

Wahl der Abtastraten bei Messsystemen

Whitepaper

Die eingestellte Abtastrate (Anzahl der Messungen je Sekunde oder kurz Abtastfrequenz) eines Messkanals kann entscheidend dafür sein, ob die durchgeführte Messung brauchbar ist oder nicht. Wird zu schnell abgetastet, so ist das Messergebnis immer nutzbar; die Anzahl der Messdaten kann aber sehr hoch sein und Messwertspeicher ist begrenzt. Dadurch lässt sich möglicherweise nur ein Teil des interessierenden Signalverlaufs abspeichern. Ist die Abtastrate zu gering, so kann die gesamte Messung unbrauchbar werden. Was aber ist dann die „richtige“ Abtastrate und welche Rolle spielt in diesem Zusammenhang das Antialiasingfilter. Das nachfolgende Whitepaper will hierzu einige Hinweise geben.

Eine für praktische Belange sehr wichtige Frage ist die nach der erforderlichen Abtastfrequenz. Die Preise für Messsysteme sind u. a. direkt von der Messgeschwindigkeit des Systems abhängig. Oft wird aus Unkenntnis zu langsam abgetastet und es entstehen Aliasingfehler, die die Messung unbrauchbar machen, wenn kein Antialiasingfilter benutzt wird. Wird zu schnell abgetastet, so ist man zwar auf der "sicheren Seite"; es entstehen jedoch unnötig viele Daten, die möglicherweise nachverarbeitet, also reduziert werden müssen.

Bei der Digitalisierung analoger Signale entstehen einzelne Werte des Signals zu den Abtastzeitpunkten. Um die für den Frequenzinhalt des zu erfassenden Analogsignals angepasste Abtastfrequenz zu finden, soll der Abtastprozess folgendermaßen dargestellt werden.

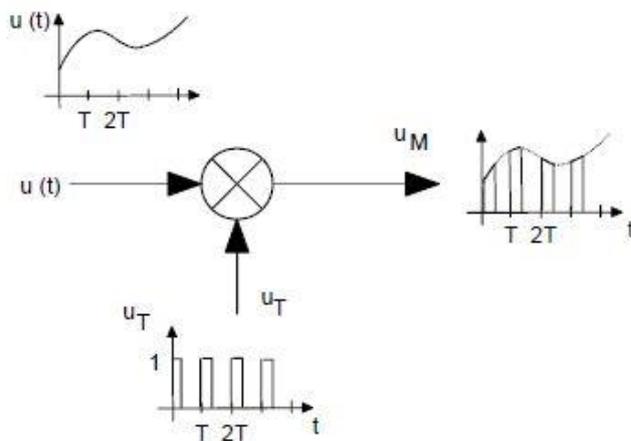


Bild 1: Abgetastetes Messsignal als multiplikatives Produkt zwischen der Messgröße $u(t)$ und einem periodischen Abtastsignal $u_T(t)$. $u_M(t)$ ist das abgetastete Signal vor der Digitalisierung durch den AD-Umsetzer.

Obiges Bild stellt den Abtastprozess dar, der üblicherweise von der Sample/Hold und AD-Umsetzer – Kombination vorgenommen wird. Er kann als Multiplikation der Messgröße $u(t)$ mit einem periodischen Abtastsignal $u_T(t)$ dargestellt werden. Das Ausgangssignal $u_M(t)$ ist noch kein digitales Signal, da es zuerst von einem S/H-Baustein (siehe White-Paper S/H-

Baustein) gehalten und vom AD-Umsetzer quantisiert werden muss. Folgendes kann festgestellt werden. Lässt man die Abtastzeit T gegen Null gehen, so erhält man offensichtlich das analoge Ausgangssignal am Ausgang des Multiplizierers. Um zu verstehen was bei der Multiplikation mit endlichen Abtastzeiten T passiert, soll zuerst ein Gedankenexperiment durchgeführt werden. Sind $u(t)$ und $u_T(t)$ zwei sinusförmige Signale mit den Frequenzen f bzw. f_T , so ergibt die Multiplikation, unter Beachtung dass

$$\sin(2\pi ft) \sin(2\pi f_T t) = \frac{1}{2} \{ \cos[2\pi(f - f_T)t] - \cos[2\pi(f + f_T)t] \}$$

gilt, die Differenz- und Summenfrequenzen $f - f_T$ und $f + f_T$.

Ein kleines Beispiel soll dieses Ergebnis verdeutlichen.

Multipliziert man ein Sinussignal mit sich selbst, so entsteht ein Signal, das nur positive Werte aufweist. Die negative Halbwelle des Signals wird durch die Quadrierung in den Bereich der positiven Halbwelle gelangen. Dadurch entsteht ein Signal mit der doppelten Signalfrequenz. Wo aber ist das Signal mit der Differenzfrequenz, also mit der Frequenz Null? Dieser Frequenzanteil ist ebenfalls vorhanden, denn das Signal hat nur positive Werte, mithin also einen Gleichanteil. Dieser Gleichanteil kann als Grenzfall für ein sinusförmiges Signal mit der Frequenz null gesehen werden.

Die Funktion $u_T(t)$ ist eine mit $1/T = f_T$ periodische Funktion und besitzt ein breites Spektrum, das umso breiter wird, je schmaler die Abtastimpulsbreite wird. Da $u_T(t)$ ein periodisches Signal ist, kann es nach Fourier in seine Frequenzanteile zerlegt werden. Neben der Frequenz der Grundschwingung f_T enthält dieses Signal noch weitere Harmonische bei $2f_T$, $3f_T$ usw. Die Multiplikation des Messsig-

nals $u(t)$ mit dem Anteil bei 0Hz von $u_T(t)$ ergibt also das Basisspektrum (siehe Bild unten). Die Multiplikation von Messsignal mit der Frequenz f_T führt zur ersten Wiederholung des Spektrums um f_T herum. Dass die Höhe der Amplituden der Spektren um f_T , $2 f_T$ usw. gleich hoch sind gilt streng genommen nur, wenn der Abtastimpuls eine verschwindende Breite besitzt, soll aber hier nicht weiter beachtet werden. Ist f_m die höchste im Analogsignal vorkommende Frequenz, so ergibt sich folgendes Bild für die Spektren der Signale.

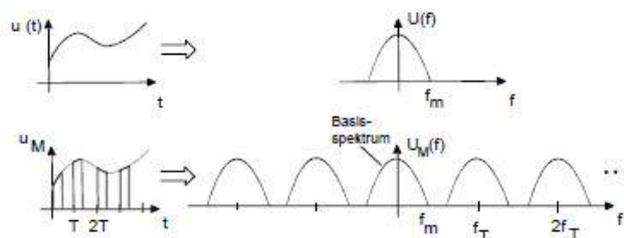


Bild 2: Spektrum des Analogsignals und des abgetasteten Signals

Um Überlappungen der durch die Abtastung entstehenden zusätzlichen Frequenzanteile mit dem Basisspektrum zu vermeiden, muss für die Abtastfrequenz nach Shannon offenbar gelten:

$$f_T > 2 f_m$$

Die Aufgabe des Antialiasingfilters ist es, die Bandbegrenzung des Messsignals $u(t)$ auf die maximale Frequenz f_m zu gewährleisten. Erst dadurch können Überlappungseffekte der Spektren vermieden werden, sofern die Bedingung $f_T > 2 f_m$ eingehalten wird. Bei den imc Geräten muss man sich um die richtige Wahl der Filterfrequenz f_m des Antialiasingfilters nicht kümmern. Hier wird lediglich die Abtastfrequenz vom Anwender vorgegeben und das

System stellt automatisch die passende Frequenz f_m ein.

Wird diese Bedingung nicht eingehalten, so ergeben sich Effekte wie der im folgenden Bild dargestellte. In diesem Fall ist die Differenzfrequenz zwischen Signal- und Abtastfrequenz als scheinbare Messsignalfrequenz zu sehen.

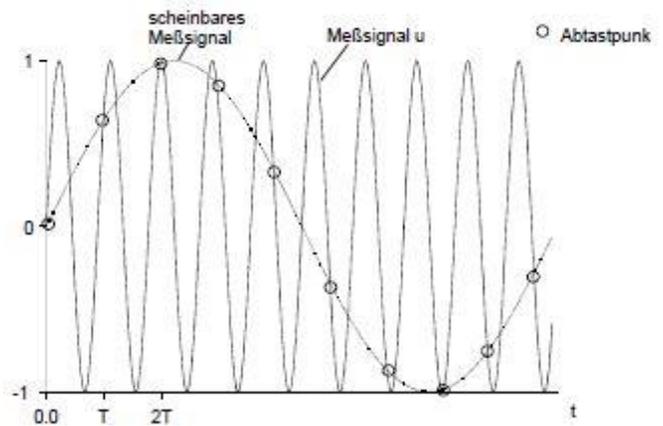


Bild 3: Durch Unterabtastung ergibt sich scheinbar ein Signal mit niedrigerer Frequenz

Scheinbar ergeben sich für das zu langsam abgetastete Messsignal eine Messpunktfolge, die als Sinus mit niedriger Frequenz (vom Auge) interpretiert wird. Bei den nachfolgenden Bildern (Bild 4 und Bild 5) wurden 120 Spektren nacheinander aufgenommen und die Signalfrequenz des sinusförmigen Messsignals von 0Hz bis 1kHz kontinuierlich erhöht. Die Abtastfrequenz war konstant 1kHz. Wird ein Sinussignal von z.B. 100Hz mit der Abtastfrequenz von 1kHz erfasst, so ergeben sich nach der vorgestellten Theorie die Frequenzen von

$$0\text{Hz} - 100\text{Hz} = -100\text{Hz} \text{ und } 0\text{Hz} + 100\text{Hz} = 100\text{Hz} \text{ sowie}$$

$$1\text{kHz} - 100\text{Hz} = 900\text{Hz} \text{ und } 1\text{kHz} + 100\text{Hz} = 1,1\text{kHz} \text{ usw.}$$

Da keine „negativen Frequenzen“ dargestellt werden, wird in diesem Fall eine Spektrallinie

bei 100 Hz dargestellt. Ist die angelegte Signalfrequenz höher als die halbe Abtastfrequenz von 500 Hz, angenommen sie liegt bei 700Hz, so macht sich in diesem Fall im dargestellten Frequenzbereich von 0...500Hz die Frequenz 1kHz - 700Hz = 300Hz bemerkbar. Obwohl die Signalfrequenz kontinuierlich erhöht wird, scheint die ermittelte Signalfrequenz kontinuierlich abzunehmen wie das Spektrum ohne Antialiasingfilter zeigt.

Im rechten Bild werden Signale mit einer Frequenz > 0,5 kHz vom Antialiasingfilter unterdrückt (nicht ideales Filter). Im praktischen Fall stören die nicht idealen Eigenschaften des Antialiasingfilters mit seiner endlichen Dämpfung für Frequenzen oberhalb der halben Abtastfrequenz nicht, da üblicherweise zu höheren Frequenzen die Signalamplituden der Messsignale klein werden. Im gezeigten Beispiel wurde die Signalamplitude aber konstant gelassen. Ausnahmen gibt es allerdings im Bereich der Akustik!

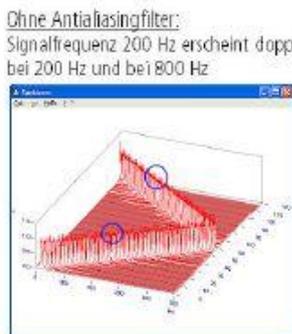


Bild 4: Ohne Antialiasingfilter



Bild 5: Mit Antialiasingfilter

Um solche Effekte zu vermeiden, kann einerseits die Abtastfrequenz hinreichend hoch gewählt werden, andererseits hat der Anwender dafür Sorge zu tragen, dass das zu messende Analogsignal keine relevanten Frequenzanteile oberhalb der Frequenz f_m aufweist. Dies kann dadurch erreicht werden, dass vor der Digitalisierung das Signal mit ei-

nem Antialiasingfilter auf den Frequenzbereich bis f_m begrenzt wird. Diese Filter sind verhältnismäßig teuer, da es sich um analoge Filter handeln muss, die entsprechend der gewählten Abtastfrequenz f_T variabel einstellbar sein müssen.

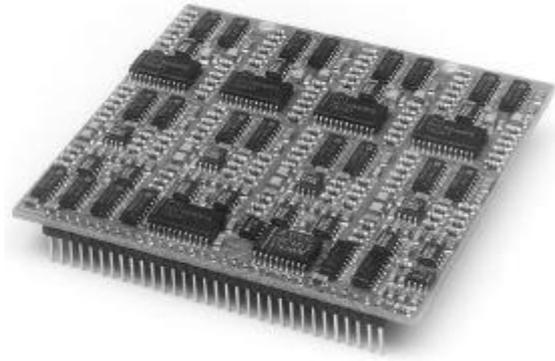


Bild 6: Beispiel eines 4-kanaligen Antialiasingfilters (8-ter Ordnung) für das imc Messsystem μ -MUSYCS aus dem Jahre 1995, das damals bereits vollkommen rechnergesteuert einstellbar war

Bei PC-Einsteckkarten sind Antialiasingfilter aus Kostengründen nahezu nicht vorhanden. Der Anwender hat für die Vermeidung dieser Effekte selbst Sorge zu tragen.

Entspannung am Horizont der Messtechnikwelt zeichnet sich mit dem Vordringen von sogenannten Sigma-Delta Umsetzern ab (siehe hierzu das entsprechende White-Paper). Diese Klasse von Umsetzern arbeitet mit einer konstanten, recht hohen Abtastfrequenz. Wegen der konstanten Abtastfrequenz muss das Antialiasingfilter nicht mit der Abtastfrequenz umgeschaltet werden und gestaltet sich technisch daher relativ einfach.

Bei Messungen in der Praxis wird daher meist empfohlen, eine Abtastfrequenz zu wählen, die 5...10 Mal so hoch ist wie die höchste noch relevante Signalfrequenz f_m . Auch hier werden häufig Fehler dadurch gemacht, dass diese Frequenz nicht richtig abgeschätzt wird.

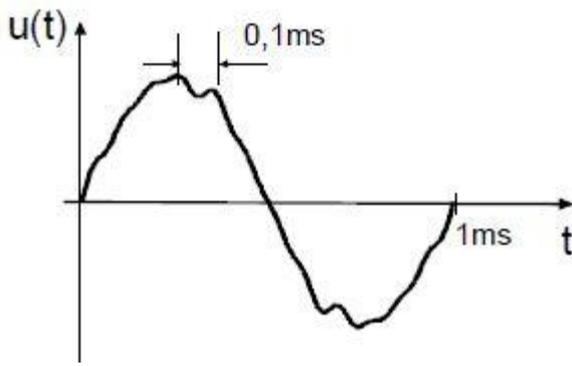


Bild 7: Signal mit der Periodendauer 1 ms, also mit einer Wiederholfrequenz von 1 kHz. Soll die auf dem Signaldach vorhandene Schwingung mit der Periodendauer von 0,1ms (10kHz Frequenz) ebenfalls korrekt erfasst werden, so muss die Abtastrate bei diesem Signal größer als 20 kHz gewählt werden!

Soll beispielsweise ein Signal mit einer Wiederholfrequenz von 1kHz erfasst werden, so reicht es bei weitem nicht aus, die Abtastfrequenz mit größer 2 kHz also z.B. 5...10 kHz zu wählen. Wie obiges Beispiel zeigt, kommt es auf den höchsten, noch relevanten Signalanteil an. In diesem Beispiel sind dies die Signaleinbuchtungen im Bereich der Maximal und Minimalamplitude. In diesem Fall stellen sie mit einer Periodendauer von 0,1 ms die höchste relevante Signalkomponente dar. Daraus folgt, dass die angepasste Abtastfrequenz in diesem Fall 20 oder besser 50 kHz

sein sollte. Für Praktiker gibt sich oftmals die Frage, woher weiß man die höchste relevante Signalfrequenz vor der Messung? Man kann sich der Antwort dadurch nähern, dass man bei einer Probemessung mit einer hohen Abtastrate beginnt. Häufig hat man aber Kenntnis über die maximalen Frequenzanteile, die im Messsignal relevant sein können. Misst man beispielsweise an einer mechanischen Struktur, bei der aus energetischen Gründen Frequenzanteile größer als 30 Hz nicht vorkommen können, so wird in diesem Fall eine Abtastrate von 200 Hz hinreichend sein.

Ist, wie bei den imc Messgeräten, eine Antialiasingfilter vor jeden Kanal geschaltet, so kann bei zu niedrig gewählter Abtastrate zwar immer noch ein Teil des interessierenden Frequenzbereiches weggeschnitten werden. Effekte von scheinbar vorhandenen Signalen, die in Wirklichkeit nicht existieren, sind hier aber ausgeschlossen.

Autor: Prof. Dr.-Ing. Klaus Metzger

Weitere Informationen erhalten Sie unter:

imc Test & Measurement GmbH

Voltastr. 5
D-13355 Berlin

Telefon: +49 (0)30-46 7090-0
Fax: +49 (0)30-46 31 576
E-Mail: hotline@imc-tm.de
Internet: <http://www.imc-tm.de>

Die imc Test & Measurement GmbH ist Hersteller und Lösungsanbieter von produktiven Mess- und Prüfsystemen für Forschung, Entwicklung, Service und Fertigung. Darüber hinaus konzipiert und produziert imc schlüsselfertige Elektromotorenprüfstände. Passgenaue Sensor- und Telemetriesysteme ergänzen unser Produktportfolio.

Unsere Anwender kommen aus den Bereichen Fahrzeugtechnik, Maschinenbau, Bahn, Luftfahrt und Energie. Sie nutzen die imc-Messgeräte, Softwarelösungen und Prüfstände, um Prototypen zu validieren, Produkte zu optimieren, Prozesse zu überwachen und Erkenntnisse aus Messdaten zu gewinnen. Rund um die imc Geräte steht dafür ein umfassendes Dienstleistungsspektrum zur Verfü-

gung, das von der Beratung bis zur kompletten Prüfstandsautomatisierung reicht. Auf diese Weise verfolgen wir konsequent das imc Leistungsversprechen „produktiv messen“.

National wie international unterstützen wir unsere Kunden und Anwender mit einem starken Kompetenz- und Vertriebsnetzwerk.

Wenn Sie mehr über die imc Produkte und Dienstleistungen in Ihrem Land erfahren wollen oder selbst Distributor werden möchten, finden Sie auf unserer Webseite alle Informationen zum imc Partnernetzwerk:

<http://www.imc-tm.de/partner/>



Nutzungshinweis:

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Dieser Bericht darf ohne Genehmigung weder bearbeitet, abgewandelt noch in anderer Weise verändert werden. Ausdrücklich gestattet ist das Veröffentlichung und Vervielfältigen des Dokuments. Bei Veröffentlichung bitten wir darum, dass der Name des Autors, des Unternehmens und eine Verlinkung zur Homepage www.imc-tm.de genannt werden. Trotz inhaltlicher sorgfältiger Ausarbeitung, kann dieser Bericht Fehler enthalten. Sollten Ihnen unzutreffende Informationen auffallen, bitten wir um einen entsprechenden Hinweis an: marketing@imc-tm.de. Eine Haftung für die Richtigkeit der Informationen wird grundsätzlich ausgeschlossen.