

Autonome AE Systeme: Optimierte Hard- und Softwarelösungen zur Unterstützung von Permanent Monitoring Anwendungen

Michael HÄUSERER¹, Horst TRATTNIG¹

¹ Vallen Systeme GmbH, Icking

Kontakt E-Mail: michael.haeuserer@vallen.de

Kurzfassung. Neben den Inspektionsanwendungen der Schallemission im Rahmen von z.B. Integritätsprüfungen von Druckbehältern oder der Leckage Detektion an Flachbodenlagertanks ist eine steigende Nachfrage für die kontinuierlicher Überwachung von werthaltigen und sensiblen Anlagen oder Bauteilen festzustellen. Die Überwachung dient zum Erhalt der Funktionalität bewegter Bauteile von Maschinen, Industrieanlagen oder Bauwerken. Ziel der Überwachung ist es frühzeitig Schäden zu erkennen, um rechtzeitig planbare und geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten oder mittels anderweitiger NDT Verfahren detailliertere Untersuchungen anzustellen. Die Methode der Schallemissionsanalyse unterstützt diesen Prozess mit geeigneten Messsystemen zur Detektion und Lokalisierung des Schadens. Basierend auf der Auswertung der Daten und der Fachkenntnis des Experten/Anlagenbetreibers können Maßnahmen zur Schadensabwendung dadurch frühzeitig abgeleitet werden.

Eine optimale Unterstützung von Condition Monitoring (CM) und Structural Health Monitoring (SHM) mit Schallemission stellt neue Anforderungen an die Hard- und Software von AE Messsystemen. Diese müssen dabei kontinuierlich den Zustand der Anlage überwachen, Änderungen in ihrem Systemzustand erkennen und bei signifikanten Abweichungen automatisch warnen bzw. alarmieren. Basis hierzu sind zuverlässige Messtechnik (Hardware und Software), ein sich selbst überwachendes Sensornetzwerk und eine programmierbare 24/7 fähige Signalanalyse. Eine weitere Herausforderung ist die IT-Infrastruktur, welche offene Schnittstellen in die Cloud, für den Fernzugriff und für Steuerungsmöglichkeiten bereitstellen muss.

Dieser Beitrag zeigt an zwei Beispielen die Anwendung von Sachallemissionsanalyse für permanente Überwachung aus der Sicht des AE Messsystems. Das erste Beispiel bezieht sich auf die Überwachung eines Kugellagers in einem 500 kW Elektromotor, das zweite Beispiel auf die Überwachung eines Hafenkranes. Es werden die jeweiligen individuellen Anforderungen an die Hardware, Software und der remote Zugriff auf das AE Messsystem sowie das Datenhandling vorgestellt.

Einführung

Die Anwendung von Schallemission als zerstörungsfreies Prüfverfahren ist seit Jahren etabliert und wird im Rahmen von zahlreichen Anwendungen eingesetzt. Im industriellen Umfeld werden unter anderem Druckgeräte, Pipelines und Tanks mit Hilfe von Schallemission geprüft [1]. Dabei stehen unter anderem Integritätstests, Leckage- und



Korrosionsprüfungen im Fokus. Die Prüfung erfolgt meist zyklisch in vorgegebenen Zeiträumen. Neben diesen Anwendungen steigt seit einiger Zeit auch der Bedarf im Bereich der kontinuierlichen Überwachung von Strukturen und Prozessen.

Dabei reicht die Spannweite von hochwertigen Bauteilen in Maschinen wie Getriebe und Motoren, Industrieanlagen wie Pipelines, Ventilen und Kränen bis hin zu Bauwerken und Brücken. Die Anlagen sind teilweise Jahrzehnte lang in Betrieb und sind Abnutzungsprozessen, Erosion, Materialalterung und –ermüdung, Korrosion und Deformation ausgesetzt [4]. Um die Verfügbarkeit der Anlagen sicherzustellen wählen Betreiber oft unterschiedliche Inspektions- und Wartungsstrategien die auf verschiedenen Grundlagen beruhen. Schallemission kann hier ein hervorragendes Werkzeug darstellen um die Veränderung von Anlagen zu detektieren [5]. Davies [2], Nakasa [3], Allevato [1] und andere haben ebenfalls gezeigt, dass Schallemission eine geeignete Methode für kontinuierliche Überwachung ist.

Ziel der kontinuierlichen Überwachung ist es den aktuellen Systemzustand der Anlage zu erfassen, weiter zu beobachten und Änderungen frühzeitig zu entdecken. Dadurch wird der Betreiber in die Lage versetzt frühzeitig Schädigungen an der Anlage zu identifizieren und rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. So können u.a. Arbeitsunfälle vermieden, Ausfälle der Anlage reduziert und Stillstandszeiten besser geplant werden. Legt man die 4 Schadenserkennungslevel nach Rytter [9] zu Grunde, kann Schallemission bei der „Detektion“ und „Lokalisierung“ von Schäden unterstützen. Bei der Einschätzung des „Schadensausmaßes“ und der Abschätzung der „Restlebensdauer“ hingegen ist die Expertise des Anlagenbetreibers notwendig. Tscheliesnig [5] hat in Tests gezeigt, dass die Einzelergebnisse von zyklischen Druckgerätestests eine höhere Eintrittswahrscheinlichkeit gegenüber einer permanenten Überwachung haben. Bei Integritätstests ist darauf zu achten, dass z.B. Noisequellen eliminiert werden, die Druckaufbringung in geeignetem Maße stattfindet und der Prüfdruck über dem Betriebsdruck liegt. Bei einer permanenten Überwachung im normalen Betrieb der Anlage herrschen auch die üblichen Betriebsbedingungen. Der Vorteil der Schallemission ist, dass die Hintergrundgeräusche identifiziert werden und somit in der Auswertung berücksichtigt werden können. Für eine permanente Überwachung empfehlen sich daher Tests im Vorfeld um die Betriebsbedingungen und deren mögliche Auswirkungen auf die Messergebnisse zu kennen. Anhand dieser Tests besteht die Möglichkeit Schwellwerte für Alarme abzuschätzen die bei der folgenden Überwachung eingesetzt werden können [5]. Bei einer permanenten Installation sollte ebenfalls im Vorfeld evaluiert werden ob die gesamte Anlage überwacht werden soll oder ob kritische Punkte identifiziert werden können, auf denen der Fokus liegt. Der Fokus auf diese hot spots ist aus wirtschaftlichen Aspekten sehr attraktiv und vereinfacht die Datenanalyse. Die Identifikation der Hotspots einer Anlage beruht oft auf den Erfahrungen des Betreibers oder kann über Simulationsrechnungen bestimmt werden [5].

Anforderungen an Schallemissionssysteme im Rahmen von permanenter Überwachung

Die Auswahl eines geeigneten Schallemissionssystems ist sehr stark vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Das Schallemissionssystem soll in der Lage sein die Anlage permanent zu überwachen und deren Schallemission mit einem geeigneten Sensornetzwerk zu erfassen. Auf Grund der permanenten Laufzeit der Anlagen ist in vielen Fällen eine Überwachung für 24 Stunden an 7 Tagen der Woche notwendig. Das Schallemissionssystem und die Signalanalyse müssen daher die Messdaten automatisiert aufzeichnen und analysieren, Änderungen im Systemzustand erkennen, schadensrelevante Merkmale extrahieren und bei der Überschreitung vorher definierter Schwellwerte Alarme

auslösen. Dafür sind eine zuverlässige Messtechnik und ein geeignetes Sensornetzwerk notwendig. Das Sensornetzwerk muss je nach Anwendung auch einer dauerhaften Installation im Freien gewachsen sein und unter anderem eine entsprechende Robustheit, Wasserdichtigkeit und UV Beständigkeit aufweisen. Wenn Sensoren permanent installiert werden, sind sie nach der Installation oft schwer zugänglich. Das Entfernen oder ein Umbau der Sensoren ist daher kosten- und zeitaufwändig [6]. Die Ankopplung der Sensoren soll über den gesamten Zeitraum der Überwachung konstant sein, d.h. der Anpressdruck oder die Klebung darf sich nicht ändern. Die Anforderung an Langzeitstabilität ist einmalig für eine permanente Installation gegenüber der Inspektion [7]. Eine umfangreiche Möglichkeit für digitale Filterung der Messdaten ist von Vorteil um mögliche Störeinflüsse aus den Messdaten zu eliminieren. Im Weiteren muss die Analysesoftware flexibel auf den aktuellen Anwendungsfall zugeschnitten werden können. Wiederkehrende Aufgaben neben der Datenerfassung und Analyse müssen automatisiert und selbstständig ausgeführt werden. Dazu gehört unter anderem:

- Steuerung und Überwachung des Schallemissionssystems
- Alarmierung bei Abweichungen vom Soll
- Automatisierte Testabläufe z.B. Sensor Ankopplungstest
- Fernzugriff und email Benachrichtigung
- Protokollierung von Ergebnissen

Vallen Automation Manager Software

Die *Vallen Automation Manager Software* ist das Automatisierungswerkzeug für die Vallen Systeme AE-Messtechnik.

Dieses Programm wird mit der Vallen AE-Suite am Messrechner installiert und ist die zentrale Instanz, um andere Softwaremodule und Programme zu überwachen und zu steuern.

Dazu gehören u.a. die *Vallen Aquisition Software* zum Aufzeichnen der Messdaten, *VisualAE* zur Analyse der Messdaten und als Option die Ansteuerung von Serverzugängen oder das Versenden von Daten in die Cloud.

Die Abläufe der *Vallen Automation Manager Software* gliedern sich in Events, Tasks und Actions. Events können entweder durch Alarm Prozessoren in *VisualAE*, timer, watchdogs oder auch manuell ausgelöst werden.

Watchdogs sind frei programmierbar Funktionen, die z.B. auf erhöhte Aktivität oder überschreiten von definierten Limits reagieren.

Falls ein Event auftritt, führt die *Vallen Automation Manager Software* einen vorher definierte Task aus, der aus einem oder mehreren Actions bestehen kann. Beispiele für Actions sind Start und Stop der Datenaufzeichnung, Wechsel zu einer neuen Aufzeichnungsdatei oder der Versand einer E-Mail [8]. Ein schematisches Prozessbild und das Zusammenspiel zwischen *Vallen Automation Manager*, Sensor Netzwerk und Fernzugriff auf das System ist in Abb. 1 dargestellt.

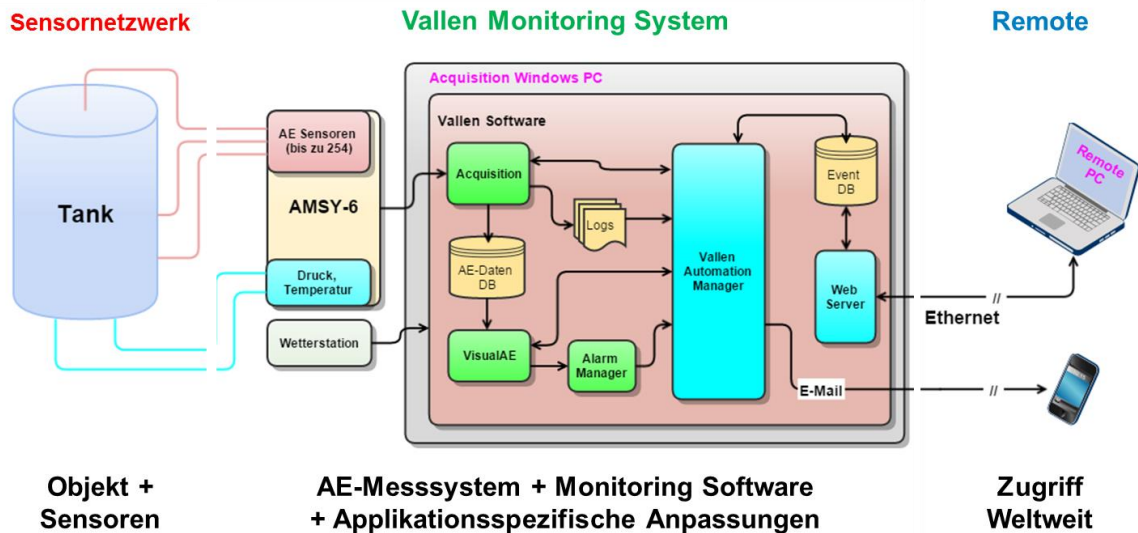


Abb. 1: Schematisches Prozessbild des Vallen Automation Manager

Anwendungsbeispiele für permanente Überwachung und deren individuelle Lösungen

1 Kranüberwachung

In einer Pilotstudie wird ein Containerkran über einen Zeitraum von 9 Monaten permanent mit Schallemission überwacht. Als Schwachstelle wurden vom Betreiber die sogenannten „tension bars“ identifiziert, die im Betrieb die Hauptlast des Kranauslegers und der Container tragen. Das Projekt startete im Frühjahr 2017, weswegen aktuell noch keine Ergebnisse vorgestellt werden können. Der Containerkran wird in einem der wichtigsten internationalen Häfen der Welt eingesetzt und ist im 24/7 Betrieb, also rund um die Uhr im Einsatz um Containerschiffe zu be- und entladen. Der Kran ist seit einigen Jahrzehnten in Betrieb. Ziel der permanenten Überwachung mit Schallemission ist es mögliche Schäden frühzeitig zu erkennen um ereignisorientierte Inspektionen und Wartungen durchzuführen und die Ausfallzeiten gegenüber regelmäßigen Inspektionen zu minimieren.

1.1 System und Sensornetzwerk

Der Betreiber des Containerkrans hat aus langjähriger Erfahrung mit dem Krantyp die tension bars als hot spots identifiziert, welche kontinuierlich überwacht werden soll, siehe Abb. 2. Die Abnutzungserscheinungen sind nach jahrzehntelangem Betrieb an diesen Bauteilen des Krans bekannt. Durch die Vorkenntnisse kann sich die Überwachung auf diese hot spots konzentriert und damit eine zielgerichtete Planung des Sensornetzwerkes und der Analysesoftware erstellt werden. Zu den Herausforderungen an das Sensornetzwerk bei der Überwachung gehören die Außenanwendung an sich und die damit notwendigen wasserdichten und UV beständigen Sensoren und Kabel. Weiter ist bei der Inbetriebnahme zu beachten, dass die tension bars aus zwei bzw. drei Stahlträgern bestehen, die über Bolzen verbunden sind. Die einzelnen Abschnitte der tension bars sind an den Bolzen beweglich verbunden und klappen zusammen wenn der Kranausleger hochgeklappt wird. Diese Beweglichkeit ist notwendig, damit Containerschiffe unter dem Kranausleger hindurchfahren und an der Kaimauer anlegen können. Jeder Abschnitt der tension bars soll separat betrachtet werden, da erwartet wird, dass die Verbindungsstellen

die Schallausbreitung behindern. Auf den einzelnen Abschnitten der tension bars soll linear geortet werden. Das AMSY-6 System und der Messrechner sind im Kontrollraum des Krans mit entsprechender Stromversorgung und USV installiert. Alarmausgänge des AMSY-6 sind mit dem Kranüberwachungssystem verbunden um bei einem Alarm unverzüglich Maßnahmen einleiten zu können.

Über ein mobiles Netzwerk ist das Schallemissionsmesssystem mit dem Internet verbunden und kann so Meldungen verschicken oder auch via Fernzugriff gesteuert werden.



Abb. 2: Beispiel von Containerkränen im Betrieb. Die Kranausleger sind teilweise hochgeklappt. "tension bars" sind bei einem Kran durch die weißen Pfeile gekennzeichnet [10]

1.2 Analyse Software und Automation Manager

Während der Inbetriebnahme werden mit Hilfe eines erfahrenen Servicedienstleisters die Einflüsse der üblichen Betriebsgeräusche auf die Schallemissionsergebnisse erfasst und in die Analyse und Alarmierung miteinbezogen.

Die Automation Manager Software steuert dann die Messdatenerfassung, die Analyse der Messdaten, das Alarmmanagement und die automatische Benachrichtigung z.B. per E-Mail.

Eine weitere wichtige Aufgabe der Automation Manager Software ist eine regelmäßige Überprüfung des Sensornetzwerks. Dabei wird die Ankopplung der Sensoren, die Funktion der Messkette (Sensoren und System) und die Verkabelung (Kabelbruch) überprüft.

2 Lagerüberwachung

Jede rotierende Maschine emittiert „Geräusche“ durch Reibung, Defekte und/oder Unwucht. In diesem Beispiel wurde ein Kugellager in einem 500kW Motor mit Schallemission überwacht. Der Motor ist Teil des Kühlkreislaufs eines Kraftwerks und daher ein sicherheitsrelevantes Bauteil. Auslöser war das Versagen eines Kugellagers in diesem Motor, das zum Brand und Totalausfall der Anlage führte. Die Schallemissionsmessung wurde gewählt um nähere Informationen über die Zustandsänderung des Kugellagers zu erhalten und somit einem erneuten Schaden frühzeitig zu erkennen.

2.1 System und Sensornetzwerk

Für die Überwachung werden zwei Sensoren mit einer Resonanzfrequenz von 150kHz verwendet. Das Lager des Motors ist nicht frei zugänglich weswegen Waveguides

verwendet werden, die auf der Lagerschale montiert sind. Die Sensoren sind auf die Montageplatte der Waveguides geklebt und zusätzlich mit Magnethaltern fixiert. Die Sensoren sind auf dem Lager zu beiden Seiten der Antriebswelle montiert. Neben den Sensoren werden zwei Temperatursensoren eingesetzt. Ein Temperatursensor ist an einem Waveguide montiert und misst die Temperatur nahe am Lager, der zweite Sensor befindet sich neben dem Schallemissionssystem und misst die Raumtemperatur. Der Temperaturverlauf am Lager soll später mit der Schallemission verglichen werden um mögliche Zusammenhänge zu identifizieren. Die Signale der Sensoren werden mit einem AMSY-6 Schallemissionsmesssystem von Vallen Systeme aufgezeichnet, die Signale der Temperatursensoren werden in die parametrischen Kanäle des AMSY-6 eingespeist. Der Motor steht in einer Halle, weswegen keine erhöhten Anforderungen oder separater Stromversorgung für das Sensornetzwerk und das System bestehen.

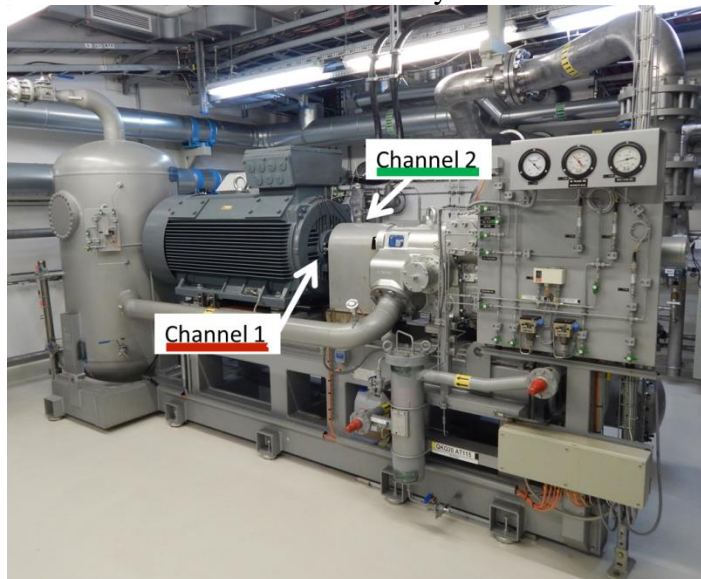


Abb. 3: 500kW Motor mit Positionen der beiden Sensoren zur Messung der Schallemission des Lagers. Kanal 1 ist rot markiert, Kanal 2 ist grün markiert. Die farbliche Markierung ist analog zur farblichen Darstellung der Messdaten in Abb. 4

2.2 Automation Manager und Analyse Software

Die Kontrolle der Schallemissionsdaten erfolgt räumlich getrennt vom System. Ein direkter Fernzugriff auf das System ist aus IT Sicherheitsgründen nicht möglich. Ein regelmäßiger Datenupload auf einen FTP Server ist jedoch möglich. Die Automation Manager Software legt alle 24 Stunden eine neue Datei an, in der die Messdaten gespeichert werden, und lädt Daten des Vortages auf den FTP Server des Betreibers. Der Automation Manager aktiviert zusätzlich alle 12 Stunden für einen kurzen Zeitraum die Aufzeichnung von TR Daten, also die Aufzeichnung der kompletten Wellenform eines Zeitfensters. Dadurch stehen in regelmäßigen Zeitabschnitten TR Daten zur Verfügung mit denen der Frequenzinhalt der Messdaten analysiert werden kann. Die Dauer der TR Datenaufzeichnung ist so gewählt, dass die Datenmenge für die Analyse ausreichend ist aber für den Datenaustausch über den Server nicht zu groß wird. Die Messdaten werden täglich über den FTP Server abgeholt und offline analysiert. Zur besseren Darstellung werden Stundenmittelwerte des RMS gebildet und zusammen mit den vorherigen Daten zu einer Messreihe zusammengesetzt (Abb. 4).

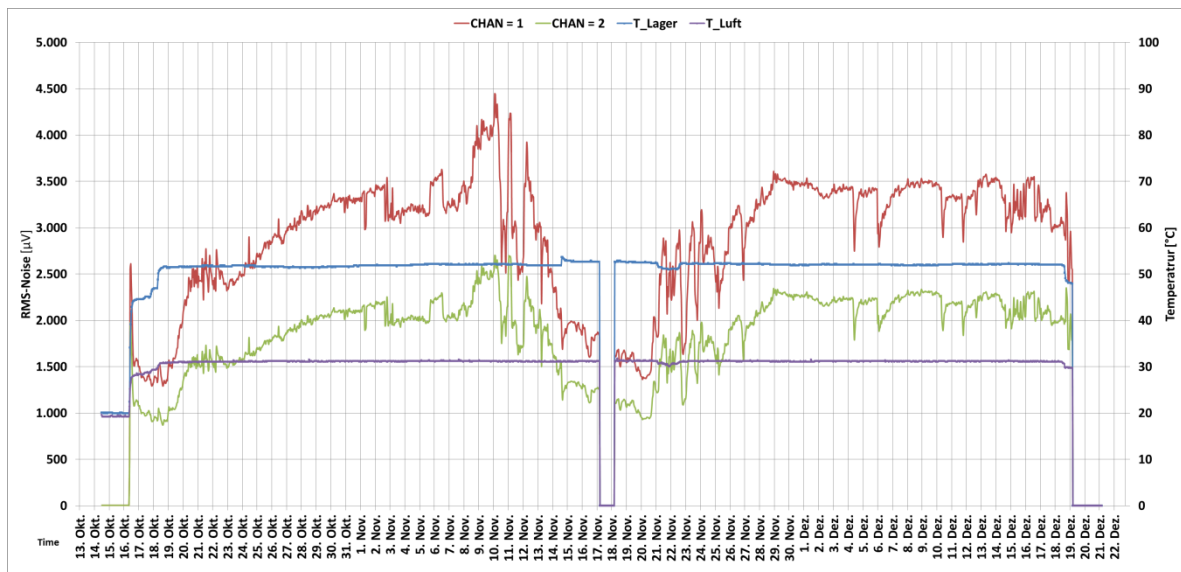


Abb. 4: Darstellung des RMS Wertes von Kanal 1 (rot) und Kanal 2 (grün) als Stundenmittelwerte über die Zeit. Die 2. Y-Achse zeigt die Temperaturmesswerte. Die Temperatur am Lager ist als blaue Kurve und die Temperatur im Raum als violette Kurve dargestellt.

2.3 Beschreibung der Messdaten

Das Diagramm in Abb. 4 zeigt die Schallemissionsdaten der beiden Sensoren und Daten der Temperaturaufzeichnung über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2 Monaten. Die Schallemissionsdaten sind als RMS Werte, gemessen in μV , dargestellt. Die grüne Kurve zeigt die RMS Werte von Sensor 1 (CHAN 1) und die rote Kurve die RMS Werte von Sensor 2 (CHAN 2). Beide Kurven zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf und eine hohe Konsistenz in der Volatilität. Sie unterscheiden sich maßgeblich in der Amplitude, was auf die Ankopplung der Sensoren über die Waveguides auf das Lager zurückzuführen ist. Die Absolutwerte der Messdaten und vor allem deren Volatilität ist bisher noch nicht ausreichend geklärt und muss noch weiter vor dem Hintergrund möglicher Quellmechanismen für die Schallemission in Lagern bearbeitet werden. Der Ansatz, die RMS Werte mit der Temperatur zu korrelieren spiegelt sich in den Messdaten nicht wieder. Die Temperaturmessdaten des Sensors am Lager ist als blaue Kurve mit der Einheit $^{\circ}\text{C}$ dargestellt. Die Messdaten der Raumtemperatur sind als violette Kurve dargestellt. Die Temperaturskala ist auf der rechten y-Achse des Diagramms in Abb. 4 abgebildet. Die gemessene Temperatur am Lager ist erwartungsgemäß höher als die Raumtemperatur. Beide Temperaturkurven verlaufen nach dem Hochfahren des Motors auf Vollast (18. Okt.) nahezu konstant bis zum Abschalten des Motors am 18. Dez. Der geringe Temperaturanstieg der blauen Kurve (Temperatur Lager) am 14. November ist auf ein Nachfetten des Lagers zurückzuführen. Die Schallemissionsdaten sind eine Momentaufnahme im Verlauf der Nutzungsdauer des Lagers. Die Charakteristik der Schallemissionsdaten am Beginn der Nutzungsdauer sind leider nicht bekannt, weswegen aktuell noch keine Aussage über die Änderung des Zustands getroffen werden kann.

Zusammenfassung

Mit diesen beiden Beispielen wurde gezeigt, dass die Schallemissionsmesstechnik heute bereits die Anforderungen für Permanent-Monitoring-Anwendungen erfüllt. Die Kombination aus automatisierten Software und Analysetools, zuverlässiger Messtechnikhardware und selbstüberwachenden Sensornetzwerken bietet zudem genügend Flexibilität für die verschiedensten Aufgabenstellungen.

Die beiden beschriebenen Beispiele zeigen die Flexibilität und breitgefächerte Anwendbarkeit von Schallemissionssystemen und die Unterstützung bei der permanenten Überwachung durch die Automation Manager Software. Es hat sich bestätigt, dass beide Anwendungen unterschiedlich sind und jeweils ihre eigenen individuellen Anforderungen an Sensornetzwerk und Analysesoftware stellen. Ein weiterer Punkt ist, dass das Schallemissionssystem zwar autonom laufen kann und muss, aber die Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Durchführung im Vorfeld geschaffen werden müssen. Eine zuverlässige Stromversorgung muss gewährleistet sein und eine Kommunikationsinfrastruktur für den Fernzugriff auf das System und/oder die Daten muss mit dem Betreiber aufgebaut werden. Die online Analyse muss durch erfahrene Dienstleister so aufgebaut werden, dass die Einflüsse der üblichen Betriebsbedingungen der Anlage auf die Schallemissionsergebnisse soweit bekannt sind, dass diese von den Nutzsignalen separiert werden können. Darauf aufbauend müssen die Schwellwerte für Alarmer so definiert werden, dass Alarmer durch relevante Ereignisse ausgelöst werden und nicht durch normale Betriebsaktivitäten.

Referenzen

- [1] Claudio Allevalo, 'The use of acoustic emission testing on long term monitoring of damaged components', EWGAE 2010, 2010
- [2] Ray Davis, 'AE as a Basis for Plant Integrity Monitoring', Progress in Acoustic Emission III - The Japanese Society of NDI, 1986
- [3] Hiroyasu Nakasa and Hiroaki Sasaki, 'Long-term continuous monitoring of structural integrity of steel storage tanks', IAES 1998
- [4] Baiqing Liu, Kai Qi, Aihua Jiang, Chengzhong He, Xinhua Wang, 'Application of Acoustic Emission (AE) Technique in gantry crane main metal structure safety assessment', Proceedings of World Conference on Acoustic Emission – 2011, Beijing
- [5] Peter Tscheliesnig, 'From Acoustic Emission Testing (AT) to Acoustic Monitoring', 12th International Conference of the Slovenian Society for NDT, Sep 4-6, 2013, Portorož, Slovenia
- [6] ASTM E650, 'Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors', 2012
- [7] Thomas Thenikl, Ireneusz Baran, Hartmut Vallen, 'The challenges and solution of permanent AE monitoring of an engineering structure', ECNDT 2014
- [8] Vallen Systeme GmbH, 'Vallen Automation Software user manual', 2013
- [9] Rytter A., Kirkegaard Poul Henning, 'Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures', Aalborg Universitetsforlag, 1994
- [10] CMA CGM Alexander von Humboldt (ship, 2013) 001.jpg, <https://commons.wikimedia.org>, downloaded on 30th of January 2017