

Quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Radar an Stahl- und Spannbetonbauteilen

Doreen STREICHER*, Alexander TAFFE**, Christian BOLLER*

* Universität des Saarlandes
(66123 Saarbrücken, Doreen.Streicher@bam.de)

** BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
(12200 Berlin, Alexander.Taffe@bam.de)

Kurzfassung. Die Kenntnis der Leistungsfähigkeit von zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) ist eine wichtige Grundlage für deren zunehmende Akzeptanz in der Baupraxis. Insbesondere bei Radar wird von Anwendern immer wieder nachgefragt, bis in welche Tiefe, bei welchem Betonalter und mit welcher Antennenfrequenz schlaffe Bewehrung zuverlässig geortet werden kann. Die Frage nach der Eindringtiefe in Bezug zum Betonalter ist insofern von Bedeutung, dass eine erfolgreiche Anwendung an Bestandsbauwerken an vergleichbaren Bauteilen aus jungem Beton misslingen kann, wenn die Anwendungsgrenzen von Radar an jungem Beton nicht richtig eingeschätzt werden. Da in realen Bauteilen der Bewehrungsgehalt stark differiert, ist für den Anwender auch von Interesse, wie sich die Zuverlässigkeit des Verfahrens mit zunehmender Verlegedichte der oberflächennahen Bewehrung ändert.

In diesem Beitrag werden systematische Untersuchungen an Stahlbetonbauteilen mit Bewehrungsstäben in variierender Verlegetiefe bei zunehmendem Betonalter und zunehmender Verlegedichte der oberflächennahen Bewehrung vorgestellt. Die Untersuchungen erfolgten unter Verwendung von Radarantennen mit Signalmittelfrequenzen von 1,2 GHz-, 1,6 GHz- und 2,3 GHz. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r wird bezüglich ihrer Streuung im Bauteil quantifiziert. Daraus ergeben sich ebenso Kenntnisse über die Streuung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, die beim Einsatz von Migrationsalgorithmen von großer Bedeutung sind.

Die Ergebnisse zum Eindringverhalten von Radar werden dem Anwender quantitativ in Abhängigkeit vom Betonalter und der Signalmittelfrequenz der Radarantennen zur Verfügung gestellt. In tabellarischer Form bieten die Ergebnisse so eine wichtige Orientierungshilfe für Untersuchungen an neu errichteten Stahl- und Spannbetonbauteilen und können als Ergänzung des DGZfP-Merkblatts B10 dienen.

1. Einführung

Eine Hauptprüfaufgabe von Radar im Bauwesen ist es, Bewehrungselemente, wie Spannglieder und Anker, oder auch Hohlräume in Stahl- bzw. Spannbetonbauteilen zu orten [1]. Die Nachfrage nach Radar und anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wird im Rahmen der Qualitätssicherung steigen, unter anderem, wenn die Einhaltung von Maßtoleranzen am Bauwerk nachzuweisen ist. Bei der Verlegung von Spanngliedern beispielsweise dürfen nach [2] die Maßabweichungen in Richtung der Bauteilhöhe i.d.R. ± 5 mm nicht

überschreiten. In Richtung Bauteilbreite beträgt die maximal zulässige Maßabweichungen ± 10 mm. Voraussetzung für die Anwendung der Prüfverfahren ist es, dass sie die von den Auftraggebern geforderten Nachweisgrenzen auch bei den jeweils vorherrschenden Prüfbedingungen erfüllen.

Für die Nachrechnung der Tragfähigkeit von Bauwerken hingegen ist es erforderlich, möglichst umfassend und zuverlässig die Geometrie der Bauteile und die im Bauteil verlegten Bewehrungselemente bezüglich ihrer Lage in der Ebene (z.B. x-y-Ebene), ihrer Verlegetiefe z und ihres Durchmessers d zu kennen. Wie Abbildung 1 zeigt, können die Baukonstruktionen sehr komplex sein und Radar wie auch andere Einzelverfahren stoßen dann an verfahrensbedingte Nachweisgrenzen. Durch Automatisierung und die Kombination mehrerer Prüfverfahren können komplexere Prüfaufgaben gelöst werden. Radar wird dazu als grundlegendes Verfahren herangezogen [3,4].

Flächige Anwendungen von Radar und Ultraschallecho haben gezeigt, dass sich die Ergebnisse beider Verfahren komplementieren und die Ergebniszuverlässigkeit im Gesamten dadurch gesteigert wird. Für die Visualisierung und eine einfachere Ergebnisinterpretation wurden bzw. werden die in 3D-Datensätzen vorliegenden Daten zunächst getrennt voneinander rekonstruiert und anschließend fusioniert. Das Ergebnis der Fusionierung wird dabei stark von der Präzision und Richtigkeit der Einzelergebnisse bestimmt. Der Fusionserfolg wird größer werden, wenn die Nachweisgrenzen der Verfahren besser bekannt sind und vor allem die verfahrensspezifischen Einflüsse und die daraus resultierenden Unsicherheitsbeiträge über den gesamten Prozess von der Datenaufnahme bis zur Dateninterpretation erörtert und erfasst werden. In diesem Beitrag werden zu diesem Zweck durchgeführte systematische Untersuchungen mit Radar und deren Ergebnisse vorgestellt sowie erste Ansätze zur Messunsicherheitsbetrachtung nach GUM [5] aufgezeigt.



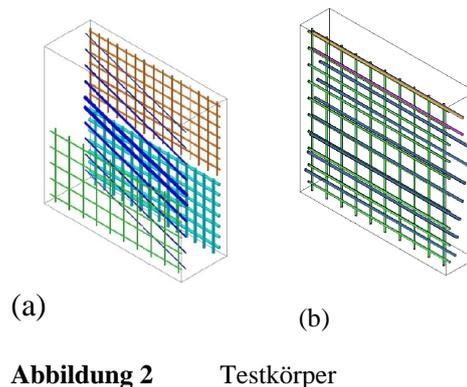
Abbildung 1 Bewehrungselemente in einem Brückenüberbau

2. Systematische Untersuchungen

Wie bei anderen Prüfverfahren werden die Nachweisgrenzen und die auf die Messgröße einwirkenden Einflussgrößen bei Radar durch das Messsystem, das Messobjekt, die Umgebungsbedingungen, die Datenaufbereitung und die Prüfaufgabe mitbestimmt. Als Prüfaufgaben stehen im Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen die **Ortung bzw. Detektion von Bewehrungselementen** und die **Bestimmung der Betondeckung** über sicher detektierten Bewehrungselementen. Es werden die Einflüsse durch das Alter des Betons und der Bewehrungsdichte betrachtet. Die Messungen dazu erfolgten mit dem CX-Radarsystem der Fa. MALA. Zum Einsatz kamen Radarantennen mit Signalmittelfrequenzen von 2,3, 1,6 und 1,2 GHz. Die Aufbereitung und Auswertung der Daten erfolgte mit der REFLEXW-Software von K. J. Sandmeier.

Für die systematischen Untersuchungen wurden bisher vier Testkörper verwendet. Zwei von ihnen sind in der Abbildung 2 dargestellt. Sie wurden unter Verwendung von Normalbeton der Festigkeitsklasse C 30/37 mit einer Gesteinskörnung bis zu 32 mm-Größtkorn hergestellt. Die Prüfflächen der Testkörper sind 1,50 m x 1,50 m groß, die Dicken betragen 0,50 bzw. 0,30 m.

Charakteristisches Unterscheidungsmerkmal der Testkörper sind die eingebrachten Bewehrungselemente. So gibt es mehrere Bereiche, in denen oberflächennah, in ca. 3 – 5 cm Tiefe Bewehrungsmatten mit unterschiedlichen Stabdurchmessern und -abständen verlegt sind. Im Inneren der Testkörper sind Einzelstahlstäbe angeordnet. Sie unterscheiden sich in ihrer Tiefe zur Oberfläche, ihrem Durchmesser und ihrer Lage zueinander. In zwei Testkörpern sind die Einzelstahlstäbe, wie in Abbildung 2a abgebildet, schräg zu den Messoberflächen verlegt.



3. Einfluss des Betonalters

Beton wird aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser, ggf. Zusatzstoffen und Zusatzmitteln zusammengesetzt. Im Betonausgangsgemisch ist ein Verhältnis von Wasser zu Zement um 0,5 üblich und ein Wasseranteil von 175 kg/m^3 in der Mischung keine Seltenheit. Unmittelbar nach dem Mischen der Ausgangsstoffe beginnt der Hydratationsprozess, wobei Calciumsilikate des Zementes Wasser binden und Calciumsilikathydrate gebildet werden. Damit ändert sich die Gefügestruktur, die Festigkeit des Betons steigt und der Feuchtigkeitshaushalt ändert sich beträchtlich. Nach [6] sind bereits bei 28 Tagen altem Portlandzementstein rd. 14 – 19 M.-% Wasser (bez. auf den Zement) gebunden. Bei vollständiger Hydratation können theoretisch rd. 25 M.-% nicht verdampfbares und rd. 15 M.-% verdampfbares Wasser gebunden werden. Die vollständige Hydratation allerdings kann einige Jahre dauern.

Durch die Bindung des Wassers ändern sich die dielektrischen Eigenschaften [7]. Die Dielektrizitätszahl des Betons nimmt ab. Die Radarimpulsweite wird nicht mehr so stark gedämpft und kann im fortgeschrittenen Betonalter tiefer und schneller in das Material eindringen. Für die quantitative Ermittlung der Einflussnahme des Betonalters auf den Messerfolg mit Radar wurden Radarmessspuren senkrecht zu den Einzelstahlstäben zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Betonage aufgenommen. Die nachfolgenden Ergebnisse basieren auf der Auswertung von Radargrammen nach Nullpunktkorrektur, teilweiser Filterung und Tiefenverstärkung der Rohdaten.

3.1 Einfluss auf die Detektionstiefe

Bereits bei den ersten Messungen im Betonalter von acht Tagen werden die Stäbe der oberflächennahen Maschenbewehrung deutlich abgebildet. Die Reflexionshyperbeln der Einzelstäbe bilden sich erst mit zunehmendem Alter des Betons ab.

Erscheint ein Einzelstab als Reflektor im Radargramm lässt sich die maximale Detektionstiefe anhand der für den Stab bekannten Betondeckung nennen. Auf diese Weise wurden für alle vier Testkörper in den Bereichen ohne Maschenbewehrung die Detektionstiefen für die MALA-Radarantennen ermittelt. Die Ergebnisse sind graphisch in Abbildung 3 dargestellt.

Die Detektionstiefe wird maßgeblich von der Signalmittenfrequenz der Radarantenne bestimmt. Mit der 2,3 GHz-Antenne wird nach einem Jahr eine maximale Detektionstiefe von 17,5 cm erreicht, mit der 1,2 GHz-Antenne die doppelt so große Tiefe von 35 cm. Der Festigkeitsentwicklung im Beton [6] ähnlich, nimmt in den ersten vier Monaten nach Betonage die Detektionstiefe deutlich zu. Nach diesem Zeitpunkt ist immer noch ein geringer Anstieg zu erkennen.

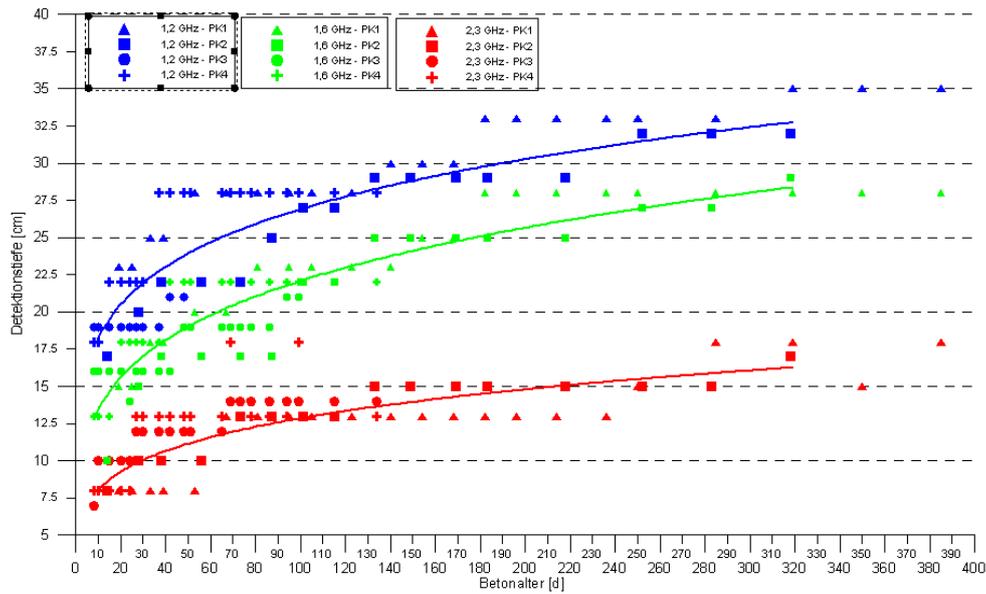
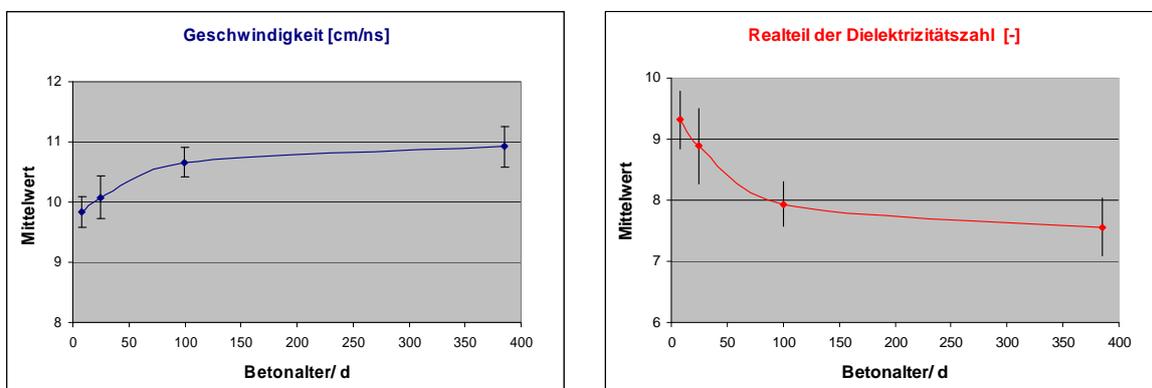


Abbildung 3 Abhängigkeit der Detektionstiefe [cm] vom Betonalter [Tage] für die vier Testkörper PK1 – PK4, Mittenfrequenzen der drei verwendeten Radarantennen: 1,2 GHz (blau), 1,6 GHz (grün) und 2,3 GHz (rot)

3.2 Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften

Die Bindung des Wassers während der Hydratation führt gleichfalls dazu, dass sich die Laufzeit des Radarimpulses im Beton verkürzt. Zum experimentellen Nachweis wurden an ausgewählten Kreuzungspunkten von Radarmessspuren und eindeutig detektierten Einzelstäben die Laufzeit, als Zeitdifferenz zwischen den ersten Extremwerten des Reflektor- und des ersten Empfangsimpulses, ermittelt. Im Zeitraum von 25 – 385 Tagen nach der Betonage beträgt die Abnahme bei den, mit der 1,2 GHz und der 1,6 GHz-Antenne ermittelten Laufzeiten meist weniger als 0,2 ns (etwa 6-8 %).

Über die für die Einzelstäbe bekannte Betondeckung wurde unter Berücksichtigung des Sender-Empfänger-Abstandes der Radarantennen die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in den Testkörpern c_{Beton} sowie der Realteil der Dielektrizitätszahl ϵ_r ermittelt. Die in der Abbildung 4 dargestellten Mittelwerte für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und der Dielektrizitätszahl beruhen auf den Ergebnissen von 34 Referenzpunkten.



(a) (b) **Abbildung 4** Darstellung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c und der Dielektrizitätszahl ϵ_r über dem Betonalter, Mittelwertdarstellung mit Standardabweichung für die vier Testkörper

Im Betonalter von 385 Tagen wurde gegenüber dem 8-Tage-Alter eine absolute Steigerung der Geschwindigkeit von 1,1 cm/ns ermittelt. Die prozentuale Zunahme bezogen auf den 8-Tage-Ausgangswert beträgt 11 % und liegt somit deutlich über den Streuungen von 2–3 %, die sich zu den unterschiedlichen Zeitpunkten ergeben. Die Dielektrizitätszahl nimmt infolge um 18 % ab (von 9,3 auf 7,6), wobei die Streuungen zu den jeweiligen Zeitpunkten 5 – 7 % betragen. Zum Vergleich: in [8] werden für „feuchte“ Betone relative Dielektrizitätszahlen ϵ_r von 8-14 und für „trockene“ Betone von 4-7 genannt.

4. Einfluss der oberflächennahen Bewehrung

Die Ortung von Bewehrungselementen sowie die Bestimmung ihrer Betondeckung mit Radar werden maßgebend auch durch die oberflächennahe Bewehrung beeinflusst. Bei zu großer Bewehrungsdichte schattet sie dahinter liegende Bewehrungselemente, wie die Einzelstäbe in den Testkörpern, ab. Untersuchungen mit Radarantennen der Fa. GSSI werden hierzu in [1] vorgestellt.

Für die Untersuchungen mit den Antennen der Fa. MALA stehen an den vier Testkörpern insgesamt vier verschieden stark bewehrte oberflächennahe Bereiche zur Verfügung: Maschenbewehrung mit (a) Stabdurchmesser 10 mm, Stababstand 15 cm; (b) Stabdurchmesser 12 mm, Stababstand 15 cm; (c) Stabdurchmesser 14 mm, Stababstand 10 cm, (d) Stabdurchmesser 25 mm, Stababstand 10 cm. Nach den bisher vorliegenden Auswertungen lassen sich in den Fällen (a) und (b) einzelne Bewehrungsstäbe im Inneren der Testkörper detektieren. Die Interpretation wird aber, wie Abbildung 5 zeigt, deutlich erschwert.

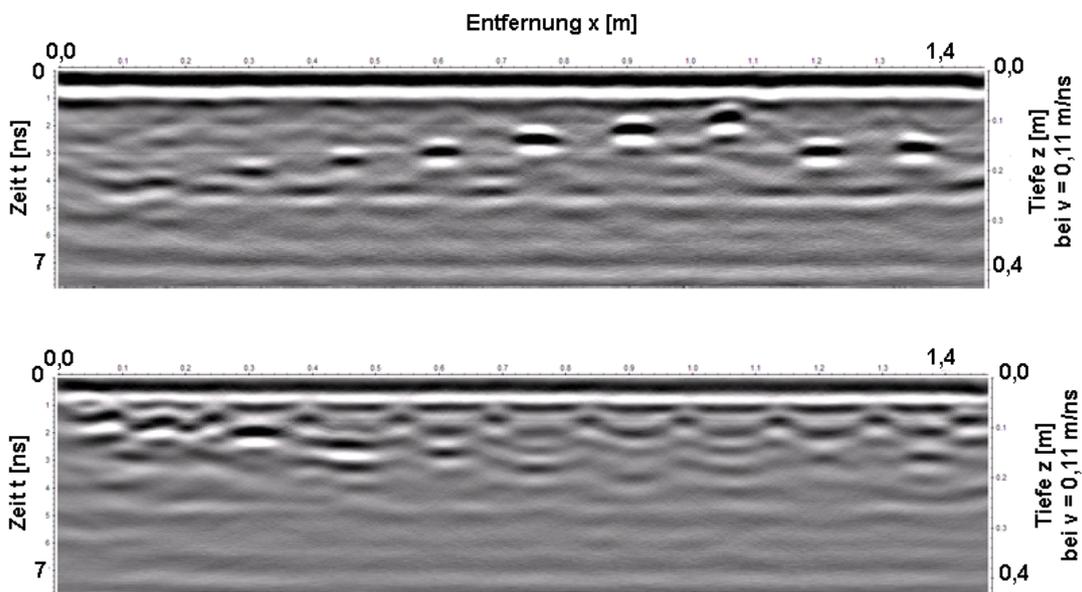


Abbildung 5 Radargramme eines Testkörpers mit 9 Bewehrungsstäben (Durchmesser 16 mm, Abstand zueinander 15 cm), Migrationsdaten; oben – aufgenommen von der Prüfseite ohne oberflächennahe Maschenbewehrung, unten – aufgenommen von der Prüfseite mit oberflächennaher Maschenbewehrung (Durchmesser 12 mm, Abstand 15 cm, Betondeckung bei 5 cm)

Das obere Radarogramm wurde mit der 1,2 GHz-Antenne in einem Bereich ohne Maschenbewehrung aufgenommen (Testkörper in Abbildung 2a). Neun Einzelstäbe und die Rückseite sind erkennbar. Das untere Radarogramm ist das Ergebnis der Radarmessungen

auf der gegenüberliegenden Seite des Testkörpers mit oberflächennaher Maschenbewehrung (Stabdurchmesser 12 mm, Stababstand 15 cm). Die Lage der Stäbe der Maschenbewehrung lässt sich zuverlässig bestimmen, die Einzelstahlstäbe im Testkörperinneren und die Rückwand werden im Vergleich zum oberen Radargramm deutlich schlechter abgebildet. Die Messdaten in beiden Bereichen wurden gleich prozessiert.

5. Messunsicherheit nach GUM

Das Betonalter, die Signalmittenfrequenzen der Radarantennen und das Vorhandensein oberflächennaher Bewehrung sind nur drei Einflussgrößen, die für die Untersuchungen mit Radar von Bedeutung sind. In [9] werden weitere für die Ortung von Bewehrungselementen relevante Einflussgrößen genannt und die POD-Methodik zur objektiven Abschätzung der Detektionswahrscheinlichkeit vorgestellt.

Die Ergebnisse bei der Bestimmung der Betondeckung werden in diesem Beitrag nach dem Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen [5] beurteilt. Der als „GUM“ bezeichnete, sehr allgemein formulierte Leitfaden hat in Deutschland derzeit den Status einer Vornorm (DIN V ENV 13005). Dass die darin beschriebene Vorgehensweise gut an Prüfaufgaben im Bauwesen angewendet werden kann, wird in [10] für die Verfahren Ultraschallecho und Low-Strain gezeigt. Nach GUM wird der gesamte Messprozess und alle darauf wirkenden Einflussgrößen betrachtet und man erhält ein statistisch bewertetes Ergebnis.

Bei der Bestimmung der Betondeckung mit Radar beinhaltet das Ergebnis die Betondeckung d_i und die kombinierte Standardunsicherheit u_c : $d_i \pm u_c$.

Die Betondeckung d_i wird nicht direkt gemessen, sondern aus der Laufzeit des Radarimpulses t an der Stelle i und der für den Laufweg charakteristischen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v berechnet. Der mathematische Zusammenhang kann durch die allgemeine Modellgleichung (1) nach [10] beschrieben werden.

$$d_i = f(v, t) = (v_{\text{Beton}} + \delta v_{\text{Beton}}) / 2 \cdot (t_i + \sum_{j=1}^n \Delta t_j + \sum_{k=1}^m \delta t_k) \quad (1)$$

d_i – Betondeckung in cm
 v_{Beton} – mittlere Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in cm/ns
 t – Laufzeit in ns

In der allgemeinen Modellgleichung werden die auf den Prozess einwirkenden Einflussgrößen in Form von systematischen Abweichungen Δt_j und zufälligen Abweichungen δt_k berücksichtigt. Sie sind zu identifizieren und zu quantifizieren. Hierzu gehören der Einfluss durch die Signalmittenfrequenz der Radarantenne, die Vorlaufzeit der Impulswelle, der Abstand von Sender und Empfänger bei der Radarantenne, die Reflektortiefe, die dielektrischen Eigenschaften der Materialien, die Auflösung der Zeitachse, gerätespezifische Störeinflüsse. Die kombinierte Standardunsicherheit u_c drückt die Gesamtmessunsicherheit aus. Für die Betondeckung berechnet sich die Standardunsicherheit aus den Unsicherheitsbeiträgen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit $u(v_{\text{Beton}})$ und der Laufzeitmessung $u(t_j)$ nach den Gleichungen (2) und (3). Die Unsicherheitsbeiträge selbst basieren auf der statistischen Analyse von Beobachtungsreihen bzw. auf detaillierten Kenntnissen nicht statistischer Art. Die Korrelationen der Einflüsse untereinander werden bei der Berechnung der Gesamtunsicherheit mit Hilfe des Korrelationskoeffizienten r gewichtet.

$$u_c = \sqrt{u_c(d_i)^2} \quad (2)$$

$$u_c(d_i)^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial v_{\text{Beton}}} \right)^2 \cdot u(v_{\text{Beton}})^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial t_j} \right)^2 \cdot u(t_j)^2 + 2 \cdot \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial t_j} \cdot \frac{\partial f}{\partial v_{\text{Beton}}} \cdot u(t_j) \cdot u(v_{\text{Beton}}) \cdot r(t_j, v_{\text{Beton}}) + 2 \cdot \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=j+1}^m \frac{\partial f}{\partial t_j} \frac{\partial f}{\partial t_k} \cdot u(t_j) \cdot u(t_k) \cdot r(t_j, t_k) \quad (3)$$

Wie sich die Betondeckung und ihre Standardunsicherheit ändern kann, wird in den folgenden Abschnitten 5.1 und 5.2 am Beispiel der Einflussgrößen Sender-Empfänger-Antennenabstand und Abstand der Antenne vom Prüfobjekt vorgestellt.

5.1 Messunsicherheit nach GUM – systematische Abweichungen durch Sender-Empfänger-Abstand und Antennen-Prüfobjekt-Abstand

Bei den verwendeten Antennen befinden sich Sender und Empfänger räumlich voneinander getrennt im Antennengehäuse. Ihr Abstand bei der 1,2 GHz-Antenne beträgt 76 mm. Bei der 2,3 GHz und der 1,6 GHz-Antenne sind Sender und Empfänger 40 mm voneinander getrennt. Allein durch die räumliche Trennung und den damit verbundenen Änderungen des Laufweges ist die Abweichung von der tatsächlichen Betondeckung bei oberflächennahen Streuern größer als bei Reflektoren in größerer Tiefe. Die Vorlaufzeit, die Wellenlänge und die Pulsbreite werden dabei in der Abbildung 6 nicht berücksichtigt. Sie sollen separat Beachtung finden.

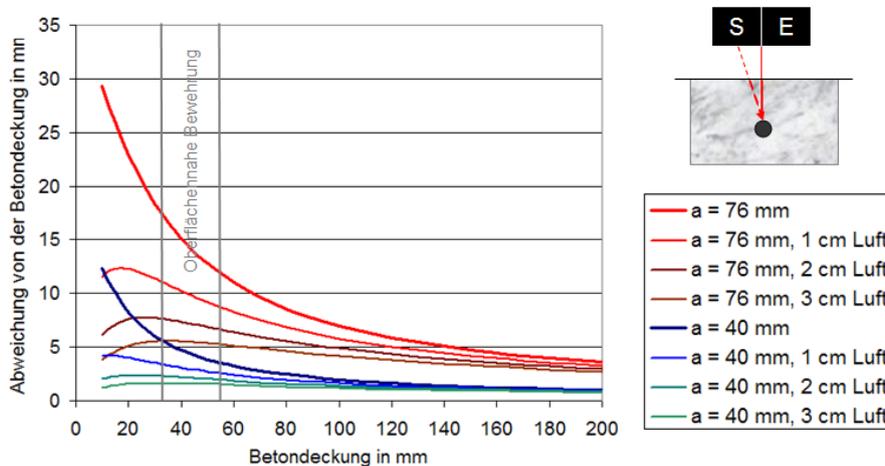


Abbildung 6 Abweichung des angenommenen Laufweges im Beton von der tatsächlichen Betondeckung bei zwei verschiedenen Sender-Empfänger-Abständen a und verschiedenen Abständen der Radarantenne zum Messobjekt

Nach der Darstellung unterscheiden sich die Abweichungen bei der 2,3 GHz-Antenne (a=40 mm) zum Beispiel bei den Betondeckungen von 50 mm und 170 mm um 2,9 mm, bei der 1,2 GHz-Antenne (a=76 mm) ergibt sich beim Vergleich der Betondeckungen 80 mm und 200 mm ein Unterschied von 5 mm. Das Verhältnis vom Laufweg im Beton (sehr vereinfacht angenommen) und der tatsächlichen Betondeckung ändert sich geometrisch, wenn bei automatisiert durchgeführten Radarmessungen die Antenne mit einem geringen Abstand von 1-2 cm über die Messfläche geführt wird. Die Abweichungen verringern sich

dabei deutlich. Die nichtlineare Abnahme der Abweichungen mit zunehmender Betondeckung bleibt dennoch erhalten. Diese Systematik kann einfach bei der Bestimmung der Betondeckung berücksichtigt werden. Bei der Rekonstruktion und der Fusion von Daten unterschiedlicher Verfahren muss sie beachtet werden, damit die Ergebnisqualität nicht verschlechtert wird.

5.2 Messunsicherheit nach GUM – Unsicherheitsermittlung durch Sender-Empfänger-Abstand und Antennen-Prüfobjekt-Abstand

Bei den folgenden Beispielrechnungen zur Gesamtunsicherheit ist die systematische Abweichung des Impulslaufweges von der tatsächlichen Betondeckung berücksichtigt. Dazu wurde bei der Berechnung der Laufzeit t_i der Winkel α einbezogen (s. Abbildung 7) und die Modellgleichung (1) im Abschnitt 5 entsprechend modifiziert. Der in den Beispielen in Abbildung 7 genannte Winkel α beträgt 45° . Er ergibt sich aus dem großzügig angenommenen Sender-Empfänger-Abstand von 100 mm und der Betondeckung von 50 mm.

In die Gleichungen (2) und (3), Abschnitt 5 fließen zur Berechnung der Gesamtunsicherheit die in der Abbildung 7 erwähnten Einflussgrößen für die Laufzeit ein. Als einzige Einflussgröße ändert sich in den gegenübergestellten Beispielen der Abstand der Antenne von der Prüfoberfläche. Im Beispiel in der Abbildung 7 rechts, liegt die Antenne auf. Im Beispiel links wird angenommen, dass die Antenne mit einem Abstand im Mittel von 10 mm über das Prüfobjekt bewegt wird und sich der Abstand während der Messungen um maximal ± 10 mm ändert. Gründe hierfür sind in der Oberflächenstruktur und der Anbringung der Antenne zu finden. Für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v_{Beton} werden die Ergebnisse aus Abschnitt 3 verwendet. Die Berechnung erfolgte mit dem GUM-Workbench-Programm der Fa. Metrodata.

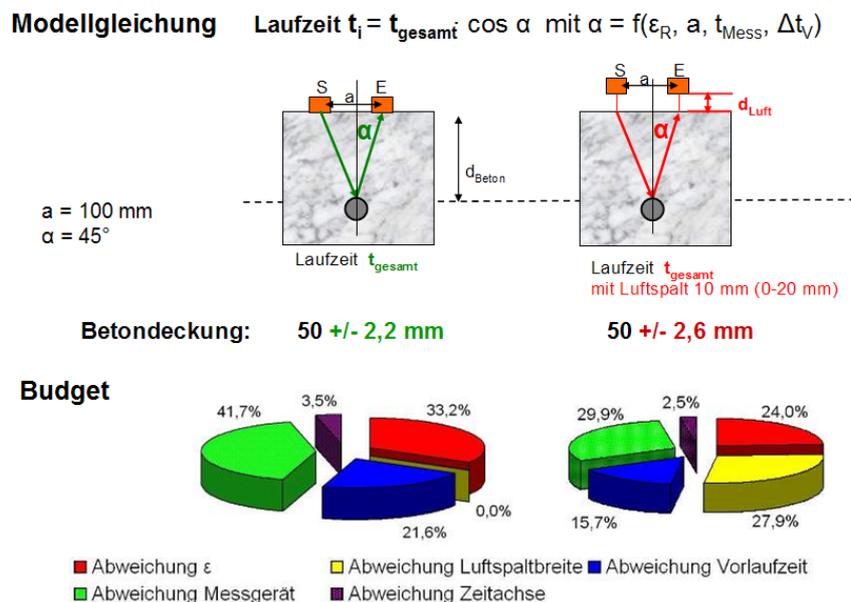


Abbildung 7 Modellgleichung, Messergebnis und Unsicherheits-Budget für die Modellbeispiele: Sender-Empfänger-Abstand 100 mm, Winkelabweichung 45° , Betondeckung 50 mm, Abstand der Antenne von der Betonoberfläche 0 bzw. 10 mm

Die Gesamtunsicherheiten für die beiden Beispiele unterscheiden sich um 0,4 mm. Das Vorhandensein und die Schwankungsbreite des Luftspaltes haben demnach nur einen sehr geringen Einfluss. Das dargestellte Unsicherheitsbudget zeigt, dass bei einer Schwankungsbreite des Luftspaltes von maximal ± 10 mm die Unsicherheitsbeiträge durch den Einfluss von Luftspalt, Messgerät und Dielektrizitätskonstante ϵ ähnlich groß sind.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Experimentell wurden die Einflüsse des Betonalters und der oberflächennahen Bewehrung auf den Messerfolg mit Radar untersucht. Die Ergebnisse ergänzen die Informationen des DGZfP-Merkblattes B10 [8]. Sie sollen den Anwendern des Radarverfahrens als praktische Orientierungshilfe bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit und der Anwendungsgrenzen des Verfahrens dienen.

Für die Bestimmung der Betondeckung mit Radar wurden Ansätze zur Messunsicherheitsbetrachtung nach GUM vorgestellt. Der Vorteil der Methode ist es, dass sich die Gesamtmessunsicherheit aus Unsicherheitsbeiträgen einzelner Einflussgrößen und der Korrelation zueinander zusammensetzt. Demzufolge kann die Gesamtmessunsicherheit bei sich ändernden Einflüssen neu berechnet werden. Voraussetzung ist, dass die auf die Bestimmung der Betondeckung wirkenden Einflüsse quantitativ erfasst werden und das Netz der einwirkenden Unsicherheitsbeiträge kontinuierlich verdichtet wird. In diesem Beitrag wurde aufgezeigt, dass sich die systematischen Abweichungen durch den Abstand zwischen Sender- und Empfängerantenne mit zunehmender Betondeckung nichtlinear ändert. Beispielrechnungen zur Gesamtunsicherheit haben gezeigt, dass der bei automatisiert durchgeführten Radarmessungen vorhandene Abstand zwischen Antenne und Prüfbjektiv die Gesamtunsicherheit des Ergebnisses nur sehr gering beeinflusst.

7. Danksagung

An den umfangreichen Messungen und Auswertungen waren die Studenten Anne Dobat, Norman Diersch, Magdalena Gil und Alexander Schubert maßgeblich beteiligt. Ihnen gilt an dieser Stelle ein besonderer Dank.

Referenzen

- [1] Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., Kohl, C.: Strukturuntersuchung von Betonbauteilen mit Radar, Beitrag zu einem Sammelwerk: Verkehrsbauten - Flächentragwerke (Beton-Kalender 2007) 1 (2006) Kap. V / Abschnitt 5, 512-518; Ernst & Sohn
- [2] ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauwerke), Teil 3 Massivbau In: Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056, Stand: 07/06, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Verkehrsblatt-Verlag
- [3] Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C., Wöstmann, J und H. Wiggenhauser: Datenfusion komplementärer Impuls-Echo Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen, in: DACH-Jahrestagung, 17.-19. Mai 2004, Salzburg, A, Berlin: DGZfP BB-CD 89
- [4] Streicher, D., Kohl, Ch., Wiggenhauser, H. und A. Taffe, Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken , Beton- und Stahlbeton 101 (2006) 5, S. 330-342
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
- [6] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Teil 2 Beton Mauerwerk; Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1993
- [7] Van Beek, A.: Dielectric properties of young concrete, Non-destructive dielectric sensor for monitoring the strength development of young concrete, Dissertation TU Delft (NL), Delft University Press, 2000
- [8] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung: B 10, Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Fassung Februar 2008
- [9] Feistkorn, S. und A. Taffe: Anwendung von POD zum Nachweis der Güte zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen, in: DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt, P 4, Berlin: DGZfP
- [10] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag Berlin, Diss. RWTH Aachen 2008