

Maschinendiagnose mit erweitertem Frequenzbereich

Peter HOLSTEIN^{*}, Dominik SUREK^{**}, Andreas THARANDT^{***},
Sebastian GRAMSTAT^{****}, Hans-Joachim MÜNCH^{*}

- * SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GMBH,
peter.holstein@sonotec.de , 06112 Halle, Nauendorfer Str. 2
- ** An-Institut für Fluid-und Pumpentechnik e.V. Merseburg, 06217
Merseburg, Geusaer Str., dominik.surek@hs-merseburg.de,
- *** HTWK Leipzig, FB IMN, atharandt@web.de
- **** TU Ilmenau, Fak. Maschinenbau, FG Kraftfahrzeugtechnik,
sebastian.gramstat@tu-ilmenau.de

Kurzfassung. Mit der Verbesserung der Sensorik erweitern sich die Möglichkeiten der Anwendungen von Verfahren der Schallemission auch für die Bereiche der Maschinendiagnose, der Technischen Akustik und für Instandhaltungsaufgaben. Mit breitbandig ausgelegter Sensorik kann ein hybrider Zugang erreicht werden, der simultan Bewertungen vom traditionellen niederfrequenten Bereich (Struktur- und Betriebsschwingungen) bis hin zu hochfrequenten transienten Vorgängen auch quantitativ möglich macht. Flexible Algorithmen für die Signalverarbeitung bilden dafür das Gerüst.

1. Einführung

Akustische Methoden spielen in der Technischen Diagnose eine immer größere Rolle. Die Akzeptanz der Verfahren hat deutlich zugenommen. Dabei finden sich Anwendungen von sehr tiefen Frequenzen bis in den Ultraschallbereich hinein. Die nachzuweisenden Vorgänge und Zustände benötigen dabei Verfahren, die von der Erfassung und Bewertung einfacher Pegel bis hin zu komplexeren Zusammenhängen wie Modalanalyse oder Transferpfadanalyse reichen. Die gleichen messtechnischen Verfahren werden auch zur Beschreibung des Einflusses von betriebsbedingten akustischen Auswirkungen genutzt. Die stochastischen akustische Vorgänge oder sehr schnelle (transiente) akustische Vorgänge, wie sie beispielsweise bei Reibungsprozessen, Rissentstehungen, bei Bruchvorgängen oder auch bei Kavitationsvorgängen entstehen, finden oft bei relativ hohen Frequenzen statt. Im Beitrag wird deshalb ein gesamtheitlicher Zugang vorgestellt, der sowohl die Sensorik, Datenerfassung und auch Signalverarbeitung umfasst. Die unterschiedlichen Fragestellungen und Möglichkeiten zur messtechnischen Erfassung haben – historisch gesehen – zur Aufteilung in Gebiete wie Technische Akustik und Schallemission geführt. In vielen Fällen erscheint diese Differenzierung in Technische Akustik und Schallemission nicht begründet. Insbesondere die Analogie (oder Gleichheit) der Signalverarbeitungsmethoden, neue Möglichkeiten der Messtechnik sowie die Performance der Rechentechnik legen in einigen Fällen ein Konzept mit breitbandiger Sensorik zur simultanen Erfassung

akustischer Signale im hörbaren und Ultraschallbereich nahe. Die besondere Rolle der Signalverarbeitung ist dabei offensichtlich. Insbesondere stellt die Klassifikation von transienten Signalen in „rauer Anregungsumgebung“ (Beispiel: das Einsetzen von Kavitation in Pumpen) eine Herausforderung dar. Erfolgreiche Anwendungen wurden für das Monitoring von Abläufen an Pumpen, an Bremsprüfständen und für die Überwachung von Pipelines erarbeitet. Es wird auch gezeigt, dass die Sensorik zur simultanen Erfassung nieder- und hochfrequenter akustischer Signale geeignet ist. Die Diagnose bei höheren akustischen Frequenzen kann eine wertvolle Ergänzung der etablierten Verfahren der Technischen Akustik darstellen und für spezielle Fragestellungen komplementäre Ergebnisse liefern. Es wird auch gezeigt, dass die Sensorik – unter Einbeziehung entsprechender Datenverarbeitung - zur simultanen Erfassung nieder- und hochfrequenter Schwingungen geeignet ist.

2. Experimentelles

2.1 Datenakquisition und Handling

Das generelle Konzept [1,2], das zur Datenakquisition und echtzeitfähigen Datenverarbeitung (insbesondere zur Erfassung und Bearbeitung großer Datenmengen für Fragestellungen der Technischen Akustik und Diagnose) entwickelt wurde, hat sich für viele Applikationen als tragfähig erwiesen. Die konsequente Integration von MATLAB-basierter Technologie erlaubt eine Bearbeitung sehr kundenspezifischer Probleme. Die Modularisierung und Vereinheitlichung von Abläufen beruht dabei auf der Generalisierung von Datenflüssen und algorithmischen Verknüpfungen. Mit einer solchen Herangehensweise lassen sich auch (scheinbar) sehr verschiedene Fragestellungen bearbeiten und programmier- sowie verfahrenstechnisch beherrschen. Grundlagen und Anwendungen auf dieser Basis wurden seitdem weiterentwickelt.

Zwei grundlegende Anforderungen an die Abläufe bei der Datenverarbeitung wurden gestellt. Das modulare System muss in der Lage sein, beliebige Datenmengen zu akquirieren und zu verarbeiten. Die Berechnungen müssen in Echtzeit möglich sein. Weiterhin müssen beliebige Verknüpfungen von Datenströmen möglich sein. Dies ist z. B. von Bedeutung, wenn mehrere Kanäle für Korrelationsberechnungen verwendet oder Algorithmen zur Lokalisierung von Fehlern zielführend implementiert werden sollen. Wie in [1,2] vorgestellt, können damit auch Probleme des Langzeitmonitorings effektiv gelöst werden. Als ein besonders nützliches Merkmal wird die Möglichkeit angesehen, dass die Daten auch dann effektiv bearbeitet werden können, wenn die Algorithmen iterativ verbessert werden oder – wie in dieser Arbeit vorgeschlagen – verzweigt und damit (in Echtzeit) parallel verarbeitet werden können. Natürlich spielt die Performance von Mess-Hardware und IT dabei eine entscheidende Rolle. Dieses Problem ist aber nach der Entwicklung der letzten Jahre meist relativ leicht lösbar.

Viele Messungen wurden beispielsweise mit einer USB-Box der Fa. National Instruments (USB 6251 - 8 Inputs 16 Bit bei 1,25 MHz) [1] durchgeführt. Inzwischen sind auch höhere Abtastraten verfügbar. Dabei wird auf die Skalierbarkeit der Lösungen gesetzt, die dadurch erreicht wird, dass die Software über Standardtreiber mit der Hardware verknüpft wird. Für die Lösungen im Rahmen der vorgestellten Arbeiten sind dies die Treiber von National Instruments und MATLAB. Damit ist ein weitgehender Austausch von Hardware je nach Anforderung gegeben.

2.2 Sensorik

Neben der Optimierung der Datenakquisition und der Signalverarbeitung wurde vor allen die Entwicklung geeigneter Sensorik vorangetrieben, die den Ansprüchen

- in einem breiten Frequenzbereich einsetzbar zu sein (Bereiche der traditionellen technischen Akustik wie z. B. der Maschinendiagnose und der „Schallemmission“ überdeckend)
- einer deutlichen Verbesserung des Kennlinienverhaltens (Verringerungen von störenden Resonanzen)

genügen sollte.

Wesentliche Verbesserungen konnten dabei durch die Anwendung neuer Materialien und Herstellungstechnologien erreicht werden. Insbesondere durch die Anwendung von Composite-Materialien und durch die Beherrschung der dazu notwendigen Herstellungstechnologie wurde die Empfindlichkeit erhöht, der Kennlinienverlauf verbessert und damit eine Verbesserung bei der Quantifizierbarkeit von frequenz-abhängigen Messwerten erreicht.

Anwendungen im maschinenakustischen Bereich verlangen Sensoren, die für die jeweiligen Aufgaben optimiert sind. Mikrophone und Schwingungssensoren sind seit langem in sehr hoher Messqualität verfügbar und können die analogen Spannungen für die Datenakquisition mit sehr hoher Dynamik bereitstellen. Kalibrierungen sind ebenfalls leicht und sicher möglich, da die Kennlinien im vorgesehenen Messbereich linear sind. Die Genauigkeitsanforderungen – beispielsweise beim Einsatz in der Schallpegelmessung (Klasse 1 oder 2) – sind über die entsprechenden Normungen geregelt.

In vielen praktischen Fällen ist aber die extrem hohe Messgenauigkeit der Amplitudenwerte zur Lösung von technischen Problemen oder Überwachungsaufgaben nicht notwendig. Eine hinreichende Genauigkeit und -ebenfalls von großer Bedeutung – hohe Reproduzierbarkeit sind auch deshalb in den letzten Jahren insbesondere dann akzeptiert worden, wenn die in zeitveränderlichen Signalen enthaltene Information komplett genutzt wird (Zeit-Frequenz-Analysen). Mit der Verbesserung der Rechenleistung – einhergehend mit der Miniaturisierung – haben sich die Einsatzmöglichkeiten dieser Herangehensweise stark erweitert. Ein anderer Aspekt ergibt sich daraus, dass es immer besser und effektiver möglich wird, mehrere/viele Sensoren (auch ökonomisch sinnvoll) einzusetzen. Vereinfacht gesagt, sind mehrere Sensoren mit ausreichender Genauigkeit in sehr vielen Anwendungsfällen wesentlich besser für Überwachungs- und Klassifikationsaufgaben geeignet als singular platzierte, die über eine eigentlich gar nicht notwendige Genauigkeit verfügen.

Dies ist in vielen Fällen praxisrelevant, da beispielsweise bei der Überwachung von Pumpen schwingungsakustische Probleme mit Frequenzen unter 1 kHz auftreten. Gleichzeitig kann es Zustände geben (z. B. Kavitation), die deutlich höherfrequente (100 kHz und mehr) Anteile aufweisen und anders bewertet werden müssten. Ein paralleler Einsatz von „Schwingungsüberwachungstechnik“ und „Schallemissionstechnik“ ist in den meisten Fällen ökonomisch nicht zu rechtfertigen und würde in der Praxis kaum akzeptiert werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Sensoren wurden aus ursprünglich für Anwendungen im Pipelinebereich entwickelten Ultraschallwandlern abgeleitet. Als sehr breitbandige Sensoren sind diese in einem weiten technisch interessanten Frequenzbereich einsetzbar. Dies wurde in einigen Anwendungen gezeigt. Dabei ist insbesondere von Bedeutung, dass Frequenzen in einem Bereich empfindlich genug erfasst werden können, für den normalerweise (herkömmliche) Schwingungssensoren verwendet werden.

Problematisch bei einer „einfachen“ Verwendung der Rohdaten ist, dass die Sensoren naturgemäß, da sie als Resonanzsensoren ausgelegt sind, nicht über lineare Kennlinien verfügen. Dies macht den Einsatz für quantifizierbare Messungen problematisch. Es konnte gezeigt werden, dass für einige wichtige Anwendungen die Kenntnis des „exakten“ Frequenzgangs nicht benötigt wird. Man nimmt dabei sozusagen in Kauf, dass die Verhältnisse der Amplituden bei verschiedenen Frequenzen nicht ohne zusätzliche Information miteinander verglichen werden können.

Neben der physikalischen und elektronischen Verbesserung von Sensoren, können diese auch in weiten Grenzen über digitale Korrekturen von Kennlinien aufgewertet und für den Einsatz in neuen Verfahren aufbereitet werden. Dies betrifft sowohl den Einsatz von Sensoren als Aktuatoren im Sendebetrieb – beispielsweise zur Aussendung definierter Signalmuster – als auch im Empfangsbetrieb. Es konnte gezeigt werden, dass beispielsweise mit einem inversen Amplitudengang Anregungen bei der akustischen Tomographie [3] wesentliche Verbesserungen bei der erreichbaren Messgenauigkeit und Qualität der Ergebnisse implizieren. Insbesondere kann die Messgenauigkeit bei Verfahren wesentlich gesteigert werden, die durch das Zusammenspiel mehrerer Sensoren (wie z. B. bei der erwähnten Tomographie) gekennzeichnet sind. Korrekturen dieser Art lassen sich effektiv auf der Basis von MATLAB in den (Echtzeit-)Datenstrom integrieren. Weiterhin sind bestimmte Verfahren erst auf diese Weise numerisch beherrschbar. Im vorliegenden Fall wirkt sich dies so aus, dass der Frequenzgang der Sensoren so beherrscht werden soll, dass damit simultan Messwerte aus dem Bereich mit relativ niedrigen Frequenzen (Strukturschwingungen, Maschinendiagnose) und aus dem normalerweise für die „Schallemission“ (reibung induzierte Vorgänge wie Schmierung-Trockenlauf, hochfrequente Strömungsgeräusche, Schwingungen klein(st)er Strukturen usw.) genutzten Frequenzbereich mit vergleichbarer Genauigkeit verfügbar sind.

3. Algorithmik und Datenhandling

Der flexible und aufgabenangepasste Umgang mit den Messdaten ist entscheidend für die Anwendung vieler, auf der Bewertung akustischer Vorgänge beruhender Vorgänge. So wurde eine auf MATLAB basierende Technologie zur Behandlung großer Datenmengen, die bei der akustischen Überwachung an Pipelines Anwendung fand [4], vorgestellt. Eine Kernaussage dieser Technologie war, dass damit Algorithmen iterativ verbessert werden bzw. individuell an eine Aufgabenstellung angepasst werden konnten, ohne dass dabei die Grundstruktur des Signalflusses verändert werden musste. Dadurch ist diese Technologie sehr effektiv und konnte auf weitere Applikationen im Bereich der Technischen Diagnose übertragen werden. Es zeigte sich insbesondere, dass die Algorithmen effektiv bei der hybriden Erfassung und Bewertung von Problemen der Technischen Diagnose und der Schallemission im Ultraschallbereich mit nur einer Art von Sensorik erfolgreich angepasst werden können. Dies ist deshalb herausfordernd, da – vom Standpunkt der Signalverarbeitung aus gesehen - sich teilweise widersprechende Anforderungen wie Frequenz- oder Pegelanalysen und die Bewertung nichtstationärer Ereignisse gegenüberstehen.

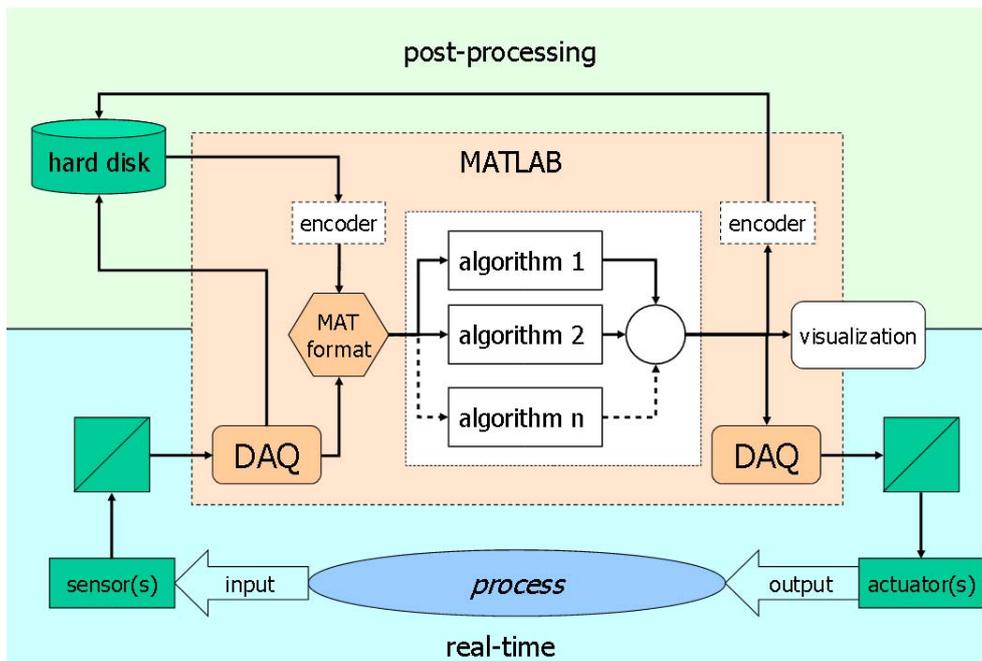


Abb. 1: Beispiel für die hybride Verwendung des Datenstroms. Unterschiedliche Algorithmen werden miteinander verknüpft und (hier) für die Auslösung einer Überwachungsfunktion genutzt.

Die flexible und aufgabenangepasste Datenverarbeitung ermöglicht erst hochwertige Anwendungen. Auf die im vorhergehenden Abschnitt erwähnte digitale Kennlinienkorrektur („Linearisierung mit ausreichender Genauigkeit“) soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Diese ist fest mit dem jeweiligen Sensor verknüpft. Die Sensoren liefern zunächst nur die „Rohdaten“, die in vielen Fällen nicht zur eindeutigen Bewertung von Vorgängen geeignet sind. In den Abbildungen 1 und 2 ist angedeutet, wie die Daten eines Messkanals (d.h. eines Sensors) verzweigt und in mehreren virtuellen Kanälen verschiedene Fragestellungen bearbeitet werden. So können spezifische Algorithmen zur Bewertung von Schwingungsvorgängen und von transienten Ereignissen – auch in verschiedenen Frequenzbändern – miteinander verknüpft werden. Die Art der Verknüpfung (UND / ODER / FUZZY/ ...) kann beliebig komplex sein.

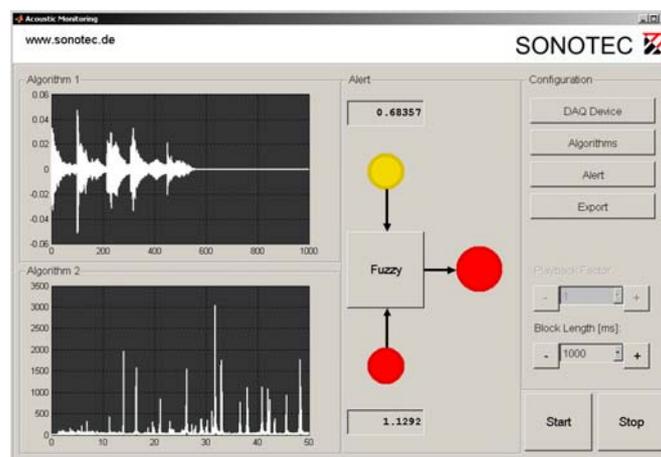


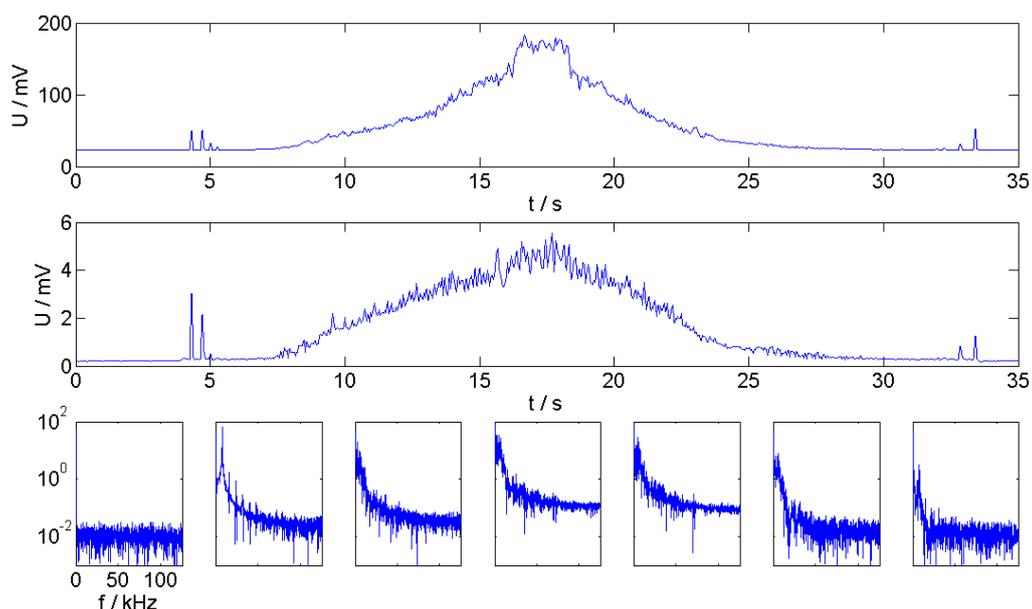
Abb. 2: Beispiel für die hybride Verwendung des Datenstroms. Unterschiedliche Algorithmen werden miteinander verknüpft und (hier) für die Auslösung einer Überwachungsfunktion verwendet. Die Kombination aus der Zeit- (oben) mit einer Frequenzinformation eines Sensors (unten) wird hier für eine klassifizierende Überwachungsfunktion (Qualitätssicherung) an Kleinstbauteilen verwendet. Dieselbe Struktur kann auch mit Daten von zwei (oder mehreren) Sensoren belegt werden

4. Anwendungsbeispiele

Wichtige Entwicklungs- und Anwendungsfelder waren bisher die akustische Überwachung von Molchdurchgängen in Gas-Pipelines [4], die Bewertung der Akustik an Bremsenprüfständen [5] sowie von Vorgängen an Pumpen [6].

In allen Fällen hat sich gezeigt, dass durch die Erweiterung der Bewertung akustischer Daten unter Einbeziehung des Ultraschallbereichs deutlich verbesserte Ursache-Wirkungs-Beziehungen aufgestellt und modelliert werden können. Beispielsweise werden die im hörbaren Bereich störenden Effekte beim Bremsen durch Reibungsvorgänge induziert, deren akustischen Auswirkungen sich zunächst im Ultraschall relevanten Bereich abspielen. Aufgrund komplexer Anregungs- und Übertragungsmechanismen des Körperschalls geht bei der ausschließlichen Betrachtung im niederfrequenten Bereich die Möglichkeit der Aufklärung der Ursache-Wirkungsmechanismen teilweise verloren.

Ähnlich komplex sind die Vorgänge, die zu den verschiedenen akustischen Erscheinungen beim Betrieb von Pumpen führen. Ein Pumpenprüfstand (*FPT Merseburg*) wurde mit mehreren Sensoren bestückt. Die Platzierung erfolgte an möglichst günstigen Stellen an der Saug- und Druckseite (optimale Platzierungen sind konstruktiv oft nicht möglich). Ziel der Versuche war es, mit Mitteln der (simultanen) Technischen Diagnose und Ultraschallbewertung sowohl die Betriebsschwingungen als auch das Einsetzen von Kavitation und anderen strömungsbedingten Vorgängen zu erfassen. Ein weiteres Ziel war die Zuordnung von Orten der Schallentstehungen zu den Signalen (etwa in Analogie zu Schallemissionsprüfung an Druckbehältern). Aufgrund des hohen stochastischen Anteils in den akustischen Signalen ist dies herausfordernd. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Die Grundidee der Messung und Bewertung soll in der nachfolgenden Abbildung beschrieben werden.



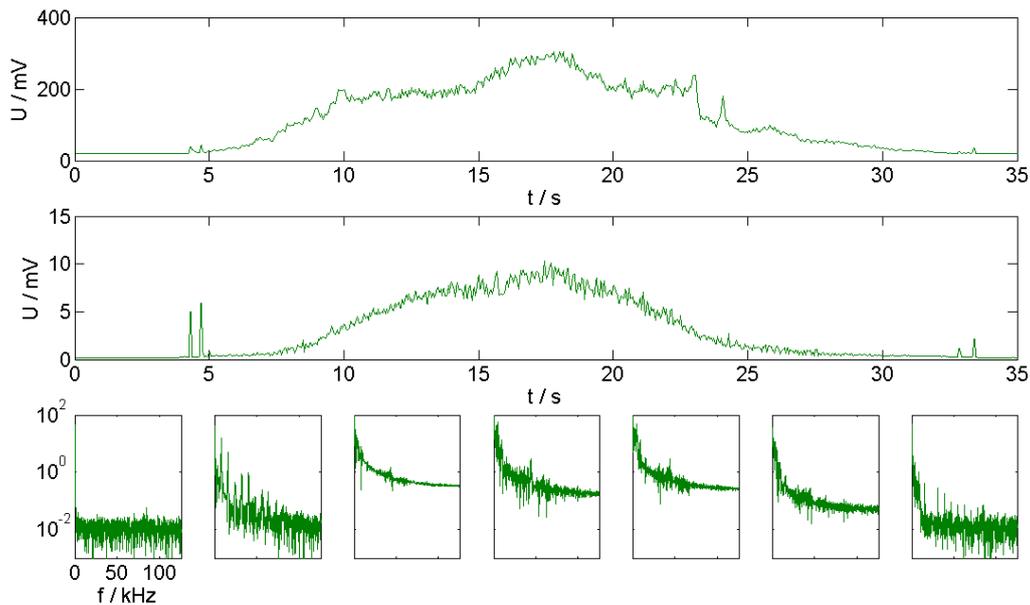


Abb. 3: Die Sensoren wurden jeweils an der Druck- und Saugseite einer Seitenkanalpumpe (max. Drehzahl ca. ca. 1200 Umin⁻¹) appliziert. Die Zeitsignale der beiden Sensoren zeigen jeweils einen kombinierten Hoch- und Runterlauf (bei gedrosselten Ventilen). Der obere Zeitverlauf stellt jeweils das ungefilterte r.m.s.-Signal dar. Der untere Zeitverlauf ist gefiltert (Bandpass: 20 ... 60 kHz). Die untere Zeile zeigt die jeweils zu Zeitabschnitten von 5s gehörigen mittleren Spektren. Saugseitig wird eine stärkere Auswirkung der Kavitation in bestimmten Betriebszuständen erwartet. Dies spiegelt sich in den Messwerten auch wider.

5. Zusammenfassung

Breitbandige Sensorik für Schallemission - in Verbindung mit entsprechend angepasster Signalverarbeitung - kann in vielen Fällen für die Umsetzung eines hybriden Konzeptes der Verbindung der Möglichkeiten der Technischen Akustik und der Schallemission angewandt werden. Verfahren, die sich in der „niederfrequenten“ Akustik und im Ultraschallbereich bewährt haben, können simultan auf Basis der gleichen Sensorik nützliche Information liefern. Wichtige Grundlage dafür ist zum einen die Entwicklung von Sensoren auf der Basis neuer Materialien und Herstellungsverfahren sowie die intensive Einbeziehung von Verfahren der Signalverarbeitung und von *state-of-the-art* Messtechnik.

Danksagung

Die Arbeiten wurden teilweise durch das AiF ZIM-Projekt „Entwicklung eines neuen Verfahrens und eines Ultraschallsensors zur verbesserten Ortung und Bewertung von Maschinenfehlern“, Förderkennzeichen, KF2266001 gefördert.

Microtech Gefell stellte Messmikrophone für den Ultraschallbereich zur Verfügung.

Das Steinbeiszentrum „Technische Akustik und angewandte Numerik“ unterstützte die Arbeiten zur Entwicklung und Anwendung der Software.

Referenzen

- [1] P. Holstein, A. Tharandt, H.-J. Münch
Große Datenmengen und Algorithmenentwicklung
DGZfP-Tagung, Münster, Mai 2009, Proceedings
- [2] P. Holstein, A. Tharandt, H.-J. Münch
Handling großer Datenmengen – ein Beitrag zur Algorithmenentwicklung
Proceedings, 17. DGZfP-Kolloquium Schallemission, 2009
- [3] M. Domke, P. Holstein,
Verzerrungsmessungen mit digitalen akustischen Sensoren.
In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2008, ISBN: 978-3-9808659-4-4 ,Dresden
- [4] P. Holstein, H.-J. Münch, S. zur Horst-Meyer, A. Tharandt, U. Bauerschäfer, L. Ledig, S. Gai, K. Krüger, Ultrasonic Pig Detection at Pipelines
Pipeline Pigging and Services Association, Proceedings, Nov. 2010, Aberdeen, UK
www.ppsa-online.com/papers/10-aberdeen/2010-04-sonotec.pdf
- [5] P. Holstein D. Surek , A. Tharandt H.-J. Münch, S. Gramstat,
Möglichkeiten der Maschinendiagnose mit Ultraschall, DAGA 2011, Düsseldorf, 21. 24.03.2011
- [6] D. Surek, P. Holstein, H.-J. Münch, S. Stempin, A. Tharandt
Maschinendiagnose mit Ultraschall ,
Technische Diagnose, Merseburg, Okt. 2010