

Ermittlung von Detektionstiefen an Betonbauteilen mit Radar

Alexander TAFFE, Sascha FEISTKORN
 BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung), Berlin
 Norman DIERSCH
 Technische Universität Berlin

Kurzfassung. Kenntnisse der Leistungsfähigkeit und Grenzen von ZfPBau-Verfahren sind wichtige Voraussetzungen, die Lösbarkeit einer Prüfaufgabe richtig einzuschätzen. Daher ist es für den künftigen Nutzer von ZfPBau-Verfahren erstrebenswert, die zu erwartende Leistungsfähigkeit eines Verfahrens durch Validierung und damit verbunden durch systematische Untersuchungen für die Haupteinflussfaktoren anzugeben. In diesem Beitrag werden systematische Untersuchungen mit Radar beschrieben, um die erzielbare Detektionstiefe von Bewehrungsstäben in Betonbauteilen subjektiv zu quantifizieren. Diese Untersuchungen wurden mit verschiedenen Geräten und Antennenfrequenzen durchgeführt. Dazu wurden Betonbauteile konzipiert, die bezüglich der Größen Einbautiefe der Bewehrung, Betonalter (Aushärtung des Betons) und Betonsorte variiert wurden. Am Ende stehen Kurven, aus denen die realistisch erzielbaren Detektionstiefen von Bewehrungsstäben in Beton in Abhängigkeit von Betonalter, Antennenfrequenz und Betonsorte abgelesen werden können.

1 Angabe der Leistungsfähigkeit und Grenzen von ZfPBau-Verfahren

Bevor ein Kunde Untersuchungen beauftragt, möchte er sichergehen, dass seine Anforderungen erfüllt werden. Daher ist es wichtig, dass der Dienstleister die Leistungsfähigkeit und Grenzen seines Verfahrens kennt und diese dem Kunden auf Anfrage transparent darlegen kann. Darüber hinaus besteht beim Dienstleister ein großes wirtschaftliches Interesse, im Vorfeld einer zeitkritischen Untersuchung die wichtigsten Parameter seines Verfahrens bestmöglich zu wählen. Um Prüfaufgaben später nach der Methodik von Heft 574 des DAfStb [1] validieren zu können, sind zuvor systematische Untersuchungen erforderlich, um das Verfahren unter bestimmten Randbedingungen zu charakterisieren.

In diesem Beitrag werden systematische Untersuchungen mit Radar beschrieben, die dem Anwender helfen, erzielbare Detektionstiefen von Bewehrungsstäben in Betonbauteilen in Abhängigkeit der verwendeten Antennenfrequenz, dem Betonalter (Aushärtung des Beton) und der Betonsorte zu ermitteln. Dabei soll die Vorgehensweise zur Konzeption der Testkörper, die Durchführung der Messung und Aufbereitung der Messergebnisse transparent gemacht werden. Dem Anwender soll am Ende eine einfache Grafik zur Verfügung stehen, aus der die Größenordnung erzielbarer Detektionstiefen in Abhängigkeit der wichtigsten Einflussgrößen ablesen kann und die darüber hinaus einen Eindruck vermittelt, inwieweit die Tiefen streuen können.

Die Grundlagen des Radarverfahrens sind u.a. in [2] und [3] beschrieben. Die zugehörigen Auswertungsalgorithmen, die auf die Radardaten angewandt wurden, sind in [4] erläutert. Erste Untersuchungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des

Radarverfahrens zur Betondeckungsmessung wurden von *Streicher* durchgeführt und sind bezüglich der erzielbaren Messunsicherheit in [5] veröffentlicht.

2 Konzeption von Testkörpern und systematischen Radaruntersuchungen

Mit dem Ziel, Angaben zur möglichen Detektionstiefe von Radarprüfsystemen zu machen, wurden sechs Testkörper mit ähnlichem Aufbau konzipiert. Durch systematische Untersuchungen an diesen Testkörpern im Rahmen des OSSCAR-Vorhabens (www.ossicar.eu, [6], [7]) sollten die erzielbaren Detektionstiefen dann abgeschätzt werden. Neben unterschiedlichen Antennenfrequenzen (1,2 GHz; 1,6 GHz; 2,3 GHz) erfolgte zusätzlich die Variation baustofflicher Parameter, um die Änderung der Detektionstiefen bei unterschiedlichen Randbedingungen erfassen zu können.

Folgende Einflussgrößen wurden hierbei gezielt in den unterschiedlichen Testkörpern variiert:

- Betonalter:
von der Betonage bis zu einem Alter von rd. 600 Tagen
- Überdeckung der Reflektoren:
von 10 cm bis 40 cm
- Grad der oberflächennahen Bewehrung (onB):
von unbewehrt bis Ø25; s=10 cm)
- Reflektordurchmesser:
von 8 mm bis 28 mm
- Reflektorabstand:
von 5 cm bis 10 cm
- Betonrezeptur insbesondere Zementarten:
CEM-I; CEM-II, CEM-III

Tabelle 1 fasst den Aufbau der sechs erstellten Testkörper in einer Übersicht zusammen. Zusätzlich sind die Testkörper in Abbildung 1 in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 1: Aufbau der im Rahmen des OSSCAR Vorhabens konzipierten sechs Testkörper

PK Nr.:	Abmaße (h; b; d) in cm	Beton (Druckfestigkeit; Größtkorn; Zement)	Stab-Ø in mm	Stab-abstand in cm	onB (vier Bereiche)
PK1	150x150x50	C30/37 GK32 CEM-II-B-S 32,5 R	2 x (8, 10, 14, 20, 28) schräg verlegt	10	ohne Ø10; s=15 cm Ø14; s=10 cm Ø25; s=10 cm
PK2	150x150x50	C30/37 GK32 CEM-II-B-S 32,5 R	2 x je drei(10, 20) schräg verlegt	5 und 10	ohne Ø10; s=15 cm Ø14; s=10 cm Ø25; s=10 cm
PK3	150x150x30	C30/37 GK32 CEM-I 42,5 N	7 x (16) in verschied. Tiefen gerade verlegt	15	ohne Ø12; s=15 cm
PK4	150x150x50	C30/37 GK32 CEM-I 42,5 N	7 x (43 - Hüllrohre) in versch. Tiefen gerade verlegt	15	ohne Ø12; s=15 cm
PK5	150x150x50	C30/37 GK16 CEM-I 42,5 N	3 x (8, 16, 28) schräg verlegt	15	ohne Ø12; s=15 cm
PK6	150x150x50	C30/37 GK16 CEM-III 32,5 N-LH/NA	3 x (8, 16, 28) schräg verlegt	15	ohne Ø12; s=15 cm

Durch das Aufzeichnen von Messlinien zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Betonalter) kann der Einfluss der Hydratation des Betons auf die subjektive Detektionstiefe metallischer Reflektoren erfasst werden. Verschiedene Überdeckungen der Stäbe wurden durch einen schrägen Einbau erzielt, wobei die Tiefenlage eines Reflektors im Testkörper auf Grundlage der zwei bekannten Tiefenlagen an den Seiten des Testkörpers ermittelt wurde. Infolge des Einbaus dreier Mattenbewehrungen, die sich in Abstand und Durchmesser der Stäbe unterscheiden, sowie einem unbewehrten Bereich ist der Einfluss unterschiedlicher Bewehrungsgrade bestimmbar. Auch die baupraktische Fragestellung des Einflusses unterschiedlicher Reflektordurchmessers sowie ihrer Abstände zueinander auf die Detektionstiefe wurde durch Variation dieser Parameter in den erstellten Testkörpern berücksichtigt. Zu guter Letzt wurden verschiedene Zemente verwendet, um den Einfluss unterschiedlicher Hydratationsgeschwindigkeiten auf die Entwicklung der Detektionstiefe zu bestimmen.

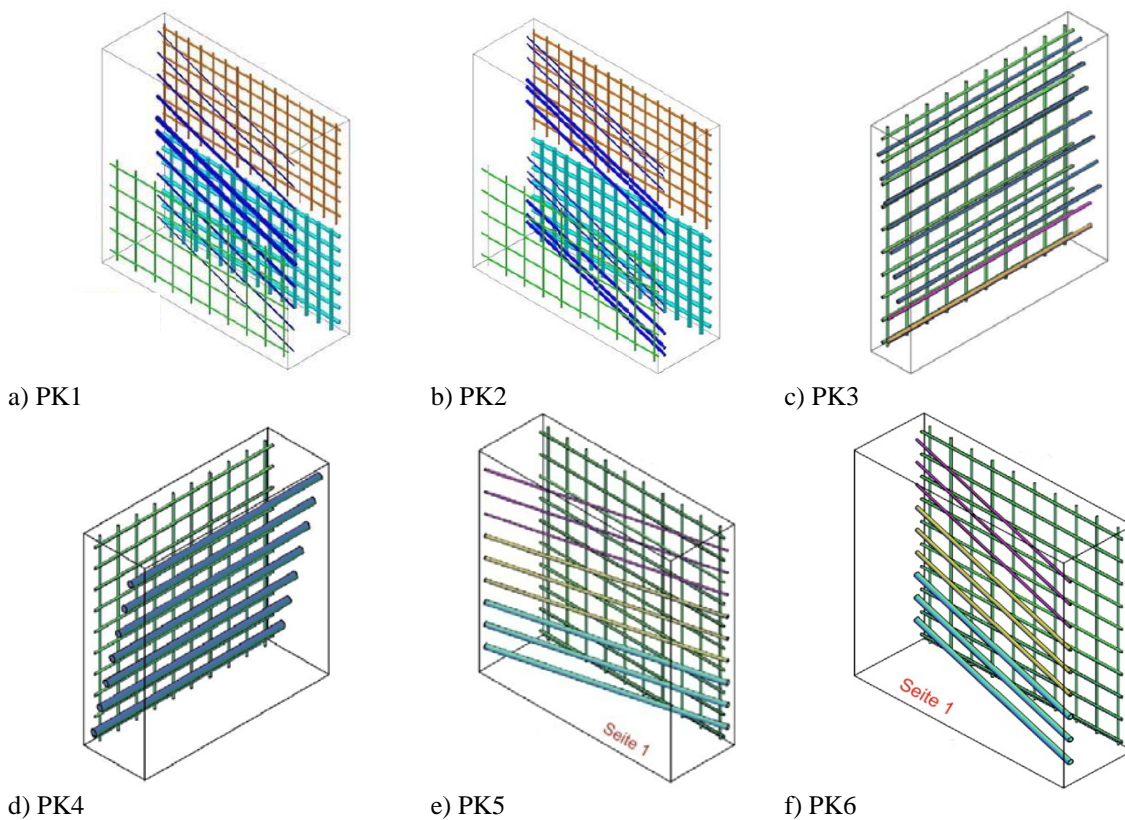


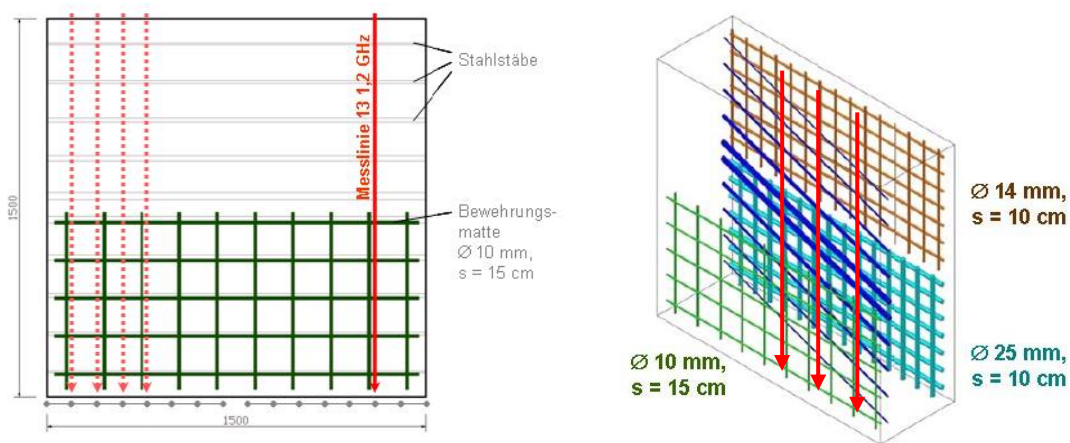
Abbildung 1 Darstellung der konzipierten Testkörper PK1 - PK6

An diesen Testkörpern sind mit einem Radarprüfsystem und drei Antennen (1,2 GHz; 1,6 GHz; 2,3 GHz) Messlinien zu vorher festgelegten Zeitpunkten aufgezeichnet worden, um den Einfluss des Betonalters zu bestimmen. Die Aufzeichnung der Messlinien erfolgte in vertikaler Richtung auf beiden Testkörperseiten in einem Abstand von 10 cm, um die Auswirkung unterschiedlicher Überdeckungen, Bewehrungsgrade sowie Reflektordurchmesser und -abstände auf die subjektive Detektionstiefe ermitteln zu können. Das Prinzip der Messdatenaufzeichnung und die Anordnung der Messlinien zu den Reflektoren sowie der oberflächennahen Bewehrung zeigt Abbildung 2.

Die so aufgezeichneten Messdaten wurden anschließend in vorher festgelegten Aufbereitungsschritten bearbeitet, um die Aussagekraft der Rohdaten zu verbessern. Folgende Prozesse wurden hierbei vorgenommen [4]:

- Verkürzen des Zeitfensters durch **Abschneiden** der Daten etwa 1 ns hinter der zu erwartenden Rückwand

- Korrektur der Außerzmittigkeit des Zeitsignals mit **DC-Shift** (Alternativ: Dewow-Filter)
- Filterung mit **Bandpass**
- Glättung der Laufzeitkurve durch Mittelung mehrerer Einzelmessungen **Running Average**
- Entfernen von antennenspezifischen Störsignalen durch **Background-Removal**
- Festlegung des Startpunktes der Laufzeitmessung durch eine **Ersteinsatzbestimmung**
- Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses und Wandlung der Reflexionshyperbeln in punktförmige Reflektoren durch **Migration**
- tiefenabhängige **Signalverstärkung**



a) Ansicht

b) räumliche Darstellung

Abbildung 2 Anordnung der Messspuren auf den Testkörpern

Die dadurch erzielte Verbesserung der Ergebnisqualität ist in Abbildung 3 veranschaulicht.

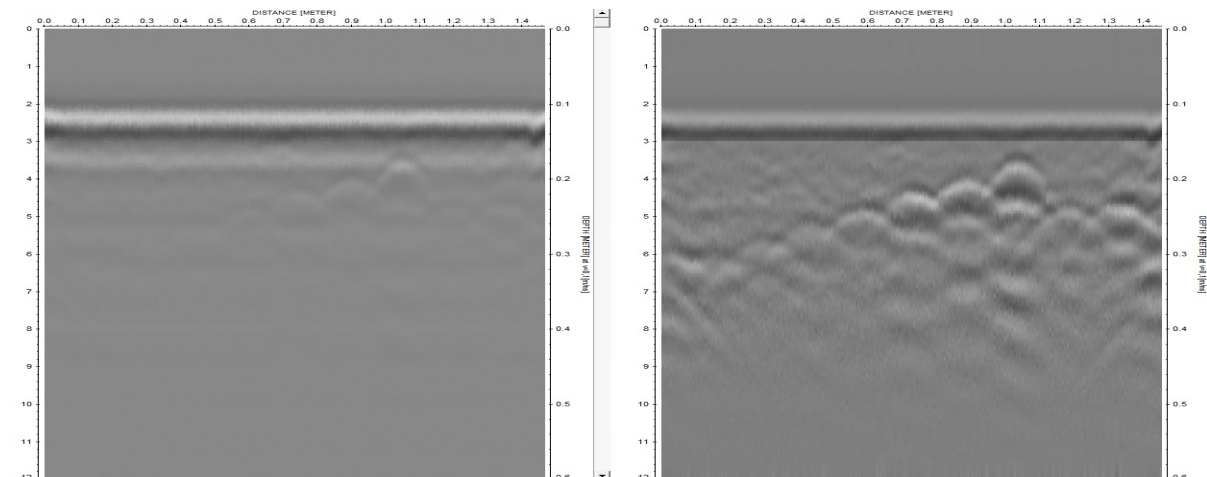


Abbildung 3 Vergleich zwischen den Rohdaten und den prozessierten Daten

An den bearbeiteten Messdaten wurden nun die Detektionstiefen subjektiv ermittelt. Diese Ergebnisse sind in Kapitel 3 dargestellt.

3 Ermittlung der Detektionstiefen

Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, in Abhängigkeit des Betonalters, der Reflektordurchmesser und -abstände, der Rezeptur und des Grades der oberflächennahen Bewehrung die Tiefe zu bestimmen, in der ein metallischer Reflektor von einem Prüfer noch visuell detektiert werden kann. Die Ermittlung der Detektionstiefe, d.h. bis zu welcher Tiefe ein Bewehrungsstab gerade noch erkennbar ist, erfolgte anhand der aufgezeichneten und bearbeiteten Radargramme (B-Bilder). Diese Art der Tiefenermittlung ist zu einem gewissen Grad subjektiv, ist aber im Anbetracht der Streuung der ermittelten Detektionstiefen hinnehmbar. Die auf diese Weise bestimmten Werte wurden über dem Betonalter in Abhängigkeit der Antennenfrequenz aufgetragen.

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen an den Testkörpern PK1, PK5 und PK6 über einen Zeitraum von etwa 20 Monaten dargestellt. Die aus den Daten berechneten Regressionskurven entsprechen hierbei einem logarithmischen Polynom.

Es gilt zu beachten, dass in dieser Abbildung nur der Einfluss des Betonalters, des Zements und der Antennenmittelfrequenz dargestellt ist. Um sowohl die Auswirkung der Änderung der oberflächennahen Bewehrung als auch des Stabdurchmessers und der Stababstände auf die subjektiv ermittelte Detektionstiefe zu erfassen, sind weitergehende Auswertungen als die hier dargestellten in Arbeit. Besonders beim Vorhandensein oberflächennaher Bewehrung versagt die hier verwendete visuelle Bestimmung der Detektionstiefen aus Radargrammen, weil das Vorhandensein eines Bewehrungsstabs vom Prüfer nicht mehr zweifelsfrei erkannt werden kann. Bei oberflächennaher Bewehrung hat sich die Anwendung der Methode der POD (Probability of Detection) bewährt. In [8] werden zuverlässige Detektionstiefen über den Kennwert $a_{90/95}$ (Detektionswahrscheinlichkeit 90% in 95 von 100 Fällen) angegeben. Darüber hinaus werden Detektionstiefen für eine oberflächennahe Mattenbewehrung ermittelt, die etwa 30% geringer sind.

Die Wahl drei verschiedener Zementsorten ist sicherlich nicht erschöpfend für die große Bandbreite heute verwendeter Betonsorten. Jedoch ist aus der Grafik gut ablesbar, welche Größenordnung der erzielbaren Detektionstiefen angenommen werden kann und welche Streuungen zu erwarten sind.

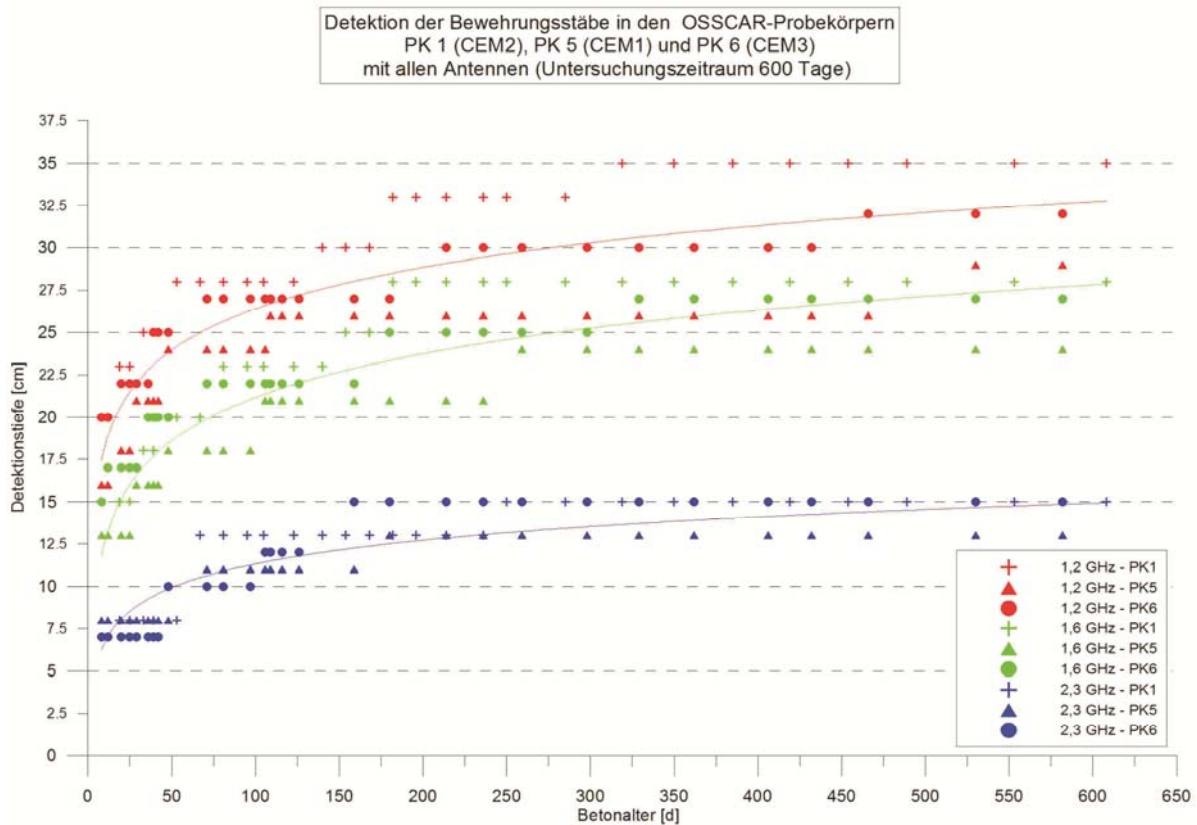


Abbildung 4 Entwicklung der aus Radargrammen visuell ermittelten Detektionstiefen von Bewehrungsstäben in Abhängigkeit des Betonalters, der Antennenmittenfrequenz und der Zementart

Für baupraktische Anwendungen des Radarverfahrens lassen sich aus Abbildung 4 folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die drei Antennen der Frequenzen 1,2 GHz, 1,6 GHz und 2,3 GHz weisen erwartungsgemäß mit zunehmendem Betonalter zunehmende Eindringtiefen auf.
- Die Detektionstiefe der 2,3 GHz-Antenne ist somit erwartungsgemäß am geringsten und liegt deutlich unterhalb der beiden übrigen Antennen. Überschneidungen treten nur bei der 1,2-GHz- und der 1,6-GHz-Antenne auf, was primär auf Streuungen der verschiedenen Zemente bzw. Betonsorten zurückzuführen ist.
- Bei einem Betonalter von etwa einer Woche werden im Mittel folgende Detektionstiefen erreicht: (Abweichungen infolge Zementart bzw. Betonsorte)
 - 2,3 GHz: 7,5 cm (± 1 cm)
 - 1,6 GHz: 15 cm ($\pm 2,5$ cm)
 - 1,2 GHz: 20 cm ($\pm 2,5$ cm)
- Bei einem Betonalter von etwa einem Jahr werden im Mittel folgende Detektionstiefen erreicht: (Abweichungen infolge Zementart bzw. Betonsorte)
 - 2,3 GHz: 13,75 cm ($\pm 1,25$ cm)
 - 1,6 GHz: 25 cm ($\pm 2,5$ cm)
 - 1,2 GHz: 30 cm (± 5 cm)
- Die Zunahme der Detektionstiefe beträgt für die 1,2-GHz- und die 1,6-GHz-Antenne jeweils gut 10 cm und für die 2,3-GHz-Antenne etwa 7,5 cm. Im zweiten Jahr ist die Zunahme der Detektionstiefe nur noch weniger als halb so groß und spielt im Vergleich der Streuung infolge Zementart bzw. Betonsorte nur noch eine untergeordnete Rolle.

- Infolge dessen ist es möglich, für jede Antennenfrequenz einen Bereich festzulegen, in dem diese bevorzugt eingesetzt werden kann. Folgende Anwendungsbereiche werden deshalb auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen ab einem Betonalter von 14 Tagen und unter Verwendung des gleichen Radarsystems empfohlen:
 - 1,2 GHz: 20 cm bis 30 cm
 - 1,6 GHz: 15 cm bis 25 cm
 - 2,3 GHz: 5 cm bis 12 cm

4 Referenzen

- [1] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag, Berlin (2008), Dissertation
- [2] Kind, T. und C. Maierhofer: Das Impulsradarverfahren - ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufklärung in Bauwerken, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.3, S. 333-341
- [3] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, DGZfP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin (2008)
- [4] Gil, M.: Weiterentwicklung der Verarbeitung von automatisiert aufgenommenen Georardardaten an Stahlbetonbauwerke, TU Berlin (2011), Diplomarbeit
- [5] Streicher, D., Taffe, A. und Ch. Boller: Quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Radar an Stahl- und Spannbetonbauteilen, in: Berichtsband der DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt, 10.-12. Mai 2010, BB 122-CD, Vortrag Mo.3.B.1
- [6] Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben „Brückenscanner – Automatisierte zerstörungsfreie in-situ-Untersuchungen von Brücken (OSSCAR – OnSite SCAnneR)“, 2011 (unveröffentlicht)
- [7] Taffe, A., Kind, T., Kurz, J.-H. und M. Stoppel: Bauwerksscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen, Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011) 4, Ernst & Sohn, S. 267-276
- [8] Feistkorn, S.: Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradars, TU Berlin (2011), Dissertation