

# Es geht auch einfacher

**Mit laserbasiertem Verfahren Zustand von Betonbauwerken erfassen:** Die Laserinduzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS) stellt eine Alternative zur nasschemischen Analyse dar, um den Zustand von Betonbauwerken zu erfassen. Bei diesem Verfahren laufen der Analysevorgang und die Auswertung automatisiert ab. Ein Prototyp für die mobile Anwendung auf der Baustelle steht zur Verfügung. So kann auf Knopfdruck ein schriftlicher Bericht erstellt werden, der einen genauen Wert für die Eindringtiefe eines relevanten Elements wie Chlorid ausgibt.

Cassian Gottlieb, Matthias Bernhard Lierenfeld, Gerd Wilsch, Christian Bohling

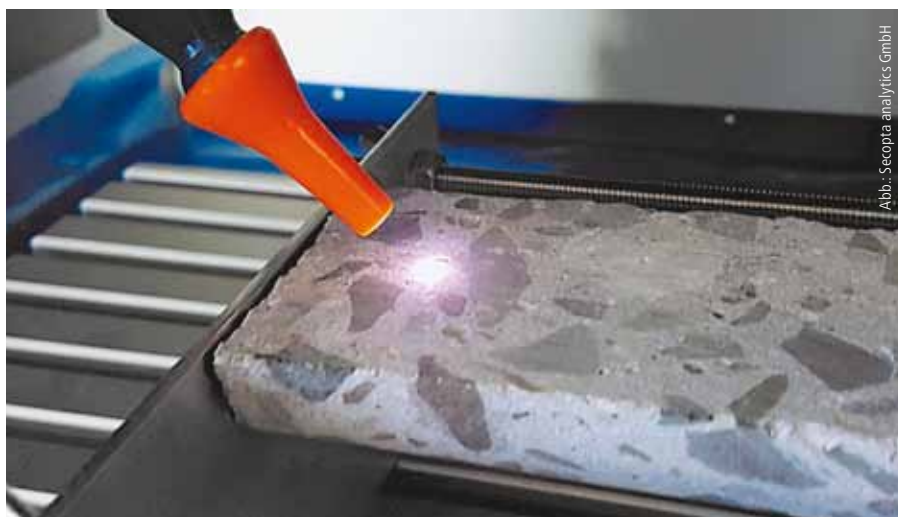


Abb. 1: Bei einer LIBS-Messung wird ein laserinduziertes Plasma auf einer Betonkernoberfläche erzeugt, wodurch ein Teil der Probe verdampft und eine elementspezifische Strahlung emittiert wird. Diese kann mit einer geeigneten Optik gemessen werden.

Um den Zustand von Betonbauwerken zu erfassen, sind verschiedene Schädigungsprozesse und ihr Fortschreiten zu beurteilen. Zu den in unseren Breitengraden häufigsten Schädigungsmechanismen gehört die Chlorid-induzierte Lochkorrosion in der Stahlbewehrung. Sie wird insbesondere durch Streusalz verursacht. Das Salz wird zum Beispiel durch Fahrzeuge in Parkhäuser eingetragen und dringt in die Betonoberfläche ein.

Um diese Korrosion zielsicher zu verhindern, sind präventive Instandsetzungsmaßnahmen durchzuführen, bevor an der Bewehrung ein kritischer Chloridgehalt erreicht wird. Deshalb werden bei einer Zustandsanalyse der Chloridgehalt und die Eindringtiefe ermittelt. Etabliert sind hierfür nasschemische Verfahren. Relativ neu sind laserbasierte Analyseverfahren (Abb. 1).

## Nasschemische Analyse ist aufwendig

Für die nasschemische Analyse werden an mehreren Stellen Bohrkern entnommen (Abb. 2) und im Labor untersucht. Die Bohrkern werden hierfür zunächst in Scheiben mit einer Dicke von circa zehn Millimetern geschnitten (Abb. 3). Anschließend werden diese zerkleinert, homogenisiert und nasschemisch analysiert. Das Ergebnis zeigt die mittlere Konzentration der Chloride bezogen auf das homogenisierte Volumen der Scheibe.

Diese Art der Analyse ist zeitaufwendig und aufgrund der vielen Prozessschritte arbeitsintensiv. Daher werden in der Praxis oft weniger Scheiben untersucht, zum Beispiel nur aus drei Tiefen. Das mindert zwangsläufig die Aussagekraft der Ergebnisse.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass beim Zerkleinern die Bindemittelmatrix (Zement) und die Gesteinskörnung zu einem homogenen Pulver verarbeitet werden. Das Analyseergebnis zeigt somit die Chloridkonzentration bezogen auf die Gesamtmasse aus Zement und Gesteinskörnung an [1]. Dieses Messergebnis ist verhältnismäßig wenig aussagekräftig, da aktuelle Normen und Richtlinien [2] die zu ermittelnde Chloridkonzentration von Beton bezogen auf den Zementanteil fordern. Deshalb wird das Ergebnis umgerechnet und dafür die Betonzusammensetzung abgeschätzt, zum Beispiel 2/9 Zement, 1/9 Wasser und 6/9 Gesteinskörnung. Exakt lässt sich dieser Faktor nur mit einem hohen labortechnischen Aufwand ermitteln, zum Beispiel durch die Bestimmung des Glühverlusts und einen Säureaufschluss. Das wird in der Regel aber nicht praktiziert. So bleibt neben diesem unbekanntem Faktor zusätzlich der Einfluss der Gesteinskörnung unberücksichtigt. Auch lokale Erhöhungen der Chloridwerte, verursacht durch Poren und Risse, bleiben unerkannt.

## Die laserinduzierte Plasmaspektroskopie stellt eine Alternative dar

Eine Alternative zur nasschemischen Analyse ist die Laserinduzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS). Mit ihr können in Sekundenbruchteilen berührungslos qualitative und quantitative Analysen durchgeführt werden. Bei dieser optischen Atom-Emissions-Spektroskopie (Analyse von Licht) wird die Strahlung eines gepulsten Lasers auf einer Probenoberfläche fokussiert – hier Beton – und erzeugt durch die hohe Energiedichte im Brennpunkt ein Plasma von mehreren tausend Grad Celsius.

Hierdurch wird ein kleiner Teil der Probe im  $\mu\text{g}$ -Bereich verdampft (Abb. 1). Die hohe Temperatur regt das verdampfte Material an, sodass unter anderem eine elementspezifische Strahlung erzeugt wird. Mit einer geeigneten Optik aus Linsen und Lichtleitfasern lässt sich diese Strahlung mit einem Spektrometer detektieren und die chemische Zusammensetzung der Probe bestimmen (Abb. 4). Die Auswertung der elementspezifischen Emissionslinien (Spektren) erfolgt dabei durch verschiedene statistische Methoden und Datenverarbeitung vollautomatisch.

### LIBS ermittelt zahlreiche Werte simultan

Mit dem Verfahren lassen sich theoretisch alle Elemente des Periodensystems simultan messen. Dadurch können in einem Arbeitsgang unterschiedliche Schädigungsmechanismen untersucht werden, die durch unterschiedliche Elemente ausgelöst werden wie die Chlorid-induzierte Korrosion der Stahlbewehrung, die Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) oder die Karbonatisierung. Dabei zeigt die LIBS-Analyse im Anschluss an die Messung eine 2D-Verteilung dieser Elemente an der Querschnittsfläche an, wodurch wichtige Indikatoren für die Bewertung des Ist-Zustands dargestellt werden, zum Beispiel die Konzentration, Eindringtiefe und räumliche Ausbreitung.

Bei der orts aufgelösten Messung mit LIBS wird die Materialheterogenität von Beton berücksichtigt, da die Laserpulse punktwisese rasterförmig abgegeben werden. Dies ist durch die Bewegung der Probe mit zwei motorisierten Achsen in einer räumlichen Auflösung von  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$  möglich. Im Anschluss an die Messung können durch Auswertung der Spektren elementabhängige Transportprozesse im Beton visualisiert werden (Abb. 5).

Da einige Gesteine einen hohen Natrium- und/oder Chloridgehalt aufweisen können, beeinflussen sie durch die Homogenisierung des Bohrmehls beim nasschemischen Verfahren die Analyse. Diese Gehalte sind aber in der Gesteinskörnung des Betons gebunden und tragen daher in der Regel nicht zum effektiven Schädigungsprozess bei. Um den externen Eintrag an Tausalzen zuverlässig abschätzen zu können, müssen diese Elemente berücksichtigt werden.



Abb. 2/3: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung



Abb. 2/3: Die nasschemische Analyse ist aufwendig. Zunächst werden Bohrkern entnommen und dann in mindestens drei jeweils zehn Millimeter dicke Scheiben gesägt. Diese werden einzeln zermahlen und analysiert.



Abb.: Secopta analytics GmbH

Abb. 4: In so einer automatisierten Messkammer kann eine schnelle orts aufgelöste LIBS-Messung durchgeführt werden.

## Titelthema Betoninstandsetzung

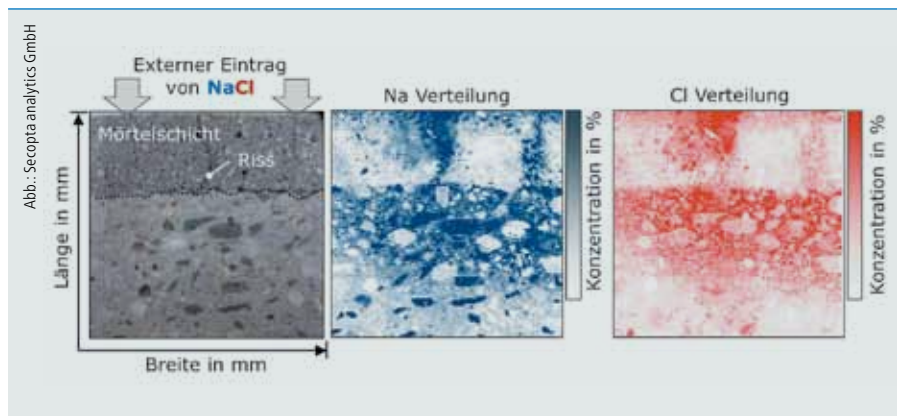


Abb. 5: Die zweidimensionale LIBS-Messung einer Betonquerschnittsfläche (links) zeigt die ortsaufgelöste Elementverteilung für Cl (Mitte) und Na (rechts).

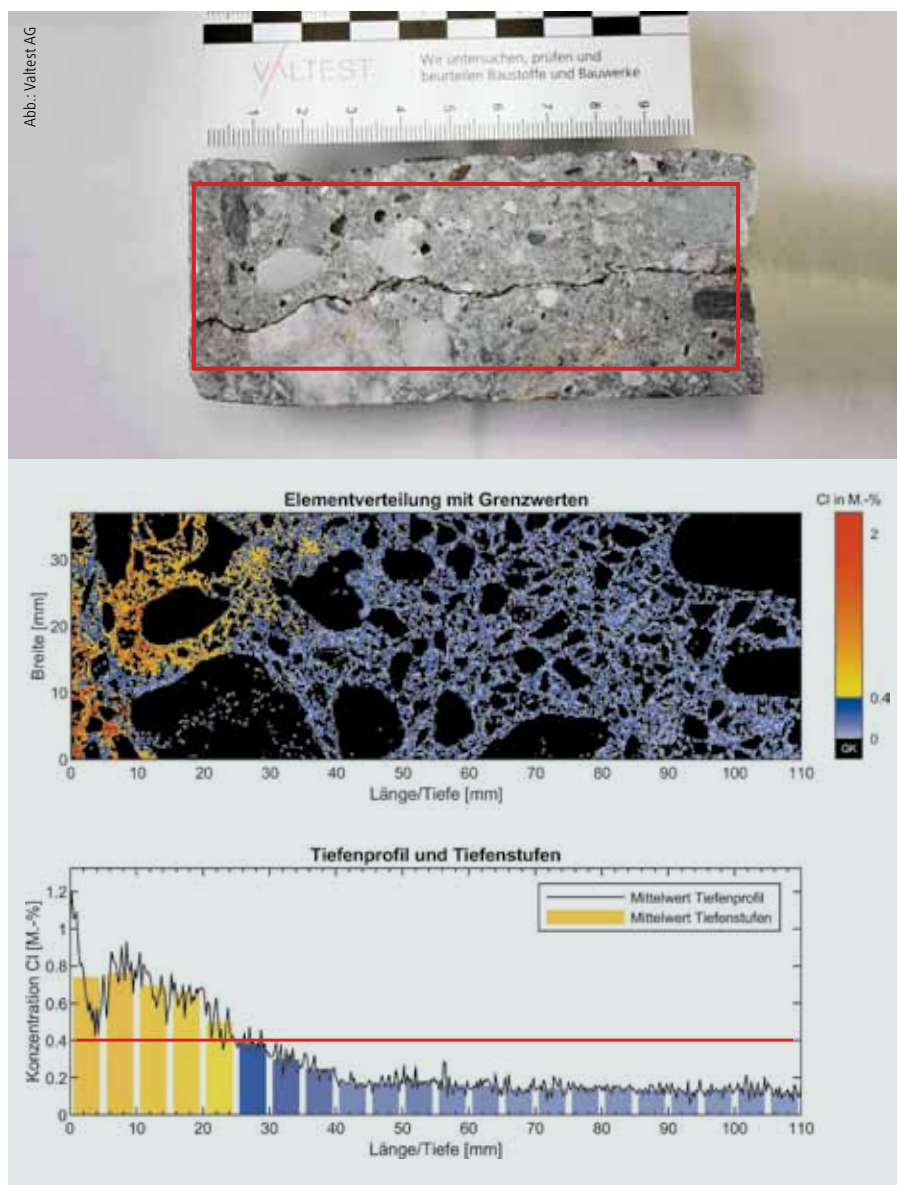


Abb. 6: Der halbierte Bohrkern (oben) wurde im rot markierten Messfeld mit dem LIBS-Verfahren analysiert. Die zwei-dimensionale farbkodierte Darstellung in der Mitte veranschaulicht die Ergebnisse mit Grenzwerten. Die Tiefenprofile (unten) wurden durch die Mittelung der Messpunkte pro Messlinie aus dem 2D-Ergebnis extrahiert. Dabei ist die Betonheterogenität berücksichtigt.

Dies geschieht bei LIBS über mathematische Klassifikationsverfahren, mit denen für die Analyse nicht relevante Gesteinskörnungen ausgeschlossen werden können, sodass Elementkonzentrationen ausschließlich in der Bindemittelmatrix bestimmt werden. Außerdem ist es mit diesem Verfahren möglich, aus den zweidimensionalen Profilen die in der Bauingenieurbranche bekannten Eindringprofile zu extrahieren (Abb. 6).

### LIBS-Verfahren wurde in die Baustellenpraxis überführt

Durch die stetige Weiterentwicklung von Lasern, Detektoren und optischen Komponenten konnte das LIBS-Verfahren aus dem Labor in die Baustellenpraxis überführt werden [3, 4, 5, 6]. So hat die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Kooperation mit dem Ingenieurbüro SKP [7] und dem Gerätehersteller Seccopta analytics GmbH [8] einen Prototyp für die mobile Anwendung direkt am Bauwerk entwickelt. Dieses Gerät ermöglicht die Chlorid-Analyse direkt am Bauwerk (Abb. 7–10).

Des Weiteren wurde in der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) ein Unterausschuss „LIBS im Bauwesen“ gegründet, der einen ersten Schritt in Richtung Standardisierung darstellt. Der Ausschuss beschäftigt sich mit der Etablierung des LIBS-Verfahrens für die Baustoffanalytik sowie mit den instrumentellen und analytischen Anforderungen.

### Auch in der Schweiz wird das neue Verfahren angewandt

Die Valtest AG, ein akkreditiertes Baustoff-Prüflabor mit Sitz im schweizerischen Lalden [9], hat 2018 ein Fiber-LIBS-Sensorsystem erworben und ist damit in der Baustoffindustrie der erste kommerzielle Anwender des Verfahrens. Der prüftechnische Schwerpunkt liegt momentan auf der detaillierten und lokalen Messung von Chlorid. Hierfür setzt das Unternehmen ein quantitatives Standardverfahren ein, mit dem der Chloridgehalt anhand von Kalibrierproben quantifiziert wird (Abb. 6).

Diese speziellen Zementproben wurden von der BAM durch Beimischen von vordefinierten Chloridgehalten hergestellt. Vor jeder Mess-Kampagne werden die Kalibrierproben gemessen, um die Stabilität und die Zuverlässigkeit im Hinblick auf die Qualitätssicherung zu garantieren.

Die Valtest AG arbeitet außerdem daran, die Anwendung des LIBS-Verfahrens auszuweiten und zum Beispiel die Karbonatisierung, die Alkali-Aggregat-Reaktion oder die Eindringtiefe einer Hydrophobierung zu bestimmen. ■

Abb. 7–10: Mit dem Prototyp des mobilen LIBS-Systems lässt sich die ortsaufgelöste Elementverteilung von Chlorid bestimmen.



## Autoren

Dr. Cassian Gottlieb

Applikationsingenieur, Secopta analytics GmbH  
Teltow

Dr. Matthias Bernhard Lierenfeld

Stv. Prüfstellenleiter, Valtest AG  
Lalden, Schweiz

Dipl.-Phys. Gerd Wilsch

Wissenschaftler, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Berlin

Dr. Christian Bohling

Geschäftsführer, Secopta analytics GmbH  
Teltow



## Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Arbeitskreis Prüfverfahren – Chlorideindringtiefe (Hrsg.): Heft 401/1 Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton, 1989
- [2] DIN EN 206:2017-01 Concrete – Specification, performance, production and conformity, Deutsche Fassung: EN 206:2013+A1:2016
- [3] [www.bam.de](http://www.bam.de)
- [4] Wilsch, G.; Weritz, F.; Schaurich, D.; Wiggerhauser, H.: Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy, in: Construction and Building Materials, pp. 724–730, 2005
- [5] Gottlieb, C.; Günther, T.; Wilsch, G.: Impact of grain sizes on the quantitative concrete analysis using laser-induced breakdown spectroscopy, in: Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, pp. 74–84, 2017
- [6] Millar, S.; Wilsch, G.; Eichler, T.; Gottlieb, C.; Wiggerhauser, H.: Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalyse, in: Beton- und Stahlbeton 8/2015, S. 10
- [7] [www.bauwerkplan.de/firma/specht-kalleja-partnerberatende-ingenieure-gmbh](http://www.bauwerkplan.de/firma/specht-kalleja-partnerberatende-ingenieure-gmbh)
- [8] [www.secopta.de](http://www.secopta.de)
- [9] [www.valtest.ch](http://www.valtest.ch)



Abb. 7–10: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung