

# Schallemissionsanalyse in der Praxis

Christian SODEIKAT<sup>1</sup>, Robin GROSCHUP<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ingenieurbüro Schiessl · Gehlen · Sodeikat GmbH, München

Kontakt E-Mail: sodeikat@ib-schiessl.de

**Kurzfassung.** Bei zahlreichen älteren Brücken ist die Spannbewehrung stark korrosionsgeschädigt oder spannungsrissskorrosionsgefährdet. Dies kann dazu führen, dass die Tragsicherheit unklar ist. Für einen sicheren weiteren Dauerbetrieb der Brücke oder eine temporäre weitere Nutzung bis zu einem Ersatzneubau ist dann eine Dauerüberwachung bzw. ein Monitoring erforderlich.

Dieses besteht in der Regel aus einer Integration verschiedener Messsysteme, welche den möglichen Schadensszenarien des jeweiligen Bauwerks und den daraus resultierenden Schadreaktionen anzupassen sind. Die Schallemissionsanalyse (SE) oder Acoustic Emission (AE) stellt dabei das einzige Verfahren dar, mit dem Spannstahlbrüche direkt detektiert werden können. Die Sensorik muss für jedes Bauwerk speziell geplant werden, hierzu empfehlen sich Vorversuche am Bauwerk.

## 1. Einführung

Brücken werden in Deutschland regelmäßigen Prüfungen nach DIN 1076 unterzogen. Diese 3-jährigen Prüfzyklen mit den eingesetzten Prüfverfahren reichen bei vielen älteren Brücken jedoch nicht aus, um den sicheren Betrieb zu gewährleisten. Besonders gefährdete Bauwerke müssen einer Dauerüberwachung unterzogen werden, um das Tragverhalten kontinuierlich zu überprüfen und zunehmende Schädigungen im zeitlichen Verlauf zu erfassen. Ferner sollen singuläre Ereignisse/Schädigungen erfasst werden, die auf ein Bauteilversagen, im schlimmsten Fall auf ein Bauwerksversagen, hindeuten bzw. dieses ankündigen.

Eine Dauerüberwachung besteht in der Regel aus unterschiedlichen Messverfahren, die in Kombination zu erfassen und auszuwerten sind. Häufig kombiniert werden z.B. Verformungsmessungen am Bauwerk, Temperaturmessungen (zur Kompensation der daraus resultierenden Verformungen), Dehnungsmessungen an Bauteilen (z.B. am Spannstahl), Schwingungsmessungen (zum Erfassen veränderlicher Steifigkeiten) und Messungen zur Detektion von Rissen (z.B. mit Glasfaseroptik). Bei Bauwerken, bei denen mit Spannstahlbrüchen zu rechnen ist, empfiehlt sich die gezielte Überwachung mit Schallsensorik. Mit dem Messverfahren der AE können Spannstahlbrüche detektiert und bei geeigneter Anordnung der Sensoren auch lokalisiert werden.

## 2. Einsatzgebiete der Schallemissionsanalyse an Brücken

Die SE bietet insbesondere bei folgenden Bauwerken bzw. Bauwerkssituationen gegenüber anderen Messmethoden entscheidende Vorteile, siehe auch [1, 2]. Weitergehende Informationen zur Installation und zum Betrieb können [3, 4, 5] entnommen werden.



## 2.1 Spannungsrisskorrosionsempfindliche Spannstähle [1]

AE stellt bei Bauwerken, die mit spannungsrisskorrosionsempfindlichen Spannstählen hergestellt wurden, das einzige Monitoringverfahren dar, mit dem Spannstahlbrüche kontinuierlich erfasst werden können. Das Versagen erfolgt schlagartig und verformungsarm (Spröbruch). Korrosionsnarben und Anrisse an Spannstählen können auch in Hüllrohrabschnitten entstehen, welche ordnungsgemäß verpresst sind und keine erhöhten Chloridgehalte aufweisen. Mögliche Korrosionsursachen können z.B. sein:

- Vorkorrosion der Spanndrähte durch zu lange Verweilzeit der Drähte im Hüllrohr vor der Injektion des Einpressmörtels
- Vorkorrosion der Spanndrähte durch eingedrungenes Blutwasser aus dem Betoniervorgang
- Verpressfehler während der Injektion
- Entmischung des Einpressmörtels durch ungünstige hydraulische Verhältnisse im Hüllrohr
- Fehlerhafte Zusammensetzung des Einpressmörtels und infolgedessen Entmischung des Einpressmörtels.

## 2.2 Spannstahlbrüche ohne Spannungsrisskorrosionsgefahr

Spannstähle können bruchgefährdet sein, auch wenn die Stähle selbst nicht spannungsrisskorrosionsgefährdet sind. Über nicht funktionsfähige Abdichtungen und Übergangskonstruktionen, wasserführende Risse, Spritzwasser etc. können Tausalze bis zu den Hüllrohren und den Spannstählen gelangen und chloridinduzierte Korrosion auslösen. Je nach Riss- bzw. Kerbempfindlichkeit können bereits kleine Korrosionsnarben zum Reißen der Spannstähle führen [6].

## 2.3 Entmischter Injektionsmörtel infolge hoher Verpressdrücke

Eine hoch korrosive Umgebung innerhalb von Hüllrohren kann entstehen, wenn nicht sedimentationsstabile Verpressmörtel mit hohen Drücken eingepresst werden. Durch Entmischungen des Verpressmörtels entstehen Anreicherungen an Alkalien und damit verbunden sehr hohe pH-Werte. Durch eine gleichzeitige Absenkung des elektrochemischen Potentials durch Sauerstoffverarmung wird ein sehr korrosiver Bereich innerhalb des Pourbaix-Diagramms erreicht. Spannstähle können innerhalb weniger Monate und Jahre soweit geschädigt werden, dass sie reißen. Gefährdete Bauwerke sind z.B. Brücken und hohe Türme [7, 8].

## 2.4 Unverpresste Hüllrohre

In größeren Hohlräumen innerhalb von Spanngliedern oder im Bereich der Spannanker kann es durch die eingeschlossene Luftfeuchtigkeit und wechselnden Temperaturen zu einem zyklischen Tauwasseranfall kommen. Durch den Wasseranfall und durch aus dem Verpressmörtel gelöste und auf den Spannstählen abgelagerte Salze kann es zu einem starken Korrosionsangriff kommen [9].

## 2.5 Kompensation normativ geforderter Bauwerksprüfungen durch AE

Durch besondere konstruktive Randbedingungen kann es vorkommen, dass Bauwerke nicht nach den normativen Vorgaben nach DIN 1076 oder RIL 804, Module 804.8001 und 804.8002 Ril visuell überprüft werden können, z.B. weil die Bauwerksunterseite nicht mehr zugänglich ist. In diesen Fällen ist die fehlende Inspizierbarkeit durch ein Bauwerksmonitoring zu kompensieren, wobei AE ein Teilsystem sein kann.

## 2.6 Bauwerkskontrolle während Probelastungen

Mit AE können Bauwerke während Probelastungen überwacht werden. Je nach Randbedingungen sind z.B. Rissbildungen im Betonquerschnitt, Rissuferversätze und Spannstahlbrüche detektierbar [6].

## 2.7 Überwachung rechnerisch nicht nachweisbarer Bauwerke

Hier kann AE einen wichtigen Baustein für ein Gesamtmonitoring von Bauwerken darstellen, welche auch unter Anwendung fortgeschrittener tragwerksplanerischer Analysen nicht mehr ausreichend zuverlässig nachgewiesen werden können. Gelingt z.B. der rechnerische Nachweis Riss-vor-Bruch nach der Nachrechnungsrichtlinie nicht, kann eine zunehmende Schädigung des Bauwerks in Form von Spannstahlbrüchen durch AE im zeitlichen Verlauf erfasst werden.

## 2.8 Stahlbrücken und Stahlverbundbrücken

Mit AE kann an Stahlbrücken eine fortlaufende Rissbildung an Schweißnähten erfasst und überwacht werden.

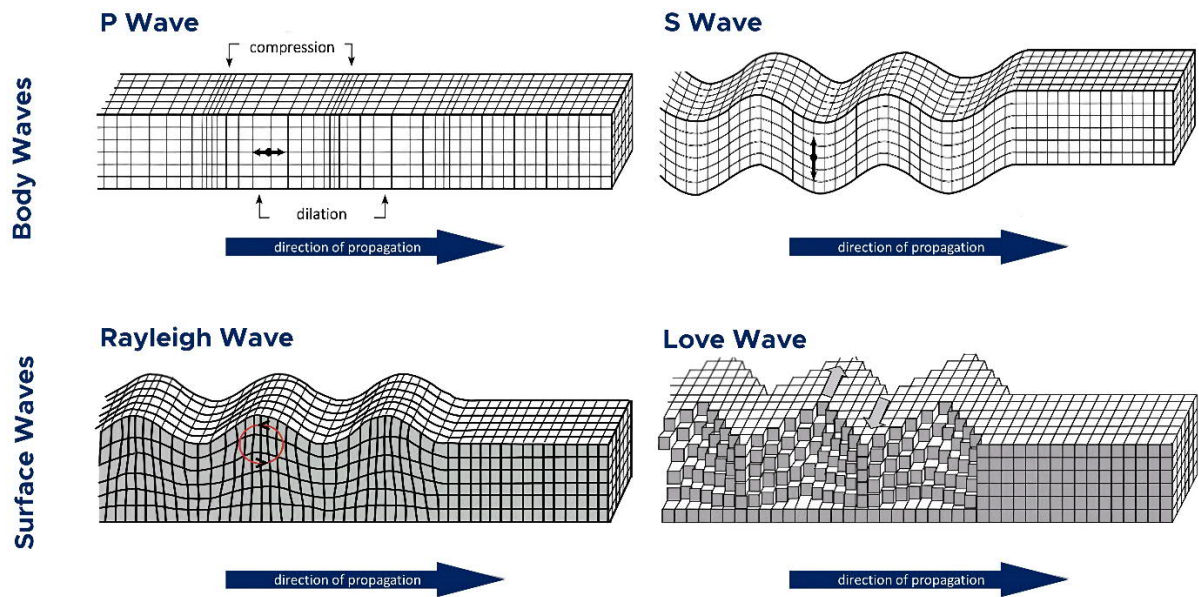
# 3. Grundlagen des Messverfahrens Acoustic Emission

## 3.1 Schallwellenarten

Mit dem Messverfahren Acoustic Emission werden Schallemissionen (SE) gemessen, welche sich als elastische Wellen bei spontaner Energiefreisetzung in Festkörpern ausbreiten. In Festkörpern mit Oberflächen entstehen bei Schallereignissen folgende drei unterschiedliche Wellenarten, **Abb. 1** [10, 11]:

- Kompressionswelle oder Longitudinalwelle (p-Welle), Wellengeschwindigkeit in Beton rd. 3.500 – 4.500m/s
- Scherwelle (s-Welle); Wellengeschwindigkeit in Beton rd. 2.400 – 2.900m/s
- Oberflächenwelle (Rayleigh-Welle); Wellengeschwindigkeit in Beton rd. 2.200 – 2.600m/s

Für die Auswertung von AE Daten kann es dabei entscheidend sein, welche Wellenart das gemessene Signal dominiert. Zu beachten ist ferner, dass sich der Schall auch entlang des Bewehrungs- und Spannstahls ausbreitet und die Schallgeschwindigkeit mit 5.900 m/s (p-Welle) und 3200 m/s (s-Welle) in Stahl deutlich größer ist.



**Abb.1:** Unterschiedliche Wellenarten in Festkörpern. Abb. aus Wikipedia.

### 3.2 Schallquellen

Schallereignisse in Bauwerken können verschiedene Quellen haben und werden wie folgt eingeteilt:

#### Primäre Schallquellen [12]

Allgemeine Bruchereignisse, Spannstahlbrüche, Betonstahlbrüche, Rissentstehung im Beton oder Stahlbauteilen, Verbundversagen zwischen Bewehrung und Beton, Aufreißen von Schweißnähten

#### Sekundäre Schallquellen [12]

Reibung von Rissufern, Interaktion von Bewehrung und Beton, Reibung von Spannstahl in unverpressten Hüllrohren

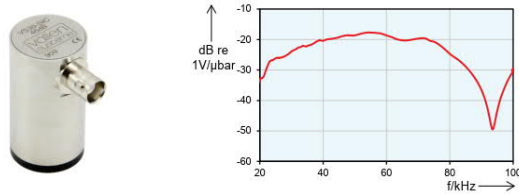
#### Tertiäre Schallquellen [1]

Schallereignisse mit Ursprung außerhalb des Bauwerks, z.B. Arbeiten am Bauwerk (Ausführung von Bohrungen, Arbeiten mit mechanischen Hämmern etc.), Unfall- bzw. Anprallereignisse, Kratzen von Schaufeln von Schneeräumfahrzeugen an Fahrbahnoberflächen etc.

### 3.3 Sensorik

An Bauteiloberflächen entstehen durch Schallwellen Bewegungen senkrecht zur Bauteiloberfläche, welche i.d.R. von den piezoelektrischen Elementen der AE Sensoren aufgenommen und in elektrische Signale bzw. elektrische Spannungen umgewandelt werden.

AE Signale weisen ein breites Frequenzspektrum zwischen 10 und 200 kHz auf [10]. Die Stärke (Amplitude) der gemessenen Schallsignale umfasst viele Größenordnungen, weshalb der Auswahl der richtigen Sensoren entscheidend ist. Bei der Überwachung von Betonbauwerken werden üblicherweise Breitbandsensoren mit einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 100 kHz und verwendet, exemplarisch dargestellt in Abb.2.



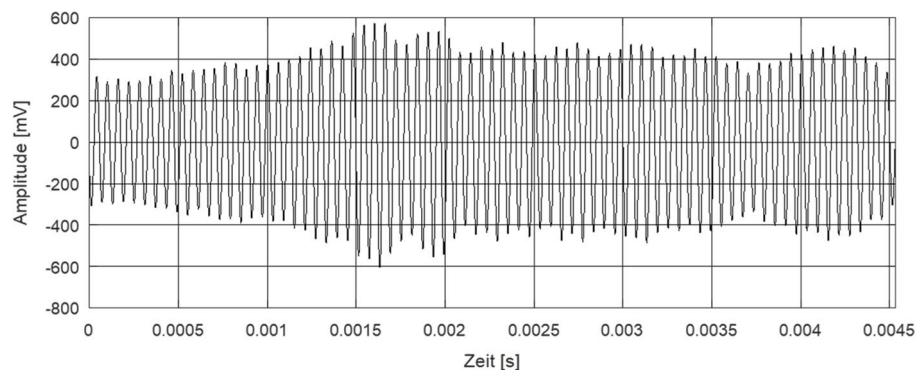
**Abb.2:** Exemplarischer Schallsensor mit Vorverstärkung und zugehörigem Frequenzspektrum, Abb. Fa. Vallen GmbH

Zur Überprüfung der Ankopplungsgüte der Sensoren ist es üblich, Bruchtests mit Bleistiftminen, sogenannte „PLB“ (pencil-lead breaks nach DIN EN 13477-2:2010 [13]) durchzuführen. Hierzu werden mit einem Druckbleistift (dies entspricht einer sogenannten Hsu-Nielson Quelle: Mienenhärte 2H, Minendurchmesser 0,5 mm, genormter Distanzring zur Sicherstellung eines definierten Bruchwinkels) an jedem Sensor in einem Abstand von rd. 10 cm von der Sensormitte fünf Bleistiftminenbrüche erzeugt, welche von den Sensoren aufgezeichnet werden müssen. Nach [14] haben Zugrisse in Beton etwa die gleiche Größenordnung der Amplitude wie Bleistiftminenbrüche.

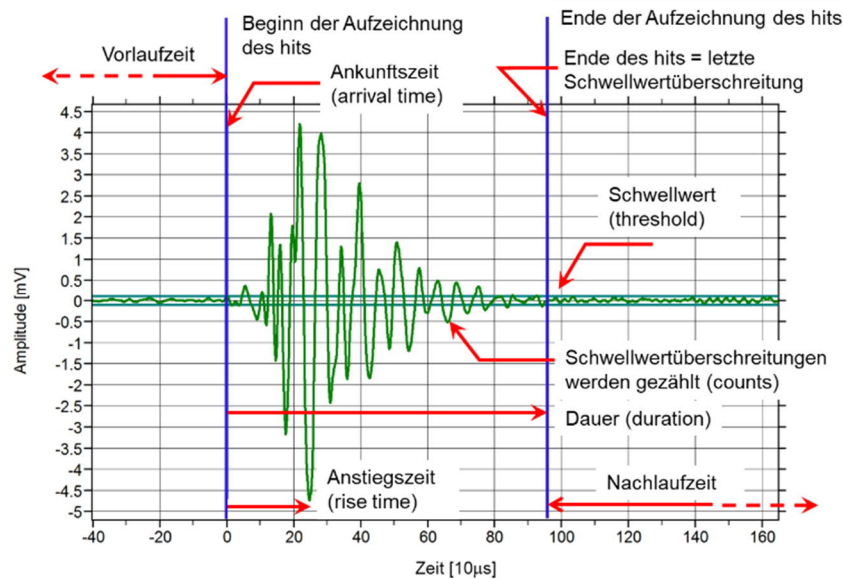
### 3.4 Datenaufzeichnung und -analyse

Ankommende Schallsignale bzw. die mechanischen Wellen werden mit AE Sensoren ununterbrochen aufgenommen und durch A/D-Wandler mit hohen Abtastraten von üblicherweise zwischen 25 ns und 100 ns in elektrische Signale umgesetzt. Diese Daten werden nicht alle gespeichert, da hierzu eine zu große Datenmenge gespeichert werden müsste.

Die AE unterscheidet zwischen kontinuierlicher Schallemission, dies kann ein permanentes akustisches Rauschen sein, Abb. 3, und sogenannten transienten Schallsignalen, Abb. 4. Transiente Signale haben einen zeitlich erkennbaren Anfang und Ende. Dieses Ereignis wird als auch „Hit“ bezeichnet. Die Speicherung von AE Signalen erfolgt in zeitlichen Abschnitten, die Auslösung der Speicherung erfolgt über Triggerkriterien. Wird ein vorab eingestelltes Triggerkriterium erreicht, d.h. ein Schwellwert (threshold) überschritten, wird die Aufzeichnung begonnen und theoretisch nach Unterschreiten des Schwellwerts wieder beendet. Für die nachträgliche Interpretation des Schallereignisses sind sowohl Messwerte vor Erreichen des Schwellwerts als auch Messwerte danach erforderlich. Aus diesem Grund wird eine vorab auf Basis von Voruntersuchungen definierte Vorlauf- als auch Nachlaufzeit gespeichert.



**Abb.3:** Kontinuierliches Schallsignal durch Arbeiten mit einer Bohrmaschine. Abb. aus [1]



**Abb.4:** Schallsignal (Amplituden/Zeitverlauf) mit Darstellung der wesentlichen Schallparameter. Abb. aus [1]

Eine direkte signalbasierte Datenanalyse, bei der exakt nachgewiesen wird, wie welche Wellen entstanden sind, welche Wege sie genommen haben, wie sie gedämpft wurden etc. ist schwierig, die Rechenalgorithmen sind noch Gegenstand der Forschung. Der gravierende praktische Nachteil ist jedoch, dass die Berechnungen erst im Anschluss an die Messungen erfolgen können. Bruchereignisse, z.B. Spannstahlbrüche sollen in realen Bauwerken jedoch Alarmmeldungen in Echtzeit generieren, um ggf. schnell Maßnahmen einleiten zu können.

In der Dauerüberwachung von Bauwerken wird deshalb eine parameterbasierte Datenanalyse durchgeführt, wobei die Auswertung der Schallsignale in der Regel über die folgenden 5 Parameter erfolgt, Tab. 1:

**Tabelle 1.** Wesentliche Parameter bei der Auswertung von AE Signalen, Tabelle aus [1]

| Parameter              | Beschreibung   |
|------------------------|--|
| Counts [-]             | Anzahl der positiven Schwellwertüberschreitungen   |
| Amplitude [dB oder mV] | Relative Signalstärke<br>$\text{dB} = 20 \log (V_{\text{sensor}}/1\text{mV})$                      |
| Energie [eu]           | Gemessene Energie<br>$1 \text{ eu} = 10^{-18} \text{ Js} \Rightarrow 10^{-14} \text{ V}^2\text{s}$ |
| Risetime R [ms]        | Anstiegszeit von Überschreitung Schwellwert bis Erreichen des Maximums                             |
| D Duration [ms]        | Zeitdauer von Erreichen bis Unterschreiten des Schwellwerts  |

#### 4. Feststellung von Bruchereignissen

Wird an einem Bauwerk über vorab eingestellte Triggerkriterien eine Alarmmeldung ausgelöst, welche auf ein Bruchereignis hindeutet, muss dieses Ereignis eingehend analysiert werden, um den Bruch zu bestätigen oder zu verwerfen. Das Vorgehen hierzu wird nachfolgend eingehender erläutert.

##### Eventbildung – Bestätigung eines lokalisierten Events

Ein Hauptkriterium bei der Bestätigung von Bruchereignissen stellt die sogenannte Eventbildung dar. Bei sinnvoller Sensoranordnung wird ein Bruchsignal i.d.R. von mehreren

Sensoren detektiert. Die Signale werden dabei aufgezeichnet und bewertet wobei folgende Definitionen gelten:

- Hit: transientes Signal mit Anfang und Ende
- Event: Zuordnung mehrerer Hits zu einem Ereignis
- Event (LE): lokalisiertes Ereignis

Die Zuordnung zu einem Event bzw. einem Localised Event bedeutet, dass aufgrund der Analyse der Schallsignale nach den ermittelten Signalankunftszeiten bestätigt werden kann, dass alle an allen Sensoren ermittelten Schallsignale aus einer einzigen Schallquelle, dem Bruch kommen.

### Typische Schallparameter

Ein Spannstahlbruch weist i.d.R. die folgenden Parameter auf, vgl. auch Abb. 4:

- Schallenergie/Amplitude => hoch
- Rise time => relativ kurz
- Duration => relativ kurz
- Counts => relativ wenige

### Lokalisierung von Schallereignissen

Die Lokalisierung eines Ereignisses ist bei der Beurteilung, ob es sich bei einem Schallereignis um einen Bruch handelt, von maßgebender Bedeutung, nicht nur weil man bei der Anzeige eines Spannstahlbruchs wissen möchte wo, im besten Fall welcher Spannstahl gerissen ist.

Zur Lokalisierung ist der Einsatz mehrerer AE Sensoren erforderlich. Bei der Überwachung nur eines Spannglieds (1D-Fall) sind mindestens zwei AE Sensoren, bei der Überwachung von Spanngliedern in einer Ebene (2D-Fall; z.B. Detektion von Spanngliedern an der Brückenunterseite) mindestens 3 AE Sensoren, bei räumlicher Detektion mindestens vier AE Sensoren erforderlich. In letzterem Fall müssen die Sensoren allerdings räumlich verteilt sein. Dies ist an realen Bauwerken häufig nicht möglich. Die AE Sensoren sollten räumlich so verteilt angeordnet werden, dass potentielle Schallereignisse innerhalb des Sensornetzes auftreten, da dann die Lokalisierung am genauesten bzw. überhaupt erst möglich ist. Die Position der AE Sensoren ist genau einzumessen und in der Auswertesoftware einzugeben.

Die Lokalisierung der Schallquelle erfolgt über einen Rechenalgorithmus, unter Ansatz der unterschiedlichen Ankunftszeiten der aufgezeichneten Hits an den einzelnen AE Sensoren. Entscheidend hierbei ist, dass die aufgezeichneten Hits aus einem Schallereignis kommen. Die Hits werden dann zum Event zusammengefasst. Würden in einem Lokalisierungsprozess Hits aus verschiedenen Schallereignissen verwendet werden, würden sich unsinnige bzw. falsche Ergebnisse ergeben. Die Sensorhersteller verwenden zur Lokalisierung jeweils eigene Rechenalgorithmen, welche für den Anwender i.d.R. nicht einsehbar sind

## **5. Sensoranordnung, Dämpfung, Schallgeschwindigkeit**

### *5.1 Grundlagen*

Zur Feststellung von Bruchereignissen ist die Lokalisierung von entscheidender Bedeutung.

Die Lokalisierung wiederum ist maßgebend von der Sensoranordnung, der Dämpfung und der Schallgeschwindigkeit abhängig.

Die erforderliche Anzahl der eingesetzten AE Sensoren zur Lokalisierung von Schallereignissen wird bestimmt durch die Stärke der Schallquelle und der Signaldämpfung innerhalb des Schalllaufweges. Ein Großteil der Dämpfung der Signale ist geometrisch bedingt. Die in einer angenommenen Punktquelle freigesetzte Energie wird auf eine sich ausbreitende Wellenfront verteilt, ohne dass Energie verloren geht. Eine weitere Dämpfung erfolgt durch Streuung der Wellen und Absorption, wobei die Dämpfungsanteile durch Absorption sehr gering sind.

Die Dämpfung wird von der Bauteilgeometrie und dem konstruktiven Aufbau beeinflusst. Schallwellen werden entlang von Stahl weniger gedämpft als quer dazu, außerdem ist die Schallausbreitungsgeschwindigkeit entlang des Stahls schneller als in Beton. Dies ist bei der Bewertung der Ankunftszeiten der Schallereignisse an den einzelnen Sensoren zu berücksichtigen. Eine Übersicht von Einflussgrößen bei der Lokalisierung von Schallquellen ist [11]a zu entnehmen.

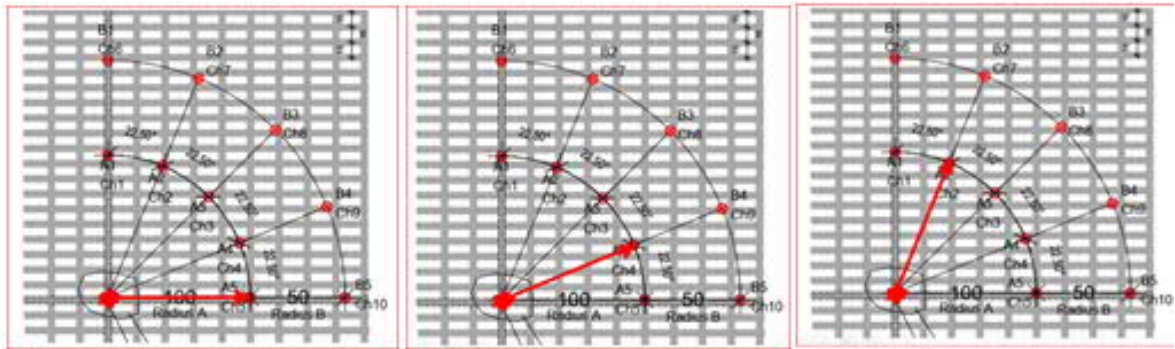
### *5.2 Bestimmung der Schallwege und Schalllaufzeiten an einer Eisenbahnbrücke*

In einem Versuch an einer längs- und quervorgespannten Eisenbahnbrücke wurde die Ausbreitung der Schallwellen infolge Spannstahlbrüche untersucht. Die Brüche wurden künstlich an geöffneten Spanngliedern durch Anflexen hergestellt, Abb. 6. zeigt die Reihenfolge der ankommenden Schallsignale. Der Bruch wurde an einem Längsspannglied ausgelöst (in Abb. 7 horizontal verlaufend dargestellt). Man erkennt, dass sich der Schall wesentlich schneller entlang der Längsspannglieder ausbreitet als quer dazu entlang des Betons. Die Schallsignale erreichen z.B. die Sensoren Ch10, Ch9 und Ch8 schneller als den Sensor Ch1 obwohl dieser 50 % weniger weit entfernt ist [15].

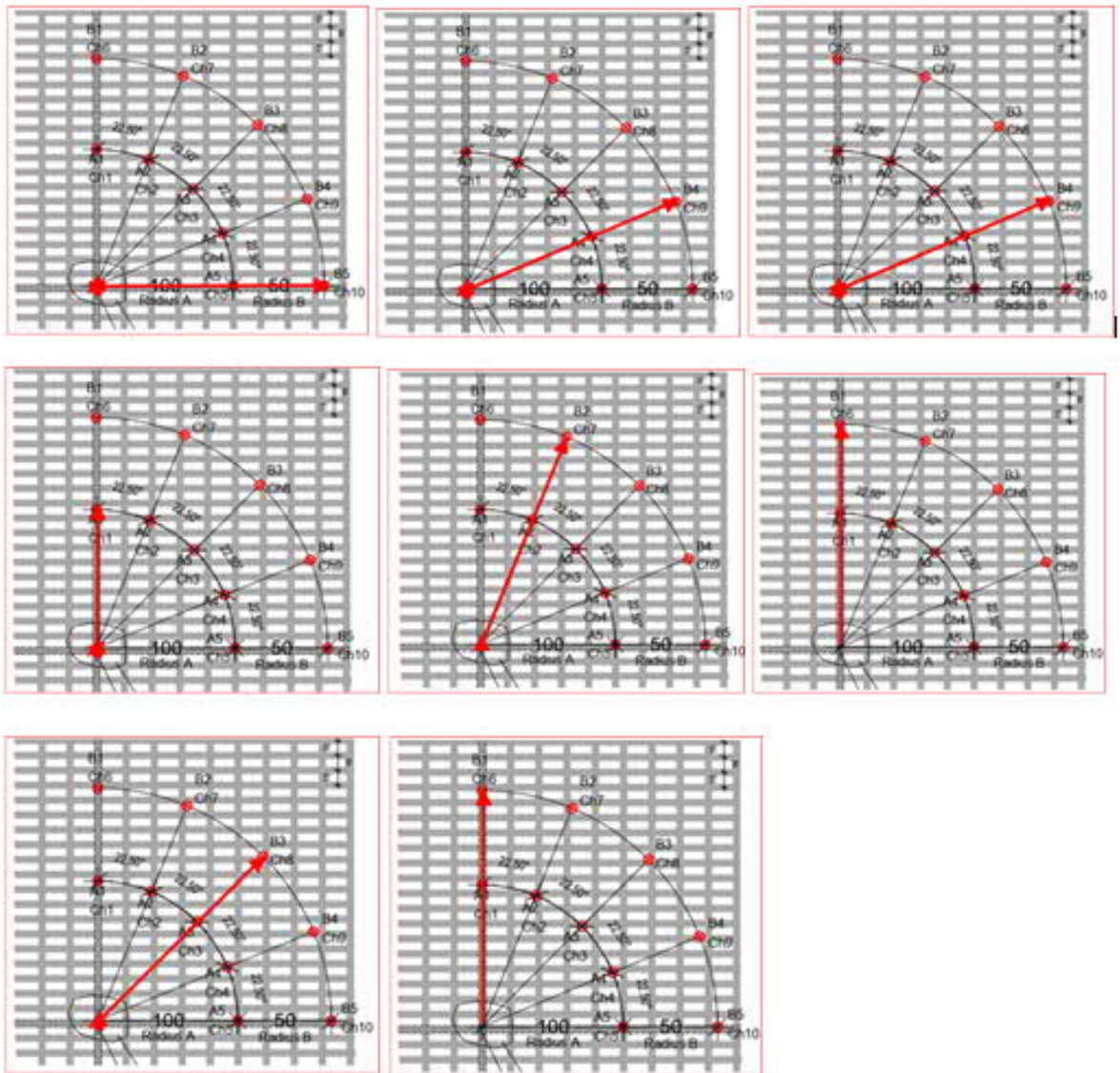


**Abb.5:** Freilegung von Spanngliedern zur Untersuchung des Spannstahls und Versuchsdurchführung zur Spannstahlbruchdetektion.





Reihenfolge der aufgezeichneten Schallsignale der einzelnen Sensoren



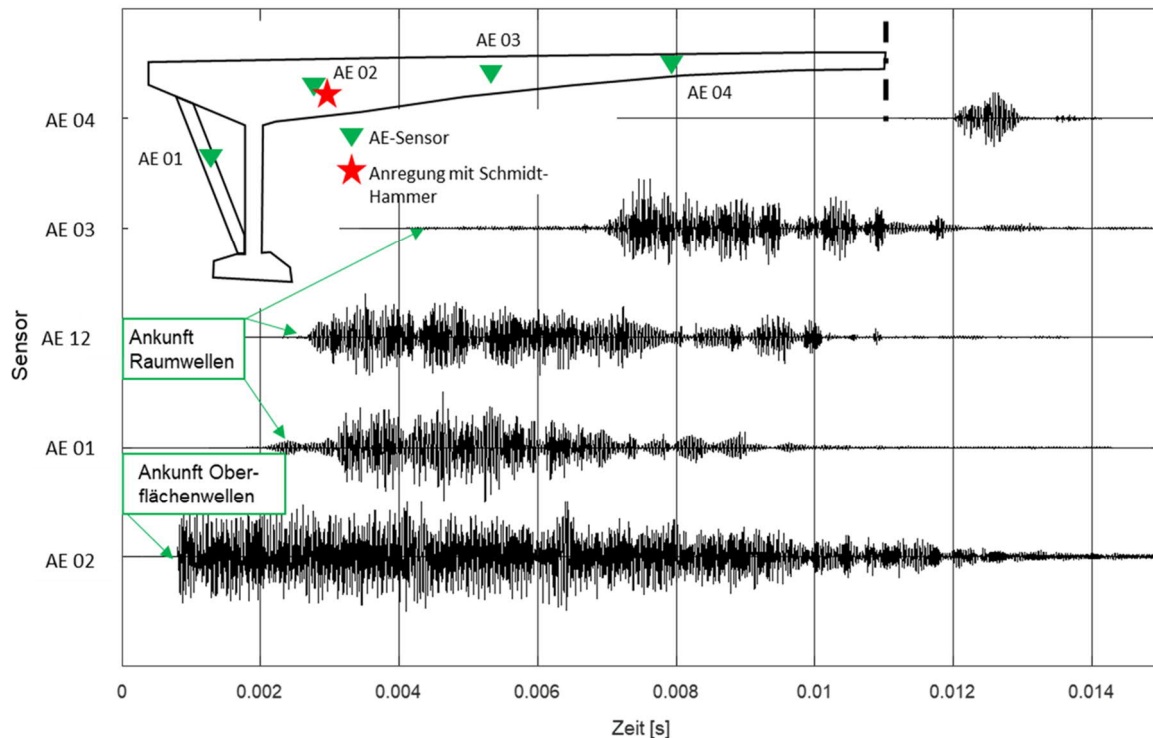
**Abb.6:** Freilegung von Spanngliedern zur Untersuchung des Spannstahls und Versuchsdurchführung zur Spannstahlbruchdetektion.

### 5.3 Versuche zur Bestimmung der Schallwege und Schalllaufzeiten an der Gänstorbrücke Ulm [6]

An der Gänstorbrücke in Ulm wurden im Vorfeld der Installation eines Acoustic Emission Systems Vorversuche zur Bestimmung der Sensoranordnung durchgeführt.

Die Dämpfung der Konstruktion wurde durch Schallereignisse untersucht, welche durch einen handelsüblichen Rückprallhammer ausgelöst wurden. Die aufgezeichneten Schallsignale, Abb. 7, bestätigen qualitativ die rechnerischen Simulationen, Abb. 8. Je nach Entfernung zur Schallquelle werden an den AE Sensoren zuerst Oberflächenwellen oder Raumwellen aufgezeichnet. Die Schallsignale mit den höchsten Amplituden und dem vergleichsweise „ungleichmäßigsten“ Verlauf stellen die Oberflächenwellen (R-Wellen) dar, die Schallsignale der Raumwellen (p- und s- Wellen) sind hingegen gleichmäßiger im Verlauf und weisen wesentlich geringere Amplituden auf.

Eine weitergehende Analyse der Schallwege zeigte, dass die Schallwellen „verschiedene Wege durch das Bauwerk gehen“ und je nach Schallleiter (Betonstahl, Spannstahl, Beton) keine einheitlichen Schallgeschwindigkeiten bestehen, was die Lokalisierung von Schallereignissen erschwert. Man erkennt jedoch auch, dass an der Oberfläche von Stahlbetonbauwerken ausgelöste Schallereignisse eine andere Signalform aufweisen als Schallereignisse im Inneren, z.B. infolge von Spannstahlbrüchen. Damit können Schallereignisse von einem Anprall an das Bauwerk von Bruchereignissen unterschieden werden.

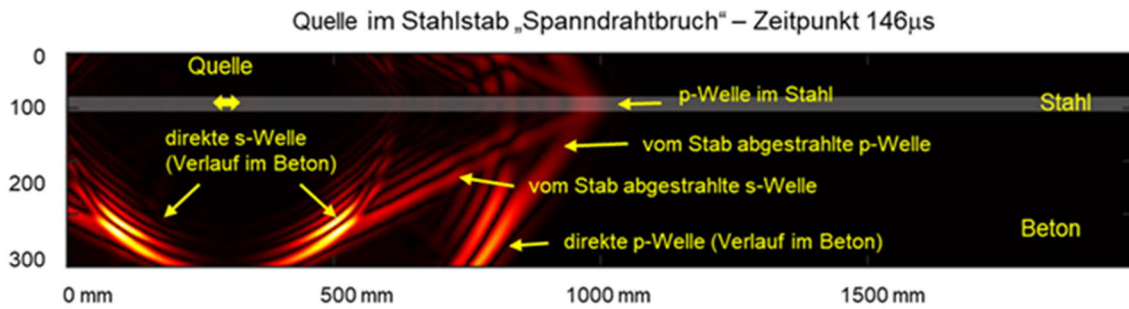


**Abb.7:** Aufgezeichnete Schallsignale von Schlägen durch den Rückprallhammer zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten und Dämpfung. Bild aus [1].

#### 5.4 Rechnerische Simulationen zur Bestimmung von Schallwegen

Zur Veranschaulichung von Schallmessungen, vgl. vorangegangene Abschnitte, wurden Simulationsberechnungen durchgeführt, mit denen eine Schallquelle an der Bauteiloberfläche (Rückprallhammerschlag) und im Bauteilinneren (Spannstahlbruch) nachgestellt wurden. Beton und Stahl wurden als homogene, isotrope Materialien angesetzt. Die Berechnungen erfolgten mit dem FDTD (Finite Difference Time Domain, numerische

Simulation im Zeitbereich) Verfahren unter Ansatz von E-Modul, Querdehnzahl und Dichte in einem 2D-Modell [16].



**Abb.8:** Simulation eines Spannstahlbruchs

Der Spannstahlbruch wurde an einem Betonbauteil mit 2000 mm Länge, 400 mm Höhe und einem Spannstahl in 100 mm Tiefe simuliert. Schallwellen breiten sich unmittelbar ab dem Bruchzeitpunkt vom Bruchort (Quelle) zunächst in Spannstahllängsrichtung aus. Anschließend erfolgt die Wellenausbreitung (Raumwellen, d.h. p- und s-Wellen) weiter entlang im Spannstahl) und ausgehend von der Quelle im Beton. Vom Spannstahl werden Schallwellen (Raumwellen) ständig auch in den umgebenden Beton emittiert, so dass sich verschiedene Wellenfronten und Wellenarten ergeben, die sich fortlaufend überlagern. Je nach Abstand von der Quelle kommen an der Bauteiloberfläche zuerst die Raumwellen aus dem Beton an, wobei aufgrund der höheren Schallgeschwindigkeit zuerst die p-Welle ankommt, bevor die s-Welle die Oberfläche erreicht. Mit zunehmendem Abstand von der Quelle überholen die vom Spannstahl emittierten Raumwellen die Raumwellen, welche direkt von der Quelle ausgehen, Abb. 8.

Die Simulation zeigt, dass zur Lokalisierung von Schallquellen/Bruchorten die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen im jeweiligen Bauteil anhand der möglichen Schalllaufwege im Beton und im Spannstahl zutreffend abgeschätzt werden muss.

## 6. Anwendungsbeispiele

Nachfolgend werden Anwendungsbeispiele für AE Systeme an Brücken dargestellt, welche aufzeigen, dass Spannstähle aus sehr verschiedenen Gründen bruchgefährdet sein können und eine sinnvolle Überwachung ohne AE nicht möglich ist.

### 6.1 Altstadttringtunnel München – spannungsrissskorrosionsgefährdeter Spannstahl [1]

Der zwischen 1967 und 1972 in Deckelbauweise errichtete Altstadttringtunnel stellt eine wichtige Ost-Westverbindung im Innenstadtbereich dar. Die Blöcke des Haupttunnels sind überwiegend 1-achsig in Längsrichtung vorgespannt und mit Verdrängungskörpern hergestellt. Die vorgespannten Blöcke wurden mit Spannstahl vom Typ Sigma St 145/160 oval 40 hergestellt, welcher gemäß der Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion als spannungsrissskorrosionsgefährdet eingestuft wird.

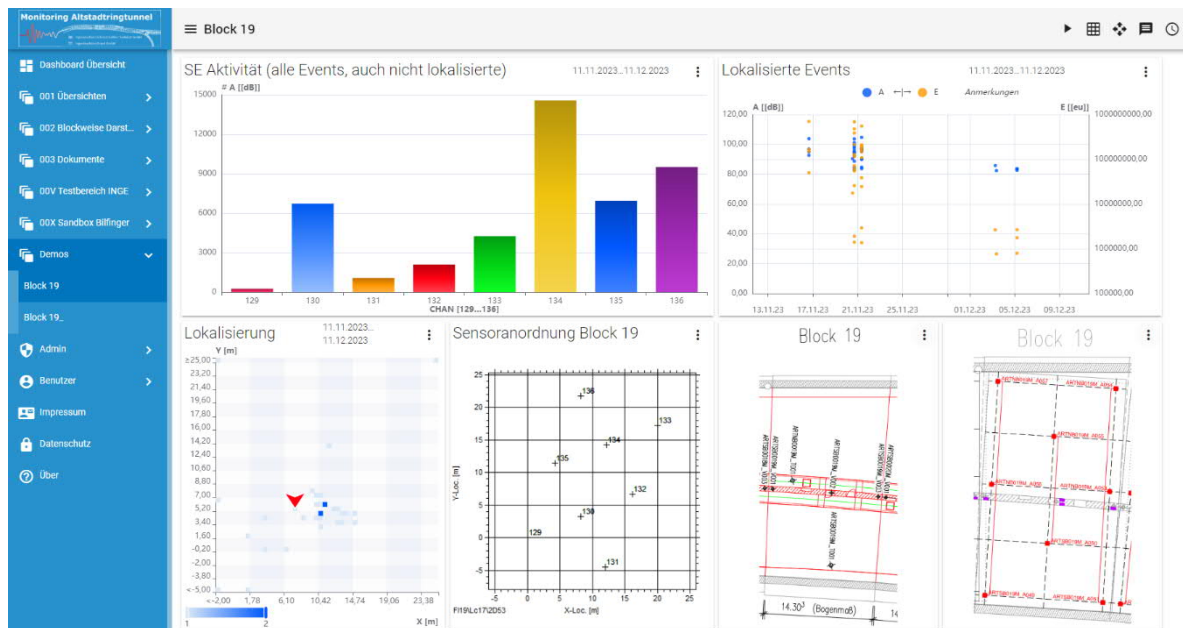
Im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen wurden zum Teil starke Korrosionserscheinungen mit entsprechender Anrissbildung infolge Spannungsrissskorrosion festgestellt.

Für den Bauherrn stellte sich nunmehr die Frage, ob und unter welchen Randbedingungen er das Bauwerk weiter betreiben kann. Aufgrund des geringen Feuchtegehalts des Einpressmörtels (Selbstaustrocknung) ist erst einmal davon auszugehen, dass die

Korrosionsprozesse am Spannstahl stark verlangsamt ablaufen. Unter der Annahme, dass die Einwirkungen auf den Spannstahl gleichbleiben, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass der Altstadtringtunnel uneingeschränkt über einen Zeitraum von 25 bis 30 Jahren weiter genutzt werden kann.

Da ein gewisses Restrisiko verbleibt, wurden von Seiten des Bauherrn jedoch Maßnahmen beschlossen, das Verhalten des Bauwerks langfristig zu überwachen und für einen möglichen Versagensfall einzelner Tunnelblöcke Vorkehrungen zu treffen. Im Rahmen einer 2-jährigen Versuchsphase an 4 Tunnelblöcken wurden durch das installierte AE System 4 unprovizierte/spontane Spannstahlbrüche detektiert, dies zeigt die Sinnhaftigkeit der Dauerüberwachung mit AE.

In diesem Anwendungsszenario wird die Überwachung mittels AE mit einem System zur direkten Messung der Durchbiegung der Tunneldecke kombiniert. Zur Bewertung der Durchbiegung wird weiterhin der vertikale Temperaturgradient innerhalb der vorgespannten Tunneldecke erfasst. Die erhobenen Messdaten werden in Echtzeit auf einer zugangsbeschränkten Online-Plattform für den Bauherren, Tragwerksplaner und die Monitoring-Fachplaner zur Verfügung gestellt, Abb. 9. Weiterhin besteht eine direkte Verbindung der Messsysteme zur Tunnelleittechnik um bei kritischen Messwerten unmittelbar Maßnahmen auslösen zu können.



**Abb.9:** Dashboard zur Online Visualisierung der Messdaten.

## 6.2 Gänstorbrücke Ulm – Bruchgefahr durch Korrosion infolge unverpresster Hüllrohre [6]

Voruntersuchungen ergaben eine lokal sehr starke Korrosionsschädigung der Spannstähle. Trotz großer Querschnittsverluste wurden noch keine Spannstahlbrüche aufgefunden, dies lässt darauf schließen, dass der Spannstahl ein vergleichsweise gutmütiges Bruchverhalten aufweist und nicht kerbempfindlich ist. Dennoch kann nicht zuverlässig abgeschätzt werden, in-wieweit bereits Spannstahlbrüche aufgetreten sind und ob und in welcher Zeit zukünftig mit Spannstahlbrüchen gerechnet werden muss. Aufgrund der großen Querschnitte der Spannstähle und der vergleichsweise geringen Anzahl an Spannstählen wirken sich Spannstahlbrüche prozentual auf die Tragsicherheit der Gänstorbrücke wesentlich stärker aus, als beispielsweise Spanndrahtbrüche an Brücken mit Sigma-Oval-Stählen. Zur dauerhaften

Überwachung auf Spannstahlbrüche wurden 36 AE Sensoren verteilt auf den vier Stegen und acht Zuggliedern angebracht.

### *6.3 Gänstorbrücke Ulm – Bruchgefahr durch chloridinduzierte Korrosion infolge undichter Ükos*

Im Bereich der vorgespannten Zugglieder wurde ein starker Chlorideintrag durch eine undichte Übergangskonstruktion festgestellt. Im Verlauf des ersten Jahres der AE Messungen wurde bereits ein Spannstahlbruch an einem Zugglied detektiert.

*Anmerkung zur Gänstorbrücke:*

*Die Gänstorbrücke ist bereits so stark geschädigt, dass eine Sanierung nicht mehr möglich ist. Das installierte Monitoringsystem soll den sicheren Betrieb bis zum fertig gestellten Neubau gewährleisten.*

## **7. Ausblick**

Anhand der Schallemissionsanalyse AE ist es möglich, an Bauwerken singuläre Schadensereignisse, z.B. Spannstahlbrüche oder Schadensfortschritte, z.B. das Aufreißen von Schweißnähten zu detektieren.

Bei den meisten Brücken mit rissgefährdetem Spannstahl kann ein zunehmender Spannstahlausfall nicht anhand zunehmender Verformungen detektiert werden. Erst bei einem Aufreißen des Brückenquerschnitts oder einer großen Anzahl von Spannstahlbrüchen werden die Verformungen so groß, dass sie über Verformungsmessungen eindeutig identifiziert werden können. In diesem Fall bedeutet dies aber häufig, dass das Bauwerk bereits schwer geschädigt ist und nicht weiter betrieben werden kann. Es ist im Interesse des Bauherrn, ständig über einen zunehmenden Schadensfortschritt Bescheid zu wissen, um rechtzeitig Maßnahmen einleiten zu können, wie z.B. die Planung/Umsetzung einer Instandsetzung/Verstärkung, falls dies möglich ist, oder eines Ersatzneubaus.

Die Langzeitdetektion von Spannstahlbrüchen an Bauwerken mit AE ist möglich, die Schallsignale infolge Spannstahlbrüche können von anderen Schallereignissen unterschieden werden. Für Schallereignisse sind in der Steuerungs- bzw. Auswertesoftware Schwellwerte festzulegen, die bei potentiellen Bruchereignissen Alarme für den zuständigen Personenkreis generieren. Jedes Alarmereignis ist nachträglich zu analysieren. Dabei ist zu bewerten, ob es sich tatsächlich um einen Bruch handelt oder eine andere Schallquelle alarmanlösend war. Die Sensorik muss für jedes Bauwerk speziell geplant werden. Es empfiehlt sich, anhand von Vorversuchen die Dämpfungseigenschaften und Schallgeschwindigkeiten des Bauwerks zu bestimmen. Anhand dieser Kennwerte sind dann Schallsensoren mit geeigneter Verstärkung auszuwählen und die Sensoranordnung möglichst so festzulegen, dass Bruchsignale von mehreren Sensoren detektiert werden können, um den Bruchort zu bestimmen.

Eine wesentliche Stärke der AE liegt darin, dass ein ganzes Bauwerk mit einer begrenzten Anzahl von Sensoren überwacht werden kann, ohne dass die Detektion von Ereignissen davon abhängt, ob Schäden an beliebigen Stellen im Bauwerk zu messbaren Veränderungen im Bereich lokaler Messstellen führen, beispielsweise lokalen Verformungen oder Dehnungsänderungen.

Dennoch entfaltet die Technologie aufgrund der komplexen Bewertung erst in Kombination mit anderen Messsystemen ihre wahre Leistungsfähigkeit, indem Ereignisse in der Gesamtschau mehrerer Systeme analysiert werden können. AE stellt deshalb bei

Bauwerken, welche einem Dauermonitoring unterliegen, zumeist nur eines von mehreren, kombiniert eingesetzten Messverfahren dar.

Die Einbindung verschiedener Messsysteme in ein Gesamt-Monitoringsystem muss sorgfältig geplant werden, um alle Messdaten in geeigneten Datenformaten und insbesondere zeitsynchron zu erhalten. Die Datenaufnahme, Datenspeicherung, Datenfusion und das Postprocessing der Messdaten erfolgen üblicherweise über sogenannte Edge-Server. Die Datenvisualisierung und das Reporting erfolgt in Dashboards, in welchen die Daten für einen bestimmten Personenkreis einsehbar und auf verschiedenen Arten darstellbar aber nicht mehr manipulierbar sind.

## Referenzen

- [1] Sodeikat, C.; Groschup, R.; Knab, F.; Obermeier, P.: Acoustic Emission in der Bauwerksüberwachung zur Feststellung von Spannstahlbrüchen. *Beton und Stahlbetonbau* 114 (2019), Heft 10., S. 707 – 723.
- [2] Schacht, G.; Käding, M.; Bolle, G.; Marx, S.: Konzepte für die Bewertung von Brücken mit Spannungsrisskorrosionsgefahr: In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2018), Heft 12, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [3] DGZfP Merkblatt B09: Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken, Fassung 2022.
- [4] DGZfP Merkblatt: Detektion von Spannstahlbrüchen mit Schallemission, erscheint in Kürze
- [5] DBV Merkblatt Brückenmonitoring, Fassung 2018.
- [6] Müller, A.; Sodeikat, C.; Schänzlin, J.; Knab, F.; Albrecht, L.; Groschup, R.; Obermeier, P.: Die Gänstorbrücke in Ulm – Untersuchung, Probelastung und Brückenmonitoring. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020), Heft 2, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [7] Bertolini, L., Carsana, M.: High pH Corrosion of Prestressing Steel in Segregated Grout, In: Andrade C., Mancini G. (eds) *Modelling of Corroding Concrete Structures*. RILEM Bookseries, vol 5. Springer, Dordrecht.
- [8] Sodeikat, Ch.; Mayer, K.; Obermeier, Ph.: Corrosion on prestressing wires due to segregation of the injection mortar – Detection of injection defects with Ultrasonic-Echo Technique. ICCRRR 2018, Cape Town South Africa.
- [9] Sodeikat, Ch.; Schönemann, U.; Lautz, M.; Schießl, P.; Gehlen, Ch.: Untersuchung an den Spannverankerungen dreier Straßenbrücken in München. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), Heft 4, S. 278-288, Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [10] Graff, K.F.: *Wave Motion in Elastic solids*. New York, NY: Dover Publications, Inc., 1991.
- [11] Gibson A., Popovics J.S.: Lamb wave basis for impact-echo method analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 131 (4) , pp. 438-443, 2005.
- [12] Große, Ch.; Schumacher, Th.: Anwendung der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken. *Bautechnik* 90 (2013), Heft 11, S. 721-731. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [13] DIN EN 13477-2:2013-04: Zerstörungsfreie Prüfung – Schallemissionsprüfung – Gerätecharakterisierung -Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen; Deutsche Fassung EN 13477-2:2010.
- [14] Fricker, St.: Schallemissionsanalyse zur Erfassung von Spanndrahtbrüchen bei Stahlbetonbrücken. ETH Zürich, Research Collection, 2010.
- [15] Roger, M.; Sodeikat, Ch.; Diwald, F.: Detektion von Spannstahlbrüchen mittels Acoustic Emission. Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 47 (2020). TU München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Centrum Baustoffe und Materialprüfung.
- [16] [www.simsonic.fr](http://www.simsonic.fr); Bossy et al, *JASA* 115, 2314-2324, 2004.