

Vibrationen als Energiequelle für Feldinstrumente in der Prozessautomatisierung

Dr. Kai König; Dr. Marco Ulrich, Holger Kaul, Dr. Philipp Nenninger

ABB AG, Forschungszentrum Deutschland, Wallstadter Str. 59, 68526 Ladenburg, Deutschland
+49 6203 716249, kai.koenig@de.abb.com, marco.ulrich@de.abb.com, holger.kaul@de.abb.com,
philipp.nenninger@de.abb.com

1. Motivation

Drahtlose Feldinstrumente ermöglichen eine größere Flexibilität bei Messungen an prozesstechnischen Anlagen, z.B. an unzugänglichen oder entfernten Orten oder auf bewegten Teilen [ULR12]. Für dauerhafte Lösungen ist jedoch die Energieversorgung über Primärzellen wegen des Wartungsaufwands unbefriedigend. Energy Harvesting bietet Alternativen, um vor Ort verfügbare Energie, z.B. aus Temperaturgradienten, Sonneneinstrahlung oder mechanischer Bewegung, in nutzbare Energie umzuwandeln [ULR11]. Diese Arbeit geht auf die Möglichkeit ein, Vibrationen in prozesstechnischen Anlagen als Energiequelle zu nutzen.

Vibrationen sind in prozesstechnischen Anlagen zwar in der Regel unerwünscht, werden aber dennoch von Pumpen und Motoren in signifikantem Ausmaß erzeugt und breiten sich in der Anlage aus. Diese ungenutzte mechanische Energie der Vibrationen steht prinzipiell als Energiequelle für Energy Harvesting zur Verfügung.

Eine Reihe von Herstellern bietet Vibrationswandler basierend auf harmonischen Oszillatoren und elektromagnetischer Induktion oder dem piezoelektrischen Effekt an. Erfolgreiche Pilotanwendungen im Transportsektor [NAU03] und in Konsumgütern [KNI08, PAR05] sind bekannt. Systematische Untersuchungen bezüglich der Einsatzfähigkeit in typischen Prozessanlagen, besonders mit drehzahlgesteuerten Antrieben die wegen ihrer potenziell besseren Energieeffizienz häufig eingesetzt werden, sind nach unserem Wissen jedoch noch nicht durchgeführt worden.

2. Vibrationen in Anlagen der Prozessindustrie

Zur Bestimmung der kritischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von kinetischen Wandlern in der Prozessindustrie wurde ein hochgenauer industrieller Durchflussmesstand (Flow and Process Test Rig, FPTR, Abbildung 1) verwendet. Zum Einen wurden die typischen Vibrationen einer solchen Anlage mit Hilfe von Beschleunigungssensoren ausgemessen, zum Anderen die Vibrations-Harvester verschiedener Hersteller in einem realistischen Umfeld getestet. Hierbei gibt der Messstand die tatsächliche Situation in typischen Prozessanlagen sehr gut wieder.



Abbildung 1: Ein Durchfluss-Messstand simuliert eine prozesstechnische Anlage.

Drahtlose Prozesssensoren auf der Basis von WirelessHART benötigen in der Regel einige mW als durchschnittliche Leistung, die der Energy Harvester zur Verfügung stellen muss. Mikromechanische elektrostatische Harvester und viele piezoelektrische Harvester sind daher nicht für diesen Anwendungszweck geeignet, da sie nur geringere Leistungen zur Verfügung stellen können.

Die Anwendungen in Anlagen der Prozessindustrie unterscheiden sich von z.B. denen im Transportsektor dadurch, dass keine Stöße stattfinden, sondern dass durch die verwendeten Motoren und Pumpen üblicherweise mehrere schmale Frequenzbänder kontinuierlich angeregt werden. Bei Anlagen mit

Pumpen im Leistungsbereich einiger 10 kW ist mit Amplituden im Bereich 0.05 g bis 0.5 g zu rechnen, wobei die genauen Spektren stark von den verwendeten Motoren und Pumpen abhängen. Bei diesen Beschleunigungen erreichen nur wenige piezoelektrische und mehrere induktive Harvester die geforderte Leistung. Unsere Untersuchungen konzentrieren sich daher auf diese Harvester.

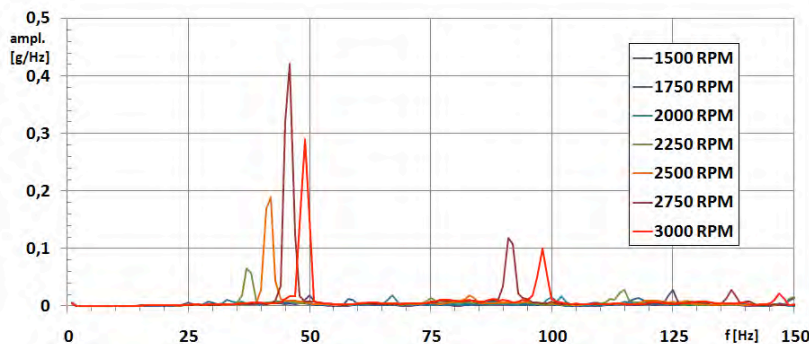


Abbildung 2: Spektrale Vibrationsamplitude der im Teststand verbauten 37 kW-Pumpe mit drehzahlgesteuertem Antrieb bei verschiedenen Drehzahlen (RPM). Gezeigt ist das Spektrum für Vibrationen parallel zur Motorachse; die anderen Richtungen weisen qualitativ ähnliche Spektren mit geringeren maximalen Amplituden auf.

diese Anpassung einfach durchzuführen sein kann, erschweren z.B. drehzahlgesteuerte Antriebe diese Anpassung. Abbildung 2 zeigt typische Vibrationsspektren eines drehzahlgesteuerten Antriebs bei verschiedenen Drehzahlen. Bei hohen Drehzahlen stehen über eine Größenordnung stärkere Vibrationen fürs Harvesting zur Verfügung. Der Frequenzpeak erster Ordnung wandert erwartungsgemäß zwischen 25 Hz bei 1500 RPM bis zu 50 Hz bei 3000 RPM, und die höheren Ordnungen entsprechend.

Die Amplituden, die bei diesem Motor bei unter 2250 RPM entstehen, erlauben mit heutigen Harvestern keine Energieerzeugung. Bei höheren Drehzahlen dagegen ist die Erzeugung von mehreren mW mit geeigneten Harvestern mit Resonanzfrequenz im Bereich zwischen 35 und 50 Hz im Prinzip möglich. Jedoch wären nur sehr breitbandige Harvester geeignet, allein den gesamten Drehzahlbereich zwischen 2250 und 3000 RPM wirkungsvoll abzudecken.

Für viele Anwendungen kann es wünschenswert sein, den Vibrationsharvester nicht direkt auf dem Motor oder der Pumpe anzubringen, sondern an beliebigen Orten in der Anlage. Die Ausbreitung von Schwingungen in prozesstechnischen Anlagen kann oft sogar mit dem bloßen Auge erkannt werden, wenn Rohrleitungen oder Bauteile bei entsprechendem Betrieb sichtbar und fühlbar schwingen. Dabei werden die Vibrationen von den Vibrationsquellen wie Motoren und Pumpen über Strukturbauteile, Rohrleitungen

Da die heute kommerziell verfügbaren Vibrations-Harvester auf harmonischen Oszillatoren basieren, hängt ihre Leistungsausbeute nicht nur von der Amplitude, sondern auch stark von der Frequenzverteilung der anregenden Vibrationen ab. Der verwendete Vibrationsharvester muss daher passend zum Frequenzspektrum am Montageort ausgewählt werden.

Während bei Vibrationsquellen mit fester Frequenz, z.B. Motoren mit fester Drehzahl,

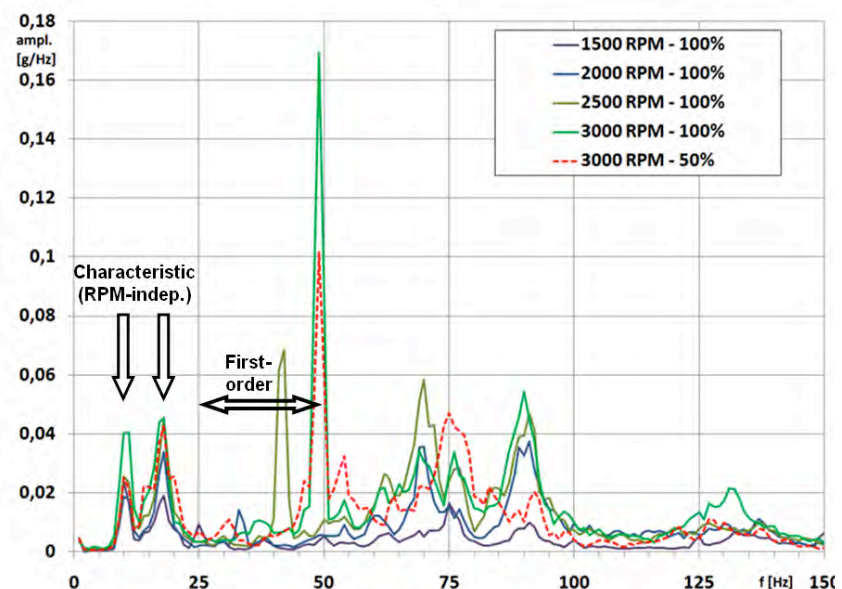


Abbildung 3: Spektrale Vibrationsamplitude bei Betrieb der im Teststand verbauten 37 kW-Pumpe mit drehzahlgesteuertem Antrieb bei verschiedenen Drehzahlen (RPM) und Öffnung eines Sperrventils in der Flussstrecke (in %), gemessen an einem Ventil in einigen Metern Entfernung entlang der Flussstrecke (Prozessmedium Wasser bei Raumtemperatur). Gezeigt ist das Spektrum für Vibrationen parallel zur Motorachse bei Betriebszuständen, die Abbildung 2 entsprechen. Die maximale Amplitude beträgt nur noch etwa die Hälfte des Werts direkt am Motor, und charakteristische (drehzahlunabhängige) Peaks sind erkennbar.

und durch die gepumpte Flüssigkeit übertragen. Das Vibrationsspektrum wird bei dieser Übertragung z.T. sehr deutlich verändert. Das übertragene Spektrum der Vibrationsquellen wird abgeschwächt, wobei niedrigere Frequenzen tendenziell stärker erhalten bleiben. Resonanzfrequenzen der lokalen Struktur werden diesem Spektrum überlagert, und könnten bei entsprechender Amplitude für drehzahl-unabhängiges Vibrationsharvesting genutzt werden. In der Nähe von Fixpunkten, z.B. Verbindungen mit dem Boden oder Wänden, ist die Dämpfung naturgemäß deutlich stärker. Je nach Messort können sich so sehr verschiedene Spektren ergeben, für die in Abbildung 4 ein Beispiel gegeben ist.

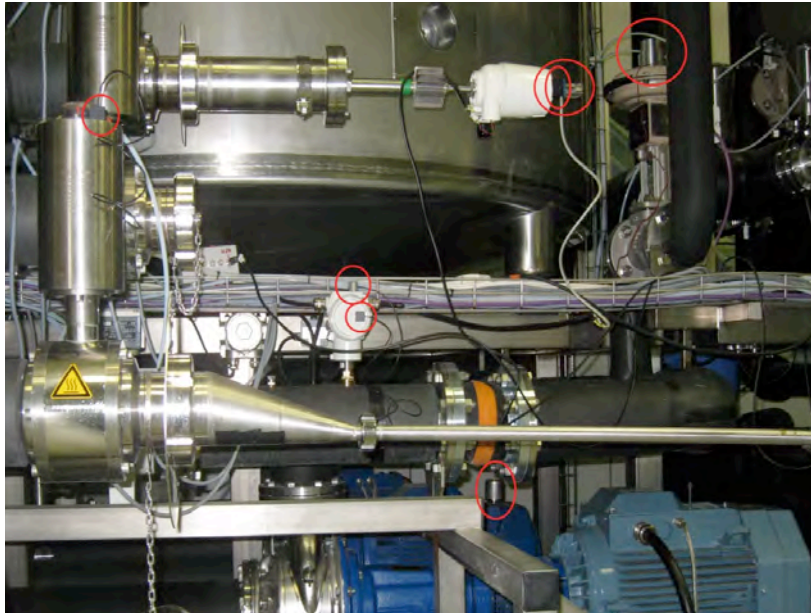


Abbildung 4: Vibrations-Harvester auf dem FPTR. Piezoelektrische und induktive Harvester verschiedener Hersteller, montiert an einer prozesstechnischen Anlage, auf Motoren, Pumpen, Ventilen, Druck- und Temperatursensoren (eingekreist). Die unterschiedlichen Bauformen und Abmessungen, bei Massen zwischen 15 g und 1000 g, werden im Vergleich augenscheinlich, wobei massivere Harvester in der Regel höhere Leistungen bei geringeren Amplituden und deutlich größere Bandbreiten aufweisen.

muss, oder zwischen verschiedenen Flusspfaden umgeschaltet wird. Daher sind Montageorte nahe an oder direkt auf den Vibrationsquellen vorzuziehen, um den Aufwand für die Suche nach und Überprüfung von geeigneten Montageorten gering zu halten.

3. Einsatz von Vibrations-Harvestern

Eine Anzahl von Vibrations-Harvestern, einige davon kommerziell erhältlich, andere Prototypen, wurde auf unserer Anlage an Orten mit zuvor vermessenen und als passend angesehenen Spektren installiert (Abbildung 4).

Unter den an dieser Anlage gegebenen Bedingungen wurden insbesondere mit massiven induktiven Vibrations-Harvestern für den Frequenzbereich um 50 Hz hohe Leistungen bis über 5 mW erzielt. Bei Montage eines aktuellen massiven Vibrationsharvesters lies sich über einen Drehzahlbereich von 2600 RPM bis 3000 RPM durchgehend eine Leistung von mindestens 1 mW erzielen. Damit ist gezeigt, dass auch bei variabler Drehzahl Bedingungen vorliegen können, bei denen zumindest ein gewisser Drehzahlbereich fürs Vibrations-Harvesting mit nur einem einzigen Harvester geeignet ist, wenn dieser Harvester die notwendige Bandbreite aufweist.

Abbildung 3 zeigt auch, dass Vibrationsspektren im Detail nicht nur von der Drehzahl, sondern auch vom Durchfluss und Durchflusswiderstand abhängen: So werden für 3000 RPM die Spektren bei geöffnetem und halb geschlossenem Absperrventil in der durchflossenen Strecke gezeigt, wobei an diesem Ort die Vibrationen bei halb geschlossenem Ventil um über ein Drittel verringert werden. An anderen Messstellen nehmen die Vibrationen jedoch mit dem Schließen des Absperrventils zu. Es erscheint schwer möglich, die Ausbreitung von Vibrationen innerhalb der Anlage vorherzusehen, besonders wenn durch die Verwendung drehzahlgesteuerter Antriebe eine Vielzahl von Spektren berücksichtigt werden

Bei den Leistungs- und Vibrationsmessungen mit Harvester wurde allerdings auch beobachtet, dass das Hinzufügen eines Vibrations-Harvesters das Vibrationsspektrum stark beeinflussen kann, was eine geringere Ausgangsleistung des Harvesters als erwartet zur Folge haben kann (Abbildung 5). Dennoch lieferte der verwendete induktive 100 Hz-Harvester älterer Bauart bei der Konfiguration aus Abbildung 5 zwischen 0.5 und 1.6 mW, während der aktuelle kommerziell verfügbare induktive 50 Hz-Harvester bis zu 3.8 mW als stabilisierte DC-Ausgangsleistung zur Verfügung stellen konnte, was den Betrieb eines drahtlosen Feldinstruments ermöglichen würde.

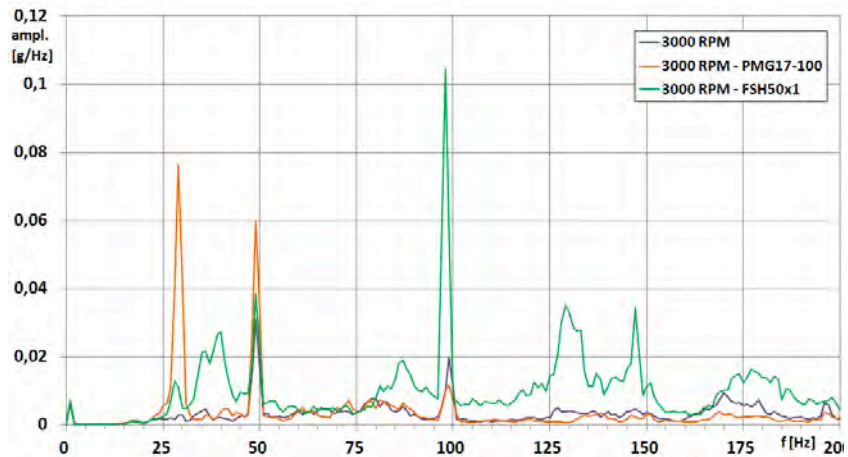


Abbildung 5: Spektrale Vibrationsamplitude bei Betrieb der im Teststand verbauten 37 kW-Pumpe mit drehzahlgesteuertem Antrieb bei 3000 RPM. Die violette Linie zeigt das Spektrum ohne verbaute Harvester. Die orangefarbene Linie beschreibt die Pumpe mit einem Harvester für Schwingungen um 100 Hz, während das grüne Spektrum bei Betrieb mit einem 50 Hz – Harvester aufgenommen wurde. In diesen Fällen wirken die Harvester an ihrer Resonanzfrequenz als Schwingungsdämpfer, aber Schwingungen anderer Frequenzen können verstärkt werden.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die beschriebenen Arbeiten zeigen, dass in prozesstechnischen Anlagen schon ab wenigen zehn kW Pumpenleistung und auch bei Verwendung von drehzahlgesteuerten Antrieben ausreichend Vibrationen vorhanden sein können, um damit drahtlose Feldgeräte zu betreiben. Der Markt stellt Vibrationsharvester zur Verfügung, für die vom Hersteller eine Lebensdauer von 20 Jahren erwartet wird, und der Einsatz im gesamten industriellen Temperaturbereich -40 bis 85 °C und in explosionsgefährdeten Bereichen zugelassen (ATEX) ist. Diese Harvester stellen bei den an unserer Anlage vorhandenen Vibrationsamplituden mehrere mW zur Verfügung; auf einem Vibrationsteststand wurden bei Amplituden bis zu 0.5 g über 20 mW (geregelte Gleichspannung bei $5,2\text{ V}$) abgegeben. Diese Leistung könnte bei stärkeren Vibrationen auch im Feld erzielbar sein.

Somit stellt Vibrations-Energy-Harvesting unter passenden Bedingungen eine realisierbare Alternative dar, um drahtlose Feldgeräte mit Energie zu versorgen. Ein modulares Konzept mit Energiespeicher [ULR12] ist zu empfehlen, falls durch wechselnde Drehzahlen oder Stillstandzeiten der Anlage Zeiten überbrückt werden müssen, in denen keine für den Harvester nutzbare Energie verfügbar ist.

Zu beachten ist jedoch, dass aufgrund der hier gezeigten Einflüsse wie Wechselwirkungen zwischen Anlage und Harvester, frequenzgesteuerte Antrieben und bei wechselnder Fluss oder Konfiguration der Anlage gründlich geprüft werden muss, ob in allen Betriebszuständen geeignete Bedingungen für das Vibrations-Harvesting vorliegen. Dies schränkt die Möglichkeiten für den Einsatz dieser Energiequelle auf bestimmte Anlagen ein, die ein mit vertretbarem Aufwand erfassbares, idealerweise statisches, Drehzahl- und Lastprofil aufweisen. Selbst in diesen Fällen müssen potentielle Montageorte für Vibrationsharvester zuerst mit Vibrationsaufnehmern vermessen werden, oder der Montageort und die geeignete Resonanzfrequenz des Harvesters müssen durch Versuch und Irrtum direkt mit dem Harvester bestimmt werden. Dadurch könnte in manchen Fällen, selbst bei prinzipieller Einsetzbarkeit, ein mit dem Verlegen eines Kabels vergleichbarer Installationsaufwand entstehen.

Quellen

- [NAU03] Naumann G. Dissertation: Energiewandlersystem für den Betrieb von autarken Sensoren in Fahrzeugen. Technische Universität Dresden, 2003.
- [KNI08] Knight C, Davidson J, Behrens S. Energy Options for Wireless Sensor Nodes. Sensors 8, 2008.
- [PAR05] Paradiso JA, Starner T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. IEEE Pervasive Computing, vol 4, 2005.
- [NEN11] Nenninger P, Ulrich M. Harvest Time. ABB Review, 1-11, 2011, p47 – 51
- [ULR11] Ulrich, M., Nenninger, P., Nurnus, J., (2011). Energieautarker drahtloser Temperaturtransmitter. Automatisierungstechnische Praxis (atp Edition) 10/2011, p54-60
- [ULR12] Ulrich M, König K, Kaul H, Nenninger P. Autonomous wireless sensors for process instrumentation - Autonome drahtlose Sensorik für die Prozessindustrie. Sensoren und Messsysteme 2012.