

# Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren bei der Zustandserfassung auf Brücken – ein Erfahrungsbericht aus der Praxis

Philipp Truffer  
Valtest AG, Lalden, Schweiz

Nathan Metthez  
Valtest AG, Lalden Schweiz

## Zusammenfassung

Bauwerke müssen erhalten werden, sollen sie ihre bestimmungsgemässe Nutzungsdauer uneingeschränkt erreichen. Ein zielgerichteter Erhalt erfordert u.a. die Kenntnis des aktuellen Bauwerkszustandes. Für dessen Ermittlung stehen heute zahlreiche erprobte und effiziente Messmethoden zur Verfügung. Im Rahmen des vorliegenden Vortrags werden einige moderne zerstörungsfreie und –arme Prüfverfahren anhand von Praxisanwendungen vorgestellt. Neben des Radar- und Ultraschallmessverfahrens werden die Anwendungen der aktiven Thermografie sowie die Laser-induzierten Breakdown Spektroskopie präsentiert.

## 1. Einleitung

Bauwerke altern! An und für sich keine neue Erkenntnis. Aus dieser Tatsache heraus ergibt sich der Umstand, dass im Laufe der Nutzungsdauer regelmässig Informationen über den baulichen Zustand für allfällige Interventionen beschafft werden müssen. Es gilt den optimalen Zeitpunkt für die Planung und Umsetzung von Instandsetzungsmassnahmen zu treffen. Aufgrund der grossen Anzahl von Bauwerken im Bestand gilt es die zur Verfügung stehenden Mittel für eine umfassende Beurteilung optimal einzusetzen. Da die Bauwerke im Normalfall während der Nutzung z.B. unter Verkehr eingesehen und untersucht werden, müssen die sich daraus ergebenden Einschränkungen zeitlich und örtlich minimiert werden.

Im Rahmen der Zustandsuntersuchung und Bauwerksdiagnose gilt es daher mit möglichst wenig Aufwand ein möglichst lückenloses Bild über den aktuellen Bauwerkszustand zu erhalten. Hierzu stehen den Ingenieuren und Planern heute effiziente und leistungsstarke Verfahren zur Verfügung. Im Rahmen des vorliegenden Vortrags werden einige typische moderne zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren und –methoden vorgestellt. Dabei wird der theoretische Verfahrensteil bewusst kurz gehalten (weitergehende Informationen sind z.B. in [1-6] zu finden) - die Anwendungen an praktischen Beispielen mit Bezug zu Brückenbauwerken stehen im Vordergrund. Es werden Anwendungsbeispiele aus der Praxis mit Impuls-Radar, Ultraschall, aktiver Infrarot-Thermografie und Laser-

induzierter Breakdown Spektroskopie (LIBS) vorgestellt.

## 2. Radaranwendungen

### 2.1. Verfahren

Beim Impuls-Radar handelt es sich um ein elektromagnetisches Messverfahren. Dabei wird ein elektromagnetisches Signal von einer Antenne abgestrahlt und an verschiedenen Grenzflächen reflektiert. Das reflektierte Signal wird anschließend von der Antenne empfangen und ausgewertet. Das Radarverfahren wird hauptsächlich in Reflexionsanordnung angewandt. Die Sende- und Empfangsantenne befinden sich dabei nebeneinander in einem Gehäuse. Gemessen werden die Laufzeit und die Amplitude der empfangenen Radarwellen sowie deren Messposition. Im Bauwesen kommen Antennen mit Frequenzen zwischen 400 bis 2'600 MHz zur Anwendung.

An den Grenzflächen von verschiedenen Materialien entstehen Reflexionen. Die Ausbreitung und das Reflexionsverhalten der elektromagnetischen Transversalwellen ist im Wesentlichen von der Dielektrizität bzw. Permittivität des Baustoffs abhängig.

### 2.2 Anwendungen

Das Radarverfahren kann im Bauwesen in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden (Bauteildicken, Objektortung, Feuchteverteilungen, Belagschichtdick-

enmessungen, usw.). Da elektromagnetische Wellen an der Grenzfläche von Beton-Metall vollständig reflektiert werden, eignet sich das Radarverfahren sehr gut zur Ortung und Detektion von schlaffer Bewehrung, metallischen Hührlöhren (Vorspannung) oder sonstigen metallischen Einbauten wie z.B. Ankerköpfe im Beton. Die Beispiele in den Abbildungen 1 bis 4 zeigen entsprechende Anwendungen.

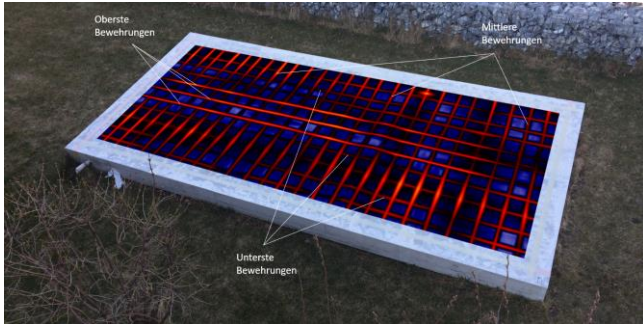


Abb. 1 Bewehrungsdetektion an einem bewehrten Prüfkörper mittels Radar (1600 MHz). Eine genaue Zuordnung der unterschiedlichen Bewehrungslagen ist ersichtlich, wobei eine Durchmesserzuordnung nicht möglich ist.

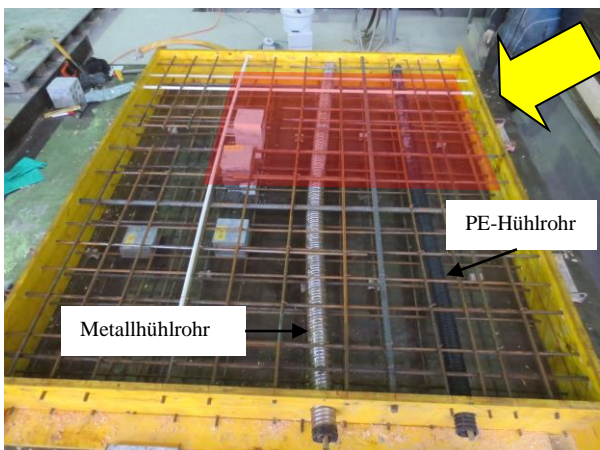


Abb. 2 Prüfkörper mit u.a. zwei eingelegten Vorspannhührlöhren aus Metall (links) und PE (schwarzes Hührlrohr rechts). Die rot eingefärbte Fläche markiert den Messbereich aus Abb. 3 und der Pfeil die Richtung der Draufsicht.

Die Abbildung 3 zeigt die Radarauswertung des in Abbildung 2 dargestellten Prüfkörpers (vor dem Betonieren). Mit der eingesetzten Antenne (Mittenfrequenz 2 GHz) können die Bewehrungen sowie das Metallhührlrohr sehr gut, das PE-Hührlrohr hingegen nicht detektiert werden. Durch den Einsatz einer anderen Antenne (1600 MHz) kann das PE-Hührlrohr hingegen in Abbildung 4 nachgewiesen werden.

Die Anwendung von Impuls-Radar ist bei feuchten Baustoffen z. B. bei jungem Beton (relative hohe Signaldämpfung möglich) sowie bei hohen Verlegedichten

der oberflächennahen Bewehrung eingeschränkt. Die Auswertungen der Radarsignale zeigen die metallischen Einlagen wie Bewehrungen in ihrer horizontalen geometrischen Lage im Bauteil. Eine eindeutige Zuordnung des Bewehrungsdurchmessers ist jedoch, wenn überhaupt, nur mittels zusätzlicher Kalibriersondagen möglich. Der eindeutige Abstand der Reflektoren von der Messoberfläche (vertikale Detektion) ist erst dann zuverlässig, wenn die Laufzeitachse der Radargramme unter Berücksichtigung der materialspezifischen Eigenschaften (Permittivität) in eine Tiefenachse umgerechnet wurde.

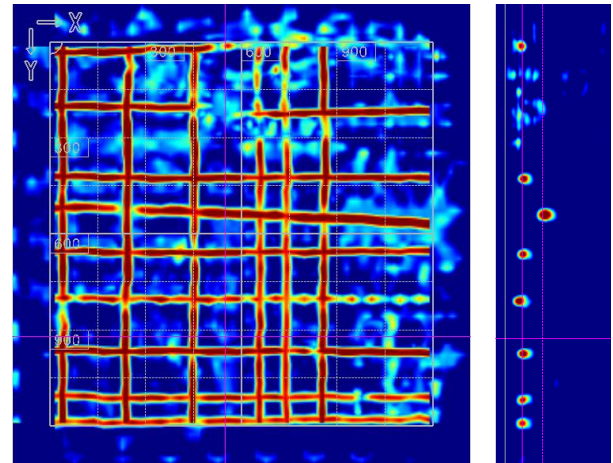


Abb. 3 C-Scanbild (Draufsicht) und Schnittbild Radar vom Prüfkörper in Abb. 2 (Mittenfrequenz 2 GHz).

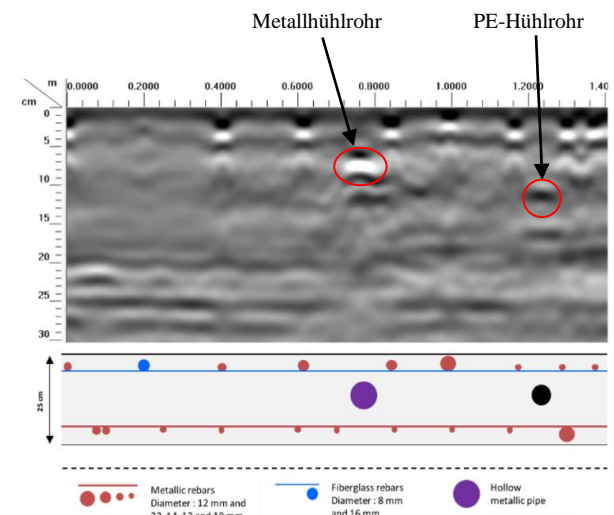


Abb. 4 B-Bild einer Detektion der Bewehrung und der Vorspannung in einem Prüfkörper (1600 MHz-Antenne).

Verschiedene Untersuchungen (siehe u.a. [6]) versuchten die Chloridbelastungen auf Brückenplatten mittels Radarmessungen zerstörungsfrei nachzuweisen. Auch wenn im erwähnten Bericht die ermittelten Ergebnisse für die Chloridbelastung auf der Basis von Werten für die Permittivität und Leitfähigkeit zu keiner Überein-

stimmung mit den Ergebnissen der Sondierungen gezeigt haben, so ist ein entsprechender Ansatz trotzdem erfolgsversprechend. Die Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Auswertung einer Radarmessung mit der 1600 MHz-Antenne. Dabei wurde in einem Prüfkörper an einigen ausgewählten Stellen Beton mit unterschiedlich hohem Chloridgehalt eingebaut. Mit den ausgewerteten Radardaten konnten die entsprechenden Bereiche relativ gut detektiert werden. Hierzu laufen weitergehende Untersuchungen mit Objekten mit einer vollflächigen Abdichtungen und Walzasphalt.

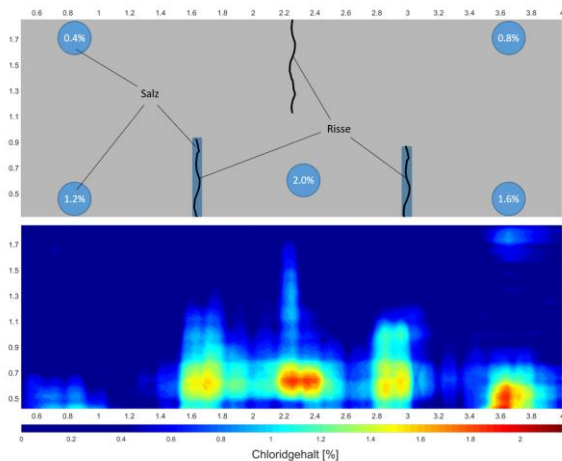


Abb. 5 Radarauswertung (1600 MHz-Antenne) bei einer Versuchsplatte mit Salzdepots mit unterschiedlichen Chloridgehalt.

### 3. Ultraschall-Tomografie

#### 3.1. Verfahren

Beim Ultraschall handelt es sich um ein akustisches Messverfahren. Dabei werden über einen Prüfkopf mechanische Impulse erzeugt, welche elastische Wellen im Bauteil erzeugen. Für Ultraschall im Beton liegen die erzeugten Frequenzen im Bereich zwischen 30 und 100 kHz. Moderne Ultraschallmessgeräte mit Punkt-Kontakt-Prüfköpfen (siehe Abb. 6) erzeugen Transveralwellen und erfordern hierfür zusätzliches kein Kopplungsmittel.

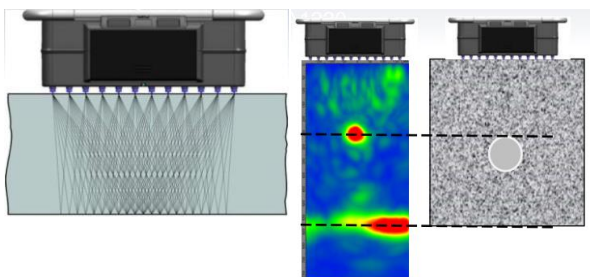


Abb. 6 Ultraschall-Tomograph mit Punkt-Kontakt-Prüfköpfen.

Die durch das Ultraschall-Messgerät erzeugten Schallwellen werden an Schichtgrenzen oder an Reflektoren wie z.B. Bewehrungsstäben oder Hohlräumen rückgestreut. Die Reflexion ist dabei umso stärker, je grösser der Impedanzunterschied von zwei Materialien ist. An einer Grenzfläche zur Luft erfolgt dabei nahezu eine Totalreflexion. Zur Dickenmessung von Bauteilen oder Bestimmung der Tiefenlage von Reflektoren wird die Laufzeitmessung verwendet. Dabei kann unter Berücksichtigung der im Bauteil vorherrschenden Schallgeschwindigkeit aus den gemessenen Laufzeiten die Messtiefe der reflektierenden Objekte bestimmt werden.

#### 3.2. Anwendungen

Die Ultraschallmessungen eignen sich sehr gut für die Bestimmung von Bauteilabmessungen. Die entsprechende Nachweisgrenze bei Betonbauten liegt dabei je nach Randbedingungen zwischen maximal 80 bis 100 cm. Bei grösseren Bauteilabmessungen werden andere Verfahren wie z.B. das Radarverfahren eingesetzt. Weiter können mit dem Ultraschall Hohlstellen und Kiesnester sowie oberflächenparallele Ablösungen detektiert werden. Mittels Ultraschall ist zudem auch eine Spannliedortung in Brückenplatten möglich.

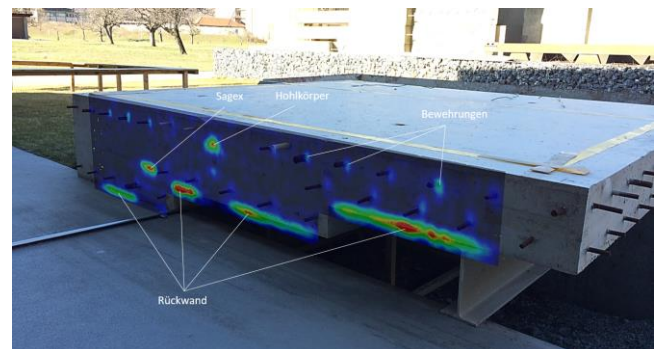


Abb. 7 Nachweis der Bauteilabmessungen an einem Prüfkörper mit unterschiedlichen Dicken mittels Ultraschall-Tomografie (50 kHz).

Abbildung 10 und 11 zeigen ein entsprechendes Beispiel von oberflächenparallelen Ablösungen in unterschiedlichen Tiefen bei einem Prüfkörper. Mit der Ultraschall-Tomografie (Messraster 100x100 mm) konnten alle Einlagen in unterschiedlichen Tiefen eindeutig detektiert und nachgewiesen werden. Die in den Einlagen eingebauten kreisrunden Löcher (Durchmesser 100 mm) sind in den Auswertungen ebenfalls z.T. erkennbar.



Abb. 8 Prüfkörper vor dem Betonieren mit den eingelegten (hellblau und pink) Dämmplatten.

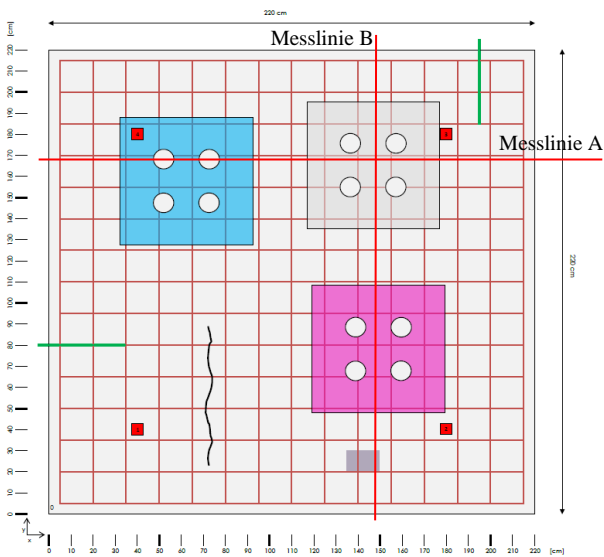


Abb. 9 Planskizze Prüfkörper (Bauteildicke 200 mm) mit Messlinie A. Bei der grau eingefärbten Einlage handelt es sich um eine während des Betoniervorgangs eingelegte PE-Folie.

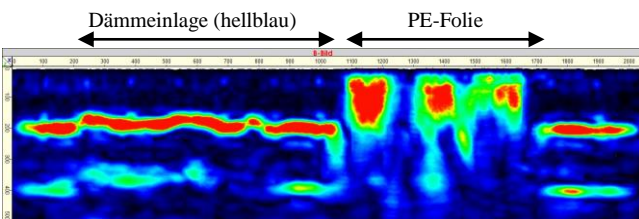


Abb. 10 B-Bild Messlinie A.

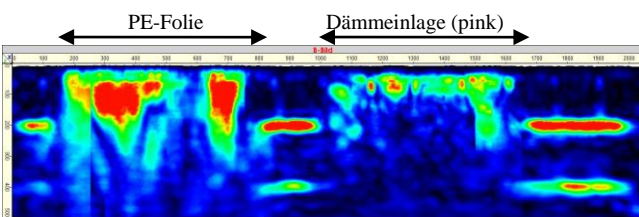


Abb. 11 B-Bild Messlinie B.

## 4. Aktive Thermografie

### 4.1. Verfahren

In der Automobil- und Flugzeugindustrie ist die Anwendung von aktiver Thermografie bereits seit längerem eine bewährte Untersuchungs- und Qualitätssicherungsmethode. Erfahrungen bei der Anwendung in der Praxis haben gezeigt, dass die aktive Thermografie als berührungsloses und bildgebendes Verfahren auch zur qualitativen Strukturuntersuchung von Bauwerken einsetzbar ist.

Bei der aktiven Thermografie wird im zu untersuchenden Bauteil mittels zusätzlicher Erwärmung oder Abkühlung aktiv ein instationärer Wärmetransport erzeugt. Dabei will man Fehlstellen und Inhomogenitäten in der zu untersuchenden Struktur quantitativ nachweisen [7]. Die Auswertung kann dabei im Gegensatz zur passiven Thermografie im Zeit- wie auch im Frequenzbereich erfolgen.

Idealerweise wird die Infrarot-Thermografie-Messung bei relativ grossen Temperaturgradienten entweder bei einem Aufwärm- oder Abkühlvorgang durchgeführt. Die zu detektierende Schichtstärke bestimmt im wesentlichen die Zeitspanne, innerhalb derer das Messobjekt ausgemessen wird. Die Aufheizung der Objekte kann wiederum in Abhängigkeit der Fragestellung (wie dick ist die zu untersuchende Schicht) mit Blitzlampen, Strahlern oder Halogenlampen durchgeführt werden. Da im Bauwesen vielfach relative grosse Oberflächen begutachtet werden, kann auch die natürliche Sonneneinstrahlung genutzt werden.

### 4.2. Anwendungen

Die Anwendungen der aktiven Infrarot-Thermografie im Bauwesen sind vielfältig:

- Ortung von Hohlstellen und Ablösungen z.B. bei Verbundabdichtungen oder Verstärkungen mittels CFK-Lamellen
- Ortung von Hohlstellen und oberflächenparallelen Schalenbildungen in Beton (Nachweisgrenze bei ca. 10 cm ab Bauteiloberfläche)
- Putzablösungen
- Detektion von Objekteinbauten wie z.B. Ankerköpfen
- Nachweis von Bereichen mit erhöhter Feuchtigkeit im Oberflächenbereich (Feuchtehorizonte)

Die Beispiele in Abbildung 12 und 13 zeigen den Nachweis von eingebauten Fehlstellen bei verklebten CFK-Lamellen mittels Infrarot-Thermografie (Aufwärmvorgang). Das in Abb. 9 bereits vorgestellte Beispiel ist in Abb. 14 mittels Infrarot-Thermografie ebenfalls ausgewertet dargestellt. Dabei konnte von den oberflächennahen Einbauten nur die Dämmung (pink),

jedoch nicht die in gleicher Höhe (ca. 50 mm) eingebaute PE-Folie nachgewiesen werden. Ein Beispiel für den Nachweis von eingebauten Fehlstellen bei einer vollflächig aufgeschweissten Polymerbitumen-Abdichtung zeigen die Abbildungen Abb. 17.3-17.7. Die aktive Thermografie kann folglich auf Brücken zur Kontrolle der Einbau- bzw. Verarbeitungsqualität von Verbundabdichtungen eingesetzt werden.

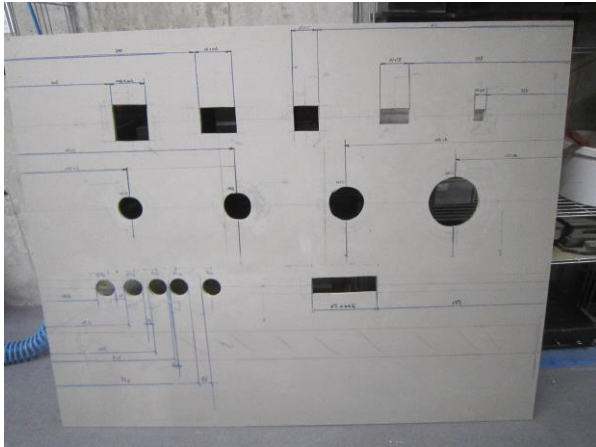


Abb. 12 Hinteransicht Prüfkörper mit unterschiedlich grossen, künstlich angelegten Fehlstellen.

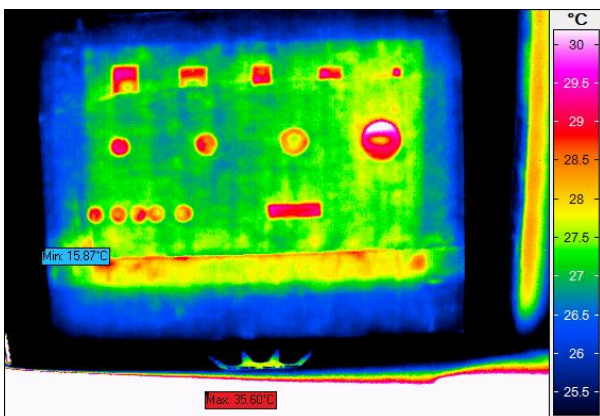


Abb. 13 Vollflächig verschweisste Polymerbitumenabdichtung. Infrarot-Thermografie-Bild rund 20 Sekunden nach Entfernen der Wärmequelle (Sonne).

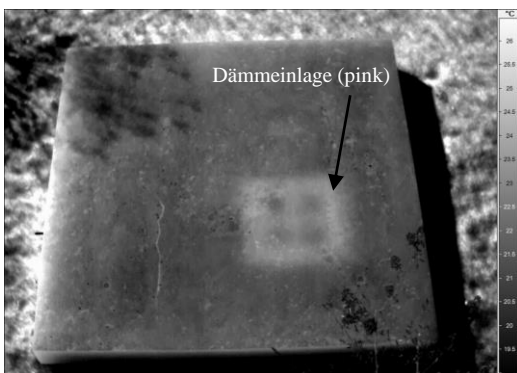


Abb. 14 Ausgewertetes Wärmebild des Prüfkörpers aus Abb. 9 (Abkühlphase).

## 5. Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS)

### 5.1. Verfahren

Die Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie ist eine Methode zur Untersuchung der Elementverteilung auf Oberflächen und sie bietet die Möglichkeit, direkt auf der optisch zugänglichen Oberfläche zweidimensional die Elementverteilung zu erfassen und darzustellen. Eine Aussage über den Bindungszustand der Elemente ist jedoch nicht möglich [8]. Mit Hilfe eines Laserstrahls werden einige Mikrogramm des zu untersuchenden Materials verdampft und dabei wird ein Plasma erzeugt. Die vom Plasma emittierte Strahlung wird über ein Glasfaserkabel zu einem Spektrometer geleitet und dort ausgewertet (Abb. 15). Als Ergebnis erhält man eine Intensitätsverteilung der Strahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge (Spektrum). Es sind prinzipiell alle Elemente aus dem Periodensystem nachweisbar.

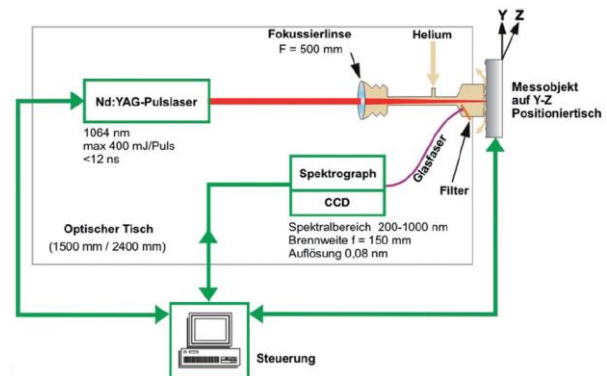


Abb. 15 Prinzipschema einer LIBS-Messung ([10]).

Ein wesentlicher Vorteil der LIBS-Messung gegenüber herkömmlichen spektrographischen Messmethoden ist die Möglichkeit die Probe zweidimensional abzurastern und entsprechend darzustellen (siehe Abb. 16).

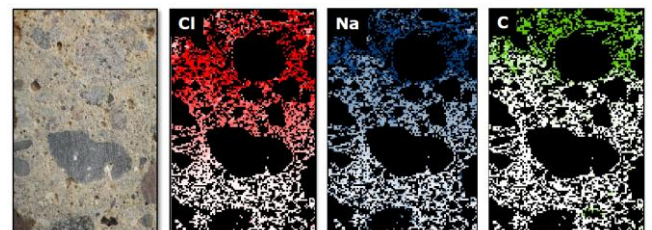


Abb. 16 Nachweis der Elemente Chlor, Natrium und Kohlenstoff aus einer Betonprobe.

Die zu prüfenden Oberflächen werden mit einer örtlichen Auflösung von bis zu 0.1 x 0.1 mm abgescannt und dabei für jeden Messpunkt die Elementkonzentration bestimmt. Mit dieser Auflösung kann die Heterogenität von Beton praktisch komplett abgebildet werden und ein sehr genauer Bezug der Elementkonzentrationen auf den Zementgehalt erfolgen [9].

## 5.2. Anwendungen

Typische Anwendungen von LIBS sind die Ermittlung der Konzentration von potenziell schädigenden Substanzen wie  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  oder  $\text{CO}_2$  im Beton. Hierbei gilt beim Nachweis der Chloride der Hinweis, dass nicht zwischen freiem und gebundenem Chlorid unterschieden werden kann. Die Abb. 17 zeigt eine Chlorid-Auswertung einer LIBS-Analyse im Vergleich mit einer nasschemischen Analyse an einer Betonprobe.

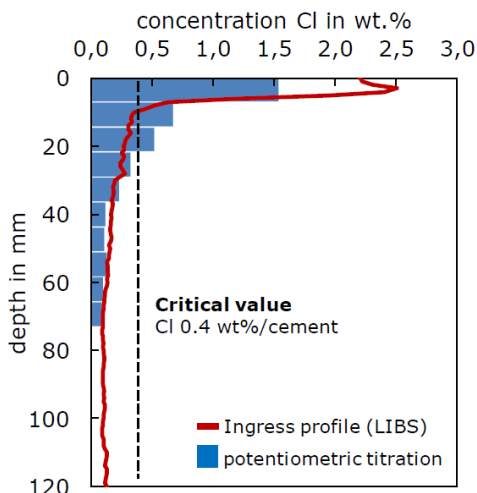


Abb. 17 Vergleich eines nasschemischen Nachweises von Chloriden und einer entsprechenden LIBS-Analyse an einer Betonprobe [8].

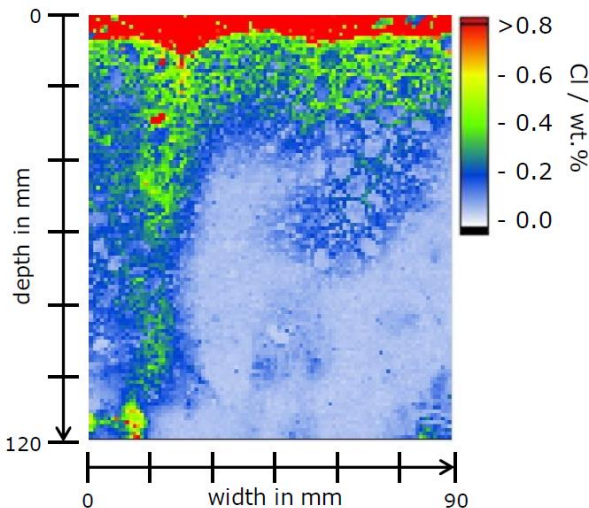


Abb. 18 Querschnitt eines Bohrkerns aus einer Betonplatte aus einem Parkhaus. Gut zu erkennen ist dabei die Chloridanreicherung entlang des Risses bis in Tiefen über 120 mm [8].

Weitere Anwendungen von LIBS sind die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe, die Bestimmung des Eintrags von Alkalien (bei Alkali-Kieselsäure-Reaktion), die Bestimmung der Verteilung von Schwefel, oder der Nachweis von Spurenelementen.

Beim nachfolgenden Beispiel lautete die Fragestellung, ob die vom Projektingenieur vorgesehene plangemäße Menge an Silikastaub ( $28 \text{ kg/m}^3$ ) effektiv eingebaut bzw. ob überhaupt Silikastaub verwendet wurde. Für die Identifizierung des Zusatzstoffes Silikastaub wurde die LIBS eingesetzt.

Hierzu wurden vorgängig auf der Grundlage der Grundrezeptur vier Referenzproben mit steigendem Anteil an Silikastaub (0, 14, 28 (Soll-Wert) und  $56 \text{ kg/m}^3$ ) hergestellt. Die entsprechenden Proben dienen zur Herleitung einer Kalibrierkurve.

Die Proben wurden im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit in je drei Teil-Zylinder trocken zersägt. Die einzelnen Querschnittsflächen wurden anschliessend mittels LIBS analysiert. Die Grösse der einzelnen Messfläche betrug  $30 \times 30 \text{ mm}$ . Die räumliche Auflösung betrug  $0.2 \times 0.2 \text{ mm}$ . Das Ergebnis für jeden Messpunkt bestand aus sechs akkumulierten Plasmaereignissen, um die Signalintensität zu erhöhen. Die Proben wurden auf einer ausgewählten Spektrallinie von Silizium getestet. Für den Nachweis wurden aus dem Bauwerk (Tunnel) entnommene Bohrkern (unbekannte Proben) nach dem gleichen oben beschriebenen Verfahren analysiert und mit den Referenzwerten bzw. der daraus gewonnenen Kalibrierkurve verglichen (siehe Abb. 19).

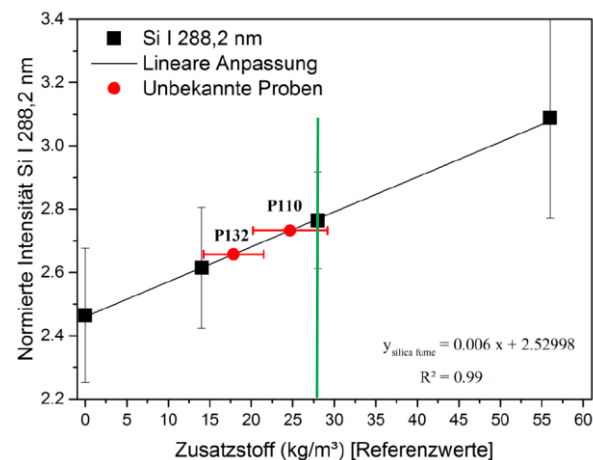


Abb. 19 Beispielhafte Darstellung einer Kalibrierung zur Quantifizierung der unbekannt Menge an Silikastaub.

Die grüne Linie markiert den Soll-Wert.

Die durchgeführten LIBS-Analysen liessen darauf schliessen, dass bei der Herstellung der unbekannt Proben Silikastaub verwendet wurde. Für den Gehalt an Silikastaub in den unbekannt Proben erfolgte die quantitative Angabe der Messunsicherheit unter Verwendung der dreifachen Standardabweichung. Die LIBS-Analyse ergab folgende Ergebnisse (P110):

- Messung 1:  $20 \text{ kg/m}^3 \pm 4 \text{ kg/m}^3$
- Messung 2:  $25 \text{ kg/m}^3 \pm 5 \text{ kg/m}^3$

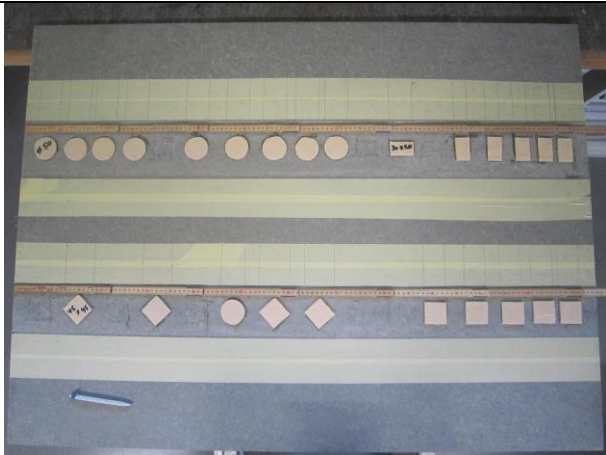


Bild 17-1

### Prüfkörper mit CFK-Lamellen

Die Abb. 17-1 zeigt den vorbereiteten Prüfkörper vor und die Abb. 17-2 nach dem Applizieren der CFK-Lamellen. Die nachfolgenden Wärmebilder zeigen den Aufwärmvorgang bei Sonneneinstrahlung ( $380 \text{ W/m}^2$ ) in unterschiedlichen Zeitabständen.

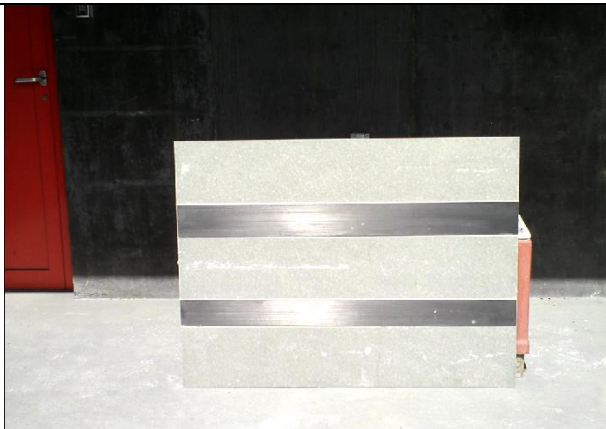


Bild 17-2

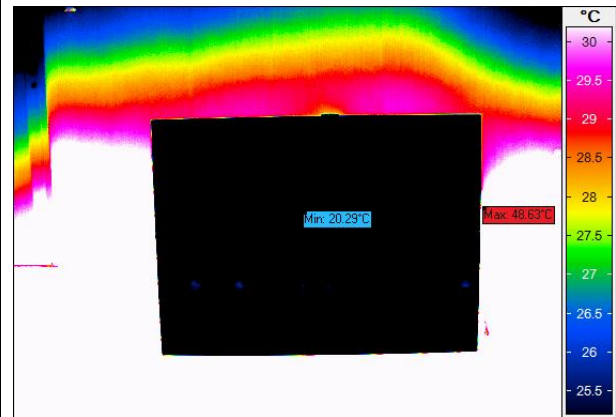


Bild 17-3 nach 10 Sekunden Einstrahlung Wärmequelle

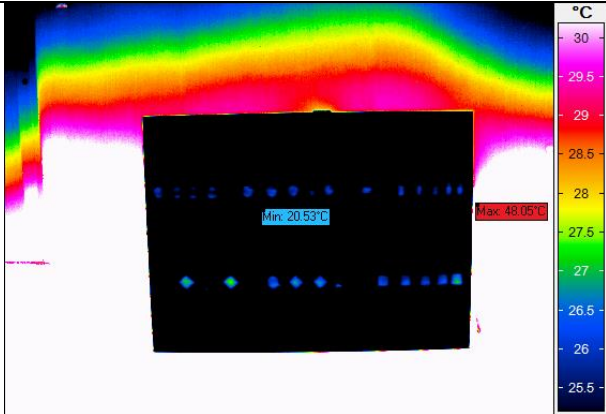


Bild 17-4 nach 20 Sekunden

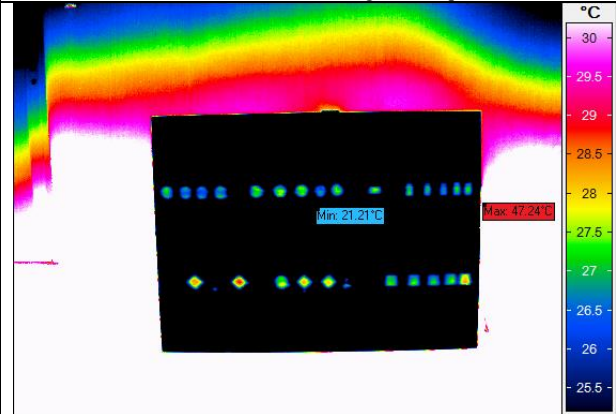


Bild 17-5 nach 30 Sekunden

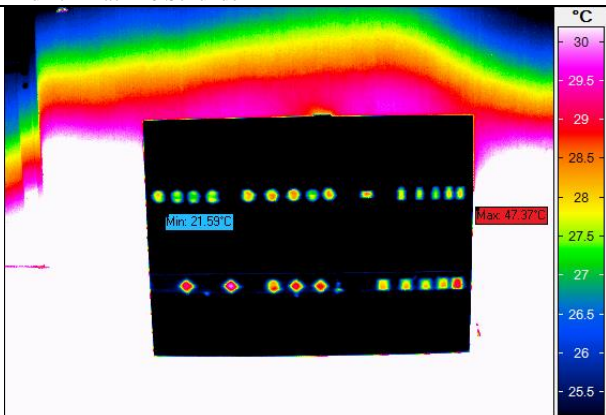


Bild 17-6 nach 50 Sekunden

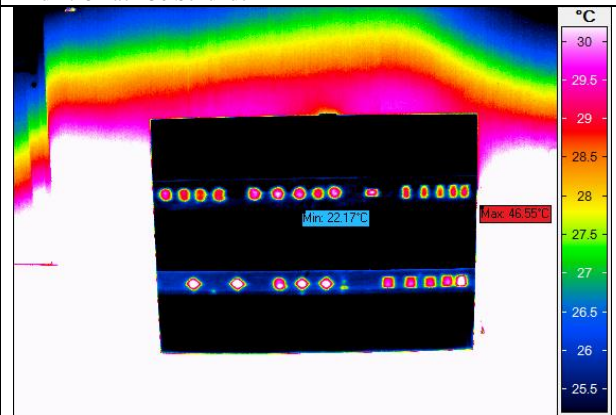


Abb. 17-7 nach 70 Sekunden

## 6. Literatur

- [1] Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen – Merkblatt Fassung Januar 2014  
Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin
- [2] Merkblatt über das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile, Merkblatt B 4  
Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung E.V., Februar 2008
- [3] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Merkblatt B 10  
Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung E.V., Februar 2008
- [4] Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen, Merkblatt B 11  
Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung E.V., Mai 1999
- [5] Einsatz von Ultraschallecho zur Spanngliedortung bei der Verstärkung von Brückenbauwerken  
Sebastian Schulze, Beton- und Stahlbetonbau 110(2015)
- [6] Ermittlung und Kartierung des Chloridgehalts in Brückenfahrbahnplatten mittels Georadaruntersuchungen  
Bundesamt für Strassen (Schweiz), Forschungsbericht AGB 2011/016, November 2015
- [7] Zerstörungsfreie Prüfung von Beton und Mauerwerk mit aktiver Thermografie  
Christiane Maierhofer, Mathias Röllig, Ralf Arndt, MP Materials Testing 51 (2009)
- [8] LIBS – Ein Tool zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Beton  
Gerd Wilsch, BAM, Berlin – Fachtagung DGZfP Bauwerksdiagnose 2018
- [9] Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalyse  
Steven Millar et al, Beton- und Stahlbetonbau 110(2015), Heft 8
- [10] Betonkorrosion durch Schwefelsäure in Abwasserbauwerken  
A. Taffe et al, Beton- und Stahlbetonbau 1025(2007), Heft 10