

Radiographie im Bauwesen

Einsatzmöglichkeiten in der Praxis im Rahmen der ZfPBau

Dr.-Ing. Sebastian Schulze

Radiographie im Bauwesen

Einsatzmöglichkeiten in der Praxis im Rahmen der ZfPBau

Die Durchstrahlungsprüfung ist in der klassischen Materialprüfung aus guten Gründen seit Jahrzehnten etabliert, bietet sie doch als einziges zerstörungsfreies Verfahren die Möglichkeit einer direkten Bildgebung des Innern von Schweißnähten, Guss- und Werkstücken. In der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau) wird das Verfahren bislang nicht systematisch angewandt, obwohl sich dank Weiterentwicklungen insbesondere im Bereich der digitalen mobilen Radiographie viele praktische Einsatzmöglichkeiten anbieten. Qualitätssicherung im Neubau, Schadensbewertung im Bestand oder die noninvasive Untersuchung von Spannbeton und Denkmalschutzbauten – die Palette ist breit gefächert. Mit der Radiographie ist eine eindeutige Abbildung, Vermessung, Tiefenlagenbestimmung und Identifikation von Einbauteilen, Bewehrungs- und Spannstahl möglich. Die zielführende Untersuchung von Rissen im Beton oder von Restquerschnitten korrosiver Bewehrung ist ebenfalls denkbar und kann Stoff zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Dieser Beitrag umreißt die Grundlagen, Möglichkeiten und Grenzen der Radiographie im Bauwesen und belegt anhand von Beispielen das Potenzial für den praktischen Einsatz in der Bauwerksdiagnostik.

Stichworte Radiographie; Röntgen; RT; Durchstrahlungsprüfung; ZfPBau; Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen; Bauwerksprüfung; Bauwerksuntersuchung; Bauwerksdiagnostik; Bauforense

1 Einleitung

1.1 Grundlagen der Radiographie

Die Radiographie ist eine der ältesten Methoden der zerstörungsfreien Materialprüfung unter Verwendung komplexer physikalischer Gerätschaften. Im Jahre 1897 veröffentlichte Wilhelm Conrad Röntgen die ersten beobachteten Phänomene über die bis dato unbekannt und von ihm „X-Strahlen“ getaufte Art [1]. In seiner Erstveröffentlichung beschreibt er Untersuchungen, die bereits als erste Materialprüfung betrachtet werden können (Bild 1), wenn auch die Radiographie zunächst überwiegend in der Medizin zum Einsatz kam.

In der Material- und der Bauwerksprüfung nutzbare hochenergetische elektromagnetische Strahlung lässt sich auf zwei Wegen erzeugen. Werden in einer Vakuumröhre unter Hochspannung beschleunigte Elektronen abgebremst, spricht man gemeinhin von Röntgenstrahlung. Beim Zerfall natürlicher oder künstlich hergestellter radioaktiver Isotope wird sogenannte Gammastrahlung

Radiography in civil engineering – practical applications of RT in NDT-CE

Radiographic Testing (RT) has been a proven testing method in NDT for decades. This is because RT is the only method providing direct imaging of the inner structure of welds, castings, and workpieces. However, radiography is widely unknown in the field of non-destructive testing in civil engineering (NDT-CE) in Germany – although great progress has been made in the last decades, especially in the field of digital imaging and mobile applications. This allows for many practical testing tasks, e. g. on-site quality assurance, damage assessment, and non-invasive investigation of buildings under a preservation order. In general, RT allows for identification, size and depth determination of reinforcement, tendon ducts and other components. Investigation and evaluation of cracks and corroding steel should be possible as well and may be the aim of future research work. This paper outlines basics, possibilities and limitations of radiography in civil engineering and shows its potential basing on practical applications.

Keywords radiography; radiographic testing; NDT-CE; non-destructive testing in civil engineering; building inspection; structural inspection; structural investigation

freigesetzt. Beide Strahlenarten unterscheiden sich nur in der Art der Erzeugung und dem jeweiligen Energiespektrum. Die Strahlenart – hochenergetische elektromagnetische

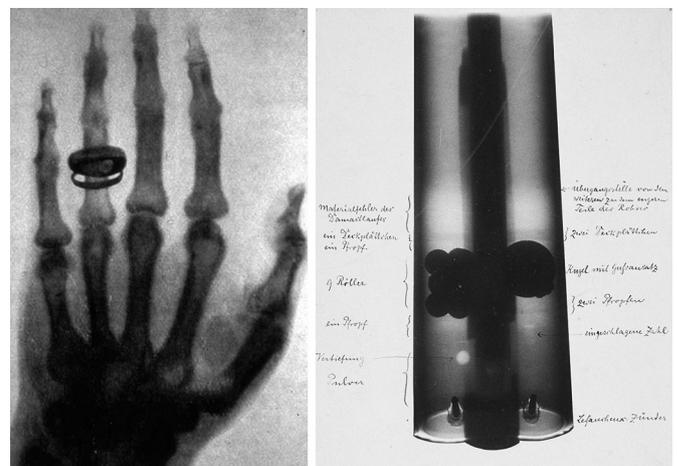


Bild 1 Historische Durchstrahlungsbilder von Wilhelm Conrad Röntgen (1896)
Historical radiographs

sche Wellen – ist dieselbe. Bei radioaktiven Stoffen hängen Intensität und Energie vom Typ des Isotops ab; bei Röntgenröhren gilt, dass Energie und Intensität mit der in der Vakuumröhre zur Beschleunigung der Elektroden angelegten Spannung sowie dem Röhrenstrom zusammenhängen.

Röntgenröhren haben den Vorteil, dass die potenzielle Gefährdung der Umwelt durch Strahlenbelastung prinzipiell geringer ist, da nur bei eingeschalteter Röhre Röntgenstrahlung erzeugt wird. Eine ausgeschaltete Röhre birgt keine Gefahr. Isotope hingegen strahlen aufgrund des beständigen Zerfalls permanent und sind daher in Arbeitsbehältern aus Materialien mit hoher Dichte aufzubewahren. Die Vorteile bestehen hier in der autarken (stromlosen) und platzsparenden Einsetzbarkeit.

1.2 ZfPBau: Stand der Wissenschaft und Technik

In der Zerstörungsfreien Materialprüfung nach DIN EN ISO 9712 [2] ist die Radiographie, internationale Kurzform RT für Radiographic Testing, zusammen mit vielen anderen Prüfverfahren längst etabliert. Was diese Norm für die klassische Materialprüfung darstellt, soll für die ZfPBau die jüngst in Erstausgabe publizierte DIN 4871 [3] werden. Das Ziel dieser Norm ist es, für die ZfPBau-Verfahren Radar, Wirbelstrom, Ultraschall, Impakt-Echo und Potentialfeldmessung eine praxisgerechte Personalqualifikation sicherzustellen.

Der große Unterschied in der Verbreitung und Akzeptanz der Methoden der zerstörungsfreien Materialprüfung und der Bauwerksprüfung ist in deren originären Anwendungsbereichen begründet. Während in der Materialprüfung in aller Regel die Qualität von Serienfertigungen überprüft und sichergestellt werden soll (z. B. von Schweißnähten an öl-, gas- oder chemikalienführenden Rohren und an sicherheitsrelevanten Bauteilen von Bahn, Automobilindustrie und Luftfahrt), kommen die Verfahren der Bauwerksprüfung immer noch überwiegend bei Bestandsuntersuchungen zum Einsatz. Einzig die Tunnelinnenschalenprüfung gemäß RI-ZFP-TU [4] ist als qualitätsnachweisende und damit -sichernde Methode in einem speziellen Bereich des Bauwesens etabliert – und beweist dort eindrucksvoll das Potenzial der ZfPBau.

Eine der wenigen geregelten wiederkehrenden Bauwerksuntersuchungen im Bestand ist die Prüfung von Bauwerken der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur (überwiegend Brücken und Tunnel sowie begleitende Bauwerke wie Schilderbrücken oder Lärmschutzwände) nach DIN 1076 [5] und deren Bewertung nach RI-EBW-PRÜF [6]. Die öffentliche Hand ist als Bauherr und Eigentümer in der Pflicht, diese Regelungen umzusetzen. Die Prüfung erfolgt aber in der Regel per Sichtprüfung und „handnah“ und nur bei Sonderfragen unter Zuhilfenahme aufwendigerer Verfahren. Im Bereich der privaten Bauindustrie gibt es derartige Vorgaben nicht; dort beschränken sich

Regelungen meist auf die gesetzlichen Vorgaben zur Verkehrssicherungspflicht und die damit zusammenhängenden Mindeststandards. Eine Qualitätssicherung am Neubau wäre jedoch an vielen Stellen sinnvoll und bei einer ganzheitlichen Lebenszyklusbetrachtung auch wirtschaftlich, wird aber, wenn überhaupt, nur sehr sporadisch durchgeführt. Mit der Weiterentwicklung von BIM kann sich dies zukünftig ändern, wenn es um die Dokumentation der tatsächlichen Ausführung geht, Stichwort „Digitaler Zwilling“.

Zerstörungsfreie Prüfverfahren kommen im Bauwesen vorwiegend im Bestand bei unklarer Ausführung (z. B. verwendete Baustoffe, Bauteilaufbauten und -abmessungen), in Streitfällen oder im Denkmalschutzbereich zum Einsatz. Immer noch aber ist der allgemeine Kenntnisstand zur Leistungsfähigkeit der vorhandenen ZfPBau-Verfahren bei den Baubeteiligten recht gering, sodass allzu häufig unnötige zerstörende Eingriffe zur Feststellung des Ist-Zustands durchgeführt werden, welche sowohl unwirtschaftlich als auch wenig nachhaltig sind.

Mit der DIN 4871 sollen die Möglichkeiten von ZfPBau-Verfahren künftig besser ausgeschöpft werden. In der Anwendung liegt für qualitätssichernde Zwecke noch erhebliches Potenzial, insbesondere zur Vermeidung von Spätschäden, welche die Dauerhaftigkeit oder Verkehrssicherheit herabsetzen. Beispielhaft seien hier oberflächlich nicht sichtbare Mängel wie unzureichende Betondeckung der Bewehrung oder Kiesnester und Lunker im Beton zu nennen, aber auch fehlende oder unzureichende Bewehrung.

1.3 Die kurze Geschichte der Radiographie im Bauwesen

Zur Radiographie im Bauwesen gibt es in Deutschland bislang kaum Forschung und Veröffentlichungen (z. B. [7, 8]) und nur wenig Praxiserfahrung. Konsens ist, dass die Radiographie aufgrund der direkten Bildgebung als Referenzverfahren für die Verifizierung von mit anderen ZfPBau-Verfahren (Radar, Ultraschall, Betondeckungsmessung) gewonnenen Volumendaten herangezogen werden kann (z. B. [9]). Einer der wenigen Ansätze in der Vergangenheit, die praktische Radiographie im Bauwesen zu beschreiben, ist das Merkblatt B1 der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), „Merkblatt für die Durchstrahlungsprüfung von Stahlbeton und Spannbeton“ [10], dessen einzige Ausgabe auf das Jahr 1990 zurückdatiert und aufgrund fehlender Aktualität zurückgezogen wurde. Normen oder sonstige Regelwerke, die über die allgemeingültigen Regelungen zum Strahlenschutz hinaus die Anwendung im Bauwesen beschreiben, existieren (noch) nicht. Auch in der Erstausgabe der DIN 4871 ist die Radiographie noch nicht enthalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass dieses Verfahren in den letzten Jahrzehnten in Deutschland im Bauwesen kaum eingesetzt wurde, was sich in Zukunft aufgrund des erheblichen Potenzials ändern soll.

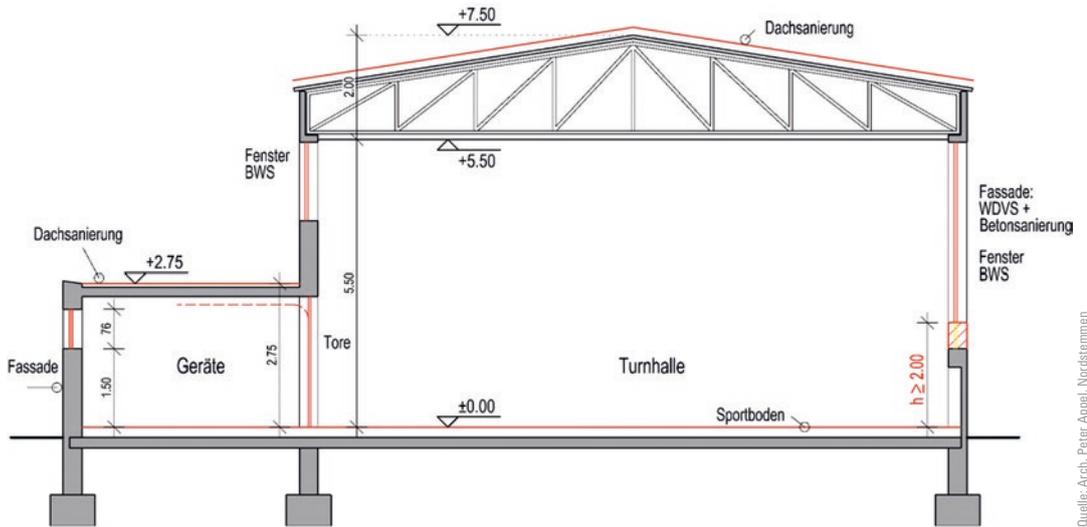


Bild 2 Hallenquerschnitt mit Bauteildarstellungen auf Grundlage der Bestandsunterlagen, Darstellung der geplanten Sanierungsmaßnahmen (rot)
Cross section of the gymnasium with components based on inventory records (trussed steel girder); modernization measures (marked in red)

1.4 Strahlenschutz im Bauwesen

In der Praxis können Vorgaben des Strahlenschutzes die Umsetzbarkeit einer Durchstrahlungsprüfung erschweren und in Einzelfällen unmöglich machen, insbesondere im innerstädtischen Bereich. Dabei bieten sich gerade bei Neubauten auf noch nicht fertiggestellten Baustellen qualitätssichernde oder ausführungsnachweisende Untersuchungen mit RT an, wenn nach Ende der Baustellentätigkeit untersucht wird, d. h. abends oder am Wochenende. Der Bauablauf wird dann in keiner Form gestört. Und auch an Bestandsbauten abseits von Wohngebäuden kann der gesetzlich und normativ geforderte Strahlenschutz bei genügender Planung problemlos realisiert werden.

Einzuhalten sind in jedem Fall die allgemeingültigen rechtlichen Vorgaben des Strahlenschutzgesetzes und der Strahlenschutzverordnung, StrlSchG und StrlSchV [10, 11]. So ist z. B. im ortsveränderlichen Einsatz einer Röntgeneinrichtung in der Grobstrukturanalyse/Materialprüfung in der Regel eine Kontrollbereichsgrenze einzuhalten, an der eine Dosisleistung von $40 \mu\text{Sv/h}$ nicht überschritten wird [12]. Dieser Wert entspräche bei der Durchstrahlung von Stahlbetonbauten mit 20 bis 30 cm Bauteilstärke mit einer üblicherweise erforderlichen Röhrenspannung von etwa 200 bis 300 kV einem abzusperrenden Bereich von etwa 50 bis 150 m je nach Kathodenstrom – bei Schwächung ausschließlich durch Abstand, ohne jede Abschirmung. Nun liegt im Nutzstrahl mindestens der zu durchstrahlende Prüfkörper, der die Dosisleistung der auftreffenden Strahlung erheblich abschwächt. Der Kontrollbereich liegt dann in Nutzstrahlrichtung noch bei etwa 15 bis 50 m. Durch weitere Wand- und Deckenebenen oder z. B. mithilfe mobiler Strahlenschutzwände kann der Kontrollbereich zusätzlich eingegrenzt werden. Weiterhin sind Einflüsse von Streu- und Rückstrahlungseffekten be- und durchstrahlter Bauteile mit in diese Überlegungen einzubeziehen. Um diese geome-

trisch schwer einschätzbaren Effekte sowie Unsicherheiten bei den angenommenen Rechenwerten zu berücksichtigen, ist die Kontrollbereichsgrenze jeder Durchstrahlungsprüfung im ortsveränderlichen Betrieb zwingend messtechnisch zu überprüfen und ggf. anzupassen. In jedem Falle ist ein zugangsbeschränkter Bereich zu schaffen, bestenfalls maximal die Außenhülle des (leeren) Gebäudes um das zu untersuchende Bauteil herum.

2 Beispiele aus der Praxis

2.1 Spannbetonbinder

Die beiden aktuellen Praxisbeispiele aus den Bereichen Bestand und Neubau (Abschn. 2.2) sollen das Potenzial der Durchstrahlungsprüfung an Stahl- und Spannbeton belegen. Für eine Schulsporthalle in Niedersachsen wurden Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen der Fassade geplant. Gemäß Bestandsunterlagen sollte es sich bei der Halle mit Außenmaßen von etwa $25 \times 12 \times 6 \text{ m}^3$ um eine in Rahmenbauweise erstellte Konstruktion mit Stahlbetonpfosten und Fachwerkbindern handeln (Bild 2). Die Nachrechnung des Bauwerks erfolgte auf Grundlage dieser Annahmen.

Während der Vorbereitung der Bauausführung wurde nach Öffnen der Abhangdecke festgestellt, dass anstelle von Fachwerkbindern Stahl- oder Spannbetonbinder verbaut worden waren (Bild 3). Zu dieser Umplanung waren in den Bestandsunterlagen keinerlei Hinweise zu finden. Typ und Bewehrungsgehalt waren völlig unbekannt. Aufgrund der geringen Spannweite von zwölf Metern waren sowohl Ausführungen mit massiver schlaffer Bewehrung als auch in Spannbetonbauweise mit Spannstahl im Hüllrohr oder Einzellitzen in direktem Verbund denkbar.

Aufgrund der Randbedingungen – ungünstiger Querschnitt, schlechte Zugänglichkeit, eingebaute Montage-



Bild 3 Tatsächliche Ausführung des Binders in Beton- bzw. Spannbetonbauweise
Actual concrete girder



Bild 4 Anordnung von Röntgenröhre und Digitaldetektor für die Durchstrahlungsprüfung (exemplarisch)
Exemplary setup of X-ray-tube and digital detector for radiographic examination

schienen – hätten „übliche“ zerstörungsfreie oder minimalinvasive Prüfverfahren (Wirbelstrom, Radar, Ultraschall, Endoskopie) keine ausreichende Aussagesicherheit geboten. Ein größerer zerstörender Eingriff in den Binder kam aufgrund des unbekanntem Lastabtrags nicht infrage. Für die zielführende Identifikation des Bauteilaufbaus verblieb somit nur die Radiographie.

Zum Einsatz kamen eine mobile 300-kV-Röntgenröhre und ein digitaler Flachdetektor (Bild 4). Der Strahlenschutzbereich (Kontrollbereich) konnte durch geeignete Positionierung der Röhre auf die Außenhülle der Halle begrenzt werden. Röhre und Detektor wurden per Funk (WiFi) und Kabel von außerhalb des Kontrollbereichs gesteuert und ausgelesen.

Die Röntgenröhre wurde zunächst derart positioniert, dass der Zentralstrahl in etwa auf die Mitte des Untergurts gerichtet war, den statisch-konstruktiv interessan-

testen Teil des Binders. Zwecks besserer Interpretierbarkeit der folgenden Röntgenbilder zeigt die Skizze in Bild 5 links eine der Anordnungen im Querschnitt. Die Länge des Strahlengangs durch den Beton, die wesentlich ist für die Belichtung des Flachdetektors, variiert aufgrund des Bauteilquerschnitts erheblich zwischen 10 cm im vorderen und etwa 25 cm im hinteren Bereich des Untergurts. Um Einbauten im Beton jeweils bestmöglich auszuleuchten und die Verzerrung der Röntgenbilder weitestmöglich gering zu halten, wurden Röntgenröhre und Flachdetektor für verschiedene Aufnahmen unterschiedlich angeordnet. Die Vergrößerung der auf dem Detektor abgebildeten Einbauteile lässt sich dann per Strahlensatz sehr genau berechnen, vgl. auch nachfolgendes Praxisbeispiel (Abschn. 2.2).

Bild 5 rechts zeigt das Röntgenbild zur skizzierten Anordnung. Schon in der kleinformatigen Darstellung sind Bügelschlösser sowie ein Hüllrohr mit Spannstahl erkenn-

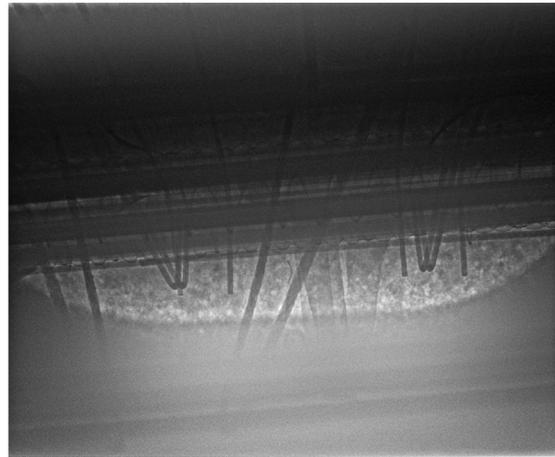
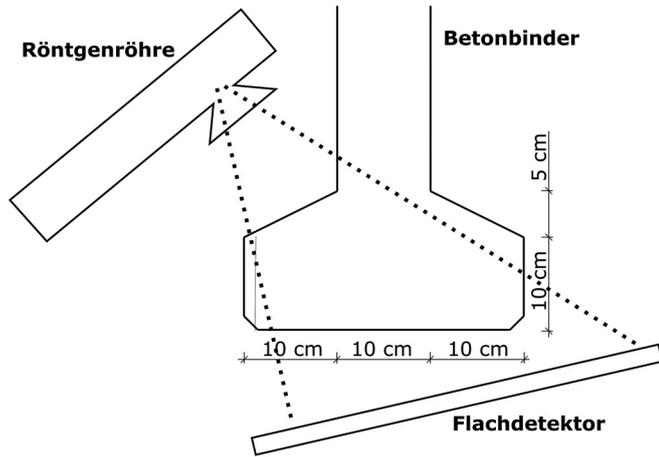


Bild 5 Skizze zur Durchstrahlung und zugehöriges digitales Röntgenbild
Drawing of examination setup and respective digital X-ray image

bar. Die Detailansichten in Bild 6 (unterschiedlich kontrastiert) zeigen weitere identifizierbare Einbauten mit Maßangaben. Identifizierbar und vermessbar sind folgende Bildanzeigen:

- a Spannstahl, Vollquerschnitt, 4 Stück, je $\varnothing 10$ mm, auf Röntgenbild überlagert mit hinterer Montage-schiene
- b Hüllwellrohr, Stahl (da geringere Schwärzung im Positivbild, folglich höhere Dichte als umgebender Beton), $d \approx 45$ mm
- c horizontale Bügel im Untergurt (stark verzerrte Abbildung), Betonrippenstahl, $\varnothing 6$ mm, $a \approx 15$ cm
- d vertikale Bügel im Steg, $\varnothing 4$ mm bis 4,5 mm, $a \approx 15$ cm, Glatstahl
- e augenscheinlich Auflagereisen für Hüllrohr, konstruktiv, oder Bügel wie d
- f, g vordere obere und untere Längsbewehrung im Untergurt, $\varnothing 10$ mm, Betonrippenstahl, überlagert auf Röntgenbild mit Projektion der vorderen Montage-schiene
- h Bindedraht, ca. $\varnothing 2$ mm
- i Flacheisen für Abhängung der Unterdecke (außerhalb des Binders)

Wie am deutlich sichtbaren Bindedraht erkennbar, ist die Radiographie für die Identifikation und Vermessung von Stahl in Beton hervorragend geeignet. Obwohl der Drahtquerschnitt nur etwa ein bis zwei Prozent des Betonquerschnitts in Durchstrahlungsrichtung ausmacht, ist der Draht deutlich zu sehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Schwächung der einen Stoff durchdringenden Strahlung exponentiell mit der Dichte des Stoffs zusammenhängt [13]. Der Draht erzeugt somit trotz 1–2% Durchstrahlungsquerschnitt auf dem Röntgenbild einen Kontrast von etwa 10–20% im Vergleich zur Durchstrahlung des umgebenden Betons und ist damit deutlich identifizier- und vermessbar. Aufgrund des stark kontrastzeichnenden Dichteunterschieds gelingt auch die Unterscheidung zwischen profiliertem Stahl und Glatstahl, vgl. Bild 5 rechts. Bei der Bügelbewehrung $\varnothing 6$ mm handelt es sich augenscheinlich um Tor-Rippenstahl [14] mit

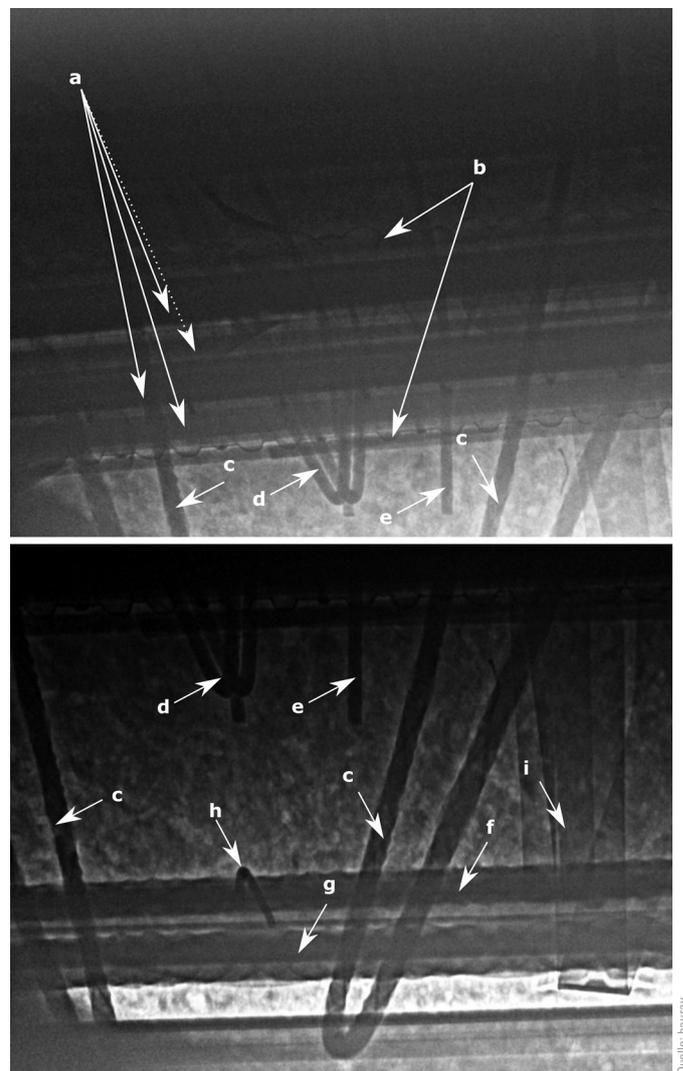
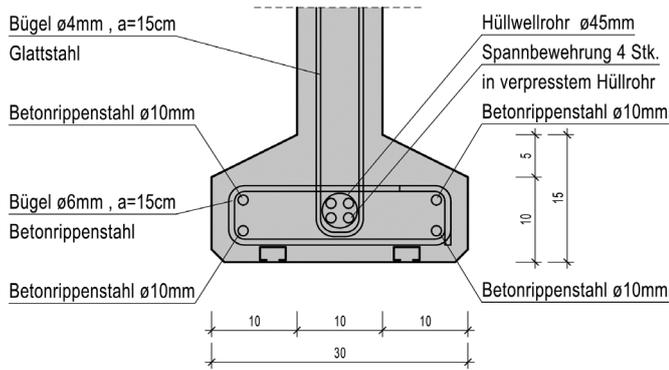


Bild 6 Detailansichten Röntgenbilder; Markierung identifizierbarer Bauteile
X-ray detail views showing identifiable components

schräg verlaufenden Rippen. Auch das Hüllwellrohr ist deutlich erkennbar, wenn auch aufgrund der sehr geringen Wandstärke von weit unter einem Millimeter (in der Regel etwa 0,2–0,3 mm bei Hüllrohren mit dem hier vorliegenden Durchmesser) nur dort, wo die Hüllrohrwand tangential durchstrahlt wird.



Quelle: bauray GmbH

Bild 7 Rekonstruierter Binderquerschnitt
Girder cross section derived from radiographic images

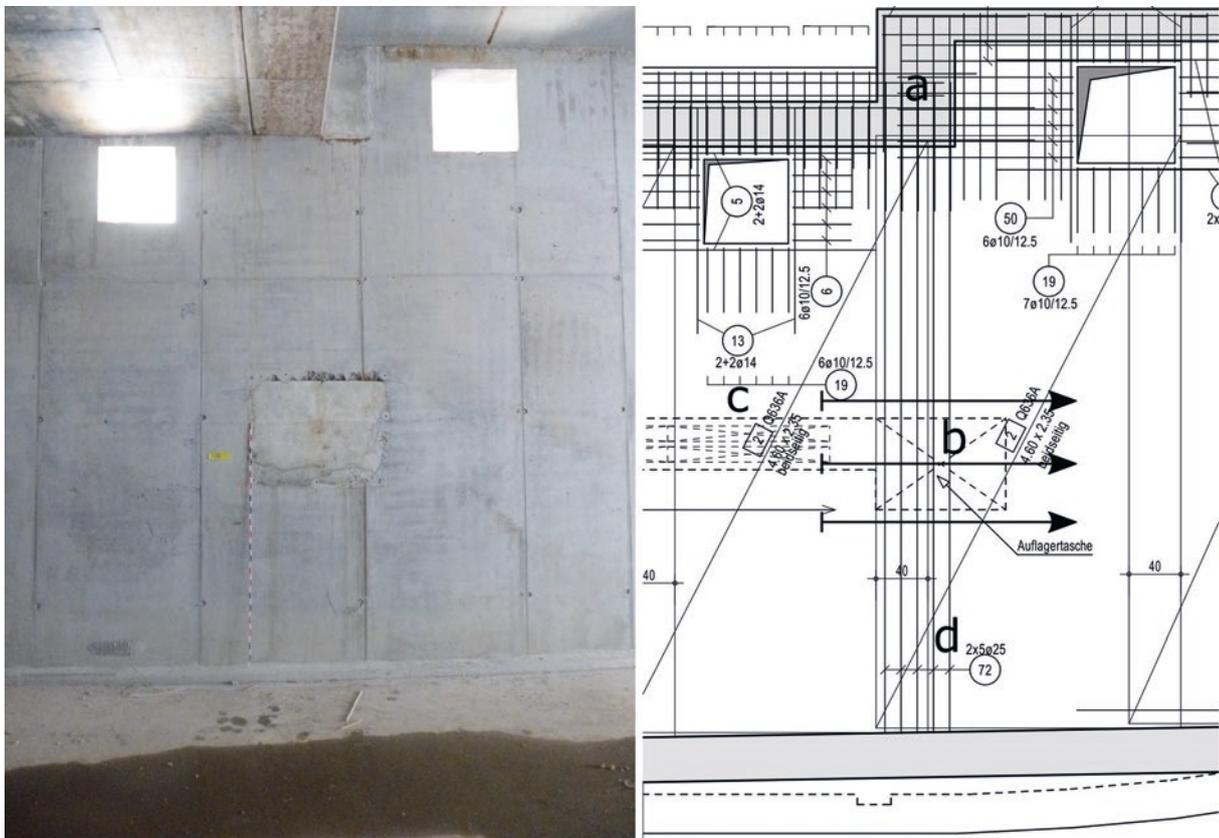
Schließlich kann festgestellt werden, dass das Hüllrohr augenscheinlich voll verpresst ist, da beidseits der Hüllrohrwandung keine Intensitätssprünge erkennbar sind, die auf einen relevanten Dichteunterschied hinweisen würden. Die Differenz der Dichte zwischen Beton und Verpressmörtel ist mit etwa 10% zu gering für eine Unterscheidung im Röntgenbild, Luft im Hüllrohr hingegen verursacht keinerlei relevante Schwächung der Strahlendosis und würde eine deutlich stärkere Belichtung des Röntgenbilds als der umgebende Beton bewirken. Die Radiographie ermöglichte somit die vollständig zerstörungsfreie Rekonstruktion des Bauteilquerschnitts

(Bild 7) mit Informationen für eine zielführende statische Nachrechnung.

2.2 Untersuchung einer Stahlbetonwand

Am Neubau eines innerstädtischen Wohn- und Geschäftsensembles wurden diverse Mängel bei der Ausführung der Betonierarbeiten festgestellt und mit „klassischen“ zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Prüfverfahren – Betondeckungsmessung, Radar und Ultraschall, minimal-invasive Endoskopie sowie Bohrkernentnahmen – untersucht und bewertet. An einer Wand war zudem aufgrund der sichtbaren Schalungsflächen die Bewehrungsführung eines Unterzugs für die Ableitung von Druckkräften durch ein Balkenauflager unklar (Bild 8). Augenscheinlich wurde zunächst die Wand $d = 22$ cm betoniert und die Auflagertasche des Balkens ausgespart, danach wurde der Balken betoniert. Die fragliche Druckbewehrung, insgesamt zehn Stäbe $\varnothing 25$ mm, verläuft auf den Ausführungsplänen durch die Auflagertasche und hätte folglich in der Schalung aufwendig einzeln ausgespart werden müssen, was aufgrund der allgemeinen Ausführungsqualität infrage gestellt wurde.

Bei der Suche nach der Druckbewehrung kamen zunächst Ultraschall und Radar als bildgebende Verfahren zum Einsatz. Die mit diesen Verfahren erhaltenen Bilder



Quelle: bauray GmbH/AWD Ingenieure, Köln

Bild 8 Wandansicht und zugehöriger Bewehrungsplan mit Unterzug a), Auflagertasche b), Grundbewehrung Matten Q 636 $\varnothing 9$ –10 mm c), Zulagebewehrung $2 \times 5 \varnothing 25$ mm d), Lage der Ultraschall- und Radarmessspuren (Pfeile)
Region of interest and respective reinforcement plan (detail) with joist a), beam support b), basic reinforcement $\varnothing 9$ to 10 mm c), additional reinforcement $\varnothing 25$ mm d), position of ultrasonic and radar measuring paths (arrows)

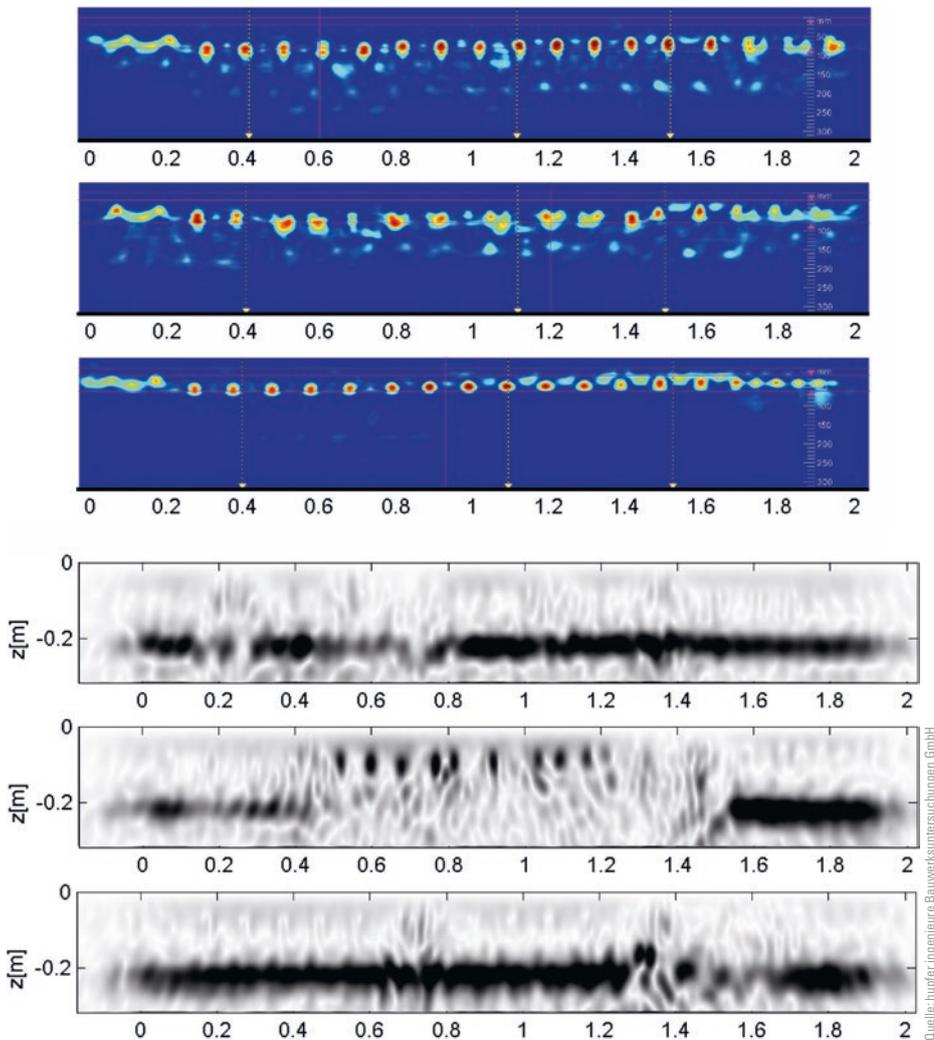


Bild 9 Radar- (oben) und Ultraschallbilder (unten) als horizontale Wandquerschnitte entlang der Messspuren aus Bild 8
 Radar (top) and ultrasonic (bottom) horizontal cross section images along measuring paths in fig. 8

des Wandquerschnitts sind in Bild 9 dargestellt. Die Verfahrenskombination bietet sich hier – wie auch bei den meisten anderen Aufgabenstellungen zur Rekonstruktion von Bauteilquerschnitten – an, da die Verfahren aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Ansätze [15, 16] unterschiedliche Vor- und Nachteile bei der Untersuchung von Betonbauwerken aufweisen, wie im Folgenden aufgezeigt wird.

Die Radargramme in Bild 9 (aufgenommen mit einer Mittelfrequenz von 1,6–2,0 GHz) zeigen deutlich die Bewehrung sowohl auf der Seite der Messung als auch auf der abgewandten Seite. Das regelmäßige Raster von 15 cm und die gleichmäßige Tiefenlage sind ein sicheres Indiz für eine Mattenbewehrung, auf den Durchmesser der Stäbe kann hingegen nicht rückgeschlossen werden. Die Ultraschallbilder (aufgenommen mit einem Lineararray [9] und einer Mittelfrequenz von ca. 50 kHz) zeigen deutlich die Wandrückseite, jedoch nur schwach die beiden oberflächennahen Bewehrungslagen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass nur Bewehrung mit geringem Durchmesser vorhanden ist. Eine Aussage über den tatsächlichen Durchmesser ist aber auch mit dem Ultraschallverfahren nicht möglich.

Zwar deuten die Bilder an, dass keine Zulagebewehrung im Wandquerschnitt vorhanden ist, ein sicherer Nachweis konnte mit diesen Verfahren aber noch nicht erbracht werden. Grundsätzlich denkbar wäre ein „Übersehen“ der Zulagen bei doppelstabähnlicher Positionierung entlang eines Stabs der Mattenbewehrung. Besonders Radar ist für eine solche Abschätzung anfällig. Dagegen hat Ultraschall nahe der Bauteiloberflächen seine Grenzen.

Eine direkt bildgebende Darstellung mittels Radiographie kann einen eindeutigen Nachweis erbringen, ähnlich einer Fotografie. Da es sich bei der Radiographie um eine bauteildurchdringende Untersuchung statt einer Echountersuchung handelt, bei der der gesamte Bauteilquerschnitt auf dem Röntgenbild dargestellt wird, gilt prinzipiell: „Was auf einem Röntgenbild (nicht) zu sehen ist, befindet sich auch (nicht) im Bauteil.“

Bild 10 zeigt den Prüfaufbau beidseits der Wand. Röntgenröhre und Detektor haben einen Abstand von etwa einem Meter, der Detektor liegt an der Rückseite der Wand an. Da es sich hier um einen geometrisch einfachen Prüfaufbau handelt, kann bei bekannter Tiefenlage



Bild 10 Prüfaufbau mit Röntgenröhre und Detektor (Speicherfolie)
Test setup with x-ray tube and detector (image plate)

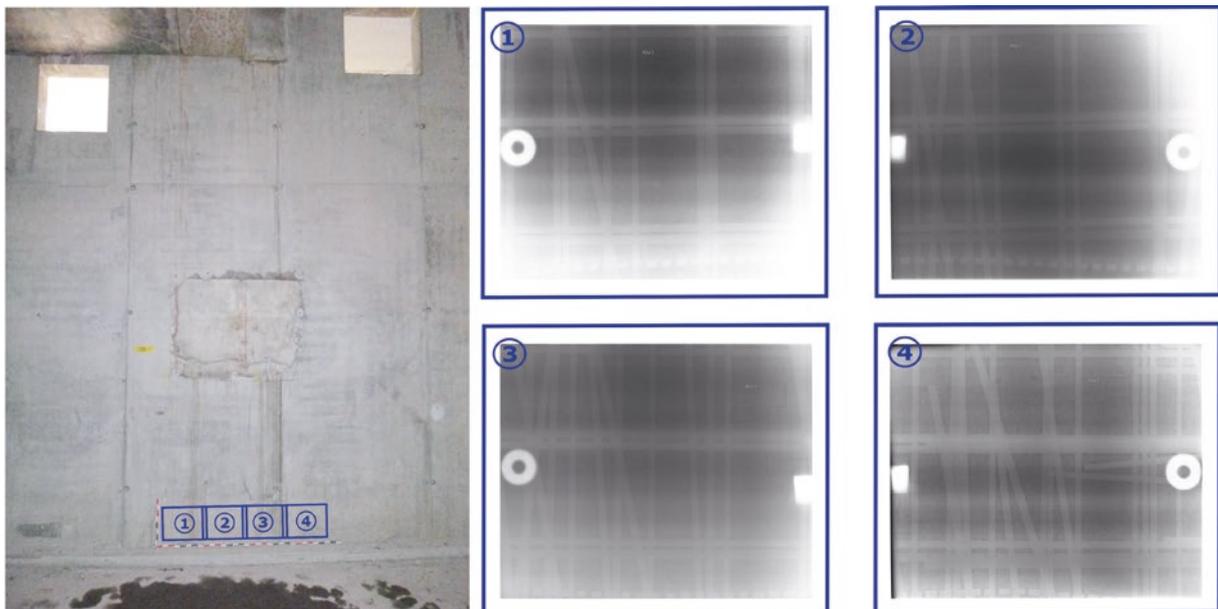


Bild 11 Radiographien der Stahlbetonwand
Radiographic images of the reinforced concrete wall

der Durchmesser der Bewehrung ohne Weiteres sehr genau bestimmt werden.

Aufgenommen wurden vier sich geringfügig überschneidende Röntgenbilder am Wandsockel unterhalb der Auflagertasche des Balkens (Bild 11). Es ist sofort erkennbar, dass ausschließlich Bewehrung von annähernd gleichem Durchmesser eingebaut ist. Identifizierbar sind die beidseitige Mattenbewehrung im rechteckigen Raster sowie

die etwas abgebogene Anschlussbewehrung aus der Sohle. Zulagebewehrung mit größerem Durchmesser ist eindeutig nicht vorhanden.

Bild 12 zeigt einen Ausschnitt aus Röntgenbild Nr. 2 mit vermaßten Abbildungen von Stabdurchmessern und Stababständen. Strahlerseitige und detektorseitige Bewehrung können aufgrund der unterschiedlichen Vergrößerung eindeutig unterschieden werden. Per Strahlensatz

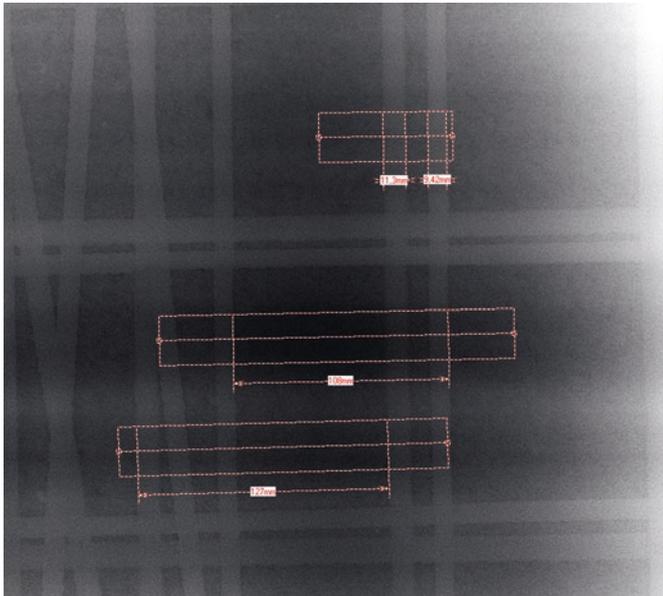


Bild 12 Vermaßtes Röntgenbild
Radiographic image with dimensions

kann auf die wahre Größe rückgerechnet werden. Der Vergrößerungsfaktor der Abbildung der detektorseitigen Bewehrung liegt bei einer Betondeckung von ca. 3–5 cm und einem Abstand von 100 cm zwischen Strahler und Detektor bei etwa 3–5 %. Bei der strahlerseitigen Bewehrung beträgt die Vergrößerung bei 17–19 cm Abstand zur Bewehrung (strahlerseitige Betondeckung von 3–5 cm bei einer 22 cm starken Wand) etwa 20–23 %. Die Stabdurchmesser der vertikalen Bewehrung können damit zu 9 mm bestimmt werden. Eine genaue Messung der tatsächlichen Betondeckung mit magnetischen Verfahren [17] kann die Genauigkeit bei Bedarf weiter erhöhen.

Literatur

- [1] Röntgen, W. C. (1897) *Über eine neue Art von Strahlen*. Physik. Institut der Universität Würzburg.
- [2] DIN EN ISO 9712:2022-09 (2022) *Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung (ISO 9712:2021)*; Deutsche Fassung EN ISO 9712:2022. Berlin: Beuth.
- [3] DIN 4871:2022-09 (2022) *Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau)*. Berlin: Beuth.
- [4] ZTV-ING (2022) *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 7 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweisen, Anhang A Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU)*. Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Berlin.
- [5] DIN 1076:1999-11 (1999) *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*. Berlin: Beuth.
- [6] RI-EBW-PRÜF (2017) *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin.
- [7] Redmer, B.; Likhatchev, A.; Weise, F.; Ewert, U. (2003) *Location of Reinforcement in Structures by Different Methods of Gamma-Radiography*. International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 2003. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) [Hrsg.], Berlin. Tagungsband.
- [8] Maierhofer, C.; Röllig, M.; Hasenstab, A.; Schönitz, A. (2008) *Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen*. Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) [Hrsg.], Berlin. Tagungsband.
- [9] Schulze, S. (2017) *Untersuchung von Spannbetonkonstruktionen mit bildgebenden Ultraschallecho-Verfahren* [Dissertation]. Technische Universität Berlin.
- [10] DGZfP-Merkblatt B1 (1990) *Merkblatt für die Durchstrahlungsprüfung von Stahlbeton und Spannbeton* (zurückgezogen). Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) [Hrsg.], Berlin.
- [11] Gesetz (StrlSchG, 2017) und Verordnung (StrlSchV, 2021) zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung.
- [12] DIN 54113-1:2018-01 (2018) *Zerstörungsfreie Prüfung – Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 1 MV – Teil 1: Sicherheitstechni-*

Die Anschlussbewehrung weist ähnliche Werte auf wie die Mattenbewehrung, da erstere aber auch in der Tiefe schräg verlaufen kann, ist eine exakte Nachmessung schwieriger. Augenscheinlich liegen Stabdurchmesser von 9–10 mm vor. Bei den Stababständen gilt dasselbe Vergrößerungsprinzip. Der horizontale Abstand beträgt folglich 10 cm, der vertikale Abstand 15 cm (Die Informationen zu den Stababständen können auch den Radar- und Ultraschallmessungen entnommen werden). Somit konnte im vorliegenden Praxisbeispiel die Mattenbewehrung eindeutig als Q636 identifiziert und eindeutig das Fehlen der Druckzulagebewehrung nachgewiesen werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Radiographie hat das Potenzial, im Werkzeugkasten der ZfPBau-Methoden einen hohen Stellenwert einzunehmen. Die direkte Bildgebung ermöglicht die Identifikation und exakte Vermaßung von Bewehrung, Spanngliedern und Einbauteilen. Im Denkmalschutz, bei gerichtlichen und außergerichtlichen Beweisfragen mit Anspruch an eine hohe Aussagesicherheit und bei erheblich standsicherheitsrelevanten oder geschädigten Bauteilen kann die Radiographie alternativlos sein, auch weil sie zusätzlich berührungslos ist.

Um das Verfahren in der ZfPBau zu etablieren, soll der Unterausschuss Durchstrahlungsprüfung der DGZfP reaktiviert und zunächst das Merkblatt B1 neu aufgelegt werden. Eine Aufnahme des Verfahrens in zukünftige Auflagen der DIN 4871 ist bei zunehmender Praxisrelevanz des Verfahrens anzustreben.

sche Anforderungen und Prüfungen für Herstellung, Errichtung und Betrieb. Berlin: Beuth.

- [13] Vogt, H.-G.; Vahlbruch, J.-W. (2019) *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*. München: Carl Hanser.
- [14] Merkblätter DBV e.V. Bauen im Bestand (2016) *Beton und Betonstahl*. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV) [Hrsg.], Berlin.
- [15] DGZfP-Merkblatt B10 (2008) *Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*. Deut-

sche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. [Hrsg.], Berlin.

- [16] DGZfP-Merkblatt B04 (2008) *Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. [Hrsg.], Berlin.
- [17] DGZfP-Merkblatt B02 (2021) *Zerstörungsfreie Betondeckungsmessung und Bewehrungsortung an Stahl- und Spannbetonbauteilen*. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. [Hrsg.], Berlin.

Autor



Dr.-Ing. Sebastian Schulze (Korrespondenzautor)
schulze@bauray.de
bauray GmbH
Bei der Neuen Münze 12b
22145 Hamburg

Zitieren Sie diesen Beitrag

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>

Radiographie im Bauwesen

- Maximale Aussagesicherheit
in der Bauwerksdiagnostik
- bildzeichnende Darstellung
 - ohne Eingriff ins Bauteil
 - millimetergenau bemaßbar



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



Feststellung innerer Bauteilaufbauten



Feststellen innerer Bauteilaufbauten von Wänden, Decken, Böden, Stützen, Unterzügen und Fertigteilen - ohne Eingriff in die Bausubstanz

Qualitätssicherung am Neubau und an Fertigteilen



Qualitätssicherung auf Baustellen und im Werk

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 Radiographie im Bauwesen nur wenige Vorgaben: Eine begrenzte Bauteilstärke, beidseitige Zugänglichkeit sowie ausreichend realisierbaren Strahlenschutz (sog. Kontrollbereich).

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