



DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG e.V.

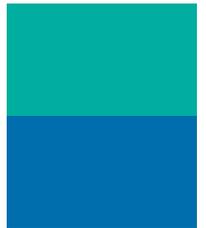
---

DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren

# **Kompendium Schallemissionsprüfung**

---

Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung



März 2022

---

---





DEUTSCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
ZERSTÖRUNGSFREIE  
PRÜFUNG e.V.

---

DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren

# **Kompendium Schallemissionsprüfung**

---

Grundlagen, Verfahren und praktische Anwendung

März 2022

---

---

## Wer ist die DGZfP?

Als technisch-wissenschaftlicher Verein verfolgt die DGZfP das Ziel der Erforschung, Anwendung und Verbreitung der zerstörungsfreien Prüfverfahren. Zu ihren rund 1.600 Mitgliedern gehören große Konzerne und mittelständische Unternehmen die Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) einsetzen, ebenso Forschungseinrichtungen, Universitäten und Behörden, aber auch einzelne Personen, die sich mit der ZfP beschäftigen.

Die DGZfP organisiert die Kommunikation und den Erfahrungsaustausch zwischen Forschungs- und Entwicklungsinstituten und ZfP-Anwendern, Geräteherstellern und Dienstleistern und informiert über neueste ZfP-Entwicklungen in der Gerätetechnik und den ZfP-Anwendungen.

Zur Lösung spezieller technischer Probleme hat die DGZfP Fachausschüsse eingerichtet. Der praxisnahe Erfahrungsaustausch und die kostenfreie fachliche Weiterbildung finden in regionalen Arbeitskreisen statt.

Die DGZfP veranstaltet regelmäßig Konferenzen und Seminare. Höhepunkt ist die jährliche Jahrestagung mit über 500 Teilnehmern. Die DGZfP ist Mitglied des EFNDT und ICNDT, der europäischen und der weltweiten Dachorganisation der nationalen ZfP-Gesellschaften.

Weitere Arbeitsgebiete sind die Qualifizierung und Zertifizierung von Prüfpersonal in der Zerstörungsfreien Prüfung. Das Angebot umfasst Kurse und Qualifizierungsprüfungen nach DIN EN ISO 9712, in allen Produktsektoren, in zehn ZfP-Verfahren und drei Qualifizierungsstufen sowie behördlich anerkannte Ausbildungen im Strahlenschutz entsprechend den Fachkunde-Richtlinien Technik.

Mit Veröffentlichung der europäischen Norm DIN EN 473 im Jahre 1993, ersetzt durch die DIN EN ISO 9712 im Jahr 2013, wurde eine unabhängige DGZfP-Personal-Zertifizierungsstelle (DPZ) eingerichtet.

Die DPZ ist von der Zentralstelle der Länder für Sicherheitstechnik (ZLS) als anerkannte unabhängige Prüfstelle nach der europäischen Richtlinie 2014/68/EU (Druckgeräte richtlinie „DGR“) anerkannt und für den nicht geregelten Bereich von der Deutschen Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS) als Zertifizierungsstelle für Personal der Zerstörungsfreien Prüfung akkreditiert. Weiterhin garantieren Verträge mit vielen Ländern Europas und Ländern in Übersee, sowie die Mitgliedschaft im Multilateral Recognition Agreement des EFNDT, dem DGZfP-Zertifikat internationale Anerkennung.

Besuchen Sie uns:



---

**Der Inhalt von DGZfP-Richtlinien und -Merkblättern ist ein von Experten formulierter Stand der Technik, dessen Anwendung empfohlen wird.**

Herausgeber:



[www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de)

Max-Planck-Straße 6 • D-12489 Berlin

Telefon: +49 30 67807-0 • Telefax: +49 30 67807-109 • E-Mail: [mail@dgzfp.de](mailto:mail@dgzfp.de)

ISBN 978-3-947971-19-0

© DGZfP e.V. 03/2022. Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung sowie Übersetzung auch in elektronischen Systemen bedarf der schriftlichen Genehmigung der DGZfP e.V.

DGZfP AT Kompendium, Ausgabe März 2022

**Weitere DGZfP-Richtlinien und Merkblätter (Stand: 03/2022):**

A 01	Richtlinie über die Qualifizierung von Prüfwerkern der Zerstörungsfreien Prüfung	DP 04	Arten von Gasprüfleck und ihre Verwendung bei Dichtheitsprüfverfahren
A 05	Richtlinie für Ausbildungsstätten – Mindestanforderungen an Ausstattung und Organisation	DP 05	Messunsicherheit und Messmittelfähigkeit bei der Dichtheitsprüfung
B 02	Merkblatt zur zerstörungsfreien Betondeckungsmessung und Bewehrungsortung an Stahl- und Spannbetonbauteilen	EM 05	Merkblatt über Schutzmaßnahmen beim Umgang mit elektromagnetischen Feldern in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung
B 03	Elektrochemische Potentialmessungen zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion	EM 06	Merkblatt über Betrachtungsplätze für die fluoreszierende Prüfung mit dem Magnetpulver- und Eindringverfahren - Ausrüstung und Schutzmaßnahmen bei Arbeiten mit UV-Strahlung
B 04	Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	ISB 02	Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Verfahren zur Bestätigung der Kompetenz einer ZfP-Prüfstelle nach DIN 27201-7 durch eine dritte Seite
B 05	Merkblatt über das aktive Thermographieverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	ISB 03	Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Validierung und Überwachung von mechanisierten bzw. automatisierten Prüfanlagen in ZfP-Prüfstellen
B 06	Merkblatt über die Sichtprüfung und Endoskopie als optische Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	MC 01	Richtlinie für Kriterien zur Auswahl von Härteprüfverfahren mit mobilen Geräten
B 08	Merkblatt Seismische Baugrunderkundung	MR 01	Metrologische Rückführbarkeit von Hilfsgeräten für die Eindring- und Magnetpulverprüfung
B 10	Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen	MTHz 01	Mikrowellenprüfung: Grundlagen und Anwendungen
B 11	Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen	OV 01	Merkblatt über Optische Verfahren - Auswahl und Erstprüfung von optischen Sichtprüfgeräten; Überprüfung von optischen Sichtprüfgeräten durch den Anwender
B 12	Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken	SE 02	Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor
D 01	Messung der optischen Dichte in Durchstrahlungsaufnahmen	SHM 01	Strukturprüfung mit geführten Wellen als Sonderform des Ultraschalls
D 02	Dunkelkammerverarbeitung von Industrie-Röntgenfilmen	Bruch-ortung	Positionspapier - Magnetische Verfahren zur Spannstahlbruchortung
D 03	Schweißnahtvermessung bei Zerstörungsfreier Prüfung und Filmkennzeichnung bei Durchstrahlungsprüfungen	US 02	Richtlinie Bildgebende Ultraschallprüfung von Neuen Werkstoffen
D 04	Ermittlung der Prüfbereichsabmessung für die Durchstrahlungsprüfung von Gussstücken	US 03	Richtlinie zur Ultraschallprüfung des prüfkopfnahen Oberflächenbereiches
D 05 pdf	Vergleichs-Durchstrahlungsbilder für Gussstücke aus Gusseisen mit Lamellen- und Kugelgraphit	US 06	Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung
D 05	Anforderungen und Rahmenbedingungen für den Einsatz der Röntgencomputer-tomographie in der Industrie	US 07	Richtlinie zur Festlegung des Prüfrasters bei der automatisierten Ultraschallprüfung großer Schmiedestücke
DP 01	Richtlinie über die Auswahl eines geeigneten Prüfgases für die Dichtheitsprüfung nach DIN EN 13185	HB PA	Handbuch für die Materialprüfung mit Ultraschall Phased Array
DP 02	Richtlinie zur Umrechnung der mit Prüfgasen gemessenen Leckageraten in andere Medien (Gase, Flüssigkeiten)	ZfP 01	Richtlinie Zerstörungsfreie Prüfung entsprechend ASME Boiler and Pressure Vessel Code
DP 03	Merkblatt zur Charakterisierung von Prüfgas-Nachweissystemen für Dichtheitsprüfungen		

Informationen unter: [www.dgzfp.de](http://www.dgzfp.de) (PUB-Shop)

**Autoren-/Firmenverzeichnis:**

Brunner, Dr. Phil. II Andreas J.	privat
Baensch, Dr. Franziska	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
Bohse, Dr.-Ing. habil. Jürgen	privat
Lackner, Dipl.-Ing. Gerald	TÜV Austria Services GmbH, Wien
Sause, Prof. Dr. Markus G. R.	Universität Augsburg, Augsburg

**Inhalt**

1	Zielstellung	1
2	Messprinzip	3
3	Art der Prüfung	4
3.1	Vorbemerkung	4
3.2	Merkmale des AT Verfahrens	4
3.3	Einschränkungen des AT Verfahrens	4
4	Aufzeichnung und Analyse von AE-Daten	5
5	AT-Messtechnik	6
6	Drahtlose Sensorsysteme für Strukturüberwachung	7
7	AT-Messgrößen	8
8	Auswertung der AE-Daten	10
8.1	Vorbemerkung	10
8.2	In Echtzeit während der Prüfung	10
8.3	Mit mehr Rechenzeit nach der Prüfung	10
9	Informationen der AT	11
10	Zuverlässigkeit der AT	12
11	Ausbildung und Zertifizierung von AT-Personal	13
12	Literaturhinweise	14
12.1	Bücher und wissenschaftliche/technische Zeitschriften	14
12.2	DGZfP-Kolloquien „Schallemission“	14
12.3	EWGAE – European Working Group on Acoustic Emission / Proceedings	15
12.4	IIIAE – International Institute of Innovative Acoustic Emission / Proceedings	15
12.5	DGZfP Schulungsunterlagen	15
12.6	Normen (Auswahl)	15
Anhang A - Übersicht industrieller AT-Anwendungen		19
Anhang B – Zustandsüberwachung mit AT		44

**1 Zielstellung**

Die Schallemissionsmessung wird seit Jahrzehnten weltweit in der Materialforschung und -prüfung, bei Laborprüfungen von Komponenten und Bauteilen sowie als Prüfverfahren für industrielle Anwendungen erfolgreich eingesetzt. In internationalen Normen wird die Schallemissionsprüfung im englischen als Acoustic Emission Testing (AT) bezeichnet, weshalb diese Abkürzung in diesem Dokument durchgängig verwendet wird. Dies ist zu unterscheiden von den ebenfalls gängigen Abkürzungen AE für Acoustic Emission, sowie SE für Schallemission, welche beide das ursächliche Phänomen, nicht aber die Prüfmethode bezeichnen.

Für die AT kommen alle Werkstoffe in Frage, die unter geeigneter Belastung bzw. geeigneten Betriebsbedingungen Schallemissionsereignisse von genügend hoher Amplitude erzeugen, wie Metall, Keramik, Glas, Gestein, Beton, spröde Polymerwerkstoffe, Holz und selbstverständlich Verbundwerkstoffe. Mechanismen der Schallemission sind z.B. Rissbildung, Rissfortschritt, Delamination, Rissuferreibung, Versetzungsbewegung, Phasenumwandlung, Korrosionsprozesse, turbulente Strömungen an Leckagen, Hochspannungs-Teilentladungen in Großtransformatoren u.v.a.m.

Dabei wird zwischen der Erzeugung von transienten Schallemissionen mit Burstcharakter und permanenter (quasi-)kontinuierlicher Schallemission unterschieden.

Zielstellungen der AT bei industriellen Anwendungen sind, anhand der Aufzeichnung und Analyse von Schallemissionssignalen die Fertigungsqualität oder den Schadenszustand von Materialverbunden, Komponenten und Bauteilen zu charakterisieren, Bereiche hoher Schallemissionsaktivität bzw. -intensität zu lokalisieren und bruchkritische Schadenssituationen vor dem ultimativen Versagen in Echtzeit anzuzeigen. Der Einsatz als Monitoring-Verfahren zur Zustandsüberwachung bringt somit die eigentliche Stärke der AT voll zur Geltung. Außerdem ist es möglich, Prozesse zu überwachen und evtl. aufgrund der Schallemissionssignale auch zu regeln.

Die AT wird als begleitendes Prüfverfahren u.a. bei der

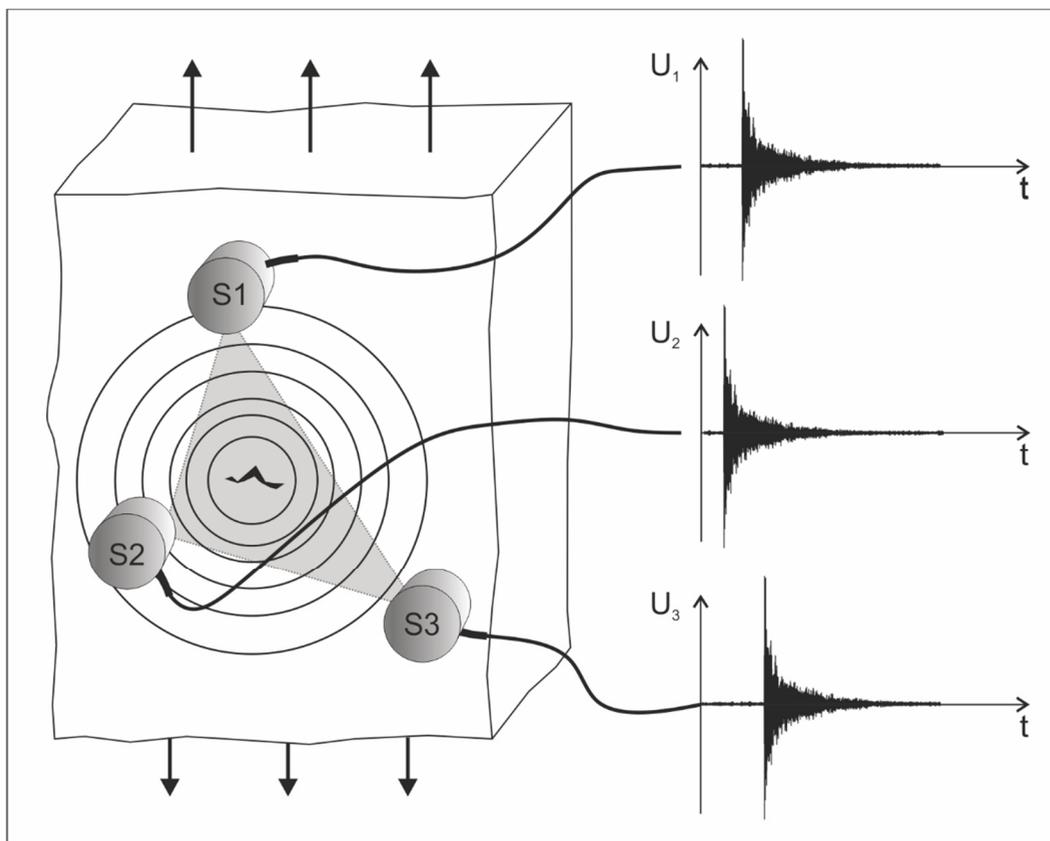
- Abnahmeprüfung
- Wiederkehrenden Prüfung
- Überwachung von Fertigungsprozessen/Prozessregelung
- Lebensdauer-/Zustandsüberwachung

eingesetzt.

Internationale Bedeutung hat die AT an Druckbehältern, Tanks, Rohrleitungen, Ventilen etc. sowie zum Monitoring von geologischen Endlagerstätten und Bauwerken, wie z.B. Brücken und Staudämmen erlangt.

## 2 Messprinzip

Die Schallemissionsprüfung basiert auf der Detektion dynamischer Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche des Prüfobjekts, welche durch sogenannte akustische Wellen (elastische Spannungswellen) bewirkt werden (Abb. 1). Diese Wellen werden durch kurzzeitige, sehr kleine Verschiebungen erzeugt, die bei plötzlichen Spannungsänderungen in schnell ablaufenden Prozessen im Werkstoff entstehen. Durch diese Schallwellen entsteht eine Wechseldruckanregung des Sensors. Der Wechseldruck erzeugt im sensitiven Piezoelement des Sensors einen elektrischen Spannungsaus-schlag, dessen Amplitude von der frequenzabhängigen Sensorempfindlichkeit gegenüber der Anregung durch Volumenwellen (in geologischen Strukturen und Flüssigkeiten) sowie Platten- oder Oberflächenwellen (in plattenförmigen Strukturen, wie Behältern, Rohrleitungen etc.) abhängt.



**Abb. 1: Das Messprinzip der Schallemission: Die bei der Rissbildung in einer belasteten Struktur erzeugten akustischen Wellen werden mittels piezoelektrischer Sensoren (S1, S2, S3) detektiert und als elektrische Zeitsignale ( $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ ,  $U_3(t)$ ) aufgezeichnet.**

(Bildquelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin/DGZfP VNB 252/2022-02-09)

### **3 Art der Prüfung**

#### **3.1 Vorbemerkung**

Die AT unterscheidet sich von anderen ZfP-Verfahren dahingehend, dass eine Schallemissionsquelle im Untersuchungsobjekt aktiviert werden muss, um die daraus resultierenden elastischen Wellen messen zu können. Dies erfolgt z.B. durch äußere Belastung des Untersuchungsobjektes.

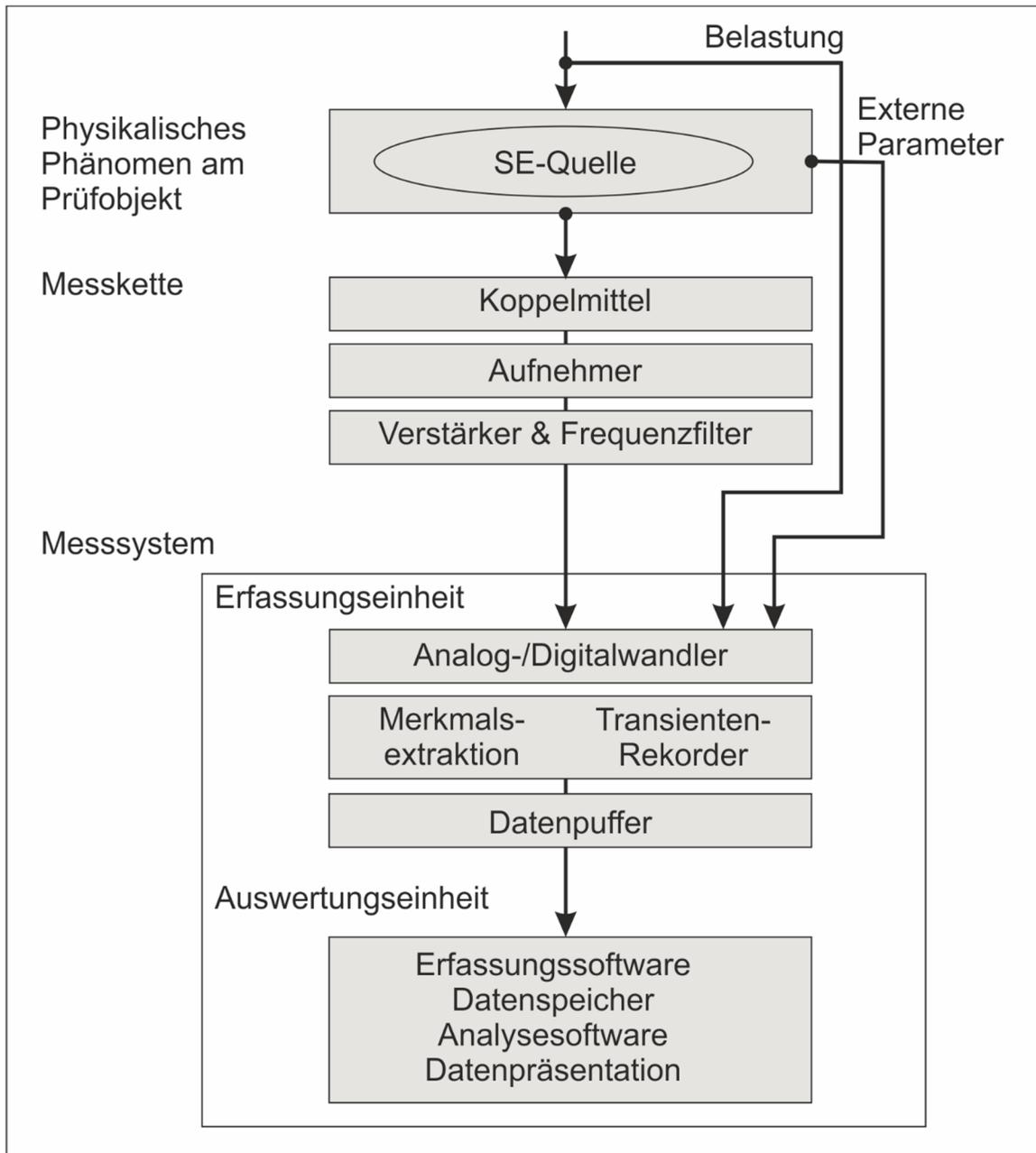
#### **3.2 Merkmale des AT Verfahrens**

- AT ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren nach EN ISO 9712.
- AT ist ein passives Detektionsverfahren zur Erfassung von elastischen Wellen.
- AT reagiert auf Wachstum von Inhomogenitäten und vergleichbare dynamische Änderungen der Materialstruktur, nicht aber auf statisch ruhende Inhomogenitäten.
- AT erlaubt eine 100% Überwachung des zu untersuchenden Materialvolumens, wenn eine genügend große Anzahl an Sensoren verwendet wird. Die Sensoranzahl bzw. der Abstand der Sensoren zueinander wird maßgeblich durch die Schallschwächung im Material, die zu erwartende Quellenstärke und, sofern verwendet, das Verfahren zur Quellenortung bestimmt.
- Es kann eine globale oder lokale Volumenprüfung mit dem Ziel der Ortung von Schallemissionsquellen bei festen Sensorpositionen durchgeführt werden. Das Verfahren ist nicht auf Oberflächeninhomogenitäten beschränkt.
- Weiterhin ist AT ein Echtzeit-Prüfverfahren, da die Signale aus dem Prüfobjekt unmittelbar registriert und verarbeitet werden können.

#### **3.3 Einschränkungen des AT Verfahrens**

- Statische Inhomogenitäten in einem Prüfobjekt erzeugen, unabhängig von ihrer Größe, möglicherweise keine Schallemission. Wird keine Schallemission freigesetzt, dann kann die Inhomogenität nicht identifiziert werden.
- Eine Wiederholung auf das gleiche äußere Belastungsniveau zeigt ebenfalls nur solche inneren Inhomogenitäten an, welche wieder aktivierbar sind, z.B. hervorgerufen durch Reibung oder beginnendes Materialversagen.
- Bei der Belastung auftretende Nebengeräusche (z.B. durch Pumpen, Aktoren, Aggregate, Wind, Regen, etc.) werden im relevanten Frequenzbereich den Nutzsignalen überlagert und können nicht immer ausreichend getrennt werden.

**4 Aufzeichnung und Analyse von AE-Daten**



**Abb. 2: Messkette und Messsystem zur Aufzeichnung und Analyse von AE-Daten**  
 (Bildquelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin/DGZfP VNB 253/2022-02-09)

## 5 AT-Messtechnik

Für die AT wird bestimmte Messtechnik eingesetzt. Die Ausführung ist als Einkanalmessung oder Mehrkanalmessung (letzttere ist erforderlich für die Ortung von AE-Quellen) möglich. Die Messkette jedes Kanals gestaltet sich üblicherweise wie folgt:

- AE-Sensoren (üblicherweise piezoelektrische Resonanz- bzw. Breitbandsensoren für einen Frequenzbereich von ca. 20 kHz ... 2 MHz)
- Koppelmittel zur guten akustischen Ankopplung der AE-Sensoren am Prüfobjekt
- Halterungen zur Sensorbefestigung (Magnethalter, Bänder etc.)
- Signalverstärker + Frequenzfilter
- PC zur Aufzeichnung und Speicherung von Schallemissionssignalen, heute meist mit Analog/Digital-Wandlern sowie mit Analogkanälen für die synchrone Aufzeichnung weiterer externer Versuchsparameter, z.B. Last, Temperatur, etc.
- Software zur Steuerung der Datenaufzeichnung
- Software zur Echtzeit-Analyse bzw. nachträglichen Auswertung von Merkmalen der Schallemissionssignale und für Prozeduren zur Ortung von Schallemissionsquellen
- AE-Monitoring von Strukturen mittels „Remote“-Steuerung der Datenerfassung und -analyse, z.B. über Internetverbindungen; zur Prozessregelung ist eine entsprechende Verbindung zur Prozesskontrolle notwendig.

## 6 Drahtlose Sensorsysteme für Strukturüberwachung

Die permanente Überwachung von Strukturen oder Bauwerken mit Schallemission oder Geführten Wellen kann wichtige Hinweise auf Schädigungsentwicklung unter Betriebslasten liefern. Dies generiert bei Aufzeichnung der Wellenformen große Datenmengen. Diese Datenmenge ist abhängig von der Anzahl Sensoren bzw. Wandler und der Abtastrate der Signalaufzeichnung. Für kabelgebundene Schallemissions-Systeme existieren kommerzielle Geräte, die fast alle Anwendungsfälle ausreichend abdecken. Werden die Daten aber mittels lokaler Sensorknoten erfasst und dann drahtlos auf einen Zentralrechner übertragen, stellen die Datenübertragungsraten kommerziell verfügbarer Systeme sowie die Synchronisation der Messkanäle eine Herausforderung dar. Unabhängig von der Dauer der Überwachung großer Prüfobjekte erfordern z.B. 32 Kanäle bereits bei 16 bit Signalauflösung und 10 MHz Abtastrate (kommerzielle Systeme gehen bis 40 MHz Abtastrate) Datenübertragungsraten von mehreren GBit/s. Langzeitüberwachung großer Strukturen mit drahtlosen Sensorsystemen bedingt auch eine entsprechende Energieversorgung der Sensorknoten. Für drahtlose Sensorsysteme zur Langzeitüberwachung von großen Prüfobjekten, wie z.B. Bauwerken, ist Photovoltaik, wenn anwendbar, zurzeit die beste Möglichkeit für die Energieversorgung. Alternative Systeme für lokale Energiegewinnung erreichen die benötigte elektrische Leistung (typisch Hundert mW oder mehr) bisher nicht, auch wenn der Energiebedarf durch Maßnahmen wie optimierte Datenübertragungsprotokolle reduziert wird. Photovoltaik kombiniert mit aufladbaren Batterien kann den Langzeitbetrieb über mehrere Jahre mit vermutlich vertretbarem Aufwand sicherstellen.

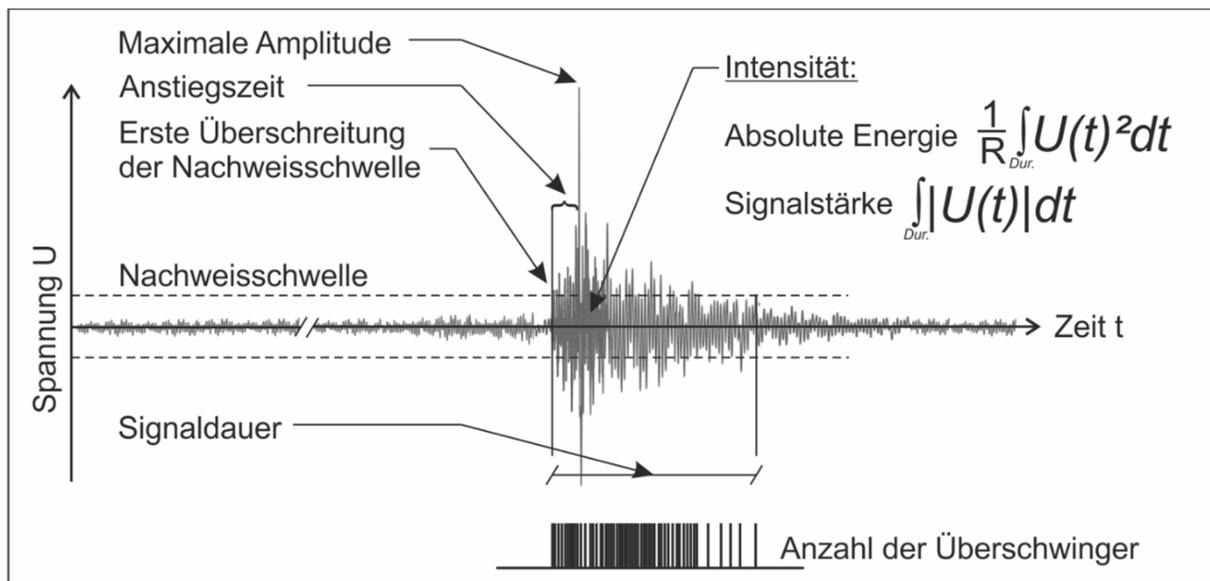
Bei der Entwicklung drahtloser Schallemissions-Systeme sind aufgrund der erzielbaren Datenraten und der vorhandenen Möglichkeiten zur Energieversorgung heute und in naher Zukunft Kompromisse notwendig, welche vom Anwendungsfall abhängige, unterschiedliche Datenreduktion vornehmen. Eine universelle Lösung für alle Anwendungen ist nicht in Sicht. Übertragungsraten von >1 Gbit/s werden voraussichtlich erst mit der nächsten Generation mobiler Datenübertragung (5G-Netz) möglich; aber auch dies ist nicht für alle Anwendungen ausreichend. Für Langzeitüberwachung spielen die Beständigkeit der Sensorkopplung und, je nach den Umgebungsbedingungen am Einsatzort, der Komponenten des Schallemissionssystems ebenfalls eine wichtige Rolle.

Für den Aufwand für Unterhalt und Reparaturen des Überwachungssystems bei Langzeitüberwachung ist eine Nutzungsdauer von Bauwerken von 50 Jahren oder mehr zu berücksichtigen. Da bisher kaum gesicherte, quantitative Daten zur Nutzungsdauer von Sensoren und Wandlern sowie weiteren Komponenten des Überwachungssystems vorliegen, ist dies zurzeit nur mit entsprechender Ferndiagnose, Unterhalt und, falls erforderlich, Reparatur des Mess-Systems erzielbar. Daher müssen diese Aspekte bereits bei der Planung und Auslegung des Mess-Systems berücksichtigt werden, um die Betriebs- und Unterhaltskosten zu optimieren und die verlangte technische Verfügbarkeit des Systems zu garantieren.

## 7 AT-Messgrößen

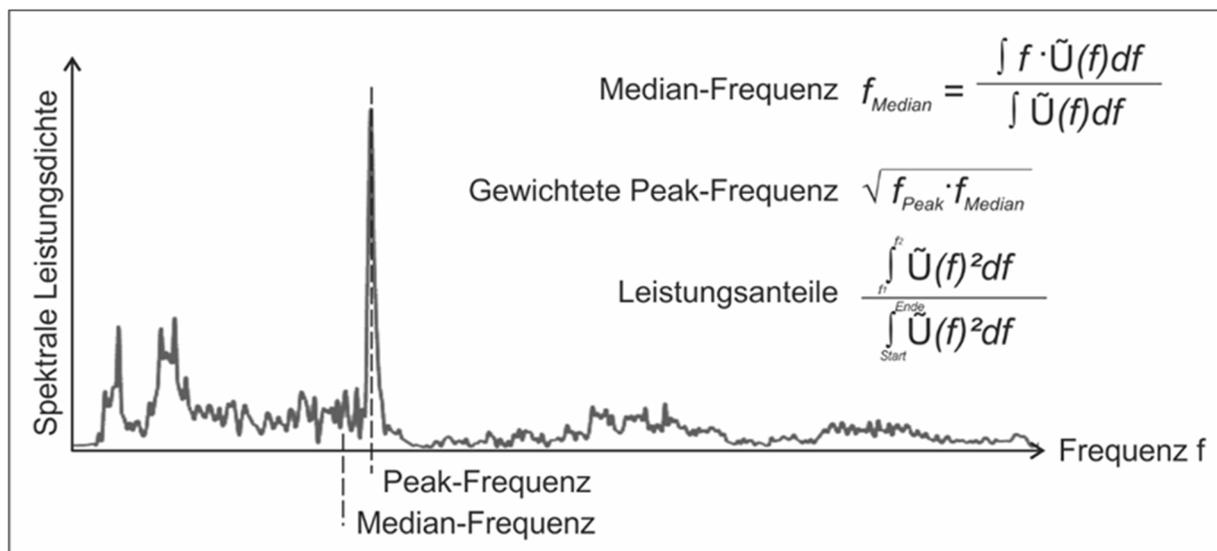
Aus den aufgezeichneten Signalen können verschiedene AT-Messgrößen ermittelt werden. Üblicherweise erlauben die etablierten Programme folgende Berechnungen:

- Ein transientes Schallemissionssignal mit zeitlich erkennbarem Anfang und Ende (sogenannter „Burst“) wird beim ersten Überschreiten der Nachweisschwelle im Messgerät als sogenannter „Hit“ detektiert
- Ankunftszeit = Zeit, wenn ein transientes Signal das erste Mal die Nachweisschwelle übersteigt
- Kumulative Signalanzahl oder Signalarate (Anzahl Signale pro Zeiteinheit)
- Merkmale zur Beschreibung eines detektierten transienten Schallemissionssignals, wie Maximalamplitude, Signalenergie, Anstiegszeit, Signaldauer, Anzahl der Überschwingungen etc. (Abb. 3)
- RMS (Effektivwert) und ASL (mittlere Signalhöhe) zur Kennzeichnung der Intensität von kontinuierlichen AE-Signalen
- Aufzeichnung von Wellenformen (Signalaufzeichnung bei Schwellenüberschreitung) oder kontinuierlich ohne Nachweisschwelle (sogenanntes „Streaming“) sowie Auswertung des Leistungsspektrums hinsichtlich Peakfrequenz, Medianfrequenz, gewichteter Peakfrequenz, Leistungsanteilen in spezifischen Frequenzintervallen etc. (Abb. 4).



**Abb. 3: Parameter zur Beschreibung eines transienten Schallemissionssignals**

(Bildquelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin/DGZfP VNB 254/2022-02-09)



**Abb.4: Frequenzbasierte Parameter zur Beschreibung eines transienten Schallemissionssignals**  
(Bildquelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin/DGZfP VNB 255/2022-02-09)

## 8 Auswertung der AE-Daten

### 8.1 Vorbemerkung

Auf Basis der ermittelten Merkmale können verschiedene Auswertungen vorgenommen werden. Dies kann zur Echtzeitüberwachung bereits während der Prüfung geschehen, bietet jedoch mit umfangreichen Signalanalysemethoden die Möglichkeit auf noch deutlich mehr Optionen nach Abschluss der Prüfung.

### 8.2 In Echtzeit<sup>1 2 3 4</sup>während der Prüfung

- Aktivitäts- und Intensitätsentwicklung der Schallemission als Funktion der Zeit oder externer Parameter, wie Verformung, Kraft, Druck, Temperatur etc.
- Lineare, planare oder 3D-Ortung von Schallemissionsquellen anhand der Laufzeitdifferenz ( $\Delta t$ )
- Zonen-Ortung von Schallemissionsquellen anhand des Erstanschlags der AE-Sensoren
- Signalformen und Frequenzspektren
- Differentielle oder kumulative Verteilungen von Signalmerkmalen als Funktion der Zeit oder externer Parameter
- Korrelationsplots von Signalmerkmalen
- Klassifizierung von Schallemissionssignalen

### 8.3 Mit mehr Rechenzeit nach der Prüfung

- Analyse der aufgezeichneten Signale (z.B. Modalanalyse, Fourier-Transformation, Wavelet-Transformationen)
- Mustererkennungsverfahren
- weitere mathematische Prozeduren zur Signalanalyse, Vergleich mit Simulationen

---

<sup>1</sup> EN 13554 (deutsche Version) Absatz 8.2 bzw. 9.3

<sup>2</sup> EN 14584 (deutsche Version) Absatz 6 bzw. 8.2

<sup>3</sup> EN 15857 (deutsche Version) Absatz 5.5 und 6.7

<sup>4</sup> ASTM E1067 Absatz 7

## **9 Informationen der AT**

Auf Basis der ermittelten Merkmale und z.B. deren zeitlichen Verlauf oder räumlicher Korrelation gibt die AT somit Informationen darüber,

- wann (Zeit, externe Belastungsparameter)
- wie viel (Signalrate, -summe)
- wie intensiv (Maximalamplitude, Signalenergie)
- wo (Ortung)

Schallemissionsquellen auftreten. Unter gewissen Voraussetzungen können auch die Quellenmechanismen der Signale identifiziert werden. Mittels geeigneter Belastung und unter Verwendung von empirischen Kriterien (abgeleitet von einer Vielzahl von anwendungsrelevanten Messdaten) können die Strukturintegrität und darüber hinaus auch die Restnutzungsdauer von Komponenten oder Strukturen abgeschätzt werden.

## 10 Zuverlässigkeit der AT

Mit der AT werden Anzeigen gefunden, die auf einen aktiven Prozess infolge einer geeigneten Anregung zurückzuführen sind. Die richtige Art der Anregung wird durch eine eigens für jede Anwendung erarbeitete Prüftechnik gewährleistet. Dafür werden die möglichen Versagensfälle untersucht und die notwendigen Prüfparameter durch Vorversuche praktisch ermittelt.

Beispielsweise werden Druckgeräte am besten mit dem Betriebsmedium bis zum vorgegebenen Prüfdruck belastet. Die AT wird also in der Regel so durchgeführt, dass die Struktur oder Komponente einer Beanspruchung ausgesetzt wird, die über der maximalen Betriebsbelastung der vorangegangenen Betriebsperiode liegt. Dadurch kann das Prüfergebnis genaue Auskunft zur Betriebssicherheit geben, da das Freisetzen von Schallemission auf mögliche Materialfehler aufmerksam macht. Allerdings ist die Prüfung bei fehlerhafter Durchführung nicht wiederholbar!

Im Fall einer Korrosionsprüfung erfolgt die Anregung durch das korrosive Lagerprodukt selbst.

Werden bei korrekter Installation und Betrieb der AT-Messkette bei entsprechender Belastung keine Anzeigen gefunden, dann liegt zum Prüfzeitpunkt auch keine für die Betriebssicherheit relevante Fehlstelle vor. Dies setzt eine etablierte Prüfanweisung mit entsprechenden Bewertungskriterien voraus.

Gerade dieser Umstand unterscheidet die AT von anderen ZfP Verfahren. Zwar wird auch dort das Bauteil in irgendeiner Form angeregt, diese Anregung steht aber im Allgemeinen mit dem normalen Betriebsverhalten nicht in Zusammenhang.

Die optimale Ausnutzung des AT Verfahrens wird ermöglicht durch

1. Technisch ausgereifte Messsysteme: Die moderne Schallemissionsprüfung stellt gerade an die Messtechnik hohe Anforderungen bezüglich empfindlicher Sensoren, Verstärker mit geringem Rauschen, scharfe Frequenzfilterung und eine hohe Datenerfassungs- sowie Verarbeitungsrate, die zuverlässig eine Echtzeitdarstellung der Messdaten liefert. Darüber hinaus ist auch die Aufzeichnung des zeitabhängigen Signalverlaufes (Wellenform) mit hohen Samplingraten (bis 40 MHz) bereits Stand der Technik. Damit können auch Bewertungskriterien aus dem Frequenzgang der Signale abgeleitet werden.
2. Technisch ausgereifte Prüftechnik: Jede Anwendung der AT auf eine spezielle Struktur basiert auf einer eingehenden Analyse der möglichen Versagensfälle und einer Reihe von daraus abgeleiteten Vorversuchen zur Ermittlung der Prüfparameter. Die aus der Prüfpraxis gewonnene Erfahrung fließt regelmäßig in die Prüftechnik ein. Tausende erfolgreiche Prüfungen an Gasflaschen, Flüssiggaslagerbehältern, Gaslagerbehältern, Reaktoren, Kugeln, Lagertanks und vielen anderen Strukturen und Komponenten wurden in den letzten Jahren durchgeführt.
3. Ausbildung und Zertifizierung von AT-Personal gemäß DIN EN ISO 9712 in drei Stufen (Details unten).

## **11 Ausbildung und Zertifizierung von AT-Personal**

Die Ausbildung und Zertifizierung von AT-Personal erfolgt gemäß DIN EN ISO 9712. Die Anwendung (AT Stufe 1), insbesondere aber die Entwicklung von AT-Verfahren sowie die Interpretation der AT-Ergebnisse und die Formulierung von Bewertungskriterien (AT Stufe 2 und 3) erfordert ein fundiertes Wissen hinsichtlich der physikalischen und messtechnischen Grundlagen. Die Kenntnis der entsprechenden Normen und eine ausreichende praktische Erfahrung sind dabei von grundlegender Bedeutung. Es wurden und werden in Deutschland und Österreich Ausbildungskurse veranstaltet, die mit Qualifizierungsprüfungen gemäß DIN EN ISO 9712 abschließen. Demzufolge sind bereits viele Prüfer der Stufen 1, 2 und 3 in AT qualifiziert und zum Nachweis ihrer Fertigkeiten auch zertifiziert.

## 12 Literaturhinweise

### 12.1 Bücher und wissenschaftliche/technische Zeitschriften

- Nondestructive Testing Handbook, 3rd Ed., Vol. 6, Acoustic Emission Testing, American Society for Nondestructive Testing, 2005
- Acoustic Emission Testing – Basics for Research – Applications in Civil Engineering, C.U. Grosse, M. Ohtsu, D.G. Aggelis, T. Shiotani (Hsg.), Springer, 2022
- Practical Acoustic Emission Testing, Editors: Society for Non-Destructive Inspection, The Japanese (Ed.), Springer 2016 ISBN 978-4-431-55072-3
- Acoustic Emission: Methodology and Application, Authors: Nazarchuk, Zinoviy, Skalskyi, Valentyn, Serhiyenko, Oleh, Springer 2017, ISBN 978-3-319-49350-3
- M.G.R Sause: In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites Theory, Basic Concepts, Methods and Applications, Springer 2016, ISBN 978-3-319-30953-8
- L.M. Rogers: Structural and Engineering Monitoring by Acoustic Emission Methods – Fundamentals and Applications, Lloyd's Register Technical Investigation Department, September 2001
- Journal of Acoustic Emission, Vol.1, 1982 – heute (Acoustic Emission Working Group, USA) <http://www.aewg.org/jaeonline.htm>

### 12.2 DGZfP-Kolloquien „Schallemission“

Eine Liste der Berichtsbände finden Sie auch auf der Web-Seite der DGZfP unter [Publikationen](#).

- BB 32: 9. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsprüfung, 04. - 05. März 1992, Zittau, 321 S.
- BB 42: 10. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 15. - 16. März 1994, Jena, 218 S.
- BB 58: 11. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 06. - 07. März 1997, Jena, 256 S.
- BB 72: 12. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 23. - 24. März 2000, Jena, 231 S.
- BB 78: 13. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 27. - 28. März 2001, Jena, 203 S.
- BB 82-CD: 14. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 27. - 28. März 2003, Berlin
- BB 99-CD: 15. Kolloquium Schallemission - Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 17. - 18. November 2005, Berlin
- BB 105-CD: 16. Kolloquium Schallemission Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. - 13. September 2007, Puchberg/A
- BB 118-CD: 17. Kolloquium Schallemission Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 24. - 25. September 2009, Bad Schandau
- BB 131-CD: 18. Kolloquium Schallemission Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 27. - 28. Oktober 2011, Wetzlar
- BB 142-CD: 19. Kolloquium Schallemission Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. - 13. September 2013, Augsburg

- BB 153-CD: 20. Kolloquium Schallemission Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 18. - 19. Juni 2015, Garmisch-Partenkirchen
- BB 159-CD: 21. Kolloquium Schallemission Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 09. - 10. März 2017, Fulda
- BB 169: 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen, 27. – 28. März 2019, Karlsruhe
- BB 175: SCHALL 21 – Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse und Zustandsüberwachung mit geführten Wellen, 24. – 25. Februar 2021, online

### **12.3 EWGAE – European Working Group on Acoustic Emission / Proceedings**

Webseite: <http://www.ewgae.eu>

### **12.4 IIIAE – International Institute of Innovative Acoustic Emission / Proceedings**

Webseite: <http://iiiae.org>

### **12.5 DGZfP Schulungsunterlagen**

Schulungsunterlagen in Verbindung mit AT-Kursen in Stufe 1, Stufe 2 und Z-AT Stufe 3

### **12.6 Normen (Auswahl)**

DGZfP-Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren (FA SEP):

- Richtlinie SE 02 (Juli 2014): Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor

CEN:

- EN ISO 9712, Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung – Allgemeine Grundlagen
- EN 1330-9, Zerstörungsfreie Prüfung – Terminologie – Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung
- EN 13477-1, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Gerätecharakterisierung – Teil 1: Gerätebeschreibung
- EN 13477-2, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Gerätecharakterisierung – Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen
- EN 13554, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundlagen
- EN 14584, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Untersuchung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung – Planare Ortung von Schallemissionsquellen
- EN 15495, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Untersuchung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung – Zonenortung von Schallemissionsquellen
- EN 12817, Flüssiggas-Geräte und Ausrüstungsteile – Überprüfung und erneute Qualifizierung von Behältern mit Flüssiggas (LPG) mit einem Fassungsraum bis einschließlich 13 m<sup>3</sup>, Anhang C (normativ) Schallemissionsprüfung
- EN 12819, Flüssiggas-Geräte und Ausrüstungsteile – Überprüfung und erneute Qualifizierung von Behältern für Flüssiggas (LPG) mit einem Fassungsraum größer als 13 m<sup>3</sup>, Anhang C (normativ) Schallemissionsprüfung

- EN 13445-5, Unbefeuerte Druckbehälter, Teil 5: Inspektion und Prüfung, Anhang E (informativ) Schallemissionsprüfung
- EN 15856, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze der Schallemissionsprüfung zum Nachweis von Korrosion innerhalb von mit Flüssigkeit gefüllten metallischen Umschließungen
- EN 15857, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Prüfung von faserverstärkten Polymeren – Spezifische Vorgehensweise und allgemeine Bewertungskriterien
- EN ISO 16148, Gasflaschen – Wiederbefüllbare nahtlose Gasflaschen und Großgasflaschen aus Stahl – Schallemissionsprüfung (AT) und nachfolgende Ultraschallprüfung (UT) für die wiederkehrende Inspektion und Prüfung
- EN ISO 18081, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Dichtheitsprüfung mittels Schallemission

## ISO:

- ISO 12713, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Primärkalibrierung von Wandlern
- ISO 12714, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Sekundärkalibrierung von Schallemissionsaufnehmern
- ISO 12716, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Begriffe
- ISO 18249, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Prüfung von faserverstärkten Polymeren – Spezifische Vorgehensweise und allgemeine Bewertungskriterien

## ASME / ASTM:

- ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive Examination, Article 11: Acoustic Emission Examination of Fiber-Reinforced Plastic Vessels / Article 12: Acoustic Emission Examination of Metallic Vessels During Pressure Testing / Article 13: Continuous Acoustic Emission Monitoring
- ASTM E 569 / E 569M Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation
- ASTM E 650 / E 650M: Standard Guide for Mounting Piezoelectric Acoustic Emission Sensors
- ASTM E 749 / E 749M: Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Continuous Welding
- ASTM E 750: Standard Practice for Characterizing Acoustic Emission Instrumentation
- ASTM E 751 / E 751M: Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring During Resistance Welding
- ASTM E 976: Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response
- ASTM E 1067 / E 1067M: Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels
- ASTM E 1118 / E 1118M: Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP)
- ASTM E 1139 / E 1139M Standard Practice for Continuous Monitoring of Acoustic Emission from Metal Pressure Boundaries

- ASTM E 1211 / E 1211M: Standard Practice for Leak Detection and Location Using Surface Mounted Acoustic Emission Sensors
- ASTM E 1419 / E 1419M: Standard Test Method for Examination of Seamless, Gas-Filled, Pressure Vessels Using Acoustic Emission
- ASTM E 1495 / E 1495M: Standard Guide for Acoustic-Ultrasonic Assessment of Composites, Laminates and Bonded Joints
- ASTM E 1736: Standard Practice for Acoustic-Ultrasonic Assessment of Filament-Wound Pressure Vessels
- ASTM E 1888 / E 1888M: Standard Test Method for Acoustic Emission Testing of Pressurized Containers Made of Fiberglass Reinforced Plastic with Balsa Wood Cores
- ASTM E 1930 / E 1930M: Standard Test Method for Examination of Liquid Filled Atmospheric and Low Pressure Metal Storage Tanks Using Acoustic Emission
- ASTM E 1932: Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Small Parts
- ASTM E 2075 / E 2075M: Standard Practice for Verifying the Consistency of AE-Sensor Response Using an Acrylic Rod
- ASTM E 2076 / E 2076M: Standard Test Method for Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Fan Blades Using Acoustic Emission
- ASTM E 2191 / E 2191-M: Standard Test Method for Examination of Gas-Filled Filament-Wound Composite Pressure Vessels Using Acoustic Emission
- ASTM E 2256 Standard Guide for Hydraulic Integrity of New, Repaired, or Reconstructed Above-ground Storage Tank Bottoms for Petroleum Service
- ASTM E 2374: Standard Guide for Acoustic Emission System Performance Verification
- ASTM E 2478: Standard Practice for Determining Damage-Based Design Stress for Fiberglass Reinforced Plastic (FRP) Materials Using Acoustic Emission
- ASTM E 2533: Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications
- ASTM E 2598 / E 2598M: Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Cast Iron Yankee and Steam Heated Paper Dryers
- ASTM E 2661 / E 2661M: Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Plate like and Flat Panel Composite Structures Used in Aerospace Structures
- ASTM E 2863: Standard Practice for Acoustic Emission Examination of Welded Steel Sphere Pressure Vessels Using Thermal Pressurization
- ASTM E 2907 / E 2907M: Standard Practice for Examination of Paper Machine Rolls Using Acoustic Emission from Crack Face Rubbing
- ASTM E 2981: Standard Guide for Nondestructive Testing of the Composite Overwraps in Filament Wound Pressure Vessels Used in Aerospace Applications
- ASTM E 2982: Standard Guide for Nondestructive Testing of Thin-Walled Metallic Liners in Filament-Wound Pressure Vessels Used in Aerospace Applications
- ASTM E 2983: Standard Guide for Application of Acoustic Emission for Structural Health Monitoring

- ASTM E 2984: Standard Practice for Acoustic Emission Examination of High Pressure, Low Carbon, Forged Piping using Controlled Hydrostatic Pressurization
- ASTM E3100 Standard Guide for Acoustic Emission Examination of Concrete Structures
- ASTM F 914 / F 914M: Standard Test Method for Acoustic Emission for Aerial Personnel Devices without Supplemental Load Handling Attachments
- ASTM F 1430 / F 1430M: Standard Test Method for Acoustic Emission Testing of Insulated Aerial Personnel Devices with Supplemental Load Handling Attachments
- ASTM F 1797: Standard Test Method for Acoustic Emission Testing of Insulated Digger Derricks
- ASTM F 2174: Standard Practice for Verifying Acoustic Emission Sensor Response

ASNT:

- CARP Aerospace/Advanced Composites Subcommittee: Guidance for Development of AE Applications on Composites, J. Acoustic Emission, Volume 11, No. 3, C1 – C24
- CARP/SPI: Recommended Practice for Acoustic Emission Evaluation of Fiber Reinforced Plastics (FRP) Tanks and Pressure Vessels, Draft I, October 1999

## **Anhang A - Übersicht industrieller AT-Anwendungen**

### **Korrosionsprüfung**

- Begutachtung des Korrosionszustands von Tankböden

### **Rissprüfung**

- Nachweis von Rissen bei der Abnahmeprüfung bzw. wiederkehrenden Prüfung von Druckgeräten, wie
  - o Druckgasspeicher
  - o Chemiereaktoren
  - o Gasflaschen
  - o Flüssiggasbehälter
  - o Rohrleitungssysteme
  - o Autoklaven
  - o Trommeln zur Papiertrocknung
- Überwachung von technologischen Prozessen
  - o Abnutzung, Rissbildung und Abplatzung an Werkzeugen, während der spanenden Bearbeitung
  - o Überwachung von Stanzmaschinen zum Nachweis von Maschinenschäden (Bruch des Stanzwerkzeugs etc.) bzw. von Formteilschädigungen infolge plastischer Verformung und Rissbildung
  - o Rissbildung bei der Abkühlung spritzgegossener Kunststoff-Formteile
  - o Rissdetektion beim isostatischen Pressen von keramischen Katalysatoren

### **Leckageprüfung**

- Nachweis von Leckagen und Gasverlusten an Ventilen

### **Prüfung von Composite-Strukturen**

- Nachweis von Beschädigungen (Impact-Schäden, Delaminationen, ...) an Composite-Strukturen für
  - o Druckgasspeicher
  - o Luft- und Raumfahrtkomponenten

### **Elektrotechnik / Elektronik**

- Prüfung von Netz-Transformatoren
  - o Teilentladungen
  - o aktive, gaserzeugende Schallemissionsquellen

### **Prüfung von Bauwerken**

- Globale und lokale Überwachung des Risswachstums an Bauwerken
  - o Brücken
  - o Staudämme

**Tribologie**

- Beurteilung von Reibungs- und Verschleißzuständen
  - Diagnose der kontinuierlichen Rotor-Stator-Reibung an Turbineneinheiten
  - Detektion der Schadensentwicklung in dünnen Hartstoffbeschichtungen

**Geologie / Geophysik**

- Aufzeichnung mikroseismischer Aktivitäten zur Beurteilung der Sicherheit von Zwischen- und Endlagerstätten für radioaktive Abfälle

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## AT AN FLACHBODENLAGERTANKS

*P. Tscheliesnig, G. Lackner, TÜV AUSTRIA SERVICES GMBH, Industry & Energy, BU AE & Adv. NDT*

**Stichworte**

Schallemission, Tankprüfung, Tankboden, Korrosion, Leckage

**Ziel und Nutzen der AT**

AT an Flachbodenlagertanks wird angewandt, um Schäden für den Betreiber und für die Umwelt rechtzeitig abwenden zu können. Es gilt mit Hilfe der Tankbodenprüfung eine Aussage zu aktuell ablaufenden Korrosionsprozessen oder bei fortgeschrittener Schädigung zu etwaigen schon vorhandenen Leckagen zu bekommen. Der Tankboden wird mit AT hinsichtlich aktiver Schallemissionsquellen geprüft, die nach Ausfilterung von Störquellen entweder aktiven Korrosionen oder aktiven Leckagen zugeordnet werden.

Auf Basis der festgestellten Korrosionsanzeigen (keine – schwache – mittlere – starke Korrosion) wird eine Empfehlung für die maximale Dauer der folgenden Betriebsperiode im Prüfbericht vermerkt. Bei starken Korrosionsanzeigen bzw. bei Leckageanzeigen ist der Tank ehestmöglich einer inneren Prüfung zu unterziehen.

Wenn keine Leckagequellen gefunden werden, dann wird die Dichtheit des Tankbodens bei der gegebenen Füllhöhe im Prüfbericht bestätigt.

Die Prüfung umfasst den gesamten Innenbereich des Bodens zu 100 % und bei einwandigen Tankböden auch die Bodenunterseite.

**Prüfobjekt**

Der Lagertank wird für den Regelfall einer kombinierten Leckage- und Korrosionsprüfung in voll befülltem Zustand geprüft.



**Abb. 5: Lagertank in der petrochemischen Industrie**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

**Kurzbeschreibung der erforderlichen AT Messtechnik und Prüfparameter**

AE Messsystem: AMSY5 oder AMSY6 (Vallen Systeme GmbH, Icking, Deutschland) mit bis zu 50 Kanälen, die Kanäle sind mit Bandpassfilter im Bereich von 20 bis 50 kHz auszurüsten. Die Prüfung umfasst den gesamten Innenbereich des Bodens zu 100 % und bei einwandigen Tankböden auch die Bodenunterseite.

Sensortype: VS30 V mit 46dB Vorverstärker.

Die AE Sensoren werden außen an der metallischen Tankwand in zwei Reihen montiert. Die erste Sensorreihe in einer Höhe von etwa 1 m über dem Bodenrandblech besteht aus mindestens 6 Stück im Abstand von nicht mehr als 15 m in Umfangsrichtung zu den beiden benachbarten Sensoren. Die Sensoren der zweiten Reihe werden in einer Höhe von etwa 5 m genau über den Sensoren der ersten Reihe montiert. Die zweite Sensorreihe ist notwendig, um AE Quellen am Tankboden von AE Quellen aus weiter oben liegenden Bereichen

(Korrosion am Schwimmdach, Kondensattropfen vom Festdach, ...) unterscheiden zu können.

### Besondere Anforderungen an Prüf- und Umgebungsbedingungen

Der Tank ist vor der Prüfung außer Betrieb zu nehmen (alle Schieber schließen, Rührwerke abschalten, Heizung abschalten, Produktzirkulation abschalten, ...). Zur Beruhigung des Tanks nach der Außerbetriebnahme ist eine Zeitspanne von 24 Std. einzuplanen. Bei kleineren Tankdurchmessern kann das auch deutlich weniger Zeit in Anspruch nehmen.

Arbeiten mit schwerem Gerät in der Umgebung des Tanks können die Messung negativ beeinflussen, ebenso wie direkte Sonneneinstrahlung, starker Wind und Niederschlag.

### Zeitaufwand

Für einen Lagertank mittlerer Größe ( $d = 50\text{ m}$ ) ist für den Aufbau der Messketten, die Prüfung und den Abbau eine Gesamtdauer von 1,5 Tagen einzuplanen. Kleinere Tanks erfordern weniger, größere Tanks erfordern entsprechend mehr Zeitaufwand. Eine einzelne Messung dauert eine Stunde. Üblicherweise werden mehrere Messungen aufgezeichnet und der Tankboden mit Hilfe der besten Messdaten (geringster Anteil an Störgeräuschen) beurteilt.

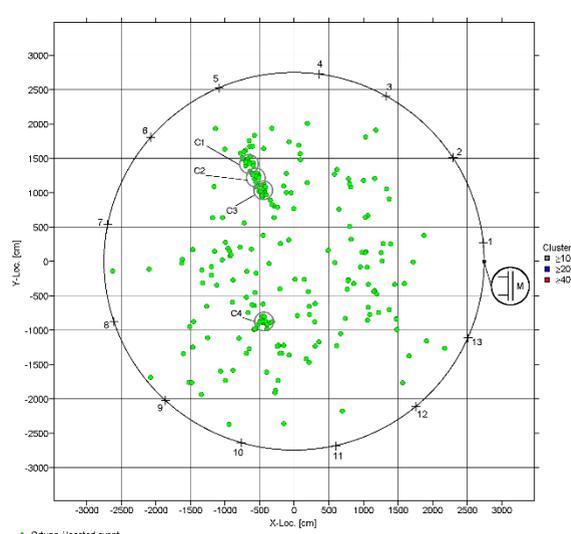
### Prüfergebnis

Das Prüfergebnis besteht in einer Zuordnung des Tankbodens zu einer aus vier möglichen Klassen nach Tabelle 1. Die Klassenzuordnung beinhaltet eine Empfehlung an den Tankbetreiber für die Dauer der nachfolgenden Betriebsperiode, in der aus Sicht der Schallemissionsprüfung keine weiteren Instandhaltungsmaßnahmen für den Tankboden einzuplanen sind.

Nach Beendigung der Prüfung wird dem Auftraggeber eine Vorabbericht ausgehändigt, der eine erste Zuordnung enthält. Diese Vorabwertung kann von der endgültigen Bewertung im Prüfbericht um eine Klasse abweichen. Darüber hinaus enthält der Prüfbericht graphische Darstellungen nach Abbildungen 6 und 7 zu den georteten Schallemissionsquellen am Tankboden.

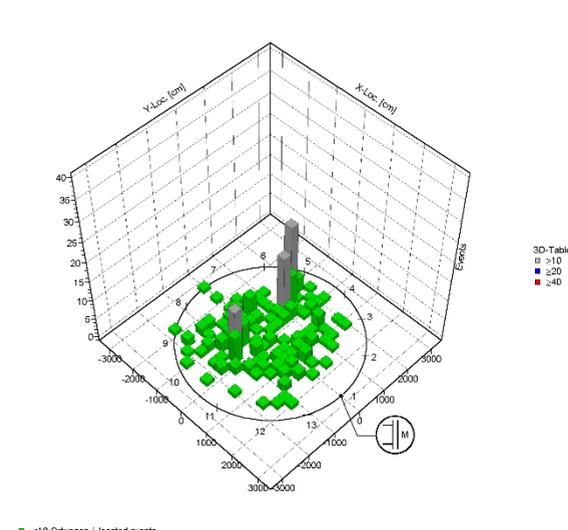
**Tabelle 1:** Klassenzuordnung des Tankbodens

Klasse	Quellenbeschreibung	Empfohlene Betriebsperiode
I	keine aktive Quelle	5 Jahre
II	Korrosion mit geringer Aktivität	3 Jahre
III	Korrosion mit mittlerer Aktivität	1 Jahr
IV	Korrosion mit hoher Aktivität	--
IV	Leckage	--



**Abb. 6:** Beispielhafte 2-d Detailansicht der Quellenortung, Koordinaten (X, Y) in Zentimetern, Ortungen sind durch grüne Kreisscheiben dargestellt, Ortungshäufungen werden durch farbige Kreise als Cluster markiert.

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)



**Abb. 7: Beispielhafte 3-d Übersicht zur Quellenortung, Koordinaten (X, Y) in Zentimetern, Säulen zeigen Ortungen in quadratischen Rasterelementen an.**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

**Kriterien zur Zustandsbewertung**

Die Messung wird in erster Linie hinsichtlich georteter Schallemissionsquellen ausgewertet. Zugrunde gelegt wird dabei die Aktivität (Anzahl der georteten Ereignisse pro Stunde) eines kreisförmigen Flächenelementes mit einem Durchmesser von 5 % des Tankdurchmessers. Die nachfolgende Tabelle enthält das angewandte Schema zur Einteilung der AE Quellen.

**Tabelle 2: Einteilung der AE Quellen (Bezugs-kreisfläche mit  $d = 0,05 \times d_{Tank}$ )**

Ereignisse pro Stunde	Bezeichnung der AE-Quelle
bis 9	keine aktive Quelle
10 bis 19	Quelle mit geringer Aktivität
20 bis 39	Quelle mit mittlerer Aktivität
40 und mehr	Quelle mit hoher Aktivität

Eine endgültige Bewertung des Tankbodens erfolgt erst, nachdem der Quellenmechanismus bestimmt worden ist. Dazu wird eine

Mustererkennung auf die Wellenformen der aufgenommenen AE Signale angewandt, wobei die untersuchten Merkmale aus dem Frequenzgang der Wellenformen abgeleitet werden.

Ein erhöhter Hintergrundgeräuschpegel aufgrund von Umwelteinflüssen kann dazu führen, dass die Nachweisschwelle angehoben werden muss. Dabei ist durch die Maximalamplituden der zu erwartenden Korrosions- und/oder Leckagesignale eine Grenze gesetzt. Innerhalb dieser Grenze ist der Lagertank prüfbar, wobei eine Bewertung mit Klasse I nach Tabelle 1 bei angehobener Schwelle unzulässig ist.

**Literaturhinweise**

1. P. Tscheliesnig and H. Theiretzbacher, "Leakage Testing by Acoustic Emission (AET) on Flat Bottomed Storage Tanks", presented at the 11th World Conference on NDT, 1985, Las Vegas (US)
2. P. Tscheliesnig, G. Lackner, M. Gori, H. Valen, P.J. van de Loo and B. Herrmann, "Inspection of Flat Bottomed Storage Tanks by Acoustical Methods. Classification of Corrosion Related Signals.", presented at the 24th EWGAE conference, 2000, Senlis (F)
3. P. Tscheliesnig, "Synthesis Report of the EC Standards, Measurements and Testing Contract Nr. SMT4-CT97-2177, Inspection of Flat Bottomed Storage Tanks by Acoustical Methods.", 2000, Brussels (B)
4. G. Lackner and P. Tscheliesnig, "Acoustic emission testing on flat bottomed storage tanks: How to condense acquired data to a reliable statement regarding floor condition.", presented at the 25th EWGAE conference, 2002, Prague (CZ)
5. CEN TC 138 WG 7, „EN 15856:2010 - Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Allgemeine Grundsätze der Schallemissionsprüfung zum Nachweis von Korrosion innerhalb von mit Flüssigkeit gefüllten metallischen Umschließungen“
6. ISO TC 135 SC 9, „EN ISO 18081:2016 - Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Dichtheitsprüfung mittels Schallemission“

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## AT-PRÜFUNG AUF INNERE LECKAGE VON VENTILEN

*J. Sell und M. Löhr, GMA Werkstoffprüfung (Teil der MISTRAS Gruppe)*

**Stichworte**

Leckage, Ventile, Verlustkontrollsystem, Schallemissionsanalyse

**Ziel und Nutzen der AT**

Die AT- Prüfung dient der Detektion und Quantifizierung der inneren Leckage von –scheinbar geschlossenen Ventilen. Die Funktion von Absperrarmaturen ist beeinträchtigt, wenn diese nicht mehr 100%ig schließen. Mögliche Gründe sind z.B. eingeklemmte Partikel unter dem Ventilsitz oder Undichtigkeiten infolge von Korrosion und Erosion am Ventil. Die Prüfung erfolgt im eingebauten Zustand. Die turbulente Durchströmung der Leckage führt zu einem hochfrequenten, erhöhten Schallemissionspegel. Dieser Pegel kann durch Korrelation mit der Datenbanksoftware von British Petroleum (BP) einer Leckage-Rate in Liter pro Minute zugeordnet werden. Die verwendete Messtechnik wird als ex-geschütztes, batteriebetriebenes Handgerät unter der Bezeichnung VPAC vertrieben (500 verkaufte Systeme weltweit (Stand: 2001)). Inzwischen ist das VPAC vom Nachfolgemodell VPAC II abgelöst. Das VPAC-System ist einfach und schnell in der Handhabung. Neben einer geplanten Überprüfung von Ventilen ist eine kontinuierliche Fernüberwachung von wichtigen bzw. schwer zugänglichen Absperrarmaturen möglich.

**Prüfobjekt**

sind eingebaute Absperrarmaturen (meist Sicherheitsventile) in gas- und flüssigkeitsführenden Leitungen von Raffinerien, Petrochemiewerken, Chemiewerken, Energieumwandlungsanlagen, Bohrseln etc. Die Praxis zeigt,

dass z.B. etwa 1-10 % der Ventile in einer Raffinerie innere Gasleckage zeigen. Hierbei sind nur etwa 1% der lecken Ventile für etwa 70 % der Gesamtverluste verantwortlich; diese gilt es zu finden. Der gesamte Gasverlust wird zumeist einem Wiedergewinnungssystem zugeführt. Das Gas wird dort gespeichert bzw. als Brennstoff in Gasturbinen verfeuert. Überschüssiges Gas wird in einer zentralen Fackel verbrannt. Mit der AT- Prüfung werden die, für den Gasverlust, verantwortlichen Ventile detektiert und der spezifische Gasverlust quantifiziert. Dadurch wird

- eine kostenoptimierte Wartungsplanung möglich.
- der Verlust von kostbaren Produkten (z.B. Wasserstoffgas) drastisch reduziert.
- das Vermischen unterschiedlicher Produktströme (Cross flow) verhindert.
- die Umweltbelastung minimiert.



**Abb. 8: Prüfung eines Ventils auf innere Leckage mit dem VPAC II- System VPAC II.**

(Bildquelle: GMA Werkstoffprüfung GmbH (Teil der MISTRAS Group), Düsseldorf/DGZfP VNB 236/2022-01-10)

## Prüftechnik und Prüfparameter

Physikalische Quelle der Schallemission ist das wechselnde Druckfeld infolge des turbulenten Durchströmens eines Fluids durch die Leckage(n) im scheinbar geschlossenen Ventil. Hierdurch entsteht ein kontinuierlicher Energieverlust der Strömung, der im Wesentlichen auf Reibung zurückzuführen ist. Der gemessene Schallemissionspegel steht in Abhängigkeit zu diesem Reibungsverlust. Die Korrelation zwischen dem gemessenen Schallemissionspegel und der Leckage-Rate in Liter pro Minute beruht auf einer Datenbasis von British Petroleum. Als Parameter fließen in die Korrelation der Ventiltyp, der Eingangsdurchmesser, die Druckdifferenz und die Dichte des Fluids (optional) ein.

Das System besteht aus dem batteriebetriebenen ex-geschützten Handgerät Modell VPAC II und aus einem ebenfalls ex-geschützten, breitbandigen Schallemissionssensor mit Anti-Vibrationseinrichtung und der von BP lizenzierten Software. Die Hardware des Sensors und des Messgerätes ist für die Anwendung in einer Produktionsanlage optimiert, d.h. es werden weitestgehend Störgeräusche eliminiert. Die Anwendung dieser Prüftechnik ist geeignet für die Qualitätskontrolle bei Inbetriebnahme und zur wiederkehrenden Prüfung von Ventilen.

Der verwendete Sensor wird bei einer Oberflächentemperatur unterhalb von etwa 85° Celsius einfach per Handkopplung auf das Ventilgehäuse gedrückt. Für Ventile mit höheren Temperaturen erfolgt die Ankopplung über einen metallischen Wellenleiter (Temperaturen über 170° Celsius zerstören den Sensor). Der anliegenden Schallemissionspegels wird als ASL -Wert (Average Signal Level) in dB<sub>AE</sub> gemessen. Die Prüfung eines Ventils ohne innere Leckage liefert einen Schallemissionspegel, der dem eines nicht angekoppelten Sensors entspricht (Grundrauschen). Ein erhöhter Schallemissionspegel wird bei der Prüfung eines undichten Ventils festgestellt. Zur Überprüfung, ob der erhöhte Schallemissionspegel

einer inneren Leckage im Ventil zu zuordnen ist, erfolgt eine „Lokalisation“. Mit zunehmendem Abstand von der Leckagequelle im Ventil muss der Schallemissionspegel auf der zu- und abführenden Seite des Ventils immer kleiner werden.

## Prüfaufwand und -ergebnis

Der Zeitaufwand beträgt etwa zwei Minuten. Die Anwendung der Messtechnik ist einfach und erfordert nur eine geringe Qualifizierung des Prüfers (30 Minuten Einweisung). Mit der Messung des Schallemissionspegels (ASL-Wert) ist direkt keine Aussage über die Leckage-Rate im Ventil möglich. Die Bestimmung erfolgt mit der lizenzierten Soft-ware von BP. So zeigt bei gleichen Schallemissionspegel (z.B. 42dB<sub>AE</sub>) ein großes Ventil bei niedrigem anliegendem Differenzdruck eine hohe Leckage-Rate, während ein kleines Ventil bei hohem anliegendem Differenzdruck eine vernachlässigbare kleine Leckage-Rate zeigt.

Mit Hilfe der Leckage-Rate ist eine kostenoptimierte Wartungsplanung möglich. Durch Abwägung der Kosten durch den Produktverlust und der Kosten für die Instandsetzung kann ein undichtes Ventil sofort oder zu einem gewählten Zeitpunkt in Revision gehen.

## Grenzen und Genauigkeit des Prüfverfahrens

Die Anwendung setzt eine turbulente Durchströmung der Leckagestelle(-n) voraus. Als Anhaltspunkt sollte die anliegende Druckdifferenz für Gase mind. 1 bar und für Flüssigkeiten mind. 3 bar betragen.

Es werden Gasleckage-Raten von etwa 1 bis 6.000 Liter pro Minute erfasst, wobei in der Praxis die Genauigkeit der ermittelten Leckage-Rate um den Faktor 2 liegt. Gründe sind z.B. das Vorliegen von Zweiphasengemischen, die variierenden Signalverluste durch unterschiedliche Übertragungswege (Ort der Leckage(n), Ventile unterschiedlicher Hersteller) von der inneren Quelle zum angekoppelten Sensor auf dem Ventilgehäuse. Gegenüber Gasleckagen ist die

Datenbasis für Flüssigleckagen kleiner. Daher ist die entsprechend ermittelte Leckage-Rate unter Umständen stärker fehlerbehaftet.

Alle Quellen turbulenter Strömung (Pumpen, Dampfablassventile, andere undichte Ventile) in der unmittelbaren Messumgebung können zu Störungen führen.

### Literaturhinweise

1. A. Pollock: Leak Detection Using Acoustic Emission, SYS Hsu, Japan Journal of Acoustic Emission, Vol. 1, No. 4, 1982
2. P.T. Cole, M. Hunter: An Acoustic Emission Technique for Detection and Quantifi-

cation of Gas Through Valve Leakage to Reduce Gas Losses from process Plant, presented at the Institute of Petroleum, 4th Oil Loss Conference, 1991

3. R. Watkins: Detection of Gas Leakage to Flare, Trail held at BP Oil, Grange mouth, 1985
4. JN. Lord AE Deisher, RM. Koerner: Attenuation of Elastic Waves in Pipelines as applied to Acoustic Emission Leak Detection, Materials Evaluation, Nov. 1977, pg. 49-545.
5. EN ISO 18081, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Dichtheitsprüfung mittels Schallemission

VPAC II LEAK CALCULATION															Total Loss: <b>\$9,899,841</b>			
COMPANY:			LOCATION:			Date Created: 2/4/2011 3:02 PM			Contact:									
#	Valve ID	Signal Level dB	Up Stream dB	Down Stream dB	Pressure Difference		Inlet Size ins NB	Valve Type	Seat Type	Valve Equation	Time of Test m/d/yy h:mm	Leak Rates			Fluid Density kg/m³	Loss tons/yr	Cost Per Ton \$	Total Loss Per Valve \$/yr
					PSI	Bar						l/min	ft³/hr	gal/hr				
8	1 VALVE27	12			27	1.8	27	Ball	Hard	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	3.4	7.2	54.2	1.30	2.3	\$550.00	\$1,284
9	2 ABC123	23			999	68.0	33	Ball	Soft	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	0.5	1.2	8.7	1.30	0.4	\$6.50	\$2
10	3 GOOB11	21	30	21	118	8.0	9	Other	Hard	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	0.3	0.6	4.6	1.30	0.2	\$122.00	\$24
11	4 888AA	56			45	3.1	15	Other	Hard	GAS LB	2/4/11 3:33 PM	339.1	718.3	5374.8	1.30	231.7	\$420.00	\$97,304
12	5 BOD-708	77			77	5.2	30	Ball	Hard	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	140.3	297.3	2224.4	1.55	114.3	\$420.00	\$48,014
13	6 XYZ-PDQ	32			65	4.4	13	Ball	Hard	GAS LB	2/4/11 3:33 PM	65.2	138.2	1034.0	1.15	39.4	\$420.00	\$16,560
14	7 EAA33	33			1234	83.9	11	Ball	Soft	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	0.1	0.3	2.2	1.15	0.1	\$420.00	\$36
15	8 BIGGIE2	42			1777	120.9	26	Ball	Soft	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	0.8	1.7	13.1	1.15	0.5	\$420.00	\$210
16	9 LRGLIQ	13			54	3.7	11	Ball	Soft	LIQUID LB	2/4/11 3:33 PM	0.5	1.0	7.2	1.15	0.3	\$420.00	\$116
17	10 BVDS	9			1112	75.6	8	Ball	Hard	GAS	2/4/11 3:34 PM	0.3	0.7	5.4	2.20	0.4	\$420.00	\$167
18	11 HMM-99	15			88	6.0	6	Other	Hard	GAS	2/4/11 3:34 PM	1.9	4.0	29.8	2.50	2.5	\$600.00	\$1,484
19	12 HOQ102	99			987	67.1	6	Gate	Hard	GAS	2/4/11 3:34 PM	22260.1	47160.3	352867.5	1.66	19421.9	\$500.00	\$9,710,936
20	13 DANT567	34			42	2.9	3	Gate	Hard	GAS	2/4/11 3:34 PM	32.6	69.1	517.0	1.66	28.5	\$600.00	\$17,073
21	14 --_OK	22			48	3.3	8	Other	Hard	GAS	2/4/11 3:35 PM	6.1	12.9	96.4	1.66	5.3	\$600.00	\$3,183
22	15 9874A	56			65	4.4	4	Other	Hard	LIQUID	2/4/11 3:35 PM	4.4	9.2	69.1	2.07	4.7	\$430.00	\$2,041
23	16 EGGY-32	65			39	2.7	3	Gate	Hard	LIQUID	2/4/11 3:35 PM	11.0	23.3	174.2	1.11	6.4	\$220.00	\$1,410

**Abb. 9: Excel-Programm zur Errechnung der Leckage-Rate und des Verlustes für Gase. Neben der Angabe des Schallemissionspegels in  $dB_{AE}$  sind nähere Angaben zu dem geprüften Ventil (Typ, Eingangsdurchmesser), dem anliegenden Differenzdruck und der Gasdichte (optional) notwendig.**

(Bildquelle: GMA Werkstoffprüfung GmbH (Teil der MISTRAS Group), Düsseldorf/DGZfP VNB 236/2022-01-10)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## AT AN TROCKENZYLINDER IN PAPIERMASCHINEN

G. Schauritsch, TÜV AUSTRIA SERVICES GMBH, Industry & Energy, BU AE & Adv. NDT

**Stichworte**

Schallemission, Trockenzylinder, Papiermaschine, Grauguss, Stahlguss, wiederkehrende Untersuchung

**Ziel und Nutzen der AT**

AT an Trockenzylindern wird als Teil der wiederkehrenden Untersuchung (Ersatz der Innenuntersuchung und Wasserdruckprobe) angewandt und ermöglicht eine integrale Zustandsbeurteilung des gesamten Zylinders (zylindrischer Mantelteil, Böden mit Wellenzapfen) im Hinblick auf das Vorliegen möglicher Fehlstellen (Risse, Gussfehler, Leckagen, Dampferosionen). Ein aufwändiger Ausbau des Trockenzylinders aus der Papiermaschine ist hierbei nicht erforderlich.

Die AT ist somit eine aussagekräftige, praxisorientierte und wirtschaftliche Lösung für die wiederkehrenden Überprüfungen an derartigen Zylindern.

**Prüfobjekt**

Bei Trockenzylindern handelt es sich um rotierende, mit Dampf betriebene Druckgeräte aus Grau- bzw. Stahlguss, die in großer Stückzahl in einer Papiermaschine eingebaut sind und den Trocknungsprozess des Papiers während der Produktion maßgeblich beeinflussen bzw. steuern. Sie werden aufgrund des aufgetragenen Dampfdruckes und der hohen Rotationsgeschwindigkeiten starken Belastungen ausgesetzt.

Darüber hinaus werden moderne Papiermaschinen heute, bezogen auf ein Kalenderjahr, mit einem Auslastungsgrad von 95 % und mehr

betrieben. Dies bedeutet, dass Maschinenstillstände selten vorkommen und durch entsprechende Vorausplanung zeitlich optimiert werden müssen. Durchaus üblich ist es, dass im Zuge derartiger Stillstände, neben der normalen Servicetätigkeit an der Maschine, gleichzeitig Umbauarbeiten zur weiteren Qualitäts- bzw. Produktivitätssteigerung der Maschine erfolgen.



**Abb. 10: Trockenzylinder in einer Trockengruppe einer Papiermaschine**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

**Kurzbeschreibung der erforderlichen AT-Messtechnik und Prüfparameter**

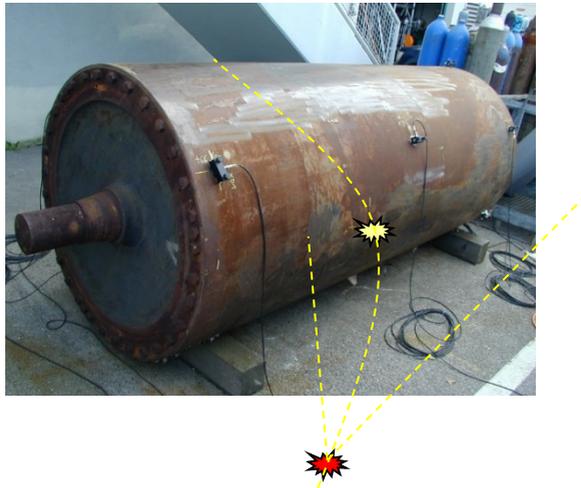
Mehrkanaliges AE-Messsystem AMSY5 (Vallen Systeme GmbH, Icking, Deutschland).

Sensoren der Type VS150-RIC mit integriertem Vorverstärker.

In Abhängigkeit der Zylinderlänge werden mehrere Schallsensoren entlang der Zylindererzeugenden linear am Prüfling appliziert. Die Applikation erfolgt im Normalfall ohne Vorbehand-

lung der im Betrieb blanken Applikationsflächen mittels Magnethalterungen, die bei Bedarf auch eine Überkopfmontage ermöglichen.

Die Zustandsbeurteilung erfolgt im Zuge einer kontinuierlichen Drucksteigerung mit Pressluft ausgehend vom drucklosen Zustand bis zum 1,1fachen höchsten Betriebsdruck des Druckgerätes. Die Drucksteigerungsrate während der Messung wird mit maximal 0,2 bar/min begrenzt.



**Abb. 11: lineare Anordnung der Sensoren und Bereichszuordnung durch  $\Delta t$ -Messung**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

### Besondere Anforderungen an Prüf- und Umgebungsbedingungen

Die zu prüfenden Trockenzylinder sind vor der Prüfung außer Betrieb zu nehmen (Druck- und Temperaturabbau). Die Prüfung kann ohne Ausbau des Trockenzylinders aus der Papiermaschine erfolgen. Aus sicherheitstechnischen Überlegungen sowie zur Reduktion etwaiger Störeinflüsse sind während der Prüfung keine weiteren Arbeiten innerhalb eines festzulegenden Schutzbereiches im Umkreis des Prüflings zulässig (Absperrung erforderlich).

Die Druckaufbringung erfolgt üblicher Weise über die Dampfzuführung aus dem anlageninternen Pressluftnetz. Entsprechende Drucksteigerungs- und Entlastungseinrichtungen zu Steuerung des Belastungsregimes sind vorzusehen.

### Zeitaufwand

Üblicher Weise können zwei Zylinder gleichzeitig druckbeaufschlagt und geprüft werden. Als Zeitrahmen hierfür (Aufrüstung, Kalibrierung, Prüfdurchführung, Erstbeurteilung, Ab- bzw. Umrüsten) sind in Abhängigkeit der Zylindergröße 3 bis 4 Stunden anzusetzen.

### Prüfergebnis

Treten während der Messung akustisch aktive Quellen auf, so können durch Messung der Ankunftszeitunterschiede zwischen den Sensoren ( $\Delta t$ -Messung) Bereiche der Druckgerätewandung mit akustischer Aktivität von solchen die sich akustisch neutral verhalten getrennt werden. (siehe Abbildung 11)

Bei entsprechender Anzahl und Anordnung der Sensoren wird somit die gesamte drucktragende Wandung des Trockenzylinders überwacht und beurteilt. Gleichzeitig ergeben die Resultate der Bereichsortung Hinweise auf die örtliche Lage möglicher Fehlstellen, die sodann mit herkömmlichen zf-Prüfverfahren gezielt nachuntersucht werden können. Die Echtzeitkontrolle sowie die Überwachung der Abbruchkriterien erfolgt in Anlehnung an die Maßgaben der EN 14584.

### Kriterien zur Zustandsbewertung

Maßgeblich für die Zustandsbewertung der Trockenzylinder ist das jeweilige Ausmaß der Aktivität/Intensität innerhalb eines beliebigen Zylinderabschnittes von 10 cm Länge (Cluster). Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt direkt vor Ort nach Beendigung der Druckprüfung. Hierzu werden die gespeicherten Messdaten im Hinblick auf ihre clusterbezogene Aktivitäts-/Intensitätsverteilung über die Zylinderlänge analysiert und mittels eines eigens hierfür entwickelten clusterbezogenen Bewertungsparameters (**Cluster Evaluation Faktor**, kurz **CEF**) beurteilt. Je nach Klassifizierung der Quelle kann die Nachuntersuchung mit anderen zf-Prüfverfahren (z.B. visuelle Besichtigung, Ultraschallprüfung, Magnetpulverprüfung) sofort veranlasst werden (siehe Tabelle 1). In einem zweiten Schritt werden nach Beendigung des Prüfeinsatzes die aufgezeichneten Daten im Labor nochmals analysiert, wobei zusätzlich die gleichzeitig

über Transientenrekorder aufgezeichneten Wellenformdaten mit in die Analyse einfließen. Eine endgültige Bewertung aus beiden Analysen wird in einem entsprechenden Prüfprotokoll für jeden Zylinder zusammengefasst und dokumentiert.

Das Prüfprotokoll dient als Grundlage für die Eintragung der Revisionsbemerkungen in die Druckgerätedokumentation durch die akkreditierte Kesselprüfstelle.

#### Literaturhinweise

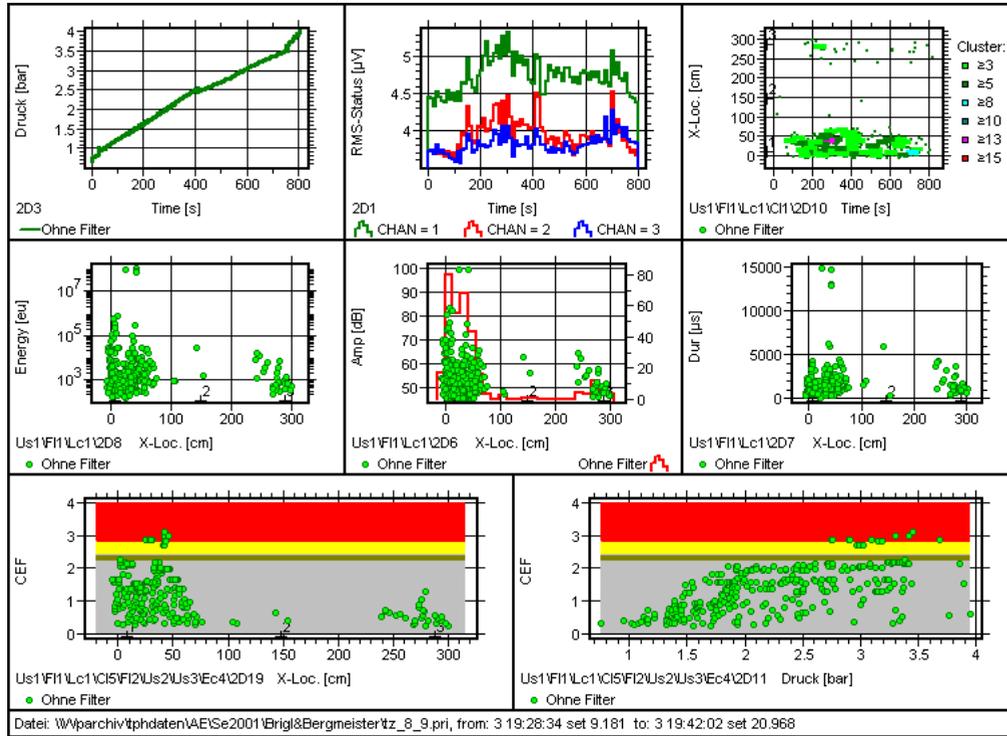
1. G. Schauritsch, „Einsatz der Schallemissionsprüfung bei der wiederkehrenden Untersuchung an Kühl- und Trockenzylindern in Papiermaschinen – Erfahrungsbericht“, präsentiert

anlässlich der DACH-Jahrestagung 2004 in Salzburg

2. P. Tscheliesnig, G. Schauritsch, „Applikation eines automatischen AT-Auswertesystems bei der Prüfung schwer zugänglicher Strukturen“, präsentiert anlässlich der DACH-Jahrestagung 2007 in Fürth
3. TAPPI TI Sheet 0402-16, „Guidelines for the Safe Operation of Steam Heated Paper Machine Dryers“
4. EN 13554, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemission – Allgemeine Grundlagen EN 14584, Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemission – Untersuchung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung – Planare Ortung von Schallemissionsquellen

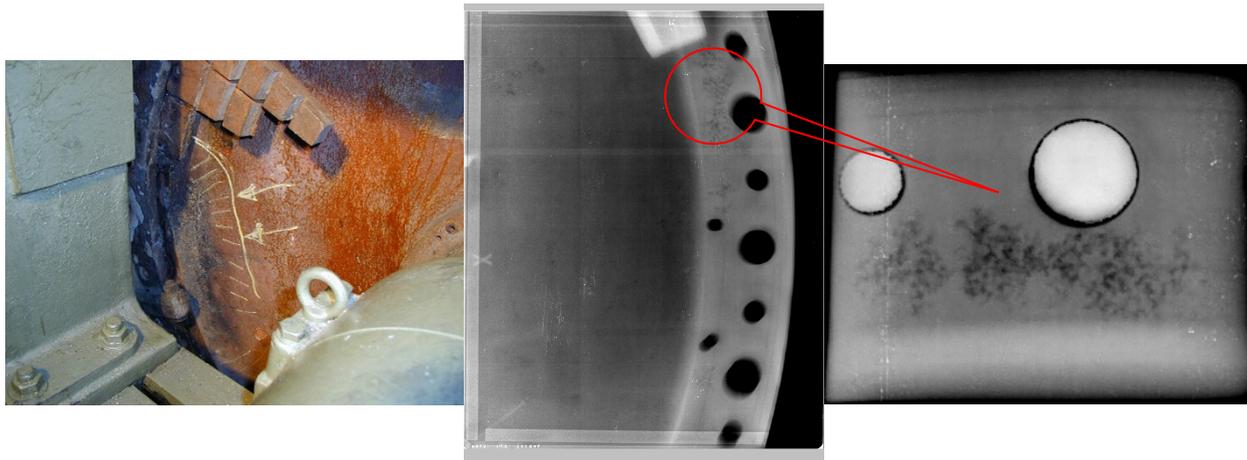
**Tabelle 1:** Klassenzuordnung des Trockenzylinders

Klasse	Bewertung (CEF)	Quellenbeschreibung	Maßnahmen
A	$\leq 2,2$	keine aktive Quelle	Weiterer Betrieb ohne Einschränkung
B	$2,2 < \text{CEF} \leq 2,8$	aktive Quelle	Weiterer uneingeschränkter Betrieb nur nach negativer Befundung mit anderen zf-Prüfverfahren; Weiterführung der Drucksteigerung zulässig
C	$> 2,8$	kritisch aktive Quelle	Abbruch der Drucksteigerung; Nachprüfung mit anderen zf-Prüfverfahren; Fallentscheidung anhand der festgestellten Ergebnisse.



**Abb. 12: Auswertung eines Klasse C beurteilten Trockenzylinders**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)



**Abb. 13: Trockenzylinder Klasse C; massive Gussfehler im triebseitigen Zylinderboden**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## AT AN FLÜSSIGGASLAGERBEHÄLTERN

*G. Schauritsch, TÜV AUSTRIA SERVICES GMBH, Industry & Energy, BU AE & Adv. NDT*

**Stichworte**

Schallemission, Flüssiggas, Behälter, wiederkehrende Untersuchung

**Ziel und Nutzen der AT**

AT an Flüssiggaslagerbehältern wird als Teil der wiederkehrenden Untersuchung (Ersatz der Innenuntersuchung und Wasserdruckprobe) angewandt und ermöglicht eine integrale Zustandsbeurteilung des gesamten Behälters sowie der Behälterausrüstung (drucktragende Wandungsteile, Verschlüsse, Armaturen) im Hinblick auf das Vorliegen möglicher Fehlstellen (Risse, Korrosionen, Leckagen). Insbesondere bei erdvergrabenen Behältern stellt die Schallemissionsprüfung derzeit die einzig aussagekräftige und ökonomisch vertretbare Möglichkeit zur strukturellen Gesamtbewertung des Behälters dar. Die Prüfung erfolgt im Zuge einer kontinuierlichen Drucksteigerung im Behälter mit dem Betriebsmedium selbst. Eine aufwändige Entleerung des Behälters mit anschließender Wasserfüllung für die Druckprobe ist somit nicht erforderlich und schützt so in hohem Maße die Umwelt durch Einsparung wertvoller Ressourcen. Auch Folgeschäden, wie Korrosionen und Reglerversetzungen sowie schwere Unfälle auf Grund von Behälterbegehungen ohne ausreichende Atemluft können hierdurch vermieden werden.

Die AT ist somit eine aussagekräftige, praxisorientierte, umweltschonende, die Sicherheit fördernde und wirtschaftliche Lösung für die wiederkehrenden Überprüfungen an derartigen Behältern.

**Prüfobjekt**

Bei Flüssiggaslagerbehältern handelt es sich um Druckbehälter mit einem üblichen Fassungsvermögen bis einschließlich 13 m<sup>3</sup>, die auf Liegenschaften im privaten als auch gewerblichen Bereich zur Lagerung von Flüssiggas (Propan bzw. Butan) zum Zwecke der Energieversorgung aufgestellt sind. Es handelt sich hierbei um Behälter einfacher Geometrie (zylindrischer Mantel mit gewölbten Böden oder Kugelform) aus üblichen Kesselbaustählen der Werkstoffgruppen 1.1, 1.2 und 1.3 nach EN 13445-Teil 2.

Die Behälter werden teil- bzw. erdvergraben oder oberirdisch aufgestellt und verfügen über einen passiven als auch aktiven Korrosionsschutz (Beschichtung und/oder kathodische Korrosionsschutzanlage). Durch die exponierte Aufstellung im Freien sind die Behälter über lange Jahre den Einflüssen von Wind und Wetter und insbesondere im eingegrabenen Zustand den Einflüssen durch anstehendes Erdreich ausgesetzt. Auch die vorhandenen Behälterverschlüsse und Armaturen zeigen Verschleißerscheinungen, die in der Folge zu gefährlichen Gasleckagen führen können.

**Kurzbeschreibung der erforderlichen AT-Messtechnik und Prüfparameter**

Mehrkanaliges AE-Messsystem AMSY5 (Vallen Systeme GmbH, Icking, Deutschland).

Sensoren der Type VS150-RIC oder VS75-SIC mit integriertem Vorverstärker.

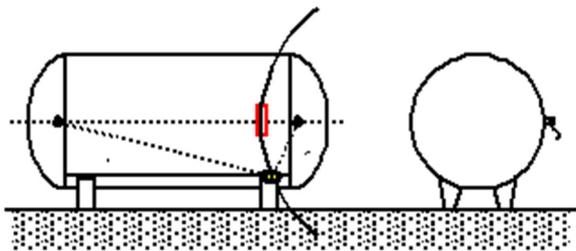
In Abhängigkeit der Bauform, der Behältergröße und der Zugänglichkeit zur metallischen Behälteroberfläche werden mindestens zwei

Schallsensoren appliziert und ein lineares Ortungssystem ( $\Delta t$ -Korrelation) gebildet.



**Abb. 14: Flüssiggaslagerbehälter oberirdisch aufgestellt oder eingegraben**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)



**Abb. 15: Lineare Anordnung der Sensoren und Bereichszuordnung durch  $\Delta t$ -Messung**

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

Die Applikation der Sensoren erfolgt im Normalfall nur durch Reinigung der Applikationsstellen direkt auf der vorhandenen Behälterbeschichtung (Farbanstrich bzw. Epoxidharzbeschichtung).

Die Zustandsbeurteilung erfolgt im Zuge einer kontinuierlichen Drucksteigerung mit dem

Betriebsmedium selbst ausgehend vom vorhandenen, temperaturabhängigen Fülldruck bis zum max. 1,1fachen höchsten Betriebsdruck des Druckgerätes. Die Drucksteigerungsrate während der Messung wird mit max. 0,3 bar/min. begrenzt.

Für die Drucksteigerung sind hierfür eigens entwickelte Druckerhöhungseinrichtungen erforderlich, die eine kontinuierliche Drucksteigerung mit dem Betriebsmedium gefahrlos ermöglichen.

### **Besondere Anforderungen an Prüf- und Umgebungsbedingungen**

Die zu prüfenden Flüssiggasbehälter bleiben während der Prüfung befüllt. Über die üblichen Armaturen (Betankungsventil, Flüssigentnahmeventil) wird der Prüfling mittels geeigneter Flüssiggasschläuche mit der Druckaufbringungseinheit verbunden. Die Drucksteigerung erfolgt entweder über einen geeigneten Gaskompressor oder mittels Wasser beheizten Flüssigverdampfer. Die Gaszuführung erlaubt eine stufenlose Steuerung der Drucksteigerungsrate, sodass eine möglichst gleichmäßige und störungsfreie Belastungssteigerung über die gesamte Prüfzeit gewährleistet werden kann. Da die erforderlichen Arbeiten zum Teil innerhalb der Schutzzone des Behälters stattfinden, sind die sicherheitstechnischen Erfordernisse für Arbeiten in Ex-Zonen zwingend einzuhalten. Gleiches gilt für die eingesetzten Mess- und Arbeitsmittel.

Da bei Außentemperaturen unter  $+5^{\circ}\text{C}$  mit erheblichen Störeinflüssen durch Gasrückverflüssigung zu rechnen ist, ist der Verfahrenseinsatz auf die warmen Jahreszeiten (April – November) beschränkt. Sonstige negative Einflüsse durch Wind und Wetter können durch Verwendung von Abdeckmatten gemindert, jedoch nicht vollständig vermieden werden. In solchen Fällen ist die Prüfung abzubrechen.

### **Zeitaufwand**

Als Zeitrahmen für die Installation des Messsystems und der Druckaufbringungseinheit, Kalibrierung, Prüfdurchführung, Erstbeurteilung und Rückbau sind in Abhängigkeit der Behältergröße 1,5 bis 2,5 Stunden anzusetzen. Durch

logistische Planung der Prüfrouten können bis zu 5 Behälter/Einsatztag geprüft werden.

### Prüfergebnis

Treten während der Messung akustisch aktive Quellen auf, so können durch Messung der Ankunftszeitunterschiede zwischen den Sensoren ( $\Delta t$ -Messung) Bereiche der Druckgeräthewandung mit akustischer Aktivität von solchen die sich akustisch neutral verhalten getrennt werden (siehe Abbildung 15). Bei unterirdisch verlegten Behältern ermöglicht diese Korrelationstechnik auf Grund der sehr eingeschränkten Zugänglichkeit im Domschachtbereich nur sehr ungenaue Angaben zu definierten Quellorten. Eine qualitative Bewertung ist jedoch uneingeschränkt möglich.

Werden während der Messung die festgelegten Alarm-/Abbruchkriterien erreicht bzw. überschritten, so sind die damit verbundenen und festgelegten Maßnahmen zu setzen (siehe Anlage 1).

### Kriterien zur Zustandsbewertung

Maßgeblich für die Zustandsbewertung der Druckgeräte ist das jeweilige Ausmaß der Aktivität/Intensität innerhalb eines beliebigen Abschnittes von 10 cm Länge (Cluster). Hierzu wird bereits online während der Drucksteigerung die clusterbezogene Aktivitäts-/Intensitätsverteilung laufend analysiert und mittels eines eigens hierfür entwickelten clusterbezogenen Bewertungsparameters (**Cluster Evaluation Faktor**, kurz **CEF**) beurteilt. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt direkt vor Ort nach Beendigung der Druckprüfung und einer anschließenden Druckhaltephase.

Je nach Klassifizierung der Quelle kann die Nachuntersuchung mit anderen ZF-Prüfverfahren (z.B. visuelle Besichtigung, Ultraschallprüfung, Magnetpulverprüfung) sofort veranlasst werden (siehe Tabelle 1). In einem zweiten Schritt werden nach Beendigung des Prüfeinsatzes die aufgezeichneten Daten im Labor nochmals analysiert, wobei zusätzlich die

gleichzeitig über Transientenrekorder aufgezeichneten Wellenformdaten mit in die Analyse einfließen. Eine endgültige Bewertung aus beiden Analysen wird in einem entsprechenden Prüfprotokoll für jeden Behälter zusammengefasst und dokumentiert.

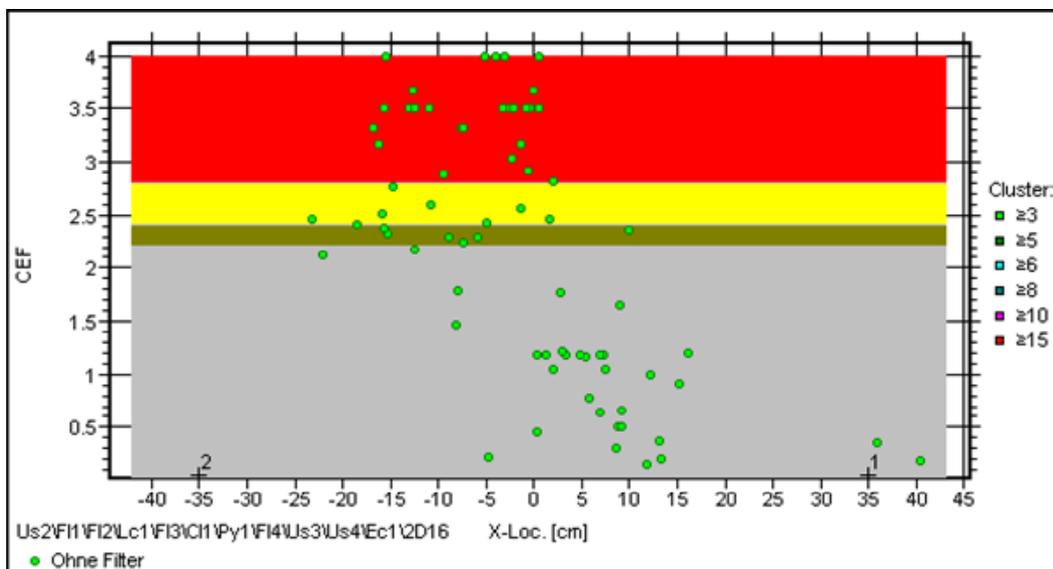
Das Prüfprotokoll dient als Grundlage für die Eintragung der Revisionsbemerkungen in die Druckgerätedokumentation durch die akkreditierte Kesselprüfstelle.

### Literaturhinweise

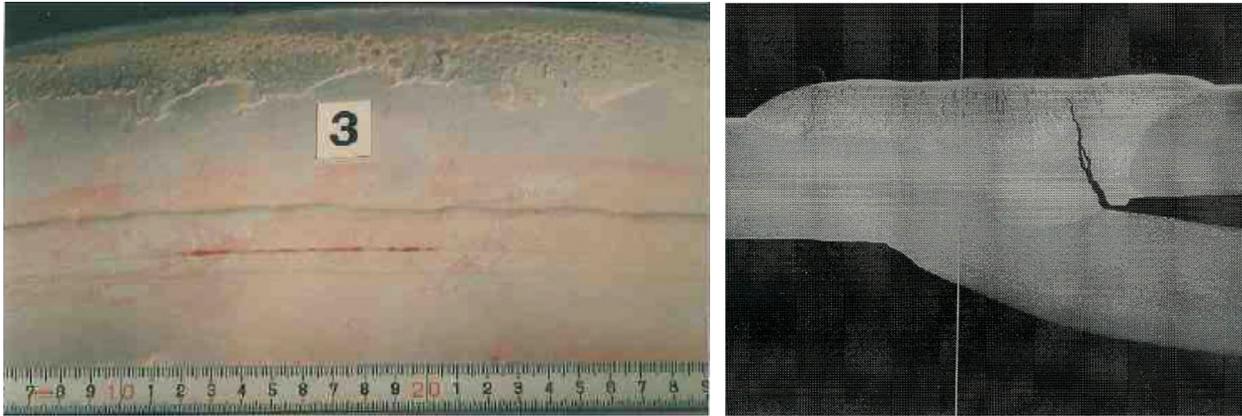
1. P. Tscheliesnig, G. Schauritsch, G. Krenn, „Die Anwendung der Schallemissionsprüfung bei der wiederkehrenden Untersuchung von Flüssiggasbehälter“, präsentiert anlässlich des 9. Kolloquium Schallemission der DGZfP in Zittau, 1992
2. G. Schauritsch, P. Tscheliesnig, „Die Schallemissionsprüfung als integrales Prüfverfahren für die Beurteilung von Flüssiggaslagerbehältern – Erfahrungsbericht“, präsentiert anlässlich der DACH-Jahrestagung 2000 in Innsbruck
3. P. Tscheliesnig, G. Schauritsch, „Applikation eines automatischen AT-Auswertesystems bei der Prüfung schwer zugänglicher Strukturen“, präsentiert anlässlich der DACH-Jahrestagung 2007 in Fürth
4. G. Schauritsch, „Schallemissionsprüfung an einem rissbehafteten Flüssiggaslagerbehälter - Ergebnisse zum Nachweis der Verfahrenseignung“, präsentiert anlässlich des 18. Kolloquium Schallemission der DGZfP in Wetzlar, 2011
5. EN 12817, Flüssiggas-Geräte und Ausrüstungsteile – Überprüfung und erneute Qualifizierung von Behältern mit Flüssiggas (LPG) mit einem Fassungsraum bis einschließlich 13 m<sup>3</sup>, Anhang C (normativ) Schallemissionsprüfung
6. EN 12819, Flüssiggas-Geräte und Ausrüstungsteile – Überprüfung und erneute Qualifizierung von Behältern für Flüssiggas (LPG) mit einem Fassungsraum größer als 13 m<sup>3</sup>, Anhang C (normativ) Schallemissionsprüfung

**Tabelle 1:** Klassenzuordnung der Flüssiggaslagerbehälter

Klasse	Bewertung (CEF)	Quellenbeschreibung	Maßnahmen
A	$\leq 2,2$	keine aktive Quelle	Weiterer Betrieb ohne Einschränkung
A/B	$2,2 < \text{CEF} \leq 2,4$	Grenzfall	Endgültige Bewertung zu Klasse A oder B anhand der Aktivitäts-/Intensitätsverläufe sowie der Wellenformdaten
B	$2,4 < \text{CEF} \leq 2,8$	aktive Quelle	Weiterer uneingeschränkter Betrieb nur nach negativer Befundung mit anderen zf-Prüfverfahren; Weiterführung der Drucksteigerung zulässig
C	$> 2,8$	kritisch aktive Quelle	Abbruch der Drucksteigerung; Nachprüfung mit anderen zf-Prüfverfahren; Fallentscheidung anhand der festgestellten Ergebnisse.

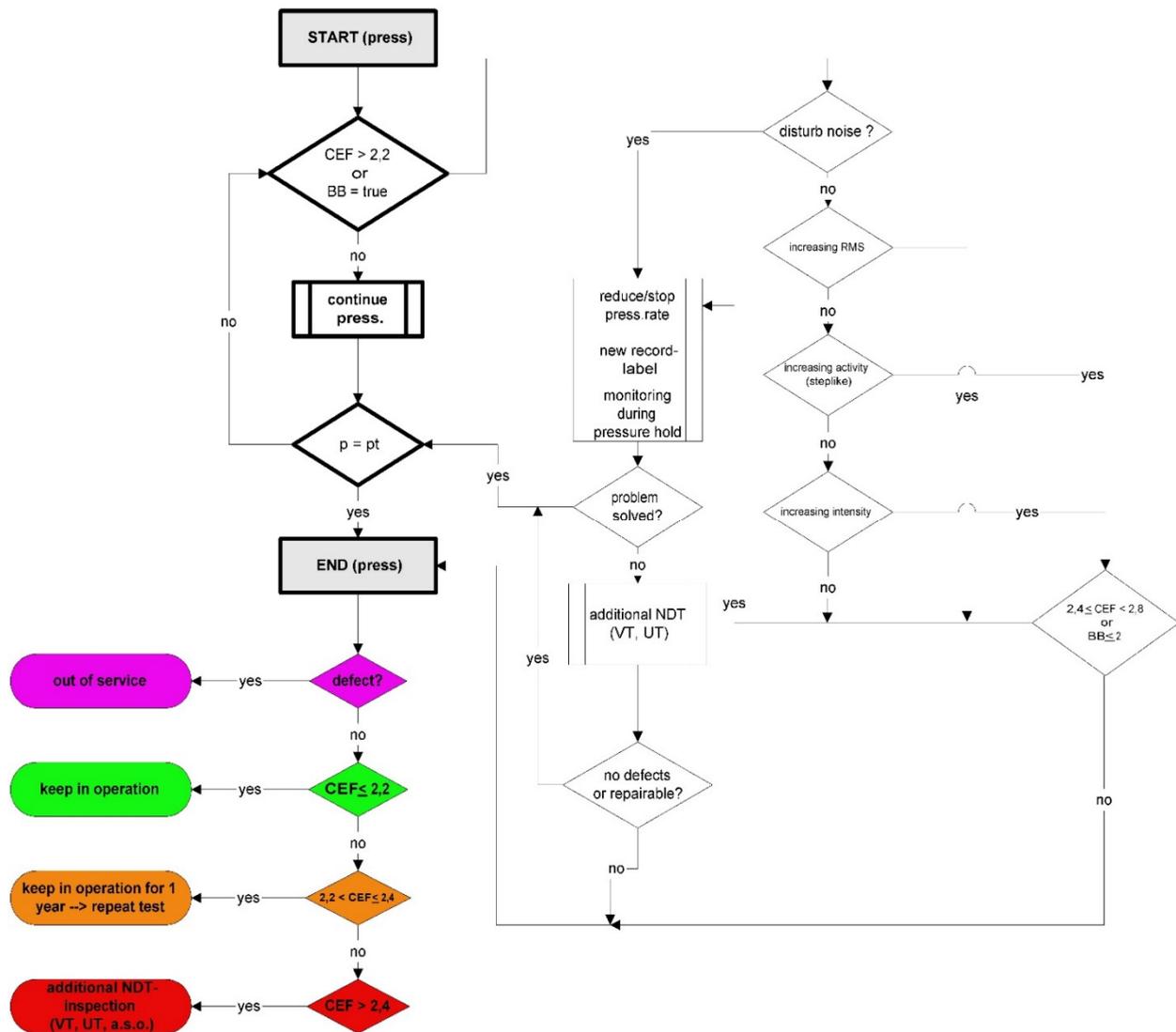
**Abb. 16:** Auswertung eines mit Klasse C beurteilten Flüssiggasbehälters

(Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)



**Abb. 17: Flüssiggasbehälter Klasse C; Riss in der Rundnaht mit stark ausgeprägtem Rissfortschritt**  
 (Bildquelle: TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH, Wien/DGZfP VNB 235/2022-01-10)

**Anlage 1:**



**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## AT-ÜBERWACHUNG VON SPANNDRAHTBRÜCHEN AN BRÜCKEN UND TUNNELN

*H. Schubert und M. Löhr, GMA Werkstoffprüfung (Teil der MISTRAS Gruppe)*

**Stichworte**

Spanndraht, Spannglied, Bruch, Überwachung, Brücken, Tunnel, Schallemissionsanalyse

**Ziel und Nutzen der AT**

Das Versagen von Spanndrähten in nachträglich gespannten Spanngliedern in längs- bzw. quervorgespannten Spannbetonbauwerken ist ein Schaden, der die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit erheblich beeinträchtigen kann. So erfolgte im Jahr 1985 schlagartig der Einsturz der nur 30 Jahre alten Brücke von Ynys-y-Gwas in Südwales/ Großbritannien. Ursache war u.a. Korrosion an den Spanndrähten, die z.B. infolge mangelnder oder gar fehlender Verpressung der sie führenden Hüllrohre auftreten kann.

Die Schallemissionsanalyse (AT) ist in der Lage als Echtzeitverfahren das Reißen von einzelnen Spanndrähten zu detektieren und zu lokalisieren. Der vorhandene Schädigungszustand kann in der Regel jedoch nicht direkt erfasst werden. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen zum Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion und Ortung von Spanndrahtbrüchen finden sich bereits um die Jahrtausendwende, siehe Literaturliste: 1-3. MISTRAS hat im Jahr 2001/2002 in Japan eine Validierung mit der Autobahnbehörde „Japanese Public Highways Corporation“ durchgeführt, in der nachgewiesen wurde, dass die Schallemissionsanalyse in der Lage ist, die Spanndrahtbrüche zu detektieren. Im Jahr 2006 erscheint die Richtlinie der britischen Autobahnbehörde (British Highway Agency), in der die Schallemissionsanalyse zur Detektion von Spanndrahtbrüchen empfohlen wird, siehe Literaturliste: 4.

*Fallbeispiel:* MISTRAS führt seit dem Jahr 2011 eine Dauerüberwachung an der gesamten A4-Überführung (Länge: 600 m) in London (Hammersmith Flyover) / Großbritannien durch (siehe Abb. 18). Es erfolgt die Detektion und Ortung von Spanndrahtbrüchen durch die Schallemissionsanalyse. Weitere Sensorinformationen (wie Dehnung, Temperatur, etc.) werden ebenfalls erfasst, um die Trag- und Gebrauchsfähigkeit der Überführung im Rahmen eines "Structural Health Monitoring (SHM)" Konzepts zu beurteilen.

**Prüfobjekt**

sind Spanndrähte in nachträglich verspannten Strukturteilen aus Beton, wie bei Spannbetonbrücken und Tunneln. Das Versagen tritt vielfach als Folge von Korrosion an den Spanndrähten auf, z.B. durch

1. eindringende Chloride durch Tausalze
2. auftretende Karbonisierung des Betons, die bei Erreichen des vergüteten Stahls, dessen Passivierungsschicht zerstört.
3. durch Einsatz von spannungsrissempfindlichen Stählen (Handelsnamen Neptun und Sigma bestimmter Chargen), die zumeist durch den bei Korrosion auftretenden Wasserstoff verspröden (Spannungsrissskorrosion) und zu schlagartigen Versagen ohne vorherige Ankündigung führen können.

## Prüftechnik und Prüfparameter

Physikalische Quelle der Schallemission ist die Bruchenergie, die beim Versagen der Spanndrähte frei wird. Diese Bruchenergie wird durch Schallemissionssensoren in einem Bereich von etwa 20 bis 200 kHz detektiert. Die Wahl der Schallemissionssensoren ist abhängig von den Störgeräuschen und dem gewünschten Abstand der Sensoren. Mit abnehmender Resonanzfrequenz kann der Abstand zwischen den Sensoren erhöht werden, wobei aber gleichzeitig eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Störgeräuschen auftritt. Die Anbringung der



**Abb. 18: Ansicht der Hammersmith Flyover Brücke in London (Bild oben) mit Blick auf korrodierte Spanndrähte im Inneren der Brücke (Bild unten).**

(Bildquelle: Mistras Inc./USA/DGZfP VNB 237/2022-01-10)

Sensoren erfolgt mit einem dauerfesten Ankopplungsmittel. Typischerweise werden die Sensoren mit einem Metallbügel in Position gehalten. Der Metallbügel ist in den Beton eingeschraubt (siehe Abb. 19 rechts). Die Sensoren besitzen eine im Sensorgehäuse integrierte Vorverstärkung von 26 dB (= Faktor 20).

Die Sensoren sind gekapselt und verfügen über ein integriertes Kabel. Das Kabel wird mit dem Datenüberwachungssystem (Model: Sensor Highway der MISTRAS Group) verbunden. Im Datenüberwachungssystem erfolgt die Aufzeichnung und Verarbeitung der Messdaten. Die Option „Wire Break Location“ in der Standardsoftware AEWIN analysiert fortwährend die Daten. Es werden nur lineare Ortungsereignisse verarbeitet, die zudem eine gewisse Intensität und eine vorgegebene Ankunftsreihenfolge von Sensoren genügen. Das Überwachungssystem gibt Alarmmeldungen über einen „möglichen Spanndrahtbruch“. Eine weitere Analyse erfolgt durch ausgebildetes und qualifiziertes Prüfpersonal, welches aus einem „möglichen“ Spanndrahtbruch einen „bestätigten Spanndrahtbruch“ oder „keinen Spanndrahtbruch“ formuliert.



**Abb. 19: Installation von Sensoren und Kabelverlegung mit Hilfe von Hubsteigern (links) und Bild eines angekoppelten Schallemissionssensors an der Tunneldecke (rechts)**

(Bildquelle: Mistras Inc./USA/DGZfP VNB 237/2022-01-10)

## Prüfaufwand und -ergebnis

Im Vorfeld der Installation erfolgen Dämpfungsmessungen und die Erfassung von Störgeräuschen, z.B. durch überfahrenden Verkehr. Dies ist notwendig zur Festlegung des maximal zulässigen Sensorabstands.

Zur Überwachung einer Fläche von 1.500 m<sup>2</sup> Tunneldecke werden 32 Schallemissionssensoren benötigt. Die Installation erfolgt durch Fahrbahnspernung und Einsatz von Hubsteigern (siehe Abb. 19 links). Die komplette Installation ist in etwa einer Arbeitswoche abgeschlossen. Die Installation umfasst die Anbringung von Sensoren, die Verkabelung zum Datenerfassungssystem, Einrichten des Datenerfassungssystems mit der Möglichkeit des Fernzugriffs. Die Überprüfung der Ankopplung der Sensoren mit gleichzeitiger Überprüfung des entsprechenden Messkanals erfolgt durch die Hsu-Nielsen-Quelle (Bleistiftminenbruch). Des Weiteren werden gezielt einzelne Spanndrähte zum Versagen gebracht, um dadurch das Überwachungssystem als gesamtes vor Ort zu verifizieren. Hierzu wird ein Spanndraht mit einer Schleifscheibe so weit im Querschnitt geschwächt, dass der Spanndraht kurze Zeit später versagt. Weitere Arbeiten während der Überwachung sind durchzuführen. So ist in regelmäßigen Abständen eine Überprüfung der Messtechnik notwendig. Einige Überprüfungen lassen sich durch Fernzugriff auf das Datenerfassungssystem durchführen. Nichtsdestotrotz ist von Zeit zu Zeit eine komplette Überprüfung der Messtechnik vor Ort notwendig.

Die Prüfaussage einer Überwachung zum Spanndrahtbruch an Brücken und Tunneln ist der bestätigte Spanndrahtbruch. Man erhält eine Aussage zum zeitlichen Auftreten auch die Information über den Ort des Spanndrahtbruchs. Wichtig ist auch die Information über die örtliche Häufigkeit von Spanndrahtbrüchen (welches Spannglied ist betroffen). Eine sprunghafte Zunahme von Spanndrahtbrüchen in einem einzelnen Spannglied ist ein starker Indikator für das Erreichen eines kritischen Zustands. Eine Korrelation der Spanndrahtbrüche mit weiteren Messdaten (Durchbiegung, Temperatur, Feuchte, weitere) bietet die Möglichkeit eine erweiterte Prüfaussage zu formulieren. Elementar ist die Aufzeichnung von der Durchbiegung und der Temperatur. Die Prüfer-

gebnisse werden in der Regel über eine kundenspezifische und geschützte Internetseite bereitgestellt (siehe Abb. 20). Die webbasierte Darstellung enthält u.a. Ort und zeitliches Auftreten von Spanndrahtbrüchen, Zugriff auf ständig aktualisierte Daten der Schallemissionsanalyse, Zeichnungen, Sensorlageplan Prüfberichte, etc.

### **Grenzen und Genauigkeit des Prüfverfahrens**

Spanndrahtbrüche sind in der Regel hochenergetische Ereignisse, die gut zu detektieren sind. Die angestrebte Ortungsgenauigkeit liegt bei etwa +/- 0,5 m. Das Verfahren ist nicht direkt in der Lage über bereits gerissene Spanndrähte vor der Überwachung eine Aussage zu liefern. Diese Information kann nur durch lokales Freilegen der Spanndrähte und visuelle Inspektion gewonnen werden. Es gibt bislang keine praktikable Lösung zur nicht-invasiven Erfassung des Zustands von Spanndrähten.

### **Literaturhinweise**

1. Murakami, Y. and Yuyama, S. (1996): Acoustic Emission Evaluation of Structural Integrity in Reinforced Concrete Beams Deteriorated Due to Corrosion of Reinforcement, Progress in AE VIII (JSNDI), Proc. 13th Inter. AE Symp., Nov. 27-30, 1996, Nara, Japan, pp.217-224.
2. Yuyama, S., Li, Z.W., Yoshizawa, M., Tomokiyo, T., and Uomoto, T. (2001): Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission, NDT & E International, Vol. 34, pp.381-387.
3. Cullington, D. W., MacNeil, D., Paulson, P. and Elliot, J. (1999): Continuous acoustic monitoring of grouted post-tensioned concrete bridges, Proc. 8th Int. Conf. Structural Faults & Repair-99, Commonwealth Institute, London, 13-15 July, Engineering Technics Press, ISBN 0-947644-41-5.
4. British Highway Agency (2006), Volume 3 Highway Structures- Inspection and Maintenance, Section 1 Inspection, Part 7 BA86/06, Advice Notes on the Non-Destructive Testing of Highway Structures

The screenshot displays the MISTRAS OLM On-Line Monitoring interface. The top navigation bar includes 'Summary', 'Wire Breaks Data', 'General Activity', 'Drawings', and 'Reports'. The main content area is divided into several sections:

- System Data Status:** A table showing system details for 'AES' (Serial Number: 1, Description: AE System, Ch. Installed: 32, Ch. Groups: 4, Ch. Active: 32, In-Service Date: 17-08-2017 13:27:26).
- Date Range:** Reporting for One Week, From: 10/08/2017 13:55:48, To: 17/08/2017 13:55:48.
- Summary Statistics:** A table with columns for Group, PWB, CWB, Total, and Monitoring Days (Total: 118). A pie chart shows 7 Selected (red) and 111 Unselected (blue) items.
- Contacts:** Site Operator: Mistras Customer Care, Company: Mistras Group Ltd.
- Location Overview:** A satellite map on the left shows the sensor layout with blue numbered rectangles. A table on the right lists confirmed wire breaks (CWB) with columns for Id, Group, Time of First Hit, Status, X (m), Y (m), Part. Channels, Set By, and At.

Group	PWB	CWB	Total
Slab 3	0	0	0
Slab 4	0	0	0
Slab 5	0	1	1
Slab 8	0	1	1
All	0	2	2

Id	Group	Time of First Hit	Status	X (m)	Y (m)	Part. Channels	Set By	At
1	Slab 5	24/04/2017 21:45:00	CWB	5.9	9.1	20,22,17,21,23,18,24	Tim Bradshaw	06/07/2017 14:00:00
2	Slab 8	24/04/2017 23:19:00	CWB	6.5	3.1	26,25,28,29,27,30	Tim Bradshaw	06/07/2017 14:00:00

**Abb. 20: Übersichtsseite (siehe oben) und Sensorlageplan mit Position der Sensoren (siehe unten, hellblaue nummerierte Rechtecke) auf der linken Seite und rechts die Auflistung der bestätigten Spanndrahtbrüche (CWB- confirmed wire break) mit weiteren Kenngrößen. Die Spanndrahtbrüche sind bewusst zur Verifikation des Überwachungssystems erzeugt wurden.**

(Bildquelle: Mistras Inc./USA/DGZfP VNB 237/2022-01-10)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## AT AN TRANSFORMATOREN

*H. Schubert und M. Löhr, GMA- Werkstoffprüfung (Teil der MISTRAS Gruppe)*

**Stichworte**

Transformatoren, Teilentladungen, Schallemissionsanalyse

**Ziel und Nutzen der AT**

Die Schallemissionsanalyse ist in der Lage Teilentladungen, Lichtbögen, lokale Überhitzungen (Heißstellen), lose Kontakte/ Anschlüsse und Auffälligkeiten in den Wicklungen von Transformatoren in Echtzeit zu detektieren. Unerwünschte Betriebszustände in einem Transformator können auf unterschiedliche Art und Weise gefunden werden. Die übliche Methode basiert auf Bestimmung der Abbauprodukte im Öl. Diese Abbauprodukte sind Ergebnis von ungewünschten Energiefreisetzen im Transformator, wie z.B. durch lokale Überhitzungen, Teilentladungen und Lichtbogenbildung. Durch untypische Werte einer Gas-in-Öl Analyse wird festgestellt, dass ein Transformator "gast". Die meisten Betreiber entschließen sich zu kürzeren Intervallen der Gas-in-Öl Analyse, um zu verstehen, was im Transformator passiert. Es sind weitere Informationen und die Meinung fachkundiger Experten notwendig, bevor Entscheidungen möglich sind. Ein sehr großer Vorteil für eine optimierte Instandhaltung des Transformators ist der Einsatz der Schallemissionsanalyse, die in der Lage ist, die Zeitpunkte von unerwünschten Betriebszuständen zu detektieren, zu orten und zu charakterisieren.

MISTRAS (Physical Acoustics- PAC) hat mehr als eintausend Transformatoren erfolgreich auf ihr Betriebsverhalten untersucht und die Erfahrung im Technologiepaket „PowerPAC“ zusammengefasst, um die Transformatoren zu bewerten. Als Ergebnis können z.B. Transformatoren

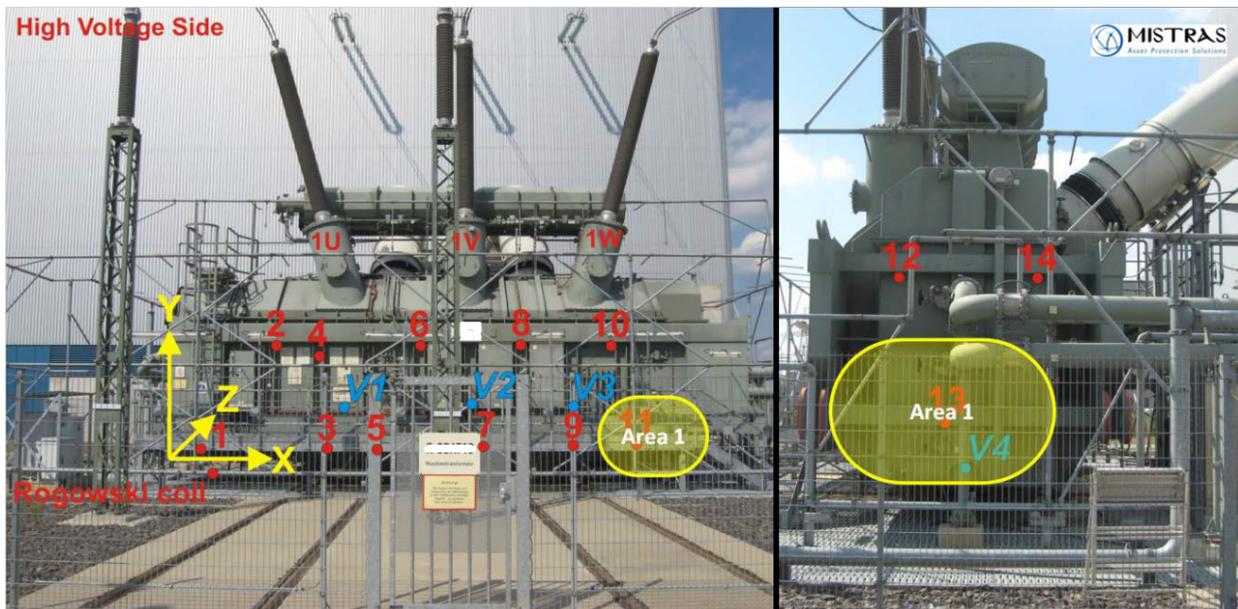
noch lange Zeit unterhalb einer kritischen Belastung verwendet werden, wenn ein Defekt in der Wicklung erst ab einer gewissen Belastungsstufe aktiv ist.

**Prüfobjekt**

Die Methode kann an allen sogenannten ölgetauchten Transformatoren eingesetzt werden. Die Wicklungen sind zur Isolation von einem Öl umgeben. Dies ist wichtig, um das sehr gute Schallübertragungsverhalten vom Öl für eine empfindliche Prüfung nutzen zu können. Diese Art von Transformatoren findet sich z.B. bei der Chlorherstellung und im Kraftwerk.

**Prüftechnik**

Kernstück der Messung ist der Einsatz der Schallemissionsanalyse. Sensoren mit einer Resonanzfrequenz um die 150 kHz werden auf den Seitenflächen des Trafokessels angebracht. Die Anbringung der Schallemissionssensoren erfolgt mit einem geeigneten Ankopplermittel und Magnethaltern, die den einzelnen Sensor in Position halten. Durch das Messen mit 150 kHz- Sensoren und entsprechender Filterung werden einige Störgeräusche nahezu unterdrückt (z.B. Magnetostriktion der Spulkerne). Andere Störgeräusche sind nur schwer zu unterdrücken und sollten daher in Ihrem zeitlichen Auftreten bekannt sein. Es können zusätzliche Schallemissionssensoren eingesetzt werden, um Schaltgeräusche im Stufenwechsler und durch den Betrieb von Pumpen und Lüftern zu erfassen. Störgeräusche durch Regen, Schnee, Eis oder Partikeleinschlag durch Sand, etc. können mit einem Schallemissionssensor detektiert werden, der nicht am Trafokessel appliziert ist, sondern z.B. auf einer Metallplatte in der Nähe des Transformators.



**Abb. 21: Ansicht auf die Hochspannungsseite mit Seitenansicht eines Transformators (3-phasig, 27 kV/ 410 kV) an einem Kraftwerksblock. Die nummerierten roten Kreise zeigen die Sensorpositionen. Insgesamt werden 28 Schallemissionssensoren an dem Trafokessel angebracht. Die blauen Kreise zeigen die Messpunkte für die Schwingungsmessung. Es wird ein Bereich gefunden, der als Referenz für Folgemessungen dient (siehe Area 1- gelb).**

(Bildquelle: Mistras Inc./USA/DGZfP VNB 237/2022-01-10)

Eine weitere Störquelle sind Bereiche von turbulenter Strömung im Öl, die die Messempfindlichkeit örtlich herabsenken können.

Bei der Prüfung sind Belastungskenngrößen und die Stufenschalterposition für den Transformator zu protokollieren bzw. als weitere Messgrößen aufzuzeichnen.

Weitere Messdaten sollten simultan mit der Schallemission aufgezeichnet werden, um eine umfassende Bewertung zu erleichtern. Neben der Temperatur ist der Einsatz von elektrischen Methoden zur Detektion von Teilentladungen vorteilhaft, wie z.B. durch die Rogowski-Spule. Sie kann als Trigger für die dreidimensionale Ortung durch die Schallemission dienen. Die erreichbare Empfindlichkeit dieser Art der Triggerung hängt stark von der Korona und bestimmten zusätzlich störenden Einflüssen ab.

Es wird empfohlen, dass die Schallemissionsprüfung durch eine Schwingungsmessung in einem Frequenzbereich von etwa 1 Hz bis 1000 Hz begleitet wird. Hierzu werden die Schwingungen in Nähe der Windungen in Form von Einzelmessungen aufgenommen. Die Schwingungsmessung ist ein Indikator für lose

Anschlüsse/ Verbindungen und Auffälligkeiten in den Windungen. Insbesondere bei auffälligen Transformatoren sollte zusätzlich eine Thermographiemessung und eine Gas-in-Öl Analyse mit einem Gerät vor Ort ausgeführt werden.

#### **Prüfaufwand und -ergebnis**

Es werden bis zu 32 Schallemissionssensoren pro Transformator verwendet. Die genaue Sensoranzahl richtet sich nach der Größe und Aufbau des Transformators. Die Installation und Inbetriebnahme der Messtechnik erfolgt durch zwei erfahrene Prüfspezialisten in weniger als 12 Arbeitsstunden. Die Installation und Messung erfolgt während des „Normalbetriebs“, ohne „freischalten“. Eine Nullmessung ist nicht notwendig. Die Messung der Schallemission erfolgt bei der Durchführung einer Prüfung über einen Zeitraum von 24 Stunden, um alle typischen Betriebszustände am Transformator zu erfassen. Während der laufenden Schallemissionsmessung erfolgt der Einsatz der Schwingungsanalyse, ggf. der Thermographie und ggf. einer „vor Ort“ Gas-in-Öl Analyse, um ein möglichst umfassendes Bild vom Transformatorverhalten zu erarbeiten.

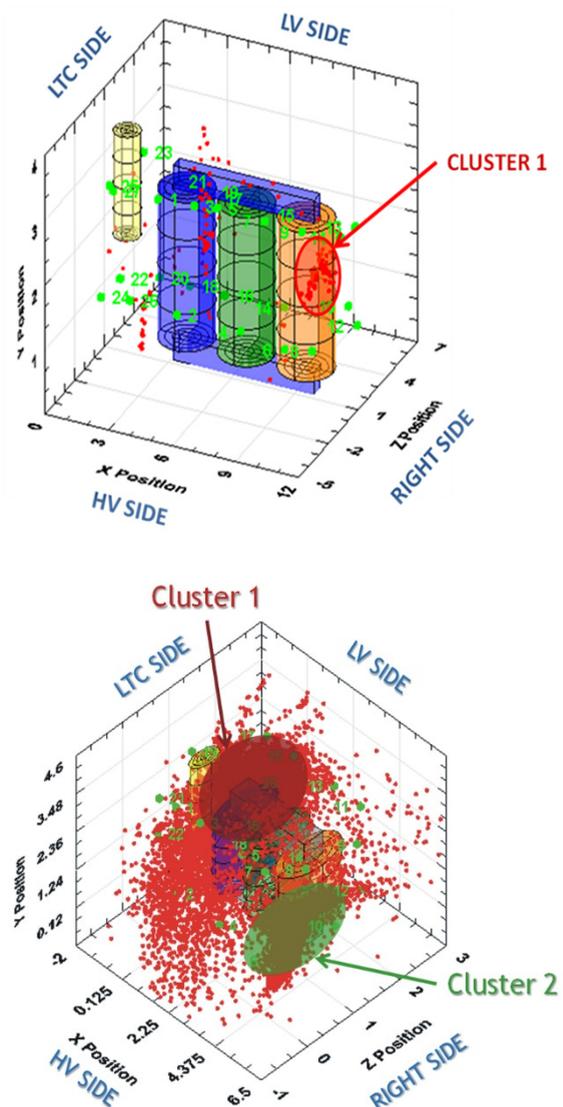
Die Prüfbewertung für die Schallemissionsanalyse erfolgt anhand der dreidimensionalen Ortungsergebnisse. Es entstehen Schallwellen z.B. durch Teilentladungsaktivitäten im Transformator, die sich vom Entstehungsort durch das Öl zu den Seitenflächen aus Metall ausbreiten, wo sie die Sensoren anstoßen. Jedes Material leitet diese Wellen mit einer material-spezifischen Geschwindigkeit weiter. Aus der Laufzeit der Signale von dem einzelnen Schall aussendenden Quellen zu mindestens vier Schallemissionssensoren kann auf die Position der

aktiven Schädigung zurückgerechnet werden (laufzeitbasierte Ortung). Zur Prüfbewertung kommen sogenannte Cluster, dies sind Ortungshäufungen. Die Ortungshäufungen (Cluster) werden nach einem Bewertungsschema von vier Einteilungen (A bis D) klassifiziert, wobei A „keine Schallemissionsaktivität detektiert“ und D „signifikante Schallemissionsaktivität detektiert“ bedeutet.

Die Bewertung des gesamten Transformators erfolgt dann unter Berücksichtigung der Gas-in-Öl-Analysen.

In Abbildung 22 findet sich die Prüfdarstellung für zwei Transformatoren aus einem Kraftwerk.

Einer der Transformatoren wird mit einem Gesamturteil von „B“ (keine Folgemaßnahmen-Referenz für zukünftige Messungen) bewertet (linke Darstellung). Der andere Transformator wird mit einem Gesamturteil von „D“ (weitere Maßnahmen zwingend erforderlich) bewertet (rechte Darstellung). Dieser Transformator wird kurz nach der Prüfung verschrottet. Jedes Ortungsdiagramm zeigt den prinzipiellen inneren Aufbau mit Lage des Trafokerns mit den Wicklungen und des Stufenschalters. Die Position und Nummer der Schallemissionssensoren finden sich als grüne nummerierte Punkte in den Ortungsdiagrammen. Die roten Datenpunkte sind die Ortungsergebnisse, die ab einer gewissen örtlichen Häufung zu einem Cluster zusammengefasst werden. Es ist ein deutlicher Unterschied erkennbar. Der Transformator am Ende seiner Lebensdauer zeigt eine Vielzahl von Ortungen, wobei zwei Clustern auftreten, die mit jeweils „D“ bewertet werden (rechte Darstellung).



**Abb. 22: Dreidimensionales Ortungsdiagramm von zwei Transformatoren aus einem Kraftwerk. Links zeigt die Ortungen und das Cluster 1 (bewertet mit B- geringe Schallemissionsaktivität) von einem „unauffälligen Transformator“. Rechts zeigt die Ortungen und die Cluster 1 und 2 (bewertet mit D- signifikante Schallemissionsaktivität) von einem „auffälligen Transformator“.**

(Bildquelle: Mistras Inc./USA/DGZfP VNB 237/2022-01-10))

### Grenzen und Genauigkeit des Prüfverfahrens

Eine Detektion von Teilentladungen, Lichtbögen, lokale Überhitzungen (Heißstellen), lose Kontakte/ Anschlüsse und Auffälligkeiten in den Wicklungen setzt immer voraus, dass diese Effekte auch während der Schallemissionsprüfung aktiv sind. Es kann daher auch eine kürzere oder längere Messdauer als 24 Stunden vereinbart werden. Die Dauerüberwachung eines auffälligen Transformators ist ebenfalls möglich.

Die Schallemissionsanalyse wird seit den frühen 80-iger Jahren letzten Jahrhunderts bei Herstellern von ölgetauchten Transformatoren bei der Funktionsprüfung eingesetzt. Hierbei werden Teilentladungen von 150 pC und mehr zuverlässig detektiert. Teilentladungen ab etwa 250 pC können bei Transformatoren im Betrieb detektiert werden. Die Empfindlichkeit ist auch bestimmt durch den Schallweg vom Entstehungsort zum Sensor. So werden Teilentladungen durch außenliegende Wicklungsfehler besser zu detektieren sein als innenliegenden Wicklungsfehler. Die Art des Schallwegs bestimmt auch die Genauigkeit der dreidimensionalen Ortungen. Ein Anhaltswert ist eine Ortungsgenauigkeit von +/- 200 mm beim Einsatz an Großtransformatoren.

### Literaturhinweise

1. IEEE- Standard C57.127-2007, USA: Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in oil-immersed Power Transformers and Reactors, 2007
2. Küchler, A.: Hochspannungstechnik – Grundlagen – Technologie – Anwendungen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 2005
3. Bartnikas and McMahon: Engineering Dielectrics, Vol. 1, Chapter 10, by R.T. Harrold, ASTM Publication, STP669-1979
4. Electric Power Research Institute (EPRI), USA: Acoustic emission detection of partial discharges in power transformers, EPRI Report EL-4009, 1985
5. Cole, P.T.: Location of Partial Discharges and Diagnostics of Power Transformers using Acoustic Methods, presented at the IEEE conference "Diagnostics methods for Power Transformers", London 1997

## **Anhang B – Zustandsüberwachung mit AT**

Im Rahmen der Arbeitsgruppe „Zustandsüberwachung“ des Fachausschuss Schallemissionsprüfung wurden einige Anwendungsbeispiele identifiziert, welche einen konkreten Fokus auf die Nutzung der AT zur Zustandsüberwachung haben. Darunter fallen alle Anwendungen, bei denen permanent installierte Sensoren einen Prozess oder eine Struktur überwachen.

Im Rahmen des Reviews wird eine Einteilung entsprechend des zu überwachenden Prozesses bzw. der Komponente wie folgt vorgenommen:

- Maschinen/Prozesse
- Strukturen im Betrieb
- Druckgeräte

Diese Anwendungsbereiche unterscheiden sich hinsichtlich:

- Ihrer Art der emittierten Schallemission (kontinuierlich oder als Burstsinal)
- der Art der Signalaufzeichnung und -verarbeitung
- den notwendigen Umgebungsgrößen, die für eine Bewertung zusätzlich herangezogen werden müssen
- und dem Ergebnis der Schallemissionsmessung.

Die vorläufigen Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Im Rahmen des Reviews werden für die oben genannten Anwendungsbereiche aktuelle Beispiele gesammelt und analysiert. Bisherige Beispiele umfassten dabei im Bereich der Maschinen/Prozesse:

- das Monitoring von Getrieben, Lagern, Ventilen, Werkzeugen und Maschinen
- Stanz- und Umformprozesse, Fügevorgängen
- Laserbearbeitungsprozesse,
- Schweißvorgänge,
- Verschiedene Verfahren der additiven Fertigung

Für die Anwendung der Schallemission im Strukturbereich wurden Brücken und Bauwerke, Kräne und Windenergieanlagen identifiziert. Bei den Druckgeräten werden Druckbehälter, Rohrleitungen und Lagertanks diskutiert.

	<b>Maschinen/Prozesse</b>	<b>Strukturen im Betrieb</b>	<b>Druckgeräte</b>
Art der AE	kontinuierliche AE	Burstsignale	vorwiegend Burstsignale, teils kontinuierliche AE
Art der Signalaufzeichnung und -verarbeitung	kontinuierliche AE, Bildung von RMS, charakteristische Frequenzen und deren Verschiebung, Hüllkurvenspektrum, Echtzeit-Spektralanalyse	getriggert bei Schwellüberschreitung, Lokalisierung des Ereignisses und Parameterbildung	getriggert bei Schwellüberschreitung, Lokalisierung des Ereignisses und Parameterbildung RMS zur Lecküberwachung
zusätzliche Parameter	Betriebskenngrößen	Umweltdaten, Betriebskenngrößen	Druck, Lastwechsel, Durchfluss, Füllstand
Ergebnis	Vergleich gegen bekannte Grenzwerte (Baseline) durch Prozesswissen oder Anwendung von KI	Ortung (linear, planar oder 3D) und Interpretation der Häufungen Beobachtung von Risswachstum	Ortung, linear, planar, 3D und Interpretation der Häufung
Beispiele	Monitoring von Getrieben, Lagern	Brücken und Bauwerke	Druckbehälter
	Ventilmonitoring (Leakage)	Kräne	Rohrleitungen
	Werkzeuge und Maschinen	Windenergieanlagen	Lagertanks
	Stanz- und Umformprozesse		
	Laserstrukturierung, Fügeprozesse		
	Schweißvorgänge Additive Fertigung		

**Tabelle 1:** Anwendungsbereiche der Schallemissionsprüfung zur Zustandsüberwachung

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## ÜBERWACHUNG DER KABEL EINER HÄNGEBRÜCKE MIT SCHALLEMISSIONSMESSUNGEN

*Frank Lehmann, MPA Universität Stuttgart*

**Stichworte**

Brückenüberwachung, Hängebrücke, Kabelbrüche, Wavelettransformation

**Aufgabe**

Die Humber-Bridge in England ist mit 1410 m Länge eine der längsten Hängebrücken der Welt. Die Hauptlasten durch Verkehr und Windangriff werden von ca. 15.000 parallel gebündelten Kabeln aus höchstfestem Stahl getragen. Unter Last kommt es immer wieder zum Bruch einzelner Kabel in einem Bündel. Die Integrität des Bündels wird dadurch nicht beeinträchtigt, solange ausreichend Kabel intakt sind. Regelmäßige Inspektionen der Kabelbündel sind aufgrund der Zugänglichkeit nur eingeschränkt möglich. Eine Dauerüberwachung der Kabel ist hier die bessere Lösung.

Machbarkeit zu demonstrieren wurde die Brücke an verschiedenen Stellen mit piezoelektrischen Schallemissionssensoren instrumentiert. Es kamen verschiedene Sensoren zum Einsatz, die über einen breiten Frequenzbereich ein lineares Antwortverhalten besitzen, um die Daten später auch anhand ihrer Frequenzen auswerten zu können. Anschließend wurden künstliche Kabelbrüche durch gezieltes Durchtrennen einzelner Kabel erzeugt. Störgeräusche durch Klopfen auf die Kabel und Arbeiten an den Kabeln wurden ebenfalls aufgezeichnet.



**Abb. 23: Humber-Brücke**

(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 247/2022-01-17)

**Verfahren/ Lösungsweg**

Die Überwachung der Kabel kann mithilfe von Schallemissionmessungen erfolgen. Um die



**Abb. 24: oben: Mit piezoelektrischem Schallemissionssensor instrumentiertes Kabel, unten: Erzeugung von künstlichen Kabelbrüchen.**

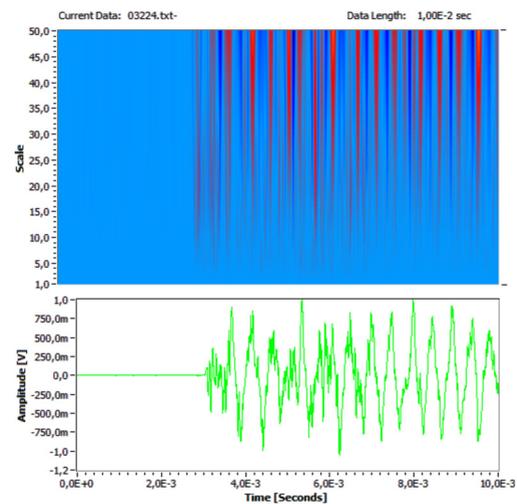
(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 247/2022-01-17)

### Ergebnisse

Die Schallereignisse der künstlich erzeugten Kabelbrüche breiten sich in den Kabeln aus und sind problemlos zu detektieren. Ziel der Datenauswertung ist eine sichere Trennung von Störsignalen und Kabelbrüchen, damit durch das Überwachungssystem im Fall von gehäuften Kabelbrüchen ein Alarm ausgegeben werden kann. Durch eine spezielle Filterung der gemessenen Daten und eine Auswertung der Frequenzantworten über eine Wavelettransformation kann diese Trennung von Störgeräuschen und Kabelbruchsignalen vollautomatisiert

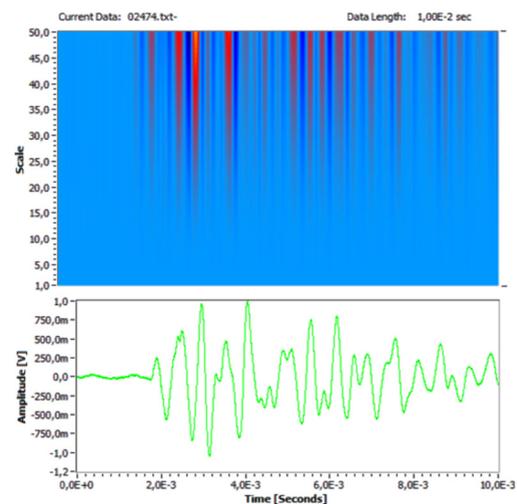
erreicht werden. Bei Überschreitung einer gewissen Anzahl an Kabelbrüchen pro Kabelabschnitt schlägt das Überwachungssystem Alarm. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass auch bei Verwendung kostengünstiger Sensoren, die ein resonantes Frequenzantwort-

verhalten haben, die Trennung von Störsignalen und Kabelbrüchen ausreichend gut funktioniert.



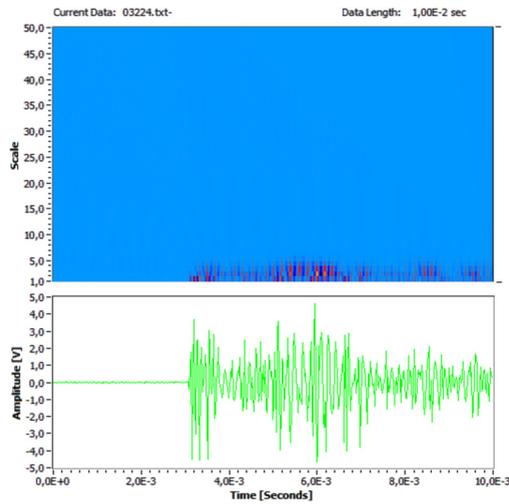
**Abb. 25: Signalform und Wavelettransformation eines Kabelbruchsignals vor Filterung**

(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 247/2022-01-17)



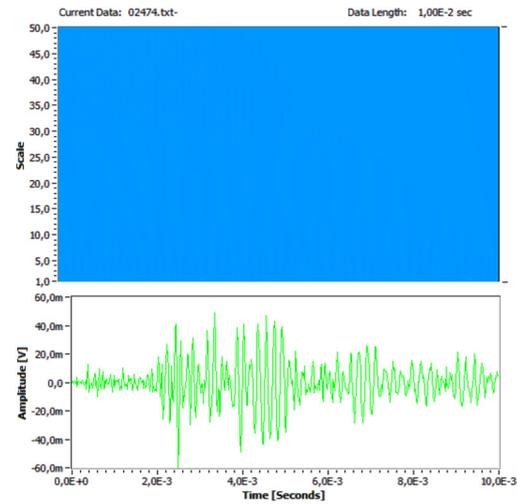
**Abb. 26: Signalform und Wavelettransformation eines Störsignals vor Filterung**

(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 247/2022-01-17)



**Abb. 27: Signalform und Wavelettransformation eines Kabelbruchs nach Filterung**

(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 247/2022-01-17)



**Abb. 28: Signalform und Wavelettransformation eines Störsignals nach Filterung**

(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 247/2022-01-17)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## RISSDETEKTION AN GEHÄRTETEN ACHSEN UND WELLEN WÄHREND DES BIEGERICHTENS

Sören Barteldes, QASS GmbH, Wetter an der Ruhr

**Stichworte**

Produktionsüberwachung, Schallemission, Rissdetektion

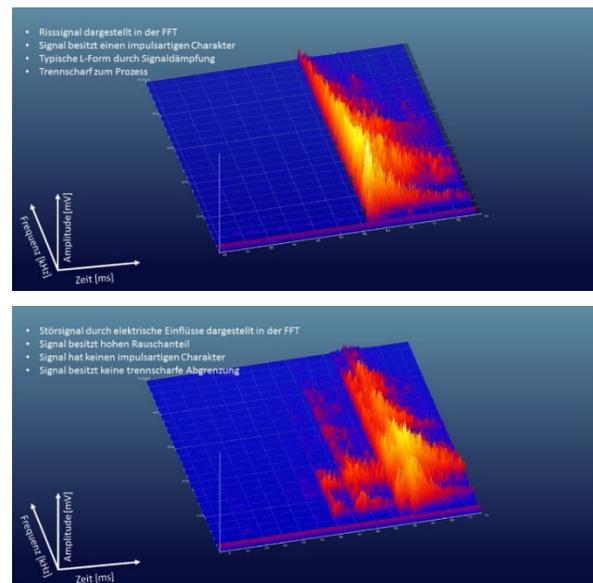
**Aufgabe**

Achsen und Wellen für PKW und LKW erleiden einen Härteverzug während der Wärmebehandlung. Nach der Abkühlung und vor dem Anlassen müssen die Bauteile auf Biegerichtpressen hinsichtlich ihres Rundlaufs geprüft werden. Ein Biegerichtstempel verformt im Rahmen einer 3-Punkt-Prüfung das Bauteil lokal stark plastisch. Dabei kann das Material spröde reißen. Risse stellen eine erhebliche Gefährdung für die umlaufbelasteten Bauteile dar. Ein SE-Sensor wird am Biegerichtstempel appliziert. Der Körperschall breitet sich während der Rissentstehung über das Bauteil aus und transmittiert in den Biegerichtstempel. Der Riss wird als Burst detektiert. Schwierigkeiten entstehen in der Trennung zwischen Rissen und Setzgeräuschen oder elektrischen Signalen. Die Anwendung ist industrietauglich und wird tausendfach angewendet.

**Verfahren/ Lösungsweg**

Für die Detektion wird der Optimizer4D verwendet. Dabei handelt es sich um ein Messgerät, das über eine FPGA basierte Messkarte verfügt. Damit ist auf bis zu vier Kanälen eine hohe Datenaufzeichnungsrate von bis zu 100 MB/sek. möglich. Dazu verfügt das System über eine hohe Speichertiefe von bis zu 8 TB. Kernfunktion ist eine Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) zur Transformation der Zeit-Amplituden Signale in den Frequenzraum. Alle 43  $\mu$ s wird ein Fourier-Spektrum erzeugt und als

Spektraldatendiagramm für Zeit-Frequenz-Amplitude visualisiert. Verschiedene Geräusche -respektive Signale- aus dem Prozess können so anhand ihres spezifischen Aussehens identifiziert werden.



**Abb. 29: Rissignal oben mit steil aufsteigender Flanke und Setzsignal mit starken Frequenzanteilen, die Reibung zugeschrieben werden.**

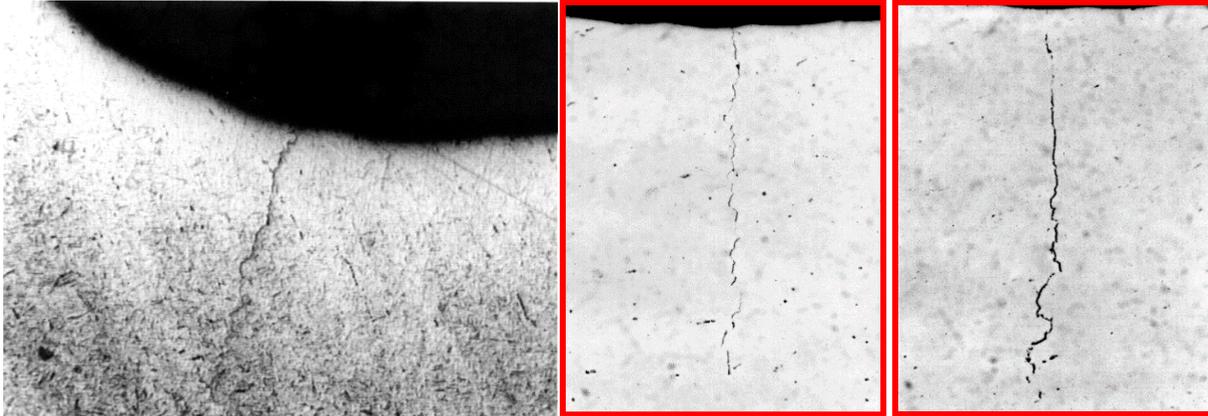
(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 239/2022-01-19)

Zur Unterscheidung zwischen Stör- und Nutzsensoren werden elektronische Filter wie Frequenzmasken, dynamische Hüllkurven oder Hochpassfilter eingesetzt. Durch die spezifische Form der Signale ist eine Mustererkennung möglich. Dazu wird die Form der Signale von Rissen eingelernt und referenziert. Abweichungen der Signale werden je nach Anwendungsfall toleriert. Das Verfahren ist sicherer als eine Schwellwertbetrachtung im Zeit-Amplituden-Bereich.

### Ergebnisse

Damit können auch innenliegende Risse oder elastisch rückverformte Risse mit geschlossenem Rissgrund an der Oberfläche detektiert werden. Abb. 30 zeigt einen Vergleich verschiedener Risse, die (auch nicht) mit anderen

zerstörungsfreien Prüfverfahren wie Farbeindringprüfung oder Magnetpulverprüfung detektiert werden können.



**Abb. 30: Geöffneter Riss in einer gehärteten Welle (links), dagegen Risse mit geschlossenem Rissgrund (mittig) und unzureichender Rissöffnung für andere ZfP-Methoden (rechts).**

*(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 239/2022-01-19)*

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## ZUVERLÄSSIGE ÜBERWACHUNG VON MONTAGE- UND FÜGEPROZESSEN

Sören Barteldes, QASS GmbH, Wetter an der Ruhr

**Stichworte**

Prozessüberwachung, Qualitätssicherung, (Körper-)Schallemission, Echtzeitanalyse

**Aufgabe**

Das Einrasten eines Sprengrings bei der Montage einer Antriebswelle soll überprüft werden. Der Springring wird auf die Verzahnungswelle gesteckt und soll als Sicherungselement eine kraftschlüssige Verbindung mit einer Buchse über eine Nut sicherstellen. Der Einrastvorgang wird akustisch mit der Schallemissionsprüfung überwacht.

**Verfahren/Lösungsweg**

An der Einlegestation beider Bauteile wird an der unteren Spannvorrichtung für die Buchse ein piezoelektrischer Sensor durch Einschrauben stationär befestigt. Die Welle mit aufgesetztem Springring wird der Buchse elektromechanisch von oben zugeführt (Abb. 31). Bisher werden zur Überwachung solcher Montageprozesse Kraft-Weg-Messungen durchgeführt, die jedoch häufig zu Fehlern führen, da sie den Einrastvorgang nur indirekt bewerten können. Dadurch bleiben Bauteilfehler häufig unerkannt. Hier setzt die Schallemissionsprüfung an. Denn beim Einrastvorgang entsteht ein erwarteter Schallimpuls, dessen Auftreten akustisch überwacht werden kann. Zur Überwachung des Montageprozesses wird das Messsystem Optimizer4D eingesetzt. Eine FPGA-basierter Messkarte führt in Echtzeit eine Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) durch. Die STFT transformiert die aufgezeichneten Zeit-Amplituden Signale in den Frequenzraum.

Diese 3D-Prozessdaten werden in einem Spektraldiagramm visualisiert. Zur Differenzierung von Stör- und Nutzsignalen werden elektronische Filter wie Frequenzmasken, dynamische Hüllkurven oder Hochpassfilter eingesetzt. Prozesscharakteristika, wie das Einrasten eines Sprengrings, zeigen spezifische Signalbilder.

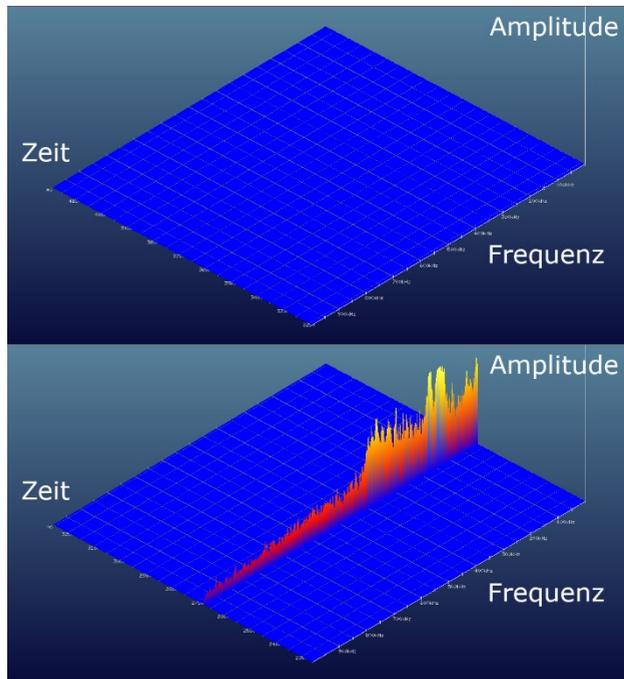


**Abb. 31: Antriebswelle mit Sprengring**

(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 240/2022-01-19)

Die Abbildung 31 zeigt ein Spektraldiagramm ohne ein Einrastensignal (oberer Bildteil) und eine Prozesslandschaft mit Einrastensignal (unterer Bildteil). Das Signal kann referenziert und als Muster einer automatisierten Erkennung zugeführt werden. Diese erlaubt, den Einrastvorgang automatisch im Prozess zu überwachen.

Bei multiplen Einrastvorgängen wird die Mustererkennung mit einer Zähllogik verknüpft. Verläuft der Prozess nicht wie beabsichtigt, zeigt sich dies durch das Fehlen eines Signalbildes oder durch Abweichungen im Signalbild, die außerhalb zuvor definierter Toleranzgrenzen liegen.



### Ergebnisse

Das zur Überwachung von Montage- und Fügeprozessen angewendete Verfahren ist valide und verlässlich. Mit dem Verfahren kann nicht nur festgestellt werden, ob der Prozess stattgefunden hat, sondern auch ob dieser korrekt verlaufen ist.

**Abb. 32: Fehlendes Signalbild zeigt fehlerhaften Prozess, Sprengring ist nicht eingerastet (oben), Signalbild zeigt fehlerfreien Prozess, Sprengring ist korrekt eingerastet (unten)**

(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 240/2022-01-19)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## KÖRPERSCHALLÜBERWACHUNG BEI LASERGEFÜHRTEN SCHWEISSPROZESSEN

Sören Barteldes, QASS GmbH, Wetter an der Ruhr

**Stichworte**

Mustererkennung, Schweißen, Körperschall, Hoch-Frequenz-Impuls-Messung

**Aufgabe**

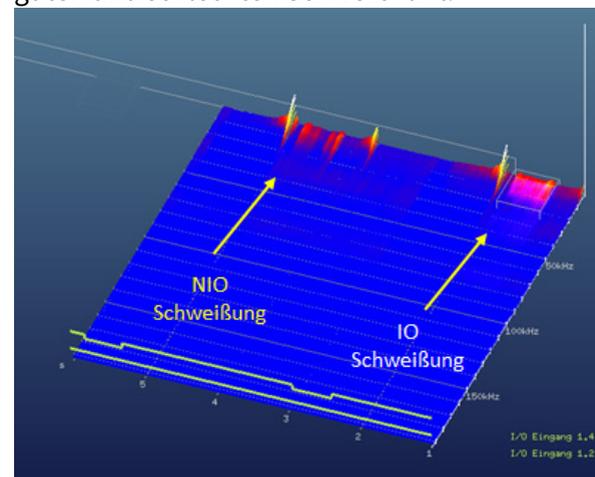
In der Produktion von Karosserieteilen sollen Bodenbleche von Automobilen mit Laser geschweißt und hinsichtlich ihrer Qualität während der Fertigung überwacht werden. Für die Überwachung der Schweißnähte werden vorwiegend optische Verfahren eingesetzt, die einerseits spezielle Prüfbedingungen und einen hohen Anlernaufwand benötigen. In diesem Fall werden günstigere piezoelektrische Vibrationsaufnehmer eingesetzt, um Abweichungen von einem vorher spezifizierten Referenzprozess zu bestimmen. Der Referenzprozess stellt eine Schweißung ohne erkennbare Fehler dar.

**Verfahren/ Lösungsweg**

Verwendet wird das Messgerät Optimizer4D mit der Hoch-Frequenz-Impuls-Messung (HFIM). Die HFIM ist ein Messverfahren zur Transformation von Zeit-Amplituden-Signalen in ein Spektraldiagramm mit der Frequenz als zusätzliche Achse (Fourier-Transformation / FFT). Über eine FPGA basierte Messkarte wird alle 43  $\mu$ s ein FFT-Spektrum erzeugt. Die anfallenden Spektren setzen sich hintereinander zu einer sogenannten Prozesslandschaft zusammen. Die Abtastfrequenz beträgt im Zeit-Amplituden-Signal 100 MHz und besitzt in der vorliegenden Anwendung der FFT eine Auflösung von 800 kHz.

Der Vibrationsaufnehmer wird an die Haltevorrichtung der automatisiert eingelegten Bleche

angebracht. Der ermittelte Referenzzustand wird mit Hilfe zerstörender metallografischer Verfahren abgesichert. Durch die Prozesslandschaft ist es möglich, einzelne Signale als Muster zu definieren. Diese Muster können in neuen Folgemessungen -respektive Prozessengesucht und Abweichungen detektiert werden. Abbildung 33 zeigt die Unterschiede einer guten und schlechten Schweißnaht.



**Abb. 33: Vergleich von Schweißungen unter Variation der Prozessparameter.**

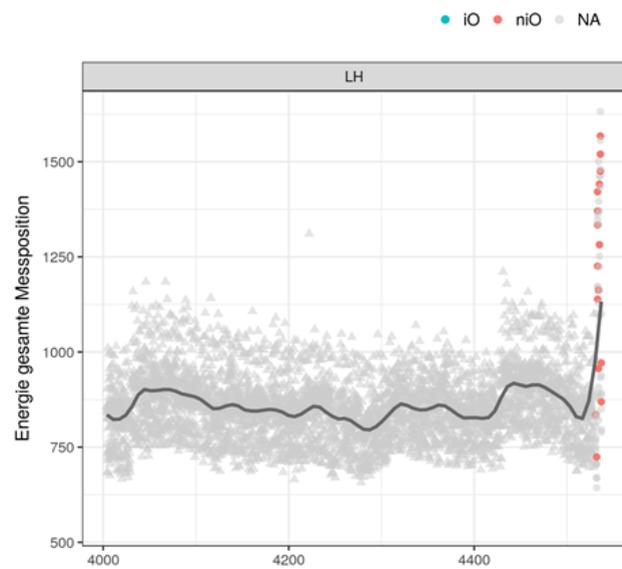
(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 241/2022-01-19)

Um verschiedene Fehlerzustände zu variieren, werden Produktionsparameter (Fokuspunkt) variiert, Fehler in das Blech eingebracht oder Bleche verschmutzt.

**Ergebnisse**

Ein energetischer Vergleich unter der Aufsummierung der Amplituden für ein definiertes Spektren-Frequenz-Fenster zeigt die generelle Zunahme bei Entstehen von Fehlern. Die Zunahme der Spaltbreite und Welligkeiten besitzen Korrelation zur Energie. Es entstehen andere Muster bei Schweißungen über

Aufklebern, Ölverschmutzung und weitere Fehler. Es zeigt sich, dass in Abhängigkeit von der Position und Fehler ein typisches Signalbild entsteht. Damit ist die spektrale Mustererkennung anwendbar. Abbildung 34 zeigt den energetischen Verlauf in Abhängigkeit von provozierten Schweißfehlern.



**Abb. 34: Energetischer Verlauf in Abhängigkeit der Schweißfehler**

(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 241/2022-01-19)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## IN-PROCESS MONITORING VON TIEFZIEHPROZESSEN

Sören Barteldes, QASS GmbH, Wetter an der Ruhr

**Stichworte**

Prozessüberwachung, Qualitätssicherung, (Körper-) Schallemission, Echtzeitanalyse, Rissdetektion

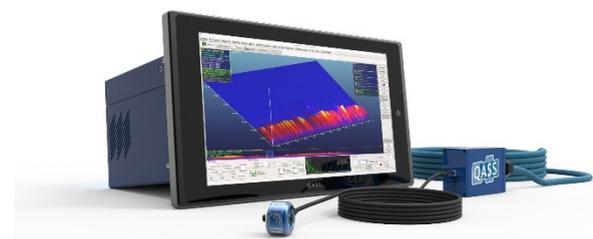
**Aufgabe**

Im Bereich der Automobilproduktion sollen an Pressen für die Anwendung Tiefziehen zur Produktion von Karosserieteilen Risse während der Fertigung detektiert werden. Aufgrund der rauen Umweltbedingungen und der fehlenden Möglichkeit, Sensoren direkt in das Werkzeug einzubringen, eignen sich piezoelektrische Vibrationsaufnehmer und die Schallemissionsprüfung zur Realisierung. Am unteren Werkzeug werden dazu ein bis mehrere Sensoren angebracht. Die bei der Rissbildung entstehenden Schallwellen werden durch das massive Werkzeug an die Außengeometrie geleitet und dort detektiert. Insbesondere Sprödrisse bei der Verwendung von Aluminium können so hervorragend detektiert werden. Aber auch niederfeste Tiefziehstähle emittieren Signale, die eine Detektion ermöglichen. Die Rissbildung erfolgt dort meist in Form von Ausdünnungen, jedoch lassen sich auch diese Prozesse durch spezielle Signalanalysen detektieren.

**Verfahren/Lösungsweg**

Die Signale der Vibrationsaufnehmer werden aus dem Zeit-Amplituden-Raum invertiert (Short-Time-Fourier-Transformation) und in ein Spektraldatendiagramm mit den Achsen Zeit-Frequenz-Amplitude überführt. Alle 43  $\mu$ s entsteht ein Spektrum. Das entstehende Prozessbild wird auch Prozesslandschaft genannt. Treten bestimmte Signale in der Prozesslandschaft in Erscheinung, die eine

signifikante Abweichung des Idealprozesses darstellen und können diese Signale fehlerhaften Referenzzuständen des Bauteils zugeordnet werden, entsteht ein Muster. Dieses Muster wird abgespeichert und kann unter Berücksichtigung bestimmter Änderungen in der Prozesslandschaft mit einem Ähnlichkeitsfaktor auch in weiteren Messungen verwendet werden. Dadurch entsteht eine Musterdatenbank, die eine Klassifikation von unbekanntem eingehenden Daten hinsichtlich Produktionsfehlern ermöglicht. Die Erfahrungen mit Signalen aus Tiefziehprozessen sind bereits vielfältig: Impulsartige Signale stellen meist Risse dar, eine Kaskade von Signalen deutet auf Stick-Slip-Effekte hin und das Fehlen von Signalen in der Prozesslandschaft zeigt Verölungen des Bleches auf. QASS setzt zum In-Processing Monitoring von Tiefziehprozessen sein Messsystem Optimizer4D ein (Abb. 35).



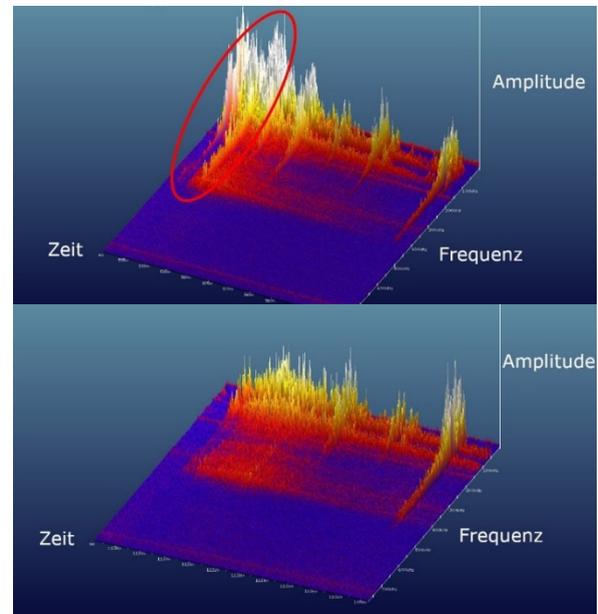
**Abb. 35: QASS Messsystem Optimizer4D**

(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 241/2022-01-19)

## Ergebnisse

Die Abbildung 36 zeigt das Prinzip der Mustererkennung anhand der Prozesslandschaft eines fehlerbehafteten Produktionsprozesses mit Rissbildung im Blech (oben) und eines fehlerfreien Prozesses (unten). Bei der Rissbildung zeigen sich die charakteristischen impulsartigen Signale deutlich. Auch das Reibungsverhalten des Bleches oder Werkzeugverschmutzungen können mit dem Verfahren und signifikanten Mustern detektiert werden.

Durch das In-Process Monitoring mit dem Optimizer4D kann somit die Ressourceneffizienz erhöht und die Wertschöpfung im Tiefziehprozess verbessert werden.



**Abb. 36: Fehlerhafter Prozess mit Signalbild eines Risses (oben), fehlerfreier Prozess (unten)**

(Bildquelle: QASS GmbH, Wetter/Ruhr/DGZfP VNB 241/2022-01-19)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## ROTORBLATT-ÜBERWACHUNG VON WINDENERGIEANLAGEN

Mareike Stephan, Fraunhofer IKTS Dresden

**Stichworte**

Windkraftanlage/Rotorblatt, Schadensfortschritt, Ortung, Dauerüberwachung

**Aufgabe**

Eine an einem Rotorblatt einer Windenergieanlage vorgenommene Reparatur (siehe Abbildung 37) sollte mittels Schallemission während des Betriebes permanent überwacht werden.



**Abb. 37: Reparaturstelle am Rotorblatt**

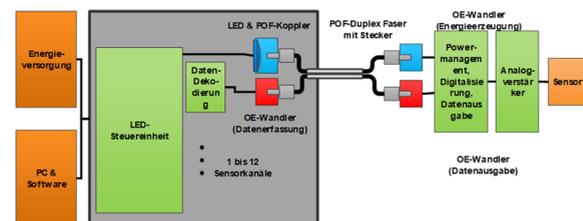
(Bildquelle: Fraunhofer IKTS, Dresden/DGZfP VNB 238/2022-01-10)

**Verfahren/ Lösungsweg**

Aus Gründen des Blitzschutzes ist das Verlegen von Metallischen Leitern im Rotorblatt nicht möglich. Es wurde ein Monitoringsystem (Abbildung 38) entwickelt, bei dem die Sensoren über optische Sensorknoten versorgt werden. Im Rotorblatt wurden 12 piezoelektrische Sensoren (PI- Duraact) für die Erfassung der AE Signale im Frequenzbereich von 10-200 kHz installiert. Der optische Sensorknoten realisiert die AD- Wandlung (16 Bit) sowie die Energie- und Datenübertragung über polymeroptische Fasern. Die Überwachung und Einstellung des Systems

sowie die Datenübertragung wird über eine Fernwartung realisiert. Bei der Auswertung werden Daten zum Betriebszustand wie z.B. die Blattlage sowie Umweltdaten berücksichtigt.

Die Verifizierung der Messdaten und die Analyse der Daten erfolgt Offline. Es wird eine planare Ortung und Rückrechnung der Amplituden durchgeführt. Im Ortungsplot werden die AE-Ereignisse dargestellt.

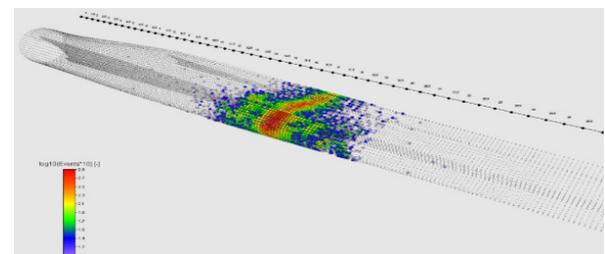


**Abb. 38: AE-Messsystem mit optischer Energieversorgung und Datenübertragung**

(Bildquelle: Fraunhofer IKTS, Dresden/DGZfP VNB 238/2022-01-10)

**Ergebnisse**

Die Darstellungen der georteten AE-Ereignisse (Beispiel Abbildung 39) ermöglichen die Beurteilung des Zustandes der Reparaturstelle. Bei Zunahme von Anzahl und Energie der AE-Ereignisse wird eine erneute Inspektion durchgeführt.



**Abb. 39: Ortungsplot für instrumentiertes Rotorblatt**

(Bildquelle: Fraunhofer IKTS, Dresden/DGZfP VNB 238/2022-01-10)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## ÜBERWACHUNG VON CMC UMMANTELTEN ROHREN IM KOHLEKRAFTWERK

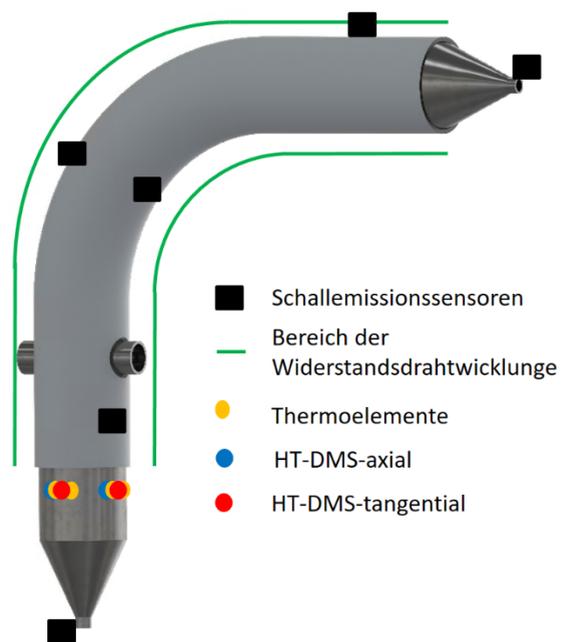
Anne Jüngert, MPA Universität Stuttgart

**Stichworte**

Kohlekraftwerk, Stahl-CMC-Verbund, Dauerüberwachung, Schallemissionsmessungen

**Aufgabe**

Druckführende Komponenten in fossil befeuerten Kraftwerken werden im Betrieb kontinuierlich durch Kriechvorgänge im Werkstoff geschädigt. Durch die Wahl hochtemperaturbeständiger Werkstoffe und regelmäßige Überwachung der Zeitstandsschädigung, konnten die Komponenten in der Vergangenheit sicher betrieben werden. Die Energie- und die Einbindung erneuerbarer Energien in die Stromerzeugung, müssen fossil befeuerte Kraftwerke heutzutage viel flexibler betrieben werden. Statt mit kontinuierlichen Lasten, hat man es mit vielen An- und Abfahrzyklen zu tun, die die Werkstoffe zusätzlich beanspruchen. Üblicherweise verwendete Werkstoffe stoßen hier an ihre Grenzen. Metallische Werkstoffe mit verbesserter Temperaturbeständigkeit, sind oft teuer und schwer zu verarbeiten.



**Abb. 40: Schema des instrumentierten Versuchsrohrs**

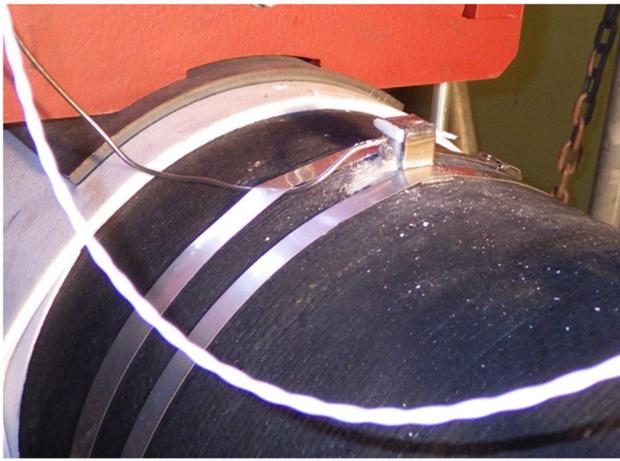
(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 244/2022-01-17)

Deshalb wird in einem Forschungsprojekt ein alternatives Werkstoffkonzept erprobt, das aus einem Stahlrohr (Liner) besteht, das mit einem Mantel (Jacket) aus keramikfaserverstärkter Keramik (CMC) umwickelt ist. Die Kriechdehnung wird vom Fasermantel getragen und der Liner gewährleistet die Gasdichtigkeit.

Im genannten Projekt ein Rohrbogen aus dem Werkstoffverbund als Bypass zu einer Frischdampfleitung im Grosskraftwerk Mannheim (GKM) erprobt. Der Rohrbogen ist zur Überwachung mit verschiedenen Sensoren ausgestattet.

## Verfahren/ Lösungsweg

Die Lage der Sensoren auf dem Rohrbogen ist in Abbildung 40 schematisch dargestellt. Neben Dehnmessstreifen, die auf dem Metall angebracht sind, sind im CMC-Jacket Widerstandsdrähte eingewickelt, die über die Änderung des Widerstands die Dehnung messen. Zusätzlich sind Schallemissionssensoren auf dem Jacket (Abbildung 41) und dem Stahlrohr angebracht. Zum Einsatz kommen hochtemperaturbeständige Sensoren, die Temperaturen bis 540°C aushalten.



**Abb. 41: Schallemissionssensor auf der Oberfläche des CMC-Jackets.**

*(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 245/2022-01-17)*

## Ergebnisse

Der Rohrbogen ist seit August 2018 in Betrieb. Der Kraftwerksblock hat in dem Zeitraum einige An- und Abfahrprozesse sowie Dauerstillstands- und Dauerbetriebszeiten gesehen.

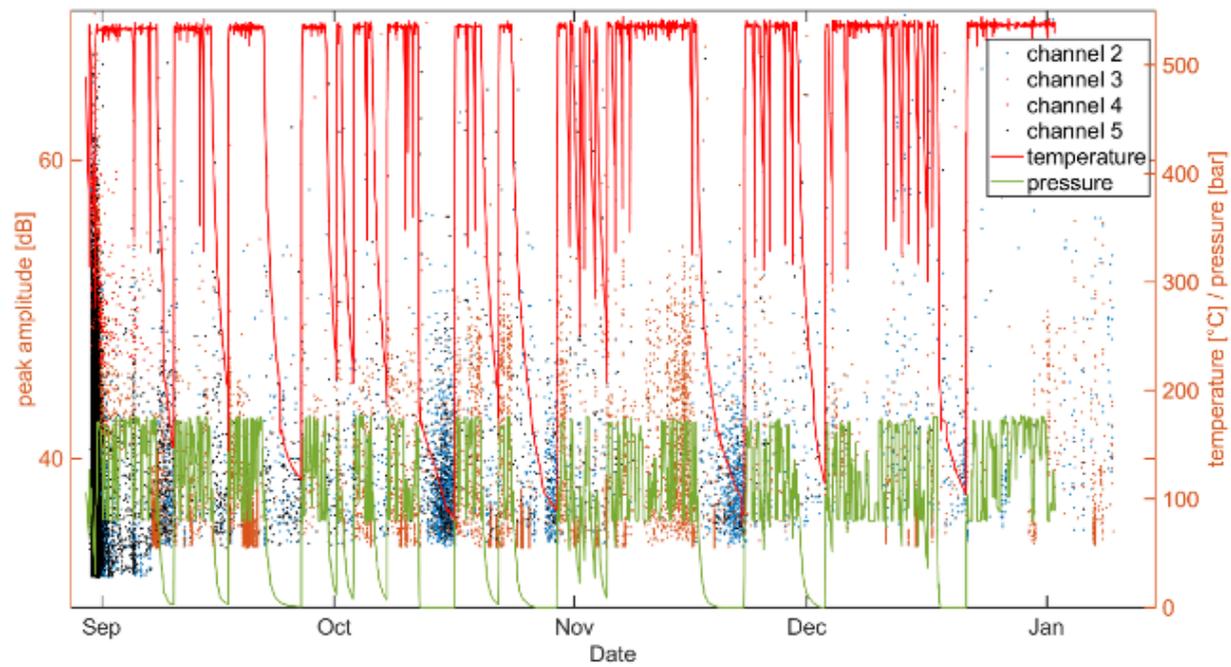
In Abbildung 42 sind die Amplituden der Schallemissionssignale der vier auf dem Jacket angebrachten Sensoren über der Zeit aufgetragen. Zusätzlich sind die Betriebsdaten Druck und Temperatur für den gleichen Zeitraum dargestellt. Die Daten wurden gefiltert, um offensichtliche Störgeräusche und elektrische Störsignale zu reduzieren.

In den ersten Tagen nach Inbetriebnahme wurden an allen Sensoren viele Schallemissionen aufgezeichnet. Hier kommt es zum Lösen von Eigenspannungen und zum Zerschneiden ungünstig gelagerter Fasern. Nach einigen

Tagen sind diese Effekte abgeschlossen und die Schallemissionsaktivität nimmt ab.

Im weiteren Verlauf des Versuchs wird deutlich, dass die Aktivität der Schallemissionen mit den Betriebsdaten korreliert. Jeder An- und Abfahrprozess erzeugt Schallsignale. Man sieht außerdem, dass auch geringe Druckschwankungen eine hohe Schallaktivität hervorrufen können. In den Stillstandszeiten, wenn der Kraftwerksblock komplett abkühlt und die Rohrleitungen drucklos sind, werden dennoch viele Schallemissionen aufgezeichnet. Diese sind vermutlich auf Reibgeräusche zurück zu führen, da das komplette Rohrleitungssystem sich durch die Wärmedehnung verschiebt.

Der Versuch und die Überwachung laufen geplant noch für weitere 8 Monate weiter.



**Abb. 42: Schallemissionsdaten der Sensoren auf dem CMC-Jacket und Betriebsdaten**

(Bildquelle: MPA Universität Stuttgart, Stuttgart/DGZfP VNB 246/2022-01-17)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## MONITORING VON VENTILEN EINER KOMPRESSOR-STUFE MITTELS SCHALLEMISSIONS- UND BESCHLEUNIGUNGSMESSUNGEN

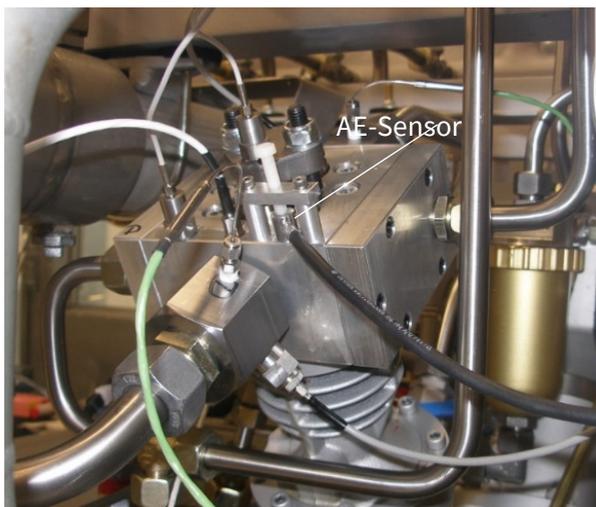
Mareike Stephan, Fraunhofer IKTS Dresden

**Stichworte**

Ventilüberwachung, Kontinuierliche AE, RMS, Baseline-Verfahren, Überwachung während des Betriebs

**Aufgabe**

Es sollten defekte oder verschlissene Ventile einer Kompressorstufe durch Erfassung und Analyse von AE- und Beschleunigungssignalen eines Kompressors im Betrieb erkannt werden. Es wurde das Überwachungsverfahren sowie die Hard- und Software für eine Dauerüberwachung entwickelt.



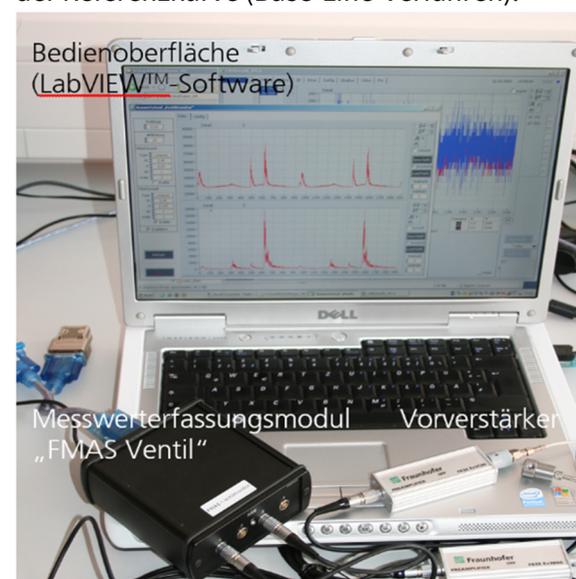
**Abb. 43: Instrumentierung des Ventilkopfes**

(Bildquelle: Fraunhofer IKTS, Dresden/DGZfP VNB 238/2022-01-10)

**Verfahren/ Lösungsweg**

Die Kompressorstufe wurde mit einem piezoelektrischen Sensor zur Erfassung der AE-Signale im Frequenzbereich von 20kHz-800kHz und einem Beschleunigungsaufnehmer (1kHz - 20 kHz)

instrumentiert. Getriggert durch die Winkelinformation erfolgt die Erfassung der Zeitsignale jeweils über einen Zyklus von 360° des Kurbelwellenwinkels. Filterung und Signalvorverarbeitung der AE Signale wird auf Microcontroller-Ebene realisiert (4 Frequenzbereiche sind mittels digitaler Filter einstellbar, Bildung des RMS der gefilterten Signale). Weitere Signalverarbeitungsschritte wie Glättung, Downsampling und Mitteilung sowie die Erzeugung und Speicherung von Referenzkurven der intakten Kompressorstufe erfolgen mittels Software (auf LabVIEW™ - Basis). Die Bewertung des aktuellen Zustandes der Ventile basiert auf der Differenz einer Anzahl gemittelter Messungen (einstellbar) von der Referenzkurve (Base-Line-Verfahren).

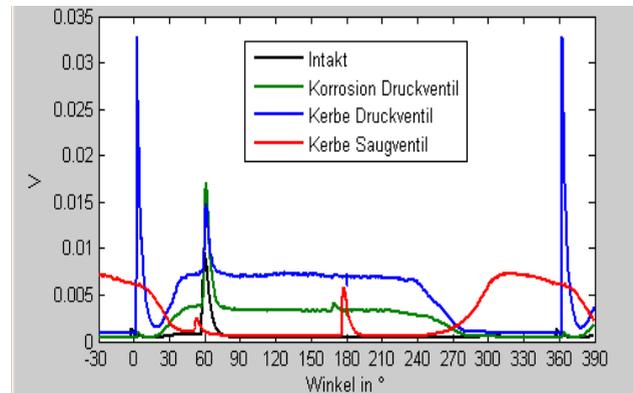


**Abb. 44: Monitoring-Hardware**

(Bildquelle: Fraunhofer IKTS, Dresden/DGZfP VNB 238/2022-01-10)

**Ergebnisse**

Verschiedene schadhafte Ventile wurden in die Kompressorstufe eingebaut und konnten detektiert werden.



**Abb. 45: Typische Signalverläufe bei verschiedenen Schädigungen**

(Bildquelle: Fraunhofer IKTS, Dresden/DGZfP VNB 238/2022-01-10)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## ZYKLISCHE ÜBERWACHUNG EINES REAKTORS WÄHREND DES BETRIEBES

Rene Friedrich, TÜV NORD MPA

**Stichworte**

Überwachung während des Betriebs

**Aufgabe**

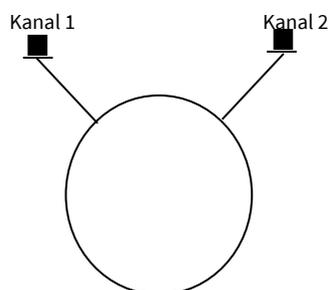
Es sollte ein Reaktor in einer chemischen Anlage während des Betriebes überwacht werden. Mit Hilfe der aufgezeichneten Signale sollten Rückschlüsse auf fortschreitende Materialschädigung und eventuelle Korrelationen mit der Betriebsweise gewonnen werden.

**Verfahren/ Lösungsweg**

Die Aufzeichnung der Schallemission erfolgte über 2 mittels Wellenleiter applizierter Sensoren.

Beide im Frequenzbereich bei 150 kHz resonant.

Weiterhin standen zur Korrelation die Ein- und Ausgangstemperatur sowie der Ein- und Ausgangsdruck des Reaktors zur Verfügung, welche über die Zeitslots der Messung miteinander verknüpft wurden.



**Abb. 46: prinzipielle Applikation der Sensoren**

(Bildquelle: Friedrich, René, TÜV NORD MPA GmbH & Co. KG, Leuna/DGZfP VNB 234/2022-01-11)

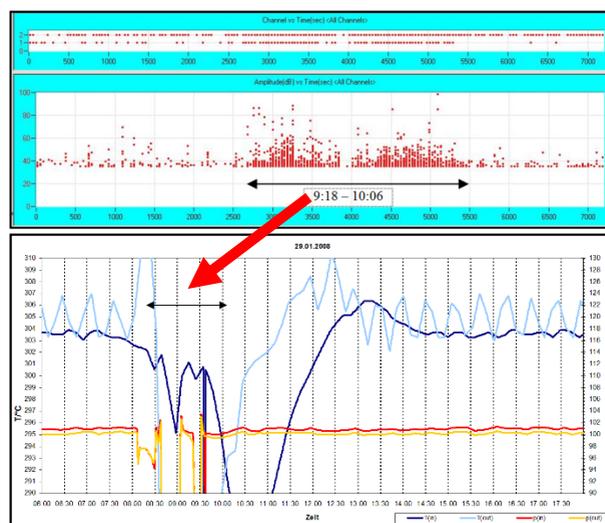
Die Datenerfassung und Analyse erfolgte mit einem PAC-System und der entsprechenden Software.

Die Messungen wurden zyklisch für 2 bis 3 Stunden durchgeführt.

Ein Einfluss auf die Intervalle und die jeweilige Betriebsweise bestand nicht.

**Ergebnisse**

Während des gleichförmigen Betriebes des Reaktors konnten Werkstoffschädigung auf Grund der erfassten Schallemission mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden. In den Phasen wechselnder Betriebsweisen fehlte eine Datengrundlage, welche auf der Aufzeichnung kontrollierter Zustandsänderungen fundiert.



**Abb. 47: Schallemission bei unstetiger Betriebsweise**

(Bildquelle: Friedrich, René, TÜV NORD MPA GmbH & Co. KG, Leuna/DGZfP VNB 234/2022-01-11)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## FOKUSLAGENBESTIMMUNG BEI DER UKP LASER-MATERIALBEARBEITUNG MIT LUFTULTRASCHALL

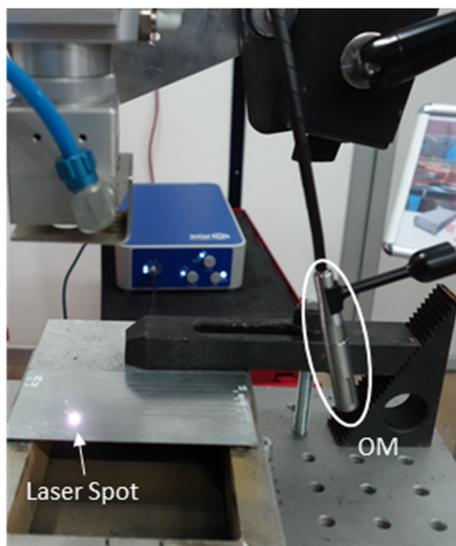
*Balthasar Fischer, XARION Laser Acoustics GmbH*

**Stichworte**

Fokuslagenbestimmung, Luftultraschall, Echtzeit-Spektralanalyse, UKP-Lasermaterialbearbeitung, optisches Mikroskop

**Aufgabe**

Es sollen die Prozessqualität sowie Veränderungen von Prozessparametern während der Ultrakurzpuls (UKP)-Lasermaterialbearbeitung anhand des emittierten Luftultraschalls bestimmt werden. Entscheidend für die Prozessqualität ist dabei die Fokuslage des UKP-Lasers, da diese die Lichtintensität auf der Materialoberfläche und damit den Materialabtrag bestimmt. Zur Detektion von luftgekoppeltem Ultraschall wurde ein breitbandiger Sensor entwickelt, der sich in Kombination mit bestehenden Datenverarbeitungssystemen für diese Prüfaufgaben eignet.



**Abb. 48: Anordnung für Luftultraschallmessung**

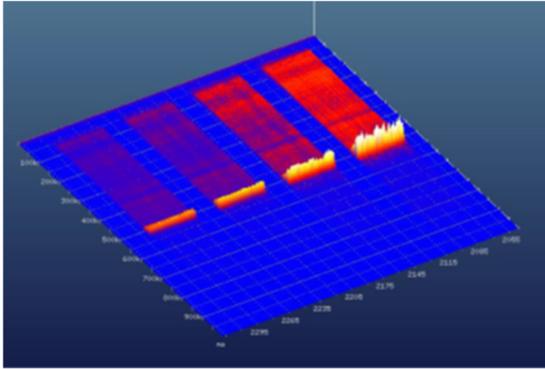
(Bildquelle: XARION Laser Acoustics GmbH, Wien/DGZfP VNB 233/2022-01-11)

**Verfahren/ Lösungsweg**

Zur Messung der akustischen Prozesssignatur wurde das Optische Mikroskop verwendet. Dieser Luft-Ultraschallsensor detektiert kontaktfrei die schallbedingte Änderung des optischen Brechungsindex. Das rein optische Messprinzip ermöglicht es, mit konstanter Empfindlichkeit den gesamten akustischen Frequenzbereich zwischen 10 Hz bis 1 MHz zu erfassen.

Zur Signalaufnahme und Verarbeitung wird ein FPGA-basiertes Messsystem verwendet, das in Echtzeit ein 3D-Spektrogramm des Signals erstellt. Das System ermöglicht des Weiteren auch Mustererkennung und spektrale Energieberechnung ausgehend von den Rohdaten.

Durch Variation der Fokuslage und Betrachtung der mittleren akustischen Energie im Frequenzband um die Puls-Wiederholrate des Lasers kann die ideale Laser Fokuslage bestimmt werden. Diese Bestimmung kann während dem Materialbearbeitungsprozess erfolgen, und erfordert keinen physischen Kontakt zwischen Sensor und Werkstück.



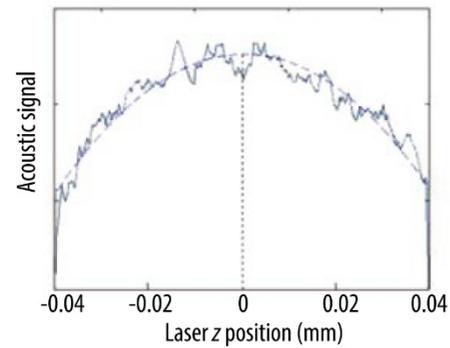
**Abb. 49: Echtzeit 3D-Spektrogramm einer Fokusalagenvariation**

(Bildquelle: XARION Laser Acoustics GmbH, Wien/DGZfP VNB 233/2022-01-11)

### Ergebnisse

Während eines Laser-Materialbearbeitungsprozesses wurde die akustische Energie für verschiedener Fokusalagen des UKP-Lasers mit dem optischen

Mikrofon erfasst. In einem Lorentz-Fit der akustischen Daten wurde der Maximalwert bestimmt. Dadurch konnte die optimale Laser-Fokusalage auf sub- $\mu\text{m}$  Genauigkeit eruiert werden.



**Abb. 50: Auswertung der akustischen Energie zur Bestimmung der Fokusalage**

(Bildquelle: XARION Laser Acoustics GmbH, Wien/DGZfP VNB 233/2022-01-11)

**Hinweis:**

Dieses Anwendungsbeispiel ist rein informativ und stellt keine Verfahrensbeschreibung oder Prüfanweisung dar. Es wird empfohlen, industrielle Prüfungen mit AT nur durch ISO 9712 zertifiziertes AT-Personal bzw. nach den anzuwendenden Prüfnormen akkreditierte Prüforganisationen durchführen zu lassen, wobei die entsprechenden nationalen Gesetze und Regelungen zu berücksichtigen sind. Für die Darstellung und sachliche Richtigkeit der Anwendungsbeispiele sind die jeweiligen Autoren verantwortlich.

## ÜBERWACHUNG EINER SPANNBETONBRÜCKE MITTELS INTEGRIERTER MONITORING ANLAGE

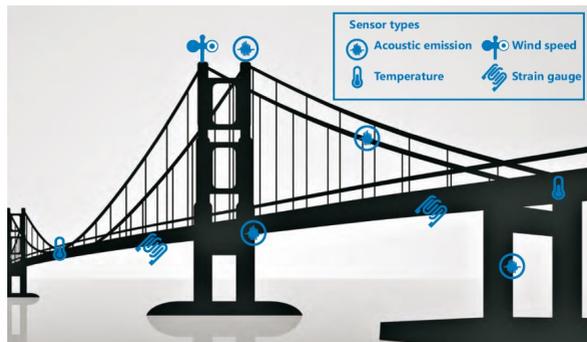
Horst Trattnig, Vallen Systeme GmbH

**Stichworte**

Brückenüberwachung, Monitoring, Spannbeton, Schallemission, AMSY-6, Cloud

**Aufgabe**

Im Süd-Westen Deutschlands wird eine Spannbetonbrücke aus den 1950er Jahren, die zur Erneuerung ansteht, mit einer Monitoring Anlage permanent überwacht. Die Monitoring Anlage nimmt neben der Schallemission auch weitere Messgrößen wie Temperatur, Weg und Dehnung (DMS) auf. Schallemission und Temperatur werden in einem integrierten System aufgezeichnet, die DMS und Weg-Daten werden nachgelagert fusioniert und analysiert.



**Abb. 51: Schematische Darstellung eines Sensornetzwerks**

(Bildquelle: Vallen Systeme GmbH, Wolfratshausen/DGZfP VNB 243/2022-01-10)

**Verfahren/ Lösungsweg**

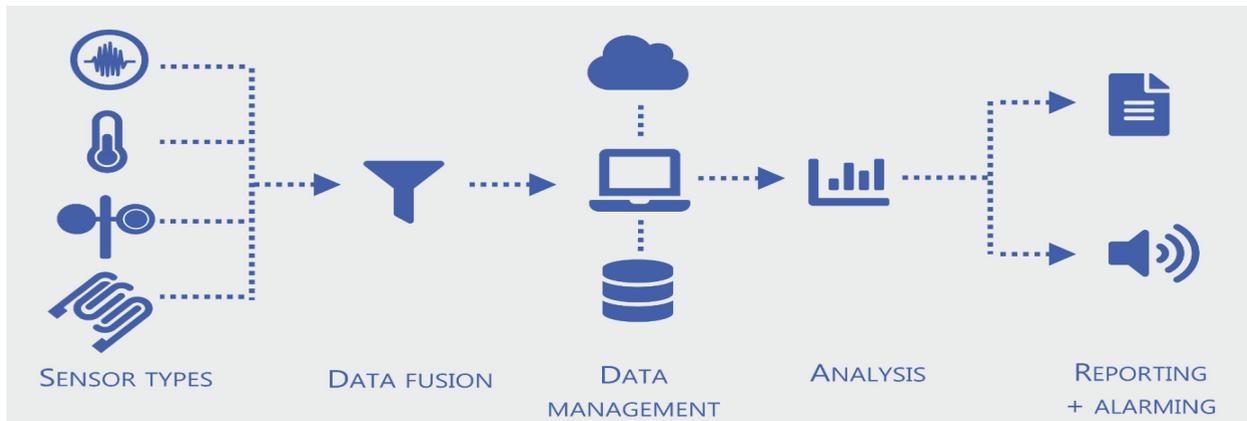
Das Projekt wird von einem Ingenieurbüro geleitet, das die einzelnen Messsysteme betreibt und die Datenauswertung übernimmt. Aus Sicht der Schallemission sind 36 niederfrequente Schallemissionssensoren äquidistant an den 4 Stegen der Brücke montiert. Das

AMSY-6 Messsystem ist in einem Schaltschrank im Widerlager montiert. Die Schallemissionssensoren sind mit Halteplatten und Montagekleber als Koppelmittel an der Brücke befestigt. Zum Schutz gegen Tiere und Vandalismus sind die Halterungen mit Schutzhauben versehen. Der Schaltschrank beinhaltet neben dem Schallemissionsmesssystem auch den Messrechner, die Kommunikationseinheit für das 4G Netzwerk und zusätzliche Messtechnik mit der die Daten von 71 Temperatursensoren erfasst werden. Die Schallemissionsdaten und die Temperaturdaten sind zeitsynchronisiert und werden gemeinsam in der Vallen Analyse Software (VisualAE) analysiert. Durch diese gemeinsame Datenbasis ist es dem Ingenieurbüro möglich, Informationen von unterschiedlichen Messsystemen einfach und schnell zu verarbeiten und zu korrelieren.

**Ergebnisse**

Das Monitoring System verhindert die Schließung der Brücke und erlaubt eine strukturierte Planung des Neubaus. Die Flexibilität der Analysesoftware ermöglicht eine maßgeschneiderte Lösung durch intelligente Datenreduktion. Das Vallen Automation Manager Software Modul steuert die Datenarchivierung, automatisierte Analyse, Sensornetzwerkverifikation und Alarmierung bei Abweichungen vom Sollzustand der Monitoring Anlage oder bei Überschreitung von programmierten Alarmschwellen.

Zusätzlich werden die wichtigsten Kenngrößen und Statistiken auf einen Cloud-Server gespeichert und stehen in einem Web-Dashboard als Übersicht dem Betreiber zur Verfügung.



**Abb. 52: Datenzusammenführung und automatisierte Aufbereitung**

(Bildquelle: Vallen Systeme GmbH, Wolfratshausen/DGZfP VNB 243/2022-01-10)