

Radaranwendungen im Bauwesen

Christiane Maierhofer, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin

Zusammenfassung

Zerstörungsfreie Prüfverfahren haben in den letzten 10 Jahren im Bauwesen verstärkt an Bedeutung gewonnen. Ein wesentliches Verfahren ist dabei das Impulsradar, das auf Grund technischer Weiterentwicklungen mit verbessertem Auflösungsvermögen sowohl zur Strukturuntersuchung von Betonbauteilen und Mauerwerk als auch zur qualitativen und mit Einschränkungen auch zur quantitativen Bestimmung der Feuchtenverteilung eingesetzt werden kann. Das Radarverfahren hat daher ein sehr breites Anwendungsspektrum, das von der Qualitätssicherung während der Bauphase bis zur Bestandsanalyse historischer Gebäude reicht. Hierbei haben sich die schnelle und zerstörungsfreie Messdurchführung sowie die gute Dokumentierbarkeit der Messergebnisse als besonders positiv erwiesen.

Einleitung und Anwendungsgebiete

Das Radarverfahren, ursprünglich als Verfahren der Geophysik zur Erkundung des Untergrundes entwickelt, hat sich aufgrund von technischen Weiterentwicklungen innerhalb des letzten Jahrzehnts als sehr effektives Verfahren zur Untersuchung der inneren Struktur von Betonbauteilen und Mauerwerk erwiesen [Ref 1, Ref 2, Ref 3, Ref 4, Ref 5]. Hier ist es insbesondere zur Dickenmessung von nur einseitig zugänglichen Bauteilen (z. B. Sohlplatten, Kelleraußenwände), zur Ortung von Hohlstellen und Ablösungen und zur Aufklärung von Mehrschichtsystemen (z. B. Beschichtungen auf Beton, mehrschaliges Mauerwerk), zur Ortung von schlaffer und vorgespannter Bewehrung in Beton sowie zur Bestimmung der Feuchteverteilung vorwiegend in Mauerwerk geeignet. In vielen Fällen ist auch eine Kombination des Radarverfahrens mit anderen Verfahren sinnvoll, z. B. zur Untersuchung des inneren Zustands von Spannkämen [Ref 6]. Da die elektromagnetischen Wellen des Radars an dem metallischen Hüllrohr vollständig reflektiert werden, wird das Radar nur zur Ortung der Hüllrohre eingesetzt. Nähere Untersuchungen des Spannkamms erfolgen dann mit dem Ultraschallechoverfahren zur Ortung von Hohlstellen in Spannkämen sowie mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren zur Ortung von Spannstahlbrüchen. Das Radarverfahren beschleunigt dabei die Durchführung der Messungen, da die zu untersuchenden Spannkämme schnell und sicher geortet werden können [Ref 2].

Das Impulsradar kann daher sowohl im Rahmen der Qualitätssicherung bei Neubauten als auch zur Bewertung und Bestandsanalyse von bestehender Bausubstanz eingesetzt werden.

Im folgenden werden zunächst die physikalischen Grundlagen sowie die Funktionsweise des Radarverfahrens beschrieben. Diese Kenntnisse sind erforderlich, um die Anwendungsgrenzen, aber auch die optimalen Anwendungsmöglichkeiten zu verstehen. Anschließend

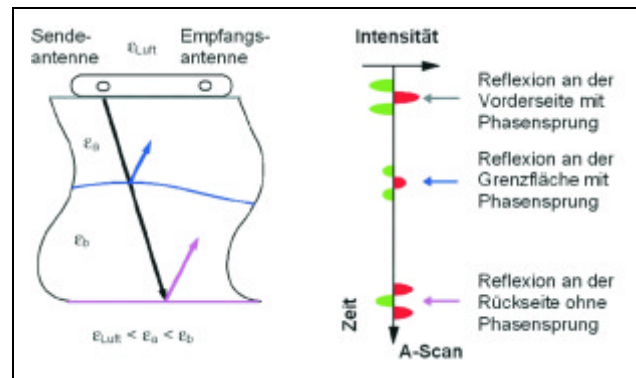


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Reflexion von Radarimpulsen an Oberfläche, Grenzfläche und Unterseite des Bauteils.

werden Anwendungsbeispiele zur Ortung von schlaffer und vorgespannter Bewehrung in Betonbauteilen, zur Qualitätssicherung im Straßenbau, zur Ortung von Hohlstellen in historischem Mauerwerk sowie zur Bestimmung der Feuchteverteilung in Mauerwerk vorgestellt.

Grundlagen des Impulsradars

Das Impulsradar basiert auf der Ausbreitung kurzer elektromagnetischer Impulse mit einer Dauer von weniger als 1 ns (1×10^{-9} s) im zu untersuchenden Bauteil. Diese Impulse werden wie in Abbildung 1 dargestellt an Inhomogenitäten im Material reflektiert (z. B. Oberfläche des Bauteils, Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien, metallische Bewehrung in Beton, Rückseite des Bauteils). Sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Impulse als auch die Intensität der Reflexionen hängen von den dielektrischen Eigenschaften der Materialien ab. Die dielektrischen Eigenschaften werden durch die komplexe Dielektrizitätszahl ϵ des Materials beschrieben:

Gl. 1

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$$

ϵ' : Realteil der komplexen Dielektrizitätszahl

ϵ'' : Imaginärteil der komplexen Dielektrizitätszahl

Für nahezu verlustfreie Materialien, d. h. für Materialien mit sehr kleiner elektrischer Leitfähigkeit, was für Beton und Mauerwerk in trockenem Zustand in den meisten Fällen zutrifft, ergibt sich zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Impulse und der Dielektrizitätszahl ϵ näherungsweise folgender einfacher Zusammenhang:

Gl. 2

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$$

v : Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse im Baustoff

c : Lichtgeschwindigkeit in Vakuum (3×10^9 m/s)

Material	ϵ
Luft	1
trockenes Mauerwerk	3-5
feuchtes Mauerwerk	5-26
trockener Beton	6-8
feuchter Beton	8-16
Asphalt	3-5
Granit	5-7
Basalt	8
PVC	3
Wasser	81
Eis	4-8

Tabelle 1: Dielektrizitätszahlen verschiedener Materialien bei einer Frequenz von 1 GHz

Sind die Dielektrizitätszahlen der entsprechenden Materialien bekannt, so lässt sich aus der Laufzeit die Tiefe der Reflektoren und damit deren Position ermitteln. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Dielektrizitätszahl durch die folgenden Parameter beeinflusst wird:

- Temperatur des Materials
- Feuchtegehalt des Materials
- Salzgehalt des Materials (nur gelöste Salze spielen eine Rolle)
- Porenstruktur
- Frequenz.

Tabelle 1 zeigt die Dielektrizitätszahlen verschiedener Materialien. Es wird deutlich, wie stark der Feuchtegehalt diese Werte beeinflussen kann. Aus diesem Grund sind Kalibrationsmessungen erforderlich, die häufig die Entnahme eines oder mehrerer Bohrkerne bedingen.

Die prinzipielle Funktionsweise des Impulsradars ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Messgerät besteht aus drei

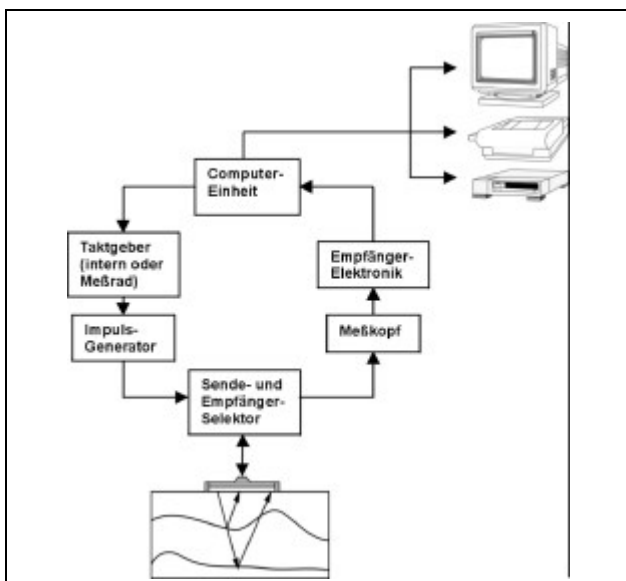


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau des Impulsradars

Einheiten: einem Hauptgerät mit Rechnermodul und Speicherelementen (Bandlaufgerät, Festplatte), einem Kontrollgerät mit Monitor sowie einem auswechselbaren Antennensystem, das über ein bis zu 30 m langes Kabel mit dem Hauptgerät verbunden werden kann. Für die Untersuchungen können 500 MHz, 900 MHz, 1 GHz und 1,5 GHz Schmetterlingsantennen sowie 1 GHz und 2,5 GHz Hornantennen eingesetzt werden. Abbildung 3 zeigt den Einsatz eines kommerziellen Radargerätes bei der Durchführung von Messungen an Mauerwerk mit der 1,5 GHz Antenne. Dazu wird die Antenne mit Oberflächenkontakt über die Bauteiloberfläche geführt.

Je nach Anwendungsfall können verschiedene Antennen miteinander kombiniert werden. Um die Messwerte mit der Antennenposition auf dem Bauteil zu korrelieren, können Marker oder Messräder eingesetzt werden. Über einen internen oder externen Trigger (z. B. Laufrad als Wegaufnehmer) werden dann von einem Impuls-generator sehr kurze elektrische Impulse mit einer Pulsbreite von ca. 1 ns erzeugt. Dabei kann eine maximale Folgefrequenz von 50 kHz erreicht werden. Die kommerziellen Radarannten erzeugen aus dem elektrischen Impuls elektromagnetische Impulse mit drei typischen sinusförmigen Halbwellen (vereinfacht dargestellt in Abbildung 1). Diese Impulse werden von der Sendeanenne in das zu untersuchende Medium abgestrahlt. Die Reflexionen werden von der Empfangsantenne detektiert, in ein Zwischenfrequenzsignal umgewandelt und auf dem Monitor dargestellt bzw. auf Festplatte abgespeichert. Die Darstellung der reflektierten Intensitäten kann entweder als Einzelkurve (A-Bild, Darstellung der Intensität über der Zeit) oder viele Einzelkurven als Falschfarben- bzw. Grauwertdarstellung erfolgen (Radarogramm oder B-Bild). Bei der Falschfarben- bzw. Grauwertdarstellung werden gleichen Intensitäten und Phasen gleiche Farben bzw. Grauwerte zugeordnet. Weiterführende Beschreibungen des Verfahrens können der Literatur entnommen werden [Ref 7, Ref 8].

Die Nachweisgrenzen und Messgenauigkeiten der Ortung mit dem Impulsradar werden durch die Eindringtiefe, die Tiefenaufösung sowie die horizontale Auflösung (Auflösung in Richtung der Antennenbewegung) definiert.

Die Eindringtiefe wird durch die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen bestimmt, zu der drei Prozesse beitragen: die Absorption im Material, Verluste durch den Öffnungswinkel der Antenne und Verluste durch Streuung und Reflexion an Störstellen. Dadurch hängt die Eindringtiefe vom Feuchtegehalt, vom Salzgehalt, von der Anzahl der Reflexions- und Streuzentren, von der Frequenz der elektromagnetischen Wellen und vom Öffnungswinkel der Antenne ab. Für die 500 MHz Antenne ergeben sich z. B. für trockenen Beton und trockenes Mauerwerk maximale Eindringtiefen von 1 bis 2 m. Mit zunehmender Antennenfrequenz werden diese Werte kleiner.

Die Tiefenaufösung Δd hängt von der Dauer des elektromagnetischen Impulses und damit von der Frequenz der verwendeten Antenne ab. Höherfrequente Anten-

nen führen daher zu einer besseren Tiefenauflösung und es können Auflösungen bis zu 1 cm erreicht werden.

Die horizontale Auflösung Δx , d. h. das Trennen zweier nebeneinander liegender Reflexionszentren, wird durch die Beugungserscheinungen bei der Reflexion bestimmt und hängt dadurch von der Tiefe im Material, der Dämpfung der elektromagnetischen Wellen im Material, der Antennenapertur und der Frequenz ab. Unter optimalen Bedingungen ergibt sich eine horizontale Auflösung von 1 cm. Weiterhin wird die horizontale Auflösung natürlich auch von der Geschwindigkeit bestimmt, mit der die Antenne über das Bauteil geführt wird.

Ortung von schlaffer und vorgespannter Bewehrung in Betonbauteilen

Im Brückenbau wurde das Impulsradar in mehreren Fällen bereits sehr erfolgreich für die Ortung von Spannkämen eingesetzt. Dadurch konnten Beschädigungen von Spannkämen durch Bohrungen für die Installation von Lärmschutzwänden bzw. bei der Bohrkernentnahme verhindert werden. Wichtig ist die Ortung von Spannkämen aber auch bei der Kombination mit anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wie dem Ultraschall-Impulsecho-Verfahren, das zur Ortung von Verpressungsfehlern eingesetzt werden kann, sowie mit dem Verfahren der Magnetfeldmessung zur Ortung von Spannstahlrissen [Ref 2].

Die Vorteile des Impulsradars bei allen Anwendungsmöglichkeiten liegen dabei in der schnellen, flächendeckenden und zerstörungsfreien Durchführbarkeit. Dabei müssen die Oberflächen der zu untersuchenden Strukturen zwar direkt zugänglich sein, eine spezielle Ankopplung der Radarantennen ist jedoch nicht erforderlich. Nachteilig ist bei diesem Verfahren, dass die elektromagnetischen Wellen an metallischen Gegenständen vollständig reflektiert werden, d. h. metallische Folien und metallische Hüllrohre verhindern ein Eindringen der Radarimpulse. Ebenso kann engliegende schlaife Bewehrung zu einer fast vollständigen Reflexion der Impulse führen. Bei der Ortung von Spannkämen mit dem Impulsradar muss daher berücksichtigt werden, inwieweit sich zwischen der Antenne und dem Spannkamm schlaife Bewehrung befindet, an der eine Reflexion der Signale stattfindet.

Reflexionen an Bewehrungsstäben und Spannkämen, deren Orientierung parallel zur Oberfläche und senkrecht zur Antennenbewegung verläuft, erscheinen aufgrund des Öffnungswinkels der Antenne im Radargramm typischerweise als Hyperbeln. Die Entstehung einer solchen Hyperbel zeigt die Abbildung 4: Befindet sich die Antenne in Position I, also noch nicht direkt oberhalb einer Hohlstelle, so wird aufgrund des Antennenöffnungswinkels bereits eine Reflexion detektiert, deren Laufzeit jedoch deutlich länger ist, als wenn sich die Antenne in Position III befindet. Mit Hilfe des Satzes von Pythagoras lässt sich zeigen, dass sich dann für verschiedene Antennenpositionen eine Hyperbel im Radargramm ergibt. Aus dem Scheitelpunkt der Hyperbel lässt sich die laterale Position sowie bei bekannter Aus-



Abbildung 3: Radarmessungen mit einer 1,5 GHz Antenne an Mauerwerk

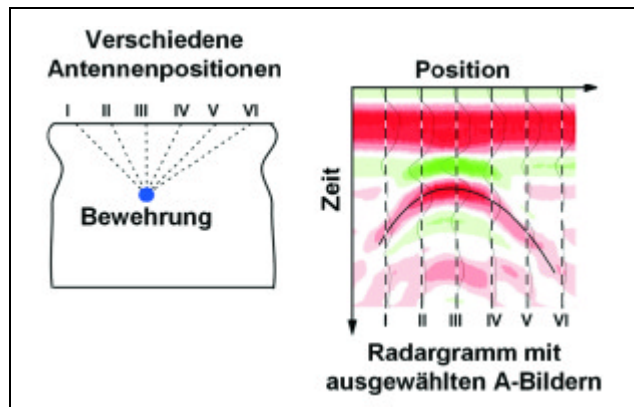


Abbildung 4: Aufgrund des Öffnungswinkels der Antenne von ca. 50° erscheint die Reflexion eines Bewehrungsstabes im Radargramm als Hyperbel

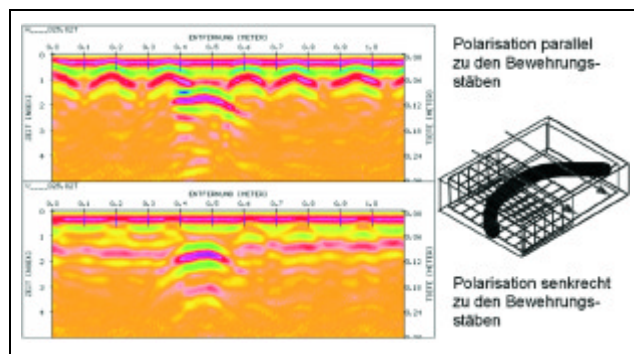


Abbildung 5: Radargramme des rechts dargestellten Betonprobekörpers für zwei Polarisationsrichtungen der 1,5 GHz Antenne zur besseren Ortung des Spannkamms

breitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse im Beton die Tiefenlage der Bewehrung ermitteln.

Um die störenden Reflexionen der schlaffen Bewehrung bei der Ortung von Spanngliedern etwas zu unterdrücken, kann man die lineare Polarisation der elektromagnetischen Strahlung ausnutzen, die von der Antenne ausgesendet wird. Dies wird anhand von Untersuchungen an einem Betonprobekörper

(2,0 x 1,5 x 0,5 m³) mit halbseitiger schlaffer Bewehrung und innenliegendem gekrümmten Spannkabel demonstriert (siehe Abbildung 5):

- Verläuft die Polarisationsrichtung des elektrischen Feldes parallel zu den Bewehrungsstäben, die von der Antenne während der Messung gekreuzt werden, so wirken die Stäbe wie ein Polarisationsfilter und ein großer Anteil der Strahlung wird reflektiert (Abbildung 5 oben).

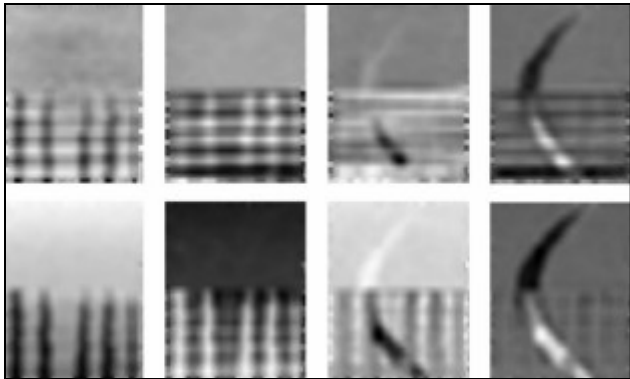


Abbildung 6: Tiefenschnitte der interpolierten Radargramme des Betonprobekörpers für zwei Polarisationsrichtungen der Antenne

oben: Polarisation waagrecht zur Bildachse
unten: Polarisation senkrecht zur Bildachse
Tiefen von links nach rechts: 4,0, 6,5, 10,0 und 12,5 cm.

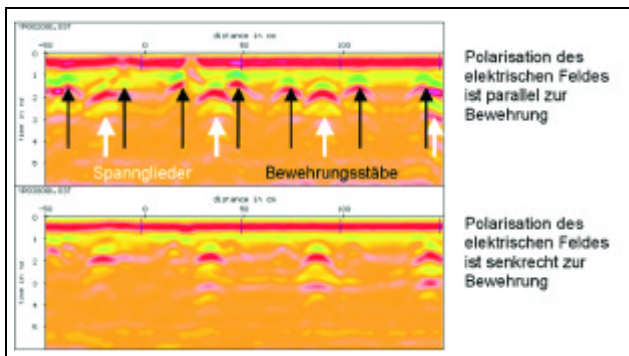


Abbildung 7: Unterscheidung von Bewehrungsstäben und Spanngliedern anhand von Radargrammen, die mit unterschiedlichen Antennenpolarisationen bei 1,5 GHz aufgenommen wurden

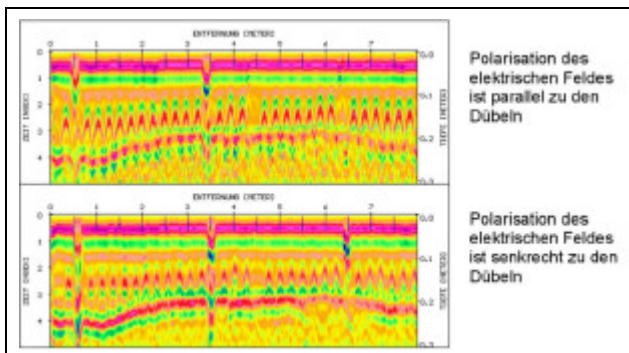


Abbildung 8: Radargramme zur Ortung von Dübeln entlang einer Querscheinfuge, aufgenommen mit der 1,5 GHz Antenne in zwei unterschiedlichen Polarisationskonfigurationen

- Dreht man dagegen die Antenne um 90° derart, dass das elektrische Feld senkrecht zu den Bewehrungsstäben polarisiert ist, so wird ein geringerer Anteil reflektiert und der darunter liegende Spannkabel kann besser geortet werden. Dieser Effekt ist gut in Abbildung 5 unten zu erkennen.

Ein Ausschnitt des Probekörpers wurde in beiden Polarisationskonfigurationen in einem engen Messraster mit der 1,5 GHz Antenne vermessen. Die Messspuren wurden jeweils zu einem dreidimensionalen Datenarray zusammengesetzt und Zeitscheiben (Schnitte parallel zur Oberfläche, C-Bilder) bzw. Tiefenschnitte in einem Abstand von 0,5 cm erzeugt. Ausgewählte Tiefenschnitte sind in der Abbildung 6 für beide Polarisationsrichtungen dargestellt. In Tiefen von 4 und 6,5 cm sind nur die Reflexionen von den Bewehrungsstäben zu erkennen, während ab einer Tiefe von 10 cm deutlich die Reflexion vom gekrümmten Hüllrohr sichtbar wird.

Haben die Bewehrungsstäbe jedoch einen Abstand von weniger als 7 cm, dann ist es fast unmöglich, den dahinter liegenden Spannkabel zu orten.

Die Änderung des Polarisationswinkels kann es aber auch ermöglichen, dünnere Spannkabel (Durchmesser: 4 cm) von den vorhandenen Bewehrungsstäben zu unterscheiden. In Abbildung 7 sind zwei Radargramme dargestellt, die auf einer Spannbetonbrücke zur Ortung von Querspanngliedern in zwei unterschiedlichen Polarisationsrichtungen mit der 1,5 GHz Antenne über eine Länge von 1,5 m aufgenommen wurden. Im oberen Radargramm war die Polarisationsrichtung parallel zu den Spanngliedern und zur Bewehrung ausgerichtet, und es ist zu erkennen, dass die Reflexionen von den Spanngliedern und den Bewehrungsstäben nicht eindeutig voneinander unterschieden werden können. Eine Drehung der Polarisationsrichtung um 90° (Abbildung 7 unten) lässt die Reflexionen von den Bewehrungsstäben nahezu vollständig verschwinden und nur noch die Reflexionen an den Spanngliedern sind deutlich sichtbar.

Qualitätssicherung im Straßenbau

Im Straßenbau konnte das Radarverfahren erfolgreich zur Lösung der folgenden Probleme eingesetzt werden:

- Untersuchung der Schräglage von Dübeln entlang von Scheinfugen bei Betonstraßen
- Dickenmessung und Ablösung einzelner Asphalt-schichten
- Ortung von Hohlräumen und -leitungen unterhalb der Asphalt-schichten

Im weiteren werden Anwendungsbeispiele zur Dübelortung sowie zur Asphaltdickenmessung vorgestellt.

Dübelortung in Betonstraßen

Betonstraßen im Autobahnbau werden mit Quer- und Längsscheinfugen ausgebildet, in die quer zum jeweiligen geplanten Riss Stahldübel bzw. Anker eingebracht werden. Der Einbau der Dübel und Anker erfolgt im noch frischen Beton durch maschinelles Eindringen und Rütteln. Die Überprüfung der Lage der Dübel und Anker

zu einem späteren Zeitpunkt kann mit dem Radarverfahren erfolgen. Dabei kann sowohl die Einbautiefe (11 bis 15 cm), eine Schräglage bzgl. der Fahrbahnebene sowie eine Schräglage bzgl. der Normalen der Scheinfuge untersucht werden.

Für die Durchführung dieser Untersuchungen eignet sich die 1,5 GHz Antenne, mit der mindestens drei Messspuren parallel zur Scheinfuge (in der Mitte der Fuge sowie jeweils eine Messspur neben der Fuge) aufgenommen werden. Da bei einer Einzelmessung jeder Messspur eine Wegaufnahme mit einem Messrad zu nicht mehr tolerierbaren Fehlern bzgl. der Antennenposition führt, sollten die drei Messspuren gleichzeitig mit drei parallel geführten Antennen und nur einem Messrad durchgeführt werden.

Abbildung 8 zeigt die Radargramme einer einzelnen Messspur parallel zur Fuge, die wiederum in beiden Polarisationskonfigurationen aufgenommen wurde. Hier empfiehlt sich die Wahl der Polarisation parallel zu den Dübeln bzw. Ankern, damit diese mit bestmöglicher Intensität dargestellt werden können. In beiden Radargrammen zeichnen sich die Positionen der Dübel deutlich durch die einzelnen Hyperbeln ab. In beiden Radargrammen ist auch die Unterseite der Fahrbahnplatte zu erkennen.

Untersuchung von Asphaltbelägen

Beim Straßenbau ist die Bestimmung der Dicke der einzelnen Schichten der Fahrbahnen entscheidend für die Qualitätssicherung bei der Bauausführung, für die Entwicklung von Konzepten zur Bestandserhaltung und zum Ausbau von Straßen sowie für den Aufbau einer Straßeninformationsdatenbank (SIB) oder eines Pavement Management Systems. Bei der zerstörungsfreien Schichtdickenbestimmung von Fahrbahnbelägen stehen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- Bestimmung der Dicken der gebundenen Schichten
- Bestimmung der Dicke der ungebundenen Schichten
- Untersuchung des Verbundes zwischen unterschiedlichen Asphaltsschichten
- Ortung von Versorgungsleitungen und Hohlräumen im Oberbau, Unterbau und Untergrund

Damit die Fahrbahnuntersuchungen mit Radar möglichst ohne wesentliche Einschränkungen des fließenden Verkehrs durchgeführt werden können, sollten die Messungen von einem fahrenden PKW aus erfolgen. Weiterhin sollten luftgekoppelte Hornantennen eingesetzt werden, da diese nicht den direkten Kontakt der Antenne zur Fahrbahn erfordern. Abbildung 9 zeigt das Messfahrzeug mit einem 2,5 GHz Hornantennenpaar. Bei kommerziellen Radarsystemen stehen neben den 2,5 GHz noch 1 GHz Hornantennen zur Verfügung, deren Eindringtiefe jedoch zur Untersuchung des Unterbaus sowie des Untergrundes nicht ausreicht. Für diese Fragestellungen müssen daher nach wie vor Antennen eingesetzt werden, die direkten Kontakt zur Fahrbahnoberfläche benötigen. Ein Abstand dieser Antennen von mehr als 5 cm zur Fahrbahn würde einen drastischen



Abbildung 9: Untersuchung von Asphaltbelägen mit Radar bei Einsatz eines 2,5 GHz Hornantennenpaares. Die Messungen können im laufenden Verkehr vom fahrenden PKW aus durchgeführt werden

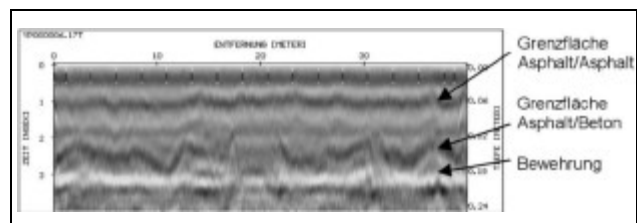


Abbildung 10: Radargramm eines Straßenprofils in Längsrichtung, aufgenommen mit dem 2,5 GHz Hornantennenpaar

Verlust der in die zu untersuchende Struktur eindringenden Strahlungsintensität bewirken.

Das mit dem 2,5 GHz Antennenpaar aufgezeichnete Radargramm eines Straßenoberbaus in einem Autobahntunnel über eine Strecke von 40 m zeigt die Abbildung 10. Es sind folgende Grenzflächenreflexionen deutlich zu erkennen:

- Asphaltdeckschicht/Asphalt
- Asphalt/Beton
- Bewehrungsgitter im Beton

Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit im Material kann die Zeitskala in eine Tiefenskala umgerechnet werden und damit die Schichtdicken ermittelt werden. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Material jedoch häufig nicht genau bekannt ist, ist es in den meisten Fällen notwendig, einige Bohrkern an ausgewählten Stellen zu ziehen.



Abbildung 11: Altes Museum auf der Museumsinsel in Berlin-Mitte, links: Ansicht des Museums vom Lustgarten aus, rechts: Innenraum der Rotunde

Ortung von Hohlstellen im Mauerwerk historischer Gebäude

Im trockenen und homogenen Mauerwerk lassen sich Hohlstellen mit dem Radarverfahren problemlos orten. Ein schönes Anwendungsbeispiel sind die Untersuchungen im Alten Museum auf der Museumsinsel in Berlin-Mitte.

Das Alte Museum wurde von 1822 bis 1930 durch Karl Friedrich Schinkel erbaut. Die komplette Sanierung des historischen Geländes auf der Museumsinsel macht auch eine Bestandsaufnahme des Alten Museums erforderlich. Aus diesem Grund sollte das die Rotunde umgebende Mauerwerk im inneren Bereich des Museums zerstörungsfrei mit Radar untersucht werden [Ref 4]. Ziel war die Ortung von größeren Hohlräumen und Kanälen, die dann z. B. als Installationsschächte genutzt werden können. Abbildung 11 zeigt die heutige Ansicht des Alten Museums vom Lustgarten aus sowie eine Skizze der Rotunde.

Die Radarmessungen wurden mit der 500 MHz Antenne in Kombination mit einem Messrad zur Wegerfassung durchgeführt. Horizontale Messspuren wurden entlang der inneren und äußeren Oberfläche des Mauerwerks der Rotunde in einer Höhe von 1 m oberhalb des Fuß-

bodens aufgenommen. Abbildung 12 zeigt auf der linken Seite einen Ausschnitt aus dem Grundriss der Rotunde, in den auch der Verlauf der Messspuren eingezeichnet wurde. Das zugehörige Radargramm der Messspur Nr. 4 mit einer Länge von 16,6 m ist in Abbildung 12 rechts zu sehen. Hier sind mehrere Reflexionen zu erkennen, die folgenden Strukturen zuzuordnen sind:

- a: Die Reflexion direkt unterhalb der Oberflächenreflexion entspricht einer Nische mit einem darin befindlichen Heizkörper.
- b: Die Reflexion in einer Tiefe von 1,5 m entsteht an der Innenseite des Treppenhauses.
- c, d: Die beiden Reflexionen in Tiefen von 1,9 m und 1,13 m entstehen an zwei kleinen Kammern im Innern des Mauerwerks.
- e: Die Reflexion in einer Tiefe von 1,55 m wird durch die Rückseite der Wand erzeugt.

In allen anderen Radargrammen konnten die Reflexionen ebenso klar erkannt werden, was ein Zeichen für trockenes und sehr homogenes Mauerwerk ist.

Bestimmung der Feuchteverteilung im Außenmauerwerk eines historischen Gebäudes

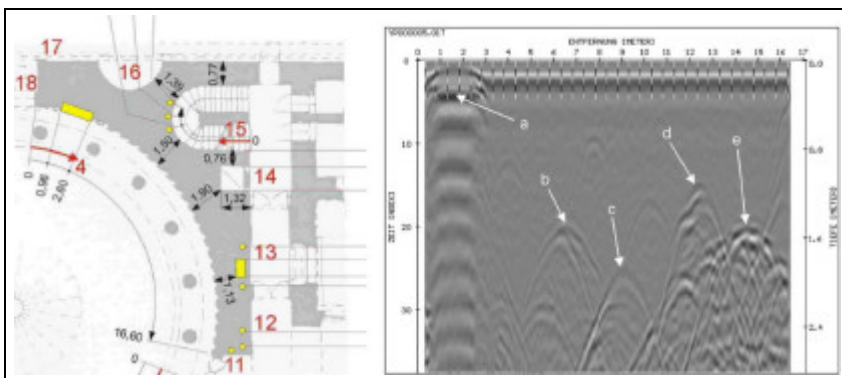


Abbildung 12: Radarmessungen an der Innenseite des Mauerwerks der Rotunde. Links: Ausschnitt aus dem Grundriss. Die mit Radar georteten Hohlstellen sind gelb markiert, rechts: Radargramm mit Reflexionen an den Hohlstellen (a: Raumheizung, b: Treppenhaus, c: kleine Kammer, d: kleine Kammer, e: Wandrückseite)

Die Kirche S. Maria Rossa in Mailand, Italien, wurde in verschiedenen Bauabschnitten vom 9. bis zum 13. Jahrhundert erbaut. Weitere Umbauten sowie Reparaturarbeiten erfolgten 1783 und 1966. Die Südwestansicht des Bauwerks ist in Abbildung 13 dargestellt. Das Mauerwerk besteht aus Vollziegeln und Lehmörtel. Der Grundwasserspiegel liegt relativ hoch und in der Umgebung der Kirche wurden aus landwirtschaftlichen Gründen viele Entwässerungskanäle angelegt. Einer dieser Kanäle befindet sich in unmittelbarer Nähe der Nordseite der Kirche. Weiterhin befindet sich die Nordseite der Kirche zum Teil

unterhalb des Straßenniveaus und hat direkten Kontakt zum Erdboden. Diese Faktoren führten dazu, das zumindest das Mauerwerk an der Nordseite sehr stark durchfeuchtet ist.

Zur genauen Untersuchung der Feuchteverteilung wurden daher Radaruntersuchungen in Kombination mit Mikrowellenmessungen in dünnen Bohrlöchern durchgeführt. Diese Transmissionsmessungen zwischen zwei Dipolantennen in zwei parallel zueinander geführten Bohrlöchern mit einem Durchmesser von jeweils 12 mm und einem Abstand von 5 cm ermöglichten eine tiefenaufgelöste Bestimmung der Dielektrizitätszahl [Ref 9]. Aus der Laufzeit der Rückwandreflexion der Radarimpulse an der durchfeuchteten Wand konnte eine mittlere Dielektrizitätszahl des Mauerwerks ermittelt werden.

Vor der Durchführung der Messungen wurden im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsvorhabens systematische Kalibrationsmessungen an Baustoffen und Probekörpern mit unterschiedlichem Feuchtegehalt durchgeführt, bei denen die Dielektrizitätszahlen mit Hilfe des Radarverfahrens und die Feuchtegehalte über eine Wägung ermittelt wurden [Ref 10, Ref 11]. Eine solche Kalibrationskurve für Kalksandstein, Kalksandsteinmauerwerk und Kalkzementmörtel zeigt die Abbildung 14. Anhand dieser Kalibrationskurven kann bei späteren Messungen der Feuchtegehalt aus den gemessenen Dielektrizitätszahlen ermittelt werden.

In Abbildung 15 oben ist ein Radargramm dargestellt, dass mit einer 500 MHz Antenne an der Nordseite der Kirche aufgenommen wurde. Die Rückwandreflexion ist aufgrund der starken Absorption im feuchten Mauerwerk nur schwach zu erkennen. Aus der bekannten Dicke des Mauerwerks und der Laufzeit der Rückwandreflexion ergibt sich ein mittlerer Feuchtegehalt von ca. 25 Vol %.

Die Verteilung der Dielektrizitätszahl über die Tiefe an der gleichen Stelle des Mauerwerks, gemessen mit dem Mikrowellentransmissionsverfahren in dünnen Bohrlöchern, ist in Abbildung 15 unten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Dielektrizitätszahl zur Mitte des Mauerwerks hin ansteigt. In Übereinstimmung mit den Radarmessungen ergibt sich auch hier ein mittlerer Feuchtegehalt von 24 Vol %.

Weitere Ergebnisse zur Untersuchung der Kirche können in [Ref 12] nachgelesen werden.

Ausblick

Die oben vorgestellten Anwendungsmöglichkeiten zeigen, dass das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen vielfältig eingesetzt werden kann. Voraussetzung ist jedoch, dass der Anwender, der die Untersuchungen durchführt, die Einflussfaktoren auf die Messergebnisse kennt und durch geeignete Wahl der Messparameter eine optimale Auflösung und Aussagefähigkeit der Messdaten gewährleistet.

Weiterentwicklungen des Verfahrens beinhalten die folgenden Aufgaben:



Abbildung 13: Südwestliche Ansicht der Kirche S. Maria Rossa in Mailand, Italien

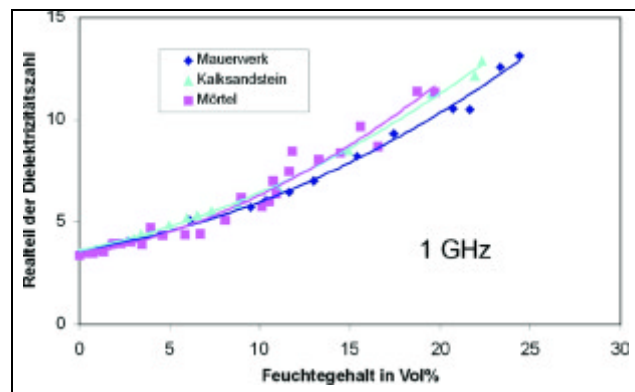


Abbildung 14: Realteil der Dielektrizitätszahlen von Kalksandstein, Mörtel und Mauerwerk in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, gemessen bei 1 GHz. Die durchgezogenen Linien entsprechen einem Polynomfit 2. Ordnung

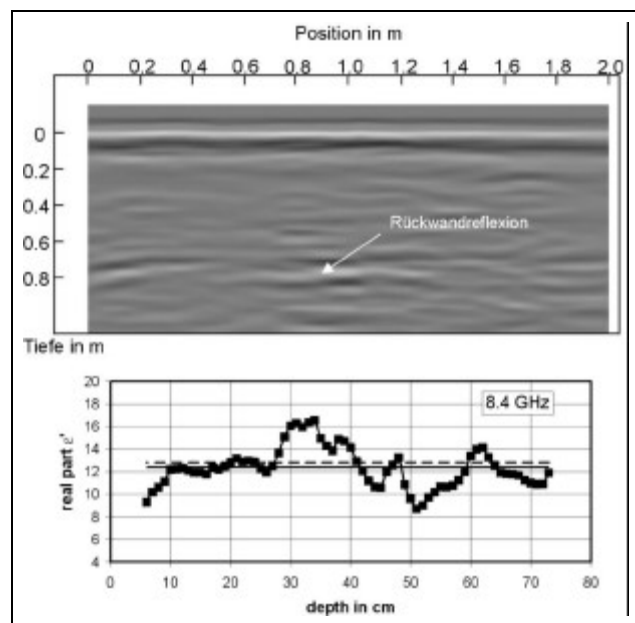


Abbildung 15: Messung der Feuchteverteilung an einer Außenwand der Kirche S. Maria Rossa, Oben: Radargramm, aufgenommen mit der 500 MHz Antennen, Unten: Tiefenaufgelöste Verteilung des Realteils der Dielektrizitätszahl, gemessen bei einer Frequenz von 8,4 GHz

- Entwicklung neuer Antennen zur Durchführung der Messungen mit höheren Frequenzen und damit einer verbesserten Ortsauflösung
- Automatisierung der Messdatenerfassung am Bauteil, z. B. durch den Einsatz eines Messroboters
- Automatisierung der Messdatenauswertung
- Kombination mit anderen Messverfahren
- Entwicklung von Qualitätssicherungskonzepten für die verschiedenen Prüfprobleme
- Erkundung neuer Prüfprobleme und Anwendungsmöglichkeiten
- Erarbeitung von Merkblättern und Normen

Danksagung

Die hier vorgestellten Untersuchungen basieren auf der engagierten und fachkundigen Tätigkeit der Mitarbeiter(innen) der Fachgruppe VII.3 Bauwerksdiagnose; Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung .

Bei den verschiedenen Prüfaufgaben wurden wir von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin, dem Bundesbauamt Berlin, der Europäischen Kommission und der Politecnico di Milano, Italien, unterstützt.

Literatur

- Ref 1 Funk, Th., Maierhofer, Ch., Leipold, S. and K. Borchardt: Non-destructive location of tendon ducts in concrete for the installation of noise insulating walls using impulse radar, in: Forde, M. C. (ed.), Proceedings of 7th International Conference on Structural Faults and Repair, Vol. 2, Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997, pp. 323-329
- Ref 2 Krieger, J., Krause, M. and H. Wiggenhauser: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethoden für Betonbrücken, BAST-Bericht Heft B 18, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW (1998), 143 Seiten
- Ref 3 Maierhofer, Ch.: Strukturuntersuchungen in Beton mit dem Impulsradar, in: Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, München, 21.-22. Januar 1999, Vortrag 5 auf CD
- Ref 4 Maierhofer, Ch., Wöstmann, J. Schaurich, D. and M. Krause: Radar investigations of historical structures, in: Proc. Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Uomoto, T. (ed.), Elsevier, Tokyo, 2000, pp. 529-537
- Ref 5 Colla, C. and Ch. Maierhofer: Investigation of historic masonry via radar reflection and tomography, in: Proceedings 8th Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar, Gold Coast, Australia, 23-26 May 2000, CDROM
- Ref 6 Maierhofer, Ch., Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B. and W. Müller: Kombiniertes Einsatz von Radar und Ultraschallarray-Verfahren zur Strukturuntersuchung von Brückenbauteilen, Berichtsband der DACH-Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2000, in Druck

- Ref 7 Maierhofer, Ch. und T. Funk: Auswertung von Radarmessungen im Bauwesen: Signalverarbeitung - Visualisierung - Interpretation, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Tagungsband des Querschnittseminars Bildverarbeitung 1995 in Stutensee, Berichtsband 50, S. 101 - 110
- Ref 8 Daniels, D. J., Gunton, D. J. and H. F. Scott: Introduction to subsurface radar. IEEE Proc. Vol. 135, Pt. F, No. 4, 1988, pp. 278-320
- Ref 9 Rudolph, M., Schaurich, D. und H. Wiggenhauser: Feuchteprofilmessungen mit Mikrowellen in Mauerwerk, in: Wiggenhauser, H., Müller, H. S. und N. Girlich, Tagungsbericht Feuchtetag 21.09.1993, Berlin: DGZfP (1993)
- Ref 10 Maierhofer, Ch., Leipold, S. and H. Wiggenhauser: Investigation of the influence of moisture and salt content on the dielectric properties of brick materials using radar, in: Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) in Lawrence, USA, 27.-30. May 1998, Kansas, USA: Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, Vol. 2 (1998) pp. 477-484
- Ref 11 Maierhofer, Ch. and J. Wöstmann: Investigation of dielectric properties of brick materials as a function of moisture and salt content using a microwave impulse technique at very high frequencies, in: NDT&E International, Vol. 31 (1998) 4, pp. 259-263
- Ref 12 Maierhofer, Ch., Leipold, S., Schaurich, D., Binda, L. and A. Saisi: Determination of the moisture distribution in the outside walls of the S. Maria Rossa using radar, in: Proceedings of the 7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) in Lawrence, USA, 27.-30. May 1998, Kansas, USA: Radar Systems and Remote Sensing Laboratory, Vol. 2 (1998) pp. 509-514

Die Autorin:



Dr. Christiane Maierhofer, geb. 1964, Diplom-Physikerin, studierte an der Technischen Universität Berlin.

Seit 1993 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Fachgruppe VII.3 Bauwerksdiagnose; Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), und dort seit 1998 Projektgruppenleiterin.

Sie ist Trägerin des Bertholdpreises 2000 der DGZfP.

Anschrift:

Dr. Christiane Maierhofer

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Fachgruppe VII.3

Unter den Eichen 87

D-12205 Berlin

Tel.: (030) 8104 4228, Fax: (030) 8104 1737

e-mail: christiane.maierhofer@bam.de