

Integration von Low-Cost Schwingungsmesssystemen in Maschinen und Anlagen zur permanenten Schwingungsüberwachung

Prof. Dr. **Josef Vollmer**, Dipl. Ing. **Thomas Neumann**,
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Sankt Augustin

Kurzfassung

Eine permanente Schwingungsüberwachung mit Low-Cost Messsystemen kann mit anwendungsspezifisch aufgebauten Messsystemen geschehen. Solche Systeme messen Vibrationen mit mikromechanischen Beschleunigungssensoren, die für verschiedene Beschleunigungen auch bis 250G zur Verfügung stehen und typische Frequenzbereiche bis einige kHz besitzen. Die Auswertung der Signale erfolgt durch Mikrocontroller oder DSP. Anwendungsspezifische Softwarealgorithmen, die z. B. die Signalamplituden bei unterschiedlichen Frequenzen bewerten, erlauben eine detaillierte Bewertung des Zustandes von Maschinen und Anlagen zu geringen Kosten.

1. Einführung

Schwingungsmessung, ob als Grundlagenuntersuchung, entwicklungsbegleitende Untersuchung oder auch permanent im sogenannten Condition Monitoring, erfolgt oft auf Basis piezoelektrischer Beschleunigungssensoren in Verbindung mit PC-gestützter Messwert-erfassung. Hier liegen Präzision und Frequenzbereich der Sensoren und eine flexible Programmierung der Messwerterfassungssoftware mit der Möglichkeit einer umfangreichen Datenspeicherung im Vordergrund. Im Laborbereich sind in vielen Unternehmen, die sich mit Schwingungsmessungen beschäftigen, solche kostenintensiven Messwerterfassungssysteme vorhanden. In der permanenten Schwingungsüberwachung lohnt sich der Einsatz solcher kostenintensiven Messwerterfassungssysteme nur in Hochpreisprodukten. Durch die Möglichkeiten, die mechatronische Produkte und Systeme in Maschinen und Anlagen heutzutage bieten, besteht immer mehr das Interesse, Schwingungsmessungen und auch eine permanente Schwingungsüberwachung auf andere Bereiche als die bisher üblichen auszudehnen. Die permanente Schwingungsüberwachung von Maschinen, die an sich nur wenige hundert bis einige tausend Euro kosten, kann nur mit Low-Cost Schwingungsmesssystemen durchgeführt werden, wie sie in diesem Beitrag vorgestellt werden. Die hier präsentierten Ergebnisse basieren auf dem vom BMBF geförderten und an der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg durchgeführten Projekt „Anwendungsspezifische Schwin-

gungsüberwachung in Maschinen und Anlagen mittels Low-Cost Körperschall-Sensorik“; Teilergebnisse wurden schon in [1] und [2] dargestellt.

2. Systemübersicht

Labormesssysteme zur Schwingungsmessung bestehen typischerweise aus Sensoren, einer Messwerterfassungshardware, einem PC und einer Auswertesoftware oder alternativ aus Sensoren und einem Spektrumanalysator. Als Vibrationssensoren werden heutzutage typischerweise piezoelektrische Beschleunigungssensoren eingesetzt, zusätzlich werden weitere Sensoren verwendet. Die wesentliche Funktion solcher Messsysteme ist die Wandlung einer Vibration in ein primäres elektrisches Signal (Sensor), die mögliche Filterung dieses Signals, die Wandlung des Signals in digitale Werte und die Signalauswertung auf einem PC mit anschließender Ausgabe der Ergebnisse.

Die hier betrachteten Low-Cost Schwingungsmesssysteme beinhalten die gleichen Funktionen wie die typischen Labormesssysteme, siehe Bild 1. Ein an die mechanische Struktur adaptierter Sensor wandelt die Schwingungen in elektrische Signale, die durch einen analogen Signalfilter gefiltert werden. Die Signalauswertung findet auf Mikrocontrollern oder Digital-Signal-Prozessoren (DSP) statt, die die Wandlung des analogen Signals in digitale Werte (ADC) beinhalten. Während Labormesssysteme flexibel eingesetzt werden können und eine große Anzahl von Messwerten mit einer hohen Abtastrate aufnehmen können, ist bei Low-Cost Messsystemen aus Kostengründen sowohl die Anzahl der Messwerte als auch die Abtastrate eingeschränkt. Damit bieten Low-Cost Messsysteme nicht die Kapazität von Labormesssystemen, können aber anwendungsspezifisch optimiert für viele Maschinen und Anlagen Zusatzfunktionen und Zusatznutzen bringen.

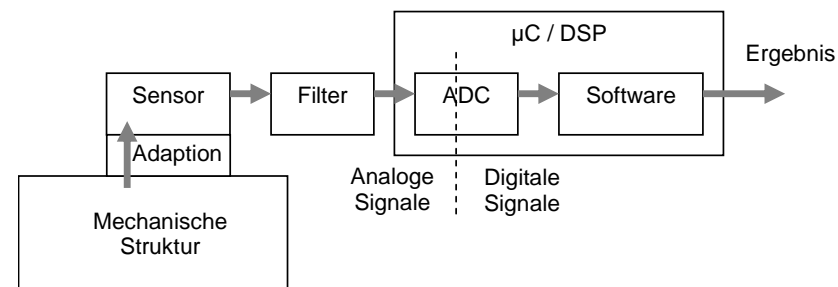


Bild 1: Komponenten eines Low-Cost Schwingungsmesssystems

3. Vibrationssensoren

Wesentlicher Bestandteil der hier vorgestellten Low-Cost Messsysteme sind mikromechanische Beschleunigungssensoren, die mechanische Schwingungen in elektrische Spannungssignale wandeln, z. B. 0...5V. Solche mikromechanischen Beschleunigungssensoren sind gerade durch den Einsatz in der Automobilindustrie in einer großen Bandbreite und zu geringen Kosten verfügbar. Sensoren zur Messung der Schwinggeschwindigkeit und der Schwingungsamplitude sind als Low-Cost Sensoren nicht am Markt vorhanden.

Mikromechanische Beschleunigungssensoren werden als sogenannte SMD-IC's in Größen von ca. 4x4x2mm³ bis ca. 10x10x4mm³ mit unterschiedlichsten Messbereichen der Beschleunigung und unterschiedlichen Frequenzbereichen angeboten, siehe Bild 2 und Bild 3. Diese Beschleunigungssensoren weisen im Vergleich zu piezoelektrischen Beschleunigungssensoren zwei wesentliche Unterschiede auf: 1) Die Auflösung (Verhältnis Messbereich zu Rauschen) beträgt nur etwa 1000:1 während piezoelektrische Sensoren Verhältnisse 100.000:1 erreichen können. 2) Die Resonanzfrequenz der meisten Sensoren liegt im Bereich von etwa 5...10 kHz, dadurch ist der nutzbare Frequenzbereich eingeschränkt. Bild 2 zeigt die Übertragungskennlinie des Sensors ADXL103, der einen Messbereich von ±1,7G besitzt. Deutlich erkennbar ist eine Resonanzüberhöhung von etwa 2,1 bei 5400Hz. Ein solcher Sensor lässt sich bis zu einer Frequenz von 1000...2000Hz ohne weiteres einsetzen. Ein nachgeschalteter analoger Tiefpassfilter mit entsprechender Charakteristik oder spezielle Softwarealgorithmen auf dem Mikrocontroller können in diesem Beispiel den Einsatzbereich auf 3000...4000Hz erweitern.

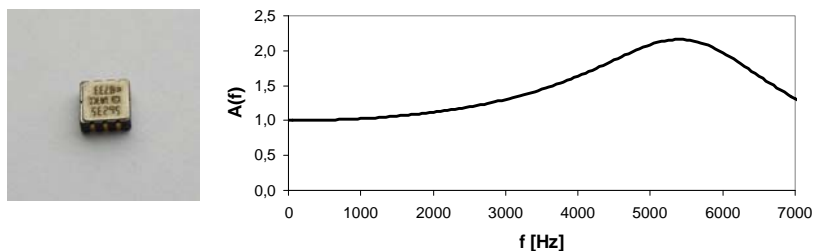


Bild 2: Beschleunigungssensor ADXL103, 5x5x2mm³, mit Übertragungskennlinie [3]

Mikromechanische Beschleunigungssensoren, die primär für den Einsatz im KFZ gedacht sind (z. B. als Airbag-Sensor), besitzen häufig integrierte Filter (vgl. auch Abschnitt 4). Bild 3 zeigt als Beispiel die Übertragungskennlinie des Sensors SMB060D, der einen Messbereich

von ±35G besitzt. Dieser Sensor hat einen integrierten Besselfilter mit einer Grenzfrequenz von 400Hz (bei -3dB). Die Übertragungskennlinie wird somit allein durch den Besselfilter bestimmt, eine Resonanzüberhöhung ist nicht zu erkennen. Der nutzbare Frequenzbereich liegt hier bei einigen hundert Herz.

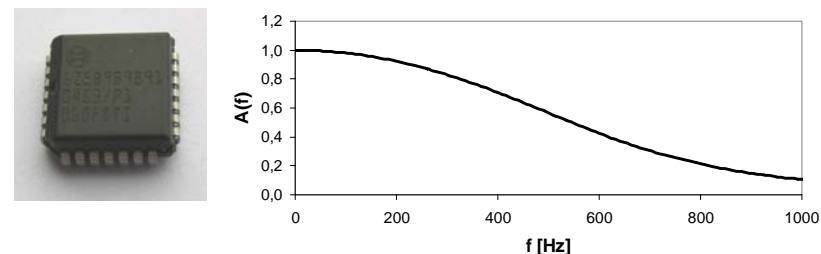


Bild 3: Beschleunigungssensor SMB060D, 12x12x5mm³, mit Übertragungskennlinie [4]

4. Analoge Signalfilter

Analoge Signalfilter werden zur Rauschunterdrückung oder als sogenannte Anti-Aliasing-Filter [7] eingefügt. Letztere sind unbedingt nötig, wenn auf dem Mikrocontroller bzw. DSP eine zusätzliche digitale Filterung oder eine Frequenzanalyse durchgeführt wird. Wie in Abschnitt 3 beschrieben, besitzen manche Sensoren schon integrierte Filter.

In den hier vorgestellten Low-Cost Schwingungsmesssystemen wird meist separat ein analoger Signalfilter eingesetzt, dessen Eigenschaften auf die entsprechende Anwendung angepasst wird. Neben einfachsten RC-Filtern haben sich als einfache und kostengünstig zu realisierende Filter sogenannte Sallen-Key-Filter [5] erwiesen. Geht man davon aus, dass in Low-Cost Messsystemen eine Justage der Filtereigenschaften für jedes individuelle Produkt nicht möglich ist, so können aus Toleranzgründen nur maximal zweistufige Sallen-Key-Filter aufgebaut werden. Bild 4 zeigt den entsprechenden Schaltplan und eine exemplarische Ausführung als SMD-Platine.

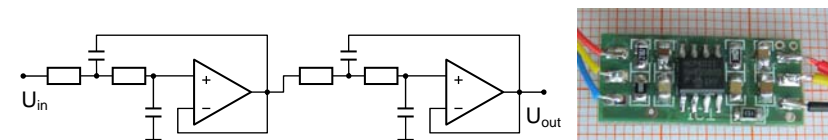


Bild 4: Analoges Signalfilter ausgebildet in der Sallen-Key-Filterstruktur [5] (links: Schaltplan, rechts: SMD-Ausführung)

Eine weitgehend freie Wahl der Widerstände und Kondensatoren der Sallen-Key-Filter (Bild 4) erlaubt den Aufbau von Filtern mit unterschiedlichen Eigenschaften. Bild 5 zeigt die Übertragungskurven der bekannten Tschebyscheff- und Butterworth-Filter [6], die als zweistufige Sallen-Key-Filter, also als Filter 4. Ordnung aufgebaut sind; zusätzlich ist zum Vergleich die Übertragungskurve eines einfachen RC-Filters dargestellt.

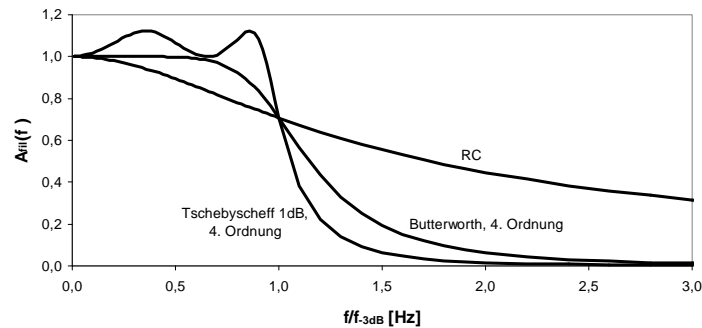


Bild 5: Übertragungsverhalten unterschiedlicher Signalfilter [6]

Zur Rauschunterdrückung bei einfachen Auswertungen (vgl. Abschnitt 6) reichen einfache RC-Filter aus. Diese sind im Unterschied zu den in Bild 4 dargestellten Sallen-Key-Filtern wesentlich einfacher zu realisieren.

Das größte Potenzial zeigen die hier vorgestellten Low-Cost Schwingungsmesssysteme allerdings bei frequenzabhängigen Signalanalysen (vgl. Abschnitt 6), die auch mit kostengünstigen Mikrocontrollern bzw. DSP mit unterschiedlichster Komplexität durchgeführt werden können. Werden frequenzabhängige Analysen mittels digitaler Signalverarbeitung durchgeführt, so ist es nach dem bekannten Abtasttheorem [7] zwingend erforderlich, vor dem Analog-Digital-Wandler einen analogen Signalfilter einzufügen, der alle Frequenzen über der halben Abtastrate des Analog-Digital-Wandlers hinreichend genau herausfiltert. Die in Bild 5 vorgestellten Tschebyscheff-Filter zeigen ein scharfes Trennverhalten, allerdings auch eine mehr oder weniger akzeptable Amplitudenverfälschung im Durchlassbereich. Der in Bild 5 dargestellte Tschebyscheff-Filter könnte je nach Anwendung Signale über der 1,5fachen Filtergrenzfrequenz ($1,5 \cdot f_{-3dB}$) hinreichend herausfiltern.

Kann die Amplitudenverfälschung im Durchlassbereich nicht geduldet werden, so wird hier ein Butterworth-Filter empfohlen. Der in Bild 5 dargestellte Butterworth-Filter würde Signale über $2,1 \cdot f_{-3dB}$ hinreichend herausfiltern, eine korrekte Signalamplitude ist allerdings nur

unter etwa $0,7 \cdot f_{-3dB}$ vorhanden. Somit müsste die Abtastfrequenz des Analog-Digital-Wandlers unter Berücksichtigung des Abtasttheorems das 6fache der maximal zu analysierenden Signalfrequenz betragen.

5. Mikrocontroller

Das gefilterte Sensorsignal wird in den vorgestellten Low-Cost Schwingungsmesssystemen mit einem Mikrocontroller oder DSP gemessen und verarbeitet. Die Bandbreite verfügbarer Mikrocontroller ist überaus groß und wird hier nicht im Detail dargestellt. Exemplarisch werden hier zwei Beispiele vorgestellt.

Der PIC18F2620 der Microchip Inc. [8] hat mittelmäßige Eigenschaften. Der Analog-Digital-Wandler des PIC18F1620 besitzt eine Auflösung von 10bit; somit entspricht eine Spannungsstufe von $1/1024 = 0,98\%$ in etwa dem Rauschverhältnis von 1% der mikromechanischen Beschleunigungssensoren (vgl. Abschnitt 3). Abtastraten bis 30kHz sind bei einer Taktfrequenz von 20MHz möglich. Müssen die Messwerte gespeichert werden, z. B. bei einer FFT (vgl. Abschnitt 6), so können bis 512 Messwerte aufgenommen werden.

Im Bereich der DSP ist der dsPIC30F3013 der Microchip Inc. [8] anzusiedeln. Der Analog-Digital-Wandler dieses dsPIC besitzt eine Auflösung von 12bit. Eine erhöhte Taktfrequenz bis 80MHz erlaubt prinzipiell eine hohe Abtastrate. Zusammen mit externen Speicherbausteinen können auch mehrere hunderttausend Messwerte aufgenommen werden.

6. Signalauswertungs-Software

Auf dem Mikrocontroller bzw. DSP des Messsystems kann eine entsprechende Signalauswertungssoftware unterschiedlichste Analysen durchführen. Hier besteht die Möglichkeit, durch Kenntnis der Maschine und durch intelligente Auswerteverfahren aus dem einfachen zeitabhängigen Beschleunigungssignal aussagekräftige Kennwerte zu berechnen, die eine einfache Bewertung des Maschinenzustandes erlauben.

Im Zeitbereich kann überaus einfach der Effektivwert der Vibration gemessen und berechnet werden [7], der in vielen Anwendungen als Maß für die Vibration ausreichend ist. Im Bereich der Wälzlagerdiagnose kann aus dem zeitlichen Verlauf des Effektivwertes z. B. unter Verwendung des Crest-Faktors oder des sogenannten K(t)-Wertes eine Aussage über den Lagerverschleiß getroffen werden [9].

Das volle Potenzial der hier präsentierten Low-Cost Schwingungsmesssysteme zeigt sich aber erst, wenn eine Frequenzanalyse durchgeführt wird. Neben frequenzabhängigen digitalen Filtern liefert vor allem die Fast-Fourier-Transformation (FFT) [7] Ergebnisse, die unter anderem auch eine Aussage über den Entstehungsort der gemessenen Vibrationen erlaubt.

Detaillierte Algorithmen zur Umsetzung solcher Analysen auf Mikrocontrollern bzw. DSP sind in [7] zu finden. Auf dem PIC18F2620 (vgl. Abschnitt 6) lässt sich relativ einfach eine FFT mit bis zu 512 Punkten durchführen bei einer Schrittweite der Frequenz von z. B. 1Hz.

7. Produktspezifische Integration von Low-Cost Schwingungsmesssystemen

Die Definition und die anschließende Entwicklung eines Low-Cost Schwingmesssystems erfordern vorab umfangreiche Kenntnisse über die Maschine bzw. Anlage, in die das Messsystem integriert werden soll.

Messungen der auftretenden Beschleunigungsamplituden und der auftretenden Frequenzen sind nötig, um den geeigneten Sensor auswählen zu können. In diesem Zusammenhang kann in der Regel auch der benötigte analoge Filter festgelegt werden.

Bei der Umsetzung etlicher industrieller Anwendungsprojekte hat sich ganz klar gezeigt, dass die eigentliche Konstruktion, der Aufbau und auch die Programmierung eines Low-Cost Schwingungsmesssystems vielleicht nur einen Anteil von 30-60% eines Gesamtprojektes ausmacht. Insbesondere wenn vorab keine detaillierten Kenntnisse über die Maschine vorhanden sind, müssen zunächst diverse Messungen durchgeführt werden und evtl. auch der später im Low-Cost Messsystem zu implementierende Algorithmus entwickelt und verifiziert werden.

Als einfaches Beispiel zeigt Bild 6 ein Gebläse, mit dem partikelhaltige Luft abgesaugt wird. Durch Ablagerungen der Partikel am Lüfterrad kann es zu einer Unwucht kommen, die später zu einem Schaden führen kann. Messungen an einem definierten Messpunkt zeigen, dass im Neuzustand ein zeitabhängiges Beschleunigungssignal bis zu 1G vorhanden ist. Im Betrieb ist durch Partikelablagerung und damit verbundener Unwucht eine Erhöhung des Signals auf etliche G zu sehen.

Durch die Drehung des Motors bei einer Drehzahl von etwa 2900min^{-1} ist eine charakteristische Frequenz von etwa 48Hz vorhanden. Zusätzlich entsteht durch das integrierte 11flüglige Lüfterrad ein Signal bei der 11fachen Drehfrequenz, also etwa 530Hz.

Als Schwingungssensor wurde deshalb der Sensor ADXL321 [10] mit einem Messbereich von $\pm 5\text{G}$ und einer Resonanzfrequenz von etwa 5000Hz gewählt. In Kombination mit einem Butterworth-Filter wurde ein Frequenzbereich des Messsystems von 0...800Hz festgelegt. Im Mikrocontroller, einem PIC18F2620, wird mit dem über 2 sec gemessenen Beschleunigungssignal eine FFT durchgeführt, um die Amplituden bei den o. g. Frequenzen bestimmen zu können. Es hat sich herausgestellt, dass die Berechnung eines Kennwertes basierend auf der Kombination der Amplituden mehrerer Frequenzen gute Ergebnisse liefert.

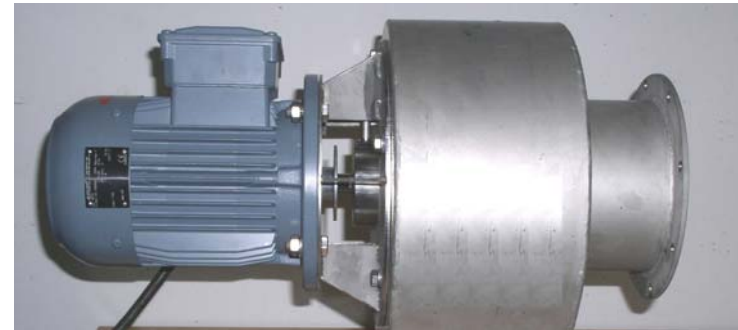


Bild 6: Beispielmachine: Gebläse für partikelhaltige Luft

Literatur

- [1] Vollmer J., Hu Y., Neumann T.: Embedded Vibration Analysis System for Online Condition Monitoring of Machines Based on Low-Cost Solid-Borne Sound Sensors. REM2009 - 9th Int. Workshop on Research and Education in Mechatronics, Bergamo - Italy, 18th-19th September 2008
- [2] Vollmer J., Hu Y., Neumann T., Solda E.: Construction Kit for Low-Cost Vibration Analysis Systems based on Low-Cost Acceleration Sensors. IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Singapore, 14th-17th July 2009
- [3] ADXL103, Datenblatt, Analog Devices Inc. und Messungen der Autoren, 2008
- [4] SMB060D, Datenblatt, Robert Bosch GmbH und Messungen der Autoren, 2008
- [5] Sallen R. P., Key E. L.: A Practical Method of Designing RC Active Filters. IRE Transaction on Circuit Theory, 1995
- [6] Tieze U., Schenk Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. Springer Verlag 2008
- [7] Smith W. S.: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 1997
- [8] Microchip Inc., www.microchip.com
- [9] Sturm A. u. a.: Wälzlagerdiagnose an Maschinen und Anlagen. Verlag TÜV Rheinland Köln, 1986
- [10] ADXL321, Datenblatt, Analog Devices Inc. und Messungen der Autoren, 2008