

Beton- und Stahlbetonbau



Röntgen in der Bauwerksdiagnostik Neue Praxisbeispiele zu Bewehrungskorrosion und Spannbeton

Dr.-Ing. Sebastian Schulze

Röntgen in der Bauwerksdiagnostik

Neue Praxisbeispiele zu Bewehrungskorrosion und Spannbeton

Mit dem Röntgenverfahren (auch Radiographie oder Durchstrahlungsprüfung genannt) können in der zerstörungsfreien Bauwerksprüfung (ZfPBau) Erkenntnisse gewonnen werden, die mit keinem anderen Verfahren denkbar sind. Die direkte Bildgebung des Bauteilinneren, ähnlich einer Schwarzweißfotografie, ermöglicht die eindeutige Identifikation und eine millimetergenaue Vermessung von Einbauteilen wie Bewehrung, Verankerungen oder Spanngliedern und die Visualisierung von Verpressmängeln, Rissen, korrosionsbedingten Querschnittsverlusten und dergleichen, ohne Bauteilöffnungen zur Verifizierung anlegen zu müssen. Somit können Erhaltungszustände bewertet und Bewehrungspläne und Bauteilquerschnitte zuverlässig rekonstruiert werden. Begrenzt wird die Anwendung des Verfahrens in der Praxis durch die notwendige beidseitige Zugänglichkeit zum Bauteil sowie die Bauteilstärke, die beeinflusst, welche Details in den erzeugten Bildern noch sichtbar und interpretierbar sind. Dieser Beitrag zeigt anhand aktueller Praxisbeispiele aus den Jahren 2023–2025 die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen des Verfahrens bei der Untersuchung korrosionsbedingter Querschnittsverluste unter der Betonoberfläche und bei der Bewertung des Erhaltungszustands von Spannbetonbauten.

Stichworte Bauwerksdiagnostik; Durchstrahlungsprüfung; Korrosion; Radiographie im Bauwesen; Röntgen; RT; Spannglieduntersuchung; Zerstörungsfreie Bauwerksprüfung; ZfPBau

1 Einleitung

1.1 Die Radiographie als bildgebende Methode der ZfPBau

Seit der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde eine Vielzahl bildgebender zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden aus diversen Bereichen der Industrie für Anwendungen im Bauwesen adaptiert. Radargeräte zur Ortung und visuellen Darstellung von Bewehrung, anderen Einbauteilen und Schichtgrenzen in Beton oder Mauerwerk bspw. stammen aus der Geophysik, welche das Verfahren wiederum aus der Luftfahrt entlehnt hat. Ultraschall wurde in der Materialprüfung und der Medizin angewendet, lange bevor es im Bauwesen Einzug fand. Auch magnetisch-induktive Verfahren, im Bauwesen z. B. für die Messung der Betondeckung der Bewehrung verwendet, stammen aus der klassischen Materialprüfung.

X-Ray-Testing in Building Diagnostics – New practical examples on corrosion and pre-stressed concrete

The X-ray method (also known as radiography or radiographic testing) can be used in non-destructive testing in civil engineering (NDT-CE) to gain insights that are unattainable by other methods. Direct imaging of the inside of components, similar to black-and-white photography, enables clear identification and precise measurement of built-in parts such as reinforcement, anchoring or tendons as well as the visualization of compression defects, cracks, corrosion-related losses of rebars and the like without having to open the component for verification. Thus, maintenance conditions can be evaluated and technical drawings can be reconstructed. Practical application of the method is limited by both-sided accessibility of the component, which is mandatory for investigation, as well as its total thickness. The latter determines which details are still visible and interpretable in the generated images. This article uses current practical examples from 2023 to 2025 to show the possibilities and limitations of the method in the fields of investigation of corrosion below concrete surfaces and the evaluation of pre-stressed concrete.

Keywords building inspection; corrosion; NDT-CE; non-destructive testing in civil engineering; radiographic testing; RT; structural inspection; tendon duct inspection; X-ray

Die Durchstrahlungsprüfung wird in der Materialprüfung seit Jahrzehnten bei der Qualitätskontrolle metallischer Bauteile eingesetzt, z. B. für die Prüfung von Gussstücken oder der Schweißnahtprüfung. Da es sich dabei um seriengefertigte Produkte oder hochgradig sicherheitsrelevante Einzelteile handelt – Rotoren, Radsätze, u. dgl. – und ein hoher Automatisierungsgrad sowie normative Vorgaben zur Prüfung (z. B. [1]) vorhanden sind, kann das Verfahren wirtschaftlich angewendet werden. Im mobilen Einsatz, z. B. bei der Prüfung von Schweißnähten an Rohren auf Industriegeländen, ist das Verfahren schon aufwendiger, da dort nicht in einem baulich gesicherten Strahlenschutzbereich (Bunker) gearbeitet werden kann, sondern ein im Strahlenschutzjargon „ortsveränderlich“ genannter Einsatz stattfindet. Dennoch gleicht auch diese Untersuchung einer Serienabnahme (z. B. Hunderte Meter Schweißnaht) und ist normativ geregelt.

Im Bauwesen wurde die Radiographie bis vor Kurzem nur selten und dann ausschließlich im Rahmen wissenschaftlicher Anwendungen oder in Sonderfragen ange-

wendet [2, 3]. Grund dafür ist der erhebliche Aufwand, da früher nur per Filmradiographie geröntgt werden konnte und die mobile Entwicklung von Röntgenfilmen sehr aufwendig ist. Im Vergleich zur Materialprüfung (Stahl, Gusseisen, wenige Sondermaterialien; homogene Aufbauten; relativ dünne Wandungen) ist außerdem die Anzahl an Freiheitsgraden, die zu berücksichtigen sind, deutlich höher (große Spannbreite an Materialien und Bauteilstärken).

1.2 Stand der Anwendungsmöglichkeiten

Erst mit der breiten Markteinführung der digitalen Radiographie vor wenigen Jahren kann auch im Bauwesen eine wirtschaftliche Anwendung der Technik umgesetzt werden. Insbesondere digitale Flachdetektoren ermöglichen, auch bei unbekanntem Bauteilaufbauten, eine schnelle Optimierung von Belichtungsparametern, ohne einen Röntgenfilm in einem mobilen Labor auf der Baustelle entwickeln und Aufnahmen ggf. wiederholen zu müssen [4]. Begrenzt wird die Anwendbarkeit der Röntgentechnik im Bauwesen von der notwendigen zweiseiti-

gen Zugänglichkeit zum Bauteil und der Energie der eingesetzten Strahlenquelle. Mobile Röntgenröhren erreichen eine Hochspannung von maximal etwa 300 kV, die eine Durchdringung von bis zu etwa 35 cm Stahlbeton ermöglicht, je nach Prüfaufgabe (Bild 1). Bei guten Randbedingungen und optimierten Belichtungsparametern können folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Bei Bauteilstärken bis etwa 15 cm ist eine extrem hohe Auflösung möglich. Unter guten Bedingungen sind Details <1 mm Abmessung erkennbar. Die Gesteinsmatrix des Betons ist sichtbar, Bewehrung ist eindeutig identifizierbar. Rippen sind ggf. auch in Durchstrahlungsrichtung (vor/hinter dem Kernstab) erkennbar, korrosionsbedingte Querschnittsverluste können identifiziert und quantifiziert werden (Bild 1 links).
- Bei Bauteilstärken von >15 cm bis etwa 25 cm nimmt die Detaillierbarkeit erheblich ab. Die Gesteinsmatrix wird i. d. R. nicht mehr aufgelöst, Stabdurchmesser sind aber noch vermessbar (Bild 1 Mitte). Rippen sind an Bewehrungsstäben nur noch seitlich erkennbar, größere Querschnittsverluste sind sichtbar, aber ggf. nicht mehr vermessbar.

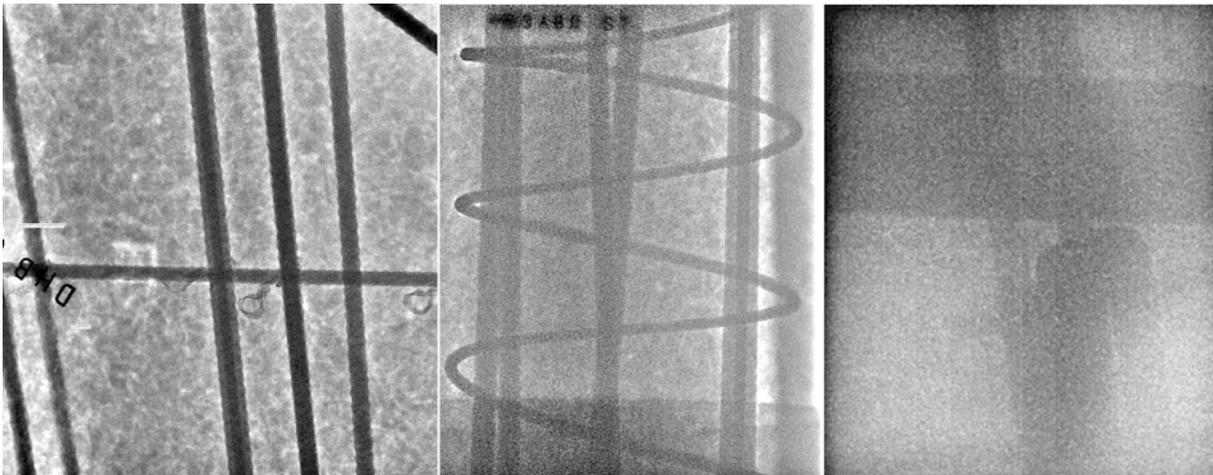


Bild 1 Röntgenbild an 8 cm starker Gehwegplatte (vgl. Bild 6), an 25 cm starker Rundstütze und an 35 cm starkem Spannbetonbalken (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)

X-ray image of 8 cm sidewalk slab (see Fig. 6), 25 cm round column and 35 cm prestressed concrete beam

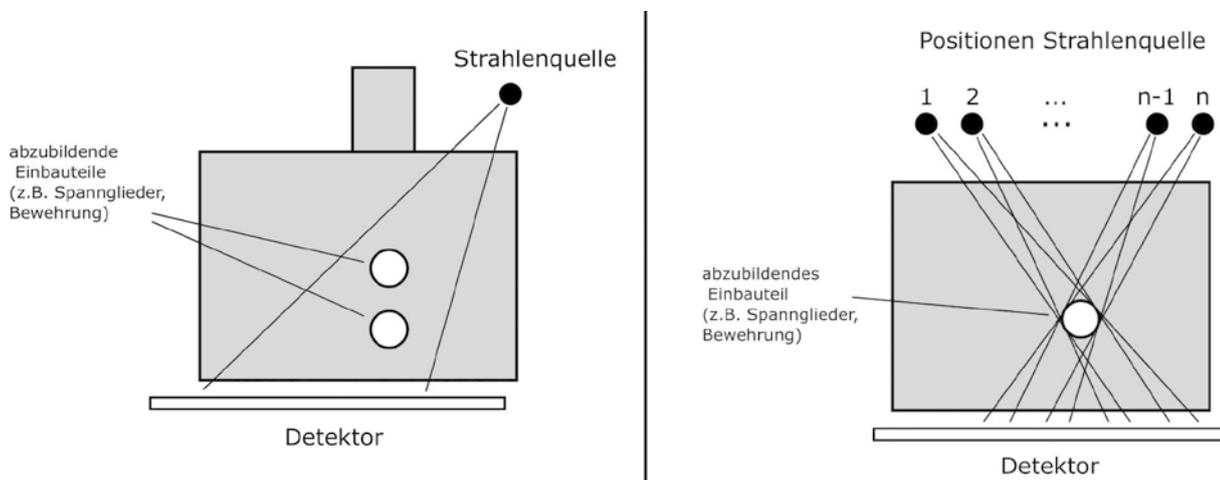


Bild 2 Auszug aus DGZfP-Merkblatt B 01: schematische Aufnahmegeometrien für Einzelaufnahmen und Stereo-/Laminographietechnik an Betonbauteilen (Quelle: DGZfP e. V.)

Excerpt from DGZfP guideline B 01: schematic imaging geometries for single and stereo/laminographic x-ray imaging of concrete components

- Bei Bauteilstärken von 30 bis 35cm nimmt der Bildkontrast aufgrund zunehmender Streustrahlung aus dem Bauteil und der fast vollständigen Absorption der eindringenden Strahlung – bei 35cm werden etwa 99,9% der eindringenden Strahlung absorbiert – immer weiter ab. Bewehrung kann nur noch schematisch erkannt werden. Verdichtungsmängel in Hüllrohren, Kiesnester oder ähnliche Fehlstellen und Besonderheiten mit Abmessungen >1cm können noch erkannt werden (Bild 1 rechts).
- Größere Durchdringungstiefen sind nur noch mit besonderer Technik möglich – mit hochenergetischen Isotopen (z. B. Cobalt-60) oder mit Beschleunigern mit Energien im MeV-Bereich [5].

Besondere Bedingungen (z.B. Feuchtigkeit, Rückstreuung von außerhalb des Bauteils, besonders dichte Bewehrung)

können die Bildgebung zusätzlich beeinflussen. Für andere Massivbaustoffe (Ziegel, Naturstein) gelten ähnliche Werte, da die Rohdichten ähnlich denen von Beton sind. Bei Baustoffen geringerer Dichte (Porenbeton, Holz) sind auch größere Durchdringungstiefen möglich.

1.3 Merkblatt B 01

Um der Radiographie im Bauwesen eine fundierte Grundlage als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zu verleihen, wurde in der DGZfP (Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V.) vom Unterausschuss Durchstrahlungsprüfung im Fachausschuss Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen das Merkblatt B 01 „Mobile Durchstrahlungsprüfung im Bauwesen“ erarbeitet [5]. Die vorherige Version des Merkblatts stammte

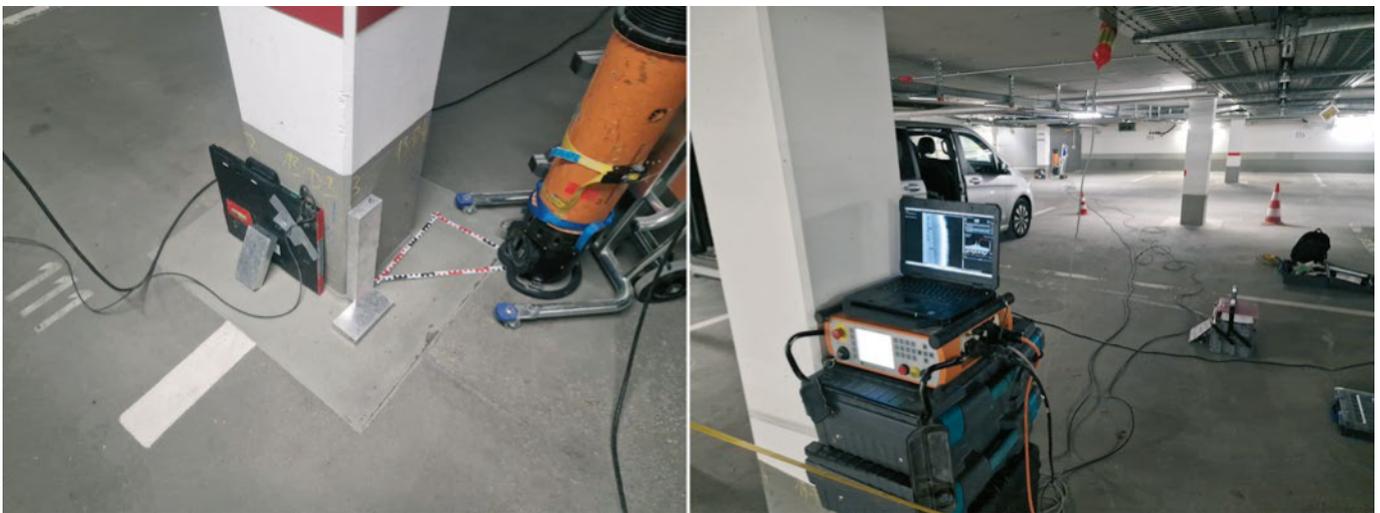


Bild 3 Anordnung von Röntgenröhre und Detektor an einer Stützecke; Leitstand in sicherer Entfernung zur aktiven Röntgenröhre (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
Positioning of x-ray tube and detector at the column's corner; control station at a safe distance from the active x-ray tube

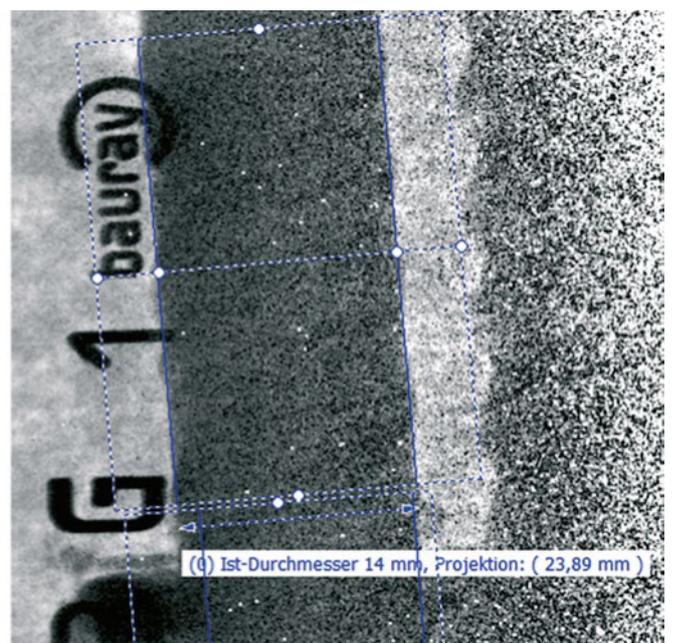
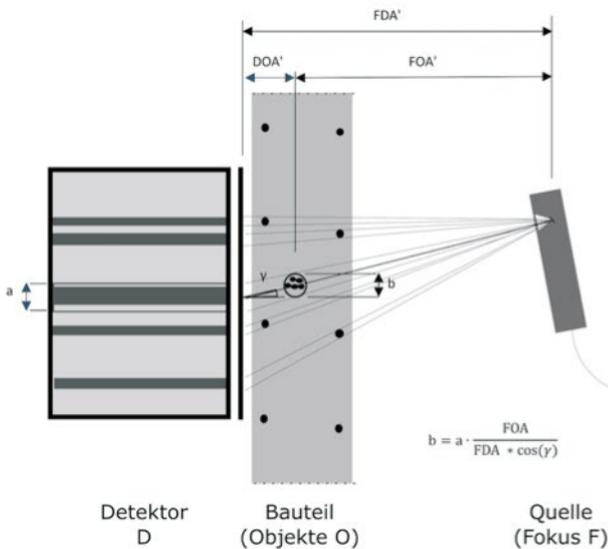


Bild 4 Bildprojektion infolge Einstrahlungswinkel (Schattenwurf) und Abstandsverhältnissen (Strahlensatz); Beispielbild (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
Image projection due to incidence angle (shadow cast) and distance ratios; exemplary image

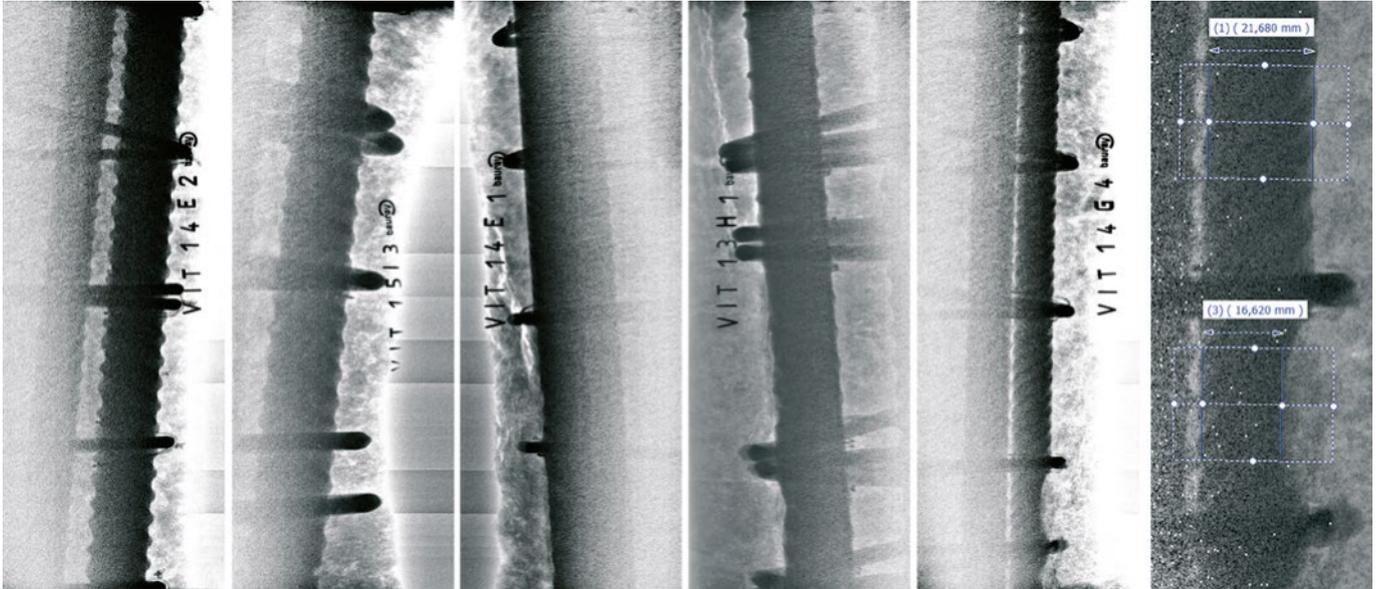


Bild 5 Röntgenbilder von Stützenecken unterschiedlicher Erhaltungszustände und mit unterschiedlichen Schadensbildern (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
X-ray images of column corners, damage-free and with various corrosion damages

aus dem Jahr 1990, vor der Entwicklung der digitalen Radiographie und den damit verbundenen wirtschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten in der Praxis. Das Merkblatt enthält neben einer grundlegenden Verfahrensbeschreibung prinzipielle Erläuterungen zur Technik, zu Aufnahmegeometrien (Bild 2), zu Anwendungs- und Nachweisgrenzen, zur Bewertung von Röntgenbildern und zum Strahlenschutz.

2 Aktuelle Praxisbeispiele

2.1 Röntgen zur Bewertung von korrosionsbedingten Querschnittsverlusten unter der Betonoberfläche

An der Sohle einer Tiefgarage in Bayern wurden Sanierungsmaßnahmen durchgeführt, die aufgrund von chloridinduzierter Korrosion erforderlich waren. Während der bereits laufenden Maßnahme wurde festgestellt, dass auch an den statisch ausgelasteten Stützenfüßen – obgleich wenige Jahre zuvor bereits mit Oberflächenschutzsystem instand gesetzt – teils erhebliche korrosionsbedingte Querschnittsverluste vorliegen. Bild 3 zeigt die Anordnung zur Durchstrahlung einer Stützecke, wie sie an insgesamt 47 Stützen an in Summe 183 Ecken – fünf Stützenecken waren bereits per Bauteilöffnung freigelegt – durchgeführt wurde, um unnötige Bauteilöffnungen und damit verbundene Querschnittsschwächungen zu vermeiden. Die Einstrahlung erfolgte im Winkel von 45° zur Bauteiloberfläche, der Abstand war jeweils gleich, so dass die Projektion (der Schattenwurf) der Ecken auf dem Röntgenbild jeweils etwa um denselben Faktor vergrößert bzw. verzerrt abgebildet wurde. Bild 4 zeigt schematisch und anhand eines Beispiels an einer der Stützenecken die Rückrechnung des projizierten auf den wahren Stabdurchmesser. Die Verzerrung infolge Einstrahlwinkel (Schattenwurf) liegt bei etwa 1,4 ($2^{0,5}$ bei 45°), die Vergrößerung infolge Abstand zwischen Quelle, Objekt und Detektor (Strahlensatz) an vorliegender Stützecke

(Lage der Bewehrung unter der Oberfläche zusätzlich magnetisch-induktiv geortet) bei ca. 1,2. Insgesamt liegt der Faktor somit bei etwa $1,2 \cdot 1,4 \approx 1,7$, d.h., der projizierte Stabdurchmesser $d = 23,9\text{ mm}$ entspricht hier tatsächlich einem Durchmesser $d = 14\text{ mm}$.

Der noninvasive Nachweis eingebauter Stabdurchmesser war hier aber nur ein Nebeneffekt, vorrangig ging es um den Nachweis des Erhaltungszustands der Ecken der hochbelasteten Stützen. Bild 5 zeigt fünf exemplarische Röntgenbilder von Vertikaleisen unterschiedlichen Zustands. Von links nach rechts:

- keine Querschnittsverluste, Rippen vollständig erhalten, keine Risse
- kleine Korrosionsnarbe am unteren Bildrand
- Sprengriss ausgehend von Bügel (Stelle der geringsten Betondeckung)
- Sprengriss an Bügel und flächige Korrosion an Vertikalstab
- massive Korrosionsnarben am unteren Bildrand

Das letzte Röntgenbild (Bild 5 rechts) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des vorherigen Bilds, mit Vermaßung des schadefreien Querschnitts und des verbliebenen Restquerschnitts. Auffällig sind die in Bild 5 gut erkennbaren unterschiedlichen Korrosionsmechanismen. Bei den augenscheinlich chloridinduzierten Korrosionsvorgängen entstehen keine Risse und Abplatzungen (keine Volumenzunahme), Korrosion tritt nur lokal auf (Bild 5 rechts: am Bügel wenige Millimeter oberhalb der deutlichen Korrosionsnarbe ist der Bindedraht unversehrt). Im Falle karbonatisierungsinduzierter Korrosion (Bild 5 Mitte) beginnt diese mit Rissen infolge Volumenzunahme an Stellen minimaler Betondeckung, die zuerst durch die Karbonatisierungsfront erreicht werden – die Bügelumfassungen der Eckstäbe – und weitet sich dann auf die gesamte außenliegende Staboberfläche des Vertikaleisens aus.

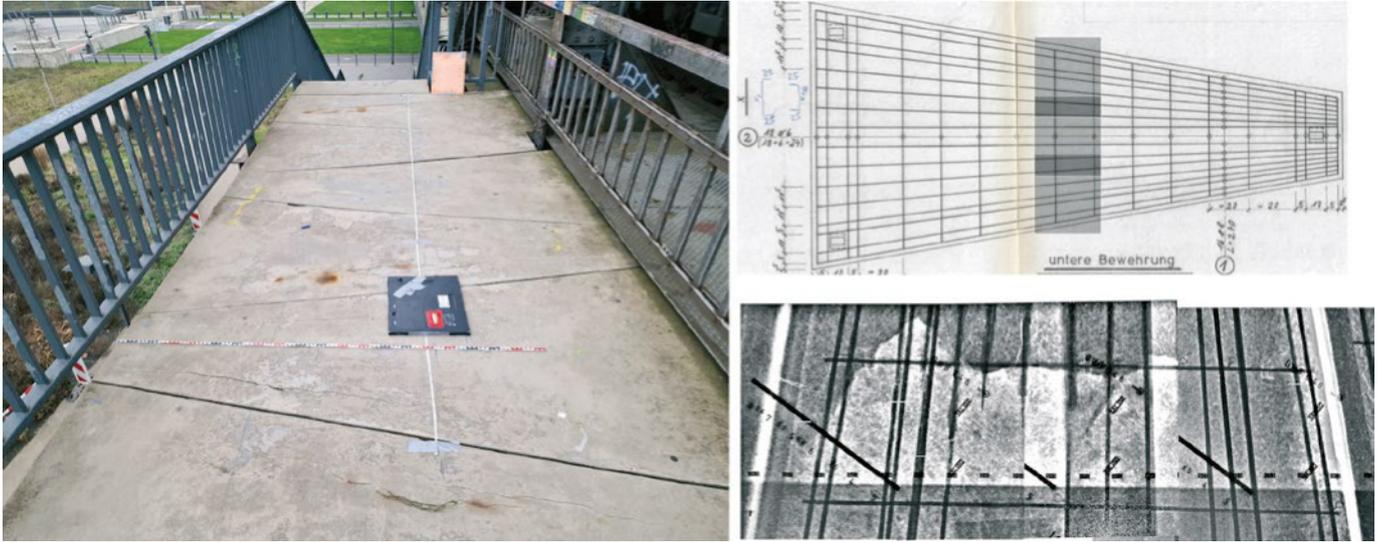


Bild 6 Röntgen dünner Gehwegplatten zur Bewertung korrosionsbedingter Querschnittsverluste (Quellen: Stadt Frankfurt am Main (oben rechts), bauray GmbH, Sebastian Schulze)
X-ray investigation of thin sidewalk slabs for the evaluation of corrosion-related cross-section losses



Bild 7 Leitstand und Anordnung von Röntgenröhre und Detektor (hinter Rohrpaket auf Untergurt des Längsträgers) zur Durchstrahlung des Trägerstegs (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
Control station and arrangement of X-ray tube and detector (behind cables on the lower flange of the longitudinal beam) for radiographic investigation of the beam

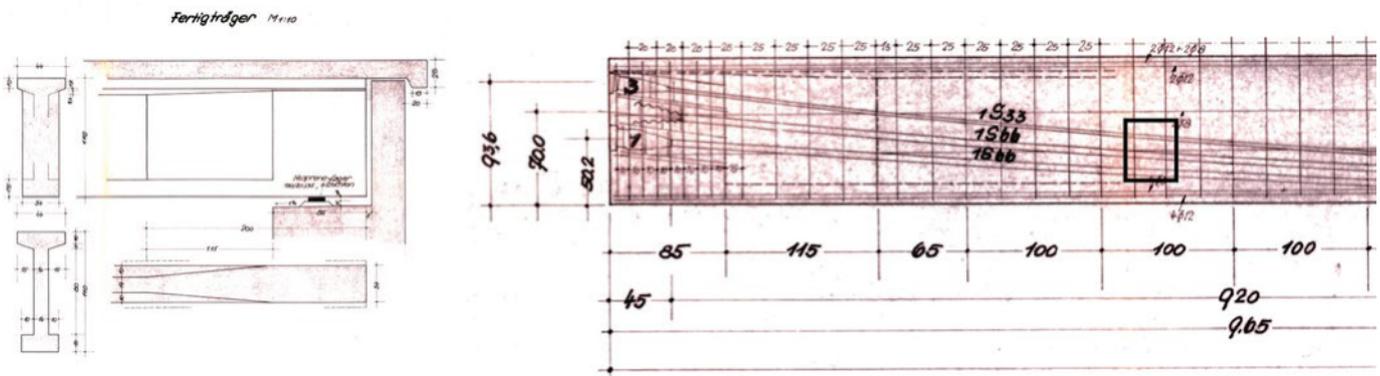


Bild 8 Bestandspläne mit Markierung der Position des Röntgenbilds (vgl. Detektorposition Bild 7) (Quelle: Stadt Neu-Ulm)
As-built plans with marking of the position of the x-ray image (detector position see Fig. 7)

Über das Verhältnis von ungeschädigtem Stabdurchmesser zu Restdurchmesser kann rechnerisch ein idealisierter Querschnittsverlust ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass Verlust von Durchmesser und Verlust von Querschnittsfläche nichtlinear zusammenhängen. Bei Annahme gleichmäßigen, tangentialen Abrostens eines

Kreissegments senkrecht zur Durchstrahlungsrichtung lässt sich der Flächeninhalt des abgerosteten Segments über Kreisformeln berechnen. In Bild 5 rechts sind mit einem Verhältnis von 16,6 mm zu 21,7 mm (Projektionsmaße) zwar etwa 25 % des Stabdurchmessers, aber nur etwa 6 % des Stabquerschnitts abgerostet. Voraussetzung für



Bild 9 Röntgenbild (vgl. Detektorposition Bild 8) und vergrößerte Details zu Montagebügeln für Hüllrohre sowie Kaltfuge/geringfügiger Verpressmangel im Hüllrohr
(Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
X-ray image (detector position see Fig. 8) and enlarged details of mounting brackets for pre-stressing tubes and slight lack of grouting in the tube

diese Berechnungsweise ist neben der Gültigkeit oben genannter Annahmen auch die zutreffende Messung des Restdurchmessers – die Grenze zwischen unversehrtem Stahl und Korrosionsprodukt ist im Röntgenbild ggf. nicht immer eindeutig erkennbar. Diese Fragen sind aktuell Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Bei sehr geringen Bauteildicken kann eine quantitative Bewertung des Querschnittsverlusts nicht nur bei Abstrahlung tangential zur Durchstrahlungsrichtung, sondern auch in Durchstrahlungsrichtung erfolgen, d.h. bei Vorgängen, die ansonsten durch den Restquerschnitt selbst verdeckt sind. Die in Bild 6 durchstrahlten Gehwegplatten sind lediglich 8cm stark und ermöglichen zum Teil den Vergleich von Restquerschnitten mit einem Bildgüteprüfkörper (Referenz-Bewehrungsstab mit künstlich erzeugten Querschnittsverlusten und Kerben) auf dem Röntgenbild.

2.2 Röntgen zur Bewertung von Spannbetonkonstruktionen

Bei der Zustandsbewertung bestehender Spannbetonkonstruktionen treten je nach Bauweise und Alter eine oder mehrere der folgenden Fragestellungen auf:

- Sind die Spannlitzen intakt oder weisen sie Brüche/Risse/Korrosion auf?
- Sind die Hüllrohre (fehlerfrei) verpresst?
- Handelt es sich (in Bauteilen unbekanntem Aufbau) um spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahl?

Zwei dieser drei Fragen können per Durchstrahlung i. d. R. gut beantwortet werden. Lediglich die direkt bildgebende Darstellung von Schäden am Spannstahl ist per Radiographie nur in Sonderfällen möglich, wenn der zu durchstrahlende Bauteilquerschnitt sehr dünn ist und die Litzen im Bild einzeln auflösbar sind, d.h., in Durchstrahlungsrichtung nicht hintereinander liegen und deshalb nicht überlagernd auf das Röntgenbild projiziert werden. Dann sind Bewertungen ähnlich wie an den oben gezeigten Stützenfüßen möglich.

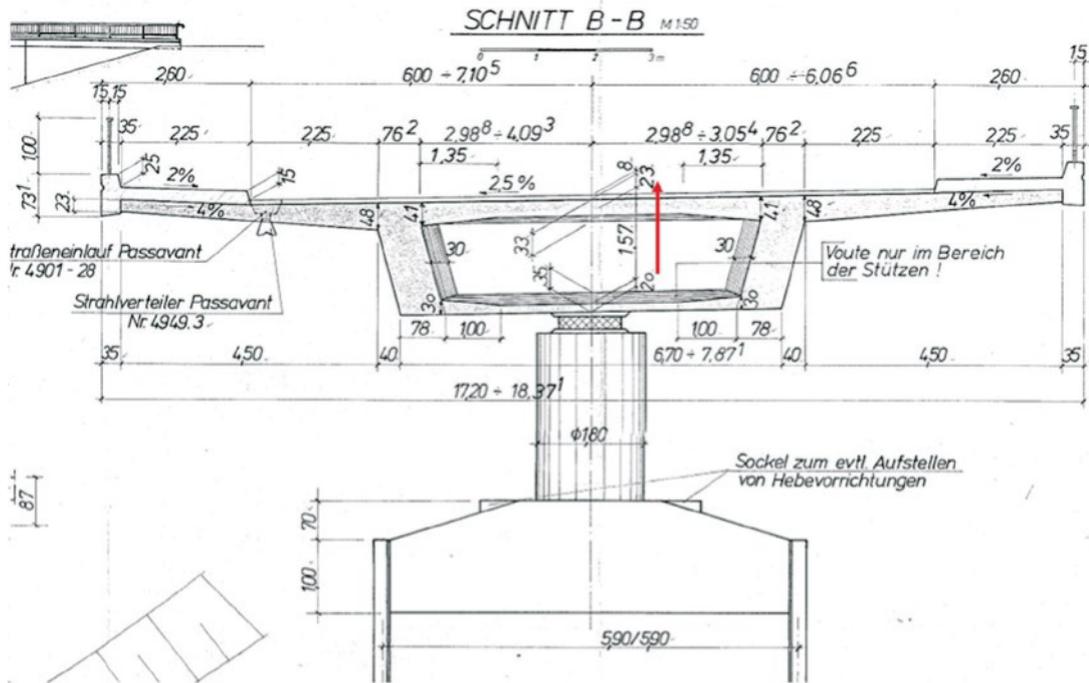


Bild 10 Skizze der Durchstrahlung der Fahrbahnplatte; Leitstand unter der Brücke; Positionierung des Detektors auf der Fahrbahn neben der befahrenen Spur (Quellen: straßen.nrw (oben), bauray GmbH, Sebastian Schulze (unten))
 Sketch of the radiography of the roadway; control station below the bridge; positioning of the detector on the closed lane next to the lane open for traffic

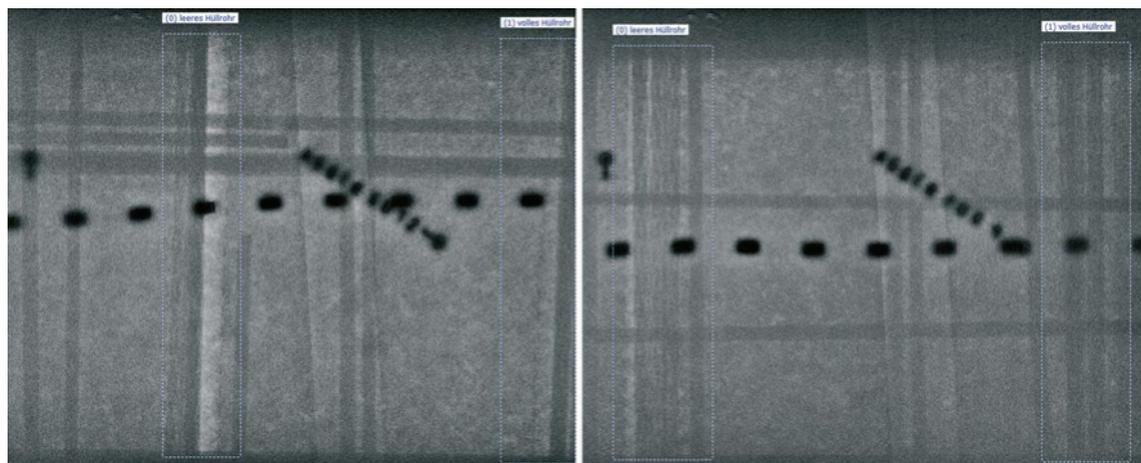


Bild 11 Röntgenbilder aus verschiedenen Feldern der Fahrbahnplatte, mit Markierung voller und leerer Hüllrohre (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
 X-ray images from different areas of the roadway, with marking of full and empty tubes

Die Brücke in den Bildern 7 und 8 besteht aus Spann-
 betonlängsträgern in Fertigteilbauweise mit einer Spann-
 weite von knapp 20m und einer Stegbreite von 14cm.
 Derart dünne Bauteile lassen sich hochauflösend röntgen

und ermöglichen eine Detailerkennbarkeit <1mm. Auf-
 grund der geringen Bauteilstärke sind auch die erforderlichen
 Belichtungszeiten sehr gering. Während bei massiven
 Bauteilen mehrere Minuten Belichtung je Aufnahme

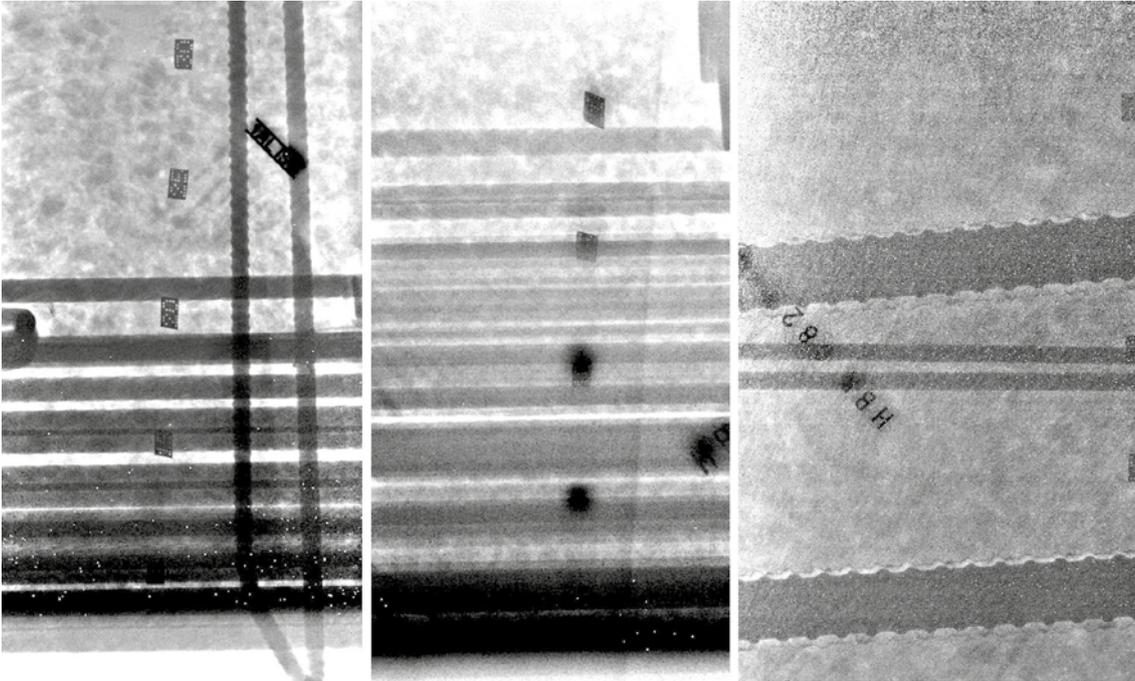


Bild 12 Röntgenbilder von Fertigteil-Hallenbindern mit unterschiedlicher Vorspannart: einige Rundstäbe (Spannbett, sofortiger Verbund), viele Ovalstäbe (Spannbett, sofortiger Verbund), einzelne Spannstäbe (Hüllrohr, nachträglicher Verbund) (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)

X-ray images of precast girders with different types of prestressing: few round bars (pre-tensioned concrete), many oval bars (pre-tensioned concrete), few prestressing bars (post-tensioned concrete)

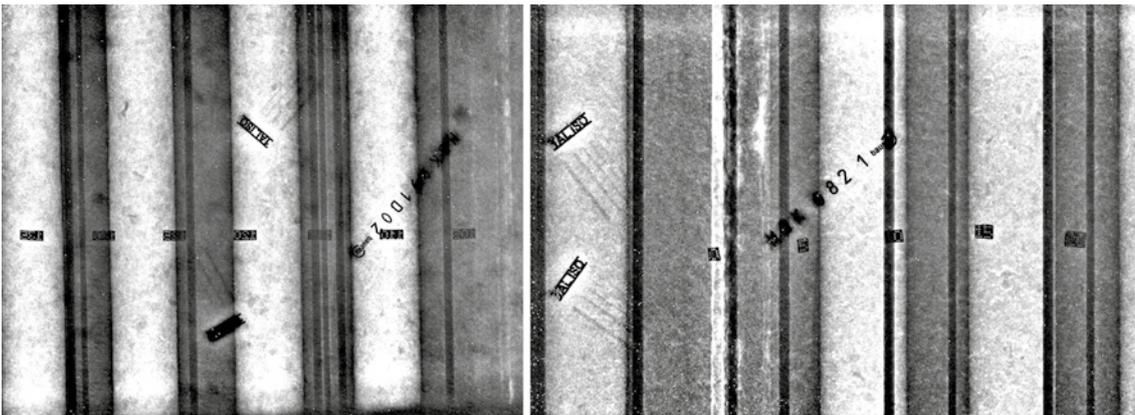


Bild 13 Röntgenbilder von Spannbeton-Hohlkastendielen mit unterschiedlichen Litzen; Litzen liegen in den Stegen und im Untergurt, sind auf dem Röntgenbild teils in der Projektionsebene der Hohlkammern sichtbar (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)

X-ray images of prestressed ceiling elements

notwendig sind, reichen bei dünneren Bauteilen wenige Sekunden aus. Bild 9 zeigt das Röntgenbild zur Aufnahmeposition in Bild 8 sowie interessante Details aus weiteren Aufnahmen. Hüllrohre, Litzenpakete, schlaffe Bewehrung und die Gesteinsmatrix im Beton sind sehr gut erkennbar. Es ist sofort ersichtlich, dass die Lage der Spannglieder gut mit der planmäßigen Lage übereinstimmt. Außerdem ist erkennbar, dass der Verpresszustand der Hüllrohre auf den ersten Blick gut ist – die Grauwerte (Belichtungswerte) im Röntgenbild sind inner- und außerhalb des Hüllrohrs gleich, ein sicherer Nachweis dafür, dass die Hüllrohre voll verfüllt sind, da Beton und Verpressmörtel sehr ähnliche Dichte und Zusammensetzung aufweisen und daher Röntgenstrahlung ähnlich stark absorbieren. Ein leeres Hüllrohr würde sich deutlich heller gegen den Hintergrund abheben, da hier der durchstrahlte Bauteilquerschnitt aufgrund der „Fehl-

stelle“ Hüllrohr geringer wäre und das Röntgenbild somit an dieser Stelle stärker belichtet würde (vgl. Bild 11).

In den Detailbildern wird das hohe Auflösungsvermögen bei der Durchstrahlung dünner Bauteile erkennbar. Wie an den Stützenecken sind Bindedrähte identifizierbar, die Rippen des Torstahls sind deutlich erkennbar. Einzelne Litzen des Litzenbündels sind hingegen nicht unterscheidbar und damit auch nicht hinsichtlich etwaiger Spanndrahtbrüche bewertbar. Es kann lediglich festgestellt werden, dass die oben und unten liegenden Litzen am oberen bzw. unteren Rand keine Korrosion aufweisen, zu den innenliegenden Litzen kann keine sichere Aussage getätigt werden. Außerdem kann festgestellt werden, dass es sich um glatte Einzelstäbe handelt, Rippen oder Drahtlitzen sind nicht vorhanden. In Bild 9 unten ist eine Auffälligkeit im Hüllrohr durch Bildbearbeitung hervorgehoben. Augenscheinlich liegt eine Art Kalt-

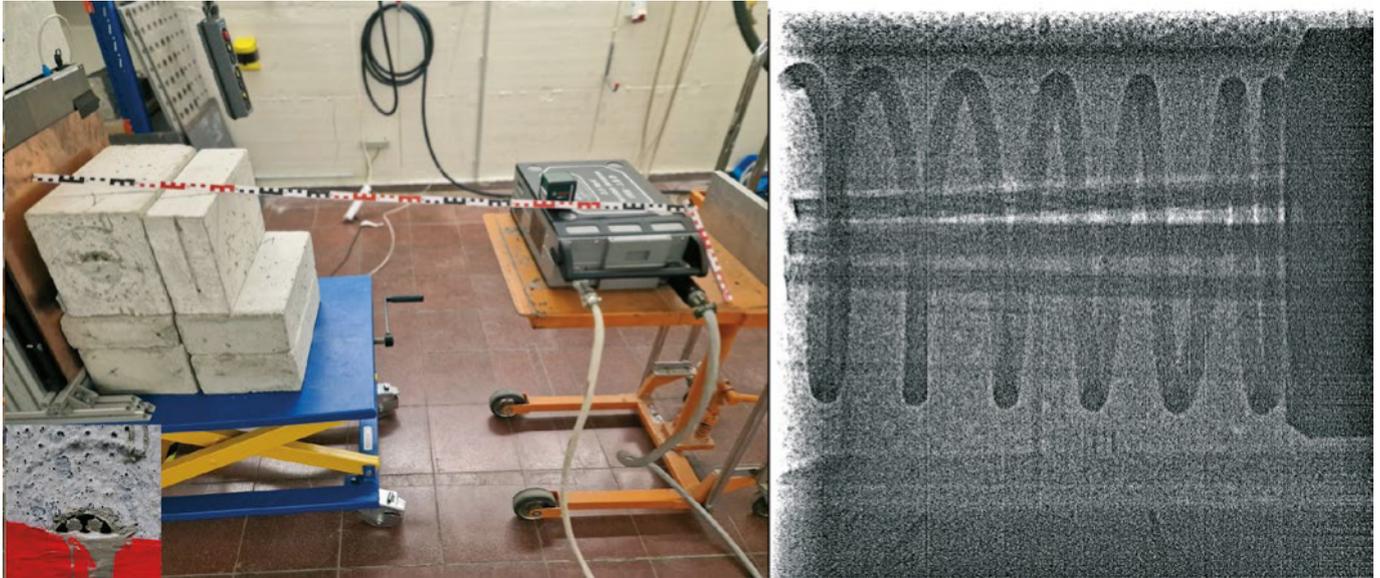


Bild 14 Durchstrahlung eines Labormodells (Gesamtstärke ca. 40 cm), geröntgt mit Hochenergie zur Abbildung künstlicher Verpressfehler im Verankerungsbereich von Spannbeton (Quelle: bauray GmbH, Sebastian Schulze)
 Radiography of a laboratory model (total thickness approx. 40 cm) x-rayed with high energy for imaging of artificial compression faults in anchoring of prestressed concrete

fuge bzw. eine Luftlinie im Verpressmörtel unterhalb des Litzenbündels vor, sowohl links (markiert) als auch ganz rechts im Detailbild. Die Luftlinie weist eine Höhe von maximal etwa 0,8mm auf und ist mutmaßlich auf Verpressmörtel zurückzuführen, der nach Abschluss des Einpressvorgangs abgesackt ist.

Derart detailgenaue Röntgenbilder sind nur bei dünnen Bauteilen möglich. Schon bei einer Verdoppelung von 14cm auf 28cm wird das erhaltene Röntgenbild deutlich unschärfer und kontrastärmer (vgl. Bild 1), was einerseits auf die hohe Absorption von Strahlung im Beton zurückzuführen ist und andererseits auf die starke Streustrahlung im Beton, die die Bildqualität verschlechtert – etwa so, als würde man eine klassische Fotografie im Halbdunkel und bei nebligem Wetter aufnehmen statt bei hellem Tageslicht und klarer Luft. Derartige Bilder zeigen Aufnahmen an einer anderen Brücke, bei der es darum ging, den Verpresszustand der Querspannglieder zu bewerten. Die Radiographie zeigt hier ihre Stärke in der Ausführung ohne Bauteileingriff, die sogar bei laufendem Verkehr auf der Brücke möglich ist. Die Röntgenröhre wurde im Hohlkasten positioniert, dessen Betonquerschnitt einen hervorragenden „Strahlenschutz bunker“ darstellt. Der Detektor liegt auf dem Asphalt der Straße (Bild 10). Durchstrahlt wurden etwa 23cm Fahrbahnplatte und 8cm Asphalt. Diese Bauteilstärke absorbiert hier etwa 99 % der eingestrahelten Dosisleistung, was zu längeren Belichtungszeiten je Röntgenbild, aber auch zu einem besseren Strahlenschutz auf der Oberseite führt. In wenigen Metern Entfernung liegt kein Strahlenschutzbereich (Kontrollbereich) mehr vor, der fließende Verkehr wird ebenfalls nicht gefährdet.

Die Röntgenbilder weisen einen deutlich schwächeren Kontrast auf als bei der Durchstrahlung des 14cm starken Stegs. Schlafe Bewehrung ist nur noch schematisch erkennbar, die Rippen sind nicht mehr identifizierbar. Die

Bildbeschriftung ist kaum identifizierbar, ein sicheres Zeichen für starke Streustrahlung aus dem Bauteilinnern. Hüllrohre sind meist nur dann identifizierbar, wenn diese nicht verfüllt sind, da dann ein Kontrast zum umgebenden Beton entsteht (Bild 11). Das linke Röntgenbild zeigt ein leeres Spannglied mit seitlich liegendem Litzenbündel und ein volles Hüllrohr (zur Hälfte auf dem Bild erkennbar, mit ansatzweise identifizierbarem Hüllwellrohr). Das rechte Röntgenbild zeigt ein leeres Hüllrohr mit gleichmäßig über den Hüllrohrquerschnitt verteilten Litzen. Es ist ansatzweise erkennbar, dass es sich hier um mehradrige verdrehte Litzen handelt, zwischen denen der Kontrast zum leeren Hüllrohr sichtbar wird. Das Hüllrohr rechts im Bild ist wieder voll verfüllt, die Litzen sind schematisch erkennbar, aber kaum von schlaffer Bewehrung zu unterscheiden, ein Hüllrohr ist hier nicht erkennbar.

Auch bei der Frage nach der Identität von Spannstahl kann die Radiographie helfen. Nach dem Einsturz der Carolabrücke in Dresden drängt sich diese Frage insbesondere bei Fertigteilen auf, bei denen aufgrund von Bauzeit und Bauweise die Möglichkeit besteht, dass spannungsrissskorrosionsgefährdeter Spannstahl [6] eingebaut wurde. So kann z.B. an Fertigteilebindern und Spannbetonhohlblechen im Hallen- und Geschossbau aufgrund der geringen Bauteilstärken mit relativ geringem Aufwand ohne Bauteilöffnung durch die bildgebende Darstellung (Bilder 12, 13) von Abmessungen (Durchmesser?) und Form (oval/rund?) sowie ggf. Rippung (übereinstimmend z.B. mit Sigma Oval?) überprüft werden, ob bei Kenntnis des Baujahrs in Abgleich mit den entsprechenden Tabellen [7] eine Einstufung als SpRK-gefährdeter Stahl ggf. ausgeschlossen werden kann. Ist das nicht der Fall, kann immer noch eine Bauteilöffnung und Beprobung durchgeführt werden.

3 Fazit

Mit der Radiographie sind in der zerstörungsfreien Bauwerksprüfung bei vielen Aufgabestellungen Prüfaussagen möglich, die mit keiner anderen zerstörungsfreien Methode erreichbar sind. Fotoaufnahmen „durch den Beton“ ermöglichen die sichere Identifikation und Vermessung von Einbauteilen, Bewehrung und Fehlstellen. Neben den gezeigten Einsatzmöglichkeiten sind auch viele Anwendungen im Denkmalschutz und in anderen Bereichen möglich.

Die Durchstrahlung massiverer Bauteile mit Hochenergiebeschleunigern wurde in Abschnitt 1.2 erwähnt. Aktuell läuft dazu ein BAST-gefördertes Forschungsvorhaben im Rahmen des Innovationsprogramms Straße [8] mit dem Arbeitstitel BrückenCT und dem Ziel, über dreidi-

mensional rekonstruierbare Röntgenaufnahmen kritische und schwer zugängliche Bereiche von Brückenbauten zu durchleuchten, z. B. Spannanker (Bild 14).

Insgesamt kann statuiert werden, dass die moderne digitale Radiographie im Bauwesen noch am Anfang ihrer Möglichkeiten steht. Die verwendete Messtechnik ist i. d. R. noch nicht für den Einsatz im Bauwesen an stark streuenden, massiven Bauteilen mit den erforderlichen langen Belichtungszeiten optimiert. Teils sind beim mobilen Einsatz von Hochenergiebeschleunigern auch noch rechtliche und organisatorische Hürden zu überwinden, was erstmals im BrückenCT-Projekt gelingen wird. Künftig können also eine weitere Verbesserung der Methodik und eine Verbreiterung des Einsatzspektrums der Radiographie im Bauwesen erwartet werden.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 17636-2 (2013) *Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Durchstrahlungsprüfung – Teil 2: Röntgen- und Gammastrahlungstechniken mit digitalen Detektoren* (ISO 17636-2:2023). Berlin: Beuth.
- [2] Hasenstab, A.; Redmer, B. (2016) *Radiografie im Bauwesen und Kombination anderer ZfP-Verfahren*. Berichtsband der Fachtagung Bauwerksdiagnose, 25.–26. Februar 2016, unter <http://www.bauwerksdiagnose2016.de/Berichtsband> [Zugriff am: 18.02.2025]
- [3] Weise, F.; Patitz, G.; Redmer, B.; Hübner, M. (2004) *Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Strukturaufklärung in antiken Baudenkmalern* in: Patitz, G. [Hrsg.] *MONUDOCthema 01: Mauerwerksdiagnostik in der Denkmalpflege*, IRB-Verlag, Stuttgart, S. 117–125.
- [4] Schulze, S. (2022) *Radiographie im Bauwesen – Einsatzmöglichkeiten in der Praxis im Rahmen der ZfPBau*. Beton- und Stahlbetonbau 117, H. 12, S. 1008–1018. <https://doi.org/10.1002/best.202200094>
- [5] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. [Hrsg.] (2024) *Merkblatt B 01 – Mobile Durchstrahlungsprüfung im Bauwesen*. Berlin: Eigenverlag.
- [6] Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen [Hrsg.] (2011) *Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion* [online]. <https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/Entwurf/Handlungsanweisung-Spannungsrissskorrosion-Entwurf.html> [Zugriff am: 18.02.2025]
- [7] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2006) *BAW-Brief Nr. 3 – Spannungsrissskorrosion von Spannstählen* [online]. <https://henry.baw.de/items/74482a61-f33b-42dc-9f67-ade0ec13c636> [Zugriff am: 18.02.2025]
- [8] Forschungsförderung „Innovationsprogramm Straße“ der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen [online]. https://www.bast.de/DE/BASt/Forschung/Forschungsfoerderung/Forschungsfoerderung_node.html [Zugriff am: 18.02.2025]

Autor:in



Dr.-Ing. Sebastian Schulze (Korrespondenzautor:in)
schulze@bauray.de
bauray GmbH
Amtsstraße 12
22143 Hamburg

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schulze, S. (2025) *Röntgen in der Bauwerksdiagnostik – Neue Praxisbeispiele zu Bewehrungskorrosion und Spannbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 120, H. 5, S. 378–387.
<https://doi.org/10.1002/best.202500010>

Radiographie im Bauwesen

Maximale Aussagesicherheit in der Bauwerksdiagnostik

- bildzeichnende Darstellung des Innern von Bauteilen
- ohne Eingriff ins Bauteil
- millimetergenau bemaßbar

bauray
GmbH

Radiographie im Bauwesen - wie funktioniert das?

Radiographie oder Röntgen - diese Begriffe kennt man aus der Medizin. An einen Einsatz im Bauwesen denkt man bei diesem Verfahren eher nicht.

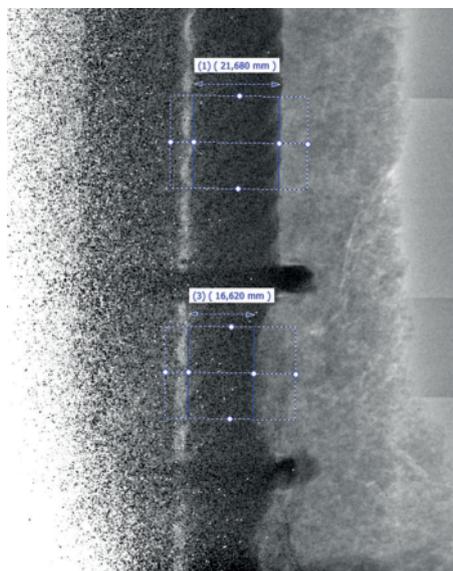
Dabei sind in der klassischen Materialprüfung radiographische Verfahren seit Jahrzehnten etabliert, z.B. bei der Qualitätssicherung von Schweißnähten an Rohren. Warum also die Radiographie nicht auch im Bauwesen systematisch einsetzen?

Als einziges Verfahren der zerstörungsfreien Bauwerksprüfung (ZfPBau) ermöglicht die Radiographie eine vollständig zerstörungsfreie, originalgetreue Bildgebung des Bauteilinnern. Buchstäblich eine „Photographie“ des Bauteilaufbaus, denn wie bei der klassischen Fotografie verwenden wir Photonen zur Belichtung unserer Bilder - nur eben nicht aus dem Spektrum des sichtbaren Lichts, sondern deutlich energiereicher.

Tatsächlich erfordert die Anwendbarkeit der Radiographie im Bauwesen nur begrenzte Bauteilstärken und beidseitige Zugänglichkeit, der Strahlenschutz ist in der Regel problemlos realisierbar.

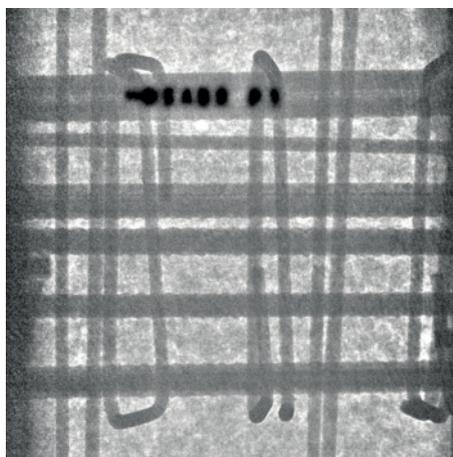
Unter diesen Voraussetzungen sind wir in der Lage, unschlagbar aussagesichere ZfPBau zu machen!

Identifikation und Vermessung von Korrosion ohne Bauteilöffnung



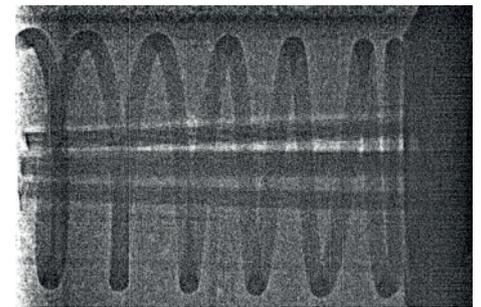
Massive chloridinduzierte Querschnittsverluste an Stützecke einer Tiefgarage

Eindeutige zerstörungsfreie Bewertung



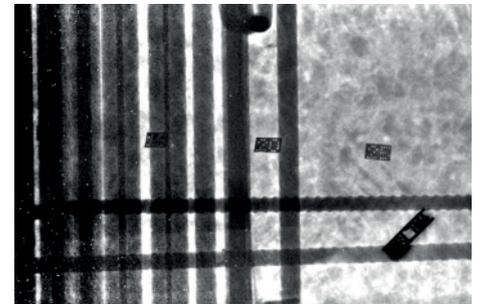
Eindeutige Identifikation und Vermessung von Einbauteilen und Bewehrung

Untersuchung von Spannbetonbauten



Identifikation von Verpressfehlern in Spannbeton

Sichtprüfung potentieller SpRK-gefährdeter Bewehrung



Blick auf die Spannlitzen eines Fertigteilträgers aus den 70er Jahren

bauray
GmbH

bauray GmbH
Radiographie im Bauwesen

Dr.-Ing. **Sebastian Schulze**
Geschäftsführender Gesellschafter

Bei der Neuen Münze 12 b
D - 22145 Hamburg
+49 (0)40 675 952 432
+49 (0)175 55 90 432
kontakt@bauray.de

www.bauray.de

