

Schallemissionsprüfung an einem rissbehafteten Flüssiggaslagerbehälter – Ergebnisse zum Nachweis der Verfahrenseignung

Ing. Gert SCHAURITSCH
TÜV AUSTRIA SERVICES GmbH
Institut für Technische Physik
1230 Wien, Deutschstraße 10 (gsch@tuv.at)

Kurzfassung. Im September 2009 kam es am Lager einer Flüssiggasfirma in Österreich zum Zerknall eines Flüssiggaslagerbehälters, bei dem einer der beiden Behälterböden vom zylindrischen Mantelteil komplett abgetrennt wurde. Im Zuge der eingeleiteten Schadensuntersuchung stellte sich einerseits das Vorliegen von Spannungs-Risskorrosion als Schadensursache heraus. Andererseits konnte nachgewiesen werden, dass die Bodenrundnaht des unversehrt gebliebenen Bodens – offensichtlich aus ähnlichen Gründen – in der 6-Uhr-Position einen ca. 1 Meter langen Schweißnaht-Längsriss aufwies. Über Intervention des zuständigen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend^[1], wurde am abgetrennten Behälterende ein neuer Boden angeschweißt und somit der Behälter für die Durchführung einer Wasserdruckprobe bzw. eines Berstversuches mit begleitender Schallemissionsüberwachung vorbereitet. Der Beitrag schildert die gewählte Verfahrens- und Auswertetechnik und präsentiert die festgestellten Ergebnisse.

1. Einführung:

Seit 1991 wird in Österreich die wiederkehrende Überprüfung von Flüssiggas-Lagerbehältern durch Anwendung der Schallemissionstechnik im Zuge einer Druckerhöhung mit dem Betriebsmedium (Flüssiggas) als Ersatz der gesetzlich vorgeschriebenen Druckprüfung und Innenuntersuchung durchgeführt. Die von der TÜV AUSTRIA SERVICES GMBH eingesetzte Verfahrenstechnik entspricht den Anforderungen der EN 12817, Anhang C und basiert auf der Nutzung linearer Ortungsalgorithmen dessen Ergebnisse mittels der selbst entwickelten Bewertungsmethode des Cluster-Evaluation-Faktors (CEF) analysiert werden und in der Folge die Klassifizierung im Hinblick auf die Zulässigkeit zum weiteren Betrieb der Behälter ermöglicht. Spezifische Verfahrensbeschreibungen gemäß EN 12817 (Standardverfahren) regeln hierbei den Einsatz an oberirdisch aufgestellten und erdverlegten Flüssiggaslagerbehältern bis 13 m³ Inhalt und stellen die Grundlage für die gültige Akkreditierung der TÜV AUSTRIA SERVICES GMBH dar. Bei mehr als 50.000 Behälterprüfungen im In- und Ausland konnte die Zuverlässigkeit dieser Verfahrenstechnik bereits mit Erfolg nachgewiesen werden.

2. Arbeitsweise und Auswertung der Standardverfahren:

Das vom TÜV AUSTRIA entwickelte und verwendete Verfahren dient zur einfachen und schnellen Bewertung von Schallemissions-Messergebnissen bei Anwendung 1- bzw. 2-dimensionaler Ortungs-Algorithmen. Es beruht auf der Annahme, dass ausgehend von einem relevanten Quellort innerhalb einer Struktur, Schallemissionsaktivitäten während der Belastungssteigerung annähernd gleiche Laufzeitunterschiede zu den applizierten Schallaufnehmern aufweisen werden (siehe Bild 1).

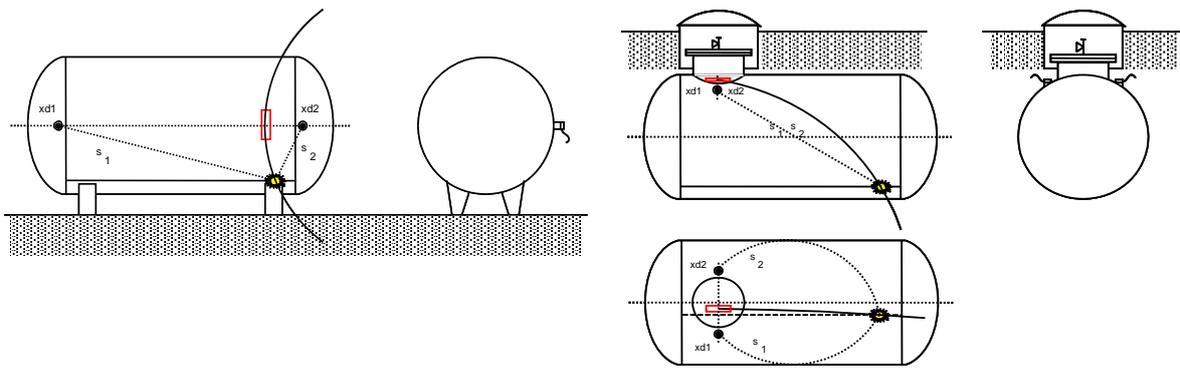


Bild 1: Clusterbestimmung für das Auswerteverfahren bei OF und UF-Behältern; Standardverfahren entsprechend Pos. 1 und Pos. 2

Durch Analyse der diesen Ortungsbereichen (Cluster) zugeordneten Signalparametern (Maximalamplitude, Energieinhalt, etc.) kann für jeden Signalparameter ein Bewertungsfaktor (f_{p_n}) ermittelt werden.

Durch Summenbildung der einzelnen Bewertungsfaktoren und anschließender Division durch die Anzahl der verwendeten Bewertungsparameter wird der Mittelwert gebildet. Der so ermittelte Bewertungsfaktor (Cluster Evaluation Faktor – CEF^[2]) gibt in Form eines normierten Zahlenwertes eine qualitative Aussage über beliebig viele, miteinander verknüpfte Schallemissionsparameter in einem beliebigen Ortscluster auf der zu prüfenden Struktur an, die wiederum zur finalen Bewertung des Zustandes der zu prüfenden Struktur herangezogen werden können (siehe Bild 2).

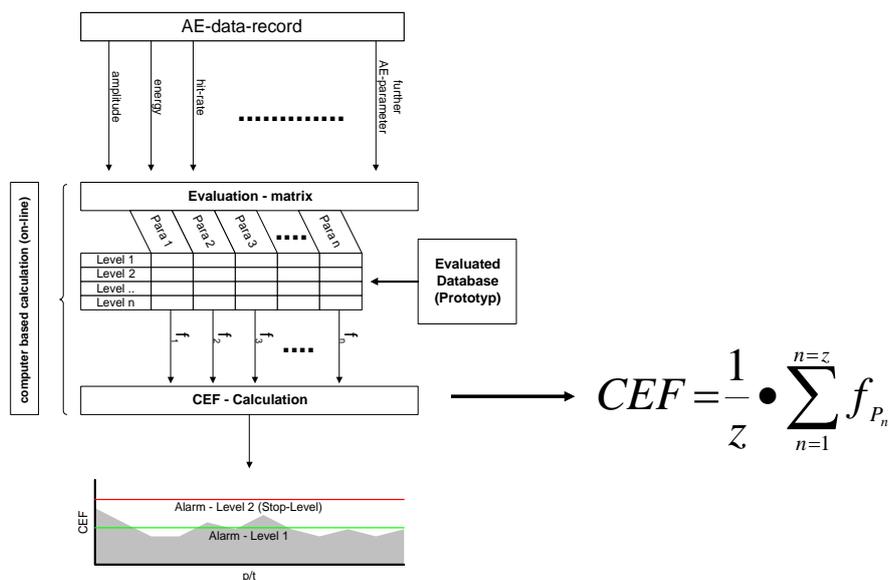


Bild 2: Funktionsprinzip der CEF-Ermittlung

Gemäß der gültigen Verfahrensbeschreibungen der TÜV AUSTRIA SERVICES GMBH wurden folgende Alarm- und Abbruchkriterien angewandt:

Warnung 1	5 Ereignisse $\geq 78 \text{ dB}_{\text{AE}}$
Alarm 1	3 Ereignisse $\geq 90 \text{ dB}_{\text{AE}}$
Warnung 2	1 Ereignis (clusterbezogen) $\rightarrow 2,2 < \text{CEF} \leq 2,8$
Alarm 2	1 Ereignis (clusterbezogen) $\rightarrow \text{CEF} > 2,8$

Die Bewertung und Behälterklassifizierung erfolgt an Hand der während der Prüfung aufgetretenen Warn- und Alarmmeldungen gemäß nachstehendem Szenario:

Klasse	Warnung		Alarm		Weiterführende Maßnahmen
	1	2	1	2	
A	--	--	--	--	Behälter für den weiteren Betrieb geeignet
B	✓	--	--	--	Weiterführung der Belastungssteigerung möglich; Nachuntersuchung vor der nächsten Befüllung erforderlich.
	--	✓	--	--	
C	--	--	✓	--	Abbruch der Belastungssteigerung und Druckentlastung; Nachuntersuchung umgehend erforderlich.
	--	--	--	✓	

3. Applikation und Kalibrierung:

Die Messtechnik wurde so ausgewählt, dass im Zuge der Prüfung die in der Praxis angewandten Standardvarianten für die Prüfung an erdverlegten und oberirdisch aufgestellten Flüssiggaslagerbehältern parallel ohne gegenseitige Beeinflussung zur Anwendung gelangen konnten. Zusätzlich wurde zur detaillierten Zuordnung und Identifizierung der Ursprungsorte von einzelnen Schallemissionssignalen ein planares Ortungsset appliziert. Ziel dieser Maßnahme war es, Schallemissionssignale aus dem Bereich des vorhandenen Anrisses in der 4 bis 8-Uhr-Position der Sickenrundnaht eindeutig zu identifizieren und in der Folge dessen Auswirkungen auf die Bewertung und Klassifizierung durch die beiden Standardverfahren nachzuweisen.

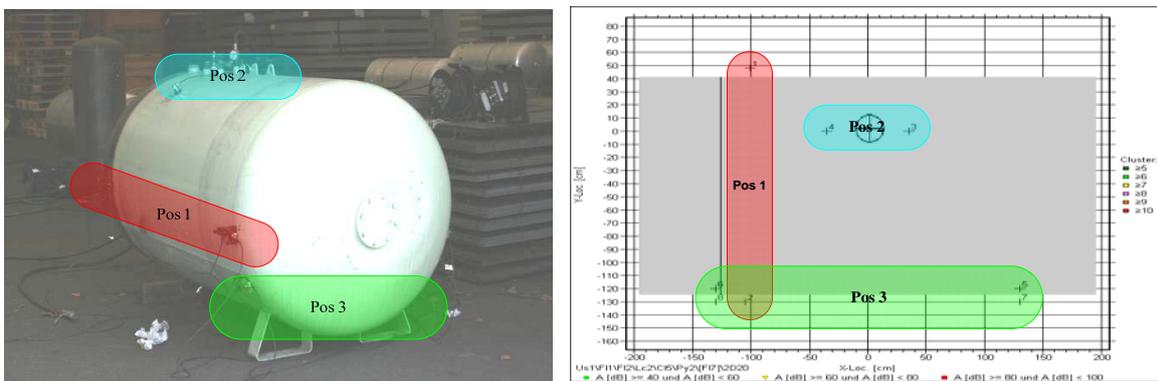


Bild 3: Applikation der Messtechnik

- Pos 1 ... Sensor 1, 2; Standardverfahren für oberirdisch aufgestellte Flüssiggaslagerbehälter (OF) bis 2to
- Pos 2 ... Sensor 3, 4; Standardverfahren für erdverlegte Flüssiggaslagerbehälter (UF) bis 2 to
- Pos 3 ... Sensor 5, 6, 7, 8; Rissüberwachung
- Pos 1 + 2 + 3 ... Planares Ortungsset zur Quellenidentifizierung

In der Software der angewandten Messtechnik basiert die Darstellung des planaren Ortungssystems auf einer Abwicklung des zylindrischen Behältermantels (Bild 4), wobei die x-Koordinate die Umfangsrichtung und die y-Koordinate die Behälterlängsrichtung darstellt. Der Bezugspunkt für das Koordinatensystem (x/y=0) bezieht sich auf die Mitte des Armaturen-Schutzdeckels im Behälterfirst (12-Uhr-Position).

Die eingesetzte Sensorik ist nachstehender Tabelle zu entnehmen:

Sensor 1 und 2 (Pos 1)	Vallen VS 150-RIC	150 kHz; 34 dB; 95 - 350 kHz
Sensor 3 und 4 (Pos 2)	Vallen VS 75-RIC	75 kHz; 34 dB; 20 - 350 kHz
Sensor 5, 6, 7, 8 (Pos 3)	Vallen VS 150-RIC	150 kHz; 34 dB; 95 - 350 kHz

Die Sensoren wurden - wie in der Praxis üblich - direkt auf den vorhandenen Behälteranstrich appliziert. Im Anschluss wurden die Schallausbreitungseigenschaften mittels HSU-Nielsen-Quelle (Bleistiftminenbruch) kontrolliert, wobei die üblichen Werte für die Schallausbreitungseigenschaften (Schallgeschwindigkeit $c = 4,8$ bis $5,0$ m/msec., Fernfeldschwächung $\alpha = 3,6$ dB/m) bestätigt wurden.

Im Anschluss wurden entlang der Behälterlängsnaht und der Sickenrundnaht im Bereich der Risslage Probeortungen mit der HSU-Nielsen-Quelle durchgeführt.

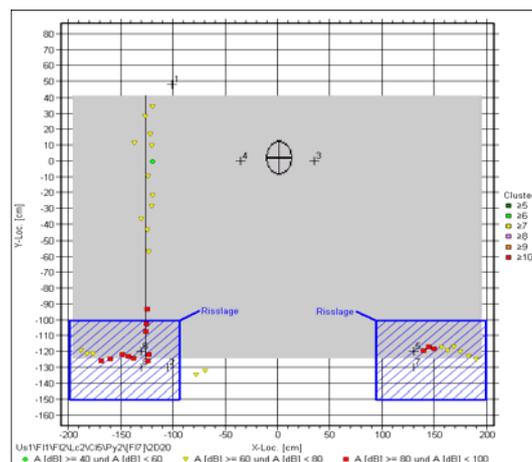


Bild 4: Probeortung entlang der Behälterlängsnaht und Sickenrundnaht im Bereich der Risslage; Darstellung im planaren Ortungssystem

Die Probeortungen konnten hervorragend den beiden Standardverfahren (Pos. 1 und 2) zugeordnet werden.

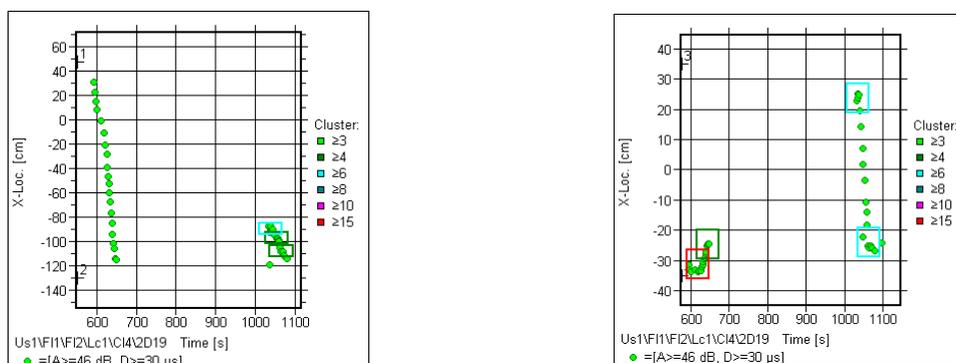


Bild 5: Probeortung entlang der Behälterlängsnaht und Sickenrundnaht im Bereich der Risslage
linkes Bild: Darstellung im Standardverfahren für OF-Behälter (Pos. 1); zuerst Längsnaht, dann Risslage.
rechtes Bild: Darstellung im Standardverfahren für UF-Behälter (Pos. 2); zuerst Längsnaht, dann Risslage.

4. Prüfdurchführung und Ergebnisse:

Die Prüfung erfolgte am 18.06.2010 im Zuge einer möglichst kontinuierlich geführten Wasserdruckprüfung (Drucksteigerungsrate ~ 0,3 bar/min.) bis zum festgelegten Prüfdruck des gegenständlichen Behälters ($P_T = 24$ bar). Dieser Belastung hielt der geschädigte Behälter ohne Einschränkungen stand. Angestrebt war es eigentlich, die Schallemissionsaufzeichnung bis zum Erreichen des tatsächlichen Berstdruckes weiterzuführen. Dies zeigte sich jedoch in der Praxis als nicht zielführend, da ab dem Prüfdruck des Behälters massive Schallemissionsereignisse hervorgerufen durch eintretende plastische Verformungen in der Gesamtstruktur auftraten. Die Wasserdruckprüfung wurde ohne weitere Schallemissionsüberwachung auf einem anderen Prüfstand weitergeführt. Erst bei einem Druck > 45 bar (!) trat das Versagen des Behälters im Bereich der Risslage an der Sickenrundnaht auf.

4.1 Auswertung mit einem planaren Ortungsset zur Quellenidentifizierung:

Zur einfacheren Quellenidentifizierung wurde parallel zu den beiden Standardverfahren ein planares Ortungsset bestehend aus den 8 applizierten Schallemissionssensoren eingesetzt. In Bild 6 sind die, während der Druckprüfung bis 24 bar, registrierten und georteten Schallemissionsquellen in der zylindrischen Behälterabwicklung dargestellt, wodurch eine grobe Quellenzuordnung zu vier Quellbereichen möglich war.

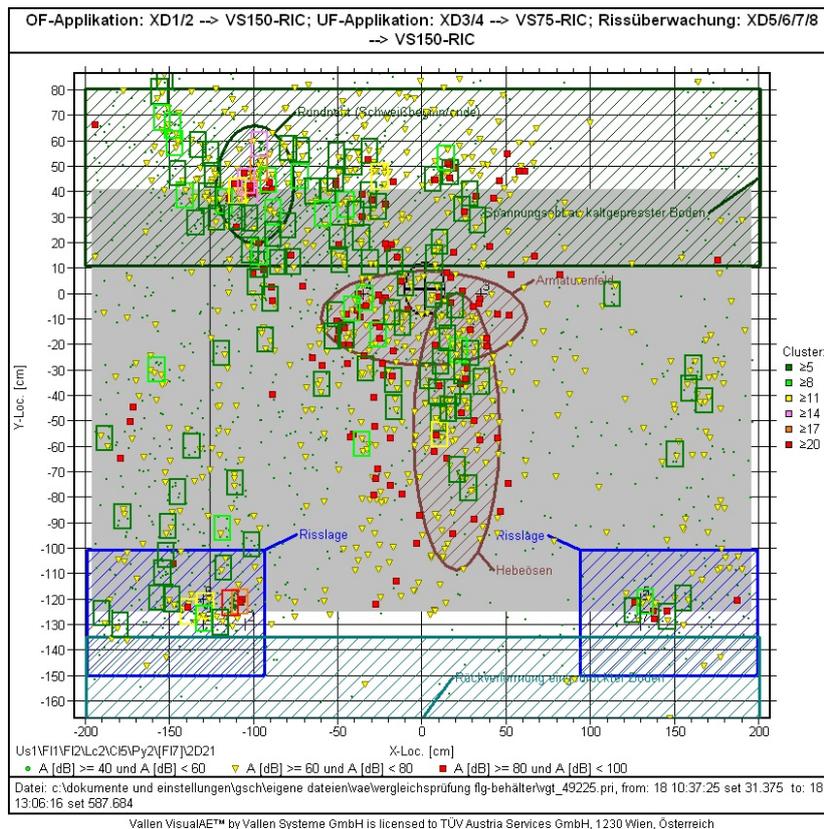


Bild 6: Ortungsergebnis bei Anwendung des planaren Ortungssets (Pos 1,2,3) am zylindrischen Mantelteil; aufgezeichnete Aktivitäten während der Wasserdruckprobe von 1 bar bis 24 bar

Teilweise wurden Schallemissionsaktivitäten aus dem neu aufgeschweißten Deckel, vermutlich hervorgerufen durch Abbau vorhandener Spannungen und möglicher Weise vorhandener Schweißnahtfehler insbesondere aus dem Bereich der Anfangs- und Endposition der Rundnahtschweißung, festgestellt. Weitere Schallemissionsaktivitäten waren dem Bereich des Armaturenfeldes und der beiden angeschweißten Hebeösen sowie aus der bestehenden Risslage in der Sickenrundnaht und der Rückverformungszonen des teilweise eingedrückten Bodens auf der Rissseite zuzuordnen.

4.1 Auswertung mit dem Standardverfahren für oberirdische (OF) Behälter gemäß Pos. 1:

Schon von Beginn an wurden massive Schallemissionsaktivitäten festgestellt, die besonders der Seite mit dem neu angeschweißten, kaltgepressten Behälterboden zugeordnet werden konnten. Von der rissgeschädigten Behälterseite wurden bei 9,8 und 10 bar 2 intensive Schallemissionsereignisse registriert, die bereits zu diesem Zeitpunkt einen CEF von 2,58 erreichten. Somit war zu diesem Zeitpunkt die **Warnung 2** bereits erfüllt und entsprechend vom Messsystem aktiviert worden.

Ab 11,1 bar wurde auf der rissgeschädigten Seite **Alarm 2** aktiv. In der Praxis ist daher die Belastungssteigerung abzubrechen und die umgehende Druckentlastung vorzunehmen.

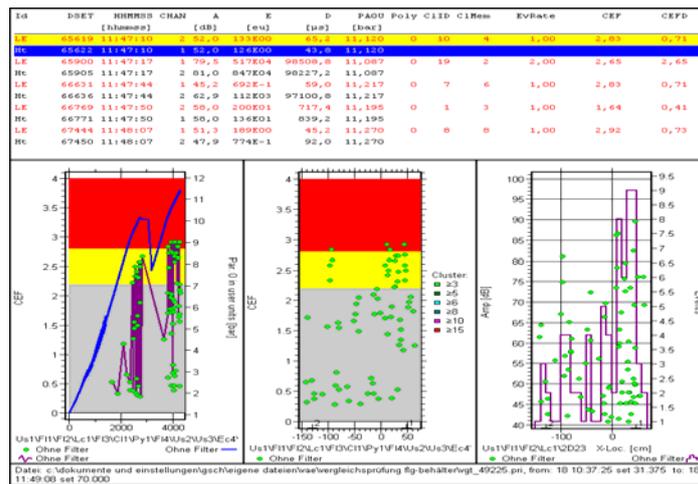


Bild 7: Auswertung bis Aktivierung des Alarm B
Auswertung mit dem Standardverfahren Pos. 1

In weiterer Folge konnten im Zuge der Nachauswertung eindeutige Signalzuordnungen zu den Vorgängen im Rissbereich hergestellt werden. Hierzu wurde mit Hilfe von Ortsfiltern auf Basis des angewandten planaren Ortungssystems Schallemissionsdatensätze extrahiert, die eindeutig dem Rissbereich zugeordnet werden können. In Bild 8 ist zu erkennen, dass die aufgezeichneten Aktivitäten insbesondere aus den beiden Rissenden herrühren. Gleichzeitig war das Rissende im Bereich der Sensoren 5 und 7 aktiver als bei den Sensoren 6 und 8. Aus der 6-Uhr-Position (Rissmitte) wurden während der gesamten Drucksteigerung bis 24 bar geringere Aktivitäten festgestellt.

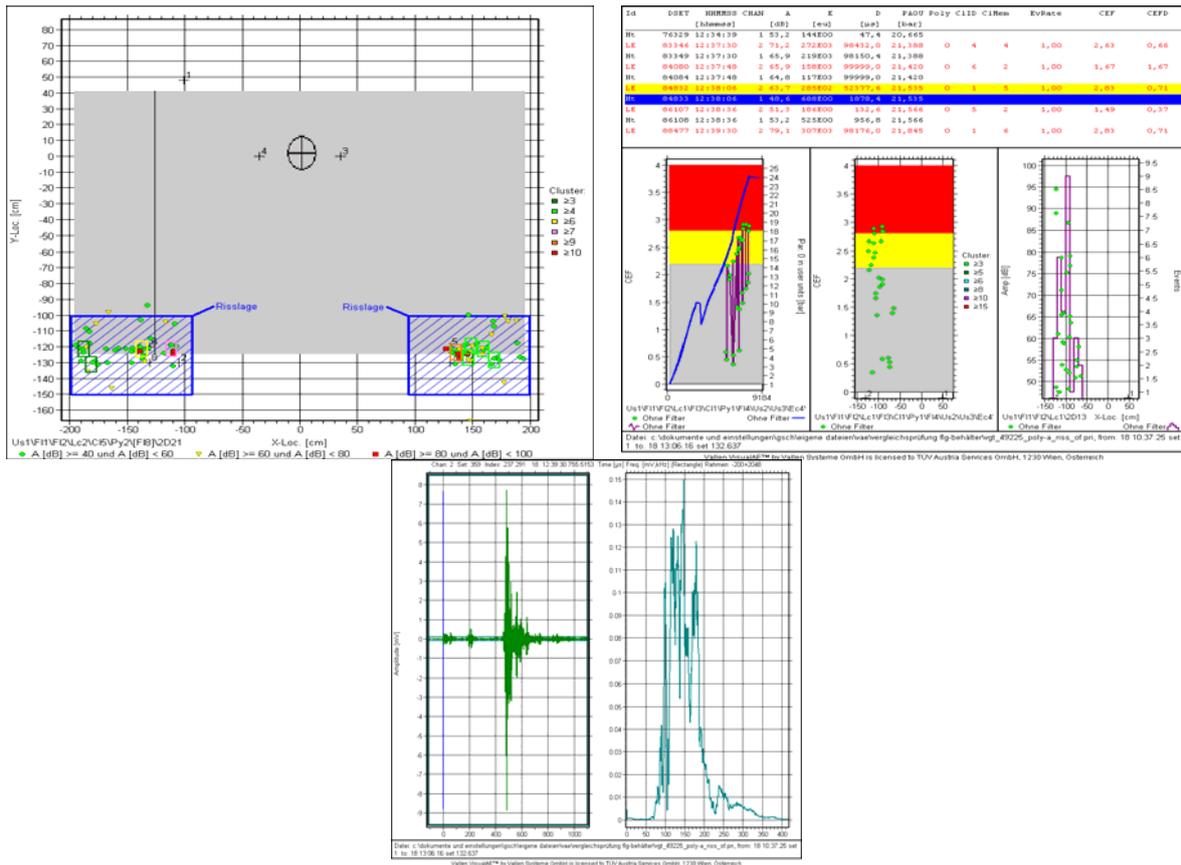


Bild 8: Signalextraktion aus dem Bereich der Risslage.

Die eintretende Rissaktivierung konnte ab 15,5 bar eindeutig nachgewiesen werden, wobei die **Warnung 2** bei 17,4 bar auftrat. Letztendlich wurde durch weitere Intensitätszunahme im Rissbereich ab 21,5 bar der **Alarm 2** sowie die **Warnung 1** ausgelöst.

4.2 Auswertung mit dem Standardverfahren für erdverlegte (UF) Behälter gemäß Pos. 2:

Ein ähnliches Bild ergab die Auswertung nach dem Standardverfahren für erdverlegte Behälter (Pos. 2). Durch die Applikation der beiden Sensoren 3 und 4 in Umfangsrichtung parallel zu den beiden Rundnähten, kann jedoch keine Aussage im Hinblick auf den Quellenursprung der aufgezeichneten Schallemissionssignale zu den einzelnen Böden getroffen werden. Demgemäß haben die frühzeitig begonnenen Aktivitäten aus dem neu angeschweißten Bodenbereich die **Warnung 2** schon bei 2,9 bar ausgelöst. Der **Alarm 2** wurde bei 6,8 bar ausgelöst (Bild 9). Der Abbruch der Druckprobe wäre zu diesem Zeitpunkt zu veranlassen gewesen.

5. Zusammenfassung:

Die festgestellten Schallemissionsergebnisse erfüllten frühzeitig innerhalb der üblichen Belastungsgrenzen die angewandten Alarm- und Abbruchkriterien. Ein Übersehen bzw. eine Falschbeurteilung des tatsächlich vorliegenden Behälterzustandes kann durch Anwendung der Verfahrenstechnik ausgeschlossen werden.

An Hand der festgestellten Schallemissionsergebnisse ist der Behälter als Klasse C-Behälter einzustufen und als nicht geeignet für den weiteren Betrieb zu klassifizieren.

Die Rissaktivierung konnte für die Standardverfahren (Pos.1) ab 15,5 bar (65% P_T) bzw. (Pos.2) 9,8 bar (41% P_T) eindeutig nachgewiesen werden und hätte bei 21,5 bar (90% P_T) bzw. 23,4 bar (97% P_T) zum Abbruch der Druckprobe geführt.

Der vorhandene Riss konnte mit 52% (Pos.1) bzw. 48% (Pos.2) gegenüber dem tatsächlichen Berstdruck des Behälters durch Aktivierung der **Warnung 1** und **Warnung 2** sowie des **Alarms 2** mit ausreichender Vorwarnung erkannt werden. Im Praxisfall wäre somit die gefahrlose Druckentlastung rechtzeitig mit ausreichendem Abstand zum Versagensdruck im Bereich des Risses möglich gewesen.

Der Behälter hielt der Wasserdruckprobe bis 24 bar ohne Beanstandung stand. Bei alleiniger Beurteilung des Behälters durch Anwendung der Wasserdruckprobe wäre die Schädigung nicht erkannt und der Behälter fälschlicher Weise als für den weiteren Betrieb geeignet eingestuft worden.

Referenzen

[1] **Zusammenfassung einschließlich Beurteilung des Schadensfalles** - Bericht des Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend in Österreich, Wien 2010

[2] **Applikation eines automatischen AT-Auswertesystemes bei der Prüfung schwer zugänglicher Strukturen** - Tscheliesnig, Schauritsch; DGZfP-Jahrestagung, Fürth 2007