssignals muss starr mit dem Enable Signal gekoppelt sein. Jeder Jitter führt zu zusätzlichem Rauschen.

Revision History

Version 1.0	Mar 16, 2012	Erstveröffentlichung
1.1	Apr 16, 2012	Tippfehler im Text korrigiert

RFbeam® ist eine geschützte Marke.

Alle Angaben in diesem Dokument sind ohne Gewähr. RFbeam behält sich das Recht vor, dieses Dokument ohne Vorankündigung anzupassen.