



1

BAUWERKE FÜR DIE EWIGKEIT?

{Text: Philipp Truffer

ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFVERFAHREN IM BAUWESEN

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) im Bauwesen sind unverzichtbare Hilfsmittel bei der Zustandserfassung von Bauwerken und in der Qualitätssicherung der Bauausführung. Zu den einfachen oder altbewährten Verfahren sind in den letzten Jahren weitere hinzugekommen, von denen nachfolgend einige vorgestellt werden, einschließlich ihrer jeweiligen Anwendungsgrenzen.

Bauwerke werden im Normalfall nicht für die Ewigkeit erstellt, d.h. sie altern. Eigentlich keine weltbewegende Neuigkeit. Aber angesichts des Teileinsturzes des Autobahnviadukts Polcevera (Ponte Morandi) in Genua ist der breiten Öffentlichkeit mit einem Mal bewusst geworden, was unter Umständen mit bestehenden Bauwerken passieren könnte. Plötzlich fragt man sich, wie sicher sind unsere Bauwerke, die wir tagtäglich nutzen, über die wir fahren oder in denen wir leben. Auch wenn die Ursachen der Katastrophe noch nicht eindeutig geklärt sind, so zeigen uns die tragischen Ereignisse von Genua eindrücklich die Endlichkeit menschengemachter Bauwerke.

Diese müssen während ihrer Nutzungsdauer den an sie gestellten Anforderungen an die Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit gerecht werden. Durch den Alterungsprozess und durch die Nutzung weicht man im Laufe der Jahre allerdings immer mehr vom Ideal- bzw. Sollzustand ab. Es darf jedoch nie zu einem nicht reparablen Zustand, zu einer vollständigen Zerstörung oder einem nicht planmäßigen Zusammenbruch

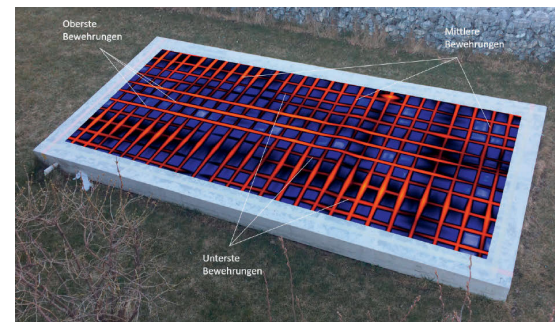
der Tragstruktur kommen. Dadurch ergibt sich folglich die zwingende Notwendigkeit, Bauwerke zu unterhalten und jederzeit ihren aktuellen Zustand zu kennen – oder zumindest einschätzen zu können. Denn im Rahmen der festgelegten (Rest-)Nutzungsdauer darf der optimale Zeitpunkt für die Planung und Umsetzung erforderlicher Instandsetzungs- und/oder Verstärkungsmaßnahmen nicht verpasst werden. Im Rahmen einer Zustandsuntersuchung und Bauwerksdiagnose gilt es daher, mit möglichst wenig Aufwand so viele Informationen wie möglich über den aktuellen Bauwerkszustand zu erhalten. Hierbei stehen Fachexperten inzwischen zahlreiche Instrumente, Verfahren und Methoden zur Verfügung, von denen u.a. eine Vielzahl zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren dienlich sein kann.

DAS EINZIG RICHTIGE ZfP GIBT ES NICHT

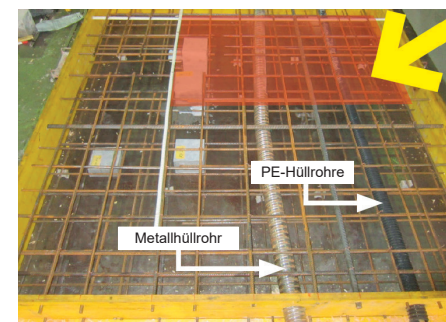
An zerstörungsfreie Prüf- und Untersuchungsverfahren im Bauwesen werden verschiedene Anforderungen gestellt. Wie der Name schon ausdrückt, sollten sie eben zerstörungsfrei oder zumindest zerstörungsarm sein. Die Verfahren sollten schnell, genau (was auch immer das heißen mag), möglichst flächendeckend sowie nachvollziehbar und interpretierbar sein. Man sollte sich aber hüten, ein Verfahren anzupreisen, das alle die

Einfache Verfahren	Traditionelle Verfahren	Moderne Verfahren
visuelle Begutachtung	Feuchtemessungen	Radar (Impulsradar, Georadar)
Hohlstellenprüfung mittels Hammermethode	- CM-Feuchte	Ultraschallecho
Rückprallhammer zur Abschätzung der Betondruckfestigkeiten	- Mikrowellen-Feuchte	Impakt-Echo
Temperaturmessungen	- relative Feuchte (Sorption)	aktive Infrarot-Thermografie
usw.	- usw.	Magnetische Streufeldmessung zur Detektion von Spanndrahtbrüchen in vorgespannten Bauteilen
	magnetisch induktive Bewehrungssuche	Dehnungsmonitoring
	Wirbelstrommessung	Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie LIBS
	Potenzialmessung zur Feststellung der aktiven Korrosion im Stahlbeton	Monitoring/Sensorik
	Bohrwiderstandsmessungen in Holz	usw.
	Schwingungsmessungen zur Erfassung der dynamischen Parameter des Bauwerks	
	Endoskopie	
	Belastungsversuche	
	geodätische Verfahren	
	usw.	

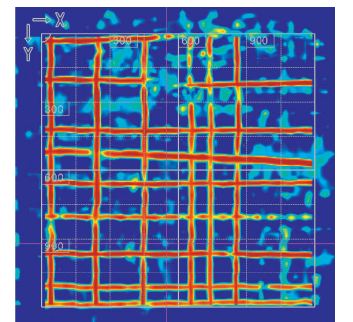
2



3



4



5

oben erwähnten Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen vermag. Vielmehr sollten gezielt auf die Frage- oder Problemstellung abgestimmte Vorschläge unterbreitet werden. Im Rahmen der Qualitätsüberwachung von Ausführungsmaßnahmen können mit den ZfP der Nachweis bzw. die Bestätigung erbracht werden, dass die gestellten Anforderungen an die Ausführung erfüllt wurden. Es gibt zahlreiche zerstörungsfreie Untersuchungs- und Messtechniken, die zuverlässig in der Praxis eingesetzt werden können. Die Tabelle (Abb. 2) zeigt eine Übersicht über bekannte und weniger bekannte Verfahren. Je nach Fragestellung kann ein entsprechendes Verfahren oder eine Kombination davon eingesetzt werden.

RADARANWENDUNGEN

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 angewendet: 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 400-2600 MHz zur Anwendung. Das Radarverfahren kann im Bauwesen in verschiedenen Bereichen eingesetzt werden

- Bewehrungsdetektion in Stahlbetonbauteilen
- Bestimmung von Bauteildicken (insbesondere auch bei Bruchstein-Mauerwerk)
- Objektortung
- Feuchte und Salzverteilungen
- Belagschicht-Dickenmessungen.

Da elektromagnetische Wellen an der Grenzfläche von Beton zu Metall vollständig reflektiert werden, eignet sich das Radarverfahren insbesondere zur Ortung und Detektion von schlaffer Bewehrung, metallischen Hüllrohren (Vorspannung) oder sonstigen metallischen Einbauten wie z.B. Ankerköpfen im Beton. Die Beispiele in den Abb. 3-5 demonstrieren entsprechende Anwendungen. Abb. 5 zeigt die Radarauswertung des in Abb. 4 dargestellten Prüfkörpers (vor dem Betonieren). Mit der eingesetzten Antenne (Mittelfrequenz 2 GHz) können die Bewehrungen sowie das Metallhüllrohr sehr gut, das PE-Hüllrohr hingegen nicht detektiert werden. Durch den Einsatz einer anderen Antenne (1600 MHz) konnte das PE-Hüllrohr hingegen nachgewiesen werden.

Die Anwendung von Impuls-Radar ist bei feuchten Baustoffen z.B. bei jungem Beton (relative hohe Signaldämpfung möglich) sowie bei hohen Verleedichten der oberflächennahen Bewehrung >

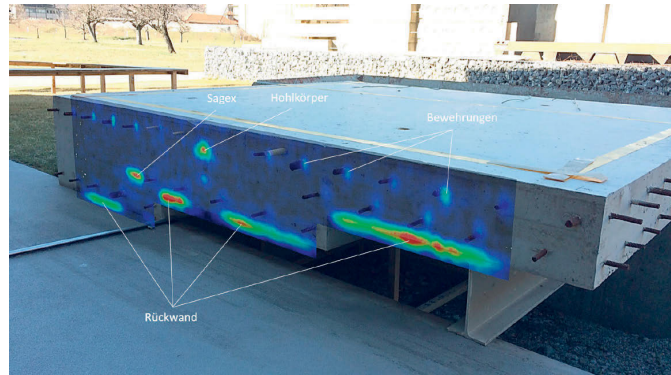
[1] ZfPVs gibt es viele, allein die aufgabenspezifisch beste muss gefunden werden. Im Bild eine Ultraschall-Tomografie bei einer Stützmauer

[2] Übersicht der zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (nicht abschließende Zusammenstellung)

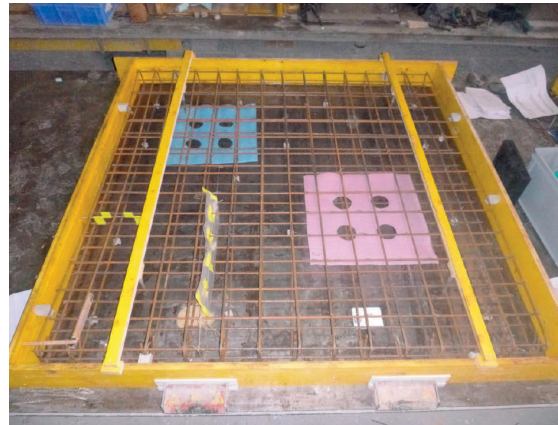
[3] Bewehrungsdetektion an einem bewehrten Prüfkörper mittels Radar (1600 MHz). Eine genaue Zuordnung der unterschiedlichen Bewehrungslagen ist ersichtlich, wobei eine Durchmesserzuordnung nicht möglich ist

[4] Prüfkörper mit u. a. zwei eingelegten Vorpannhüllrohren aus Metall (links) und PE (schwarzes Hüllrohr rechts). Rot eingefärbt der Messbereich aus Abb. 5, der Pfeil gibt die Richtung der Draufsicht an

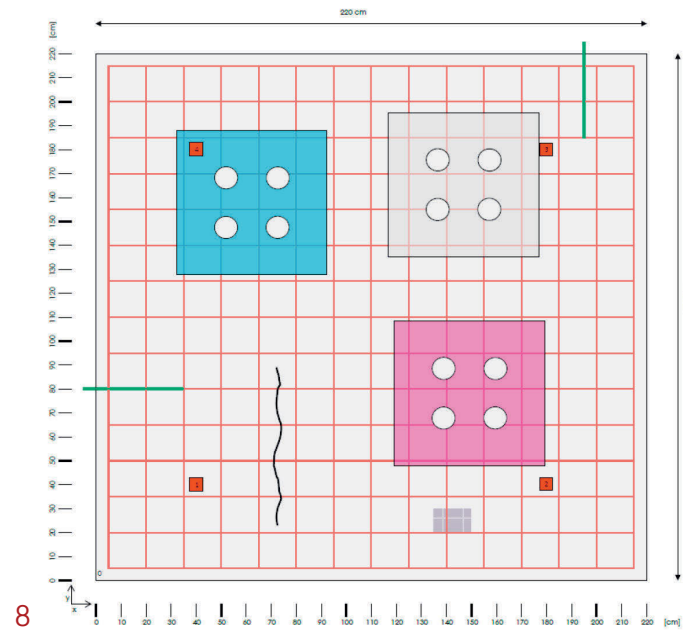
[5] Radar-Scanbild (Draufsicht) vom Prüfkörper in Abb. 4 (Mittelfrequenz 2 GHz)



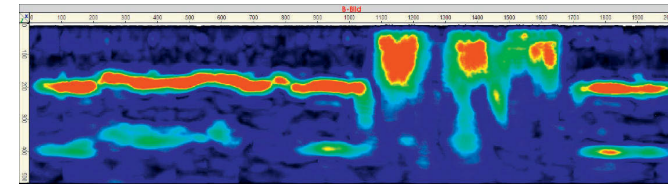
6



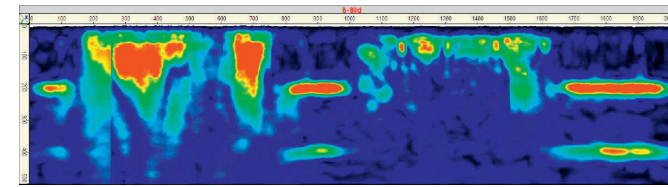
7



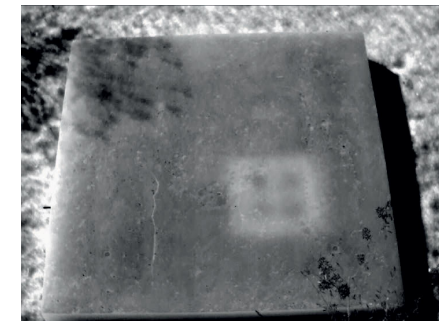
8



9



10



11

TECTUS® Glas
Ganzglastüren
flächenbündig
in Szene gesetzt

Minimalistisch
Filigran
Transparent



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.

ULTRASCHALL - TOMOGRAFIE

Beim Ultraschall handelt es sich um ein akustisches Messverfahren. Dabei werden über einen Prüfkopf mechanische Impulse erzeugt, die elastische Wellen im Bauteil erzeugen. Für Ultraschall im Beton liegen die erzeugten Frequenzen im Bereich zwischen 30-100 kHz. Die reflektierten Signale werden von einer neben der Sendeantenne positionierten Empfangsantenne aufgenommen. 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 (Wellenwiderstand) 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.

Die Ultraschallmessungen eignen sich sehr gut für die Bestimmung von Bauteilabmessungen (Abb. 6). Die entsprechende Nachweisgrenze bei Betonbauten liegt dabei je nach Randbedingungen zwischen max. 80-100 cm. Bei größeren Bauteilabmessungen werden andere Verfahren wie z.B. das Radarverfahren eingesetzt. Weiter können mit dem Ultraschall Auffälligkeiten wie Hohlstellen und Kiesnester sowie oberflächenparallele Ablösungen detektiert werden (Abb. 1). Mittels Ultraschall ist zudem auch eine Spanngliedortung in Brückenplatten sowie die Detektion von Verpressfehlern in Spanngliedern möglich. Die Abb. 9 und 10 zeigen ein entsprechendes Beispiel von oberflächenparallelen Ablösungen in unterschiedlichen Tiefen bei einem Prüfkörper (Abb. 7-8). 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.

AKTIVE INFRAROT - THERMOGRAFIE

In der Automobil- und Flugzeugindustrie ist die Anwendung der aktiven Infrarot-Thermografie bereits seit längerem eine bewährte Untersuchungs- und Qualitätssicherungsmethode. Erfahrungen bei der Anwendung in der Praxis haben gezeigt, dass sie als berührungsloses und bildgebendes Verfahren auch zur qualitativen Struktur-

untersuchung von Bauwerken einsetzbar ist. Bei der aktiven Thermografie wird im zu untersuchenden Bauteil mittels zusätzlicher Erwärmung oder Abkühlung ein instationärer Wärmetransport erzeugt. Dabei will man Fehlstellen und Inhomogenitäten in der zu untersuchenden Struktur quantitativ nachweisen [1]. Die Auswertung kann dabei im Gegensatz zur passiven Thermografie im Zeit- wie auch im Frequenzbereich erfolgen. Idealerweise wird die 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, lässt sich auch die natürliche Sonneneinstrahlung nutzen. 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 bis max. 10 cm ab Bauteiloberfläche)
- Putzablösungen
- Detektion von Objekteinbauten wie z.B. Ankerköpfen

- Nachweis von Bereichen mit erhöhter Feuchtigkeit im Oberflächenbereich (Feuchtehorizonte).

Das in den Abb. 7 und 8 bereits vorgestellte Beispiel ist in Abb. 11 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.

Die aktive Thermografie lässt sich z.B. auch auf Brücken zur Kontrolle der Einbau- bzw. Verarbeitungsqualität von Verbundabdichtungen einsetzen.

LASERINDUZIERTER BREAKDOWN-SPEKTROSKOPIE LIBS

Die sogenannte laserinduzierte Breakdown-Spektroskopie, kurz LIBS, ist eine Methode zur Untersuchung der Elementverteilung auf Oberflächen und 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 [2]. Mit Hilfe eines Laserstrahls werden einige Mikrogramm des zu untersuchenden Materials verdampft und dabei ein Plasma erzeugt. Die vom Plasma emittierte Strahlung wird über ein Glasfaserkabel zu einem Spektrometer geleitet und dort ausgewertet (Abb. 12). Als Ergebnis erhält man eine Intensitätsverteilung der Strahlung in Abhängigkeit der >

[6] Nachweis der Bauteilabmessungen an einem Prüfkörper mit unterschiedlichen Dicken mittels Ultraschall-Tomografie (50 kHz)

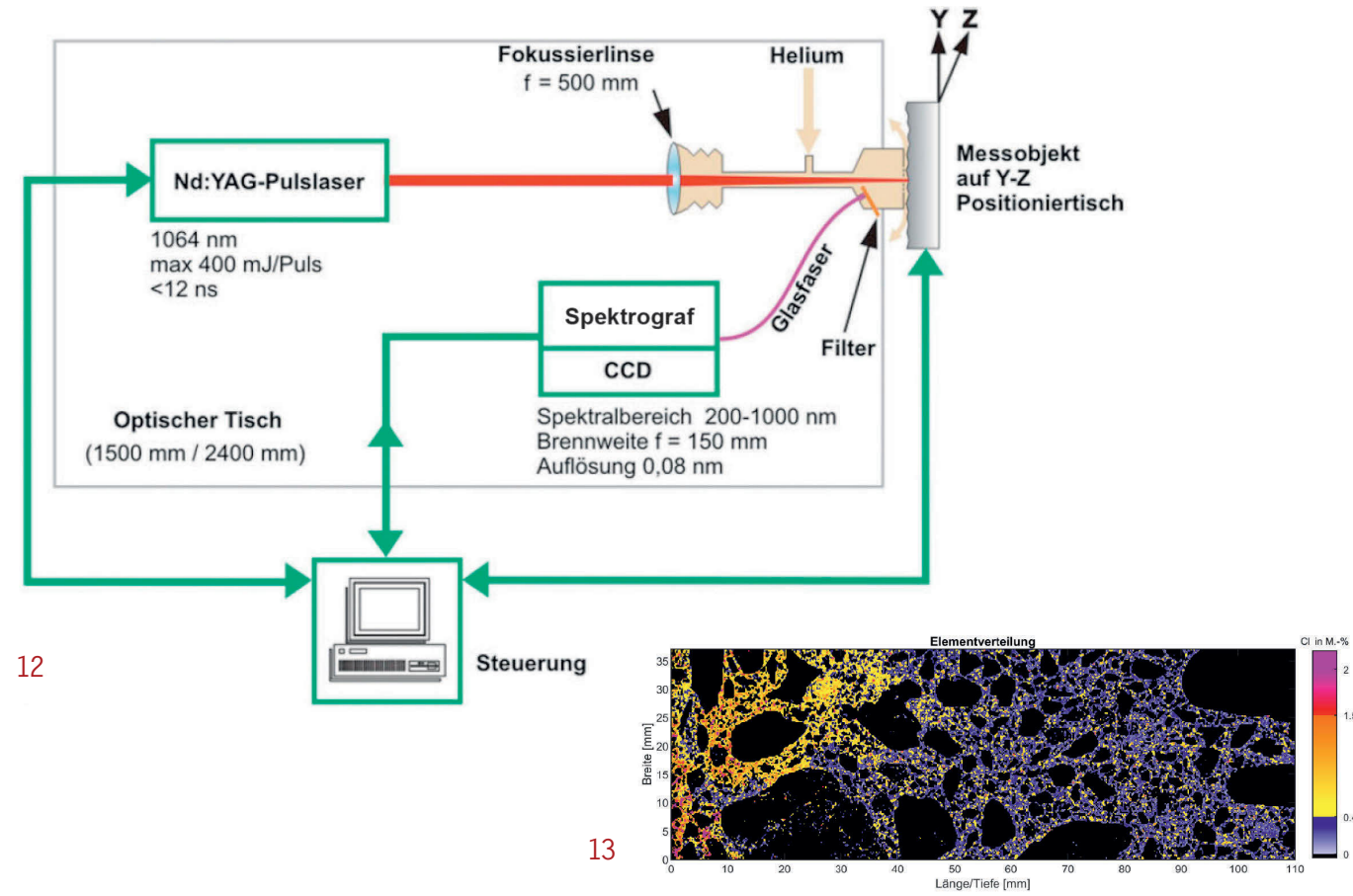
[7] Prüfkörper vor dem Betonieren mit den eingelegten Dämmplatten (hellblau und pink) ...

[8] .. und Planskizze Prüfkörper (Bauteildicke 200 mm). Bei der grau eingefärbten Einlage handelt es sich um eine während des Betoniervorgangs eingelegte PE-Folie

[9] Grafische Darstellung der Messung im Bereich der (hellblauen) Dämmplatte und Folie (grau)

[10] Grafische Darstellung der Messung im Bereich der pinkfarbenen Dämmplatte und grauen Folie

[11] Ausgewertetes Wärmebild des Prüfkörpers aus Abb. 7-8 (Abkühlphase nach aktiver Infrarot-Thermografie)



12

13

[12] Prinzipschema einer LIBS-Messung

[13] Nachweis von Chlorid an einem Bohrkern aus einer Parkdecke mittels LIBS

[14] OSSCAR-Bauwerksscanner mit Radar, Ultraschall und Wirbelstrommessung auf einem Messgerät

Wellenlänge (Spektrum). Es sind prinzipiell alle Elemente aus dem Periodensystem nachweisbar. Ein wesentlicher Vorteil der LIBS-Messung gegenüber herkömmlichen spektrografischen Messmethoden ist die Möglichkeit, die Probe zweidimensional abzurastern und entsprechend darzustellen (s. Abb. 13).

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 [3].

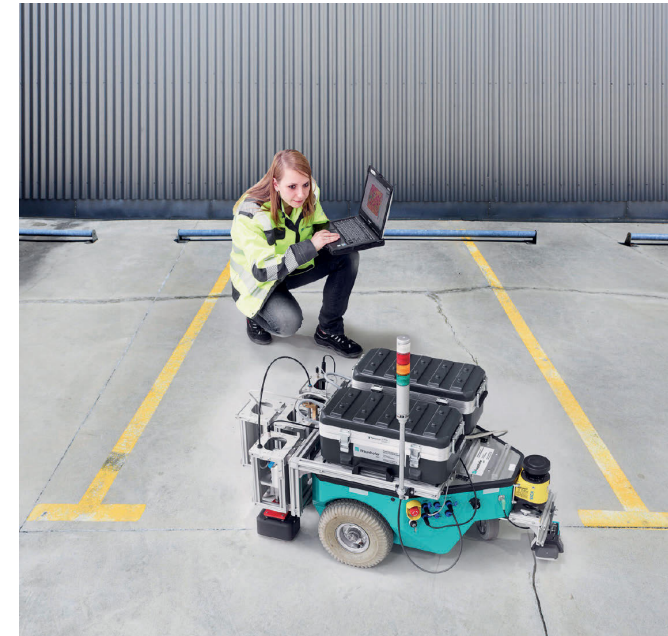
Typische Anwendungen von LIBS sind die Ermittlung der Konzentration von potenziell schädigenden Substanzen wie Cl⁻, SO₄⁻, Na⁺ oder CO₂ im Beton. Hierbei gilt beim Nachweis der Chloride der Hinweis, dass nicht zwischen freiem und gebundenem Chlorid unterschieden werden kann.

Das LIBS-Verfahren eignet sich hervorragend, um Transportmechanismen in Betonbauteilen aufzuzeigen. Weitere Anwendungen sind die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe, des Eintrags von Alkalien (bei Alkali-Kieselsäure-Reaktion), und der Verteilung von Schwefel z.B. bei biogener Schwefelsäurekorrosion in Abwasserbauwerken oder der Nachweis von Spurenelementen.

KOMBINATION VON MESSVERFAHREN

Wie bereits erwähnt, gibt es nicht das alleinige zerstörungsfreie Prüfverfahren. Je nach Aufgabenstellung ist oftmals erst der Einsatz verschiedener, unterschiedlicher Verfahren sinnvoll. Damit können die Vorteile der einzelnen Methoden optimal ausgenutzt werden. Denn ein einzelnes zerstörungsfreies Prüfverfahren kann nicht alles! Ein möglicher Ansatz hierzu wurde bei der Entwicklung des OSSCAR-Bauwerksscanner gewählt (Abb. 14). Dabei wurden verschiedene ZfP-Verfahren mit automatisierter Datenaufnahme von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom mit nachfolgender bildgebender Darstellung der inneren Konstruktion kombiniert.

Vor dem Einsatz von ZfPs gilt es immer zuerst die Prüfaufgabe möglichst klar zu formulieren: Was ist die Aufgabenstellung, was will man wissen und welchen Aufwand will man in welcher Zeit aufwenden? Welche Randbedingungen (z.B. Messen unter Verkehr oder Nachteinsatz) beeinflussen die Wahl des Verfahrens? Sind die zu untersuchenden Bereiche des Bauwerks zugänglich? Und welche Hilfsmittel wie z.B. Gerüste sind für die Messuntersuchungen vorzusehen? Weiter muss abgeklärt werden, welche Grundlagen bereits vorliegen. Ein Studium der Bauakten (falls vorhanden) kann hierzu schon wichtige Erkenntnisse liefern. Es empfiehlt sich zudem, wenn möglich, nach Festle-



14

gung des Messverfahrens entsprechende Vorversuche am Messobjekt durchzuführen. Dabei kann festgestellt werden, ob mit den getroffenen Annahmen und dem ausgewählten Verfahren die angestrebten Ziele erreicht werden können. Vielfach sind außerdem trotz der Anpreisung der Zerstörungsfreiheit gezielt ausgewählte lokale Sondageöffnungen im Bauteil zur visuellen Überprüfung und zur Kalibrierung der Messresultate erforderlich. Auch dies sollte zunächst mit dem Auftraggeber klar kommuniziert werden. Schließlich gilt noch, dass eigentlich jeder messen kann. Die derzeit auf dem Markt zur Verfügung stehenden Geräte und Systeme sind durchweg bedien- und anwenderfreundlich. Aber, eine ZfP-Aufgabe ist erst dann kompetent und erfolgreich abgeschlossen, wenn die Resultate auch fachgerecht ausgewertet und interpretiert wurden. •

{Literaturhinweise und weitere Informationen:

- [1] Christiane Maierhofer, Mathias Röllig, Ralf Arndt, Zerstörungsfreie Prüfung von Beton und Mauerwerk mit aktiver Thermografie, MP Materials Testing 51 (2009)
- [2] Gerd Wilsch, LIBS – Ein Tool zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzung von Beton, DGZfP-Fachtagung Bauwerksdiagnose, 2018, Berlin

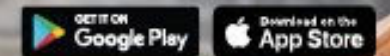
[3] Steven Millar u. a., Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalyse, Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 8

- Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen – Merkblatt Fassung Januar 2014, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Berlin
- Merkblätter von der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Berlin: z. B. über das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile, Merkblatt B 4, Februar 2008, oder über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Merkblatt B 10 Februar 2008 sowie über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen, Merkblatt B 11 Mai 1999
- Philipp Truffer und Nathan Metthez, Oberflächenparallele Ablösungen auf Betontragwerken – Detektion und Bewertung mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren, DGZfP-Fachtagung Bauwerksdiagnose 2018, Berlin
- Philipp Truffer und Nathan Metthez, Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren bei der Zustandserfassung auf Brücken – ein Erfahrungsbericht aus der Praxis, 3. Brückenkolloquium 2016, TAE, Stuttgart

SCHOMBURG digital

Schnell und sicher zur Bauwerksabdichtung.
Frag Albert! Die App.

Jetzt die App downloaden >



PROJEKT PLANEN.

DETAIL LÖSEN.

PRODUKTE FINDEN, MENGEN BERECHNEN.

fragalbert.de

SCHOMBURG
Sicher die Lösung.