

Durchstrahlungsprüfung an Stahl- und Spannbeton – was so möglich ist

Sebastian SCHULZE ¹
¹ bauray GmbH, Hamburg

Kontakt: schulze@bauray.de

Kurzfassung. In der ZfPBau wird Röntgen in Deutschland bislang nicht systematisch angewendet, 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. Der Vortrag soll anhand von aktuellsten Praxisbeispielen das Potential des Verfahrens in der Praxis der ZfPBau demonstrieren.

Einführung

Für die Planung von Instandsetzungs-, Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen, aber auch für die fortlaufende Instandhaltung von Bauwerken ist eine umfassende Kenntnis des Ist-Zustandes der Konstruktion unerlässlich.

In der Praxis kommen dabei insbesondere im Rahmen der Instandsetzungsplanung häufig nur die etablierten Methoden zur Ausführung – Chlorid- und Karbonatisierungsprüfung, Potentialfeldmessung, Betondeckungsmessung. Das Potential weiterführender zerstörungsfreier diagnostischer Methoden zur Untersuchung des tatsächlichen Erhaltungszustandes ist immer noch weitgehend unbekannt.

Gemeint sind die volumenabbildenden Methoden Radar und Ultraschall – und auch die Radiographie im Bauwesen, der Einsatz mobiler Röntgentechnik. Dabei handelt es sich um eine Methode, die bereits vor Jahrzehnten bei besonderen Fragestellungen vereinzelt Anwendung fand, sich aber aufgrund des erheblichen Aufwands in der Praxis nie durchsetzen konnte.

Mittlerweile ist die Messtechnik deutlich fortgeschritten. Mussten früher Röntgenfilme auf Bauteiloberflächen geklebt und dann vor Ort nasschemisch in einem mobilen Entwicklungslabor belichtet und fixiert werden, kann heute dank digitaler Detektortechnik die Radiographie deutlich wirtschaftlicher eingesetzt werden.

Bildgebende Bauwerksdiagnostik per Radiographie

Das Prinzip der Radiographie ist einfach und ähnelt dem der klassischen Schwarz-Weiß-Fotografie, bei der auf einem Film durch unterschiedlich belichtete Bereiche ein für das menschliche Auge interpretierbares Kontrastbild entsteht. Beim medizinischen Röntgen entsteht dieser Kontrast durch die unterschiedliche Absorption der auf den Körper einfallenden Strahlung, die insbesondere von der Dichte der „Einbauteile“ des menschlichen Körpers abhängt. So absorbieren z.B. Knochen mehr Strahlung als das umliegende Gewebe geringerer Dichte und es entsteht ein Kontrastbild mit stärker und schwächer belichteten Bereichen, auf denen die Bestandteile des durchleuchteten Körperteils sichtbar werden. Das Prinzip ist dasselbe wie bei der Lichtbildfotografie, lediglich die genutzte Energie ist beim Röntgen deutlich höher, die Strahlung „härter“.

Der wesentliche Vorteil bei Einsatz der Röntgentechnik im Bauwesen ist die direkte Bildgebung, die dem fachkundigen Baubeteiligten einen direkten, ohne Auslegungsschwierigkeiten interpretierbaren Blick ins Bauwerksinnere ermöglicht. Während beim Ultraschall- oder Radarverfahren die Interpretation durch den erfahrenen Bauwerksprüfer erforderlich ist, sind Röntgenbilder infolge der direkten Bildgebung deutlich einfacher bewertbar, ähnlich z.B. wie beim Menschen, bei dem auch der Patient selbst den Knochen(-bruch) auf dem Röntgenbild klar zu erkennen vermag.

Der Nachteil der Röntgentechnik im Bauwesen im Vergleich mit anderen Untersuchungsmethoden liegt in dem Erfordernis der beidseitigen Zugänglichkeit und dem daraus resultierenden erhöhten Aufwand, handelt es sich doch um eine *Durchstrahlungsprüfung* (Abb. 1).



Abb. 1: Typisches Setup einer Durchstrahlungsprüfung, hier an einer Elementwand (vgl. Abschnitt 2.3). Links der Detektor nahe der Bauteiloberfläche, rechts die Röntgenröhre mit Abstand zum durchstrahlten Bauteil

Demgegenüber steht der zweite große Vorteil des Verfahrens, ein echtes Alleinstellungsmerkmal: Was auf einem Röntgenbild zu sehen ist, lässt sich zuverlässig ohne Bauteilöffnung vermessen, und was nicht zu sehen ist, ist auch nicht im Bauteil vorhanden.

Wird die Anordnung von Detektor, Strahler und Bauteil dokumentiert, so kann über die bekannte Geometrie des Untersuchungsaufbaus die Vergrößerung und Verzerrung der

auf dem Detektor abgebildeten Objekte herausgerechnet und die wahre Größe der Einbauteile (Bewehrung, Spannglieder, Verankerungen, usw.) errechnet werden (Abb. 2). Voraussetzung ist die Kenntnis der Tiefenlage des Einbauteils, die mit ergänzenden Methoden (z.B. ferromagnetische Verfahren, Radar, Ultraschall) problemlos ausreichend genau bestimmt werden kann.

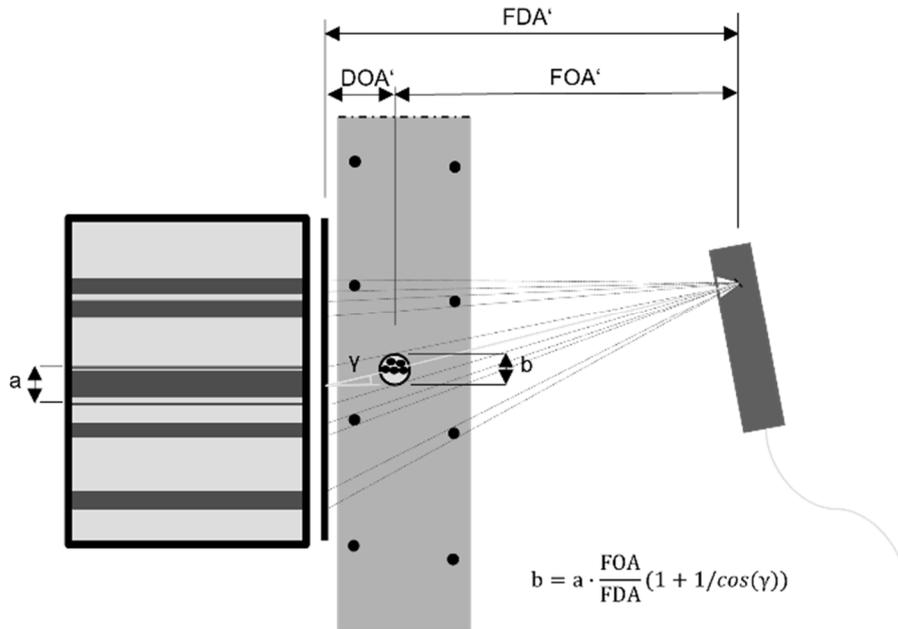


Abb. 2: Rückrechnung der wahren Größe der auf dem Detektor/Röntgenbild abgebildeten Einbauteile (hier Stab- und Spannbewehrung) über Vergrößerung (Strahlensatz) und Verzerrung/Einfallswinkel (Schattenwurf).

Somit ist eine eindeutige Nachweisführung ohne Bauteilöffnung möglich – auch das eine Parallele zur medizinischen Diagnostik, bei der aus nachvollziehbaren Gründen eine non-invasive Methode einer „Öffnung“ nach Möglichkeit stets vorgezogen wird. Die im Folgenden gezeigten Beispiel aus der Praxis belegen dies eindrucksvoll.

2.1 Praxisbeispiel Bewehrungsnachweis

An der Stahlbetonwand einer Parkhauszufahrt ($d = 20 \text{ cm}$) waren planmäßig Zulagen ($10 \text{ } \varnothing 25 \text{ mm}$) zur Ableitung von Druckkräften aus einem aufliegenden Balken einzubauen (Abb. 3). Bauherrenseitig wurde die zuverlässige Durchführung von Bewehrung durch die Auflagertasche eines einbindenden, nachträglich betonierten Balkens (Markierung b in Abb. 3) bezweifelt und der Nachweis des Einbaus der Zulagen gefordert.

Abbildung 4 zeigt exemplarisch je eine der Radar- und Ultraschallmessspuren, die im Bereich des Balkenkopfs angelegt wurden. Es handelt sich dabei jeweils um die Rekonstruktion horizontaler Querschnitte durch die Wand, detektiert wird folglich die vertikale Bewehrung. Anhand der Messdaten werden die Möglichkeiten und Grenzen der beiden Verfahren im direkten Vergleich gut ersichtlich. Die Radarmessspur bildet gut die oberflächennahe Vertikalbewehrung im Abstand von 15 cm ab, bei der es sich aufgrund des gleichmäßigen Rasters offenbar um Mattenbewehrung handelt. Auch die rückseitige Bewehrung ist teilweise erkennbar, wenn auch stark abgeschattet durch die vorderseitige Bewehrung. Die Ultraschallmessspur wiederum zeigt ein starkes Echo der Wandrückseite, aber nur schwach die der beidseitig oberflächennahen Bewehrungslagen.

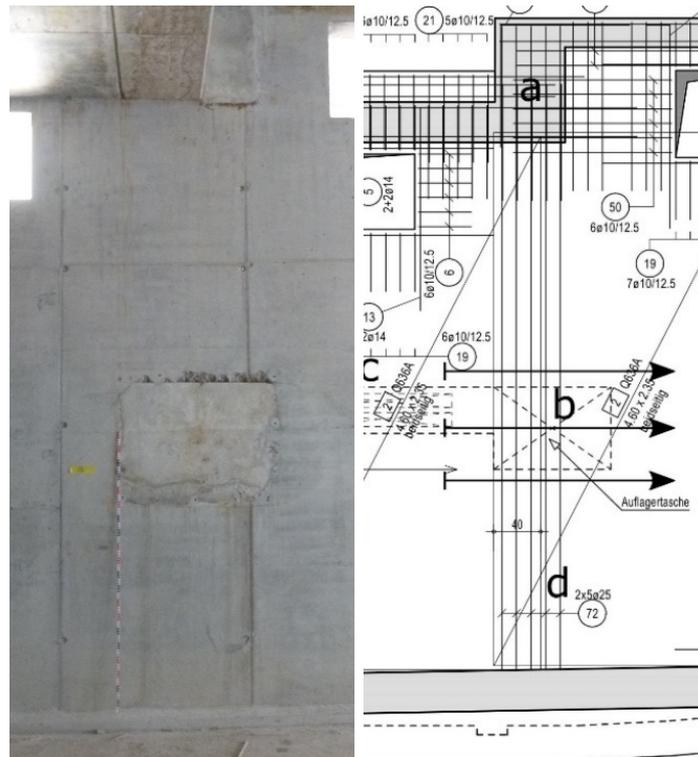


Abb. 3: Fotografie und Planzeichnung des Neubaus einer Stahlbetonwand mit aufliegendem (a) und einbindendem (b) Balken, Grundbewehrung Q636A (c) und Druckzulagebewehrung (d) sowie Kennzeichnung der Radar- und Ultraschallmessspuren zur Bewehrungsortung

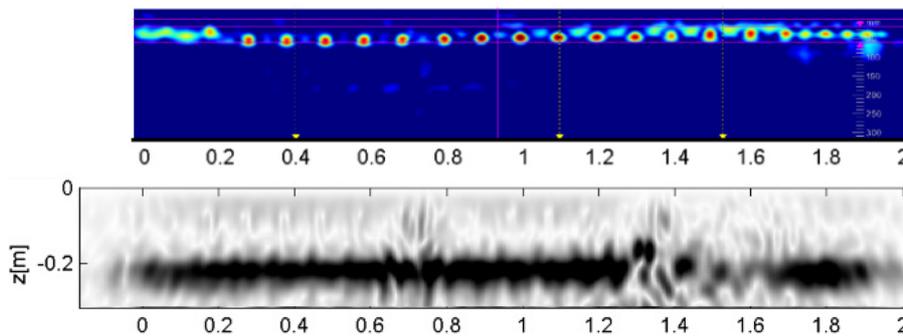


Abb. 4: exemplarische Radar- und Ultraschallmessspur aus Abb. 3 (Pfeil unterhalb der Auflagertasche)

Beide Messspuren zeigen keine Hinweise auf Zulagebewehrung, was aber keinen hinreichenden Nachweis für die Abwesenheit derselben darstellt. In der Regel werden Zulagen an bestehende Grundbewehrung angebunden, so dass Doppelstäbe entstehen, die im Radarbild nicht bis kaum von Einzelstäben zu unterscheiden sind. Rückschlüsse auf Stabdurchmesser sind per Radar ohnehin nicht möglich. Ultraschall hat seine Schwäche bei oberflächennaher Bewehrung, da naheliegende, deutlich stärkere Reflexionen (messteilig: Oberflächenwelle; rückseitig: starke Totalreflexion der Rückwand) die Anzeigen überlagern und deren Interpretierbarkeit erschweren können. So war hier mit den „herkömmlichen“ ZfP-Verfahren (soweit man davon bereits sprechen mag) kein „gerichtsfester“ Nachweis des Einbauzustandes möglich. Es musste geröntgt werden.

Die Einrichtung der Messtechnik entspricht jener in Abb. 1. Durchstrahlt wurde die Wand am Fußpunkt, an der die Zulagebewehrung in die Sohle einbinden musste. Dazu wurden mehrere Röntgenbilder aufgenommen, um einen Bereich von etwa 1,5 m Breite abzudecken (Abb. 5).

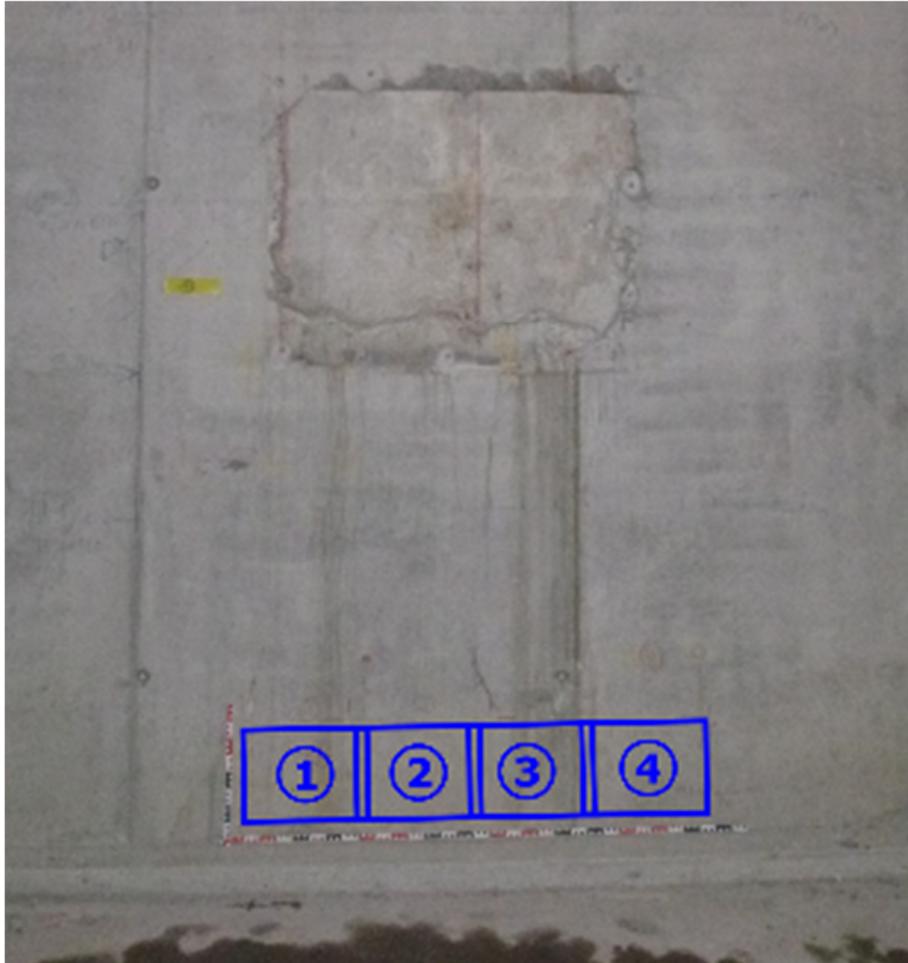


Abb. 5: Position der am Wandfuß aufgenommenen Röntgenbilder

Die zugehörigen Röntgenbilder sind in Abb. 6 dargestellt. Diese zeigen ausschließlich Stabstahl ähnlicher Durchmesser. Auf Zulagebewehrung hinweisende deutlich größere Durchmesser sind nicht erkennbar.

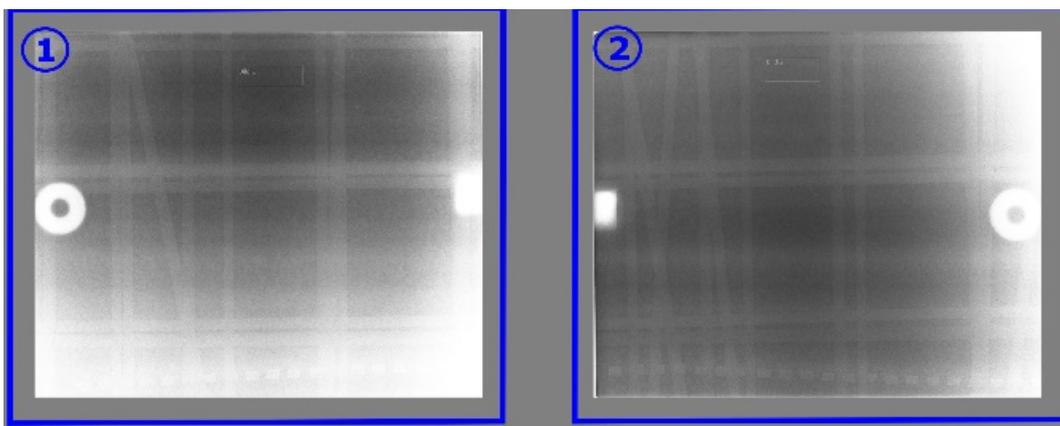


Abb. 6: Exemplarische Röntgenbilder (weiß: Positionsmarker)

Die vergrößerte Darstellung in Abb. 7 zeigt die auf dem Röntgenbild projizierten Maße. Mit der in Abb. 2 skizzierten Rückrechnung lassen sich die wahren Durchmesser bestimmen. Die detektorseitige Bewehrung ist hier geringfügig (ca. 5%), die strahlerseitige Bewehrung

deutlich vergrößert abgebildet (ca. 25%), entsprechend der Abstandsverhältnisse zwischen Strahler, Objekt und Detektor.

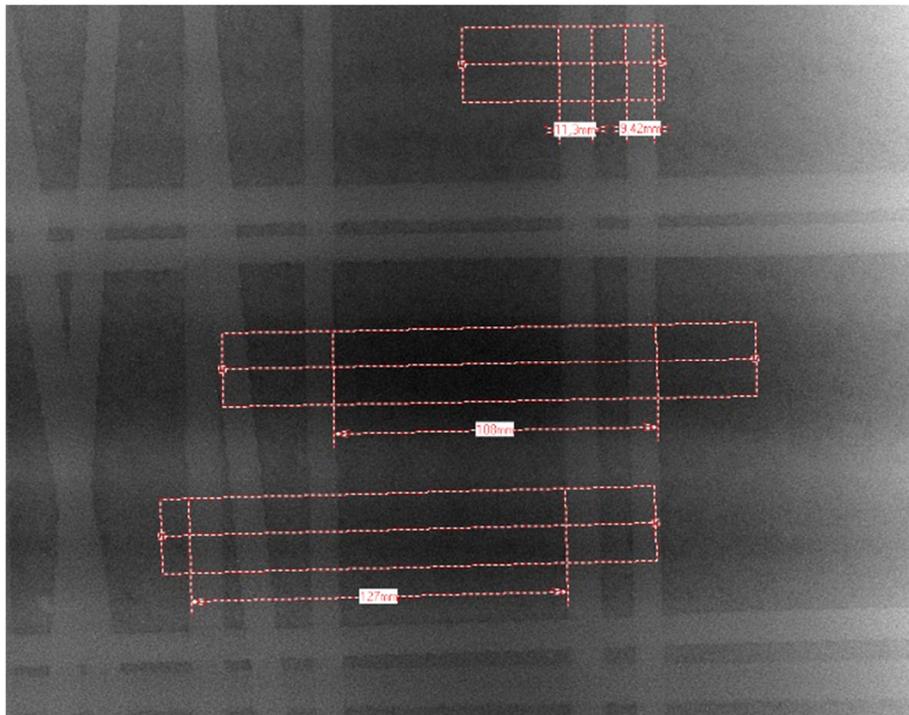


Abb. 7: Vermaßtes Röntgenbild, Ausschnitt aus Bild 2 in Abb. 6.

Die Stabdurchmesser der augenscheinlichen Mattenbewehrung betragen 9 mm, die Stababstände 15 cm, dies entspricht der planmäßigen Grundbewehrung einer Q636A-Matte. Bei den schräg verlaufenden Eisen im Bild handelt es sich um die typisch abgebogene Anschlussbewehrung aus der Sohle.

Da wie oben beschrieben im Durchstrahlungsbild der gesamte Wandquerschnitt abgelichtet und folglich alle vorhandenen Einbauteile bzw. Bewehrungsstäbe auch auf dem Röntgenbild sichtbar werden, sind diese Aufnahmen ein eindeutiger Nachweis dafür, dass die planmäßig vorgesehene Zulagebewehrung im untersuchten Bereich nicht vorhanden ist.

2.2 Praxisbeispiel Korrosionszustand

Bei dem vorangegangenen Beispiel war die Qualität der Röntgenbilder für die Zielerreichung der Aufgabenstellung ausreichend. Das Potential dieses Verfahrens bei der Untersuchung von Betonbauwerken reicht aber noch weiter. Nachfolgend wird das Ergebnis einer Machbarkeitsstudie zur Untersuchung von Bewehrungsgehalt und -zustand an Stützenfüßen einer Tiefgarage erläutert.

Das vorrangige Ziel war es, Eckeisen zerstörungsfrei auf Korrosionserscheinungen zu untersuchen. Wie zuvor die Wand waren die untersuchten Stützen 20 cm stark. Mit optimierten Belichtungsparametern und digitaler Nachbearbeitung konnten Bildqualität und damit Aussagefähigkeit der Bilder noch einmal deutlich verbessert werden. Als Studienobjekt diente eine Stützenecke mit bekannten Korrosionserscheinungen, die einige Zeit vor Durchführung der Messung bereits saniert wurde (Abb. 8).



Abb. 8: Korrodierende Stützeckenbewehrung vor Sanierung

Die Durchstrahlungsprüfung erfolgte nach Reprofilierung der Stütze. Abb. 9 zeigt den bauzeitlichen Bewehrungsplan mit Vertikaleisen $\text{Ø} 16 \text{ mm}$ in den Ecken sowie Bügelbewehrung $\text{Ø} 8 \text{ mm}$, $a = 19 \text{ cm}$ mit Zulagen am Stützenfuß.

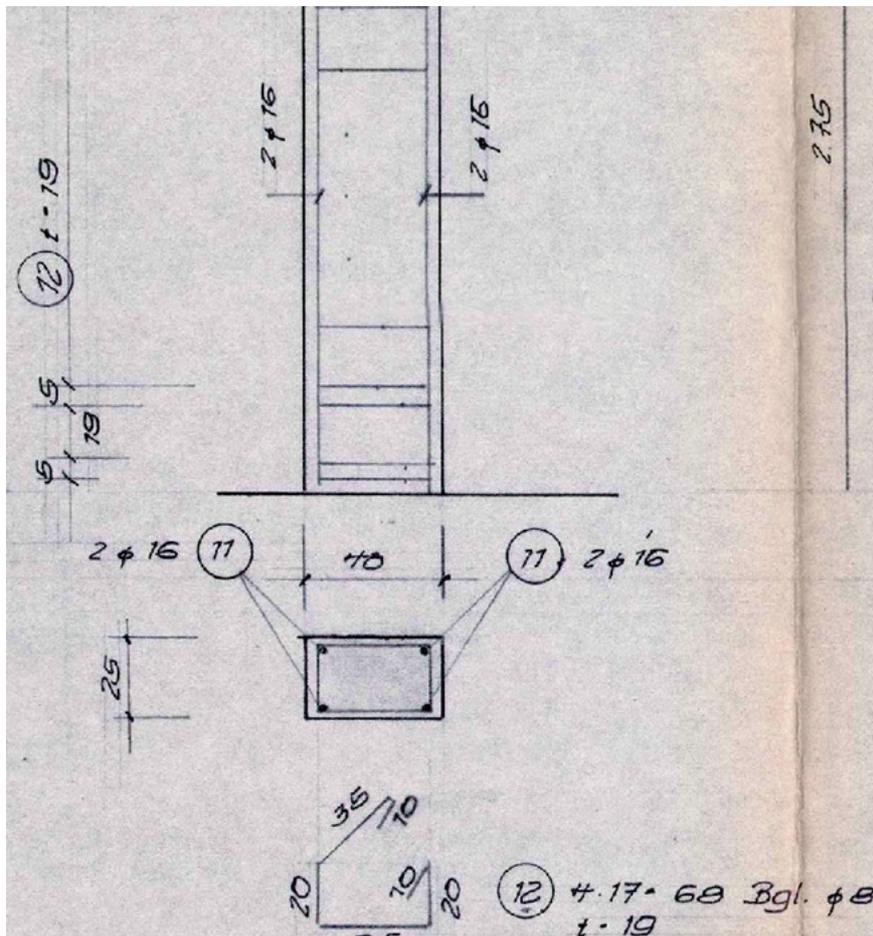


Abb. 9: Bewehrungsplan der durchstrahlten Stütze mit korrodiertem Eckeisen

Das Röntgenbild des Stützenfußes ist in Abb. 10 dargestellt. Aufgehende Bewehrung, teilweise mit deutlich erkennbaren Rippen, sowie die Anschlussbewehrung und Bügel sind eindeutig identifizier- und vermessbar: Die Vertikalbewehrung entspricht mit tatsächlichem Durchmesser von 16 mm den Bestandsplänen, die Bügelbewehrung nicht – vorhanden sind Bügel \varnothing 6 mm (bereits ohne Einmessung ist erkennbar, dass der Bügeldurchmesser kleiner ist als der halbe Durchmesser der aufgehenden Eisen), erkennbar als Doppelbügel, deren Gesamtquerschnitt damit etwa dem eines Einzelbügels \varnothing 8 mm entspricht. Allerdings sind hier ggf. eher die planmäßig mit Abstand von 5 cm vorhandenen Zulagen (vgl. Abb. 9) zusammengerutscht als dass Bügel \varnothing 8 mm absichtlich durch $2\varnothing$ 6 mm ersetzt worden wären.

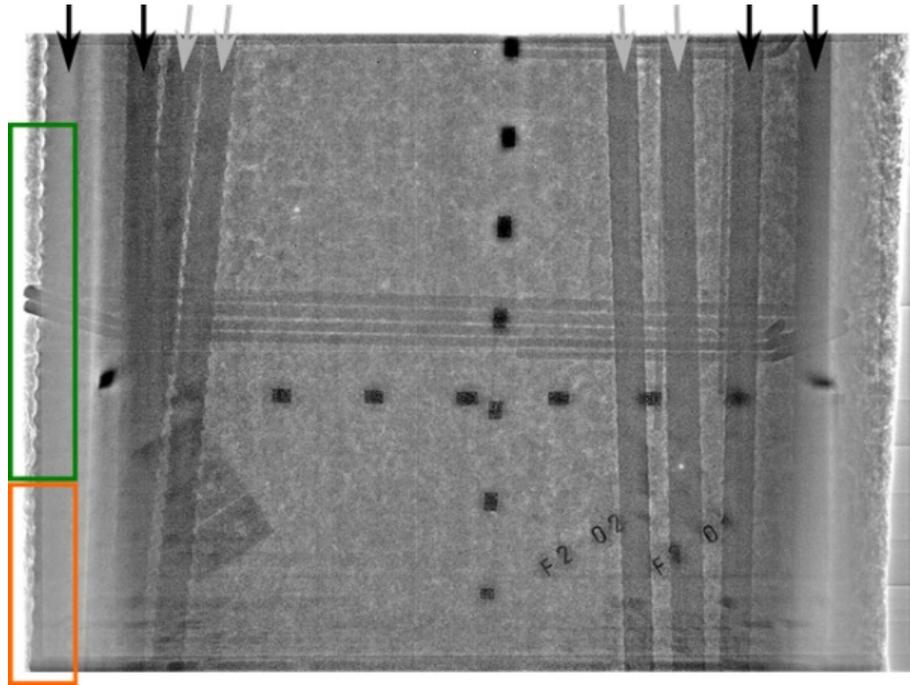


Abb. 10: Röntgenbild des Stützenfußes mit vergrößertem Ausschnitt. Erkennbar sind Stützenbewehrung (schwarze Pfeile), Anschlussbewehrung (graue Pfeiler) Bügel und Röntgenmarker (Bildbezeichnungen, Röntgenmaßband, Bildgüteprüfkörper)

Diese Zusatzinformationen zum Istzustand sind hier eher „Beifang“ zum eigentlichen Untersuchungsziel: Der Identifizierbarkeit geringfügiger korrosionsbedingter Querschnittsschwächungen. Hier ist die Markierung in Abb. 10 zu beachten, die das schadhafte Eckeseisen aus Abb. 8 zeigt. Der Bereich ist in Abb. 11 vergrößert dargestellt und der Aufnahme eines Eckeseisens an einer augenscheinlich unbeschädigten Ecke einer anderen Stütze gegenübergestellt. Im grün markierten Bereich weisen die im Profil abgebildeten Rippen keine Auffälligkeiten auf, erst im orange markierten Bereich – an der die aus Abb. 8 bekannten Abrostungen vorhanden sind – werden die Rippen deutlich flacher und sind nahe des Fußpunktes annähernd vollständig abgerostet. Im Vergleich dazu ist entlang des Referenzeisens in Abb. 11 rechts keine Auffälligkeit an den Rippen vorhanden, die Profilierung ist über die gesamte Höhe gleichmäßig ausgeprägt.

Anhand dieser Erkenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass es mittels Radiographie möglich ist, den Korrosionszustand von Eckbewehrung an Stützen und folglich auch sonstigen exponierten, schadensträchtigen Bauteilecken (Wandköpfe, Unterzüge) systematisch und vollkommen ohne Eingriff ins Bauteil festzustellen. Letzteres kann besonders bei hochbelasteten/rechnerisch überlasteten oder bereits erheblich geschädigten Stützen interessant sein, da auch der Zustand auf der Innenseite des Eckeseisens und ggf. umgreifender Bügel bewertet werden kann.

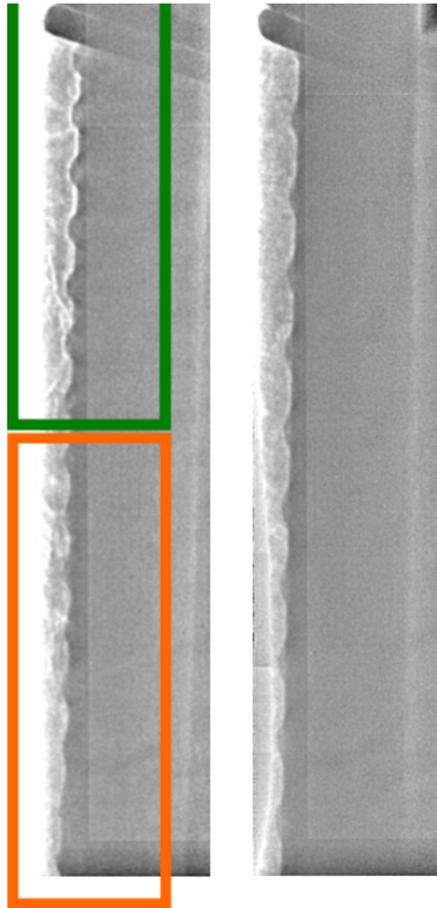


Abb. 11: Vergrößerung des geringfügig abgerosteten Eckeisens und Gegenüberstellung mit einem augenscheinlich schadfreien Eckeisen

2.3 Praxisbeispiel Schadfrees Bohren

Die exemplarische Messanordnung aus Abb. 1 stammt aus der Untersuchung von Halbfertigteilmwänden/Elementwänden, die in Teilbereichen rechnerisch derart hoch ausgenutzt sind, dass für die technische Umrüstung des Gebäudes erforderliche Kernbohrungen kein statisch relevantes Anschlusseseisen und keinen A-Bock-Gitterträger beschädigen durften. Hier gilt es dann, die relevante von der untergeordneten Bewehrung zu unterscheiden, was ohne Eingriff ins Bauteil nur durch Röntgen möglich ist, da sonstige zerstörungsfreie Methoden nah beisammen liegende Einzelstäbe nicht zuverlässig zu unterscheiden und Durchmesser nicht zu bestimmen vermögen.

Abb. 12 zeigt zwei exemplarische Röntgenbilder der durchstrahlten Elementwand. Bildkontrast und Detailerkennbarkeit sind hervorragend. Nicht nur können sämtliche Stabdurchmesser sicher festgestellt werden, auch A-Böcke, Abstandhalterräder aus Kunststoff, Lunker, selbst Bindedrähte mit Durchmessern von deutlich unter 2 mm sind zu erkennen. Die Kernbohrlagen konnten auf diese Weise mit maximaler Zuverlässigkeit und minimalen Sicherheitsabständen festgelegt werden.

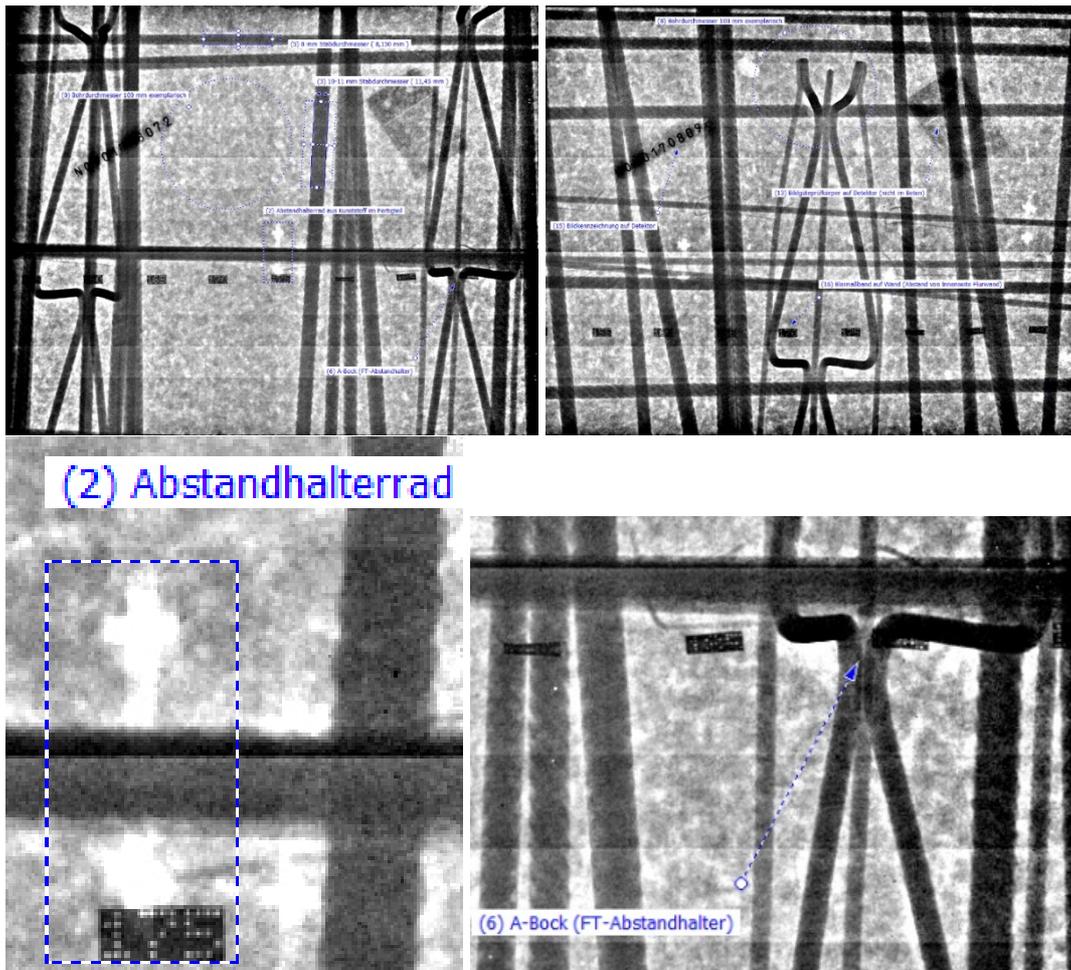


Abb. 12: Röntgenaufnahmen einer Elementwand mit Bestandteilen wie Bewehrung, Abstandhalter, Bindedrähte

3. Fazit

Die gezeigten Beispiele belegen den Erkenntnisgewinn durch den Einsatz der Radiographie an Betonbauwerken im Rahmen der Bauwerksdiagnostik. Viele weitere Untersuchungen an Stahl- und Spannbetonbauwerken zeigen weiteres Potential auf. So können per Radiographie beispielsweise auch Rissbilder untersucht, der Verpresszustand von Spanngliedern aussagesicher festgestellt oder denkmalgeschützte Bauwerke zerstörungsfrei untersucht werden.

Das Potential im Bestand ist also erheblich. Als Zukunftsziel im Sinne einer nachhaltigen Errichtung von Bauwerken ist es aber ebenso erstrebenswert, die Bauwerksdiagnostik, speziell die modernen Techniken und Methoden wie Radar, Ultraschall, Betondeckungsmessung und Radiographie, qualitätssichernd auch im Rahmen der Bauausführung und -abnahme einzusetzen. Die Kosten einer umfangreichen Begleitung und Abnahme zum Nachweis von Ausführungs- und Einbauzuständen *nach Fertigstellung der Betonierarbeiten* liegen mit Sicherheit unterhalb von einem Prozent der Gesamtprojektkosten – der Nutzen für Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks über dessen Lebensdauer liegt bei einem Vielfachen davon.