

# Signalformanalyse und Korrelationstechniken

Horst KÜHNICKE \*

\* Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Institutsteil Dresden  
horst.kuehnicke@izfp-d.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Traditionell ist die Akustische Emission mit der Wahl eines Schwellwerts verbunden. Überschreitet das Schallemissionssignal diese Schwelle, spricht man von einem Ereignis und es werden Parameter wie Maximalamplitude, Ankunftszeit, usw. gebildet.

Moderne Messsysteme erlauben auch die Aufzeichnung der Signalform in der Umgebung eines Ereignisses. Signalform-Informationen können genutzt werden, um verschiedene Quellmechanismen zu unterscheiden oder die Ortung zu verbessern. Eine Möglichkeit, fehlerhafte Ortungen automatisch zu filtern, besteht darin, mit Hilfe von Korrelationsfunktionen zu überprüfen, inwieweit die ermittelten Ankunftszeiten zu ähnlichen Einhüllenden führen.

Für kontinuierliche Signale oder für sich zeitlich überlappende Quellen können keine Ereignisse definiert werden. Die üblichen AE-Parameter verlieren ihre physikalische Bedeutung. Für eine Ortung kommen nur Korrelationsverfahren in Frage. Eine Möglichkeit bietet das Beamforming-Verfahren, das nicht nur die Laufzeiten sondern auch das Dämpfungsverhalten ausnutzt. Voraussetzung ist die vollständige Aufzeichnung der Originalsignalformen. Das Messsystem Ae.net verfügt über die Möglichkeit, Signalformen mehrkanalig über mehr als zehn Stunden aufzuzeichnen. Während der Messung werden für kontinuierliche Signale online über wählbare Zeitabschnitte Parameter wie Maximalamplitude, arithmetisches Signalniveau, Crest-Faktor u.ä. ermittelt. Offline werden mit Korrelationstechniken der wahrscheinlichste Quellort und die Abstrahlungscharakteristiken der Quellen bestimmt.

Das Messsystem Ae.net ist ein Cluster von Modulen, die im Kern aus achtkanaligen ADC-Boards und dezentralen embedded Low-Power-x86-Computern bestehen. Das Echtzeitbetriebssystem ETS 13.0 sorgt für den notwendigen hohen Datendurchsatz. Über ein Standard-Ethernetkabel erfolgen die Stromversorgung, die Synchronisation und der Datenaustausch. Jedes Modul hat eine Leistungsaufnahme von nur 18 Watt, arbeitet lüfterlos und weist den Schutzgrad IP67 auf.

Erfolgreich eingesetzt wurden das Messsystem und die neuen Bewertungsalgorithmen bei der Charakterisierung von Auflockerungszonen im Salzgestein, bei der Detektion von nicht deklarierten bergmännischen Aktivitäten in Endlagern (Safegards) und bei der Behälterprüfung.

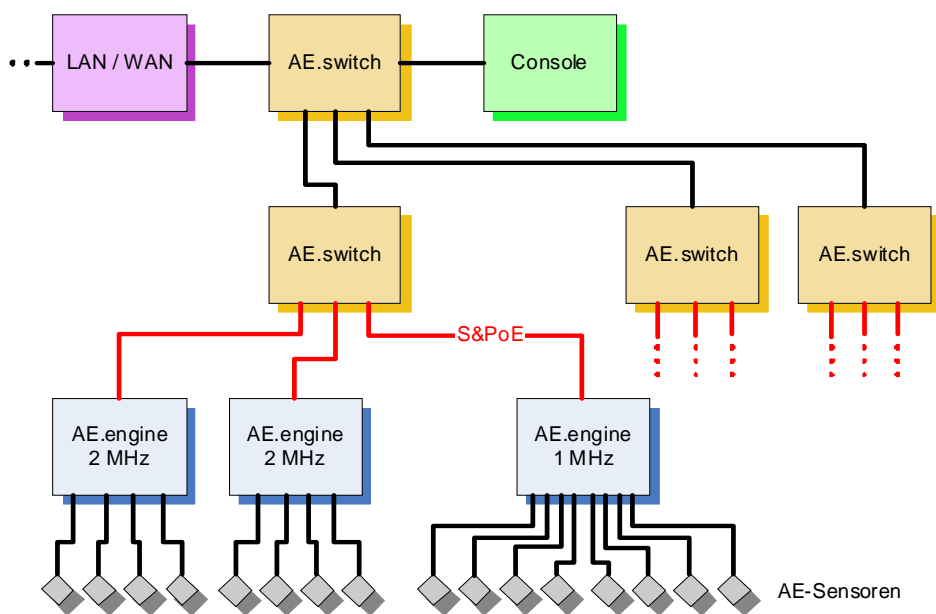
## Messtechnik

Moderne Schallemissionssysteme erlauben die komplette Aufzeichnung der digitalisierten Messsignale. Abbildung 1 zeigt eine mögliche Konfiguration des Messsystems AE.net. Die gezeigte Konfiguration besteht aus drei Modulen AE.engine4 und einem Modul AE.switch.



**Abb. 1** Beispielkonfiguration des Messsystems AE.net

Jedes Modul enthält einen embedded PC. Die Module AE.engine4 übernehmen die Digitalisierung der Signale und die vollständige Speicherung der Signale. Die Massenspeicher sind so ausgelegt, dass bei einer Abtastrate von 2MHz und einer Auflösung von 16 Bit kontinuierliche Messungen bis zu einer Dauer von 10 Stunden möglich sind.



**Abb. 2** AE.net als dezentrales Rechnernetzwerk.

Das Modul AE.switch sorgt für die Synchronisation der Messmodule AE.engine und stellt verschiedene lokale und Remote-Anschlüsse für graphische Bedienoberflächen bereit.

Jedes Modul enthält einen embedded PC und hat auf Grund der eingesetzten Low-Power-Prozessoren eine maximale Verlustleistung von 20 Watt. Das ermöglicht geschlossene lüfterlose Gehäuse, die zurzeit den Schutzgrad IP67 besitzen. Wegen der hermetischen Gehäuse können auch explosionsgeschützte Varianten aufgebaut werden. Untereinander sind die Module lediglich mit einem einzigen Standard-Ethernetkabel verbunden, das sowohl den Datenaustausch, die Taktsynchronisation als auch die Stromversorgung übernimmt. Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Systems als dezentrales Rechnernetzwerk. Diese Struktur sorgt dafür, dass unabhängig von der Ausbaugröße für einen Messkanal immer die gleiche Rechenleistung zur Verfügung steht und eine einfache Einbindung in ein bestehendes Netzwerk möglich ist.

Der Entwicklungsstand des Systems, das für die unten beschriebenen Messungen eingesetzt wurde, ist ausführlich in [1] beschrieben. Abbildung 3 zeigt die Prinzipschaltung des neusten Moduls AE.engine8. Dieser ist mit 8 AE-Kanälen ausgestattet. Damit lassen sich Messsysteme mit großen Kanalzahlen preisgünstig realisieren. Gleichzeitig wird auf ein neues 64-Bit Echtzeitbetriebssystem umgestellt. Diese Umstellung gewährleistet aufgrund der wesentlich höheren Anzahl von 16-Bit Vektorregistern, dass jetzt 8 Kanäle pro AE.engine mit der gleichen Performance wie bisher 4 Kanäle verarbeitet werden können. Auch komplizierte Auswertelgorithmen kommen dadurch mit weniger Rechenzeit aus.

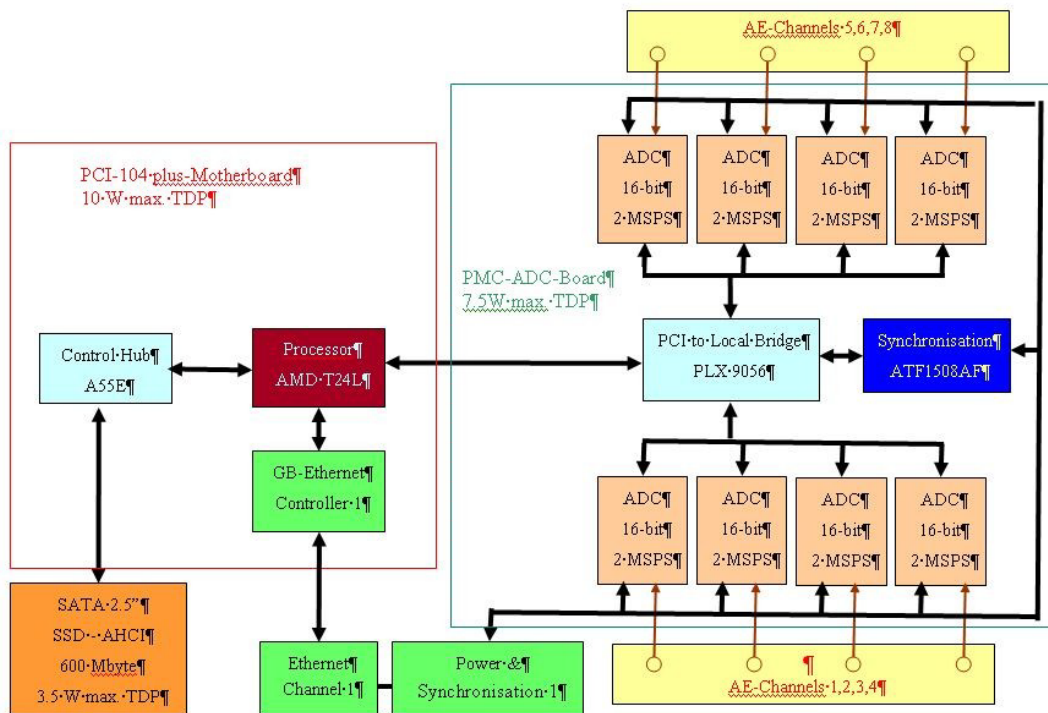


Abb. 3 Schema des neuen achtkanaligen Moduls AE.engine8

Eine wichtige Rolle spielen Datenkompressionsmethoden. Dabei sind Verfahren mit fester Kompressionsrate für hochfrequente Echtzeitanwendungen besonders geeignet. Für das Schallemissionssystem AE.net wurde eine speziell angepasste Kompressionsmethode **Modified Differential Square Root Compression (MDSRC)** entwickelt [2]. Diese Methode besitzt eine feste Kompressionsrate von 50%.

## Auswertelgorithmen

Die beiden unten beschriebenen Anwendungsbeispiele nutzen Korrelationstechniken, die dem Beam-Forming-Verfahren ähneln. Diese Methoden sind für die Ortung von sehr kleinen Signalamplituden, sich zeitlich überlagernden und kontinuierlich emittierenden Quellen geeignet.

Beim Beam-Forming-Verfahren werden die Signale aller Sensoren zeitverschoben und entsprechend ihrer Entfernung amplitudenkorrigiert addiert. Der wahrscheinlichste Quellort ist derjenige mit dem größten Summensignal.

Grundlage dieser Ortungsalgorithmen ist die folgende Likelihood-Funktion:

$$\begin{aligned}\Gamma(\vec{r}_S, t) &= \sum_k \alpha_k \cdot \Gamma_E^k(\vec{r}_S, t) + \beta_k \cdot \Gamma_C^k(\vec{r}_S, t) \\ \Gamma_E^k(\vec{r}_S, t) &= \sum_{i=0}^N \int_{t-\Delta/2}^{t+\Delta/2} f_i^2(t' - \tau_k(\vec{r}_S, \vec{r}_i)) \cdot dt' \\ \Gamma_C^k(\vec{r}_S, t) &= \sum_{i=0}^N \sum_{j=i+1}^N \int_{t-\Delta/2}^{t+\Delta/2} f_i(t' - \tau_k(\vec{r}_S, \vec{r}_i)) \cdot f_j(t' - \tau_k(\vec{r}_S, \vec{r}_j)) \cdot dt' \\ &\text{mit } \tau_k(\vec{r}_S, \vec{r}_i) = \frac{|\vec{r}_S - \vec{r}_i|}{c_k}\end{aligned}$$

Der Term  $\Gamma_E^k(\vec{r}_S, t)$  beschreibt dabei den Dämpfungsterm und  $\Gamma_C^k(\vec{r}_S, t)$  den Term, der die Zeitdifferenzen berücksichtigt. Summiert wird über alle Wellenmoden  $k$ . Frei wählbar sind die Gewichtskonstanten  $\alpha_k$  und  $\beta_k$ . Zum Beispiel bedeutet die Wahl eines im Vergleich zu  $\beta$  hohen  $\alpha$ -Wertes, dass der auf der Dämpfung beruhende Ortungsalgorithmus als sicherer eingeschätzt wird als der auf die Zeitdifferenzmessung aufbauende. Für Quellmechanismen, die eine ausgeprägte Abstrahlcharakteristik besitzen, muss  $\beta$  wesentlich größer als  $\alpha$  gewählt werden. Für in alle Raumrichtungen gleichförmig abstrahlende Quellen ist der theoretisch beste Wert  $\beta = 2 \alpha$ .

Genauer beschrieben wird das Verfahren in [2] und [3].

## Anwendung Lagertankprüfung

Öl ist ein wichtiger Rohstoff. Um die stetige Produktion zu sichern, werden in Lagertanks mit einem typischen Volumen von 20 000 m<sup>3</sup> Vorräte gehalten. Problematisch sind eventuelle Lecks im Tankboden, weil auslaufendes Öl erst nach erheblicher Kontamination des Bodens entdeckt wird. Gesicherter Stand der Technik sind Wanddickenmessungen mit Ultraschall oder Wirbelstrom im Abstand von etwa fünf Jahren. Diese Prüfungen sind sehr aufwendig, da die Behälter entleert und gereinigt werden müssen.

Ein naheliegender Gedanke ist, die bewährten konventionellen Tankprüftechniken Ultraschall oder Wirbelstrom mit Robotern bei gefülltem Tank durchzuführen. Mehrere internationale Versuche, diesen Weg zu beschreiten, waren jedoch nicht erfolgreich. Gegen den Einsatz von Robotern sprechen folgende Punkte:

- Das Innere der Lagertanks gehört zur Explosionsschutzzone 0. Da die Roboter eine erhebliche elektrische Leistungsaufnahme besitzen, sind in der Zone 0 sehr aufwendige Explosionsschutzmaßnahmen notwendig.

- Am Tankboden bilden sich je nach gelagertem Produkt und Korrosionsfortschritt Schichten, die die konventionelle Prüfung mit Ultraschall oder Wirbelstrom behindern.
- Bei vielen Produktarten behindern Einbauten wie Rührwerke oder Heizungen den Einsatz der Robotertechnik.

Aus diesen Gründen werden heute von vielen Raffineriebetreibern die Probleme beim Einsatz von Robotern als nicht lösbar angesehen bzw. sind die Kosten für deren Überwindung so hoch, dass keine Vorteile gegenüber den konventionellen Prüftechniken mit Leeren und Reinigen erwartet werden.



**Abb. 4** Lagertank für erste Testmessungen

Seit langem gibt es Bestrebungen, die aufwendigen Prozeduren durch Schallemissionsmessungen zu ersetzen, die im gefüllten Zustand mit Sensoren an dem zugänglichen Außenmantel durchgeführt werden. Eine Tankbodenprüfung mit Akustischer Emission kostet nur etwa 10% einer konventionellen Prüfung mit Ultraschall oder Wirbelstrom.

In den vergangenen Jahren wurden bereits Schallemissionsprüfungen von verschiedenen Prüfdiensten durchgeführt. Eine umfassende allgemeine Anerkennung bei allen Betreibern hat diese Prüftechnik trotz ihrer großen wirtschaftlichen Vorteile bisher nicht gefunden. Bemängelt wird von kritischen Aufsichtsbehörden,

- dass die Prüfergebnisse von unterschiedlichen Schallemissionsprüfteams teilweise nicht übereinstimmen und
- dass es auch keine Übereinstimmung der Schallemissionsergebnisse mit den Resultaten der konventionellen Ultraschall- oder Wirbelstromprüfung gibt.

Die Ursachen für beide Kritikpunkte hängen mit der Tatsache zusammen, dass das Verfahren Akustische Emission die Intensität der momentanen Korrosion misst. Für den Schädigungsgrad des Tankbodens ist aber die Summe des Korrosionsfortschritts über die gesamte Betriebszeit entscheidend. Der Korrosionsfortschritt hängt vor allem von der



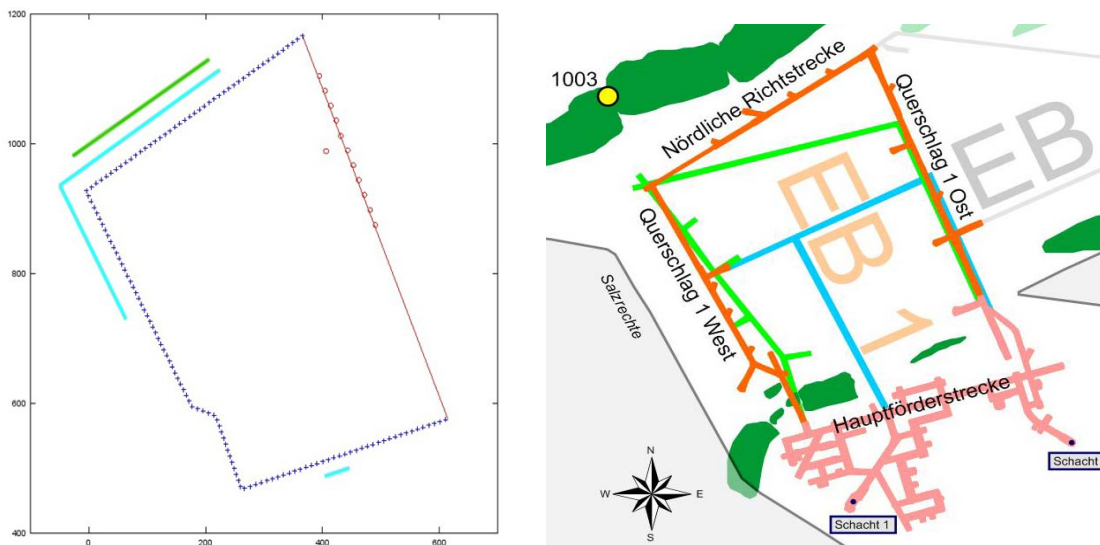
Konzentration korrosionsfördernder Bestandteile im Rohöl ab, die sich von Charge zu Charge ändern kann. Sich aller fünf Jahre wiederholende Schallemissionsprüfungen können deshalb den Gesamtschädigungszustand nur ungenügend widerspiegeln.

Um die Aussagesicherheit zu verbessern, schlagen wir eine kontinuierliche Überwachung der Tankböden vor. Der Abtrag durch Korrosion kann dann durch Integration der Schallemissionsaktivitäten am Tankboden bestimmt werden. Dazu wird ein fest installiertes Messsystem pro Tank benötigt. Der durch den technischen Fortschritt generierte Preisverfall von mikroelektronischen Komponenten erlaubt in naher Zukunft solche Überwachungskonzepte preisgünstig zu realisieren.

Bei der einmaligen Prüfung ist es relativ einfach, durch entsprechende Maßnahmen Störgeräusche zu unterdrücken. Eine quasikontinuierliche Überwachung muss unter schlechteren Signal-Rausch-Verhältnissen funktionieren. Das Beam-Forming-Verfahren ist für diese Aufgabe besonders geeignet.

### Anwendung Safegards

Laut Artikel III des Vertrags über die Nichtverbreitung von Kernwaffen verpflichtet sich jeder Nichtkernwaffenstaat zu Sicherungsmaßnahmen für spaltbares Material und für Ausgangsmaterial zur Herstellung von spaltbarem Material. Hierzu zählen auch die in einem zukünftigen Endlager eingebrachten hochradioaktiven Abfälle. Dazu sind Messverfahren notwendig, mit denen nichtdeklarierte bergmännische Aktivitäten in der Umgebung des eingelagerten Kernmaterials detektiert werden können.

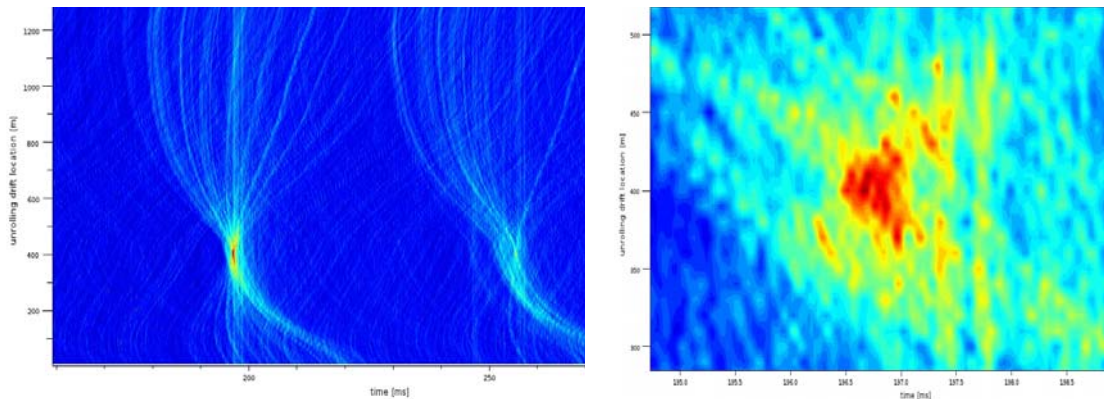


**Abb. 5** Gorleben 850 m Erkundungssohle (links vereinfachtes Modell)

In einem ersten Versuch wurde getestet, bis in welche Entfernungen und unter welchen Nebengeräuschen nichtdeklarierte bergmännische Aktivitäten im Erkundungsbergwerk Gorleben geortet werden können.

Zunächst wurde ein vereinfachtes Modell des Grubengebäudes erstellt, das nur auf den großen Hauptstrecken basiert. Der linke Teil von Abbildung 5 zeigt dieses Modell. Um die Rechenzeit zu minimieren, wurde angenommen, dass sich alle Quellen in der unmittelbaren Umgebung dieser Hauptstrecken befinden. Im Querschlag 1 Ost wurden 12 Sensoren (rote Kreise in Abb. 5 links) montiert. Bis auf einen, der sich in einer vorhandenen Nische befindet, liegen alle auf einer Linie am westlichen Stoß des Querschlags. Diese für die Überwachung des gesamten Grubengebäudes ungünstige

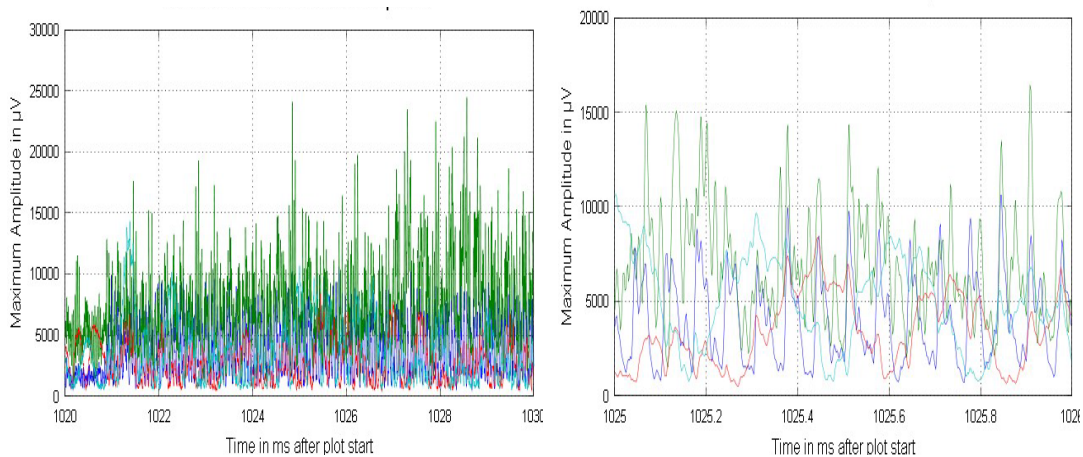
Anordnung musste gewählt werden, weil für diesen ersten Versuch nur 100 m lange Kabel zur Verfügung standen.



**Abb. 6** Ortung eines Einzelimpulses mit  $\alpha = 1$  und  $\beta = 2$  (Bolzenschuss)

In den folgenden Abbildungen werden deshalb die Quellorte auf der linearen Abwicklung der Hauptstrecken dargestellt (Ordinate). Die Abszisse ist eine Zeitachse. Farblich codiert ist die Kurzzeitwahrscheinlichkeit, dass sich die Quelle an einem Punkt der Hauptstreckenabwicklung befindet.

Abbildung 6 zeigt die Ortungsergebnisse für eine impulsförmige Quelle. Es handelt sich hierbei um einen Bolzenschuss im den Sensoren gegenüberliegenden Querschlag 1 West. Dunkelrot sind die Bereiche mit der höchsten Quellortwahrscheinlichkeit. Rechts sieht man einen vergrößerten Ausschnitt der linken Darstellung. Die Impulsquelle wurde benutzt, um die frei wählbaren Parameter  $\alpha_k$  und  $\beta_k$  für das Beam-Forming-Verfahren zu optimieren.

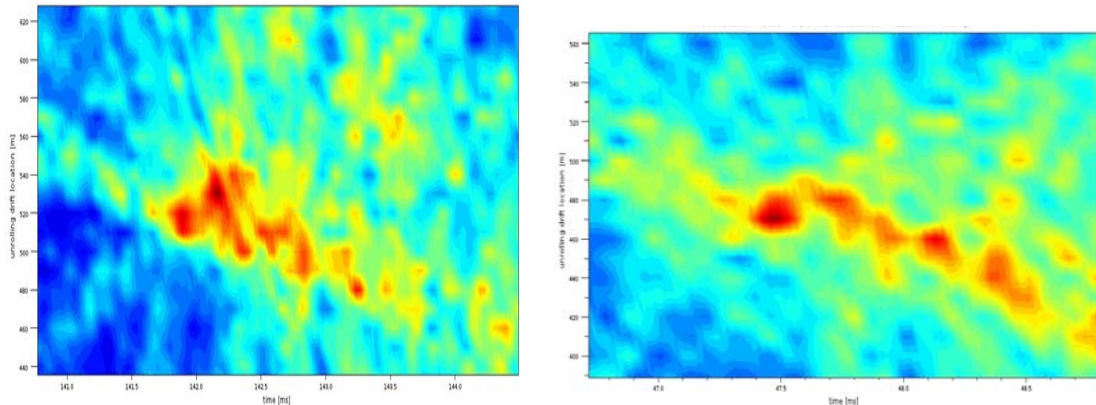


**Abb. 7** Signalformen von Bohrarbeiten (rechts gezoomt)

Interessant sind kontinuierliche und sich zeitlich überlagernde Quellen. Als Testquelle wurde zum Beispiel eine Handbohrmaschine benutzt. Abbildung 7 zeigt Ausschnitte der gemessenen Signalformen an verschiedenen Sensoren. Zeitdifferenzen können bei diesen Signalen ohne Korrelationstechniken nicht ermittelt werden.

In Abbildung 8 sind die zeitlichen Quellortwahrscheinlichkeiten für Handbohrarbeiten in ca. 300 m Entfernung im den Sensoren gegenüberliegenden Querschlag 1 West dargestellt. Im linken Teil der Abbildung wird nur an einer Stelle gebohrt und rechts sind gleichzeitig zwei Handbohrmaschinen in einem Abstand von 50 m im Einsatz. Das Beam-

Forming-Verfahren ist nicht nur für kontinuierliche Quellen geeignet. Es liefert auch nur unwesentlich schlechtere Ergebnisse, wenn gleichzeitig mehrere Quellen aktiv sind.



**Abb. 8** Ortung kontinuierlicher Geräusche mit  $\alpha = 1$  und  $\beta = 2$   
links: eine Bohrstelle      rechts: zwei Bohrstellen

Zusammenfassend wurden bei den ersten Versuchen zur Detektion nichtdeklarerter bergmännischer Aktivitäten folgende Ergebnisse erzielt:

- 10m Ortungsgenauigkeit für kontinuierliche Arbeitsgeräusche in einer Entfernung von 300 m.
- Sprengarbeiten können im Steinsalz über Entfernungen von einigen Kilometern detektiert werden.
- Gebirgsschonendes Auffahren ist etwa bis 500 m nachweisbar.
- Von der Erdoberfläche sind nichtdeklarierte Aktivitäten mit hochfrequenter Mikroseismik (30 bis 160 kHz) nicht zu detektieren.

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse findet man in [4].

## Referenzen

- [1] Abschlussbericht „Entwicklung eines Messsystems zur hochauflösenden zerstörungsfreien Erkundung von Gesteinsnahbereichen mittels Sonar“, 02 C 1184, Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Oktober 2008
- [2] H. Kühnicke „Kontinuierliche Emission und Korrelationstechniken“ 17. Kolloquium Schallemission, Bad Schandau 2009
- [3] S.T. Birchfield, A unifying framework for acoustic localization, European signal Processing Conference, Wien, Sept. 2004
- [4] J. Altmann, H. Kühnicke „Acoustic-Seismic Measurements in a Potential Final Nuclear Depository“ 33rd EARDA Annual Meeting, Budapest 2011