

Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau)

Dr.-Ing. Alexander Taffe,
Dipl.-Ing. Markus Stoppel
Dr. Herbert Wiggenhauser,
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin

Zerstörungsfreie Prüfverfahren haben im Bauwesen in der Vergangenheit zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie sind Bestandteil der objektbezogenen Schadensanalyse im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076, wenn für Schäden Ursache und Umfang bestimmt werden. Des Weiteren ist in der Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen der Einsatz von akustischen Prüfverfahren zur Qualitätssicherung geregelt. Unterteilt nach der Funktionsweise der Verfahren werden Prinzip und baupraktische Anwendungen zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen beschrieben.

1 Anwendungsgebiete von ZfPBau-Verfahren

Zerstörungsfreie Prüfverfahren werden im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) zur *Ermittlung des Bauwerkszustands* und zur *Qualitätssicherung* angewandt. Eine detaillierte Auflistung der Verfahren mit Kurzbeschreibung, Charakterisierung, Anwendung und Bewertung kann dem **ZfPBau-Kompodium** der BAM entnommen werden [1]. Eine detaillierte Beschreibung von ausgewählten ZfPBau-Verfahren zur Strukturaufklärung, Bestimmung von Materialeigenschaften und Feuchtemessung ist in [2] mit vielen Praxisbeispielen zusammengefasst. Ein Überblick bzgl. der Entwicklung der zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen aus der klassischen ZfP mit Erläuterungen zu Messgrößen und Interpretationshilfen ist in [3] beschrieben. Eine Zusammenstellung des Stands der Wissenschaft mit den Erkenntnissen der Forschergruppe FOR384 ist in [4] dokumentiert. Die zunehmende Verbreitung dieser Verfahren liegt zum einen an technischen Neuentwicklungen, die nunmehr eine Bearbeitung baupraktisch relevanter Prüfprobleme auf wirtschaftliche Weise ermöglichen, zum anderen an neuen Fragestellungen, die im Rahmen erhöhter Qualitätsanforderungen an Bauwerke, durch „Nachhaltige Entwicklung“ im Bauwesen und einem verstärkten Bewusstsein hinsichtlich dauerhafter Instandsetzungslösungen gestellt werden.

DIN 1076 und Objektbezogene Schadensanalyse

In Deutschland wird der Zustand von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken im Zuge von Wegen und Straßen im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 erfasst [5]. Die hierbei festgestellten Schäden werden entsprechend der Richtlinie zur einheitlichen Erfassung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung, RI-EBW-PRÜF, ausgewertet [6]. Bei komplexen Schadensbildern oder dem Verdacht weiter visuell nicht erkennbarer Schäden müssen zusätzlich zur Bauwerksprüfung detaillierte Informationen zu Art und Umfang von Schäden im Rahmen objektbezogener Analysen [7] erhoben werden. Der erste Schritt besteht in der detaillierten Erfassung der Bauwerksschäden durch zerstörende Untersuchungen, z. B. durch Entnahme von Materialproben oder Freilegen vermuteter Schadstellen bzw. durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. ZfPBau-

Verfahren werden dabei zur Lokalisierung von Schwachstellen und zur detaillierten Untersuchung von Schädstellen und deren Ausmaß eingesetzt. Aus den Ergebnissen werden die Auswirkungen der Schäden auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauteils abgeleitet. Darüber hinaus wird aus Schädigungsmodellen der weitere Schadensverlauf und dessen Einfluss auf die Restnutzungsdauer bzw. zu erwartende Instandsetzungskosten abgeschätzt. ZfPBau-Verfahren sind ein fester Bestandteil der *Objektbezogenen Schadensanalyse* (OSA), die im gleichnamigen Leitfaden [8] der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beschrieben wird. Die OSA ist Teil eines Bauwerks-Management-Systems, das zum Ziel hat, dem Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) einen Überblick über den Zustand seiner Bauwerke im Zuge von Fernstraßen und den zu erwartenden Finanzbedarf zu verschaffen.

Qualitätssicherung

Im Bereich der Qualitätssicherung können ZfPBau-Verfahren einen wertvollen Beitrag zum Nachweis der Ausführungsqualität leisten. Zerstörungsarme Prüfmethoden, wie sie in der Rili SIB und ZTV-ING geregelt sind, haben sich bewährt und tragen zum Nachweis der geforderten Ausführungsqualität bei. In Anlehnung daran ist die Anwendung akustischer ZfPBau-Verfahren zur Gewährleistung und Kontrolle eines hohen Qualitätsstandards bei Straßentunneln in geschlossener Bauweise erstmals in der *Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen* [9] geregelt. Demnach ist die Bauteildicke der Tunnelinnenschale im Rahmen der Eigenüberwachung des Auftragnehmers auf Fehlstellen bzw. Minderdicken zu prüfen.

Nachfolgend werden baupraktisch relevante Verfahren vorgestellt, deren Entwicklung in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte zu verzeichnen hat:

- *Akustische Verfahren* am Beispiel von Ultraschall und Impakt-Echo
- *Elektromagnetische Verfahren* am Beispiel von Radar, Thermografie und Radiografie
- *Elektrochemische Verfahren* am Beispiel des Potentialfeldmessverfahrens
- *Magnetische Verfahren* am Beispiel des Remanenzmagnetismusverfahrens
- *Spektroskopische Verfahren* am Beispiel der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS)

Die o.g. Verfahren werden z. T. bereits seit Jahren erfolgreich in der Werkstoffprüfung oder Medizintechnik angewandt. Dort wird ihr Einsatz – im Gegensatz zum Bauwesen - heute schon als selbstverständlich angenommen. Die Problematik der Anwendung im Bauwesen liegt darin, dass es sich bei Beton um einen inhomogenen Baustoff, bestehend aus Gesteinskörnung und Zementmatrix, handelt. Darüber hinaus weist die Zementmatrix eine porenreiche Struktur aus Gelporen, Kapillarporen und Luftporen auf. Zu lokalisierende Elemente, z. B. Spannstähle, sind von einem metallischen Hüllrohr und dem Einpressmörtel umschlossen. Die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften metallischer und mineralischer Werkstoffe sowie wechselnde Randbedingungen wie Baustofffeuchte und Erhaltungszustand der Struktur erschweren die Untersuchung von Bauteilen und Bauwerken.

2 Akustische Verfahren

2.1 Ultraschallecho

Das Ultraschall-Verfahren wird im Bauwesen u.a. für folgende Prüfaufgaben eingesetzt:

- Messung von Bauteildicken
- Ortung von Spanngliedern und Verdichtungsmängeln (z. B. Kiesnester)

Gegenstand der Forschung und Entwicklung sind:

- Risstiefenmessung
- Lokalisieren von Verpressfehlern in Hüllrohren

Baupraktisch ist die Ultraschallecho-Anordnung von Bedeutung, da nur eine einseitige Bauteilzugänglichkeit erforderlich ist. Die Funktionsweise beruht auf der gerichteten Einkopplung von Ultraschallimpulsen einer bestimmten Wellenart – in Abb. 1a für Longitudinalwellen dargestellt – in das Material über einen Sendekopf. Die Schallwellen werden bei Änderung der akustischen Impedanz (abhängig von der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und Rohdichte des Materials) im untersuchten Bauteil reflektiert. An Außenflächen, Hohlräumen und Rissen, d.h. an Übergängen bzw. Grenzflächen zur Luft, erfolgt nahezu eine Totalreflexion. Das reflektierte Signal wird über der Zeit aufgetragen (Abb. 1a). Die Messung erfolgt im hier verwendeten Niederfrequenzbereich üblicherweise mit getrennten Sende- und Empfangsprüfköpfen (bi-statische Anordnung). Grundlagen und Anwendungshinweise sind in [10] dokumentiert.

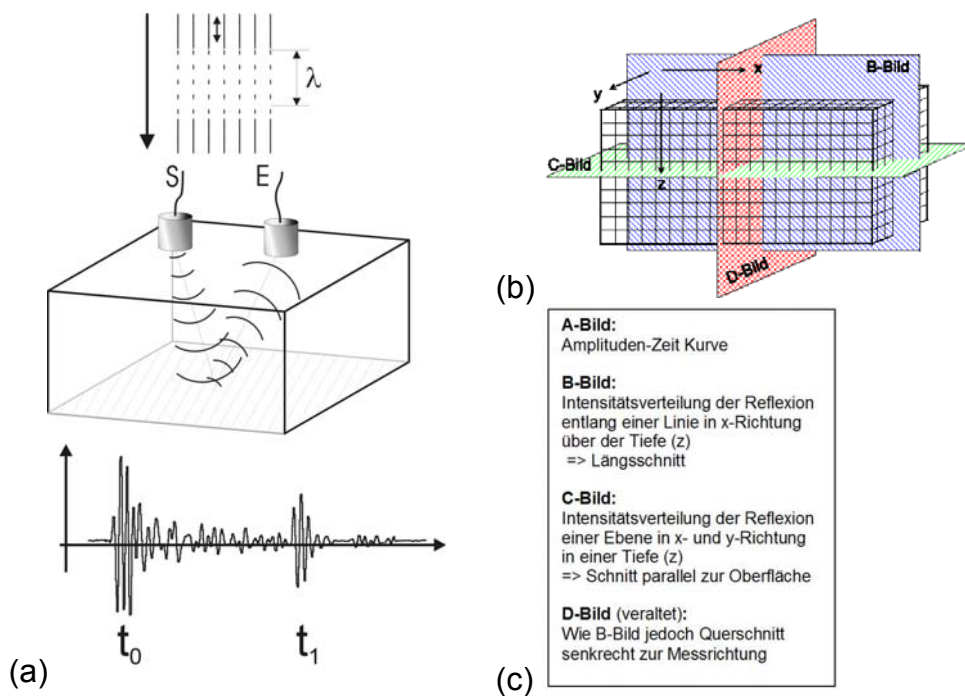


Abb. 1 (a) Reflexionsanordnung mit Signalamplitude über der Zeit aufgetragen (A-Bild); (b) Schnitte zur Darstellung von Messdaten durch das Bauteil schematisch dargestellt (B-Bild, C-Bild und D-Bild, unten) und deren Beschreibung in (c)

Da die baupraktisch verwendeten Wellenlängen ($\lambda = 2..10$ cm bei Frequenzen $f=200..40$ kHz und Schallausbreitungsgeschwindigkeit $v=4000$ m/s von Longitudinalwellen) in der Größenordnung des im Beton verwendeten Größtkorns

von 16 mm bzw. 32 mm liegen, kommt es zu Streueffekten. Verwendet man größere Wellenlängen werden die störenden Einflüsse der Streuwellen zwar geringer, wobei aber auch das Auflösungsvermögen zur Ortung von Fehl- oder Schädstellen im Bauteil reduziert wird.

Die Ankopplung planarer Prüfköpfe erfolgt mit einem Koppelmittel. Bei der Anwendung in der Praxis stellt sich dies oft als problematisch dar, da die Reste des Koppelmittels das optische Erscheinungsbild und auch die Materialeigenschaften der Oberfläche – etwa für weitere Messungen – nachteilig beeinflussen. Deshalb wurden Prüfköpfe entwickelt, die koppelmittelfrei arbeiten. Sie haben über eine Spitze einen Punktkontakt mit dem Bauteil und werden zur Messung einfach an das Bauteil gepresst.

Die besten Ergebnisse erhält man, wenn man anhand der Reflexionen und Rückstreuung eine Rekonstruktion aus dem darunter liegenden Volumen berechnet. Hierfür stehen verschiedene Methoden der Rekonstruktionsrechnung auf Basis der künstlichen (synthetischen) Apertur zur Verfügung (SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique) [11]. Die Ergebnisse dieser Berechnung können als beliebige Schnitte durch das Bauteil dargestellt werden (Abb. 1b). Abb. 2 zeigt als Beispiel die SAFT-Rekonstruktion einer Stahlbetonsohlplatte bei der ein Kiesnest in rd. 10 cm Tiefe direkt und ein weiteres indirekt über die Abschattung des Rückwandechos (bei $y \approx 100$ mm) geortet wurde [12].

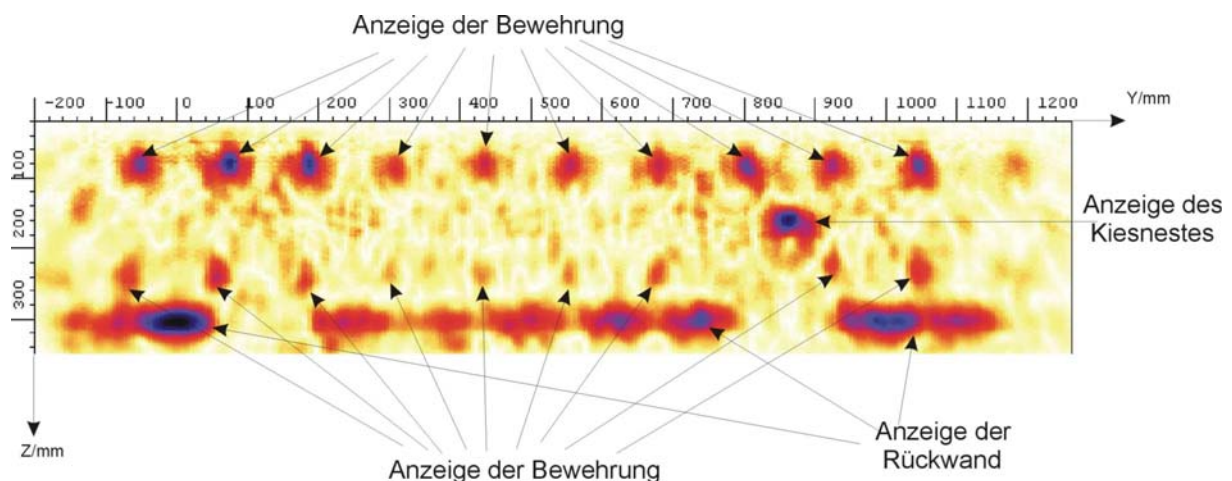


Abb. 2 SAFT-Rekonstruktion zur Ortung von Kiesnestern sowie oberer und unterer Bewehrung in einer Sohlplatte (B-Bild) [12]

2.2 Impakt-Echo

Das Impakt-Echo-Verfahren wird im Bauwesen primär zur Dickenmessung von Bauteilen eingesetzt. Grundlagen und baupraktische Anwendungen sind in [13] beschrieben. Ein Merkblatt der DGZfP ist seit 2009 erhältlich [14]. Die Ortung von Hüllrohren ist unter bestimmten Bedingungen zwar möglich ([13] [15]), sollte aber Vorzugweise mit Ultraschall durchgeführt werden.

Im Gegensatz zum Ultraschall-Verfahren, das sich i.d.R. auf die Laufzeitmessung des ersten reflektierten Impulses beschränkt, werden beim Impakt-Echo-Verfahren Vielfachreflexionen ausgewertet. Auf der Bauteiloberseite werden durch einen kurzen Schlag mit einer Kugel akustische Wellen generiert und deren Vielfachreflexionen im Bauteil gemessen (Abb. 3a).

Treten im Bauteil Änderungen der akustischen Impedanz auf, z. B. an der Bauteilrückwand oder der Grenzfläche zu einer Fehlstelle (unverpresster, mit Luft gefüllter Bereich eines Hüllrohrs), so kommt es zur Reflexion der Welle. Die auftretenden Vielfachreflexionen eines eingeleiteten Impakts werden mit Hilfe eines Sensors über die Zeit aufgezeichnet und digitalisiert. Diese Daten werden vom Zeitbereich in den Frequenzbereich übertragen (Fourier-Transformation). Dominante Frequenzen infolge von Vielfachreflexionen der Wellen an der Bauteilrückseite oder an Fehlstellen erscheinen als Anzeige im Frequenzspektrum (Frequenzbereich von ca. 2 bis 40 kHz). Der charakteristischen Frequenz (f), an der diese Spitzen auftreten, kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen (v) die Tiefe des Reflektors (d) über die Beziehung $d = v/(2 \cdot f)$ zugeordnet werden (Abb. 3a).

Die Ergebnisse können analog der Darstellung bei Ultraschall in verschiedenen Schnitten dargestellt werden. Abb. 3b zeigt ein stufenförmiges Betonbauteil und die als B-Bild dargestellten Ergebnisse der Reflexionen der Rückwand.

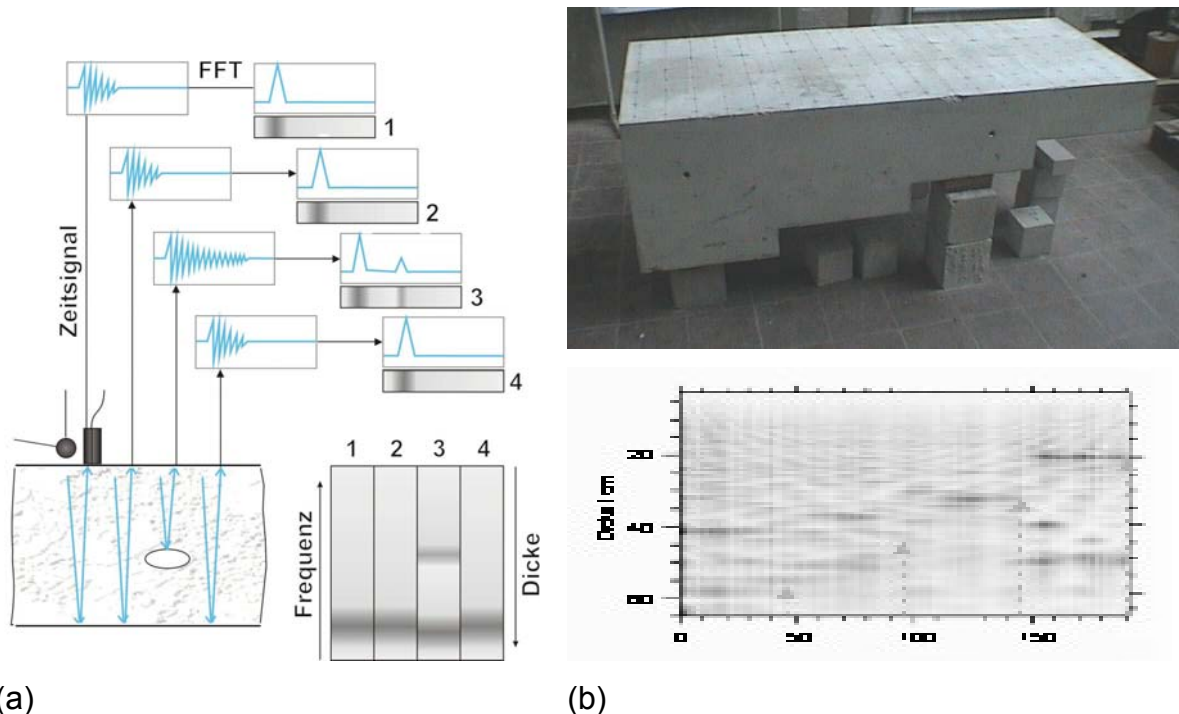


Abb. 3 (a) Vielfachreflexionen an einem Bauteil mit Fehlstellen (links unten) im Zeitbereich dargestellt (links oben); transformiertes Signal im Frequenzbereich (rechts oben); Schnitt durch das Bauteil über die Tiefe in Grauwertdarstellung (B-Bild, rechts unten) [15]
(b) Oben: Stufenförmiges Betonbauteil; unten: B-Bild Darstellung der Reflexionen der Bauteilrückwand.

3 Elektromagnetische Verfahren

Elektromagnetische Wellen werden bei der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen in verschiedenen Frequenzbereichen erzeugt bzw. detektiert:

- Radar 500 kHz bis 2,6 GHz
- Infrarot-Thermografie $3 \cdot 10^{11}$ Hz bis $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz (Wärmestrahlung)
- Radiografie 10^{16} bis 10^{21} Hz (Röntgen- und Gammastrahlung)

3.1 Radar

Radar wird im Bauwesen in verschiedenen Bereichen eingesetzt. In der 2008 überarbeiteten Richtlinie B10 der DGZfP [16] werden u.a. folgende Anwendungsbeispiele näher beschrieben:

- Ortung von Objekten in Mauerwerk
- Feuchteverteilung in Mauerwerk,
- Ortung von Spanngliedern und Bewehrung in Betonbauteilen
- Ortung von Ankern in Betonfahrbahnen
- Belagschichtdickenmessung an Brücken
- Baugrunderkundung

In [16] werden auch ausführlich die Grundlagen des Verfahrens aufgezeigt, die auf der Aussendung elektromagnetischer Wellen und deren Einleitung in das zu untersuchende Bauteil beruhen. In der Baupraxis werden zur Untersuchung von Betonbauteilen Antennen mit Mittenfrequenzen im Bereich von 500 MHz bis 2,6 GHz verwendet. Die Wellenausbreitung im Bauteil hängt von der Verteilung der dielektrischen Eigenschaften ab. Auf ihrem Weg wird die Welle an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften gestreut und reflektiert (Abb. 4).

An der Grenzfläche Luft/Beton (Bauteilrückwand, Fehlstelle) entstehen Reflexionen. An der Grenzfläche Beton/Metall (schlaaffe Bewehrung, Hüllrohr) treten Totalreflexionen auf. Die mit der Empfangsantenne aufgenommenen Reflexionen und Streuungen werden als Funktion der Laufzeit t digital aufgezeichnet (A-Bild, Abb. 4). Ist die Dielektrizitätszahl des untersuchten Baustoffs und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen bekannt, lässt sich aus der Laufzeit der Reflexionen die Tiefe der Reflektoren (Rückwand, Bewehrung, Grenzfläche/Fehlstelle) ermitteln. Stellt man die Amplituden mehrerer A-Bilder entlang einer Messstrecke farbcodiert dar, so entsteht ein Radargramm (B-Bild). Die Reflexionen der Bewehrungsstäbe sind im B-Bild an den typischen Reflexionshyperbeln zu erkennen (Abb. 5). Der Scheitel der Hyperbel markiert die Lage des Bewehrungsstahls.

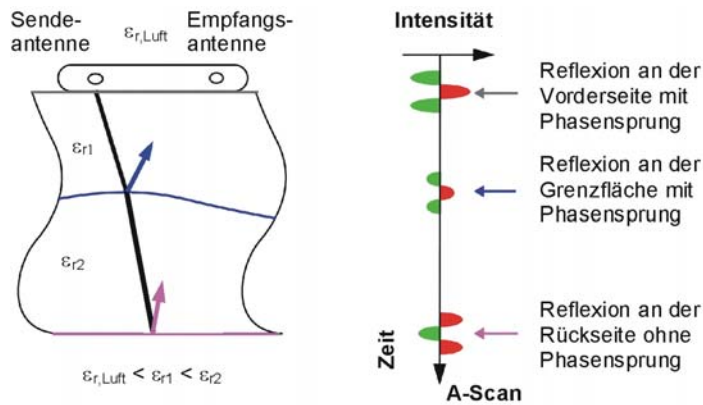


Abb. 4 Prinzip des Impulsradars; Ausbreitung und Reflexion eines Impulses

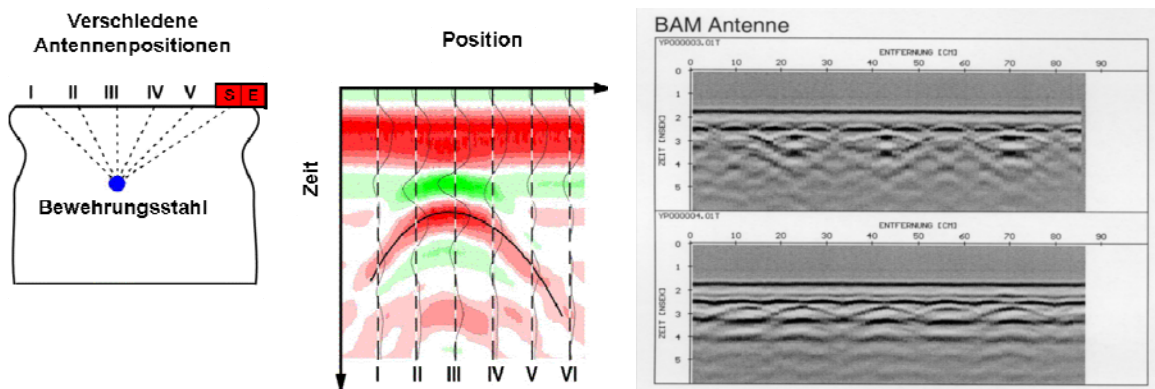


Abb. 5 Links: Verschiedene Positionen beim Überfahren einer Messstrecke mit einer Antenne. Mitte: Radargramm mit Reflexionshyperbel. Rechts: Radargramm zur Bewehrungsart entlang einer Messstrecke.

Die Anwendung der bereits im Abschnitt zu Ultraschall erwähnten SAFT-Rekonstruktionsrechnung führte auch bei Radar zur deutlich verbesserten bildgebenden Darstellung von Radar-Ergebnissen: Die typischen Reflexionshyperbeln, deren Scheitelpunkte die Lage eines Bewehrungsstahls darstellen, verschwinden und werden zu Punkten reduziert, die den Ort der Stablage angeben (Abb. 6). Diese Art der Datenverarbeitung wird bei Radar als Migration bezeichnet.

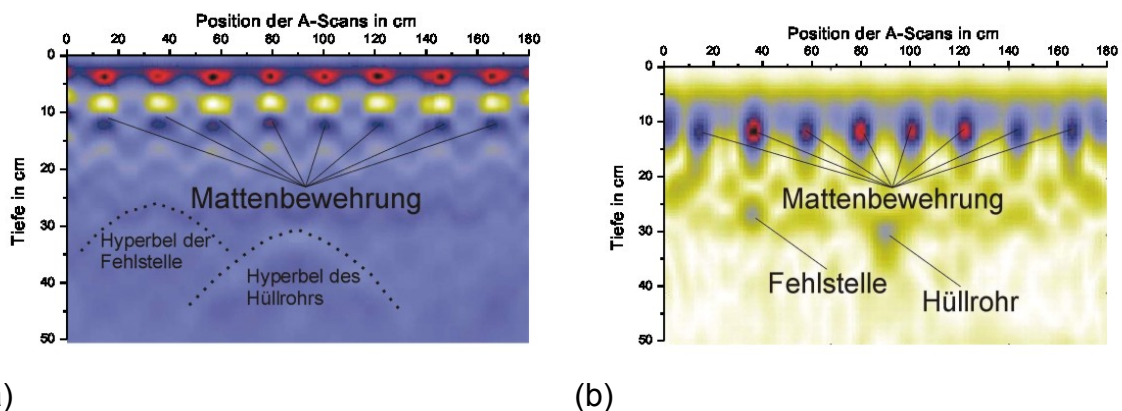


Abb. 6 Bild B11 (a) Ergebnisse einer Radarmessung an einer Stahlbetonplatte mit Fehlstelle und Hüllrohr. Die Scheitel der typischen Reflexionshyperbeln markieren die Lage von Hüllrohr und Fehlstelle. (b) Mit SAFT rekonstruierte Ergebnisse aus (a); die Reflexionen werden auf die tatsächliche Lage des Reflektors fokussiert. [18]

3.2 Infrarot-Thermografie

Die Infrarot-Thermografie umfasst berührungslose Messverfahren zur bildgebenden Aufzeichnung von Temperaturverteilungen und -änderungen an Oberflächen von Objekten aufgrund vom Objekt ausgehender Wärmestrahlung. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen passiver und aktiver Thermografie.

Die Methode der passiven Infrarot-Thermografie wird in der Bauphysik zur Ortung von Kälte- bzw. Wärmebrücken in Bauwerken sowie zur qualitativen Beurteilung von Wärmedämmung angewandt. Dieser seit Jahren bewährte Einsatzbereich wird hier nicht weiter vertieft.

Fehlstellen in oberflächennahen Bereichen werden mit Hilfe der aktiven Thermografie geortet. Dabei wird am zu untersuchenden Bauteil durch Heizen mit einem Wärmestrahler ein Temperaturgradient zur Oberfläche und/oder zur Umgebung hin erzeugt. Anschließend wird das Abkühlungsverhalten auf der Oberfläche mit einer Infrarot-Kamera bildgebend aufgezeichnet. Fehlstellen haben i.d.R. von der Umgebung abweichende thermische Eigenschaften (Dichte, spezifische Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit). Sie können durch höhere oder niedrigere Temperatur auf der Oberfläche nachgewiesen werden.

Folgende Anwendungen zur Ermittlung des Bauteilzustands und zur Qualitätssicherung werden in [17] und [19] beschrieben:

- Ortung von Fehlstellen in Beton bis rd. 10 cm Tiefe
- Ortung von Ablösungen und Fehlstellen hinter einer Fliesenschale und von Fehlstellen in der Bindeebene Fliese/Mörtel
- Ortung fehlender Verklebungen von CFK-Laminaten auf Beton mit bildgebender Darstellung
- Verpressfehler in Hüllrohren mit einer Überdeckung von 5 cm bis 8 cm

Die Erwärmungszeiten betragen je nach Tiefe der erwarteten Fehlstellen zwischen 5 und 60 Minuten. Für Untersuchung von CFK-Laminaten können bereits Erwärmungszeiten von 15 Sekunden ausreichend sein.

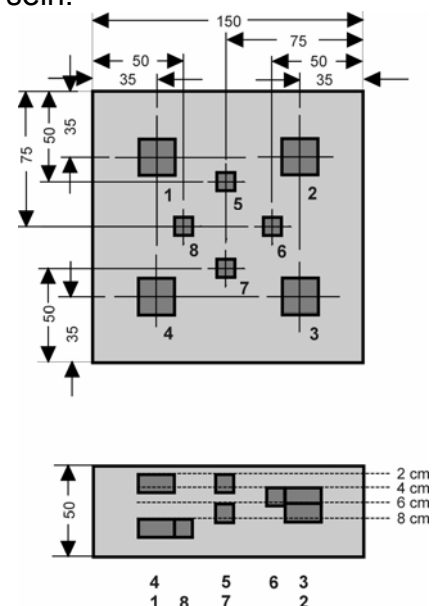


Abb. 7 Links: Thermografiekamera, Erwärmungseinheit und Betonbauteil mit Fehlstellen. Rechts: Schematische Darstellung des Betonbauteils mit Fehlstellen [17].

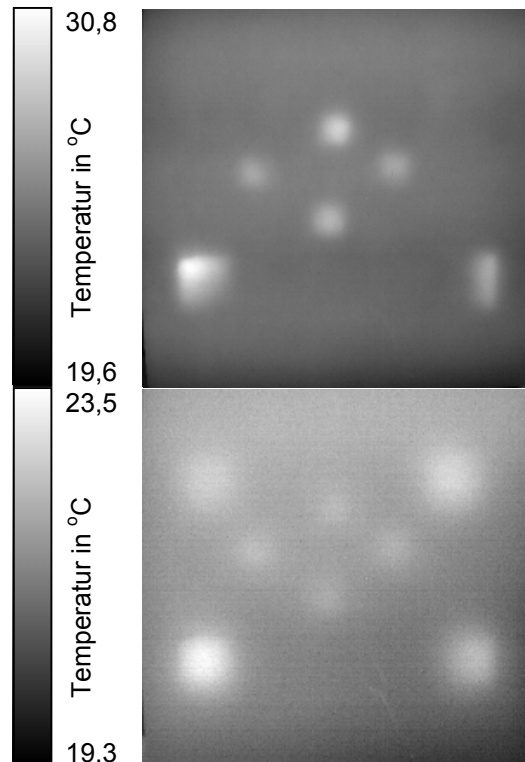


Abb. 8 Thermogramme des in Abb. 7 dargestellten Bauteils nach einer Erwärmungszeit von 10 Minuten. Das linke Thermogramm (9 Minuten Abkühlungszeit) zeigt kontrastreich die oberflächennahen Fehlstellen, das rechte Thermogramm (58 Minuten Abkühlzeit) bildet auch die tieferliegenden Fehlstellen ab [17].

3.3 Radiografie

Die Radiografie basiert auf der Schwächung (Absorption) der ionisierenden Primärstrahlung (Röntgen- oder Gammastrahlung) durch Dichte-, Material- und Materialdickenunterschiede im Bauteil. Dabei nutzt man den Effekt aus, dass die Absorption elektromagnetischer Strahlung im Röntgen- und Gammabereich praktisch nur von der Dicke und der Dichte des Materials abhängt und deshalb Beton, Bewehrung und Fehlstellen deutlich unterschieden werden können.

Als Strahlenquelle wird eine Röntgenquelle oder ein Radionuklid (Kobalt ^{60}Co und Iridium ^{192}Ir) verwendet. Als Bildaufnahmesystem dienen radiografische Filme, digitale Speicherfolien, Fluoroskope, Bildverstärker oder elektronische Halbleiterdetektoren. Die hohe Durchdringungsfähigkeit der Strahlung durch die meisten Werkstoffe führt zu einer Schwärzung des Films bzw. zu Analog- oder Digitalsignalen bei den elektronischen Detektionssystemen. Die Wahl der Strahlenquelle richtet sich im Wesentlichen nach den zu durchstrahlenden Bauteildicken. Der nutzbare Messbereich liegt für ^{60}Co zwischen 20 cm und 60 cm, für ^{192}Ir bis 35 cm und für Röntgenstrahler bis zu 30 cm Bauteildicke.

Auf dem Bildaufnahmesystem zeichnet sich dann eine zweidimensionale Projektion ab (Abb. 9a links). Die Bewehrung zeichnet sich durch geringere, der Beton durch eine größere Schwärzung bzw. Signalintensität ab. Durch Filterung, die auf einem strukturorientierten Algorithmus basiert, der nur horizontale und/oder vertikale Strukturen hervorhebt, können die Ergebnisse einer bildgebenden Darstellung noch verbessert werden (Abb. 9a rechts).

Bei der Anwendung der Radiografie ist stets auf die Einhaltung der Strahlenschutzbestimmungen zu achten (Abb. 9b). Außerdem ist für die Positionierung von Strahlenquelle und Bildaufnahmesystem der zweiseitige Zugang am Bauteil erforderlich. Deshalb erfolgt der Einsatz i.d.R. an Bauteilen mit hoher Standsicherheitsrelevanz, die eine sehr detaillierte Darstellung des Untersuchungsbereiches erfordern, insbesondere dann, wenn andere ZfPBau-Verfahren aufgrund der Randbedingungen nicht einsetzbar sind. Darüber hinaus wird Radiografie an kulturell schützenswerter Bausubstanz eingesetzt, die berührungslose Untersuchungen erfordern. Zur genaueren Bestimmung der geometrischen Abmaße von Einbauteilen können Stereoradiografie oder laminografische Rekonstruktionsverfahren [20] eingesetzt werden. Dazu sind mindestens zwei oder mehr Aufnahmen aus unterschiedlichen Einstrahlrichtungen (Mehrwinkel-Technik) erforderlich. Die Rekonstruktion des Einbauteils kann durch eine grafische oder computergestützte Rückprojektionstechnik erfolgen. Das rekonstruierte Bild ermöglicht die quantitative Vermessung der Tiefe und des Durchmessers von metallischen Einbauteilen.

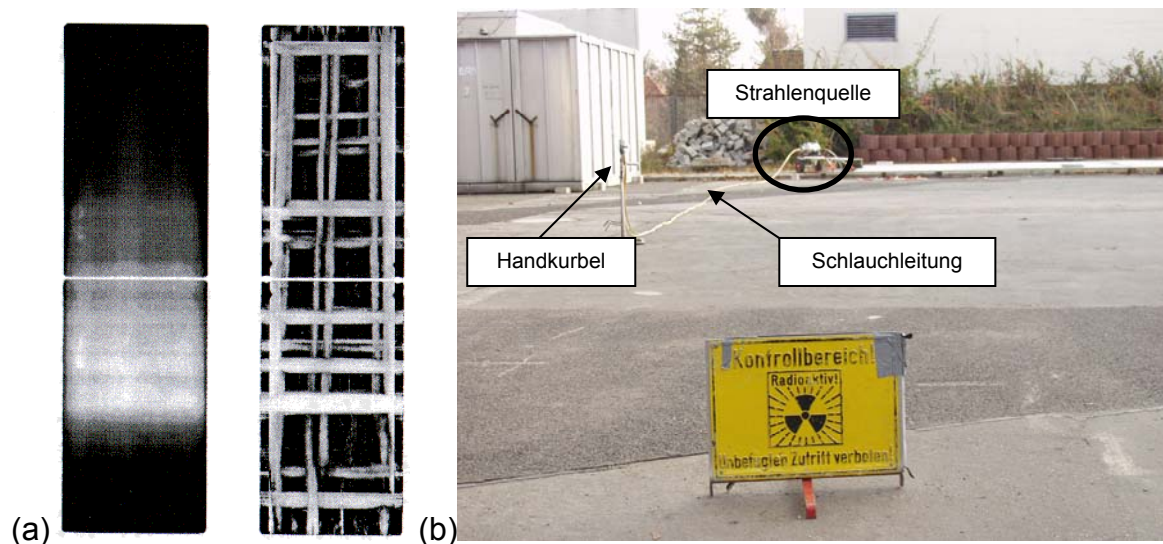


Abb. 9 (a) Vergleich der gemessenen (links) und gefilterten (rechts) Projektion eines Stahlbetonbauteils. Die Filterung basiert auf einem strukturorientierten Algorithmus, der nur horizontale und/oder vertikale Strukturen hervorhebt.
(b) Sicherheitsbereich einer Durchstrahlungsprüfung (Betonplatte, $d=30$ cm) mit Kobaltquelle. Im Hintergrund ist die Schlauchleitung zur Strahlenquelle zu erkennen. Mit einer Handkurbel wird die Strahlenquelle zum Durchstrahlungsbereich positioniert.

4 Elektrochemische Verfahren

Die elektrochemische Potentialfeldmessung ist ein Verfahren zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens der Bewehrung von Stahlbetonbauteilen. Grundlagen und Ausführungshinweise sind im 2008 überarbeiteten Merkblatt B3 der DGZfP [21] enthalten. Korrosionsaktive Bereiche können durch die Messung der elektrochemischen Potentialdifferenz lokalisiert werden. Zur Erfassung des aktuellen elektrochemischen Potentials an der Grenzfläche Stahl/Beton des unter der Betonoberfläche liegenden Bewehrungsstahls werden die an der Oberfläche ankommenden Potentiale gemessen. Dies geschieht mit einem hochohmigen Voltmeter, das an einem freigelegten Bewehrungsstahl angeschlossen ist und mit einer Bezugsselektrode verbunden ist (Abb. 10).

Die Bezugsselektrode wird über die Betonoberfläche entlanggeführt. An Stellen, an denen die den Stahl passivierende Schutzschicht durchbrochen und somit der anodische Teil des Korrosionsprozesses, d. h. Metallauflösung, in Gang gekommen ist, werden niedrigere Potentiale gemessen. Zur Bewertung der Korrosionsaktivität können die Potentiale großflächig farbcodiert dargestellt werden (Abb. 11). In Bereichen mit ausgeprägten Potentialgradienten ist von einer großen Korrosionswahrscheinlichkeit der Bewehrung auszugehen.

Das Verfahren stellt eine relativ preiswerte Möglichkeit zur Ortung von korrosionsaktiven Bereichen – vorzugsweise bei tausalzinduzierter Korrosion – dar. Es ermöglicht jedoch keine Messung des Stadiums der Korrosion oder der Korrosionsrate. Die Durchführung der Messungen und die Interpretation der Messergebnisse muss einem Spezialisten vorbehalten sein. Eine unkritische Anwendung kommerzieller Geräte kann unter Umständen zu erheblichen Fehlinterpretationen führen.

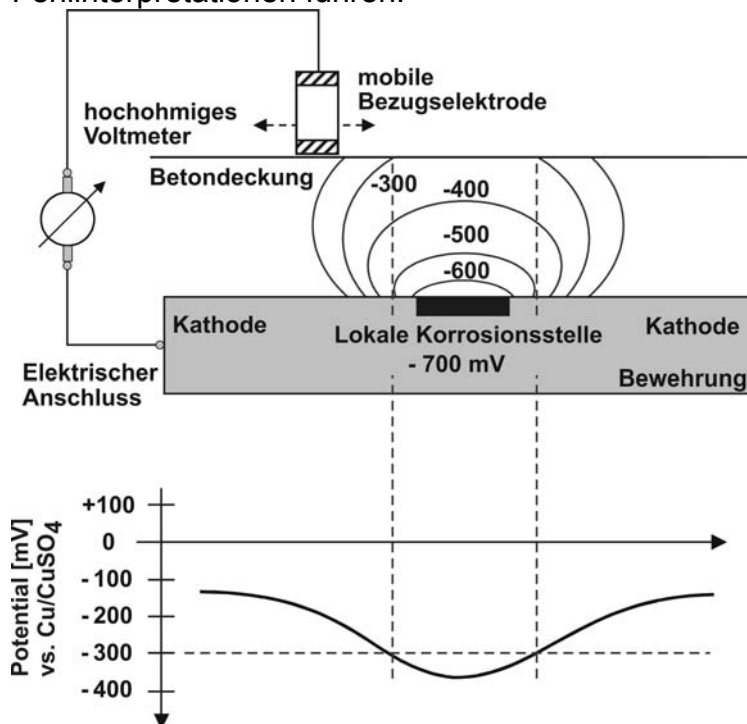


Abb. 10 Prinzipskizze der elektrochemischen Potentialmessung [21]

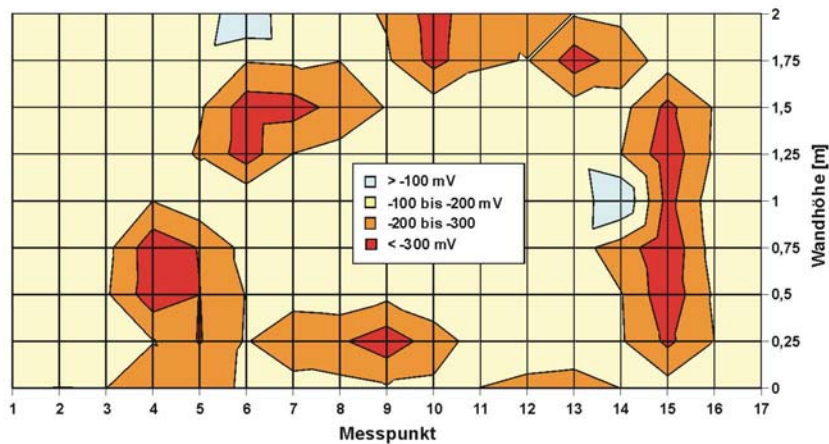


Abb. 11 Ergebnisdarstellung einer Potentialfeldmessung für ein Stahlbetonbauteil mit ausgeprägten Potentialgradienten, d.h. Bereichen mit großen Korrosionswahrscheinlichkeiten; Potentialangaben gegen Cu/CuSO₄ [22].

5 Magnetische Verfahren

Mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren wurde Ende der 1980er Jahre von der Hochtief AG ein zuverlässiges schnell arbeitendes Verfahren entwickelt, mit dem Spanndrahtbrüche unabhängig von der Dicke der Betondeckung und durch Dämm- und Putzschichten erkannt werden, auch wenn die Brüche unter einem Bügel verborgen sind (Abb. 12a). Das Verfahren wurde Mitte 1989 durch das Institut für Bautechnik begutachtet. Es nutzt das Prinzip, dass ein magnetisiertes Spannglied ein charakteristisches, messbares Magnetfeld besitzt. An Bruchstellen einzelner Spanndrähte bildet sich ein neuer Nord- und Südpol aus (Abb. 12b). Das hervorgerufene Streufeld ist an der Betonoberfläche messbar. Die Stärke dieses signifikanten Signals gibt Auskunft über die Querschnittsschwächung des Spannglieds.

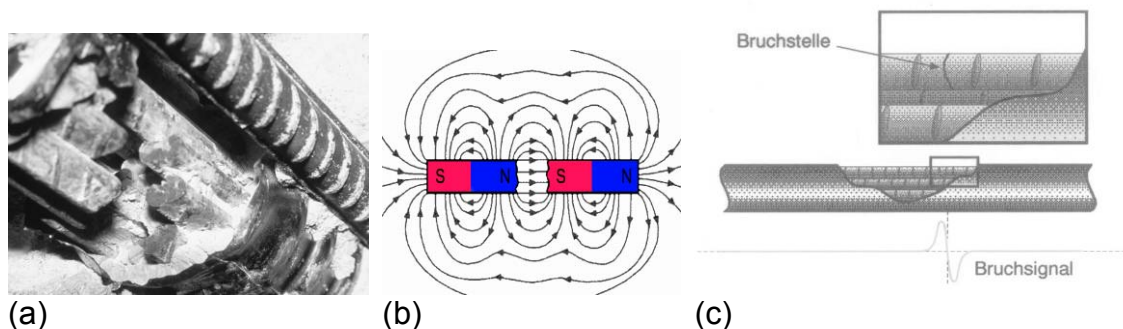


Abb. 12 (a) Bruch eines gesamten Spannglieds aufgrund von Spannungsrissskorrosion. (b) Schematische Darstellung des magnetischen Streufelds an der Bruchstelle eines Spanndrahts. (c) Spanndrahtbruch und typisches Bruchsignal der transversalen Komponente der magnetischen Flussdichte (Foto und Abbildungen: TU-Berlin) [23].

Wird mit der Hallsonde die transversale Komponente der magnetischen Flussdichte gemessen, so tritt an der Bruchstelle ein charakteristischer Signalverlauf – ein Nulldurchgang mit Vorzeichenwechsel – auf (Abb. 12c). Die

wichtigsten Einflussparameter sind die Betondeckung, die Anordnung der Stahlbetonbewehrung und anderer stählerner Ein- und Anbauten. Die Überprüfung von Spannbetonbauteilen auf Spanndrahtbrüche wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Lokalisieren des Spanngliedverlaufs (i.d.R. mit Radar)
- Montage eines geeigneten Führungssystems für die Magneten und die Messsonden entsprechend dem Spanngliedverlauf (Abb. 13a und b)
- Magnetisierung der Spannstähle (Abb. 13a und b)
- Messung des Magnetfelds der remanent magnetisierten Spanndrähte (Abb. 13c)
- Signalverarbeitung und Interpretation der Messdaten

Das Aufmagnetisieren der Spannstähle bis zur Remanenz ist unbedingt erforderlich, da die Messdaten sonst nicht zuverlässig interpretierbar sind. Wird die Messung der magnetischen Flussdichte durchgeführt, ohne zuvor die magnetische Geschichte der Spannstähle durch ein Aufmagnetisieren bis zur Remanenz ausgelöscht zu haben, sind Fehlinterpretationen vorprogrammiert.



(a)



(b)



(c)

Abb. 13 (a) und (b): Hilfskonstruktionen zum Aufmagnetisieren von Längsspanngliedern entlang des Spanngliedverlaufs. (c) Messung des Magnetfelds mit einer Hallsonde nach dem Magnetisieren von Querspanngliedern auf einem Brückendeck (Fotos: TU-Berlin).

Beim konventionellen Magnetisieren mit einem 30 kg-Magneten entlang des Spannglieds gelingt die remanente Magnetisierung bis zu Betondeckungen der Spannglieder von 30 cm. Die Spannglieder werden mit für diesen Zweck entwickelten Elektromagneten aufmagnetisiert. Es stehen Hilfskonstruktionen zur Verfügung, um die Geräte auf der oberen, seitlichen und unteren Betonoberfläche exakt entlang dem Spanngliedverlauf zu führen (Abb. 13a und b). Für die Spannungsversorgung ist ein normaler Netzanschluss (230 V, 16 A) ausreichend. Zur Messung der magnetischen Flussdichte werden Hallsonden verwendet, die entlang des Spanngliedverlaufs Messdaten aufzeichnen (Abb. 13c). Die Signale werden auf einem Messrechner wegabhängig dargestellt und abgespeichert.

Seit Ende 2005 steht ein Gesamtsystem zur Verfügung, mit dem auf einem Brückendeck schnell die Querspannglieder magnetisiert werden können [24]. Das System besteht aus einer rotierenden Sensoreinheit, die von IZFP Saarbrücken entwickelt und gebaut wurde. Die Sensoreinheit ist als Anhänger an den Magnetwagen ausgeführt (Abb. 14a). Letzterer fährt voran und magnetisiert die Querspannglieder, deren Restfeldmagnetisierung daraufhin von der Sensoreinheit erfasst wird. Die Magnetisierungs- und Messgeschwindigkeit beträgt 300 m/h bzw.

100 m/h, so dass eine Brücke von mehreren Tausend Quadratmetern in einer Nacht untersucht werden kann [24]. Eine vorangehende Lageermittlung der Spannglieder mit Georadar ist nicht erforderlich.

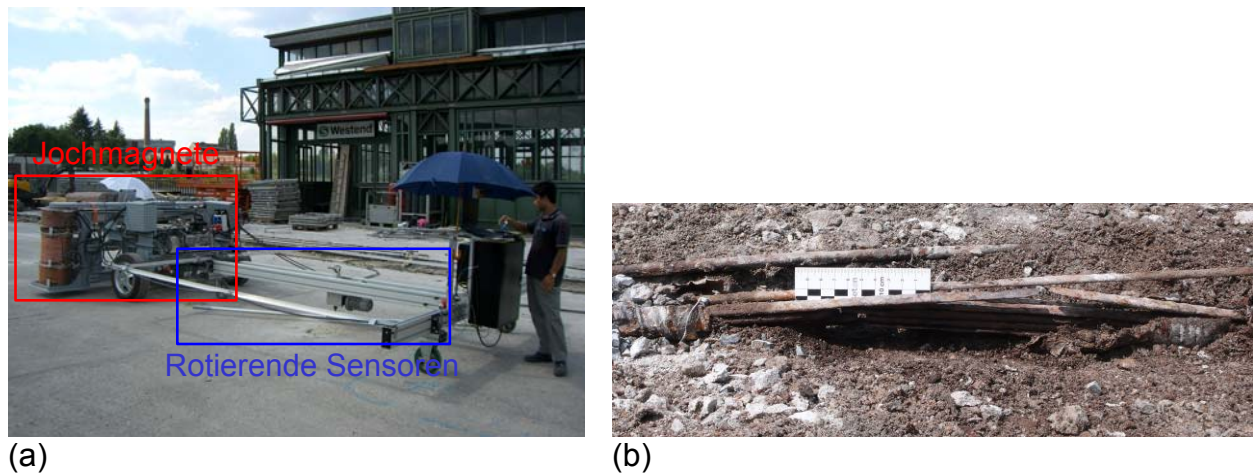


Abb. 14 (a) Von der TU Berlin eingesetztes Gesamtsystem zum Magnetisieren und Messen von Querspanngliedern. (b) Freigelegtes Querspannglied einer messtechnisch ermittelten Verdachtsstelle: alle Spanndrähte sind im Bereich von etwa 1 m gerissen.

Das System wurde u.a. 2008 in Zusammenarbeit mit der BAM an einem Brückenbauwerk angewendet, bei dem die Lage von angezeigten Verdachtsstellen auf Spanndrahtbrüche nachträglich verifiziert werden konnte (Abb. 14).

6 Spektroskopische Verfahren

Mit der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) wird ein spektroskopisches Verfahren vorgestellt, mit dem die Elementverteilung an Oberflächen bestimmt wird. Das Verfahren kann im Bauwesen zur Zementanalyse und zur Ermittlung bauschädlicher Salze (Chloride und Sulfate) verwendet werden [25]. Bei der Messung wird mit Hilfe eines gepulsten energiereichen Laserstrahls ein Plasma erzeugt, dessen emittierte Fluoreszenzstrahlung in einem Spektrometer analysiert wird. Das ermittelte Linienspektrum wird in dem für die untersuchten Elemente spezifischen Spektralbereich betrachtet. Dabei ist die Wellenlänge bei der eine Spektrallinie auftritt charakteristisch für das untersuchte Element, z. B. Chlor, Calcium oder Sauerstoff (Abb. 15). Über die Intensität bzw. die Fläche unter der Spektrallinie wird durch Kalibrierung ein Bezug zum Elementgehalt hergestellt. Durch stöchiometrische Berechnung wird auf den baupraktisch relevanten Chlorid- oder Sulfatgehalt geschlossen.

Oberflächen können im Millimeterraster untersucht und die Elementgehalte farbcodiert bzw. in Grauwerten dargestellt werden (Abb. 16a). LIBS erlaubt gegenüber den klassischen nasschemischen Analysen Eindringprofile im Millimeter-Raster zu erstellen (Abb. 16b), die eine genauere Abschätzung des weiteren Eindringverhaltens ermöglichen. Damit kann der Betonabtrag im Fall von chloridinduzierter Korrosion zuverlässig bestimmt werden. Darüber hinaus ist ein Nachweis von Chloriden in Rissspitzen an entnommenen Bohrkernproben möglich.

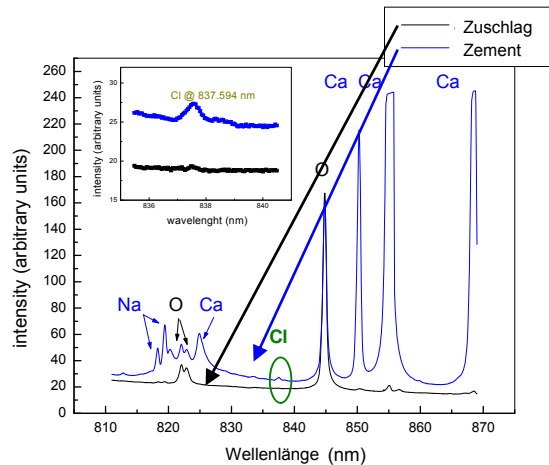


Abb. 15 Typische Linienspektren für Zement mit signifikanten Calciumlinien und Gesteinskörnung mit einer signifikanten Sauerstofflinie. Die Intensität der Chlorlinie (im Ausschnitt oben links) ist gegenüber Sauerstoff und Calcium erheblich geringer.

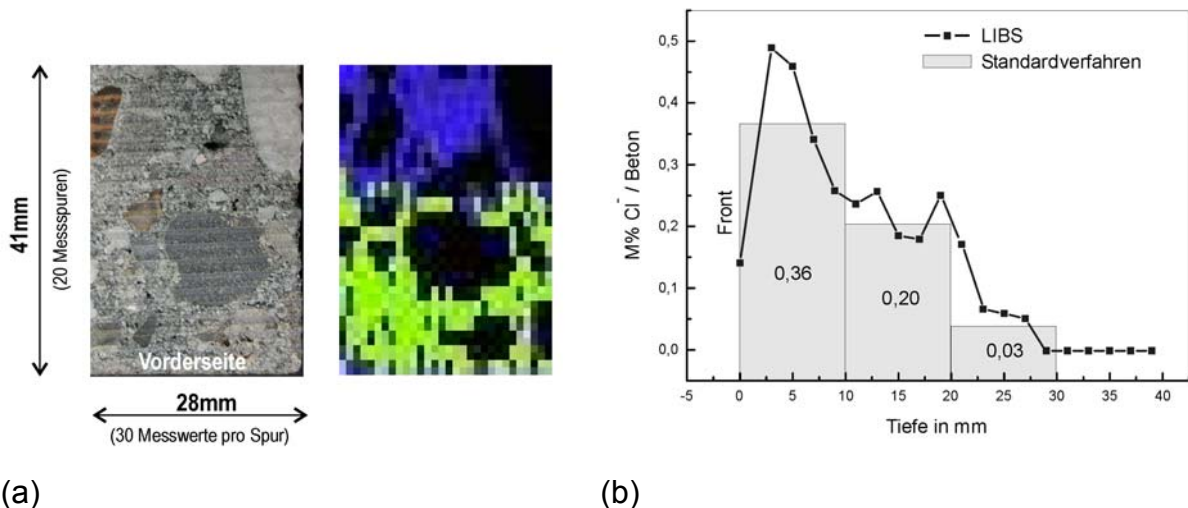


Abb. 16 (a) Betonoberfläche, die mit 30 x 20 Messungen untersucht wurde (links) und farbcodierte bzw. Grauwert-Darstellung der Chloridgehalte (rechts). Die Gesteinskörnung und daran angrenzende chloridbelastete Bereiche sind deutlich unterscheidbar.
(b) Aus dem Messraster erzeugtes Tiefenprofil mit Auflösung im 2mm-Raster. Im Vergleich dazu Chloridgehalte aus nasschemischer Analyse von Bohrmehlproben im 10mm-Raster [25].

Zwischenzeitlich wurde eine mobile Apparatur zur Ermittlung des Chloridgehalts an Betonoberflächen von der BAM entwickelt und patentiert (Abb. 17). Die Methode kann in der Betoninstandsetzung als Ergänzung bzw. Alternative zur klassischen nasschemischen Analyse dienen. Damit steht ergänzend zur klassischen Nasschemie im Labor ein Vor-Ort-Verfahren zur Verfügung, mit dem ermittelt werden kann, ob der Betonabtrag im Fall von chloridinduzierter Korrosion oder bei Eintrag von Schwefelsäure ausreichend ist. Die Anwendung des LIBS-Verfahrens zur Schadensdiagnose und Qualitätssicherung ist demnach auch zur Ermittlung von Schwefelgehalten im Fall biogener Schwefelsäure an Abwasserbauwerken möglich. Ein Praxisbeispiel zur Anwendung von LIBS zur Schadensdiagnose und Qualitätssicherung ist in [26] und [27] beschrieben.

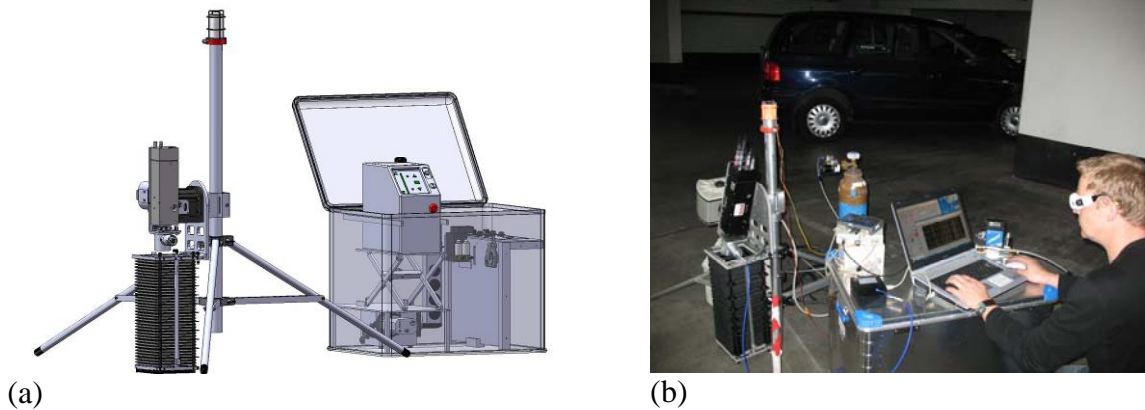


Abb. 17 (a) Von der BAM neu entwickeltes und patentiertes portables LIBS-Baustellengerät zur Qualitätssicherung auf abgetragenen Betonoberflächen; (b) Einsatz des portablen LIBS-Geräts in einem Parkhaus. [27]

7 Verfahrenskombination und Automatisierung

Die kombinierte Anwendung verschiedener Verfahren wirkt sich vorteilhaft auf die Zuverlässigkeit zur Lösung von Prüfaufgaben aus. Damit Ergebnisse verschiedener Verfahren miteinander verglichen werden können, müssen die Daten später in einem einheitlichen Koordinatensystem dargestellt werden. Dazu ist der automatisierte Einsatz der Verfahren mit so genannten Baustellenscannern von Vorteil. Mit den Scannersystemen wird ein Ultraschallprüfkopf, eine Radarantenne oder ein Sensor zur Betondeckungsmessung in einem vorgegebenen Messraster über die Oberfläche bewegt. Dies geschieht im Fall von Radar bzw. Wirbelstrom kontinuierlich mit Flächenleistungen von bis zu 15 m² pro Stunde bei einem Linienabstand 5 cm (Radar). Dagegen erfordert Ultraschall eine diskontinuierliche Datenaufnahme, da der Prüfkopf an jeder Stelle positioniert werden muss. Das führt zu Flächenleistungen von nur rd. 1,5 m²/h [29]. An der BAM und an der MfPA in Weimar wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Systeme entwickelt (Abb. 18a und b; [28] bis [30] und [11]).

Ein weiteres von der BAM entwickeltes Scannersystem wurde zur großflächigen Untersuchung von Längsträgern an einer Autobahnbrücke bei Hagen im Zuge der A1 verwendet (Abb. 18c, [31]). Die Längsträger vom System Baur-Leonhardt weisen eine Vorspannung bestehend aus nur einem Blechkasten mit Kantenlängen von rd. 13 cm auf, der einen Flächenanteil des Verpressmörtels von nur rd. 10% aufweist (Abb. 19).

(b)

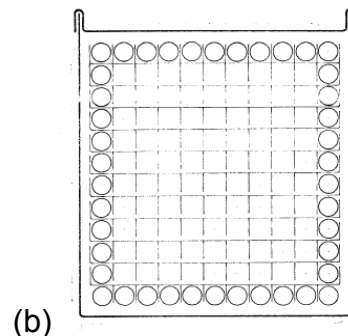


(d)

(a)

Technical drawing of a bridge structure showing dimensions and labels. The drawing includes a cross-section of the bridge deck and a plan view of the bridge layout. Key dimensions and labels include:

- Overall width: 32.00
- Span length: 29.00
- Span length: 9.00
- Span length: 9.00
- Span length: 9.00
- Span length: 3.50
- Span length: 1.75
- Span length: 1.50
- Labels: Bereich der Messflächen, Überbau FR Bremen
- Dimensions: 0.16, 2.02, 3.30, 0.35
- Träger 1, Träger 2, Träger 3



Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren

Abb. 20a zeigt die Anordnung der einzelnen Messflächen für Radar und Ultraschallecho, die jeweils mit dem Scanner in einem Raster zwischen 2 und 5 cm abgetastet bzw. abgefahren wurden.

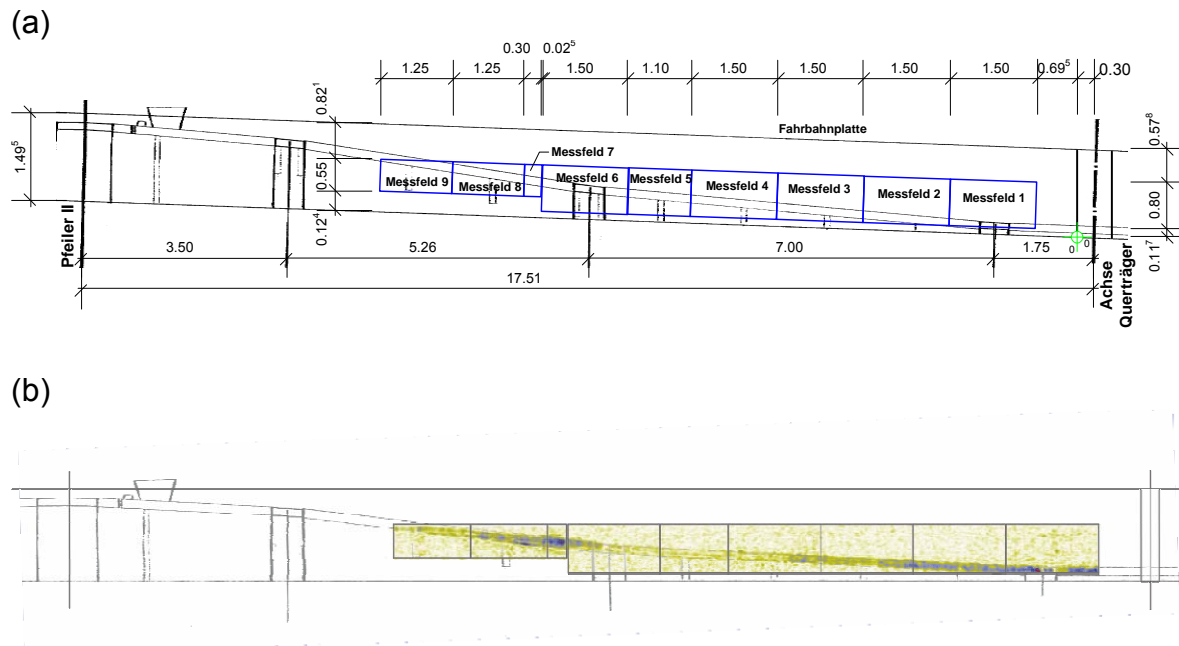


Abb. 20 (a) Anordnung der Messfelder für Radar und Ultraschallecho an der Seitenwand des Längsträgers. (b) Ergebnisse der Ultraschallechomessung in Bezug zur Bauwerksgeometrie. [31]

In Abb. 20b ist die bildgebende Darstellung der Ultraschallechomessungen dokumentiert. Der Verlauf des Spannglieds kann über die gesamte untersuchte Fläche präzise verfolgt werden. Zusammen mit der Tiefenlage und der Bauteildicke ließen sich aus den Ergebnissen die erforderlichen Informationen für eine statische Nachrechnung generieren.

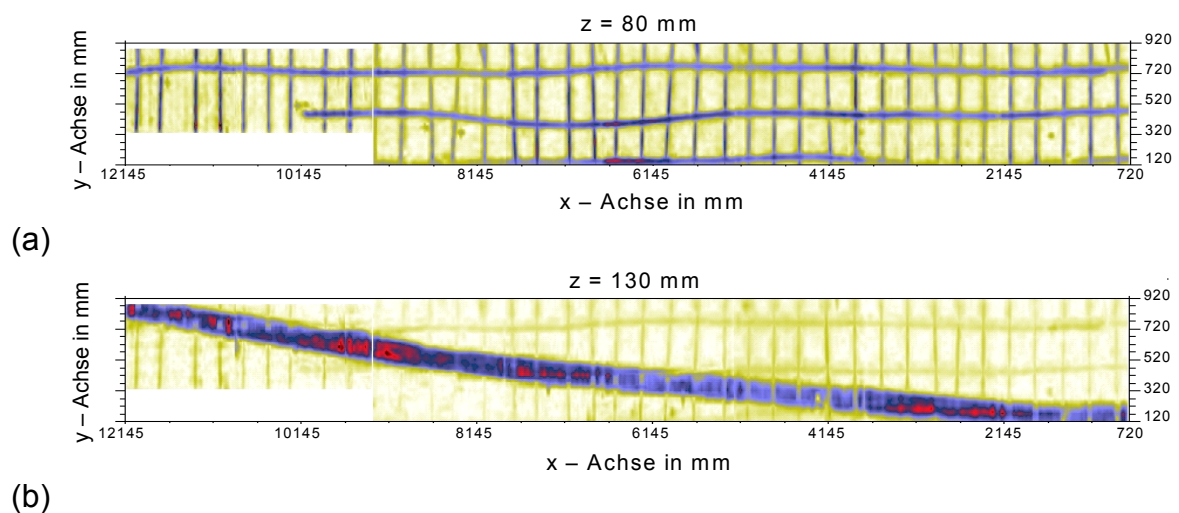


Abb. 21 Bildgebende Darstellung der Ergebnisse der Radarmessungen: (a) Reflexionen in einer Tiefe von 80 mm, (b) in einer Tiefe von 130 mm (y-Achse um Faktor 2 gedehnt). [31]

Zur Bestimmung der Lage der schlaffen Bewehrung, etwa zur Ermittlung von Schubbewehrung oder der Bewehrungsführung an ggf. vorhandenen Koppelfugen, eignen sich Radaruntersuchungen und die bildgebende Darstellung der Ergebnisse. In Abb. 21 sind die Radarergebnisse in verschiedenen Tiefen dargestellt (die y-Achse wurde um den Faktor 2 gedehnt). Abb. 21a zeigt die schlaffe Bewehrung in einer Tiefe von rd. 80 mm. Abb. 21b zeigt das Spannglied in einer Tiefe von rd. 130 mm.



Abb. 22 (a) OSSCAR Scannersystem mit den verwendeten Messgeräten für Radar (Mala ProEx), Ultraschallecho (ACSYS A1220) und Wirbelstrom (Proceq Profometer 5+); Prüfkopfhalterungen für (b) Radarantenne, (c) Ultraschallprüfkopf und (d) Sensor zur Betondeckungsmessung [32]

Eine weitere Entwicklung der BAM in Zusammenarbeit mit 12 Partnern ist das Scannersystem OSSCAR (On-Site SCAnnerR, www.ossicar.eu), das für eine Verfahrenskombination aus Radar, Ultraschall und Wirbelstrom (Betondeckungsmessung) konzipiert wurde. Alle drei Verfahren fahren jeweils in einem separaten Messgang auf einer Fläche von 1,0 x 0,6 m² ein Messraster ab, dessen Messpunktabstand bis zu 1 cm betragen kann. Dabei sind alle drei aufgenommenen Flächen kongruent. Das Scannersystem (Abb. 22a) besteht aus drei Messgeräten, die am Markt erhältlich sind und die nur mit geringfügiger Modifikation am Scanner befestigt werden (Abb. 22b-d). Damit kann ein Nutzer diese Geräte weiterhin als einzelne Handmessgeräte und als automatisiertes System zur Verfahrenskombination verwenden. Der Rahmen ist in die drei Hauptachsen zerlegbar und damit auch zum Einsatz in schwer zugänglichen Brückenbauteilen (Mannloch, Kriechgänge) einsetzbar. Daher wurde auch eine

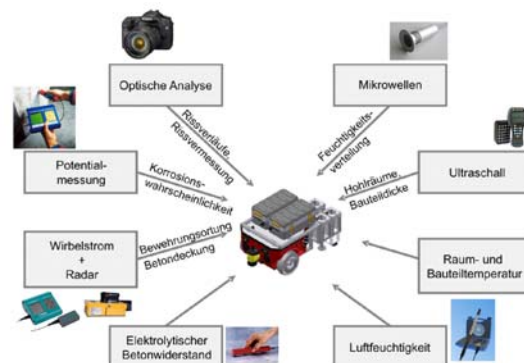
relativ kleine Messfläche gewählt, um auch in beengten Verhältnissen messen zu können. Im Gegenzug wurde darauf geachtet, dass das Umsetzen des Scanners einfach möglich ist und ein Gewicht von weniger als 20 kg auch die Montage durch eine Person erlaubt. Das System kann wahlweise mit Ankern oder zerstörungsfrei mit Saugfüßen am Bauwerk befestigt werden. Im letzteren Fall ist allerdings ein Kompressor mit entsprechenden Druckluftzuleitungen erforderlich. Gerade an alten Brücken mit geringer Betondeckung der Hüllrohre hat sich die Ankopplung des Scanners mit Saugfüßen als unumgänglich erwiesen, da durch das Bohren von Ankern zur Befestigung die Spannglieder beschädigt werden können.

Ein weiteres Beispiel für die Automatisierung ist die Entwicklung einer Multisensorplattform zur großflächigen Untersuchung von Parkdecks:

Im Rahmen des Verbundforschungsprojekt BetoScan (www.betoscan.de) wurde ein mit zerstörungsfreier Messtechnik ausgestatteter Roboter entwickelt, der in der Lage ist, große horizontale Flächen von bis zu mehreren Hundert Quadratmetern pro Tag in einem ausreichend dichten Messraster gleichzeitig mit mehreren Verfahren zu untersuchen. Auch hier ist der Grundgedanke, die Zuverlässigkeit der Messergebnisse durch den Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Messverfahren an einem Messort zu erhöhen.



(a)



(b)

Abb. 23 (a) Roboterplattform mit Sensorik (Wirbelstrom, Mikrowellen-Feuchtemesser, Ultraschallarray, Radar) (b) Übersicht aller modular einsetzbaren Sensoren. [33]

Mit dem entwickelten BetoScan-System steht erstmals eine selbstnavigierende Roboterplattform zur Verfügung, die über die Möglichkeit verfügt, modular einzelne Sensoren gezielt einzusetzen und deren Messwerte ortsreferenziert in einem einheitlichen Koordinatensystem in so genannten Zustandskarten darzustellen.

Beispielhaft zeigt Abb. 24 das Ergebnis einer ersten Betondeckungsmessung mit Wirbelstrom in einem Parkhaus über eine Fläche von 100m², die innerhalb einer von 90 min nahezu flächendeckend aufgenommen wurde. Der Abstand der Fahrspuren betrug 20 cm, jeden Zentimeter innerhalb der mäanderförmigen Fahrspuren wurde ein Wert erhoben. Derzeit wird an der Optimierung der Messintervalle im Zusammenhang mit der Fahrgeschwindigkeit gearbeitet, sodass hier noch zeitliche Verbesserungen um Faktor zwei zu erwarten sind.

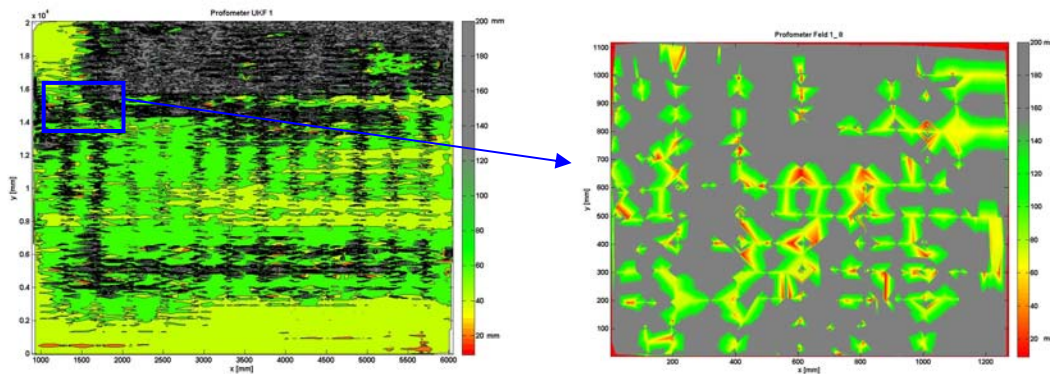


Abb. 24 Betondeckungsmessung in einem 20x5m² großen Bereich (links aus Platzgründen verzerrt dargestellt) und rechts die Vergrößerung des blauen Bereichs. In der Detailaufnahme des auffälligen Bereichs bei etwa (1,3 m; 15 m) wurde diese kleinere Fläche zusätzlich in Querrichtung mit einem Messpunktabstand von 1 cm untersucht. In der grafischen Darstellung kann dadurch die Lage einzelner Bewehrungsstäbe aufgelöst werden..

Die offene Architektur der Software erlaubt es, weitere automatisierbare zerstörungsfrei arbeitende Sensoren nachträglich einfach zu integrieren. Eine Verfahrenskombination beispielsweise aus Betondeckungsmessung, Feuchtemessung und Potentialfeldmessung ist gleichzeitig parallel möglich. Abhängig vom Messraster und Spurabstand können so pro Tag mehrere Hundert Quadratmeter eines Parkdecks untersucht werden.

Bei automatisierten Messungen sind stets die gleichen Randbedingungen zu beachten und mindestens die gleiche Erfahrung des sachkundigen Bedieners vorauszusetzen, wie bei Handmessungen. Der Roboter ist deshalb stets nur als Werkzeug zu verstehen, der dem sachkundigen Bediener schnell zuverlässige und auswertbare Ergebnisse liefert.

8 Zusammenfassende Betrachtung

Neben der Leistungsfähigkeit eines ZfPBau-Verfahrens, das für die Bearbeitung einer Prüfaufgabe ausgewählt wurde, sind zur Abschätzung des Messerfolgs auch die Verfahrensgrenzen zu berücksichtigen. Des Weiteren ist die Kenntnis der zu erwartenden Konstruktion und der Zugänglichkeit unerlässlich. Sofern möglich sollten vorhandene Planunterlagen eingesehen werden oder Erfahrungswerte aus vergleichbaren Konstruktionen angesetzt werden, so dass Bewehrungsgehalte, das Vorhandensein von Abdichtungslagen bzw. ungefähr vorhandene Dicken (nicht einsehbarer Bauteile) abgeschätzt werden können.

Meist erfolgt die Vorauswahl eines schadensverdächtigen Bereichs durch einen sachkundigen Bauwerksprüfer. Die Größenordnung wirtschaftlich prüfbarer Flächen ist stark verfahrensabhängig und liegt für das Potentialfeldmessverfahren und das Remanenzmagnetismusverfahren im Bereich mehrerer Hundert Quadratmeter, wobei oft ganze Brückenflächen oder Parkdecks untersucht werden. Abhängig vom Messspurabstand können Flächen dieser Größe auch wirtschaftlich mit Radar untersucht werden. Für die akustischen Verfahren Impakt-Echo und Ultraschallecho sollte sich die Auswahl auf einige Quadratmeter in Abhängigkeit vom Messraster beschränken. Radiografische Verfahren sind sehr aufwendig und erfordern beidseitigen Zugang des zu untersuchenden Bauteils. Ihr

Einsatz sollte sich punktuell auf konkrete Verdachtsstellen beziehen. Dafür liefern sie aber das höchste Auflösungsvermögen bei der bildgebenden Darstellung der Ergebnisse.

Ansonsten ist zu beachten, dass sich innerhalb eines Bauwerks die Randbedingungen der Messung ändern (Feuchtegehalt, Bewehrungsgehalt, Zwischenlagen aus bituminösem Material). Deshalb liefert die Kombination mehrerer Verfahren das Maximum an Informationen aus dem Bauteil. Während Radar in den oberen Bereichen eines Bauteils sehr gut Bewehrung und metallische Hüllrohre abbildet, kann das Ultraschallverfahren aus größeren Tiefen insbesondere unterhalb dichter Bewehrung Informationen über Bewehrung oder Bauteildicke liefern. Durch Radar lokalisierte Hüllrohre können von Impakt-Echo und Ultraschallecho auf ihren Verpresszustand untersucht werden. Während mit akustischen Verfahren im Falle stark durchfeuchteter Bauteile im Gegensatz zu Radar noch Informationen gewonnen werden können, liefert Radar noch Informationen aus tieferen Schichten, wenn mehrschichtige Bauteile durch Luftschichten, Folien oder Bitumenbahnen unterteilt sind.

Aber erst der gemeinsame Einsatz von Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar verbunden mit Daten-Fusion aus den gewonnenen Ergebnissen ermöglicht eine erheblich verbesserte Aussagequalität von Ergebnissen. Da die Randbedingungen am Bauwerk hinsichtlich Durchfeuchtung, Bewehrungsgehalt und Schichtaufbau ständig variieren, ist nur durch den kombinierten Einsatz mehrerer Verfahren ein Maximum an Informationen zu erzielen. Radar, Ultraschallecho und Impakt-Echo lassen sich wirtschaftlich zur Untersuchung mehrerer Quadratmeter pro Tag einsetzen.

9 Literatur

- [1] Schickert, G., Krause, M. und H. Wiggenhauser: ZfPBau-Kompendium, Internetpräsenz: <http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm> (2004).
- [2] Wiggenhauser, H. und A. Taffe: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, S. 305-418.
- [3] [Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation
- [4] Reinhardt, H.-W.: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen in Bergmeister, K. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V, S. 479-598
- [5] DIN, Normenausschuss Bauwesen: DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung, Ausgabe 11/1999, Berlin: Beuth Verlag (1999).
- [6] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF), Ausgabe 2003, Verkehrsblatt-Verlag (2003).
- [7] Krieger, J., Kaschner, R. und P. Haardt: Die objektbezogene Untersuchung und Bewertung von Brücken im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems, Bautechnik 77 (2000) 7, S. 453-463.
- [8] Bundesanstalt für Straßenwesen: Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse, Internetpräsenz: <http://www.bast.de> (2008) unter Fachthemen / Objektbezogene Schadensanalyse bei Ingenieurbauwerken / Download des Leitfadens.
- [9] Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU) Ausgabe 2007, ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1, Anhang A.
- [10] DGZfP: Merkblatt für Ultraschall-Impuls-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile (B4), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (1999)
- [11] Schickert, M.: Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion, in: Bergmeister, K. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Abschn. 7, S. 536-543.
- [12] Taffe, A., Krause, M., Milmann, B. und E. Niederleithinger: Zerstörungsfreie Untersuchungen an Fundamentplatten, Beton und Stahlbetonbau 99 (2004) 12, S. 1000-1004.
- [13] Wiggenhauser, H.: Impact-Echo, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.6, S. 358-365.

- [14] DGZfP , Merkblatt für Impakt-Echo (B11) , Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (2009)
- [15] Krause, M., Wiggenhauser, H. und J. Krieger: Materialtechnische Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger, Durchführung von Ultraschall- und Impact-Echo-Messungen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 38, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 113 Seiten (2002).
- [16] DGZfP , Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10) , Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (2008)
- [17] Maierhofer, C.: Zerstörungsfreie Ortung von Inhomogenitäten im oberflächennahen Bereich mit der Impuls-Thermografie, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.1, S. 320-329.
- [18] Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C., Mayer, K., Wöstmann, J. and H. Wiggenhauser: 3D-Visualisation of NDT-Data using Data Fusion Technique, in: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V23, Berlin (2003).
- [19] Arndt, R., Hillemeier, B., Maierhofer, C., Rieck, C., Röllig, M. und A. Walther: Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie, Bautechnik 81 (2004) 10, S. 786 – 793.
- [20] Redmer, B., Likhatchev, A., Weise, F. and U. Ewert: Location of Reinforcement in Structures by Different Methods of Gamma-Radiography, in: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD.
- [21] DGZfP , Merkblatt für elektrochemische Potentialmessungen zur Ermittlung von Bewehrungsstahlkorrosion in Stahlbetonbauwerken (B3) , Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (2008)
- [22] Mietz, J. und A. Burkert: Elektrochemische Verfahren zur Detektion von Bewehrungsstahlkorrosion, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 3 Materialeigenschaften, Abschn. 3.1, S. 379-384.
- [23] Scheel, H. und B. Hillemeier: Das Remanenzmagnetismus-Verfahren – ein Verfahren zur Ortung von Spannstahlbrüchen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.7, S. 365-369.
- [24] Hillemeier, B: Schnelle und großflächige Bauzustandserfassung an Spannbetonbrücken, Estrichen und Deckensystemen, in: DGZfP (Hrsg.); Tagungsband zur Bauwerksdiagnose 2008, Berlin, 21.-22.02.2008, DGZfP BB 112-CD, Vortrag 15
- [25] Taffe, A., Schaurich, D., Wilsch, G. und F. Weritz: Einsatz der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) im Bauwesen, Beton und Stahlbetonbau 99 (2004) 8, S. 693-695 (Teil 1) und 99 (2004) 9, S. 761-762 (Teil 2).
- [26] Taffe, A., Pohl, M., Roeser W. und B. Schwamborn: Betonkorrosion durch Schwefelsäure an Abwasserbauwerken - innovative Schadensdiagnose, Beton und Stahlbetonbau 102 (2007) 10, S. 691-698
- [27] Taffe, A., Pohl, M., Roeser, W., Schwamborn, B. und A. Schoßmann: Varianten bei der Instandsetzung eines Abwasserbauwerks mit Schäden durch Schwefelsäure und neue Verfahren zur Qualitätssicherung, Beton- und Stahlbeton 104 (2009) 12
- [28] Streicher, D., Holst, R., Wiggenhauser, H. und P. Haardt: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – Untersuchungen mit Radar, Ultraschallecho und Impact-Echo an der Fuldatalbrücke bei Eichenzell, Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) 3, in Druck.
- [29] Streicher, D., Kohl, Ch., Wiggenhauser, H. und A. Taffe , Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken , Beton- und Stahlbeton 101 (2006) 5, S. 330-342
- [30] Stoppel, M., Mielentz, F und H. Wiggenhauser: Automatisierung in der zerstörungsfreien Prüfung , Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 10, S. 562-567
- [31] Friese, M., Taffe, A., Wöstmann, J. und A. Zoëga: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte , Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 65, Bergisch-Gladbach: Wirtschaftsverlag NW, April 2009, CD-ROM, 52 Seiten
- [32] Taffe, A. , Neue leistungsfähige Systeme zur zerstörungsfreien Prüfung von Brücken im Zuge der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) , Dokumentation Erfahrungsaustausch Brückenprüfung 2009, München, 23.09.2009, VFIB: Düsseldorf (2009) Kapitel IX.
- [33] Stoppel, M., Taffe, A., Reichling, K. und J. Kurz , Zustandsermittlung und Schadensdiagnose für Parkhäuser mit automatisierten zerstörungsfreien Prüfverfahren , Beton- und Stahlbetonbau, 104 (2009) 10, Ernst & Sohn, S. 690-694

Ansprechpartner an der BAM und TU-Berlin

Dr. H. Wiggenhauser	Leiter der Fachgruppe „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“, Impakt-Echo-Verfahren E-Mail: herbert.wiggenhauser@bam.de Telefon: 030 / 8104 – 1440
Dipl.-Geophys. E. Niederleithinger	Geotechnische Verfahren und LIBS E-Mail: martin.krause@bam.de Telefon: 030 / 8104-1442
Dr. M. Krause	Akustische Verfahren und Ultraschall E-Mail: martin.krause@bam.de Telefon: 030 / 8104-1442
Dipl.-Ing. T. Kind	Radar und Elektromagnetische Verfahren E-Mail: martin.krause@bam.de Telefon: 030 / 8104-1442
Dr.-Ing. A. Taffe	Kombination und Automatisierung von ZfPBau-Verfahren E-Mail: alexander.taffe@bam.de Telefon: 030 / 8104-4244
Dr. C. Maierhofer	Thermografie-Verfahren E-Mail: christiane.maierhofer@bam.de Telefon: 030 / 8104 – 1441
Dr.-Ing. B. Isecke	Potentialfeldmessverfahren E-Mail: bernd.isecke@bam.de Tel. 030 / 8104-1730
Dipl.-Ing. B. Redmer	Radiografie E-Mail: bernhard.redmer@bam.de Tel. 030 / 8104-3653
Prof. Dr.-Ing. B. Hillemeier	Remanenzmagnetismus zur Spanngliedbruchortung E-Mail: b.hillemeier@bv.tu-berlin.de Tel.: 030 / 314 72-100 (TU-Berlin)
Dipl.-Ing. A. Walther	Remanenzmagnetismus zur Spanngliedbruchortung E-Mail; Andrei.Walther@Alumni.tu-berlin.de Tel. 03381 / 30 85 90 (BauConsulting)
Informationen im Internet	http://www.bam.de/fq-82.htm
BAM Fachgruppe VIII.2	http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm
TU-Berlin, Fachgebiet Baustoffe und Baustoffprüfung	http://beta.bv.tu-berlin.de/indexo.html