Signatur der Streuung von Radarwellen durch die Heterogenität von Beton

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

von
Dipl.-Ing. Thomas Kind

Berlin

Tag des Kolloquims:	19. Juni 2015
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. D. Bähre
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Boller
	Dr. rer. nat. H. Wiggenhauser
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. S. Diebels
Akad. Mitarbeiter:	Dr.-Ing. F. Aubertin

Kurzfassung

Das Radarverfahren ist ein schnelles bildgebendes Verfahren für die Untersuchung der inneren Struktur von Stahlbeton-Bauwerken und wird seit längerem erfolgreich für die zerstörungsfreie Untersuchung von Brückenbauwerken eingesetzt. Für die Rekonstruktion der Lage der Bewehrung reicht die Annahme einer homogenen Materialeigenschaft des Betons meistens aus.

Nähere Untersuchungen der empfangenen Streuungen der Radarwellen zeigen, dass neben der starken Streuung der Radarwellen an den metallischen Einbauteilen auch schwache Streuungen existieren. Diese schwachen Streuungen im Beton wurden nun erstmals in dieser Arbeit untersucht und können der Heterogenität des Betons zugeordnet werden. Die schwachen Streuungen entstehen durch den Permittivitätskontrast und die Geometrie der Gesteinskörnung im umgebenden Zementstein des Betons.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die schwachen Streuungen im Beton für unterschiedliche Gesteinskörnungen charakterisiert und der Einfluss des Wellenlängenbereichs der Radarwellen auf die Ergebnisse untersucht. Weiter zeigt die Arbeit, dass die Streuungen an der Gesteinskörnung einen wesentlichen Einfluss auf die maximale Eindringtiefe von Radarwellen in Beton haben.

Stichworte:

Radar, Beton, Gesteinskörnung, Heterogenität, Interferenzmuster, Sieblinie, Stahlbeton, Streuung, Zementstein, zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)

Abstract

The radar method is a rapid imaging technique for the study of the internal structure of reinforced concrete structures and has been used successfully since some time for non-destructive analysis of bridge structures. For the reconstruction of the position of the reinforcement, the assumption of homogeneous material properties of concrete is usually sufficient.

More detailed investigations of the received scattering of the radar waves show that in addition to the strong scattering of the radar waves at the metallic mounting parts also weak scattering exists. These weak variations of scattering in the concrete were investigated for the first time in this thesis and are assigned to the heterogeneity of the concrete. The weak scattering is caused by the contrast of the permittivities and the geometry of the aggregate of the surrounding concrete cement paste.

In this thesis, the weak scattering in concrete was characterized for different aggregates and the influence of the wavelength range of the radar wave on the results was investigated. Further, the thesis shows that the variations in the aggregate have an essential effect on the maximum propagation length of radar waves in concrete.

Keywords:

Radar, concrete, aggregates, heterogeneity, interference pattern, grading curve, reinforced concrete, scattering, cement stone, non destructive testing (NDT)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1

1.1 Motivation ... 2

1.2 Ziele der Arbeit ... 4

2 Grundlagen ... 7

2.1 Radar im Bauwesen ... 7

2.2 Prinzip des Radars ... 8

2.3 Aufbau des Radarsystems ... 12

2.4 Betrachtung im Zeit- und Frequenzbereich ... 14

2.5 Antennenpolarisation ... 16

2.6 Heterogenität von Beton ... 19

2.7 Streuung elektromagnetischer Wellen ... 21

2.8 Rekonstruktion von Radardaten ... 24

2.9 Automatisierung dichter und präziser Radarmessung ... 25

3 Stand der Forschung ... 29

4 Schwache Streuung von Radarwellen in Beton ... 31

4.1 Versuchsbeschreibung ... 31

4.1.1 Beton Probekörper ... 31

4.1.2 Durchführung der Messungen mit dem Bauwerkscanner ... 32

4.2 Schwache Streuung im Volumen ... 36

4.2.1 Einfluss von Laufzeit und Antennenorientierung ... 39

4.2.2 Amplitudenverteilung ... 41

4.2.3 Gerätespezifisches Rauschen ... 42

4.2.4 Quantitative Bewertung ... 44

4.2.5 Datenbearbeitung ... 46

4.2.6 Einfluss der Antennenorientierung auf die quantitative Bewertung ... 53

4.2.7 Vergleichsmessung in Luft ... 54

4.2.8 Vergleich für Größtkorn 16 mm und 32 mm ... 55

4.2.9 Reproduzierbarkeit der Schwankungen im Volumen ... 60

4.3 Schwankungen der Reflexion an der Bewehrung 61
4.3.1 Maximale Amplituden der Bewehrungsreflexion 63
4.3.2 Antennenorientierung 67
4.3.3 Vergleich zwischen Hand- und Scannermessungen 68
4.4 Statistische Auswertung der mittleren Reflexionsamplituden 71
4.5 Vergleichsmessungen mit zwei Schüttungen aus Quarzkies 74
5 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick 81
6 Schlussbetrachtung 85
7 Literaturverzeichnis 87
8 Anhang 91
8.1 Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen 91
8.2 Glossar 92

1 Einleitung

Radar kann eindrucksvoll metallische Bewehrung als innere Konstruktion eines Stahlbeton-Bauwerkes zerstörungsfrei sichtbar machen und viele Fragestellungen im Bauwesen damit erfolgreich beantworten. Aufgrund der starken Reflexionen an metallischer Bewehrung spielte bisher die quantitative Betrachtung der Stärke von Reflexionen eher eine untergeordnete Rolle. Messungen mit einer sehr dichten örtlichen Auflösung in beiden Dimensionen der Messfläche zeigen aber, dass die starken Reflexionen an metallischer Bewehrung auch starken örtlichen Schwankungen unterliegen, trotz eines gleichförmigen Aufbaus der Probekörper. Die dichten Messungen zeigen besonders deutlich, dass auch in Bereichen ohne innere Konstruktion schwache und wiederum örtlich reproduzierbare Reflexionen im Beton auftreten. Die Beobachtung von reproduzierbaren Schwankungen der Reflexionen, sowohl an der Bewehrung als auch im Volumen, legt einen Zusammenhang zur Heterogenität des Betons aufgrund der Gesteinskörnung nahe. Die Untersuchung dieses Zusammenhanges und eine bessere systematische Untersuchung der Bewehrungsreflexion ist Inhalt dieser Arbeit.

Das Innere von Bauwerken aus Stahlbeton sichtbar zu machen, ist eine notwendige und zugleich faszinierende Aufgabe. Müssen heute Brücken im Bestand für höhere Lasten ertüchtigt werden, ist es notwendig, den inneren Aufbau der Bewehrung zu kennen, damit besonders die vorgespannte Bewehrung beim Kernbohren im Rahmen einer Ertüchtigungsmaßnahme nicht beschädigt wird oder damit bei nicht vorhandenen Bestandsunterlagen die Tragfähigkeit nachgerechnet werden kann. Die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen stellt die Verfahren und Methoden zur Verfügung, die die innere Konstruktion sichtbar machen können. Radar- und Ultraschallverfahren sind beim Aufklären innerer Konstruktionen sehr erfolgreich in den letzten 20 Jahren eingesetzt worden. Die Auswahl der beiden Verfahren ist eine Entscheidung zwischen der notwendigen Detektionstiefe und dem vertretbaren Messaufwand für eine Prüfaufgabe.

Für Prüfaufgaben mit einer geforderten Detektionstiefe bis etwa 30 cm wird das Radarverfahren dem Ultraschallverfahren vorgezogen aufgrund der höchstens halb so langen Messzeit. Sind Detektionstiefen im Bereich von 50 cm und mehr notwendig, kann nur noch das Ultraschallverfahren aufgrund der größeren Eindringtiefe angewendet werden.

Für einen Großteil der Prüfaufgaben an Stahlbeton sind Detektionstiefen von bis zu 30 cm ausreichend und können deshalb allein mit dem Radarverfahren bearbeitet werden. Das Radarverfahren als elektromagnetisches Verfahren lässt sich zum Auffinden der metallischen Bewehrung im Stahlbeton sehr gut einsetzen aufgrund der Totalreflexion der elektromagnetischen Wellen an Metallen. Die geometrischen Abmessungen, wie z. B. die Dicke eines Bewehrungsquerschnittes, werden mit dem Radarverfahren nicht richtig abgebildet aufgrund der endlichen Bandbreite der Radarantennen. Durch den geschickten Einsatz der Orientierung der Radarantennen

können aber die geringen Querschnitte (typisch < 28 mm) schlaffer Bewehrungseisen von den größeren Querschnitten der Hüllrohre (typisch > 40 mm) der vorgespannten Bewehrung unterschieden werden. So unterscheidet sich die Stärke der Reflexionen an kleinen Bewehrungsquerschnitten besonders stark zwischen den beiden Reflexionen, wenn die Polarisation der einfallenden elektromagnetischen Wellen parallel oder senkrecht zum Bewehrungseisen orientiert ist. Mit größer werdendem Querschnitt verringert sich der Unterschied der beiden Reflexionen. Genaue Querschnittsbestimmung von schlaffer Bewehrung ist durch die Verwendung des Wirbelstromverfahrens oder die Messung des magnetischen Flusses durch den ferromagnetischen Bewehrungsstab möglich.

Die bildgebende Darstellung der metallischen Bewehrung von Stahlbetonbauteilen mit dem Radarverfahren ist mittlerweile vom Stand der Forschung und Technik in den Stand der Praxis überführt worden. Wurden vor zehn Jahren Radarsysteme vorwiegend von geophysikalischen Geräteherstellern angeboten, so werden heute Radarsystem auch von Firmen aus dem Bauwesen entwickelt und angeboten.

1.1 Motivation

Durch die beobachtete Schwankung der Reflexionen von Radarwellen in Beton stellen sich die Fragen, inwieweit bisherige quantitative Auswertungen von Radaruntersuchungen davon beeinflusst sind und inwieweit allein diese Schwankungen neue Informationen über das Material Beton und die Verfahrensparameter von Radar, wie z. B. die Eindringtiefe, liefern.

Die quantitative Auswertung der Reflexionsamplituden von Radarmessungen am Stahlbeton ist noch immer mehr Stand der Forschung und Technik als der Praxis. Ein wesentliches Interesse an der quantitativen Auswertung der Reflexionsamplituden ist die zerstörungsfreie Erfassung des Zustands von Bewehrung. Durch dauerhaftes Einwirken von Feuchtigkeit und Salzen in Form von Auftausalz werden ungeschützte Stahlbetonbauwerke bis heute infolge von Korrosion stark geschädigt. Das Ausmaß der Schädigungen ist teilweise so groß, dass es zum vorzeitigen Abriss kommt oder in einzelnen Fällen sogar zum vollständigen Versagen von Brücken oder Parkhäusern führt.

Neben der Zustandsbestimmung von Korrosion ist auch weiterhin die präzise Querschnittsbestimmung von Bewehrungen mit Hilfe der quantitativen Auswertung der Reflexionsamplituden von Radarmessungen Gegenstand der Forschung. Eigene Untersuchungen in der BAM haben gezeigt, dass die Reflexionsamplitude entlang eines Bewehrungsstabes nicht konstant ist, trotz konstanter Betonüberdeckung. Wiederholungsmessungen zeigten, dass diese Schwankungen entlang des gleichen Bewehrungsstabes reproduzierbar sind. Weitere Radaruntersuchungen zeigten, dass auch die Bilder der Tiefen- /Zeitschnitte von dichten und präzisen Wiederholungsmessungen dieselben Muster der Reflexionsamplituden aufweisen. Diese Muster zeigten sich auch und insbesondere in Gebieten, in denen keine

herkömmlichen Reflektoren wie Bewehrung vorhanden sind. Die geringen Streuungen aus dem Inneren des Betons legen nahe, dass die Heterogenität von Beton Ursache für die beiden Beobachtungen ist. Die Heterogenität des Betons ist durch die Gesteinskörnung und den umgebenden Zementstein bedingt.

Ähnliche Beobachtungen sind bekannt und wurden untersucht für Ultraschallmessungen an Beton (Schubert und Köhler 1997, Jansohn 2000, Kroggel, Schickert und Schnapp 2002, Schickert 2003). In diesem Zusammenhang wurde auch von Kornrauschen gesprochen. Für Ultraschall ist der Unterschied zwischen der Streuung an der Gesteinskörnung und den Reflexionen an der Bewehrung deutlich geringer als beim Radar. In den Anfangszeiten der Anwendung von Ultraschall an Beton hat dies auch zu großen Problemen geführt aufgrund des geringen Unterschieds der Reflexion der Bewehrung zur Streuung der Umgebung.

Für Radaruntersuchungen an Beton wurde die elektromagnetische Streuung an der Gesteinskörnung bisher nicht systematisch untersucht. Die vorliegende Arbeit soll diese Lücke schließen. Die Untersuchungen der Arbeit sollen ein besseres Verständnis für die Größenordnung der Streuung von Radarwellen an der Gesteinskörnung in Beton liefern. Es soll auch der Zusammenhang zwischen der Detektionsreichweite und der Streuung an den Gesteinskörnern untersucht werden, da die Streuung eine fortlaufende Schwächung der elektromagnetischen Welle bedeutet.

Völlig neu ist der Zusammenhang zwischen der Streuung im Material und der Detektionsreichweite von Radar in Stahlbeton nicht. In Praxis wird beim Erreichen der Detektionsreichweite die Radarantenne gewechselt. Der genaue physikalische Hintergrund, warum eine Antenne gewechselt werden muss, ist häufig nicht gegenwärtig. Es wird dann eine Radarantenne mit einer niedrigeren Antennenfrequenz ausgewählt, um die Detektionsreichweite zu verbessern. Der physikalische Hintergrund für eine größere Detektionsreichweite bei niedriger Antennenfrequenz ist die geringere Streuung an der Gesteinskörnung aufgrund der größeren Wellenlänge. Nachteil einer größeren Wellenlänge ist aber die geringe örtliche Auflösung. Einzelne Stäbe einer Bewehrung, die dicht beieinander liegen, lassen sich dann weniger gut unterscheiden sowohl in der Tiefe als auch in der Ebene.

1.2 Ziele der Arbeit

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass Beton für Radar kein homogener, sondern ein heterogener Baustoff ist und dass deshalb bei der Ausbreitung von Radarwellen in Beton es fortlaufend zu Streuungen an der Gesteinskörnung kommt. Die ständige Wechselwirkung der Radarwelle mit der Gesteinskörnung soll anhand von dichten und präzisen Radarmessungen, die mit einem Bauwerkscanner an verschiedenen Betonprobekörpern und an verschiedenen Schüttungen mit Quarzkies durchgeführt wurden, qualitativ als auch quantitativ dargestellt werden.

Qualitativ soll gezeigt werden, dass an der Oberfläche eines Betonprobekörpers die Streuungen der Radarwelle im Volumen fortlaufend zu Reflexionen führen, die im Zeitschnitt (C-Bild) zu Interferenzmustern führen. Diese Interferenzmuster sind in ihrer Struktur sehr eindeutig und entsprechen einem Fingerabdruck für die Messfläche auf einer Betonoberfläche. Weiter soll der Einfluss gezeigt werden, den die Antennenfrequenz, Antennenorientierung und die Gesteinskörnung auf die Interferenzmuster haben.

Anhand einer quantitativen Erfassung der Streuungen der Radarwellen an der Gesteinskörnung soll ein Zusammenhang zu der bauphysikalischen Heterogenität von Beton, im Sinne einer Sieblinie, festgestellt werden. Die bisherige Betrachtung von Beton im Zusammenhang mit dem Radarverfahren geht von einem homogenen Baumaterial aus. Bei gleichbleibender Betonqualität wird mit einer mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit gerechnet. Die Streuungen der Radarwelle an der Gesteinskörnung führen zu einer ständigen Energieabnahme der Radarwelle neben der Abnahme durch die räumliche Ausbreitung. Die Energieabnahme durch die Streuung hat aber keinen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwelle. Die Heterogenität von Beton spielte deshalb bei der Rekonstruktion der inneren Konstruktion mit dem Radarverfahren keine Rolle. In dieser Arbeit soll weiterführend die Streuung der Radarwellen an der Gesteinskörnung quantitativ charakterisiert und untersucht werden, um mit Hilfe des Radarverfahrens die Heterogenität von Beton als Materialkennwert zu erfassen. Die Streuungen sollen quantitativ durch einen Effektivwert der Streuamplituden charakterisiert werden. Mit der quantitativen Erfassung der Streuung soll an zwei unterschiedlichen Betonen mit den Sieblinien für das Größtkorn GK16 und GK32 gezeigt werden, dass das Radarverfahren in der Lage ist diese zu unterscheiden.

Die Streuungen der Radarwelle an der Gesteinskörnung ähneln einem Rauschen, wie es auch bei elektronischen Geräten auftritt. Damit das elektronische Rauschen die quantitative Erfassung der Streuung mittels Effektivwert nicht verfälscht, soll gezeigt werden, wie durch eine geschickte räumliche Filterung der Anteil des elektronischen Rauschens am Effektivwert stark reduziert werden kann.

Die fortlaufenden Streuungen im Volumen haben auch einen direkten Einfluss auf die Reflexionen an strukturellen Einbauteilen, wie z. B. Bewehrung oder einer Rückwand. Der Einfluss auf die Reflexionen an Einbauteilen soll anhand einer

systematischen Untersuchung der Reflexionen an Bewehrungsstäben in Beton und der Reflexionen an einer Metallplatte unter unterschiedlichen Schütthöhen von Quarzkies gezeigt werden. Ausgewertet werden die Schwankungen der Reflexionsamplituden entlang eines Bewehrungstabes in Beton und die Abnahme der mittleren Reflexionsamplitude an einer Metallplatte unterhalb einer Quarzkiesschüttung in Abhängigkeit von der Schütthöhe und der Sieblinie. Die Streuung wird größer bei Annäherung zwischen der Abmessung des Größtkorns und der Wellenlänge und führen dadurch zu einer stärkeren Dämpfung der Radarwelle im Material.

Die wesentlichen Ziele dieser Arbeit sind die Beantwortung der folgenden sechs Fragen:

- Wie lässt sich die Streuung von Radarwellen an der Heterogenität von Beton visuell darstellen?
- Wie lässt sich diese Streuung quantitativ erfassen?
- Wie lässt sich diese Streuung in den empfangenen Signalen vom elektronischen Rauschen des Radarsystems trennen?
- Wie unterscheiden sich quantitativ diese Streuungen von Radarwellen in den zwei Betonen mit den Sieblinien von GK16 oder GK32?
- Wie stark schwanken die Amplituden der Reflexionen entlang eines Bewehrungsstabs aufgrund dieser Streuungen?
- Wie stark unterscheidet sich die Dämpfung dieser Streuungen für zwei unterschiedliche Größtkörner?

2 Grundlagen

2.1 Radar im Bauwesen

Das Radarverfahren ist in den letzten zwanzig Jahren ein wichtiges Prüfverfahren für die „Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen“ geworden. Die Möglichkeit der Darstellung des inneren Aufbaues von schlaffer und vorgespannter Bewehrung in Stahlbetonbauwerken, wie z. B. Brücken, hat dazu wesentlich beigetragen (n.n. 1997, Bungey, Millard und Shaw 1997, Krause, Krieger und Wiggenhauser 1999, Maierhofer und Kind 2002, Hugenschmidt und Mastrangelo 2006, Kind, Trela und Wöstmann 2009, Kind, Feistkorn, et al. 2012).

Wichtige Merkmale des Radars für das Bauwesen sind von der geophysikalischen Untersuchungsmethode des Bodenradars übernommen worden, das nach dem zweiten Weltkrieg entwickelt wurde und seitdem erfolgreich für geophysikalische Bodenuntersuchungen eingesetzt wird (Daniels 2004, Jol 2008). U. a. wurde das Verfahren bei der Erkundung des inneren Aufbaues des Mondes verwendet (Simmons, et al. 1973).

Allgemein bekannt ist aber Radar für seine am weitesten verbreitete Anwendung zur Überwachung von Objekten in der Luft oder auf See für militärische und zivile Zwecke. Im Rahmen dieser Anwendung wurde auch der Name RADAR geprägt, der die englische Abkürzung für ***R**adio **A**ircraft **D**etection and **R**anging* ist. Eine weitere Anwendung des Radars ist die Fernerkundung der Erdoberfläche mit elektromagnetischen Wellen, die seit der Stationierung von Satelliten in den Umlaufbahnen von Himmelskörpern, z. B. Erde oder Mond, möglich ist.

Gemeinsames Merkmal aller genannten Anwendungen ist das Aussenden und Empfangen elektromagnetischer Wellen mit Hilfe von Antennen. Die empfangenen elektromagnetischen Wellen entstehen durch Reflexion oder Streuung an Objekten, deren elektrische und magnetische Materialeigenschaft sich von ihrer Umgebung unterscheiden. Radar im Bauwesen und besonders für die Untersuchung von Stahlbeton unterscheidet sich von den anderen Anwendungen im Wesentlichen in zwei Punkten. Der erste Punkt ist, dass die Radarantenne in einen Materialhalbraum (z. B. Beton) abstrahlt, und dass der Materialhalbraum auch inhomogene Materialeigenschaften haben kann. Radar für die Flug- oder Seeüberwachung dagegen strahlt ausschließlich in Luft ab. Der zweite Punkt, in dem sich das Radar im Bauwesen von den übrigen Anwendungen unterscheidet, ist die räumliche Ausdehnung, in der abgestrahlt, reflektiert und empfangen wird. So erstreckt sich dieser Bereich im Bauwesen direkt von der Antenne bis zu wenigen Mehrfachen der verwendeten Wellenlängen. Die Reichweiten der Wellen im Beton können bis zu einen Meter betragen je nach Art der verwendeten Radarantenne. Alle anderen Anwendungen, die hier genannt wurden, erstrecken sich über einen Bereich, der deutlich ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt. So werden bei der Fernerkundung mit Satelliten ähnliche Frequenzen verwendet wie bei der Untersuchung von

Stahlbeton mit Radar (f=100 MHz..5 GHz), aber die typischen Entfernungen betragen mehr als 200 km, was in Luft bei 5 GHz mehr als den Dreimillionfachen der Wellenlänge entspricht.

Entscheidend bei der Dimensionierung eines Radarsystems ist der notwendige Wellenlängenbereich. Die Wellenlängen werden einerseits durch das gewünschte Auflösungsvermögen von benachbarten Reflektoren bestimmt und anderseits von der technischen Umsetzung der Größe der Radarantennen eingeschränkt. Da für eine effektive Abstrahlung die Abmessung der Antenne etwa ¼ bis einer Wellenlänge entsprechen soll, führen die Anforderungen an die Wellenlängen für die Flugüberwachung in der Größenordnung von einigen Metern zu sehr großen Antennen. Aus technischen Gründen werden daher eher kleinere Wellenlängen gewählt, damit die Größe der Antenne noch technisch sinnvoll umgesetzt werden kann.

Im Gegensatz zum Radar für die Flug- und Schiffsüberwachung sind die gewünschten Wellenlängen für das Radar im Bauwesen für Stahlbetonuntersuchungen eher im Bereich von wenigen cm bei Frequenzen im Bereich von 1 - 4 GHz. Die minimale Wellenlänge wird durch die notwendige Detektionsreichweite festgelegt. So sind die Wellenlängen mit entsprechenden Frequenzen oberhalb von 2 - 4 GHz kaum noch sinnvoll, da die Detektionsreichweite aufgrund von Streuungen dann auf weniger als 0,1 m sinkt.

In den folgenden Abschnitten wird nur auf das Impulsradar eingegangen, wie es im Bauwesen überwiegend eingesetzt wird, und wie es ausschließlich in dieser Arbeit verwendet wurde.

2.2 Prinzip des Radars

Das Radarverfahren ist ein Echo-Verfahren, in dem die Laufzeit und Stärke von elektromagnetischen Reflexionen gemessen wird. Damit Reflexionen an Objekten (Reflektoren) entstehen können, wird eine elektromagnetische Impulswelle mittels einer oder zweier Antennen ausgesendet und wieder empfangen. Im Bauwesen wird überwiegend mit zwei getrennten Antennen gesendet und empfangen, die in einem Gehäuse eingebaut sind. Die Sendeantenne wird mit TX und die Empfangsantenne mit RX bezeichnet.

Die Wellenausbreitung für das Radarverfahren ist in Abbildung 1 am Beispiel der Reflexion an einem Bewehrungsstab dargestellt. Dargestellt ist die örtliche Verteilung der elektrischen Feldstärke in y-Richtung für unterschiedliche Momentaufnahmen. Positive Werte der Feldstärke sind in roten und negativen Werte in blauen Farben skaliert. Von der Sendeantenne TX wird punktförmig eine Impulswelle ausgesendet, die sich anschließend halbkreisförmig im Beton ausbreitet. Beim Auftreffen auf den Bewehrungsstab (x=0,5 m; y=0,125 m) entsteht eine reflektierte Welle, die sich zylinderförmig in alle Richtungen ausbreitet. Nach dem Zweifachen der Laufzeit für

den Hinweg zum Bewehrungsstab wird die Reflexion vom Bewehrungsstab an der Empfangsantenne RX empfangen. Der Verlauf des Empfangssignals an der Empfangsantenne RX ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Zeitpunkte der vier Wellenbilder aus Abbildung 1 sind in Abbildung 2 mit senkrechten und gestrichelten Linien markiert und mit Nummern in Kreisen entsprechend Abbildung 1 gekennzeichnet. Eine wichtige Eigenschaft des Radars im Bauwesen ist das ständige Vorhandensein eines ersten Empfangsimpulses durch die vom Sender sich ausbreitende und am Empfänger vorbeilaufende Impulswelle. Dieser Impuls wird als direkte Welle bezeichnet, da sich die zugehörige Welle auf direktem Wege ohne eine Reflexion vom Sender zum Empfänger ausbreitet. Die direkte Welle ist immer das erste Signal, das empfangen wird.

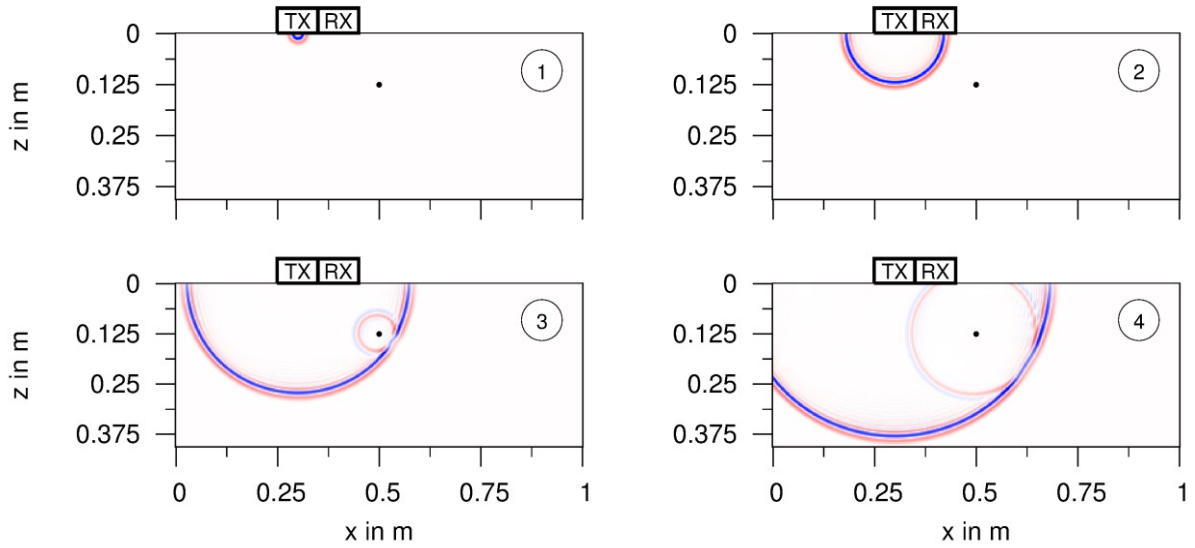

Abbildung 1 Prinzip der Wellenausbreitung des Radarverfahrens am Bespiel der Reflexion an einem Bewehrungsstab (x=0,5 m; y=0,125 m)
①: Aussenden der Impulswelle an der Sendeantenne TX,
②: Ausbreitung der ausgesendeten Welle,
③: Reflexion am Bewehrungsstab,
④: Empfangen der reflektierten Welle an der Empfangsantenne RX

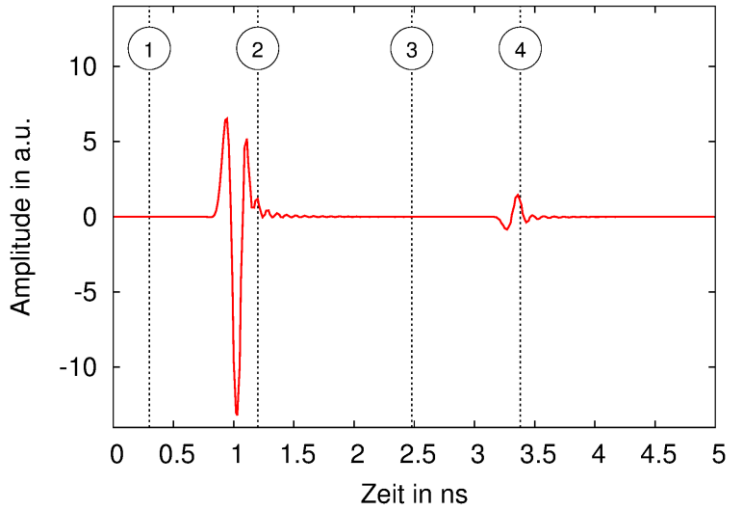

Abbildung 2 Verlauf des Empfangssignals der Empfangsantenne RX aus Abbildung 1; markiert (gestrichelte Linie) und gekennzeichnet (Zahl im Kreis) sind die vier Zeitpunkte der Wellenbilder aus Abbildung 1

In den meisten Fällen werden für eine vollständige Radarmessung entlang einer Linie mehrere Messungen mit einem konstanten Abstand zwischen den Messpunkten durchgeführt, so dass mögliche Reflektoren aus unterschiedlichen Entfernungen und „Blickrichtungen“ von der elektromagnetischen Impulswelle bestrahlt werden. Zur Interpretation der Ergebnisse werden die einzelnen Diagramme der empfangenen Reflexionen in Spalten von Pixeln gewandelt, deren Farbton entsprechend den Abtastwerten kodiert wird (Abbildung 3, links).

Die Darstellung des Diagramms von Reflexionen, die an einem Punkt empfangen werden, wird als A-Scan oder Einzelspur bezeichnet. Die aneinander gereihte zweidimensionale Darstellung der farbkodierten A-Scans wird als B-Scan oder Radargramm bezeichnet (Abbildung 3, rechts).

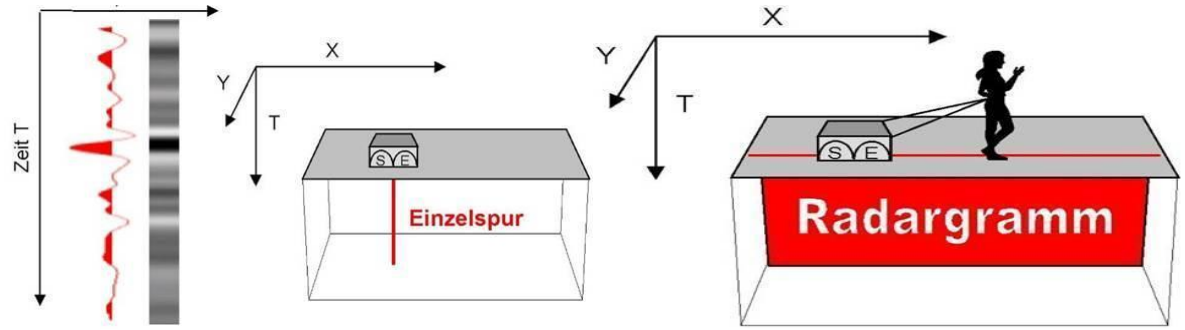

Abbildung 3 Schematische Illustration eines A-Scans (Einzelspur) und B-Scans (Radargramm) (DGZfP 2008)

Radarantennen können aus allen Raumwinkeln des Halbraums Reflexionen empfangen. Aus diesem Grund lässt sich aus der einfachen Laufzeit der Reflexion nur die Entfernung des Reflektors zur Antenne bestimmen, aber nicht die Richtung des Reflektors zur Antenne. Nähert sich die Antenne einem Reflektor, wie z. B. beim Überfahren eines Bewehrungsstabs, verkürzt sich auch die Laufzeit der Reflexion und wird minimal, wenn die Antenne sich direkt über den Bewehrungsstab befindet. Nach dem Überfahren des Bewehrungsstabs vergrößert sich die Laufzeit wieder. Im Radargramm entsteht das typische Bild einer Hyperbel (Abbildung 4, rechts).

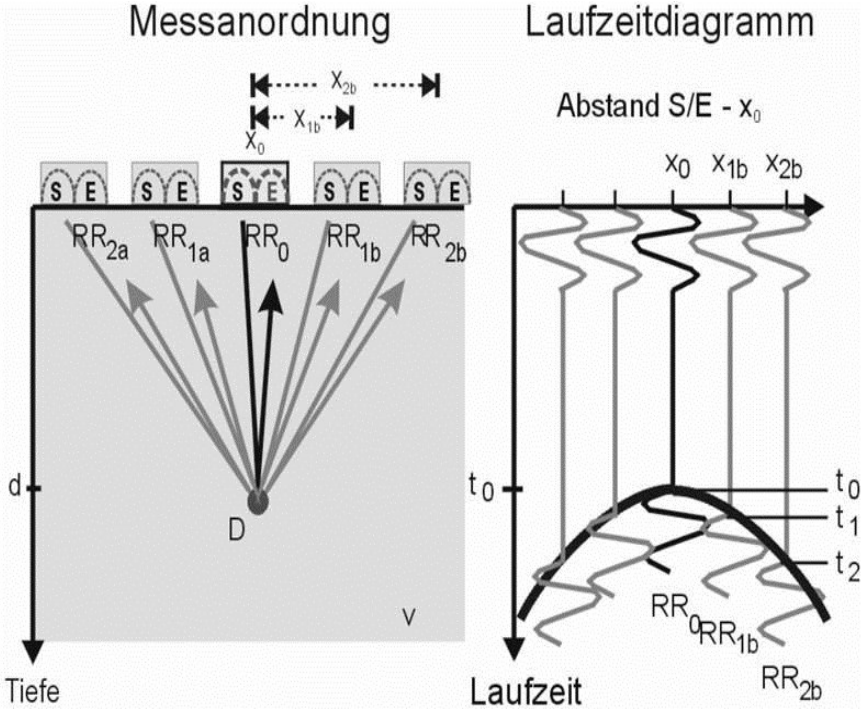

Abbildung 4 Entstehung einer Hyperbel Radargramms/Laufzeitdiagramms beim Überfahren eines Bewehrungsstabes mit einer Antenne (DGZfP 2008)

Die ortsabhängigen Laufzeiten *t* einer Hyperbel lassen sich berechnen in Abhängigkeit der Tiefe *d* des Bewehrungsstabs und der horizontalen Entfernung x_i vom Scheitelpunkt:

$$t = \frac{2}{v}\sqrt{d^2 + {x_i}^2} \tag{1}$$

Die Gleichung entspricht der Gleichung für den Schnitt einer Ebene mit einem Doppelkegel, der bereits in der Antike als Hyperbel bezeichnet wurde.

Die Einbautiefe *d* der Reflektoren wird aus der kürzesten Laufzeit t_0 und der Ausbreitungsgeschwindigkeit *v* der elektromagnetischen Wellen im Material berechnet:

$$d = \frac{v}{2t_0} \tag{2}$$

Reflexionen oder Streuungen von elektromagnetischen Wellen können nur entstehen, wenn sich die magnetischen und elektrischen Eigenschaften des Materials im Raum verändern. Im Bauwesen werden zwei Arten von Reflexionen beim Radarverfahren unterschieden. Einmal ist es die metallische Reflexion an elektrisch gut leitenden Materialien, was im Wesentlichen für alle Metalle aus dem Bauwesen zutrifft. Zum anderem ist es die dielektrische Reflexion an nicht leitenden Objekten, deren Permittivität sich von der ihrer Umgebung unterscheidet.

Grund für die Reflexionen an Metallen ist die Entstehung von Leitungsströmen auf der Oberfläche des Metalls durch die einfallende Welle. Aufgrund der Maxwellschen Gleichung müssen die tangentialen Komponenten der elektrischen Feldstärke an einer Metalloberfläche verschwinden. Beim Übergang der einfallenden Welle von

einer nicht leitenden Umgebung in das Metall muss deshalb auf der Metalloberfläche eine reflektierte Welle entstehen mit umgekehrten Vorzeichen, so dass das resultierende Feld auf der Oberfläche sich auslöscht. Die reflektierte Welle bewegt sich mit umgekehrtem Vorzeichen im Vergleich zur einfallenden Welle von der Oberfläche weg. Im Metall selber löscht sich die einfallende Welle mit der Welle aus den Leitungsströmen an der Oberfläche aus. Dieser Fall für die Reflexion an gut leitenden metallischen Reflektoren wird als Totalreflexion bezeichnet. Die Vorzeichen der elektrischen Feldstärken der reflektierten Welle in Bezug zur einfallenden Welle sind bei einer Totalreflexion immer gegensätzlich.

Der zweite Grund für Reflexionen von Radarwellen in Baustoffen sind Materialübergänge, die nicht leitend sind, aber unterschiedliche relative Permittivitäten (veraltet: relative Dielektrizitätskonstante) haben. Die relative Permittivität ist eine Materialeigenschaft nicht leitender Materialien und kennzeichnet die Schwächung eines äußeren elektrischen Feldes durch die nicht frei beweglichen Ladungen im Inneren des Materials. Beim Übergang des elektrischen Feldes zwischen zwei nicht leitenden Materialien lässt sich aus den Maxwellschen Gleichungen und den Bedingungen für die Verschiebungsströme das Verhältnis zwischen der reflektierten Welle und der einfallenden Wellen berechnen (s. Abschnitt 2.7). Die geometrische Form und Größe eines Reflektors aus Metall oder auch aus einem nicht leitenden Material bestimmt zusätzlich neben dem Unterschied in der Permittivität die Größe der Reflexion. Durch eine dielektrische Reflexion können z. B. mit Luft gefüllte Hohlräume oder Kunststoffrohre in Beton geortet werden.

2.3 Aufbau des Radarsystems

Ein Impuls-Radarsystem für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen besteht aus den folgenden Komponenten:

- Controller
- Pulsgenerator
- Antenne
- Vorverstärker
- Sampling / ADC Einheit
- Messrad / Taster (Triggereingang)

Die sechs Komponenten sind über Steuer- und Datenleitungen miteinander verschaltet, wie in Abbildung 5 dargestellt. Zusätzlich kommt bei einigen Radarsystemen noch ein Computer hinzu, der als alternative Nutzerschnittstelle dient. Mit dem Controller oder dem Computer werden Geräteeinstellungen vorgenommen und der Ablauf der Messung gesteuert. Auf einem Bildschirm des Controllers oder Computers werden die Messdaten dargestellt und bearbeitet.

Radarsysteme mit der Möglichkeit die Antennen zu wechseln, oder auch mehrere Antennen gleichzeitig zu betreiben, werden als universelle Radarsysteme bezeichnet. Im Gegensatz zu einem universellen Radarsystem ist bei einem Radar-Kompaktgerät eine oder sind mehrere Antennen im Gerät fest integriert. Die Antennen können nicht gewechselt werden. Der Anwendungsbereich der Kompaktgeräte ist auf bestimmte Prüfaufgaben, wie z. B. die Bewehrungsortung oder die Leitungsortung, eingeschränkt. Kompaktgeräte werden meistens mit Akkus betrieben.

Der Controller hat die Aufgabe den Ablauf einer Radarmessung zu steuern, und die Messdaten zwischenzuspeichern. Für den Ablauf einer Radarmessung kontrolliert der Controller die Erzeugung des Sendeimpulses im Pulsgenerator, die Verstärkereinstellung des Vorverstärkers und die Abtastung und Digitalisierung des Empfangssignals in der Sampling / ADC Einheit.

Bei den Universalgeräten wird die Antenne über ein Kabel an den Controller angeschlossen. Im Antennengehäuse sind in der Regel neben der Sende- und Empfangsantenne auch der Pulsgenerator, der Vorverstärker und häufig auch die Sampling / ADC Einheit integriert, so dass das Kabel zur Antenne nur Leitungen für die Spannungsversorgung, die Triggersignale und für die digitale Übertragung der digitalisierten Abtastwerte umfasst.

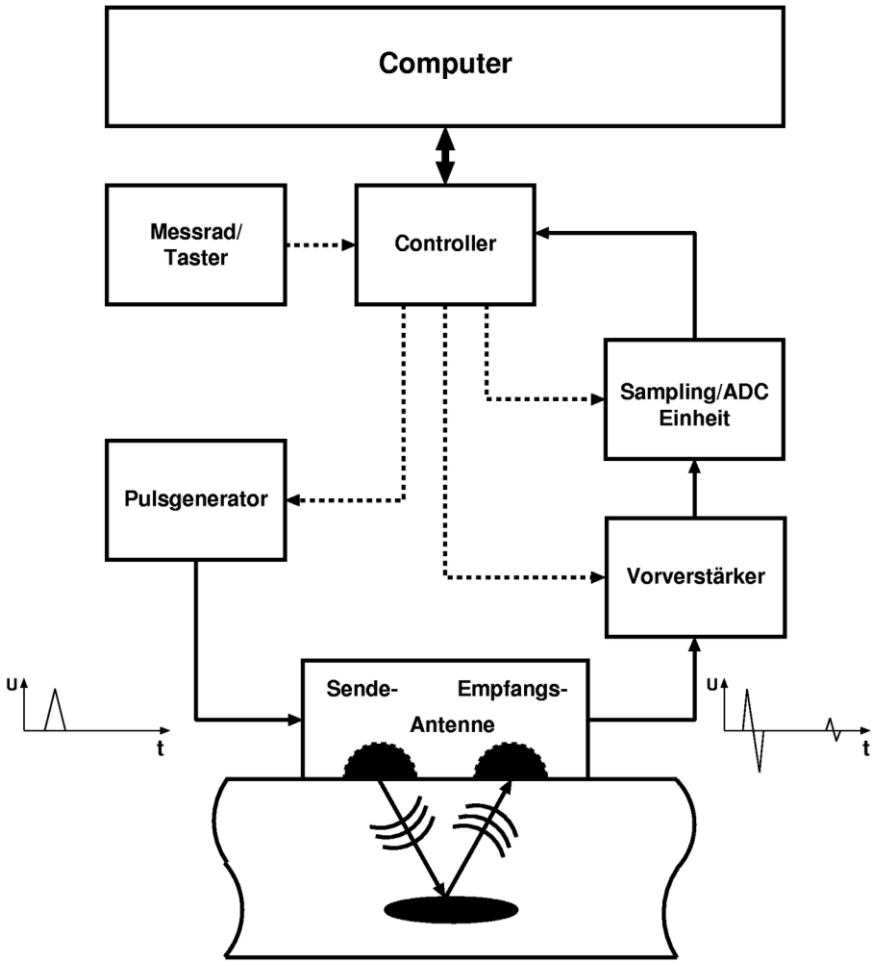

Abbildung 5 Blockschaltbild eines Impuls-Radarsystems (Kind und Maierhofer 2004)

Radarsignale für Betonuntersuchungen benötigen meistens eine Abtastung mit Frequenzen größer 10 GHz. Eine Echtzeitabtastung des Empfangssignals ist für solch hohe Frequenzen z.Zt. noch mit einem hohen technischen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund wird eine sequentielle Abtastung anstelle einer Echtzeitabtastung vorgenommen. Bei einer sequentiellen Abtastung wird pro Sendeimpuls immer nur eine Abtastung vorgenommen, die beim nächsten Sendeimpuls zeitlich um den Kehrwert der Abtastfrequenz versetzt ist. Für die gesamte Abtastung des Empfangssignals muss deshalb der Pulsgenerator entsprechend der Anzahl der Abtastungen genauso häufig das Sendesignal erzeugen. Typische Wiederholfrequenzen des Pulsgenerators liegen bei 100 kHz. Bei einer Anzahl von typischerweise 500 Abtastwerten werden für eine vollständige sequentielle Abtastung in etwa 5 ms benötigt, bevor eine neue Radarmessung durchgeführt werden kann. Die Pulswiederholfrequenz mit der Anzahl der Abtastwerte ist für die sequentielle Abtastung eines Impulsradarsystems maßgebend für die Bewegungsgeschwindigkeit der Antenne. Wird z. B. alle 5 mm eine Radarmessung durchgeführt, ergibt sich eine maximale Bewegungsgeschwindigkeit von 1 Meter pro Sekunde bei einer Pulswiederholfrequenz von 100 kHz und 500 Abtastwerten. Moderne Radargeräte haben eine Pulswiederholfrequenz, die deutlich höher als 100 kHz ist, und damit eine schnellere Radarmessung ermöglicht, wie sie bei der Befahrung von Straßen mit Radar unter laufendem Verkehr z. B. notwendig ist.

Neben dem hier beschriebenen Impulsradarsystem gibt es noch Step-Frequency und CW (continous wave) Radarsysteme, die mit harmonischen Schwingungen im Frequenzbereich arbeiten (Daniels 2004). Weiter gibt es noch Rauschradarsysteme, die mit pseudo Zufallsimpulsfolgen arbeiten (Sachs, Peyerl und Alli 2004, Reeves und Muller 2012). Auf die alternativen Radarsysteme zum Impulsradarsystem wird hier nicht weiter eingegangen, da für die vorliegende Arbeit ausschließlich ein Impulsradarsystem verwendet wurde.

2.4 Betrachtung im Zeit- und Frequenzbereich

In der Funktechnik oder auch in der allgemeinen Radartechnik, wie sie zur Flugüberwachung angewendet wird, wird häufig mit Kenngrößen gearbeitet, die nur für eine bestimmte Frequenz gelten, wie z. B. die Wellenlänge. Da aber die grundlegende Radarmessung eine zeitliche Messung ist, nämlich der zeitliche Verlauf einer Reflexion, führt dies häufig zu Irritationen. Z. B. wird die Abstrahlcharakteristik für eine Antenne meistens nur für eine einzige Frequenz dargestellt. Die Verwendung der Abstrahlcharakteristik für eine bestimmte Frequenz auch im Zeitbereich ist aber nur für schmalbandige Antennen annähernd möglich. Die Antennen des Radars für das Bauwesen sind aber besonders breitbandig, mit einer relativen Bandbreite von etwa 100%. Für diese Antennen müssen eigene Abstrahlcharakteristiken im Zeitbereich erstellt werden. Aus diesem Grund soll hier der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Kenngrößen im

Frequenzbereich und den Kenngrößen im Zeitbereich von Radar kurz erläutert werden.

Bei einer idealisierten Betrachtung von Radar wird im Zeitbereich ein Dirac-Impuls oder Delta-Impuls mit unendlich großer Amplitude und verschwindend kleiner Pulsbreite als Welle von einer Punktquelle ausgesendet und die Reflexionen am gleichen Punkt wieder empfangen. Der Dirac-Impuls hat den Vorteil, dass es keine Überlagerung mit dicht aufeinanderfolgenden Reflexionen gibt, weil die Pulsdauer null beträgt. Der Dirac-Impuls ist eine mathematische Abstraktion und kommt in der Natur nur näherungsweise vor. Wird vom Zeitbereich in den Frequenzbereich mit Hilfe der Fourier-Transformation gewechselt, werden anstelle des zeitlichen Verlaufs eines Signales die Amplituden und Phasen einer harmonischen Schwingung in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt. Die Fourier-Transformation des Dirac-Impulses hat einen konstanten Amplituden- und einen linearen Phasenverlauf für alle Frequenzen. Die Bandbreite ist unendlich. Aus diesem Grund wird für Radar mit einer sehr guten Auflösung immer auch eine hohe Bandbreite gefordert.

In der Praxis wird der oben beschriebene Idealfall durch die technische Umsetzung der Signalerzeugung, der Empfangsverstärkung, der Abstrahlung und den Empfang mit Antennen eingeschränkt. Für alle Baugruppen sind nur endliche Bandbreiten im Vergleich zum Dirac-Impuls möglich, aus den folgenden beiden Gründen:

- Endliche Bandbreite der Sende- und Empfangsantenne
- Endliche Anstiegszeit des Signalgenerators und des Empfangsverstärkers

Beide Einschränkungen sorgen dafür, dass der zeitliche Verlauf der abgestrahlten Feldgrößen eine von null verschiedene Pulslänge und eine endliche Pulshöhe im Vergleich zum Dirac-Impuls aufweisen. Aber wesentlich stärker ist die Einschränkung durch das Material selber. So nimmt die Eindringtiefe von Radarwellen im Allgemeinen für höhere Frequenzen ab, so dass beliebig große Bandbreiten durch das Material selbst begrenzt werden. Das Material selber wirkt dann wie ein Tiefpassfilter.

Aus diesem Grund sind auch in den letzten Jahren keine neuen Radargeräte für das Bauwesen auf dem Markt gebracht worden, die noch höhere Frequenzen und damit größere Bandbreiten abstrahlen können, da die für Radar wichtigen Größen wie Auflösungsvermögen und Detektionsreichweite im Bauwesen mehr durch das Material eingeschränkt sind als durch die Gerätetechnik. Für die Bewehrungssuche in Beton liegen die maximalen Frequenzen, die mit kommerziellen Geräten noch ausgesendet werden, bei etwa 4 GHz. Die Detektionsreichweite liegt dann deutlich unter 0,20 m. Es gibt Ausnahmen von Geräten mit Frequenzen größer als 4 GHz, die aber keine große Verbreitung haben, da sie nur für sehr spezielle Anwendungen verwendet werden, wie z. B. Schichtablösung.

2.5 Antennenpolarisation

Die Polarisation eines elektromagnetischen Feldes kennzeichnet die Richtung und den Verlauf der vektoriellen Feldkomponenten des magnetischen und elektrischen Feldes im Raum. Wird das elektromagnetische Feld von einer Antenne empfangen oder ausgesendet, spricht man bei der Polarisation eines solchen Feldes von Antennenpolarisation. Normalerweise bezieht sich die Antennenpolarisation auf die elektrischen und nicht auf die magnetischen Feldkomponenten.

Es wird zwischen zwei grundlegenden Polarisationen unterschieden. Die lineare Polarisation schwingt immer in derselben Richtung, aber mit veränderlicher Amplitude. Die zirkulare Polarisation besitzt eine konstante Amplitude, deren Richtung sich gleichförmig ändert, so dass die Projektion des Vektors auf die zum Ausbreitungsvektor senkrechte Ebene eine Kreisbahn beschreibt. Beide Polarisationen können auch gleichzeitig auftreten, so dass eine elliptische Polarisation entsteht. Die Antennenpolarisation wird durch die Bauform der Antenne bestimmt.

Radarantennen für das Bauwesen sind überwiegend linear polarisiert. D. h. in jedem Raumpunkt entlang der Ausbreitungsrichtung einer sich ausbreitenden Welle ist die Richtung der Feldkomponenten konstant. Zwischen zwei Raumpunkten mit unterschiedlicher Ausbreitungsrichtung kann sich die Richtung der Polarisation aber unterscheiden, was häufig nicht beachtet wird, da die Radarantennen meistens eine Hauptrichtung der Antennenpolarisation aufweisen, die parallel zur Antennenachse verläuft. Die Vektor-Feldkomponenten, die senkrecht zur Antennenachse schwingen, sind aber erheblich kleiner und werden deshalb vernachlässigt.

Eine wichtige Rolle spielt die Antennenpolarisation bei der Untersuchung von bewehrtem Beton, da die Reflexion auch von der Ausrichtung der Antennenpolarisation und der geometrischen Form des Reflektors abhängt. Deutlich ausgeprägt ist dieser Effekt bei den Reflexionen an dünnen metallischen Stäben (< 28 mm) wie der schlaffen Bewehrung. Ist die Antennenpolarisation oder die Antennenachse parallel zur Bewehrung ausgerichtet, ist die Reflexion deutlich stärker als bei einer Ausrichtung der Antennenpolarisation, in der die Antennenpolarisation senkrecht zur Bewehrung zeigt. Der Unterschied in der Reflektivität durch die Antennenorientierung zum Bewehrungsstab entsteht durch den Leitungsstrom, der durch die einfallende Welle auf der Oberfläche der metallischen Bewehrung erzeugt wird. Der Leitungsstrom kann ungehindert entlang eines Bewehrungsstabes fließen, wenn die Antennenpolarisation parallel zum Bewehrungsstab ausgerichtet ist. Bei senkrechter Antennenpolarisation zur Bewehrung steht für den Leitungsstrom nur der sehr viel kleinere Querschnitt der Bewehrung zur Verfügung. Die durch den Leitungsstrom verursachte Reflexion ist deshalb deutlich kleiner als bei einer parallelen Ausrichtung der Antennenpolarisation. Die Bewehrung kann auch als sekundäre Antenne betrachtet

werden, die besonders effektiv ist, wenn die Leitungsströme in Richtung der Bewehrung fließen können.

Bei der Anwendung von Radar zur Bewehrungssuche werden deshalb auch immer zwei Sätze von parallelen Messlinien, die zueinander senkrecht sind, auf der Bauteiloberfläche aufgenommen (Abbildung 6). Dadurch werden möglichst alle Bewehrungen einmal senkrecht überfahren. Würden Messlinien nur in einer Richtung aufgenommen, würde die Bewehrung, die senkrecht zur Antennenpolarisation verläuft, nicht oder sehr schwach erfasst werden.

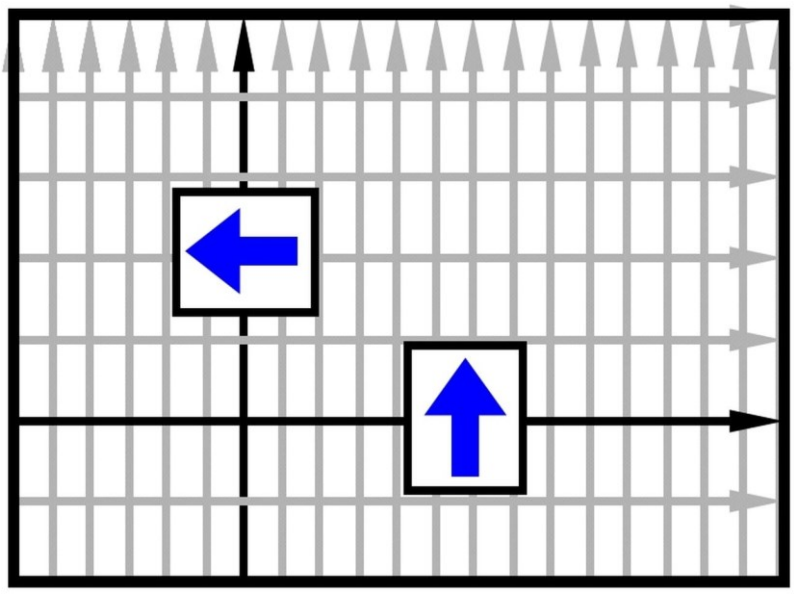

Abbildung 6 Messfeld mit Messlinien für die Ortung von Bewehrung; Messlinien sind senkrecht zueinander, um das Messfeld vollständig mit vertikaler und horizontaler Orientierung der Antennenpolarisation (blauer Pfeil) aufzunehmen

Der Unterschied der Reflexion an der Bewehrung durch verschiedene Orientierung der Antennenpolarisation verkleinert sich mit steigendem Querschnitt der Bewehrung. Bei vorgespannter Bewehrung ist der Unterschied zwischen den Reflexionen mit unterschiedlicher Antennenpolarisation deutlich geringer aufgrund des großen Querschnittes der Bewehrung. Die Querschnitte der metallischen Hüllrohre sind typischerweise größer als 35 mm. Die Abhängigkeit der Reflexionen vom Querschnitt der Bewehrung wird auch eingesetzt, um schlaffe Bewehrung von vorgespannter Bewehrung zu unterscheiden. Werden parallel verlaufende schlaffe und vorgespannte Bewehrungen nacheinander mit paralleler und senkrechter Antennenpolarisation quer zur Bewehrung überfahren, lassen sich die Hüllrohre in beiden Radargrammen annähernd gleich deutlich identifizieren im Gegensatz zur schlaffen Bewehrung, die nur mit der parallelen Polarisation zu erkennen ist (Abbildung 7).

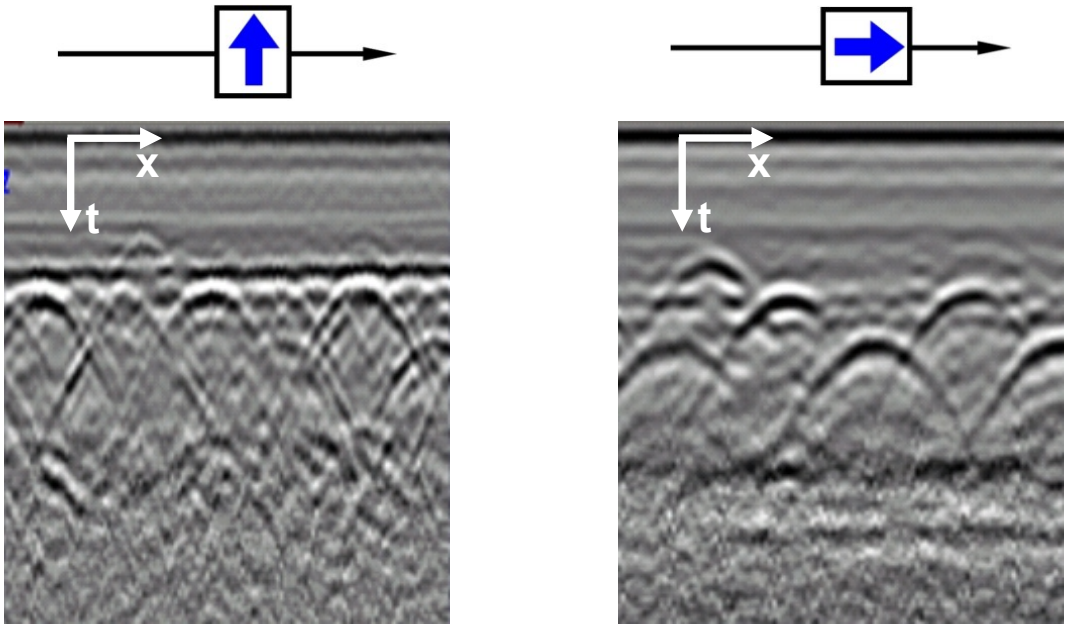

Abbildung 7 Praxisbespiel für gedrehte Antennenpolarisation; Radargramme aufgenommen auf einer Brückenplatte durch ca. 10 cm Asphalt; Antennenpolarisation (blauer Pfeil) links parallel zur Bewehrung orientiert, rechts senkrecht; links Hyperbeln der schlaffen Bewehrung und Spannkanäle; rechts nur Hyperbeln der Spannkanäle (Kind, Taffe, et al. 2013)

Die Amplitude der Reflexion an einer Bewehrung nimmt nicht stetig mit dem Querschnitt der Bewehrung ab, da die Bewehrung einen Durchmesser hat, der nur wenig unterhalb der Wellenlänge liegt. Dadurch entstehen verschiedene Reflexionen mit unterschiedlicher Phasenlage in einem Raumpunkt, die sich konstruktiv und destruktiv überlagern können. Dieser Effekt ist auch im optischen Bereich bekannt und wurde von Mie (Mie 1908) beschrieben.

2.6 Heterogenität von Beton

Die Heterogenität von Beton führt auch zu einer heterogenen Verteilung der Permittivität und verursacht deshalb viele einzelne Streuungen der elektromagnetischen Radarwellen. Aus diesem Grund soll in diesem Kapitel die Heterogenität des Betons näher beschrieben werden.

Beton setzt sich zusammen aus der Gesteinskörnung und dem Zementstein (Abbildung 8). Der Zementstein, im flüssigen Zustand als Zementleim bezeichnet, dient als Bindemittel für die Gesteinskörnung und entsteht bei der Herstellung von Beton aus Zement und Wasser. Der Zement reagiert chemisch mit dem Wasser und erhärtet dabei. Dieser Prozess wird als Abbinden bezeichnet und geht über einen Zeitraum von mehreren Wochen. Das Abbinden kann auch unter Wasser ablaufen, da das Erhärten des Betons nicht durch Austrocknen, sondern durch den chemischen Einbau des Wassers im Zementstein erfolgt. Je nach Menge des zugegebenen Wassers (Wasserzementwert) entstehen Luftporen im Zementstein und führen zu unterschiedlichen Festigkeiten und Güten des Betons.

Abbildung 8 Schnittfläche eines gesägten Betonprismas, Quarzkies umgeben mit Zementstein (Quelle www.euroquarz.de)

Zementstein und Gesteinskörnung von Beton sind jeweils für sich näherungsweise homogen. Erst durch die Kombination beider Stoffe wird Beton zu einem heterogenen Baustoff. Die Stärke der Heterogenität von Beton hängt von der Zusammensetzung der Gesteinskörnung ab. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung wird anhand einer sogenannten Sieblinie bestimmt.

Bei der Ermittlung der Sieblinie wird mit einem Satz von Sieben mit unterschiedlichen Maschenweiten der jeweilige Anteil des Siebdurchgangs für eine Maschenweite bestimmt und grafisch nach aufsteigender Maschenweite dargestellt (Abbildung 9). Auf der Abszisse wird die Maschenweite logarithmisch aufgetragen und auf der Ordinate der jeweilige Anteil, der durch das Sieb durchgegangenen Gesteinsfraktion. Alle Kurven steigen monoton und enden gemeinsam bei 100%. Verläuft die Kurve

erst flach und dann steiler, ist die Zusammensetzung der Gesteinskörnung eher grobkörnig.

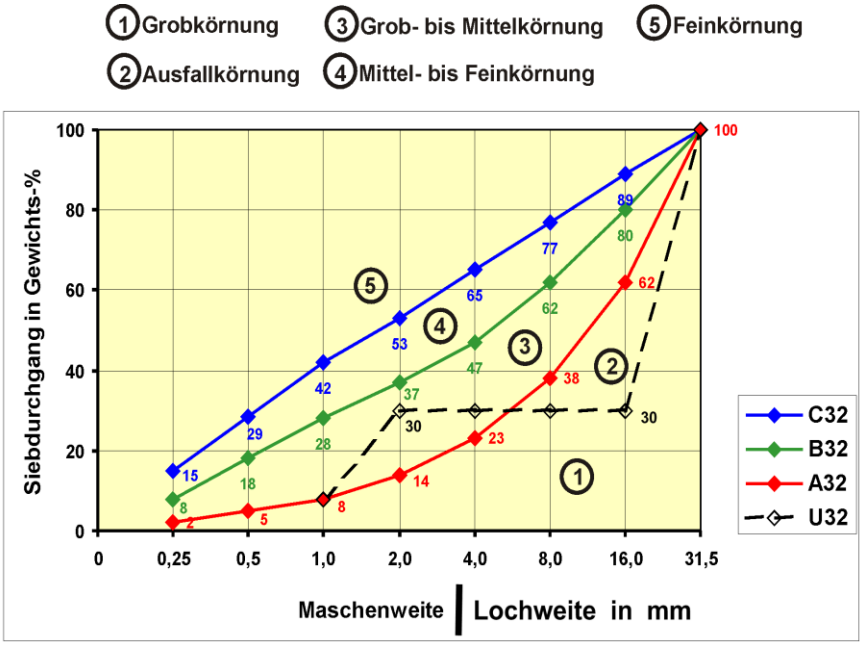

Abbildung 9 Verschiedene Sieblinien für ein Größtkorn 32 mm nach DIN 1045-2 / Anhang L (Quelle de.wikipedia.org/wiki/Gesteinskörnung)

Für Beton wird meistens eine kompakte Gesteinskörnung gewählt, um den Anteil des Zementsteins und damit den Bedarf an kostenintensivem Zement gering zu halten.

Die Art der Gesteinskörnung, die zur Herstellung von Beton verwendet wird, ist entweder kugelförmiger Quarzkies aus Kiesgruben oder gebrochener Stein wie z. B. Basalt oder Sandstein.

2.7 Streuung elektromagnetischer Wellen

In diesem Abschnitt wird die Streuung elektromagnetischer Wellen in Bezug auf das Radarverfahren im Bauwesen behandelt. Andere als elektromagnetische Streuungen, wie z. B. die optische Streuung, werden nicht behandelt.

Trifft eine elektromagnetische Welle auf Material mit elektrischen und magnetischen Eigenschaften (Leitfähigkeit, Permittivität, Permeabilität), die sich von denen der Umgebung unterscheiden, so wird ein Teil der Welle abgelenkt, zurückgeworfen oder er dringt in das Material ein. In diesem Zusammenhang werden die physikalischen Begriffe Streuung, Reflexion und Brechung verwendet. Die Begriffe überschneiden sich teilweise in ihrer Bedeutung und führen deshalb zu Verwechslung oder Unsicherheit bei der Anwendung. Aus diesem Grund werden hier noch einmal kurz die Bedeutungen dieser drei Begriffe erläutert und die Unterschiede aufgezeigt. Dabei wird nur auf den Bereich eingegangen, der für Radar im Bauwesen eine Rolle spielt.

Als **Streuung** wird der Vorgang bezeichnet, bei dem die einfallende Welle mit einem Objekt in Wechselwirkung tritt und dabei eine ausfallende Welle entsteht. Die Richtung der ausfallenden Welle unterscheidet sich von der der einfallenden. Damit es zu einer Wechselwirkung zwischen der elektromagnetischen Welle und einem Objekt kommt, müssen sich die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des Objektes von den Eigenschaften der Umgebung unterscheiden. Im Allgemeinen wird von Streuung gesprochen, wenn eine gerichtete Welle so gestreut wird, dass anschließend die Welle sich in mehrere beliebige Richtungen ausbreitet, wie z. B. die Streuung an einer rauen Oberfläche. Aber auch die Wechselwirkung einer Welle mit einem Bewehrungsstab entspricht einem Streuvorgang, da die ausfallende Welle sich in verschiedene Richtungen gleichzeitig ausbreitet. Bei dieser Streuung wird ein Teil der einfallenden Welle wieder in sich zurückgeworfen. Der Vorgang des Zurückwerfens der einfallenden Welle wird als **Reflexion** bezeichnet und ist Teil des Streuvorganges. Dringt die einfallende Welle in ein Objekt ein, so wird die einfallende Welle gebrochen, d. h., die Ausbreitungsrichtung ändert sich aufgrund der sich ändernden Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Die physikalische Bezeichnung für diesen Vorgang ist die **Brechung**. Dieser Begriff wird selten für Radar im Bauwesen verwendet. Eher wird von der Transmission der Wellen gesprochen, da die Schwächung der einfallenden Welle beim Übergang zwischen zwei Materialien eine größere Bedeutung für eine Radaruntersuchung hat als die Richtungsänderung. Der Vollständigkeit halber muss auch der Begriff **Beugung** erwähnt werden. Beugung ist Ursache für das Ausbreiten einer Welle auch in Bereiche, die nicht auf direktem Weg von der einfallenden Welle erreicht werden können. Bei Radar im Bauwesen findet auch Beugung statt, die aber nicht als eigenständiger Begriff benutzt wird, da der Vorgang der Beugung wie auch der der Reflexion Teil einer Streuung ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Begriffe Brechung und Beugung eher eine kleinere Rolle spielen als die Begriffe Streuung und Reflexion bei Radar im Bauwesen. Die Begriffe Streuung und Reflexion sind nicht scharf voneinander abgegrenzt.

Wird die Wellenfront am Material nur gespiegelt und behält ihre Form, wie z. B. an einer Bauteilrückwand oder Metallplatte (Abbildung 10), entspricht dieser Vorgang eher einer Reflexion. Dagegen entsteht bei der Wechselwirkung einer Welle mit einem Bewehrungsstab eine ausfallende Welle, die sich zylindrisch in alle Richtungen um den Bewehrungsstab ausbreitet (Abbildung 11). Die Bezeichnung Streuung ist für die Wechselwirkung einer einfallenden Welle mit der Bewehrung daher eher zutreffend als die gebräuchlichere Bezeichnung Reflexion.

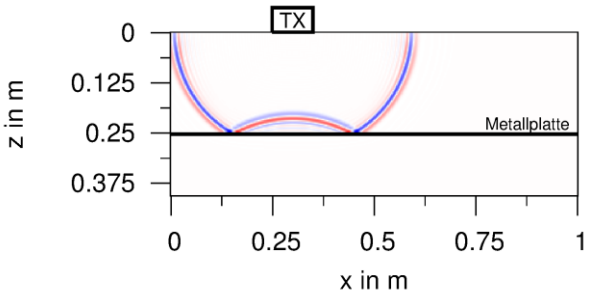

Abbildung 10 Reflexion einer Radarwelle an einer Metallplatte; die ausfallende Wellenfront wird gespiegelt

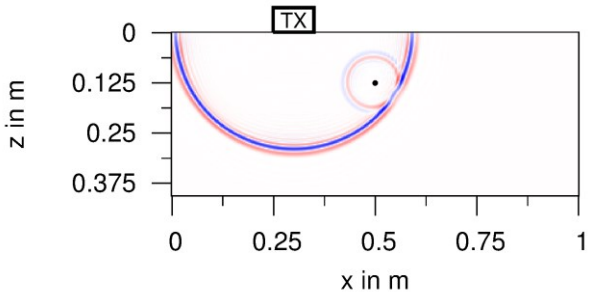

Abbildung 11 Streuung einer einfallenden Radarwelle an einem Bewehrungsstab, die ausfallende Wellenfront wird in alle Richtung zurückgeworfen

Nach dem Huygenschen Prinzip lässt sich eine reflektierte Welle an einer Ebene auch als Überlagerung vieler elementarer Punkt- oder Kugelwellen der einfallenden Wellenfront konstruieren. Auch dieses Beispiel zeigt, dass die Reflexion Teil der Streuung der Punkt- oder Kugelwellen an der Ebene ist.

Die hier behandelten Überlegungen zur Streuung betreffen bisher nur die Veränderung des Ausbreitungsweges einer Welle. Neben dem Ausbreitungsweg ändert sich auch die Stärke der ausfallenden Welle im Vergleich zur einfallenden Welle. Bei der Reflexion einer ebenen Welle an einer ebenen Grenzfläche berechnet sich das Verhältnis der Stärke der einfallenden zur ausfallenden Welle aus den Permittiviäten vor und nach der Grenzfläche. Vereinfacht lässt sich das Verhältnis r auch aus den beiden Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 vor und nach der Grenzfläche berechnen.

$$r = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \tag{3}$$

$$r = \frac{\sqrt{v_2} - \sqrt{v_1}}{\sqrt{v_2} + \sqrt{v_1}} \tag{4}$$

r : Reflexionsfaktor

ε_1: Permittivität Schicht 1

ε_2: Permittivität Schicht 2

v_1: Geschwindigkeit Schicht 1

v_2: Geschwindigkeit Schicht 2

In dieser Arbeit ist von besonderem Interesse die Wechselwirkung der Radarwelle mit der Gesteinskörnung von Beton. Auch diese Wechselwirkung entspricht einer Streuung der elektromagnetischen Radarwelle. Die Stärke der an der Gesteinskörnung gestreuten Welle ist dann einerseits vom dielektrischen Kontrast zwischen den Permittivitäten der Gesteinskörnung und des Zementsteins abhängig und anderseits vom Verhältnis der Größe der Gesteinskörnung zur Wellenlänge der Radarwelle. Die Feldstärken der am einzelnen Gesteinskorn gestreuten Radarwelle sind kleiner als die Feldstärken der an einer Rückwand oder Bewehrung reflektierten Radarwelle. Aus diesem Grund wird in der weiteren Arbeit die Streuung der Radarwelle an der Gesteinskörnung als schwache Streuung bezeichnet.

Die Streuung von elektromagnetischen Wellen an Objekten wird in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen der Wellenlänge λ und der Abmessung D eines Objektes in die drei Bereiche

- Rayleigh-Streuung ($D \ll \lambda$)
- Mie-Streuung ($D \approx \lambda$)
- optischer Fall ($D \gg \lambda$)

eingeteilt.

Der Wellenlängenbereich von Radar an Beton geht von 2 cm bis etwa 24 cm (f=0,5 GHz bis 4 GHz, v_{Beton}=0,12 bis 0,08 m/s). Daraus resultiert, dass der optische Fall eigentlich nur für großflächige Reflektoren wie eine Rückwand zutrifft. Für alle anderen Streuobjekte, wie Bewehrung oder auch die Gesteinskörnung, liegt der Fall der Mie- oder Rayleigh-Streuung vor. Die Gesteinskörnung von Beton hat durch die gewählte Sieblinie einen maximalen Durchmesser von typischerweise 16, 32 oder teilweise 64 mm und ebenso sind die Bewehrungsquerschnitte von schlaffer Bewehrung nicht viel größer als 28 mm. Die Abmessungen von Gesteinskörnung als auch Bewehrung liegen somit eher im oder unterhalb des verwendeten Bereichs der Wellenlängen von Radar an Beton.

Insbesondere bei Streuungen an Objekten in der Größenordnung der Wellenlänge treten Interferenzen auf, die neben einer Schwächung auch eine Verstärkung der ausfallenden Welle verursachen können. Sind die Objekte viel keiner als die Wellenlänge, streuen die Objekte gleichförmig in alle Richtungen und die Stärke ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge. Dieser Zusammenhang wurde erstmals 1871 durch John Strutt, später Lord Rayleigh, für den optischen Bereich beschrieben, wodurch er die Himmelsfärbungen anhand der Streuung von Sonnenlicht an Molekülen und Partikeln in der Atmosphäre erklären konnte (Rayleigh 1871, Rayleigh 1899, Bohren und Fraser 1985). Allgemein wird die Streuung an Objekten, die viel kleiner als die Wellenlänge sind, deshalb als Rayleigh-Streuung bezeichnet.

Eine allgemeine Theorie zur Berechnung der Streuung an homogenen dielektrischen Kugeln hat 1908 Gustav Mie aufgestellt, um die Streuung an einzelnen kugelförmigen Objekten zu berechnen (Mie 1908). Die Mie Theorie ist eine exakte

Lösung der Maxwellschen Gleichungen und basiert auf einer unendlichen Reihe von Wellenfunktionen. Als Mie-Streuung wird aber nur die Streuung an Objekten bezeichnet, deren Durchmesser in der Größenordnung der Wellenlänge liegt. Die Mie-Theorie beschreibt nicht nur die Mie-Streuung, sondern alle Streuungen an einer dielektrischen Kugel von beliebiger Größe. Die Mie-Theorie umfasst neben der Mie Streuung sowohl die Rayleigh-Streuung als auch den optischen Fall.

2.8 Rekonstruktion von Radardaten

In der Praxis wird bei der flächigen Ortung der inneren Strukturen von Bauteilen mit Radar, wie z. B. der Bewehrung einer Stahlbetonbrücke, eine Rekonstruktion oder Migration der aufgenommenen Radardaten durchgeführt. Ziel einer Rekonstruktion von Radardaten ist es, die innere Struktur besser zu visualisieren und die Tiefenlage richtig darzustellen. Besonders bei geneigten Reflektoren wird die Neigung aufgrund der räumlichen Abstrahlung der Antenne, die durch den Öffnungswinkel charakterisiert wird, im nicht rekonstruierten Radargram flacher dargestellt als sie tatsächlich verläuft und eine Reflexionshyperbel von z. B. einer Bewehrung wird nach der Rekonstruktion auf einen punktförmigen Bereich fokussiert.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurden die Radardaten nicht rekonstruiert, da die schwache Streuung an der Gesteinskörnung sich aus Einzel- und Mehrfachstreuung zusammensetzt. Mehrfachstreuung wird bei herkömmlichen Rekonstruktionsalgorithmen aber nicht richtig verarbeitet und führt zu Artefakten in der Darstellung der Radardaten. Aus diesem Grund wird auf die Angabe der Tiefenlage der Streuung in dieser Arbeit verzichtet, und die Streuung wird nur einer Laufzeit zugeordnet.

Für geophysikalische Anwendungen werden Rekonstruktionsalgorithmen verwendet, die auch für das Bauwesen interessant sind, da diese auch Mehrfachreflexionen bzw. Mehrfachstreuungen berücksichtigen. Dazu zählen die Reverse Time Migration (Baysal 1983) und die seismische Interferometrie (Wapenaar 2010a, Wapenaar 2010b). Bei der Reverse Time Migration können Mehrfachreflexionen über Seitenwände und Rückseite eines Bauteils benutzt werden, um die inneren Struktur des Bauteils besser darzustellen. Insbesondere könnte die geometrische Ausdehnung in der Tiefe, wie z. B. der Querschnitt eines Hüllrohrs, besser dargestellt werden. Die in der Praxis im Bauwesen bisher eingesetzten Rekonstruktions-algorithmen sind dazu nicht in der Lage.

Sollten zukünftige Entwicklungen für das Bauwesen Mehrfachreflexionen bei der Rekonstruktion richtig berücksichtigen, würden sich neue Möglichkeiten eröffnen. Die der schwachen Streuung zugeordnete Heterogenität von Beton könnte dann auch tiefenaufgelöst ermittelt werden.

2.9 Automatisierung dichter und präziser Radarmessung

Für die Untersuchung der schwachen Streuung im gesamten Volumen von Betonprobekörpern sollen die Messpunkte der Radarmessung dicht und präzise beieinander in einer Messfläche liegen, um den vollständigen Verlauf aller empfangenen Streuungen zu erfassen. In beiden Dimensionen der Messfläche soll der Messpunktabstand maximal 5 mm betragen. Eine Messung mit der Hand ist in einer vertretbaren Zeit mit der notwendigen Genauigkeit kaum möglich, weshalb die Messung automatisiert wurde. Die Automatisierung im Allgemeinen für das Bauwesen und im Speziellen für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Ein Gerät für die automatisierte zerstörungsfreie Prüfung auf ebenen Bauteiloberflächen wird Bauwerkscanner genannt. In den letzten zehn Jahren wurden verstärkt bei der zerstörungsfreien Prüfung von Bauwerken Bauwerkscanner eingesetzt (Streicher 2006, Stoppel 2007, Taffe 2011). Wesentlicher Bestandteil eines Bauwerkscanners sind mit elektrischen Motoren angetriebene Linearschienen, die einen Messkopf in zwei zueinander senkrechte Richtungen verfahren können. Der Messkopf selbst kann Sensoren unterschiedlicher ZfP-Verfahren aufnehmen. Ursprünglich wurden die Bauwerkscanner für die Automatisierung von Ultraschallmessungen an Beton entwickelt. Diese Messungen sind manuell sehr viel aufwendiger als Radar, da der Messkopf mit der Hand an jedem Messpunkt auf die Bauteiloberfläche angepresst werden muss. Ein Bauwerkscanner für die Ultraschallmessung ist deshalb mit einer Senk- und Hebevorrichtung ausgestattet.

Abbildung 12 Bauwerkscanner für die Untersuchung einer Fahrbahnplatte

Abbildung 13 Bauwerkscanner mit Vakuum-Füßen für die Untersuchung einer Hohlkastenunterseite

Wesentliches Merkmal eines Bauwerkscanners für Radar ist die Möglichkeit, den Scanner mit einer hohen Verfahrgeschwindigkeit zu betreiben. Bei einem Messpunktabstand von minimal 2 mm kann bei üblichen Radarsystemen die Antenne mit etwa 0,5 -1,0 Meter pro Sekunde bewegt werden. Diese hohe Geschwindigkeit sollte der Bauwerkscanner unterstützen, um bei sehr dichtem Messraster noch eine vertretbare Messzeit zu ermöglichen.

Die Vorrichtung zum Auf- und Absetzen kann bei einem Bauwerkscanner für Radar entfallen, da die Radarantenne über die Oberfläche mit einem festen Abstand von etwa 3 bis 8 mm geführt wird. Die bisher an der BAM aufgebauten Bauwerkscanner wurden vorwiegend für die Automatisierung des Ultraschallverfahrens entwickelt. Eine hohe Verfahrgeschwindigkeit spielte in diesem Fall eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wurde für diese Arbeit ein Bauwerkscanner entwickelt und aufgebaut, mit dem große Flächen bis etwa 2,3 m x 1,8 m mit einer großen Messpunktdichte von minimal 2 mm x 2 mm schnell aufgenommen werden können. Die Messdauer für die maximale Fläche von etwa 4 m^2 und den minimalen Messpunktabstand von 2 mm liegt bei unter zwei Stunden. Mit der Hand wäre eine solch dichte Messung mit ausreichender Genauigkeit und einem vertretbarem Aufwand nicht mehr möglich.

Abbildung 14 Bauwerkscanner zur automatischen Führung eines Messkopfes entlang einer Bauelementoberfläche, wie er in dieser Arbeit verwendet wurde

Ein erheblicher Aufwand bei der Entwicklung eines schnellen und präzisen Bauwerkscanners für Radar war die ortsrichtige Auslösung (Triggerung) der Messung. Das verwendete Radargerät hat zwischen der externen Triggerung und der tatsächlichen Auslösung der Messung eine Verzögerung, die zu einer örtlichen Verschiebung der Lage eines Messpunktes in Bewegungsrichtung der Antenne führt (Trela, Kind und Schubert 2012). Anstelle üblicher Radwegaufnehmer für die Radarmessung wurden zwei Drehgeber (Encoder) an der x- und y-Motorachse des Bauwerkscanners montiert. Die Signalausgänge der Encoder konnten nicht direkt an das Radargerät angeschlossen werden, weil dann keine mäanderförmige Messung möglich gewesen wäre. Kommerzielle Radargeräte würden bei der Rückfahrt die Messung unterbrechen, da davon ausgegangen wird, dass auf derselben Linie vor- und zurückgefahren wird. In diesem Fall würde das Radargramm nicht weiter aufgezeichnet werden, weil sich der Cursor in der Anzeige des Radargramms rückwärts bewegt. Markante Reflektoren können so noch einmal mit der Hand im Radargramm angefahren werden, um z. B. eine Markierung auf der Bauteiloberfläche anzubringen.

Zwischen den Encodern und dem Eingang für den Wegaufnehmer des Radargerätes wurde eine hardwarenahe Steuerung geschaltet, um die automatisierte Radarmessung zu ermöglichen (Schubert 2011). Eine hardwarenahe Steuerung ist erforderlich, da eine softwarenahe Steuerung mit einem Mikroprozessor zu Verzögerungen zwischen der Positionsaufnahme und der tatsächlichen Auslösung einer Messung führen, die zu lange und unregelmäßig wären.

Eine hardwarenahe Steuerung ist eine logische Schaltung (FPGA - Field Programmable Gate Array oder CPLD - Complex Programmable Logic Devices), deren Verbindungen zwischen einer Vielzahl von logischen Gattern programmiert wird. Eine softwarenahe Steuerung mit einem Mikroprozessor würde im Gegensatz zu einem FPGA oder CPLD im Betrieb mit Befehlen, die von einem Prozessor verarbeitet werden, gesteuert.

Zwischen den Herstellern von kommerziellen Radargeräten gibt es technische Unterschiede, die eine Hardwareanpassung zur Messsteuerung erfordern. U. a. ist bei einigen Radargeräten die tatsächliche Messung eines A-Scans verzögert im Bezug zum Auslösesignal am Eingang für die Wegsteuerung. Diese Verzögerung macht es erforderlich, rechtzeitig vor dem tatsächlich gewünschten Messort das Auslösesignal zu generieren. Diese „Vorauslösung“ oder Pretrigger ist auch abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit des Bauwerkscanners und den Einstellungen am Radargerät (z. B. Anzahl der Abtastpunkte).

Die maximale Verfahrgeschwindigkeit bei Radar liegt mit den zur Verfügung stehenden Radargeräten bei etwa 0,60 m pro Sekunde. Bei dieser Geschwindigkeit muss der Pretrigger auf 17 mm eingestellt werden. D. h. bei einem Messpunktabstand von 2,5 mm muss etwa sechs Messpunkte vorher das Auslösesignal am Eingang für die Wegsteuerung des Radargerätes anliegen. Ohne die Korrektur der Verzögerung durch das Radargerät, würden alle aufgenommenen A-Scans um 17 mm entgegen der Laufrichtung verschoben sein. Bei einer Meanderfahrt des Bauwerkscanners vergrößert sich der Positionsfehler auf das Doppelte, 34 mm, da die Laufrichtung zwischen zwei benachbarten Linien gegensätzlich ist. Dieser Fehler führt dann im Tiefenschnitt einer Radarmessung an bewehrtem Beton zu dem typischen „Sägezahn-Effekt“ entlang der Bewehrung.

Für die Ermittlung des Pretriggers wird entlang der gleichen Linie hin und her gefahren und der Pretrigger jeweils mit einem festen Inkrement vergrößert. Die Linien werden anschließend in der Auswertung parallel angeordnet, damit virtuelle Tiefenschnitte erzeugt werden können. An der Stelle mit der geringsten Verschiebung zwischen den Reflexionen war der Pretrigger bestmöglich eingestellt.

Die Antennenhalterung wird mit einem Schrittmotor versehen, damit neben dem automatischen Abfahren einer Messfläche auch die Antennenorientierung automatisch gewechselt werden kann. Die Antennenorientierung lässt sich im Bereich von 0° und 180° und in 5° Schritten frei einstellen.

3 Stand der Forschung

Die Streuung von Radarwellen an der Gesteinskörnung von Beton wurde bisher nicht näher untersucht. Es wurde keine Veröffentlichung gefunden, die sich direkt mit diesem Thema beschäftigt. Die Streuungen von Radarwellen an einer Heterogenität sind eher im Zusammenhang mit geophysikalischen Radaruntersuchungen näher betrachtet worden. Z. B. fiel bei der Untersuchung von Gletschern mit Radar auf, dass je nach Beschaffenheit des Gletschereises die Eindringtiefe der Radarwellen variierte, und es traten zufällig verteilte Reflexionen im Radargramm auf, die u. a. den Streuungen der Radarwelle an Luft- oder Wassereinschlüssen im Eis zugeordnet wurden (Watts und England 1976). In diesem Zusammenhang wurde als Ursache für die Dämpfung von Radarwellen die fortlaufende Streuung der Welle an der Heterogenität im Material berücksichtigt. Empirisch wurden die Verluste durch eine exponentielle Dämpfung berücksichtigt (Annan 2008). Zur Reduzierung der Streuungen der Radarwellen im Gletschereis wurde empfohlen, möglichst niedrige Frequenzen von wenigen MHz zu verwenden, damit die Wellenlänge erheblich größer ist als die Abmessungen der Luft- und Wassereinschlüsse (Watts und England 1976). Aufgrund der großen Ausdehnung eines Gletschers werden normalerweise nur Radarmessungen entlang einer Linie durchgeführt. Das dazugehörige Radargramm wird bezüglich der Mächtigkeit und der Beschaffenheit des Gletschers ausgewertet. In (Jol, Goodsell, et al. 2004) wurde auch eine flächige Radarmessung mit einer Fläche von 20 m x 12,25 m auf einem Gletscher durchgeführt. Die resultierenden Zeitscheiben zeigen kreisförmige Muster, die den Mustern der Zeitscheiben von Beton in dieser Arbeit (s. Abbildung 21) sehr ähneln. Es wurde vermutet, dass die Muster durch Schmelzwasserkanäle entstehen. Ein Zusammenhang mit Interferenzmustern durch Streuungen der Heterogenität des Eises wurde nicht betrachtet.

Auf dem Gebiet der Anwendung von Radar für die Ortung von Personenminen wird auch der Einfluss der Heterogenität und der damit verbundenen Streuung der Radarwelle erforscht (Takahashi, Igel und Preetz 2012, Daniels 2004). Bei der Ortung von Personenminen für die Räumung von Minenfeldern wird u. a. Radar angewendet, da viele Personenminen aus nichtmetallischen Materialien bestehen und deshalb mit reinen Metalldetektoren nicht gefunden werden können. In diesem Zusammenhang treten auch störende Reflexionen in Form von Streuungen an der Heterogenität des Bodens auf. Die Störungen können die Reflexion der Personenmine überdecken, so dass die Personenminen nicht eindeutig geortet werden können. Die Störungen werden in diesem Zusammenhang auch als Clutter bezeichnet. Der Begriff Clutter kommt aus der allgemeinen Radartechnik und bezeichnet unerwünschte Signale, die die Wahrscheinlichkeit der Ortung des eigentlichen Zieles herabsetzen (Daniels 1996, Takahashi, Igel und Preetz 2012). In (Takahashi, Igel und Preetz 2012) wurde in diesem Zusammenhang die Clutter-Energie für einen Referenzboden unter unterschiedlichen Feuchtigkeitsbedingungen

bestimmt und verglichen mit einem Model. Das Model basierte auf den statistischen Ergebnissen der mittleren Permittivität, die mit einer TDR-Sonde gemessen wurden und der Streuenergie, die nach Mie oder Rayleigh berechnet wurde.

Eine Anwendung, bei der die Streuung von Radarwellen an einer Heterogenität genutzt wird, ist die Messung der Verschmutzung von Gleisschotter mit dem Radarverfahren (Roberts, Al-Qadi, et al. 2006, Roberts, Al-Qadi und Tutumluer 2008, Al-Qadi, Xie und Roberts 2008). Bei dieser Anwendung wird ausgenutzt, dass Gebiete mit nicht verschmutztem Schotter aufgrund des größeren dielektrischen Kontrastes zwischen den Schottersteinen und den Lufthohlräumen stärker die Radarwellen streuen als Gebiete mit verschmutztem Schotter, in denen die Hohlräume mit Sand gefüllt sind.

In Satellitengestützter-Fernerkundung werden Streuungen der verwendeten elektromagnetischen Wellen ausgewertet, um z. B. unterschiedliche Arten von Vegetationen zu unterscheiden. Bäume haben eine ausgeprägte geometrische Form, die in Abhängigkeit von der Polarisation der einfallenden Welle zu unterschiedlichen Intensitäten der Streuungen führt (Kozlov, Ligthart und Logvin 2001).

Weitere Anwendungen, die die Messung der Streuungen von anderen Wellen als Radarwellen nutzen, sind u. a. die zerstörungsfreie Prüfung von austenitischen Stählen mit dem Ultraschallverfahren oder die optische Bestimmung der Partikel- oder Tröpfchengröße in einer Flüssigkeit oder Emulsion mit Laserlicht.

In der zerstörungsfreien Prüfung von Metallen mit Ultraschall wurde die Volumenstreuung an grobkörnigen austenitischen Werkstoffen in den 70er Jahren intensiv behandelt. In diesem Zusammenhang wird auch von Korn- und Gefügerauschen gesprochen. Bei diesen Arbeiten ging es zum einen um die Trennung zwischen dem Nutzsignal und den rauschähnlichen Streuungen des Ultraschalls an den Korngrenzen (Kraus und Goebbels 1977, Goebbels, Deuster und S.-E., Ultraschallschwächung in Stahl unter besonderer Berücksichtigung der Austenite 1976). Ein weiterer Punkt der Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens, um das Gefüge von Stählen mittels Ultraschall-Streuung zu charakterisieren (Goebbels, Gefügebeurteilung mittels Ultraschall-Streuung 1975).

4 Schwache Streuung von Radarwellen in Beton

Am Anfang dieses Kapitels werden die Messungen beschrieben, in denen die reproduzierbaren schwachen Streuungen von Radarwellen in Beton an einer Serie von Betonprobekörpern systematisch untersucht wurden. Die Untersuchung wurde als erstes für die Streuung im Volumen (Abschnitt 4.2) und anschließend für die Reflexionen an Bewehrungsstäben (Abschnitt 4.3) durchgeführt.

Vor der Vorstellung der Ergebnisse werden der Aufbau, die verwendeten Betonprobekörper und die Durchführung der Messungen beschrieben (Abschnitt 4.1). Anschließend werden die Messergebnisse und deren Verarbeitung im Hinblick auf die Charakterisierung der reproduzierbaren Streuungen vorgestellt und bewertet. Aufbauend auf der Messung und Auswertung der Reflexion an den Bewehrungsstäben wird anschließend die mittlere Reflexionsamplitude statistisch ausgewertet (Abschnitt 4.4). Am Ende des Kapitels werden Messungen mit zwei Schüttungen aus Quarzkies mit unterschiedlichem Größtkorn im Vergleich zu den Messungen an den Betonprobekörpern vorgestellt (Abschnitt 4.5).

4.1 Versuchsbeschreibung

4.1.1 Beton Probekörper

An der BAM wurde im Rahmen einer Dissertation (Feistkorn 2012) ein Satz großformatiger Betonprobekörper hergestellt. Mit Hilfe der Probekörper und statistischer Methoden wurde in der Dissertation die Detektionsreichweite für einzelne Bewehrungsstäbe anhand der POD Methode (probability of detection) für unterschiedliche Radarsysteme ermittelt. Nach Abschluss der Dissertation wurden die Probekörper für die Untersuchung der schwachen Streuung von Radarwellen weiter verwendet.

Abbildung 15 Beton Probekörper mit Varianten in der Gesteinskörnung, Bewehrungsdurchmesser und Einbautiefe der Bewehrung

Die Probekörper variieren in ihrer Gesteinskörnung, dem Bewehrungsdurchmesser und der Einbautiefe der Bewehrung, aber alle Probekörper haben eine einheitliche

Größe von 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m. Jeder Probekörper hat fünf senkrechte Bewehrungsstäbe in unterschiedlichen Einbautiefen und mit einem regelmäßigen Abstand von 0,25 m. Zu jeder Variante der Gesteinskörnung oder des Bewehrungsquerschnittes gibt es ein Paar von Probekörpern (PK1 und PK2) mit den Einbautiefen der Bewehrung von 60, 90, 120, 150, 180 mm und 210, 240, 270, 300 und 330 mm. Die Varianten der Gesteinskörnung haben eine Sieblinie mit dem Größtkorn 16 und 32 mm. Die beiden Varianten des Bewehrungsdurchmessers sind 12 mm und 28 mm. Die Probekörper mit dem Größtkorn 16 mm und einem Bewehrungsdurchmesser von 12 mm wurden als Referenzprobekörper festgelegt (RPK). Zum Referenzprobekörper wurde immer nur eine der beiden Größen des Größtkorns oder des Bewehrungsdurchmessers variiert. Insgesamt standen damit sechs Probekörper zur Verfügung.

Die Bezeichnung der Probekörper ist in folgender Tabelle zusammengestellt:

RPK1	Sieblinie GK16; Bewehrungsdurchmesser 12 mm Fünf Bewehrungsstäbe in den Tiefen 6, 9, 12, 15, 18 cm Abmaße: 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m
RPK2	Sieblinie GK16; Bewehrungsdurchmesser 12 mm Fünf Bewehrungsstäbe in den Tiefen 21, 24, 27, 30, 33 cm Abmaße: 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m
D028-1	Sieblinie GK16; **Bewehrungsdurchmesser 28 mm** Fünf Bewehrungsstäbe in den Tiefen 6, 9, 12, 15, 18 cm Abmaße: 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m
D028-2	Sieblinie GK16; **Bewehrungsdurchmesser 28 mm** Fünf Bewehrungsstäbe in den Tiefen 21, 24, 27, 30, 33 cm Abmaße: 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m
GK32-1	**Sieblinie GK32**; Bewehrungsdurchmesser 12 mm Fünf Bewehrungsstäbe in den Tiefen 6, 9, 12, 15, 18 cm Abmaße: 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m
GK32-2	**Sieblinie GK32**; Bewehrungsdurchmesser 12 mm Fünf Bewehrungsstäbe in den Tiefen 21, 24, 27, 30, 33 cm Abmaße: 1,5 m x 1,5 m x 0,66 m

4.1.2 Durchführung der Messungen mit dem Bauwerkscanner

Die Radarmessungen an den Betonprobekörpern sollte mit einem möglichst dichtem Messraster durchgeführt werden, um für die anschließenden Untersuchungen der schwachen Streuungen an der Gesteinskörnung und der Bewehrungsreflexion eine große Anzahl von Messdaten zur Verfügung zu haben. Bei einem Messlinienabstand von weniger als 10 mm ist eine manuelle Aufnahme mit der notwendigen Präzision und einem vertretbarem Zeitaufwand nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurden die Messungen mit einem schnellen Bauwerkscanner durchgeführt.

Alle sechs Betonprobekörper wurden mit dem Bauwerkscanner und zwei unterschiedlichen Antennen systematisch abgefahren. Der Bauwerkscanner hat den

Betonprobekörper meanderförmig mit horizontalen Messlinien abgefahren. Die erste Messlinie startete 200 mm oberhalb der Unterseite des PK und die letzte Messlinie verlief oberhalb des PKs. Insgesamt wurden mindestens 261 Messlinien im Abstand von 5 mm aufgenommen. Die Länge der Messlinien hat den PK deutlich überragt und jede Messlinie wurde mit einem Messpunktabstand von 2,5 mm aufgenommen. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug 0,75 m pro Sekunde. Es wurde mit drei Antennenorientierungen, 0°, 45° und 90°, aufgenommen. Die Aufnahme einer Messung auf der Oberfläche eines Betonprobekörpers mit einer Antennenfrequenz und drei verschiedenen Antennenorientierungen wurde vollautomatisch durchgeführt und dauerte weniger als 40 Minuten.

Die Radarmessungen wurden mit dem Radarsystem SIR 20 der Firma GSSI (Geophysical Survey Systems, Inc.) durchgeführt. Es wurden nacheinander zwei Antennen mit der Signalmittenfrequenz von 1,5 GHz und 2,6 GHz verwendet. Am Gerät wurde die Dauer des Zeitfensters auf 8 ns und die Anzahl der Abtastwerte auf 256 eingestellt. Daraus ergibt sich eine Abtastfrequenz von 31,25 GHz und eine ausreichende Überabtastung (vierfach) der oberen Grenzfrequenz der 2,6 GHz Antenne. Die Anzahl von Abtastwerten wurde mit Absicht niedrig gewählt, um eine große Vorschubgeschwindigkeit am Bauwerkscanner einstellen zu können. Trotz einer hohen Anzahl von Messpunkten konnte dadurch die Messung mit einem vertretbaren Zeitaufwand durchgeführt werden.

Abbildung 16 Radarsystem SIR 20 (rechts) der Fa. GSSI mit 1,5 GHz (vorne links) und 2,6 GHz Antenne (hinten links)

Der Abstand der Antenne zur Oberfläche war nicht konstant, da die Oberflächen der Probekörper leicht gekrümmt sind. Der Abstand variierte deshalb im Bereich von 2 bis 7 mm. Ein geringerer Abstand als 2 mm konnte nicht eingestellt werden, da die Gefahr einer Kollision der Antenne mit den Kanten des Betonprobekörpers bestand. Die Antennen wurden mindestens 30 Minuten vor der ersten Messung in Betrieb

genommen, um eine thermische Drift der Position des Zeitfensters und der Amplitudenwerte zu vermeiden.

Ein erstes Ergebnis der Messungen ist in Abbildung 17 dargestellt und zeigt fünf Reflexionshyperbeln von fünf Bewehrungseisen eines Betonprobekörpers. Beide Radargramme sind mit einer Messung in der Mitte des Probekörpers aufgenommen worden und unterscheiden sich nur in der laufzeitabhängigen Verstärkung. In Abbildung 17 sind die Rohdaten ohne Verstärkung und in Abbildung 18 mit Verstärkung dargestellt. Die laufzeitabhängige Verstärkung wurde so gewählt, dass die Reflexionen in den fünf verschiedenen Einbautiefen der Bewehrungen in etwa gleich stark sind. Die Farbskalierung setzt sich aus einer Grauwertskalierung und einer Blau/Rot-Skalierung zusammen. Die maximalen positiven Amplituden im Bereich von 80 bis 100 % der Maximalamplitude sind rot gefärbt. Entsprechend sind für die negativen Amplituden im gleichen Bereich die Amplituden blau gefärbt. Diese Farbskalierung wurde gewählt, um möglichst schnell und einfach die Bereiche zu kennzeichnen, in denen die stärksten Reflexionen auftreten. Im unverstärkten Radargramm von Abbildung 17 treten die stärksten Amplituden nur im Bereich der direkten Welle auf. Die Amplituden der Reflexionen an der Bewehrung sind deutlich schwächer aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Welle und der Dämpfung durch das Material. In Abbildung 18 wurde die tiefenabhängige Verstärkung so eingestellt, dass die Scheitelpunkte aller fünf Bewehrungsstäbe leicht rot eingefärbt sind. Durch die Verstärkung fällt auch auf, dass der Bereich zwischen der direkten Welle und dem Scheitelpunkt leichten Schwankungen unterliegt, die im Folgendem näher untersucht werden.

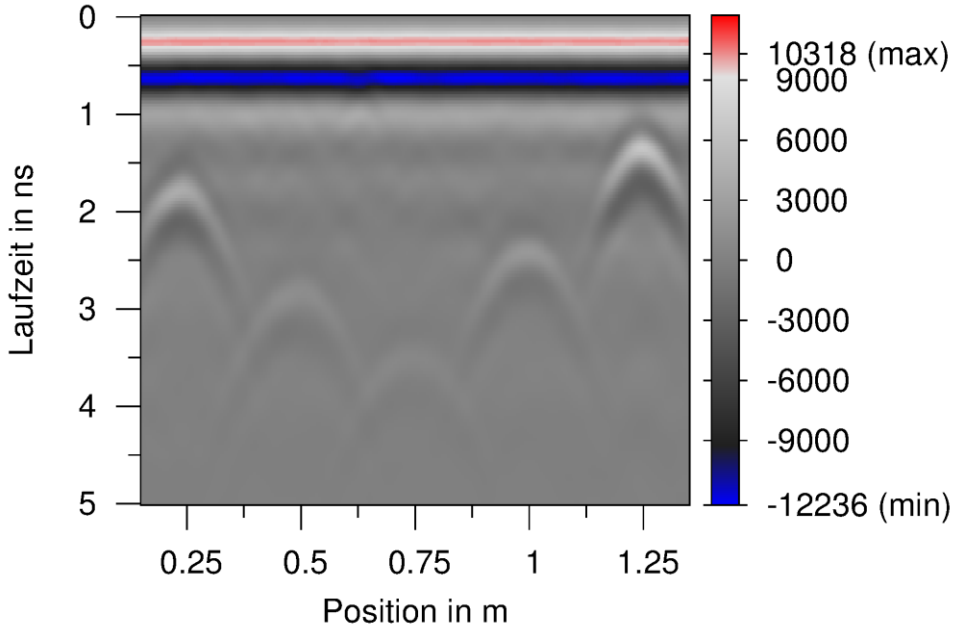

Abbildung 17 Radargramm (Rohdaten) mit fünf Reflexionshyperbeln von fünf Bewehrungsstäben mit den Einbautiefen 9 cm, 15 cm, 18 cm, 12 cm und 6 cm; Stabdurchmesser 12 mm (**ohne Verstärkung**, Antenne 1500 MHz, Antennenpolarisation parallel zur Bewehrung, Messpunktabstand 2,5 mm)

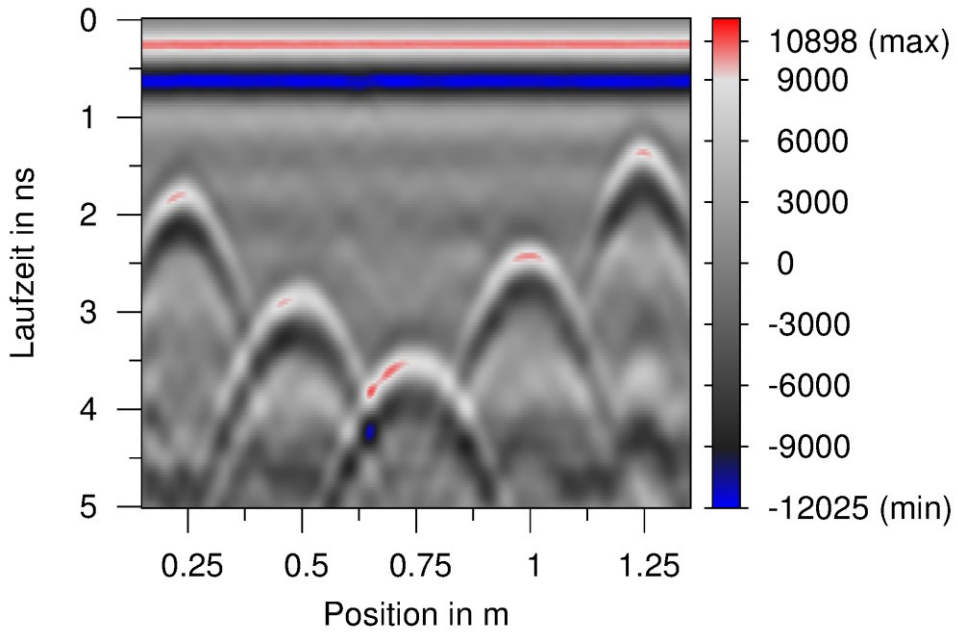

Abbildung 18 Radargramm mit fünf Reflexionshyperbeln von fünf Bewehrungsstäben mit den Einbautiefen 9 cm, 15 cm, 18 cm, 12 cm und 6 cm; Stabdurchmesser 12 mm (**laufzeitabhängige Verstärkung**, Antenne 1500 MHz, Antennenpolarisation parallel zur Bewehrung, Messpunktabstand 2,5 mm)

4.2 Schwache Streuung im Volumen

An allen Probekörpern wurde immer die gleiche Messfläche auf der Bauteiloberfläche aufgenommen. Die für die Auswertungen genutzte Messfläche beträgt 1,5 m x 1,2 m und liegt mittig auf der Bauteiloberfläche. Die Lage der Messfläche ist in Abbildung 19 als grünes Rechteck eingezeichnet. Alle x- und y-Koordinaten beziehen sich auf die untere linke Ecke der Messfläche. In x-Richtung stimmen die Koordinaten mit den Bauteilkoordinaten überein. In y-Richtung sind die Koordinaten der Messfläche um 0,15 m zu den Probekörperkoordinaten verschoben. Für alle Untersuchungen der schwachen Streuungen aus dem Volumen wurde aus der Messfläche eine Teilfläche (rot) von 0,5 m x 0,5 m gewählt, die mittig in der großen Messfläche (grün) liegt. Die Größe der kleinen Messfläche wurde so gewählt, dass Randeinflüsse durch den Betonprobekörper ausgeschlossen werden können.

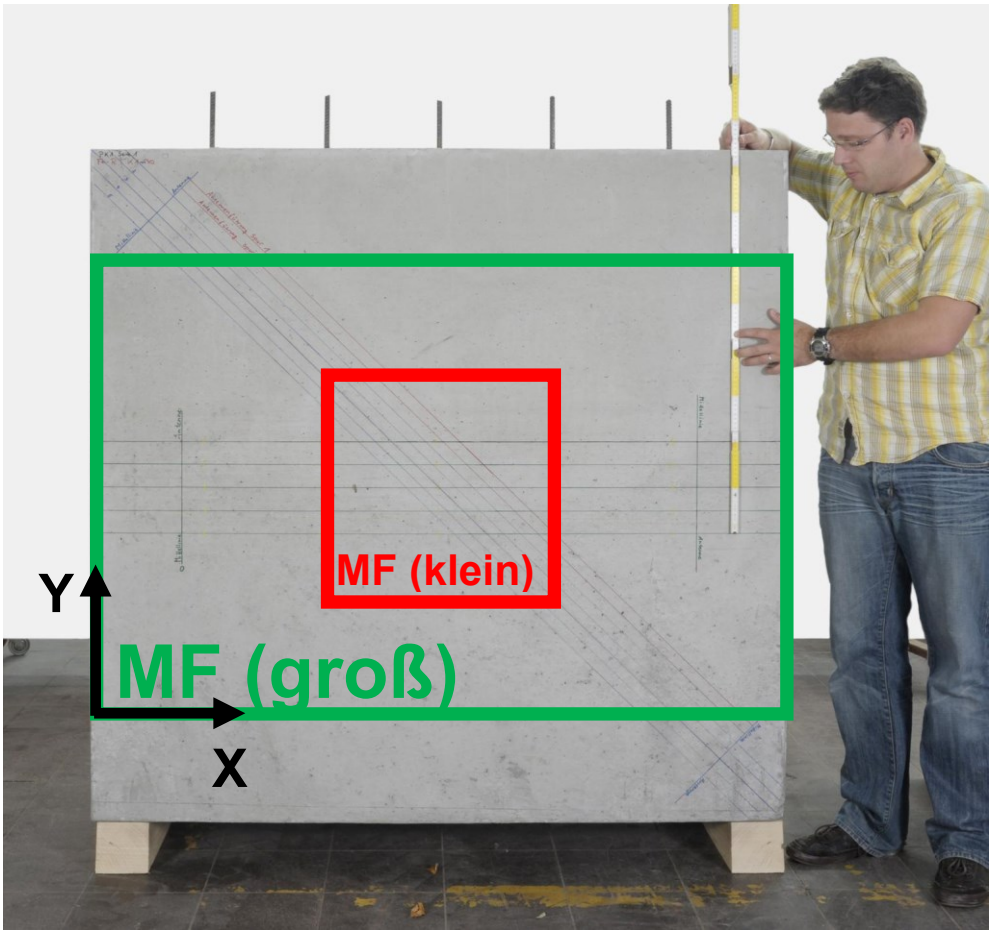

Abbildung 19 Probekörper mit eingezeichneten Messflächen; grün 1,5 m x 1,2 m, rot 0,5 m x 0,5 m

Abbildung 20 zeigt einen Zeitschnitt bei etwa 1,2 ns im Bereich der maximalen positiven Reflexionsamplitude des Bewehrungsstabs mit der Einbautiefe von 6 cm. Der Verlauf des Bewehrungsstabes bei x=1,25 m parallel zur y-Achse ist deutlich im Schnitt zu sehen. Teilweise sind die Reflexionen der Bewehrung rot gefärbt aufgrund der starken Reflexion am metallischen Bewehrungsstab. In der restlichen Fläche des Zeitschnittes sind nur sehr schwache Reflexionen zu sehen, die ein unregelmäßiges Muster aufweisen.

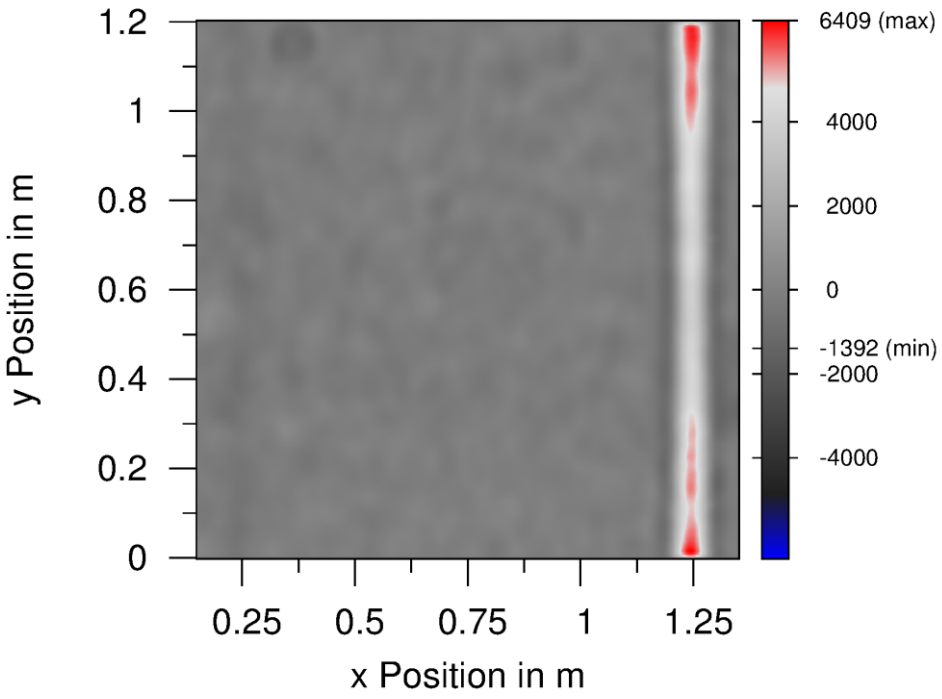

Abbildung 20 Zeitschnitt bei 1,2 ns vom Referenzprobekörper RPK2; rechts vertikaler Bewehrungsstab DN 12 mm, Tiefe 6 cm (Antenne 1500 MHz, Messpunktraster 2,5 mm x 5 mm, Antennenpolarisation parallel zur Bewehrung)

Besonders deutlich sind die Muster, wenn im Auschnitt keine Bewehrung liegt und durch eine angepasste Amplitudenskalierung die örtlichen Schwankungen verstärkt werden. In Abbildung 21 ist ein solcher Auschnitt von der Größe 0,5 m x 0,5 m aus der Mitte von Abbildung 20 dargestellt. In dem Zeitschnitt sind keine Reflexionen von Bewehrung vorhanden. Das Muster wird wesentlich deutlicher und kontrastreicher dargestellt durch die auf die maximalen Amplituden der schwachen Streuung angepasste Skalierung. Die maximalen Reflexionsamplituden (481 a. u.) der schwachen örtlichen Streuungen betragen nur noch etwa 7,5 % der maximalen Reflexionsamplituden der Bewehrung (6409 a. u.) aus Abbildung 20.

Eine Wiederholung der Messung zeigt dieselben Muster und bestätigt damit als Ursache die schwachen Streuungen die Heterogenität durch die Gesteinskörnung von Beton. Erklären lassen sich die auftretenen Muster anhand der konstruktiven und destruktiven Interferenz vieler statistisch verteilter Reflexionen im Volumen. Die statistisch verteilten Reflexionen stehen in einer festen Phasenbeziehung zur einfallenden Welle und führen zu zufällig verteilten, aber örtlich reproduzierbaren, Interferenz-Maxima und -Minima. Die schwachen und zufällig verteilten Streuungen entstehen an der durch die Gesteinskörnung bedingten Heterogenität der Permittivität im Beton. Konstruktive und destruktive Interferenzen treten durch die Variation der Abmessungen der Gesteinskörnung auf, die in derselben Größenordnung wie der Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Radarwellen sind.

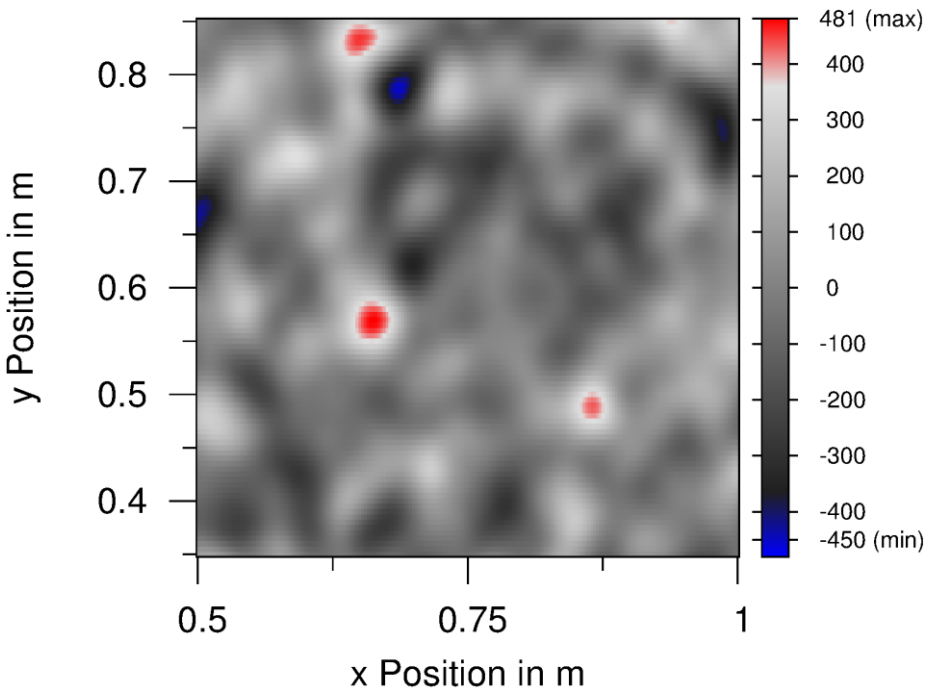

Abbildung 21 Zeitschnitt bei 1,2 ns vom Referenzprobekörper RPK1; Antenne 1,5 GHz, Ausschnitt 0,5 m x 0,5 m von Abbildung 20, Messrasterpunktraster 2,5 mm x 2,5 mm

Aus dem Bereich der Optik sind vergleichbare Interferenzmuster bekannt. Bei der Beleuchtung rauer Oberflächen mit kohärentem Laserlicht enstehen Muster mit statistisch verteilten Interferenz-Maxima und -Minima, die als Specklemuster oder Lichtgranulation bezeichnet werden. Die Bezeichnung Speckle hat ihren Ursprung im englischem Wort speckle, auf Deutsch Sprenkel, Flecken oder Tupfer. Technische Anwendung haben solche Specklemuster in der elektronischen Speckle-Muster-Interferometrie (ESPI) zur Vermessungen kleiner Distanzänderungen im nm-Bereich durch mechanische Schwingungen oder Spannungen gefunden.

4.2.1 Einfluss von Laufzeit und Antennenorientierung

In Abbildung 23 sind sechs Zeitschnitte für drei verschiedene Laufzeiten und zwei zueinander senkrechte Antennenorientierungen dargestellt. Der Ausschnitt beträgt wieder 0,5 m x 0,5 m und befindet sich in der Mitte des Probekörpers. Die Schnitte sind für die Laufzeiten 1,2 ns, 2,2 ns und 3,2 ns erstellt worden. Bei einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 0,12 m pro ns entsprechen die Zeitschnitte Schnitten in den Tiefen von 7,2, 13,2 und 19,2 cm. Im Gegensatz zum Probekörper aus Abbildung 21 mit Einbautiefen der Bewehrung von 60 mm bis 180 mm wurde ein Probekörper mit denselben Betoneigenschaften aber tiefer liegenden Bewehrungsstäben (Einbautiefe 210 mm bis 330 mm) für die Messung verwendet, damit in den Zeitschnitten keine Reflexion der Bewehrung enthalten ist.

Die Definition für die Bezeichnung der Antennenorientierung ist in Abbildung 22 dargestellt. Der Winkel der Antennenorientierung entspricht dem Winkel der Achse der Antennendipole zur x-Achse. Eine Ausrichtung der Antennendipole parallel zur y-Achse entspricht der 90° oder vertikalen Antennenorientierung. Eine 0° oder horizontale Antennenorientierung liegt dementsprechend vor, wenn die Antennendipole parallel zur x-Achse ausgerichtet sind.

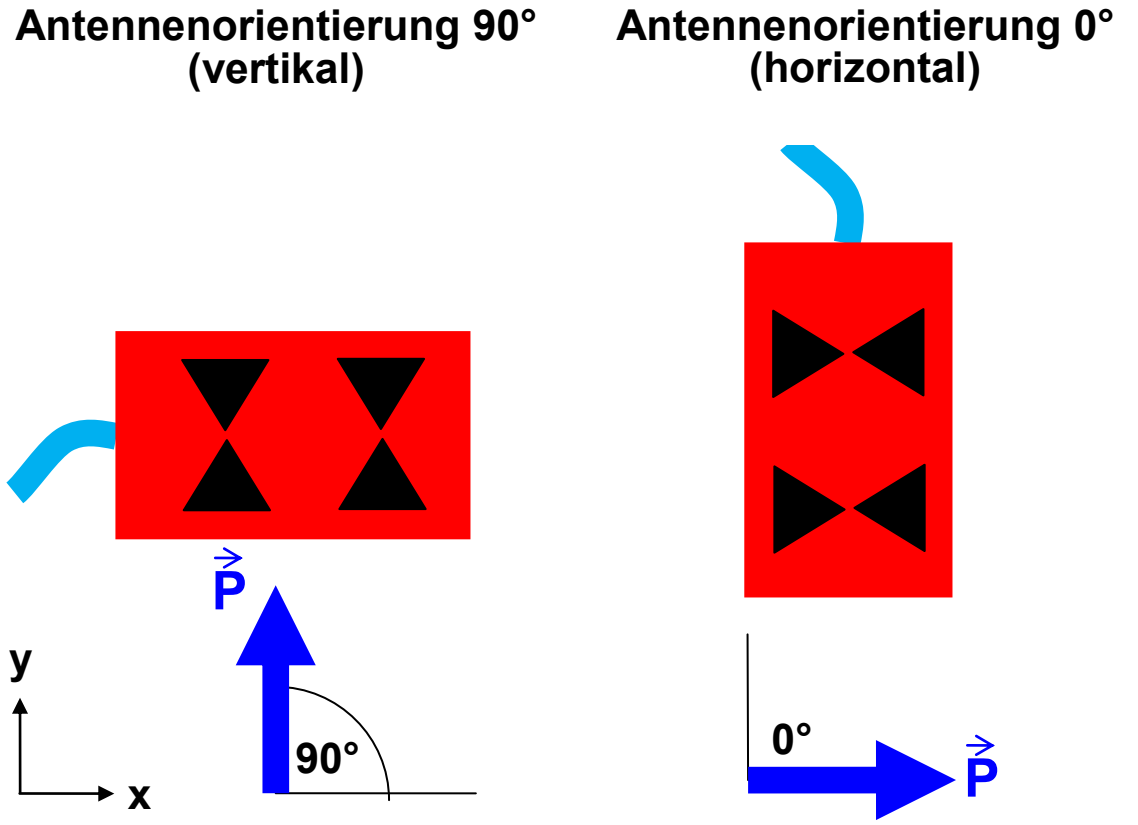

Abbildung 22 Lage der Antenne (rot) und des Polarisationsvektors (blau) für die Antennenorientierung 90° und 0°

Die Zeitschnitte zeigen deutlich unterschiedliche Muster für die drei Laufzeiten und die maximalen Amplituden (572, 363 und 171 für Antennenorientierung 90 Grad). Sie nehmen mit größeren Laufzeiten ab. Der Vergleich zwischen den beiden Antennenorientierungen zeigt nur geringe Unterschiede in den Mustern der

Reflexionen. Die geringen Unterschiede zeigen sich in einer stärkeren Hervorhebung vertikaler Strukturen im Vergleich zu horizontalen Strukturen in den Mustern für die Antennenorientierung 90° und umgekehrt für die Antennenorientierung 0°.

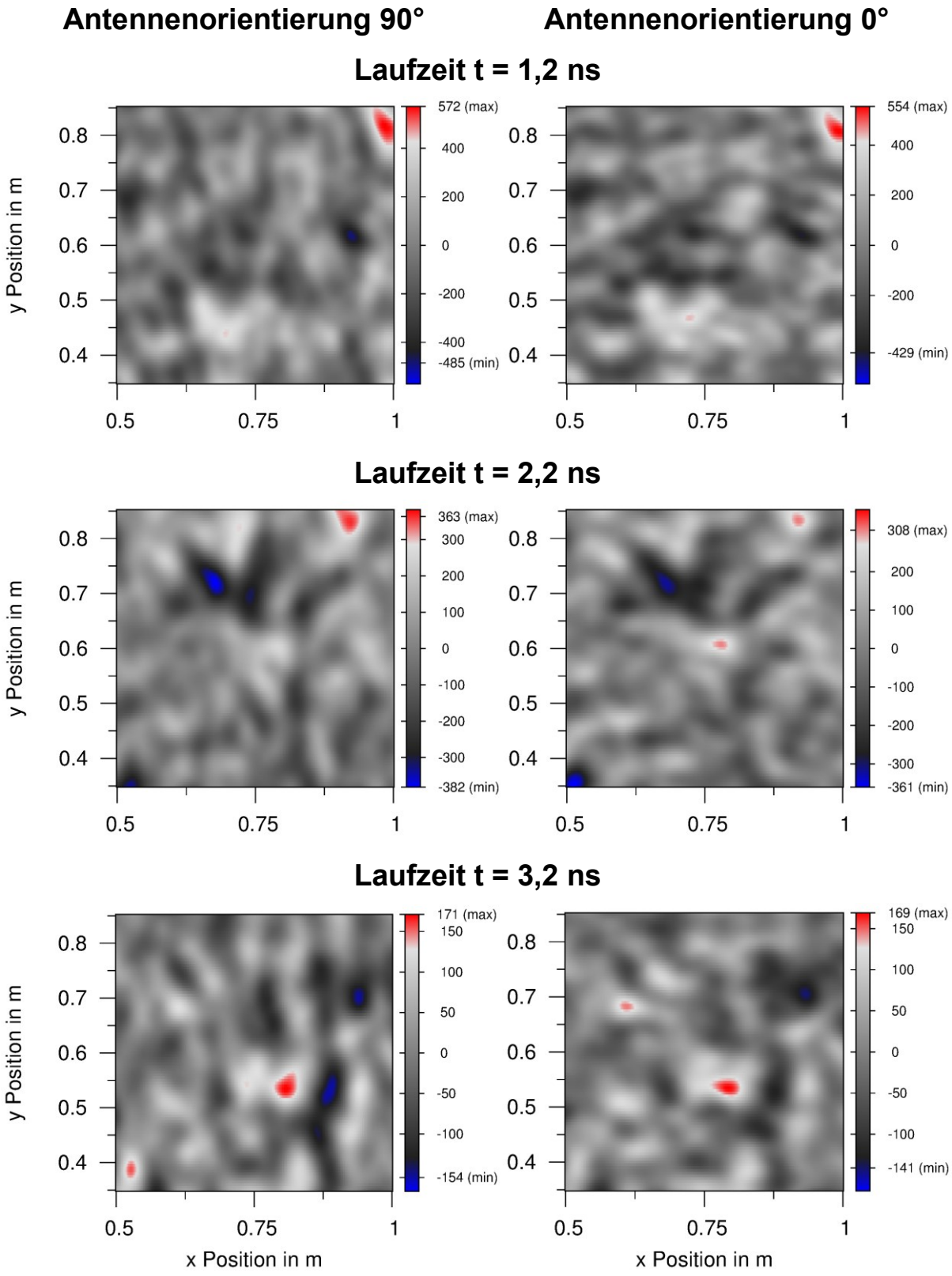

Abbildung 23 Zeitschnitte für die Laufzeiten 1,2 ns, 2,2 ns und 3,2 ns und für die Antennenorientierungen 90° (links) und 0° (rechts), Antenne 1,5 GHz, Messraster 2,5 mm x 5 mm

4.2.2 Amplitudenverteilung

Die visuelle Darstellung der schwachen Streuungen anhand von Zeitschnitten erlaubt nicht, die Abhängigkeit der Amplituden von der Laufzeit auf einen Blick zu erfassen. Wie in Abbildung 23 gezeigt, muss hierzu eine Serie von Zeitschnitten betrachtet werden. Um die Änderung der schwachen Reflexionen auf einen Blick und in einer Darstellung zu zeigen, soll anstelle der 2D-Darstellung der Reflexion in Zeitschnitten die Häufigkeitsverteilung als Histogramm der Amplituden eines Zeitschnittes verwendet werden.

In einem Histogramm werden Klassen von Bereichen mit Amplitudenwerten gebildet und für jede Klasse wird die Anzahl oder Häufigkeit der Amplituden als senkrechter Balken dargestellt. Die Höhe des Balkens entspricht dann einer Häufigkeitsdichte. Jeder Wertebereich einer Klasse hat immer die gleiche Breite. In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die Histogramme für drei verschiedene Zeitschnitte gemeinsam dargestellt. Die Abbildungen unterscheiden sich in den verwendeten Antennenorientierungen. In Abbildung 24 war die Antennenorientierung vertikal und in Abbildung 25 horizontal ausgerichtet. Für die Berechnung jedes Histogramms wurden 20231 Amplitudenwerte der Messfläche (0,5 m x 0,5 m) verarbeitet. Die Häufigkeitsdichte ist in Prozent angegeben und bezieht sich auf die Gesamtanzahl von 20231 Amplitudenwerten.

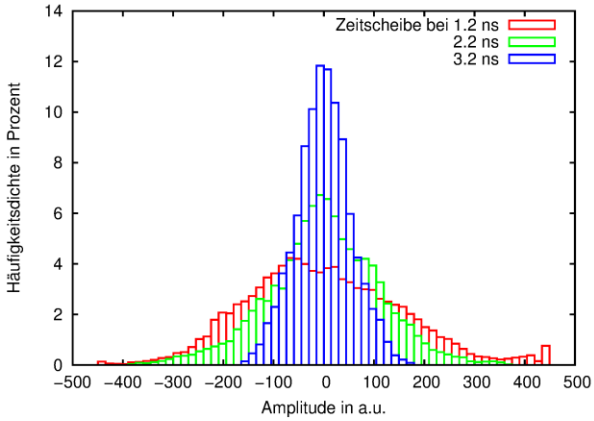

Abbildung 24 Histogramme der Amplituden für drei unterschiedliche Zeitschnitte aus Abbildung 23 (**Antennenorientierung 90°**)

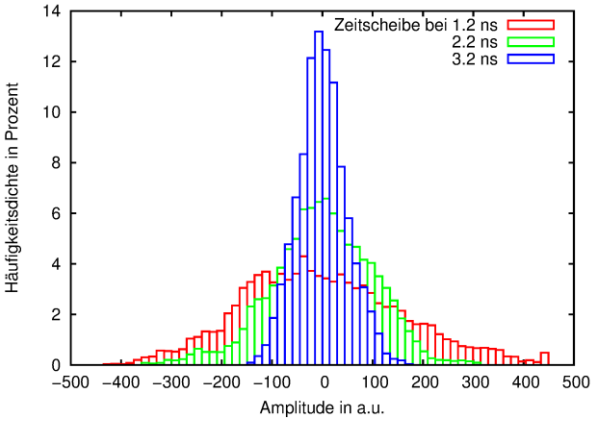

Abbildung 25 Histogramme der Amplituden für drei unterschiedliche Zeitschnitte aus Abbildung 23 (**Antennenorientierung 0°**)

Wie erwartet, nimmt die Breite der Histogramme entsprechend den maximalen Amplituden aus Abbildung 23 mit größerer Laufzeit ab. Der Unterschied zwischen den beiden Antennenorientierungen 90° und 0° ist in der Darstellung der Histogramme auch nur gering ähnlich wie in der Darstellung der Zeitschnitte aus Abbildung 23.

Durch die Darstellung mehrerer Histogramme in einer Abbildung ist es möglich, die Abnahme der schwachen Reflexionen auf einen Blick zu beurteilen. Die Schritte zwischen den Zeitschnitten müssen recht groß gewählt werden, da nur eine begrenzte Anzahl von Histogrammen übereinander dargestellt werden kann. Diese Einschränkung wird umgangen durch eine 2D-Darstellung, in der die

Häufigkeitsdichte jedes Balkens eines Histogramms als ein farbkodierter Pixel dargestellt wird. Eine solche Darstellung ist in Abbildung 26 dargestellt und wird in dieser Arbeit als 2D-Histogramm bezeichnet.

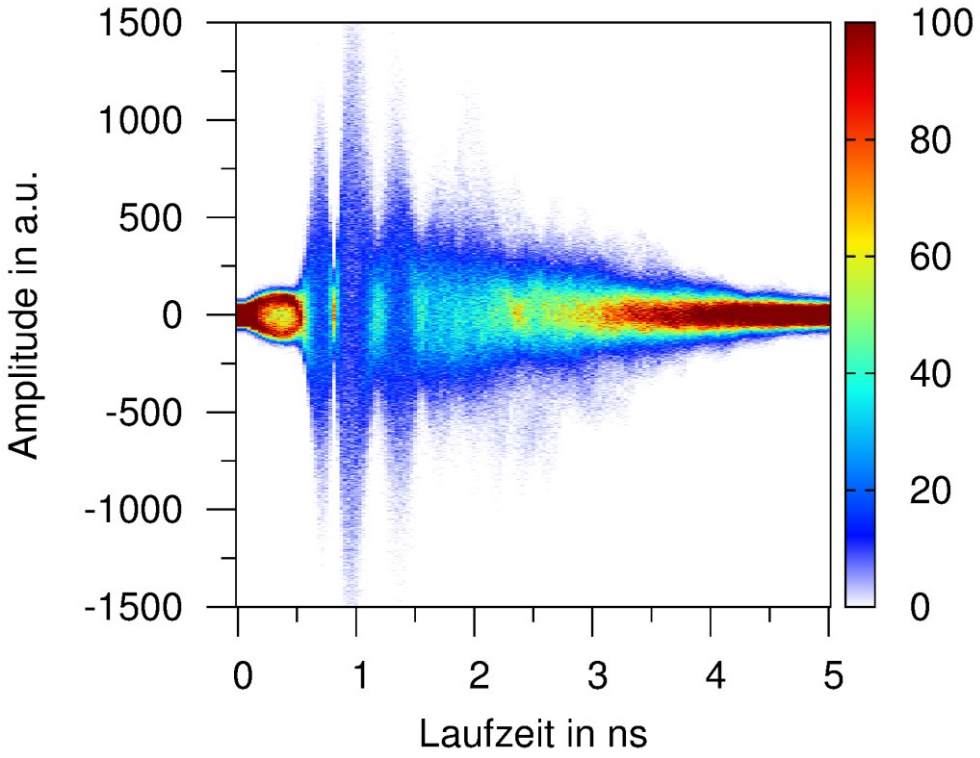

Abbildung 26 2D-Histogramm, Häufigkeitsdichtedarstellung der Amplitudenwerte eines Zeitschnittes in Abhängigkeit von der Laufzeit; in jedem Zeitschnitt ist der Mittelwert der Amplituden entfernt worden

Eine farbige senkrechte Linie entspricht der Häufigkeitsdichteverteilung für einen Zeitschnitt. Die zweidimensionale Darstellung der Häufigkeitsdichteverteilung erlaubt in einer Darstellung den Anstieg und die Abnahme der schwachen Reflexionen kontinuierlich zu beurteilen. Die Verteilung für positive und negative Amplituden ist symmetrisch, so dass die Abbildung der Verteilung spiegelbildlich um die horizontale Nullachse liegt. Die Breite der Verteilung nimmt stark bis zur Laufzeit 1 ns zu und nimmt dann wieder ab. Die Abnahme erstreckt sich von ca. 1 ns bis 5 ns. Auffällig ist, dass im Bereich der direkten Welle bis ca. 1,5 ns die Verteilung mehrmals eingeschnürt ist. Diese Einschnürungen lassen sich durch gerätespezifisches Rauschen erklären. Die Ursachen für das gerätespezifische Rauschen und die Vorgehensweise zur Unterdrückung des Rauschens wird in den nächsten beiden Abschnitten erklärt.

4.2.3 Gerätespezifisches Rauschen

Da im 2D-Histogramm alle Schwankungen dargestellt werden, sind neben den Schwankungen der realen Streuung an der Gesteinskörnung auch Schwankungen enthalten, die durch das Rauschen der verwendeten Messtechnik begründet sind. Bei der Digitalisierung des Empfangssignals wird eine Abtast-Halte-Schaltung verwendet, die zeitgleich mit einem Triggersignal die Amplitude des Empfangssignals festhält. Durch Jitter oder ein Taktzittern des Triggersignals (Phasenrauschen)

entsteht eine Unsicherheit im Abtastzeitpunkt, die wiederum zu einer Schwankung der festgehaltenen Amplitude führt. Lokale Spitzen treten deshalb im 2D-Histogramm auf, wenn die Steilheit des Empfangssignals groß ist. Dagegen ist an den Stellen der Maxima und Minima des Empfangssignals die Steilheit am geringsten und das 2D-Histogramm zeigt „Einschnürungen“. Das gerätespezifische Rauschen ist an diesen Stellen am geringsten, weshalb diese Stelle im 2D-Histogramm eher den idealen Verlauf durch die Streuung der Radarwelle im Probekörper darstellen. In Abbildung 27 ist das 2D-Histogramm aus Abbildung 26 für eine bessere Veranschaulichung zusammen mit dem mittleren A-Scan dargestellt, um die Übereinstimmung der Stellen mit den Einschnürungen im 2D-Histogramm und den Maxima/Minima Stellen des mittleren A-Scans zu zeigen.

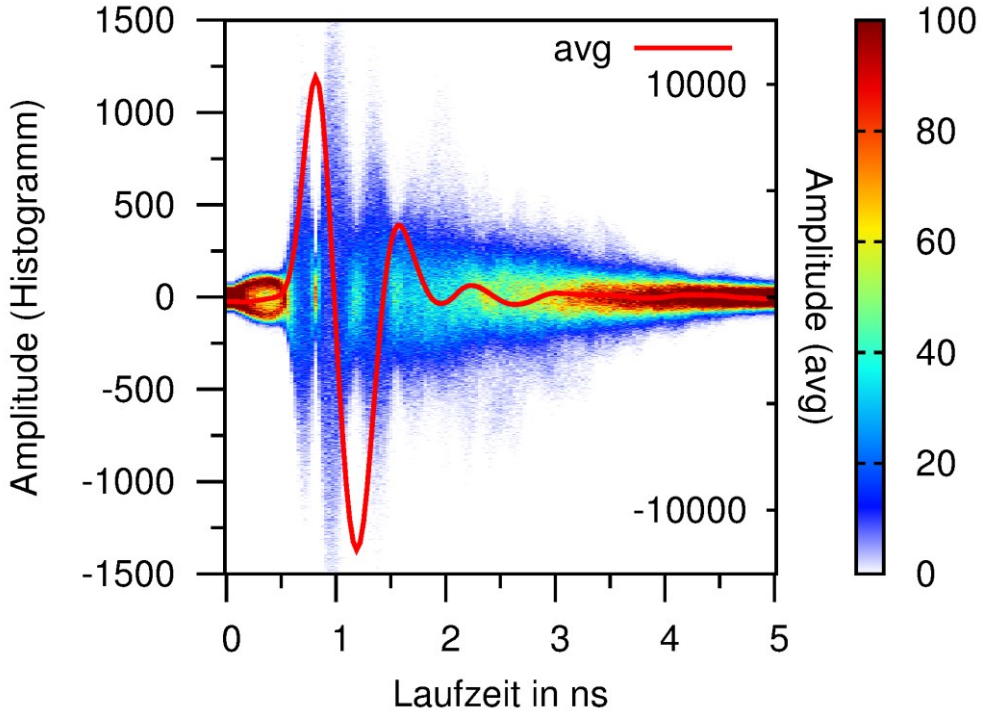

Abbildung 27 2D-Histogramm, Häufigkeitsdichtedarstellung der Amplitudenwerte eines Zeitschnittes in Abhängigkeit von der Laufzeit, wie Abbildung 26, aber mit mittlerem A-Scan

Neben dem Phasenrauschen der Abtast-Halte-Schaltung ist das Verstärkerrauschen zu berücksichtigen. Das alleinige Verstärkerrauschen ist in Abbildung 27 im Bereich bis etwa 0,5 ns deutlich im 2D-Histogramm zu sehen, da in diesem Bereich noch kein Empfangssignal vorhanden ist.

Wie die zusätzliche Verbreiterung des Histogramms durch gerätespezifisches Rauschen korrigiert werden kann, wird im übernächsten Abschnitt gezeigt.

4.2.4 Quantitative Bewertung

Bisher wurden die schwachen Streuungen visuell in Zeitschnitten oder als Häufigkeitsverteilung der Amplituden dargestellt. Als Nächstes soll statistisch die „Stärke“ der schwachen Streuungen in Abhängigkeit von der Laufzeit quantitativ ermittelt werden.

Die „Stärke“ der schwachen Streuungen soll über den Effektivwert (engl. Root mean square, RMS) der Amplituden *A(x,y,t)* eines Zeitschnitts berechnet werden. Nur das Wechselsignal (AC) der Amplituden eines Zeitschnitts wird für die Berechnung des Effektivwertes verwendet, um ausschließlich die schwachen Streuungen durch die Heterogenität des Betons zu erfassen. Die direkte Welle wird dadurch nicht erfasst, da die direkte Welle eine konstante Amplitude im Zeitschnitt hat. Der resultierende Wert für die Stärke der schwachen Streuung wird mit $RMS_{AC}(t)$ bezeichnet und berechnet sich zu:

$$RMS_{AC}(t) = \sqrt{\frac{1}{n_{max} * m_{max}} \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} (A(x_n, y_m, t) - \bar{A}(t))^2} \tag{5}$$

$$mit\ \bar{A}(t) = \frac{1}{n_{max} * m_{max}} \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} A(x_n, y_m, t) \tag{6}$$

Als Gesamtheit für die Berechnung des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ der schwachen Streuung werden alle Amplituden eines Zeitschnitts aus der Messfläche von 0,5 m x 0,5 m verwendet. Durch das dichte Messraster von 2,5 mm x 5,0 mm steht eine Anzahl von 20301 einzelnen Amplitudenwerten (n_{max}*m_{max}, n_{max}=201, m_{max}=101) pro Zeitschnitt für die statistische Auswertung der schwachen Streuungen zur Verfügung.

Die Darstellung der Effektivwerte $RMS_{AC}(t)$ der Wechselsignale eines Zeitschnittes in Abhängigkeit von der Laufzeit ist in Abbildung 28 dargestellt. Für die Berechnung des Effektivwertes wurden nur Rohdaten der Messungen vom Referenzprobekörper RPK1 verwendet. d. h., die Amplituden wurden nicht laufzeitabhängig verstärkt.

Der Vergleich mit den 2D-Histogrammen aus Abbildung 26 und Abbildung 27 zeigt den gleichen Verlauf der Verteilung der Amplitude wie der Effektivwert in Abhängigkeit von der Laufzeit. Im Bereich der direkten Welle bis etwa 1,5 ns schwanken die Effektivwerte in Abbildung 28 entsprechend der Breite der Amplitudenverteilung aus Abbildung 26 und Abbildung 27 und nehmen anschließend stetig mit steigender Laufzeit ab.

Die Effektivwerte aus Abbildung 28 sind in Abbildung 29 einfach logarithmisch dargestellt, um den Dynamikbereich der Effektivwerte besser darstellen zu können. Unter dem Begriff Dynamikbereich wird hier das Verhältnis zwischen Maximum und Minimum der Effektivwerte verstanden. Die minimalen Werte des Dynamikbereiches

unterschreiten nicht die Amplitudenwerte von ca. 30, sowohl am Anfang des Laufzeitfensters als auch am Ende des Laufzeitfensters von 5 ns. Da diese Grundschwankungen schon vor Beginn des Empfangs der direkten Welle vorhanden sind, ist davon auszugehen, dass die untere Grenze der Effektivwerte durch das Rauschen des Messsystems selber und nicht durch die schwachen Streuungen der Radarwellen im Probekörper verursacht wird.

Die lokalen Maxima im Bereich bis ungefähr 1,5 ns werden wie in den 2D-Histogrammen durch das gerätespezifische Rauschen verursacht.

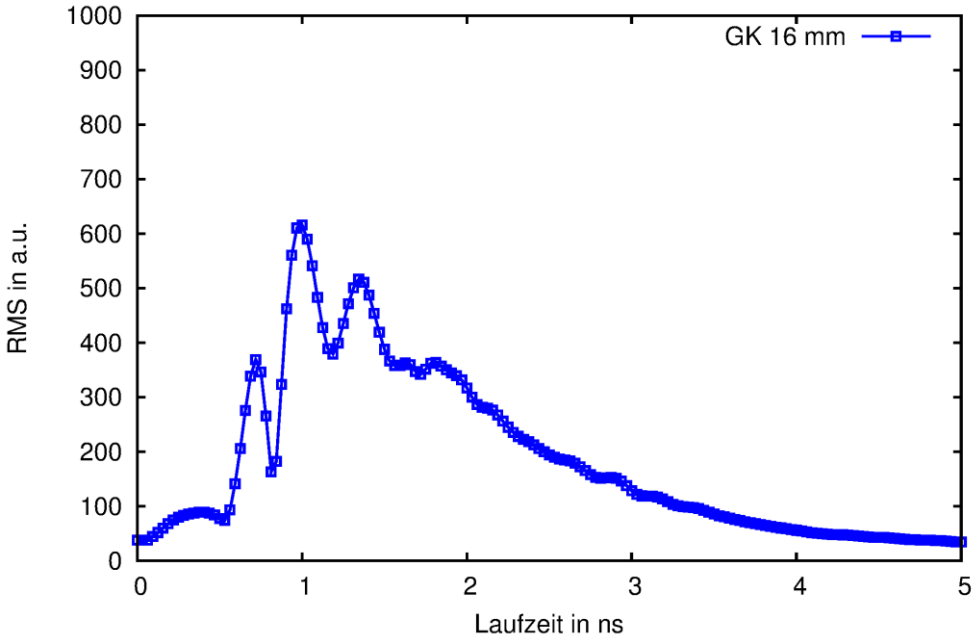

Abbildung 28 Effektivwerte (RMS) der Schwankungen von Zeitschnitten im Bereich bis 5ns (lineare Dartsellung der RMS Werte)

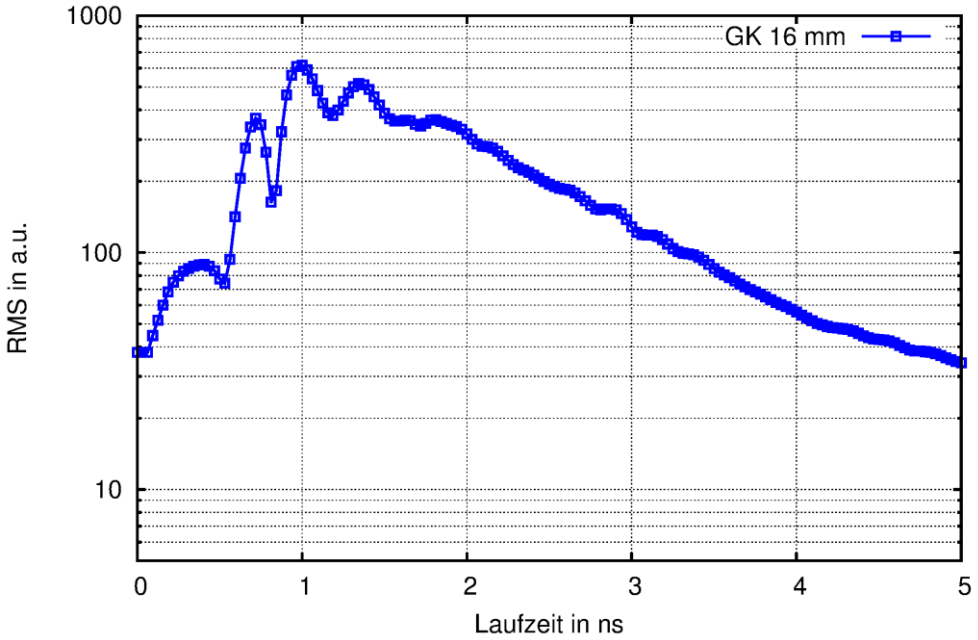

Abbildung 29 Effektivwerte (RMS) der Schwankungen von Zeitschnitten im Bereich 0 bis 5 ns (logarithmische Darstellung der RMS Werte aus Abbildung 28)

4.2.5 Datenbearbeitung

Der Unterschied zwischen den Schwankungen durch das Messsystem selber und Schwankungen infolge von schwachen Streuungen im Probekörper wird deutlich, wenn zu den Zeitschnitten noch der Amplitudenverlauf entlang einer Linie parallel zur x- oder y-Achse dargestellt wird. In Abbildung 30 sind neben den drei Zeitschnitten jeweils zwei Amplitudenverläufe entlang der roten und blauen Linien in den Zeitschnitten dargestellt.

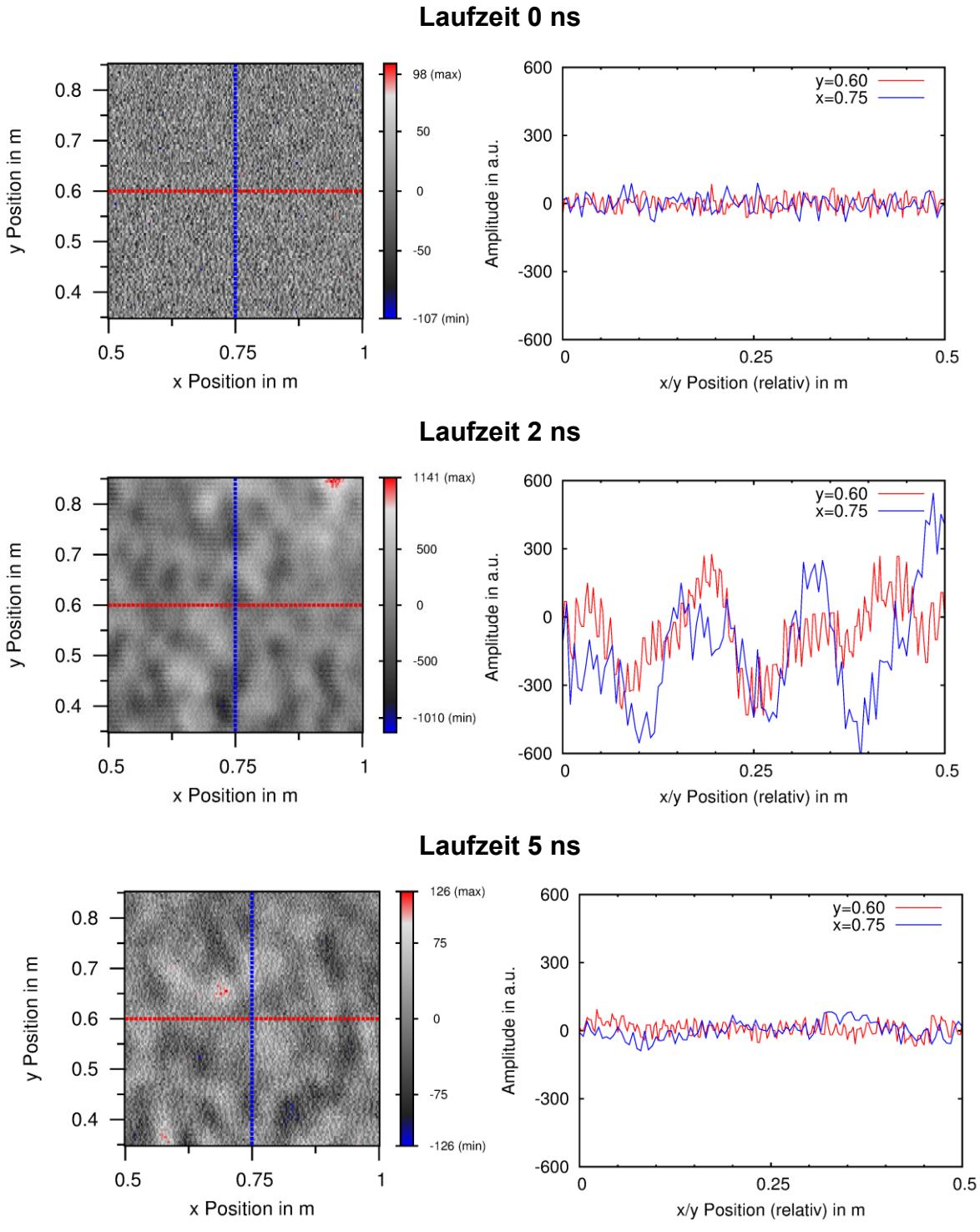

Abbildung 30 Gegenüberstellung von Zeitschnitten (links) und Amplitudenverläufen (rechts) mit den Laufzeiten 0, 2 und 5 ns;

Die Laufzeiten für die Zeitschnitte wurden einmal vor der direkten Welle bei 0 ns, kurz nach der direkten Welle bei 2 ns, und nach längerer Zeit bei 5 ns ausgewählt. Alle Amplitudenverläufe weisen eine hochfrequente Schwankung auf. In den Amplitudenverläufen der Zeitschnitte 2 ns und 5 ns überlagern sich neben dem hochfrequenten gerätespezifischen Rauschen noch die niederfrequenten schwachen Streuungen an der Heterogenität des Betons, die am stärksten in dem Zeitschnitt direkt nach der direkten Welle bei 2 ns sind. Aber auch zur Laufzeit von 5 ns sind besonders im Zeitschnitt die schwachen Streuungen noch gut zu erkennen im Gegensatz zu den Amplitudenverläufen, die stark durch das hochfrequente Rauschen dominiert werden.

Die Begriffe hochfrequent und niederfrequent beziehen sich in diesem Abschnitt nicht, wie sonst üblich, auf ein zeitlich, sondern auf ein örtlich veränderliches Signal. Das ortsabhängige Signal ist der Verlauf der Reflexionsamplituden in x- und y-Richtung. In diesem Zusammenhang wird auch von Orts- oder Raumfrequenzen gesprochen. Die Raumfrequenz gibt die Anzahl der Perioden einer Welle pro Längeneinheit an und hat deshalb die Einheit 1/m. Die Trennung zwischen dem Rauschen durch das Messsystem und den physikalischen Streuungen im Volumen des Probekörpers kann durch eine räumliche Filterung in x- und y-Richtung erfolgen.

Die Wirkung der räumlichen Tiefpassfilterung ist beispielhaft für zwei Amplitudenverläufe in Abbildung 31 dargestellt.

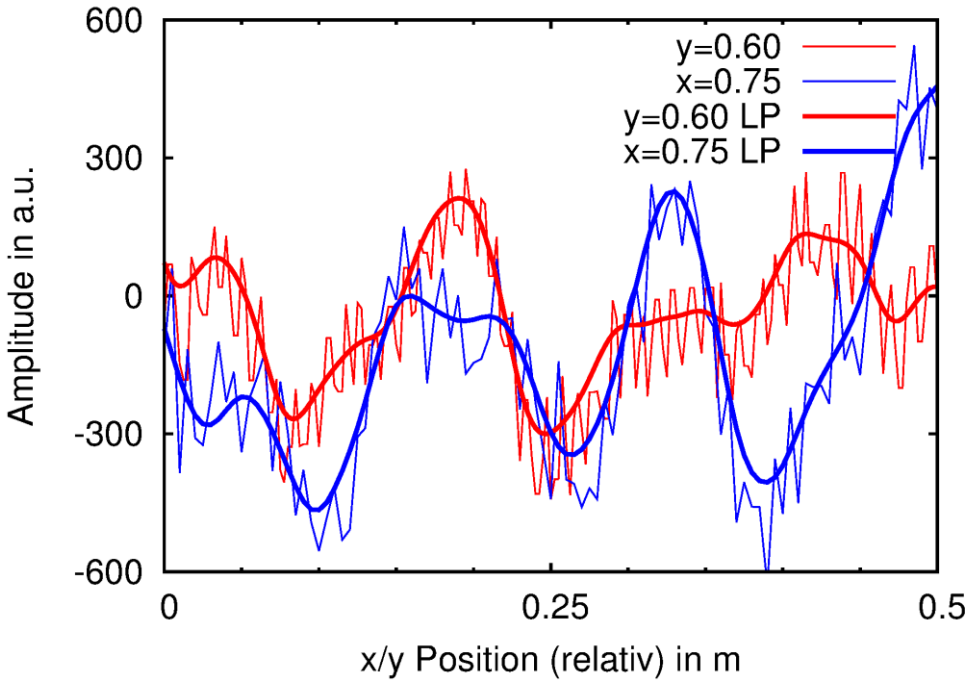

Abbildung 31 Amplitudenverlauf ohne und mit Tiefpassfilterung (f_g = 50 m^{-1})

Die Amplitudenverläufe entsprechen den Verläufen in Abbildung 30 für den Zeitschnitt bei t = 2 ns. Der hochfrequente Anteil des gerätespezifischen Rauschens wird durch einen Tiefpassfilter aus dem Amplitudenverlauf herausgemittelt, ohne dass der Verlauf der schwachen Streuung stark verändert wird. Die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters beträgt 50 m^{-1}, d. h., dass die örtlichen Schwingungen im

Amplitudenverlauf mit einer Periodenlänge von weniger als 2 cm herausgefiltert werden.

Die Wirkung der Tiefpassfilterung als Darstellung der Ortsfrequenzspektren vor und nach der Filterung sind in Abbildung 32 dargestellt. Dazu werden die Amplitudenverläufe zunächst mit Hilfe der diskreten Fourier-Transformation in den Ortsfrequenzraum transformiert. Die sinnvolle obere und untere Ortsfrequenz des Spektrums ergibt sich aus der Länge des Amplitudenverlaufs und der örtlichen Abtastfrequenz. In diesem Beispiel beträgt die Länge und Breite des Zeitschnittes 0,5 m und die örtliche Abtastfrequenz 2,5 mm in x-Richtung und 5 mm in y-Richtung. Für die untere Ortsfrequenz des Spektrums in x- und y-Richtung resultiert daraus: 2 m^{-1} (1/0.5m) und für die obere Ortsfrequenz des Spektrums resultiert daraus 400 m^{-1} in x-Richtung (1/0,0025 m^{-1}) und 200 m^{-1} in y-Richtung. (1/0,005 m^{-1}). Der Vergleich der Ortsfrequenzspektren zeigt, dass die hochfrequenten Anteile des gerätespezifischen Rauschens oberhalb von 50 m^{-1} sehr gut herausgefiltert werden, und dass das Spektrum etwas weniger als 50 m^{-1} nur schwach durch die Tiefpassfilterung verändert wird.

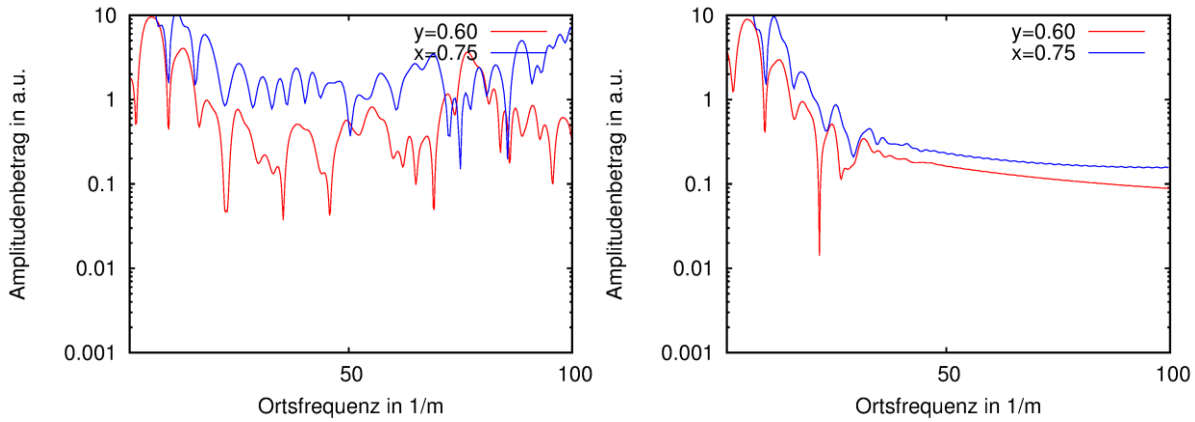

Abbildung 32 Ausgangsspektrum (links) der Amplitudenverläufe (t = 2 ns); Spektrum nach einer Tiefpassfilterung mit der Grenzfrequenz fg = 50 m^{-1} (rechts)

Als Nächstes wird die räumliche Filterung in x- und y-Richtung auf die RMS Verläufe der schwachen Streuung angewendet. Die Darstellung der schwachen Streuungen sind in der Abbildung 33 bis Abbildung 35 in Form der Rohdaten, der Tiefpass-gefilterten Rohdaten und der Tief- und Hochpass-gefilterten Rohdaten dargestellt. Jede Abbildung umfasst die Darstellung des Verlaufs des Effektivwertes RMS (blau) mit der Darstellung von sechs Zeitschnitten, deren Laufzeit im Verlauf der Effektivwerte mit roten Punkten und Pfeilen kenntlich gemacht wurde. Zum Vergleich ist unterhalb des RMS-Verlaufs das dazugehörige 2D-Histogramm gezeigt.

Unbearbeitete Daten (Rohdaten)

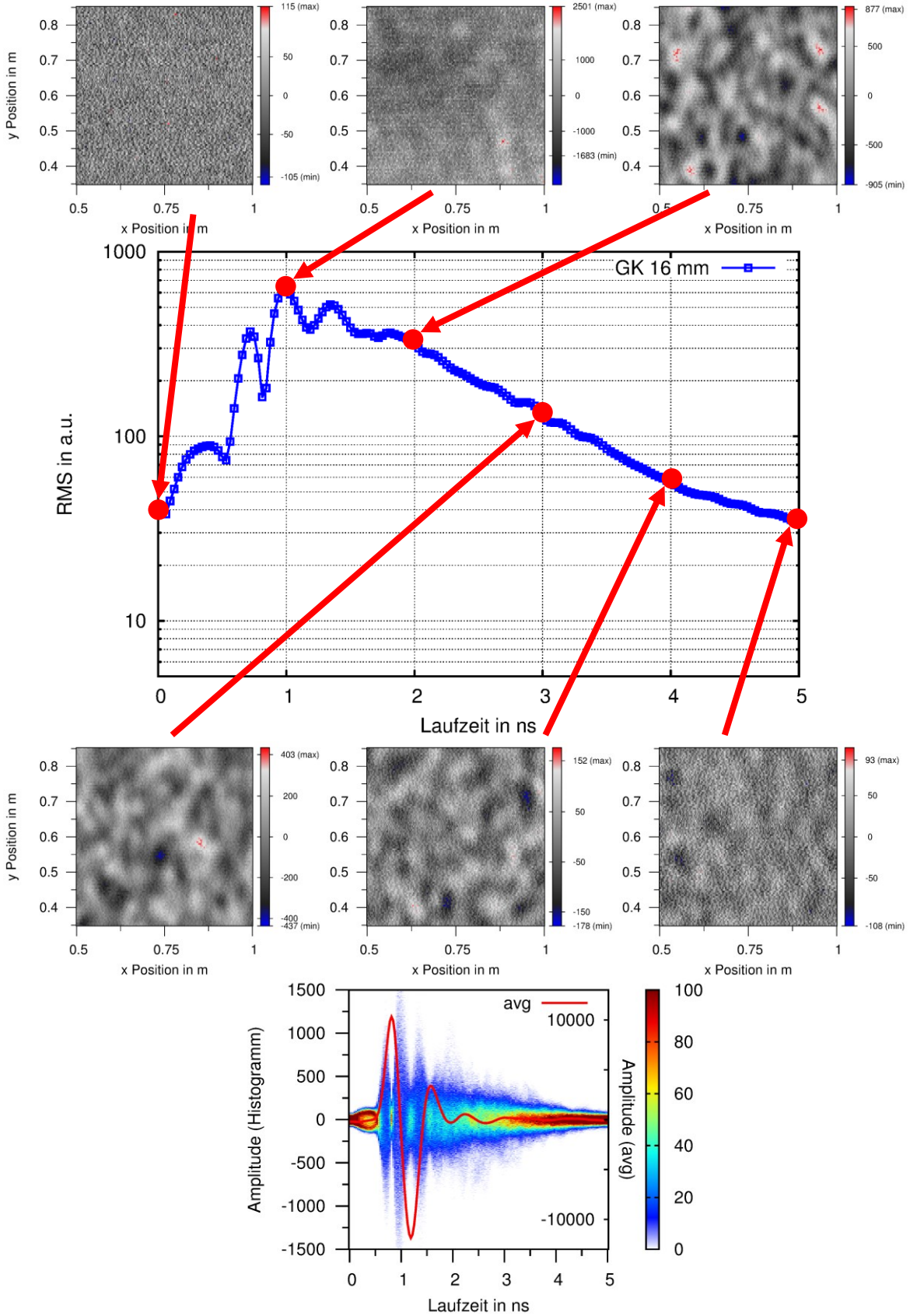

Abbildung 33 Darstellung der schwachen Streuung der Heterogenität von Beton anhand von unbearbeiteten Messdaten

Räumliche 2D-Tiefpassfilterung

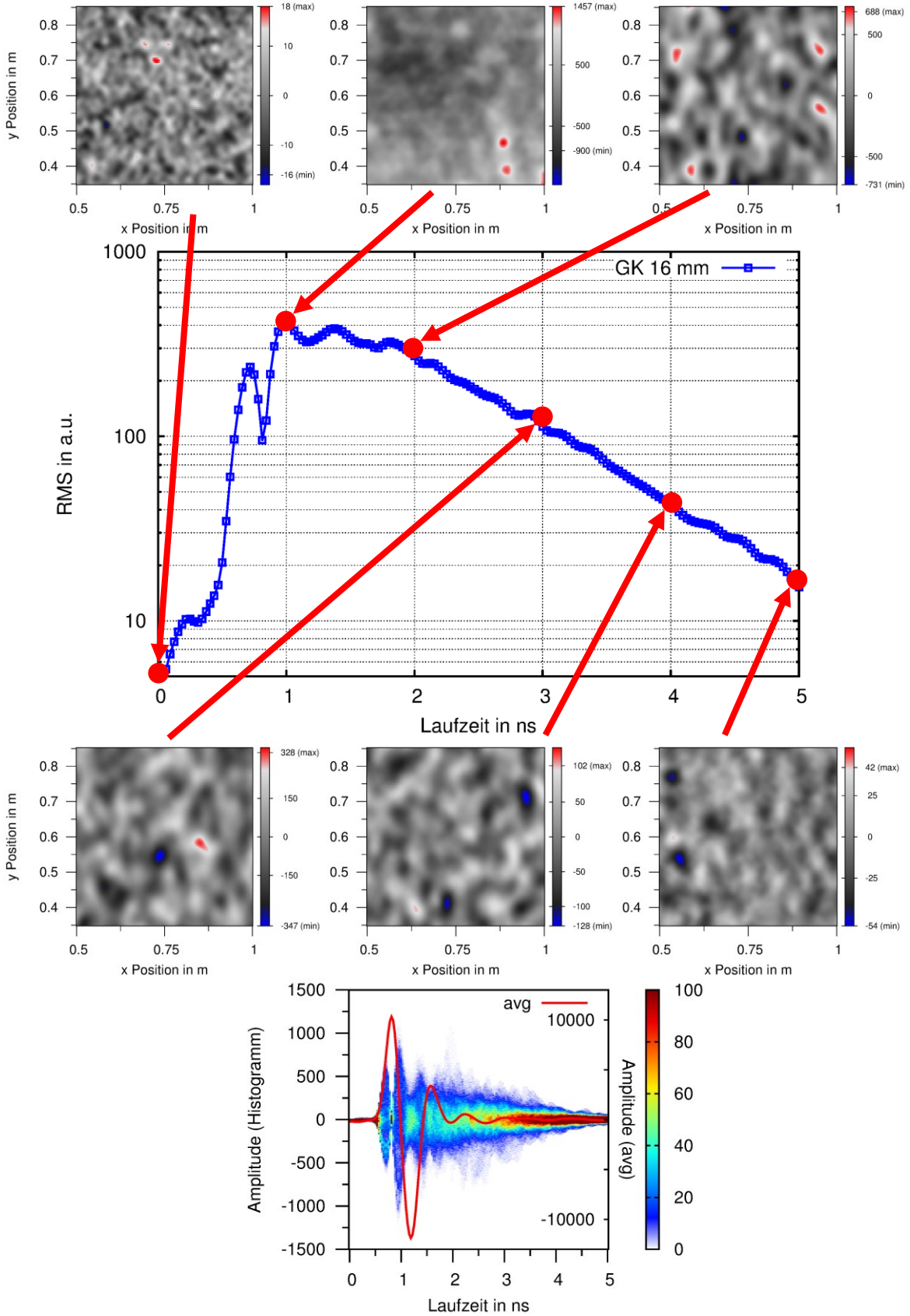

Abbildung 34 Darstellung der schwachen Streuung der Heterogenität von Beton anhand der Tiefpass-gefilterten Messdaten

Räumliche 2D-Tiefpass- und Hochpassfilterung

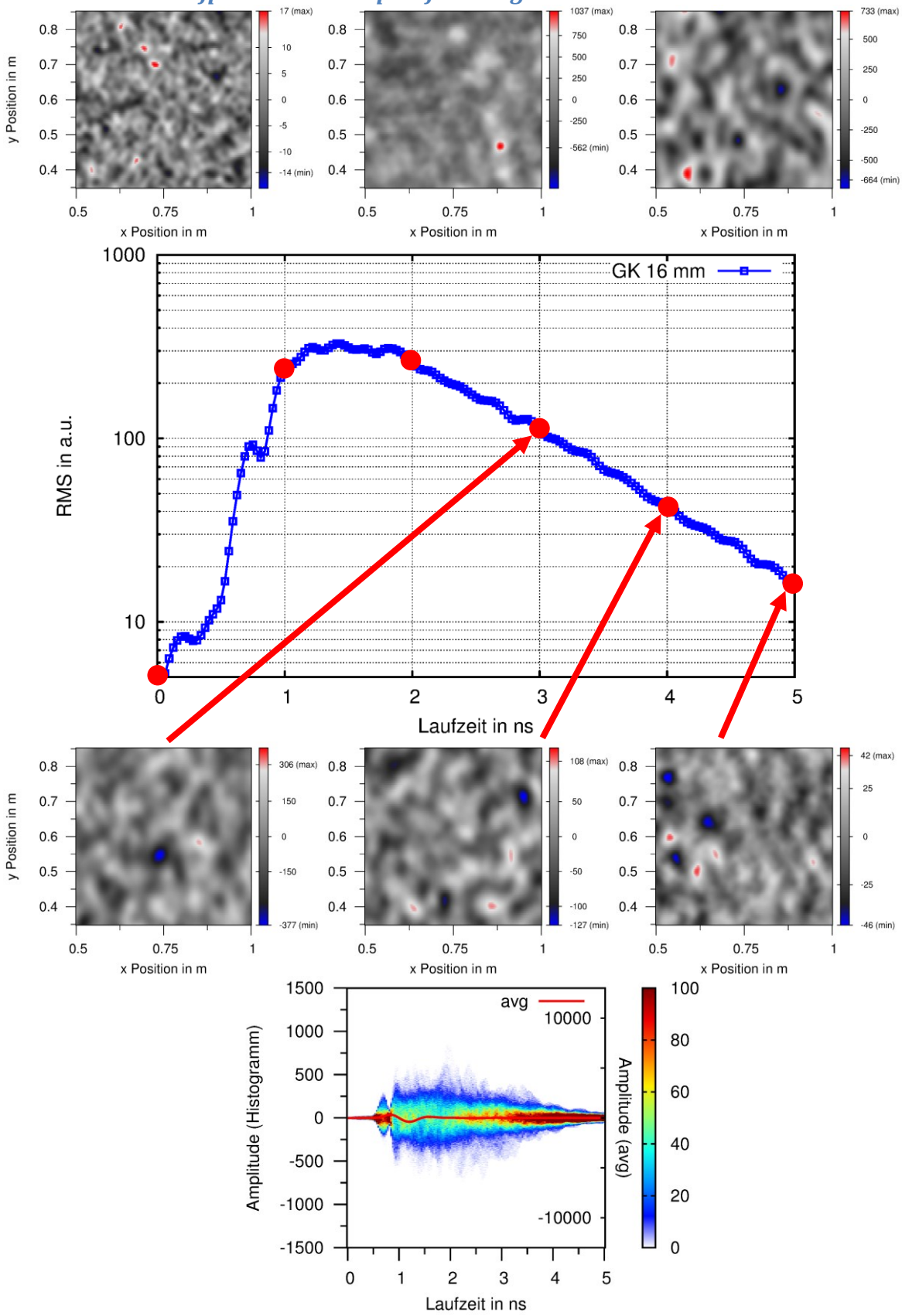

Abbildung 35 Darstellung der schwachen Streuung der Heterogenität von Beton anhand der Tiefpass- und Hochpass-gefilterten Messdaten

Der Vergleich zwischen den Rohdaten (Abbildung 33) und den mit einem Tiefpass gefilterten Daten (Abbildung 34) zeigt, dass am Anfang und am Ende des Laufzeitfensters die Effektivwerte durch die Tiefpassfilterung sinken, ohne aber die Muster der Zeitschnitte aufgrund der schwachen Streuung zu verändern. Im Bereich der direkten Welle bis etwa 1,5 ns ist die Welligkeit des Effektivwertes durch den Tiefpassfilter reduziert worden. Eine Restwelligkeit ist aber weiterhin deutlich zu sehen. Die Restwelligkeit lässt sich durch eine weitere Hochpassfilterung weiter reduzieren (Abbildung 35).

Eine räumliche Filterung mit einem Hochpass bewirkt, dass neben dem Gleichanteil der Amplituden in einem Zeitschnitt auch Änderungen, die über die gesamte Messfeldgröße sich stetig und monoton ändern, herausgefiltert werden. Solche langsamen Änderungen sind sehr gut im Zeitschnitt t = 1 ns der Tiefpass-gefilterten Daten (Abbildung 34) zu sehen. Die obere Hälfte des Zeitschnittes ist dunkler als die untere. Derselbe Zeitschnitt zeigt nach der Hochpassfilterung (Abbildung 35) einen geringeren Kontrast zwischen der oberen und unteren Hälfte als nur mit einer Tiefpassfilterung (Abbildung 34).

Eine Zusammenstellung der drei Verläufe des Effektivwertes (Rohdaten, Tiefpass, Tiefpass und Hochpass) ist in Abbildung 36 dargestellt. Für die weiteren Betrachtungen der schwachen Streuungen an der Heterogenität von Beton werden in den folgenden Abschnitten immer Ergebnisse gezeigt, die Tief- und Hochpass-gefiltert wurden und somit der gerätespezifische Einfluss auf die Ergebnisse minimiert wurde.

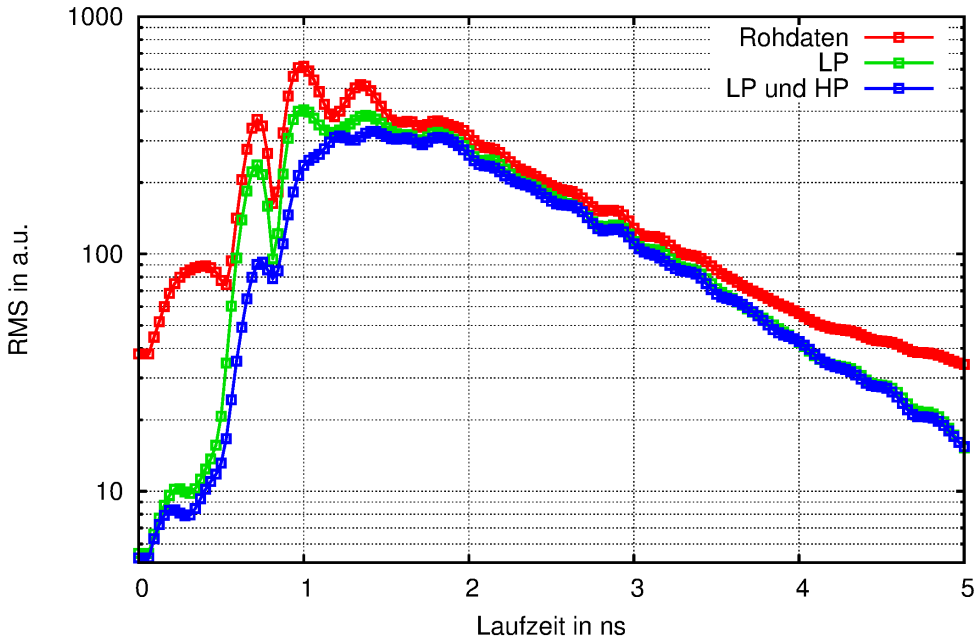

Abbildung 36 Verlauf des Effektivwertes für Rohdaten, Tiefpass- (LP) und Bandpass- (LP und HP) gefilterte Rohdaten

4.2.6 Einfluss der Antennenorientierung auf die quantitative Bewertung

Die Verläufe der Effektivwerte $RMS_{AC}(t)$ für die Antennenorientierung 0° und 90° sind in Abbildung 37 dargestellt. Beide Verläufe zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Und es treten nur geringe Unterschiede auf. Die Ausrichtung der Antenne zeigt keinen Einfluss auf die quantitative Bewertung der schwachen Streuung der Radarwellen an der Heterogenität von Beton.

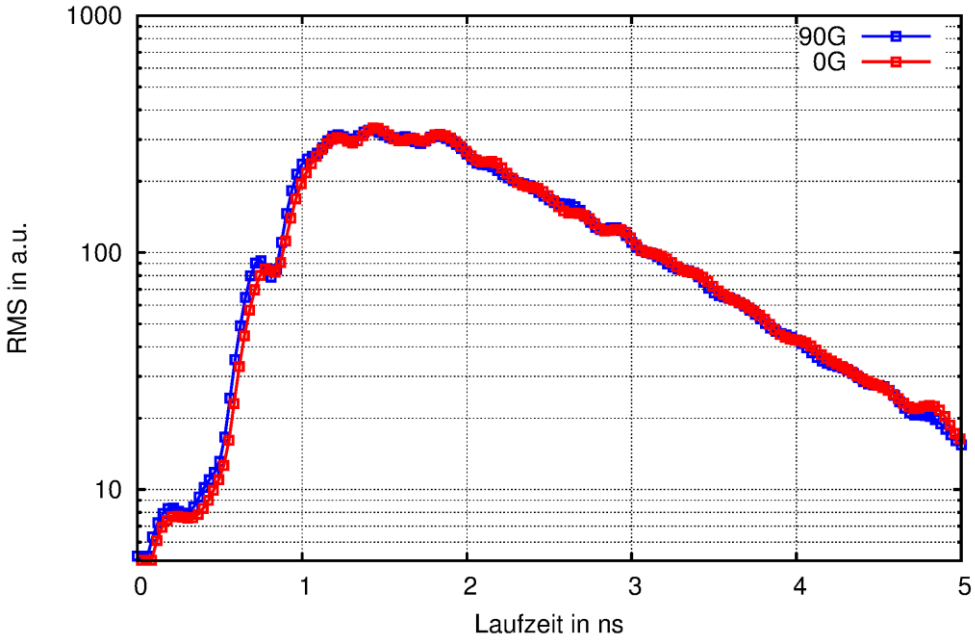

Abbildung 37 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für die Antennenorientierung 0° (rot) und 90° (blau); 1,5 GHz Antenne

Dieses Ergebnis entspricht auch dem Ergebnis vom visuellen Vergleich der Zeitschnitte für die beiden Antennenorientierungen aus Abschnitt 4.2.1. Der geringe Unterschied zwischen den Zeitschnitten für die Antennenorientierung ist durch die asymmetrische Geometrie der Gesteinskörner bedingt. Durch die Mittelung bei der Berechnung des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ werden die geringen Unterschiede aufgrund der Antennenorientierung in den Zeitschnitten wieder ausgeglichen, da es keine Vorzugsrichtung bei der Ausrichtung der Gesteinskörner im Volumen gibt.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurden immer an Zuschlägen aus Quarzkies vorgenommen. Normalerweise hat Quarzkies eher eine runde Gestalt und somit ergibt sich von Natur aus kein Unterschied bei der Reflexion für unterschiedliche Antennenorientierungen. Es ist zu erwarten, dass bei asymmetrischen Gesteinskörnern und einer Ausrichtung der Gesteinskörner bei der Herstellung von Beton die Messung der Streuungen anhand des Effektivwertes zu einer Abhängigkeit von der Antennenorientierung führt. Sollte dies der Fall sein, könnte die Antennenorientierung dazu genutzt werden, die Gestalt der Gesteinskörner zu klassifizieren.

4.2.7 Vergleichsmessung in Luft

Zur Trennung der Streuung der Radarwellen im Beton vom gerätespezifischen Rauschen wurden die automatisierten Messungen mit dem schnellen Bauwerkscanner in Luft und ohne Probekörper durchgeführt. Der Scanner wurde hierzu etwa einen Meter vom Probekörper entfernt. Mit dem Bauwerkscanner wurde die gleiche Fläche abgefahren, wie in den vorherigen Versuchen. Anschließend wurden die Messdaten von einer Messfläche der Größe 0,5 m x 0,5 m und einem Punktabstand von 2,5 mm x 5 mm ausgewertet. Das 2D-Histogramm der Messung in Luft ist zusammen mit dem 2D-Histogramm der Messung an einem Betonprobekörper in Abbildung 38 dargestellt.

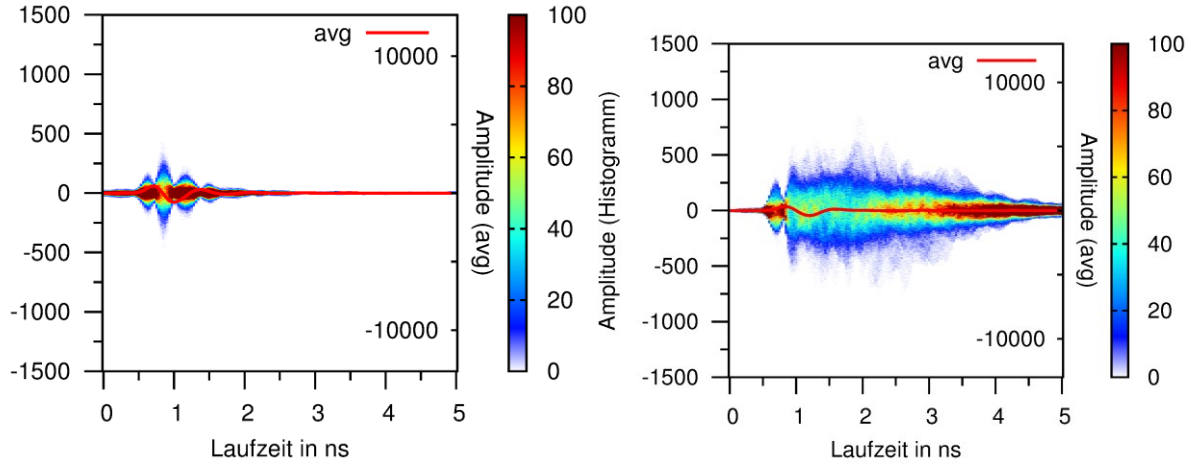

Abbildung 38 2D-Histogramm, Häufigkeitsdichtedarstellung der Amplitudenwerte eines Zeitschnittes in Abhängigkeit von der Laufzeit und mittleren A-Scan, Luft (links), Betonprobekörper (rechts)

Im Vergleich zu dem 2D-Histogramm, das am Betonprobekörper aufgenommen wurde, ist im Bereich nach der direkten Welle (> 1,5 ns) keine merkliche Verteilung der Amplituden vorhanden, da sich auch keine Streuobjekte in der Luft befinden. Die noch vorhandenen Schwankungen des 2D-Histogramms von der Messung in Luft sind durch das gerätespezifische Rauschen bedingt, das mit der Tief- und Hochpassfilterung nicht vollständig unterdrückt werden kann.

4.2.8 Vergleich für Größtkorn 16 mm und 32 mm

In diesem Abschnitt soll der Unterschied der schwachen Streuung aufgrund der Heterogenität von Beton für zwei unterschiedliche Sieblinien untersucht werden. Die beiden Sieblinien unterscheiden sich in ihrem Größtkorn von 16 mm und 32 mm (GK16 und GK32). Die Verläufe der Effektivwerte für GK16 und GK32 sind in Abbildung 39 dargestellt. Die Effektivwerte wurden wieder für eine Messfläche von 0,5 m x 0,5 m bestimmt. In dem Probekörper befinden sich Bewehrungsstäbe mit einer Einbautiefe von 210 mm bis 330 mm. Durch die zentrierte Lage des Messfeldes und die Beschränkung der Laufzeit auf 5 ns wird der Effektivwert nicht durch die Reflexionen der Bewehrungsstäbe beeinflusst. Der Vergleich beider Effektivwerte für den Laufzeitbereich nach der direkten Welle (> 2 ns) zeigt einen deutlichen Unterschied im Abfall zwischen dem Größtkorn GK16 und GK32. Die Streuungen durch das Größtkorn GK32 sind in diesem Laufzeitbereich größer als durch das Größtkorn GK16. Die geometrische Abmessung beider Sieblinien mit dem Größtkorn GK16 und GK32 sind kleiner als die Wellenlängen der 1,5 GHz Antenne. Die Streuungen der elektromagnetischen Radarwellen an Gesteinskörnern für das Größtkorn GK32 sind größer als für das Größtkorn GK16, weil die geometrische Größe der Gesteinskörner näher an den unteren Wellenlängenbereich der 1,5 GHz-Antenne heranreicht.

Für die Quantifizierung des Unterschieds des Abfalls der beiden Verläufe des Effektivwertes für das Größtkorn GK16 und GK32 wurden die beiden Kurven für den Laufzeitbereich > 2 ns durch eine Exponentialfunktion angenähert.

$$RMS_{AC}(t) = A * e^{-tB} \tag{7}$$

Die mit einer nichtlinearen Ausgleichsrechnung nach dem Marquardt-Levenberg-Algorithmus und der Methode der kleinsten Quadrate ermittelten Funktion ist in Abbildung 39 mit eingezeichnet.

Der Funktionsparameter B bestimmt die Neigung der Ausgleichsfunktion und der Funktionsparameter A die Lage auf der Ordinate der einfach logarithmisch dargestellten Ausgleichsgraden. Die Neigungsparameter B für das Größtkorn GK16 und GK32 betragen 0,673 ns^{-1} und 0,883 ns^{-1}. Die Lageparameter A für das Größtkorn GK16 und GK32 betragen 1533 und 1146.

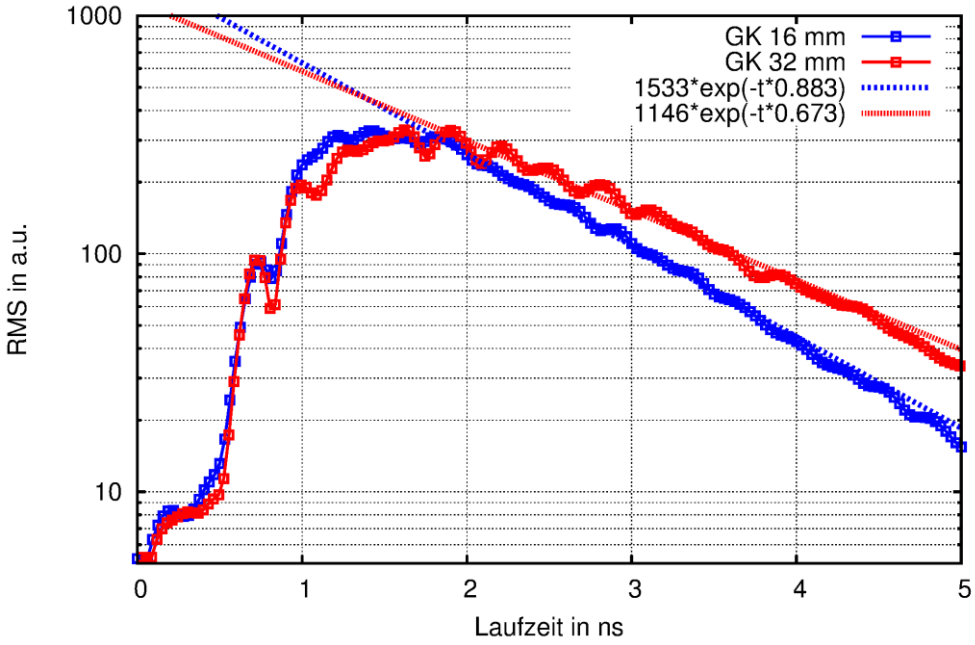

Abbildung 39 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für Beton mit der Sieblinie GK16 (blau) und GK32 (rot); Vorderseite der Probekörper vom Typ PK2; 1,5 GHz-Antenne

Die Auswertungen für die Unterscheidung der Effektivwerte für das Größtkorn GK16 und GK32 wurden am PK1 auf der Rückseite wiederholt, um die Aussagekraft der ermittelten Funktionsparameter A und B zu demonstrieren. Die Probekörper des Typs PK1 haben Bewehrungsstäbe mit einer Einbautiefe von 60 mm bis 180 mm, gemessen von der Vorderseite. Von der Rückseite beträgt die minimale Einbautiefe 480 mm, so dass die Laufzeiten der Reflexionen an den Bewehrungsstäben größer als 5 ns betragen und die Auswertung nicht beeinflussen. Die Verläufe der Effektivwerte für das Größtkorn GK16 und GK32 an den Rückseiten der Probekörper vom Typen PK1 sind in Abbildung 40 dargestellt.

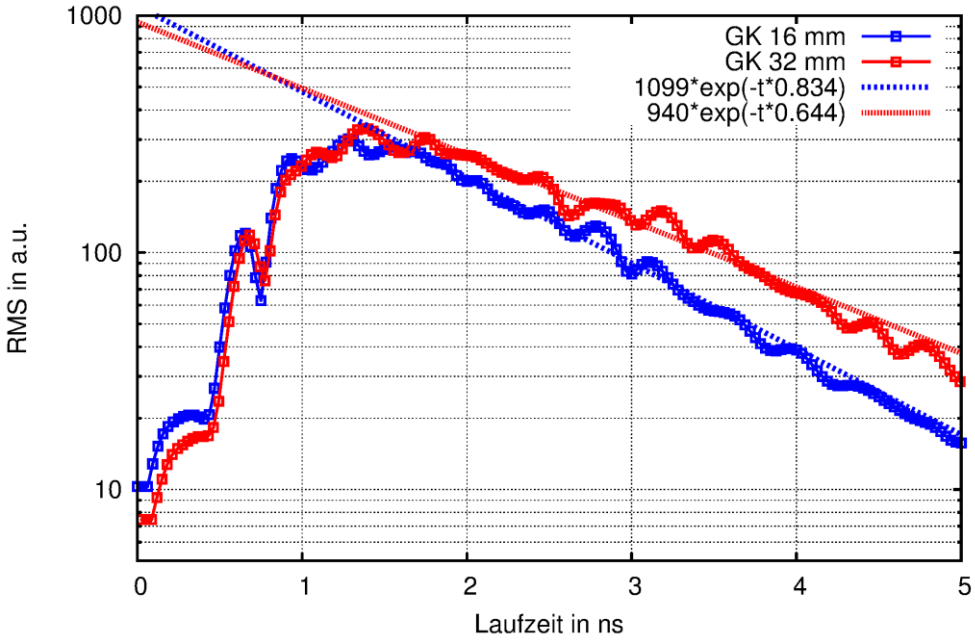

Abbildung 40 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für Beton mit der Sieblinie GK16 (blau) und GK32 (rot); Rückseite der Probekörper vom Typ PK1; 1,5 GHz-Antenne

Die Funktionsparameter A und B für die Messungen an den Probekörpertypen PK2 und PK1 (s. Seite 32), und dem Größtkorn GK16 und GK32 sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1 Funktionsparameter A und B der exponentiellen Ausgleichsfunktion unterschiedliche Sieblinien (1,5 GHz-Antenne)

	GK16		**GK32**	
	PK2 (Vorders.)	PK1 (Rücks.)	PK2 (Vorders.)	PK1 (Rücks.)
A (Lageparameter)	1533	1099	1146	940
B (Formparameter)	0,883 ns^{-1}	0,834 ns^{-1}	0,673 ns^{-1}	0,644 ns^{-1}

Der für die Neigung bestimmende Funktionsparameter B zeigt eine gute Übereinstimmung bei den Probekörpern mit dem gleichen Größtkorn. Der Unterschied zwischen den Probekörpern mit dem gleichen Größtkorn liegt bei etwa 5 %. Ein Vergleich zwischen den Funktionsparametern B des Größtkorns GK16 und GK32 zeigt einen wesentlich größeren Unterschied. Der Funktionsparameter B für das Größtkorn GK32 ist etwa 23 % größer als der für das Größtkorn G16. Der Funktionsparameter B ist deshalb gut geeignet, um anhand der Messung der schwachen Streuungen im Volumen die unterschiedliche Heterogenität des Betons aufgrund einer unterschiedlichen Sieblinie mit dem Größtkorn GK16 oder GK32 mit Radar festzustellen.

Der Funktionsparameter A (Lageparameter) zeigt sowohl zwischen Probekörpern mit dem gleichen Größtkorn (PK1 und PK2) als auch bei Probekörpern mit unterschiedlichem Größtkorn (GK16 und GK32) deutlich unterschiedliche Werte und ist deshalb nicht als Parameter zur Unterscheidung des Größtkorns geeignet.

Die als Ausgleichsfunktion verwendete Exponentialfunktion ist die mathematische Beschreibung für einen exponentiellen Prozess, der einem exponentiellen Abfall oder einer entsprechenden Abnahme entspricht. Für solch einen Prozess ist die momentane Abnahme proportional zum augenblicklichen Wert. Der Proportionalitätsfaktor zwischen dem Funktionswert und seiner momentanen Abnahme entspricht dem Funktionsparameter B. Der Kehrwert von B entspricht einer Zeitkonstanten, in der ein Funktionswert auf 1/e gesunken ist.

Der Funktionsparameter A bestimmt die Lage des exponentiellen Abfalls auf der Ordinate. A entspricht der Streuamplitude zum Zeitpunkt 0 und ist somit davon abhängig, wieviel Energie in die Oberfläche des Probekörpers eingekoppelt wird. Der nicht systematische Unterschied der Funktionsparameter A kann durch die unterschiedliche Energie-Ankoppelung aufgrund von einem unterschiedlichen Antennenabstand zur Oberfläche erklärt werden. Der Antennenabstand wurde für den Bauwerkscanner im Bereich von ca. 5 mm bis 10 mm eingestellt, so dass zwischen den Messungen ein Unterschied von maximal 5 mm bestehen konnte.

Die Ergebnisse für die ermittelten Funktionsparameter A und B der Ausgleichfunktion zeigen, dass trotz unterschiedlicher Ankopplung der Radarantenne an die Oberfläche der Probekörper der Funktionsparameter B, im Gegensatz zum Funktionsparameter A, gut geeignet ist, um als Materialkenngröße für die Heterogenität von Beton verwendet zu werden.

In Abbildung 41 und Abbildung 42 sind die Effektivwerte der schwachen Streuungen dargestellt, die mit einer 2,6 GHz-Antenne aufgenommen wurden.

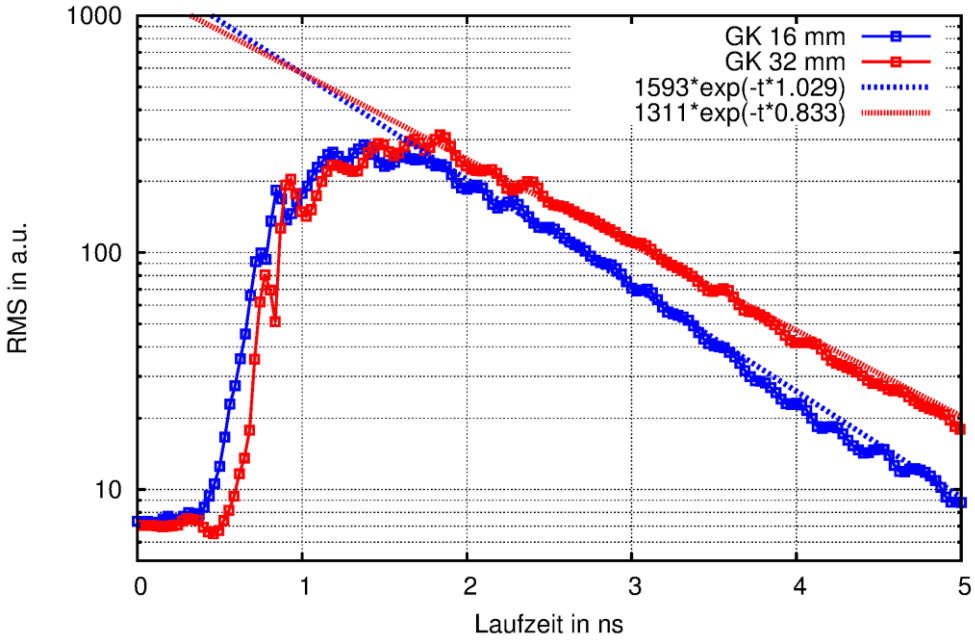

Abbildung 41 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für Beton mit der Sieblinie GK16 (blau) und GK32 (rot); Vorderseite der Probekörper vom Typ PK2; 2,6 GHz-Antenne

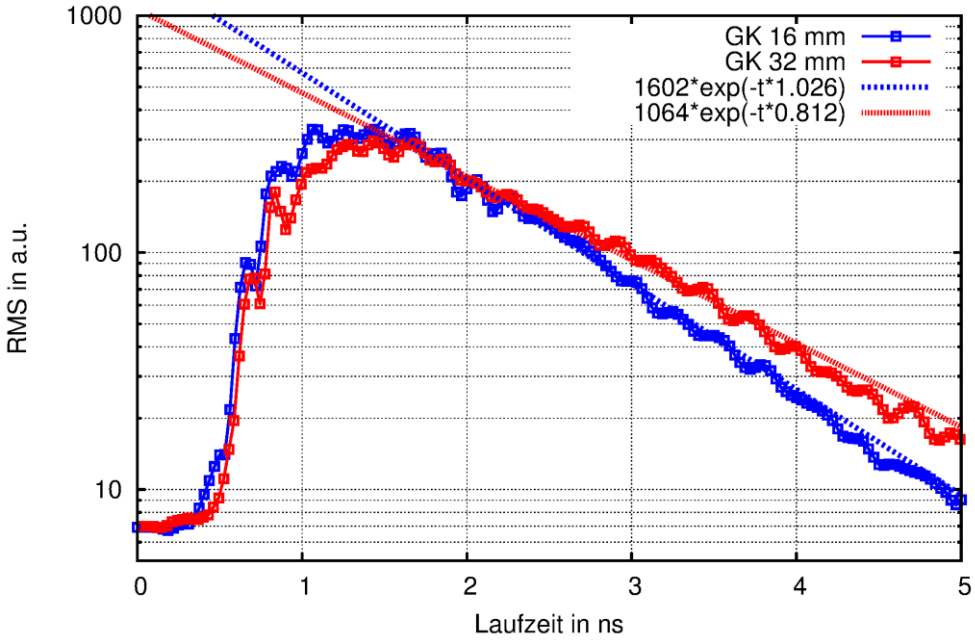

Abbildung 42 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für Beton mit der Sieblinie GK16 (blau) und GK32 (rot); Rückseite der Probekörper vom Typ PK1; 2,6 GHz-Antenne

Beide Abbildungen entsprechen den Messungen für die Abbildung 39 und Abbildung 40, nur dass anstelle der 1,5 GHz-Antenne eine 2,6 GHz-Antenne verwendet wurde. Die Wellenlänge der Signalmittenfrequenz für die 2,6 GHz-Antenne ist etwa 73 % kleiner als die entsprechende Wellenlänge für die 1,5 GHz-Antenne. Durch die verringerte Wellenlänge vergrößern sich auch die ermittelten Funktionsparameter B der Ausgleichsfunktionen. Die Zeitkonstanten (1/B) sind kleiner d.h., die Effektivwerte der 2,6 GHz-Antenne fallen mit der Laufzeit schneller ab als mit der 1,5 GHz-Antenne.

In der Tabelle 2 sind die Funktionsparameter entsprechend der Tabelle 1 (1,5 GHz Antenne) für die 2,6 GHz Antenne aufgeführt.

Tabelle 2 Funktionsparameter A und B der exponentiellen Ausgleichsfunktion unterschiedlicher Sieblinien (2,6 GHz-Antenne)

	GK16		**GK32**	
	PK2 (Vorders.)	PK1 (Rücks.)	PK2 (Vorders.)	PK1 (Rücks.)
A (Lageparameter)	1593	1602	1311	1064
B (Formparameter)	1,029 ns^{-1}	1,026 ns^{-1}	0,833 ns^{-1}	0,812 ns^{-1}

4.2.9 Reproduzierbarkeit der Schwankungen im Volumen

Wiederholungsmessungen über einen längeren Zeitraum von mehr als einem Jahr zeigen eine gute Übereinstimmung in den Interferenzmustern der Zeitschnitte. In Abbildung 43 sind zwei Zeitschnitte abgebildet, die am selben Probekörper, aber zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Zwischen den beiden Zeitpunkten der Messungen lagen etwa 18 Monate. Die geringen Unterschiede in den Amplituden zwischen den beiden Zeitschnitten sind wahrscheinlich mehr den unterschiedlichen Bedingungen der Ankopplung der Antenne an die Oberfläche des Probekörpers geschuldet, als dass sich an den Materialeigenschaften des Betons etwas geändert hat.

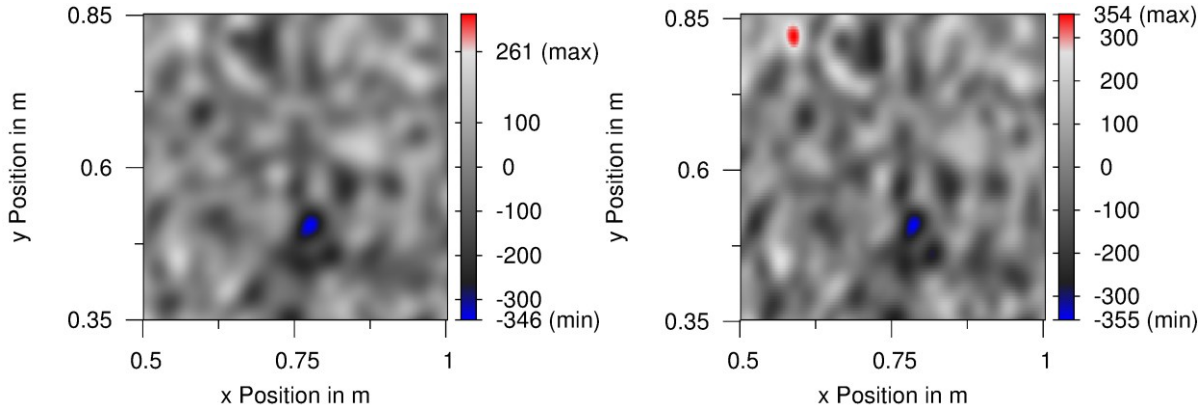

Abbildung 43 Zeitschnitt mit einer 2 GHz-Antenne, aufgenommen im Juli 2012 (links) und Januar 2014 (rechts)

Der Vergleich zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Abbildung 43) wurde anhand von Messungen mit einer 2 GHz-Antenne durchgeführt, da für die 1,5 GHz- und 2,6 GHz-Antenne keine Vergleichsmessungen über einen längeren Zeitraum vorlagen. Ein Vergleich der Zeitschnitte aus Abbildung 43 mit dem Zeitschnitt, der mit einer höheren Antennenfrequenz (2,6 GHz) aufgenommen wurde, zeigt Abbildung 44. Auch bei einer höheren Antennenfrequenz sind große Ähnlichkeiten zwischen den Abbildungen zu erkennen. Die Interferenzmuster der 2,6 GHz-Antenne sind aufgrund der kleineren Wellenlänge detaillierter als bei der 2 GHz-Antenne.

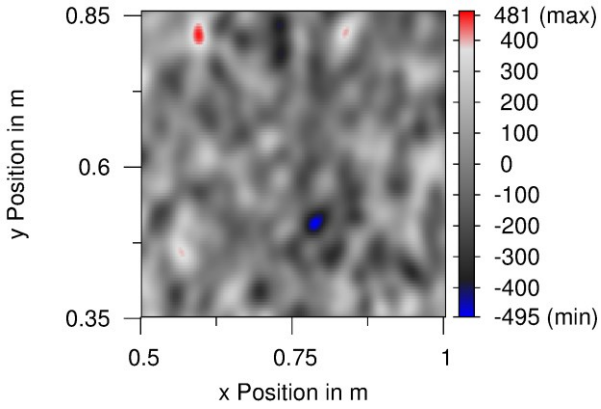

Abbildung 44 Zeitschnitt entsprechend Abbildung 43, aufgenommen mit einer 2,6 GHz-Antenne

4.3 Schwankungen der Reflexion an der Bewehrung

In diesem Unterkapitel werden die automatisierten Messungen an den Betonprobekörpern im Hinblick auf die Schwankungen der Reflexionenamplituden entlang eines Bewehrungsstabes für unterschiedliche Einbautiefen ausgewertet.

Die quantitative Auswertung der Amplituden von Reflexionen an der Bewehrung wird bisher nur im geringen Umfang in der Praxis durchgeführt. Ein Beispiel ist die Untersuchung der Schädigungen von Brückendecks aus Stahlbeton. Anhand des Vergleichs der Amplituden der Bewehrungsreflexion entlang der Bewehrung wird versucht einen Zusammenhang mit der Schädigung des Betons über der Bewehrung zu ermitteln. Die Amplituden der Bewehrungsreflexionen werden bei dieser Anwendung im Abstand von 5 cm oder mehr erfasst. Ein geringerer Abstand ist in der Praxis bei einer Messung per Hand kaum möglich (Martino, et al. 2014).

Ein weiteres Beispiel für die quantitative Auswertung der Amplitude der Bewehrungsreflexion ist die Untersuchung von Bewehrungskorrosion mit Radar (Lai, Kind und H. 2010). Die Korrosionsuntersuchung mit Radar ist immer noch Gegenstand der Forschung im Vergleich zur Korrosionsaktivitätsmessung mit der Potentialfeld-Methode, die mittlerweile zum Stand der Praxis geworden ist.

Vereinzelt wurde auch versucht, den Bewehrungsquerschnitt durch eine quantitative Auswertung der Amplitude der Bewehrungsreflexion zu bestimmen. Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Bestimmung des Bewehrungsquerschnittes ist aber erheblich schlechter als mit magnetischen Verfahren, wie z. B. dem Wirbelstromverfahren (Utsi und Utsi 2004).

Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass die maximalen Reflexionsamplituden entlang eines Bewehrungsstabs stark schwanken trotz gleicher Betonüberdeckung und scheinbar gleicher Betonqualität. Zur Aufnahme der statistischen Verteilung der Amplituden wurden ursprünglich Handmessungen durchgeführt, die aber sehr mühsam sind und nur eine beschränkte Grundgesamtheit für eine Statistik lieferten. Die systematische und quantitative Messung der Reflexionen an der Bewehrung war der Grund für die Entwicklung der im Kapitel 2.9 beschriebenen schnellen Automatisierung für Radar.

In einer ursprünglichen Untersuchung an der BAM zur Bestimmung des Bewehrungsquerschnittes anhand des Verhältnisses der gemessenen Maximalamplituden bei der parallel und senkrecht ausgerichteten Antennenpolarisation fiel auf, dass die Amplituden teilweise mehr als 50% entlang eines Bewehrungsstabes schwanken können, trotz einer konstanten Betonüberdeckung. Die Schwankungen der Amplituden entlang eines Bewehrungsstabes werden in den nächsten Abschnitten systematisch mit Hilfe von dichten Messungen an den Betonprobekörpern untersucht.

Im Abschnitt 4.3 werden als erstes die maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion und die laterale Lage entlang fünf unterschiedlich tief

eingebauter Bewehrungsstäbe ermittelt (ET 60, 90, 120, 150, 180 mm). Durch diese Messung wird gezeigt, dass die maximale Reflexionsamplitude einer Bewehrung infolge der schwachen Streuung im Beton nicht immer im Scheitelpunkt der Reflexionshyperbel auftreten muss. Anschließend werden diese Ergebnisse verglichen mit den maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion, die entlang einer Geraden an der Oberfläche mit der geringsten Betonüberdeckung und parallel zur Bewehrung aufgenommen wurden. In Abschnitt 4.3.2 wird der Unterschied der Schwankungen der Bewehrungsreflexion zwischen der parallelen und senkrechten Antennenpolarisation untersucht und im Abschnitt 4.3.3 wird der Unterschied zwischen den Messungen mit einem Bauwerkscanner und der Messung von Hand entlang der Bewehrung untersucht. Im letzten Abschnitt werden die Mittelwerte der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion für zwei unterschiedliche Bewehrungsquerschnitte verglichen.

Alle maximalen Amplituden oder Mittelwerte wurden entlang eines einen Meter langen Abschnitts der Bewehrung ermittelt. Die laterale Lage der maximalen Amplituden wurde auf einem 10 cm breiten Streifen über der Bewehrung gesucht. Die fünf Messflächen sind in Abbildung 45 als grüne Rahmen eingezeichnet, zusammen mit den Einbautiefen der fünf Bewehrungsstäbe.

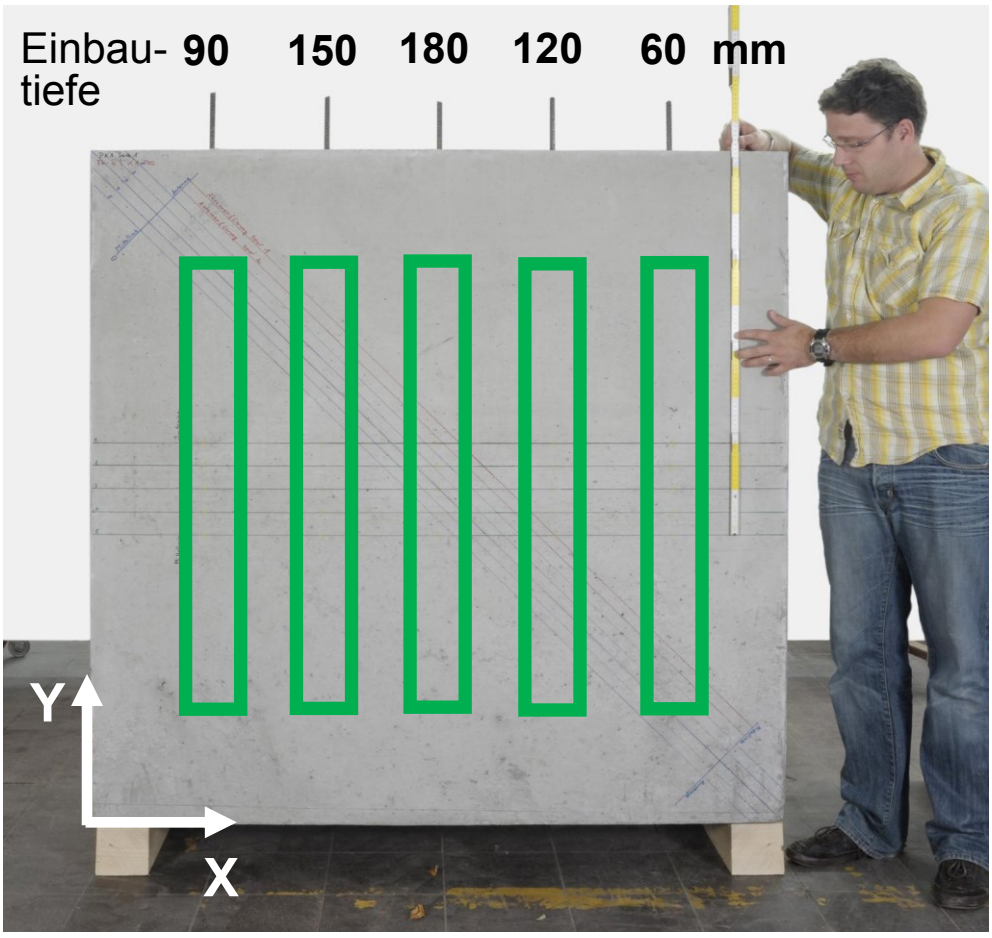

Abbildung 45 Messflächen für die Suche der Maximalamplituden der Bewehrungsreflexion; Größe Messflächen 0,1 x 1,0 m

4.3.1 Maximale Amplituden der Bewehrungsreflexion

Die Auswertung der schwachen Streuung im Volumen von Beton hat gezeigt, dass immer mit einer Welligkeit der Reflexionen in jedem Punkt eines Volumens aufgrund der Heterogenität von Beton zu rechnen ist. Deshalb muss auch bei den maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexionen entlang eines Bewehrungsstabes mit einer Welligkeit gerechnet werden. Die Welligkeit führt darüber hinaus auch dazu, dass die absolute maximale Amplitude der Bewehrungsreflexion nicht immer direkt oberhalb der Bewehrung liegt. Beim senkrechten Überfahren der Bewehrung muss deshalb die absolute maximale Amplitude der Bewehrungsreflexion nicht im Scheitelpunkt der Hyperbel liegen.

Zur Visualisierung der Welligkeit der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion wurden entlang jedes Bewehrungsstabes auf einem einen Meter langen und 10 cm breiten Streifen oberhalb der Bewehrung die maximalen Amplituden bestimmt. Zum besseren Vergleich zwischen den unterschiedlichen Einbautiefen wurden die Amplituden innerhalb jedes Streifens auf das absolute Maximum normiert. Die 2D-Darstellung der normierten und farbkodierten Amplituden ist für alle fünf Bewehrungsstäbe in Abbildung 46 dargestellt. Der Verlauf der maximalen Amplituden ist in Abbildung 46 als weiße Linie eingezeichnet. Die Auswertung wurde für die drei Probekörper mit dem GK16 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm, GK16 und Bewehrungsquerschnitt 28 mm und GK32 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm durchgeführt. Alle drei Probekörper hatten fünf Bewehrungsstäbe in den Einbautiefen 60, 90, 120, 150 und 180 mm. Für die drei Probekörper sind die Amplituden entlang der weißen Linie in Abbildung 47 als Diagramme dargestellt.

Der Einfluss der Heterogenität von Beton auf die Bewehrungsreflexion wird durch die 2D-Darstellung in Abbildung 46 deutlich. Die Färbung der normierten Amplituden entlang und quer zum Bewehrungsstab ist nicht einheitlich. Die Tendenz zu Mustern mit uneinheitlichen Amplituden entlang der Bewehrung nimmt mit größerer Einbautiefe zu. Dieses Verhalten wird auch sichtbar durch die Zunahme der Abweichung der weißen Linie von der jeweiligen Mittellinie. Zwischen den Probekörpern kann kein gravierender Unterschied in der 2D-Amplitudendarstellung von Abbildung 46 festgestellt werden. Die weiße Linie verläuft ab einer Einbautiefe von 120 mm nicht nur oberhalb von rötlich eingefärbten Gebieten (95 - 100%), sondern auch über Gebiete, die gelb oder grün gefärbt sind (45 - 75%). Die Zunahme der relativen Änderung entlang eines Bewehrungstabes mit der Einbautiefe kann auch in Abbildung 47 festgestellt werden. Die Amplituden in dieser Darstellung sind logarithmisch skaliert, so dass eine vergleichbare Differenz zwischen dem Minimum und Maximum der Amplituden für jeweils eine Einbautiefe ein konstantes Verhältnis zwischen den Extremwerten bedeutet.

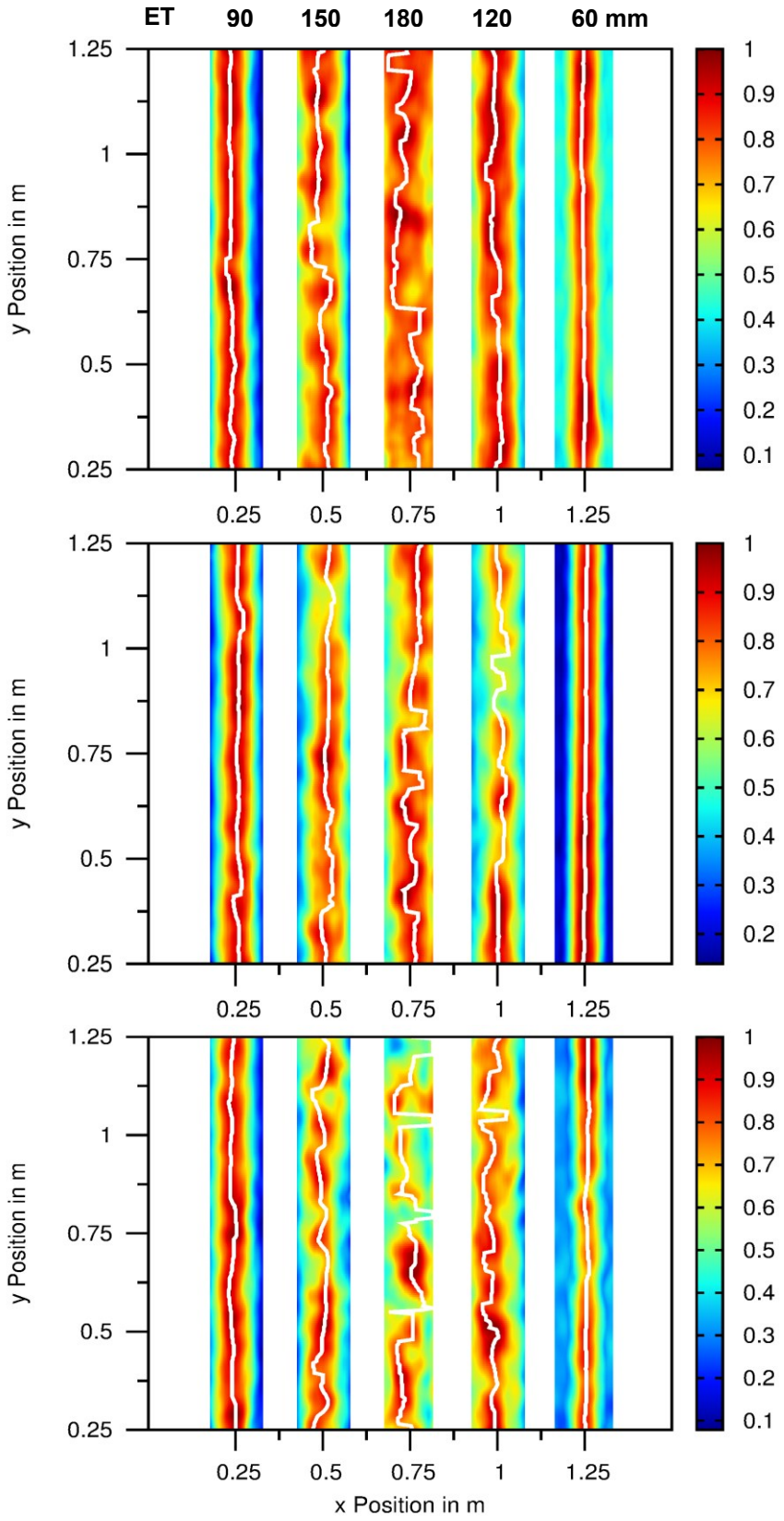

Abbildung 46 Darstellung der normierten maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion für die Einbautiefen 60, 90, 120, 150 und 180 mm mit eingezeichnetem Verlauf der maximalen Amplituden entlang der Bewehrung als weiße Linie; (oben) GK16 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm, (mitte) GK16 und Bewehrungsquerschnitt 28 mm, (unten) GK32 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm

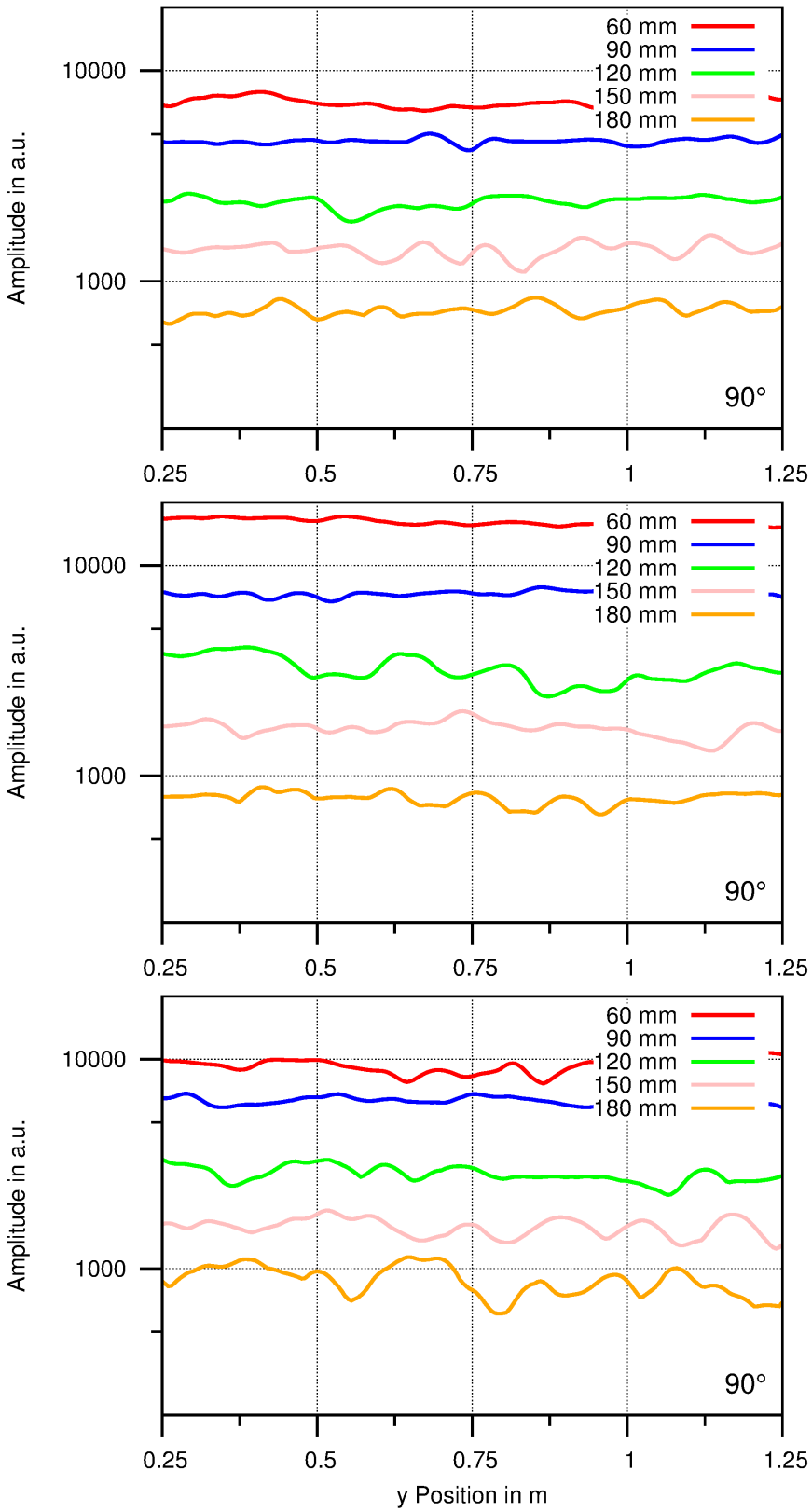

Abbildung 47 Diagramm der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion für die Einbautiefen 60, 90, 120, 150 und 180 mm; (oben) GK16 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm, (mitte) GK16 und Bewehrungsquerschnitt 28 mm, (unten) GK32 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm

Die weißen Linien aus Abbildung 46 kennzeichnen die zweidimensionale Lage der Maxima der Bewehrungsreflexion in x- und y-Richtung. Der Unterschied zwischen der zweidimensionalen Lage der Maxima eines Bewehrungsstabs und der Maxima, die entlang einer Geraden parallel zur Bewehrung bestimmt werden, ist in Abbildung 48 dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass beide Liniendiagramme einen ähnlichen Verlauf haben und sich nur in der Höhe und der Ausprägung der einzelnen Schwankungen unterscheiden. Das Liniendiagramm der Amplituden entlang einer Geraden (blau) liegt lokal teilweise unterhalb der maximalen Amplituden (rot).

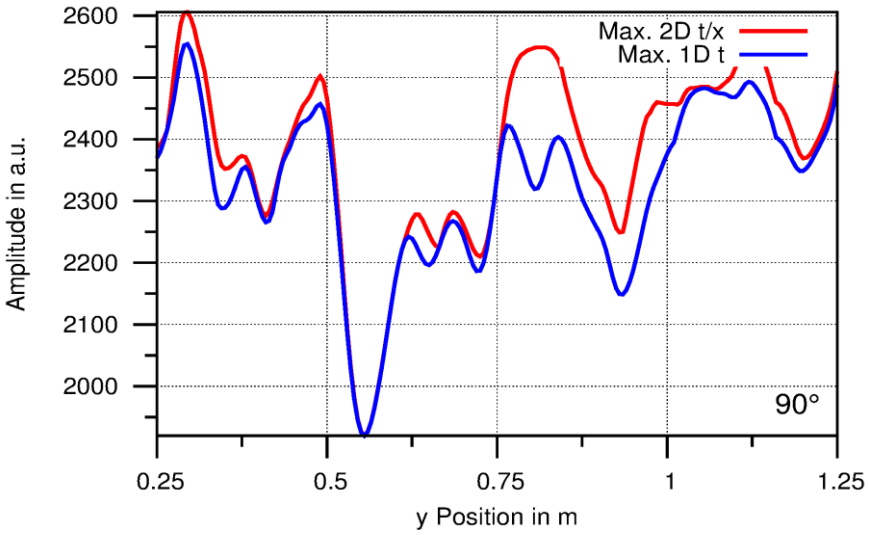

Abbildung 48 Vergleich der Liniendiagramme der maximalen Amplitude der Bewehrungsreflexion entlang einer Geraden (blau) oder der Linie der absoluten Maxima (rot); Probekörper mit GK16 und Bewehrungsquerschnitt 12 mm; Einbautiefe 120 mm

4.3.2 Antennenorientierung

Die maximale Amplitude der Bewehrungsreflexion ist abhängig von der Antennenorientierung. Mit der Antennenorientierung 90° verlaufen die elektrischen Feldlinien vertikal und sind parallel zur Bewehrung ausgerichtet. Die Amplituden der Bewehrungsreflexion sind in diesem Fall am größten. Für die Antennenorientierung 45° und 0° nehmen die Amplituden ab. Die Liniendiagramme der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion für die Antennenorientierung 0°, 45° und 90° sind in Abbildung 49 beispielhaft für einen Bewehrungsstab 12 mm für eine Einbautiefe von 120 mm dargestellt.

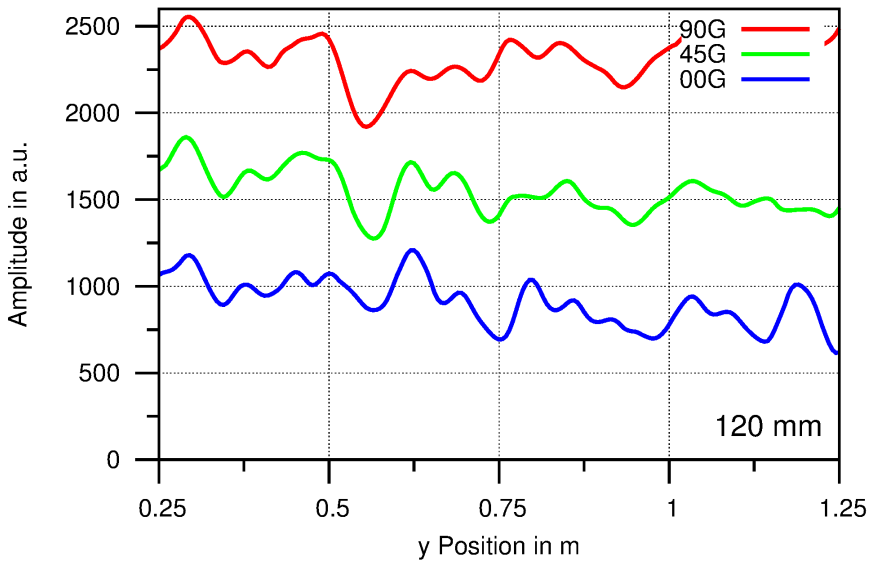

Abbildung 49 Liniendigramme: Änderungen der maximalen Amplitude (absolut) der Bewehrungsreflexion an einem Bewehrungstab (Einbautiefe 120 mm, Bewehrungsquerschnitt 12 mm)

Ein Vergleich der Liniendiagramme mit unterschiedlicher Antennenorientierung zeigt, dass alle drei Liniendiagramme einen ähnlichen Verlauf haben. An einigen Stellen sind aber Unterschiede zu sehen. Aus diesem Grund wurden die Änderung der Amplituden ermittelt und in Abbildung 50 dargestellt, um die Unterschiede deutlicher darzustellen.

Die Liniendiagramme der Änderungen wurden ermittelt, indem jeweils eine Ausgleichsgerade für die Liniendiagramme aus Abbildung 49 ermittelt wurde und anschließend von denselben Liniendiagrammen abgezogen wurde. Die Schwankungen der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion werden verursacht sowohl durch die schwachen Streuungen aus dem Volumen des Betons als auch durch die nicht konstante Amplitude der einfallenden Welle, die an der Bewehrung reflektiert wird. Auch die Liniendiagramme aus Abbildung 50 zeigen Ähnlichkeiten im Verlauf, aber für keine Antennenorientierung dominieren die absoluten Werte entlang des Stabes. Dass die Schwankungen im Mittel unabhängig von der Antennenorientierung sind, entspricht auch dem Ergebnis für die schwachen Streuungen aus dem Volumen aus Abschnitt 4.2.

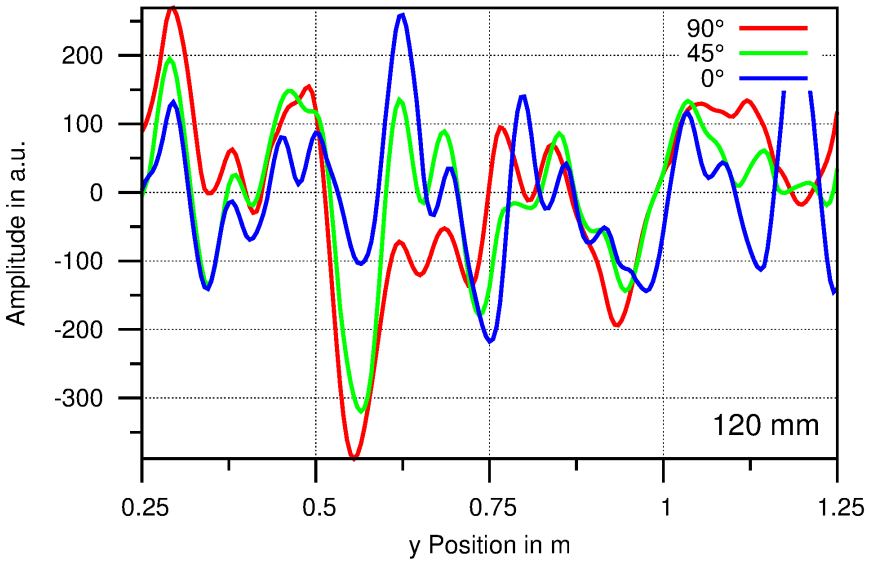

Abbildung 50 Liniendigramme der Schwankungen der maximalen Amplitude der Bewehrungsreflexion an einem Bewehrungstab (Einbautiefe 120 mm, Bewehrungsquerschnitt 12 mm)

4.3.3 Vergleich zwischen Hand- und Scannermessungen

In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, inwieweit der Verlauf der Amplituden der Bewehrungsreflexion, der mit einem Bauwerkscanner aufgenommen wurde, auch mit einer Handmessung ermittelt werden kann. Für die Handmessung wurde die Antenne entlang der Kante eines Brettes parallel zum Bewehrungsstab geführt, wie in Abbildung 51 gezeigt. Das Brett wurde vorher so eingemessen und ausgerichtet, dass die Antenne sich immer mittig über dem Bewehrungsstab befand. Die Messungen wurden für die Antennenorientierung 0° und 90° durchgeführt.

Abbildung 51 Handmessung entlang eines Bewehrungsstabes zur Überprüfung der automatisierten Scannermessungen; Antennenorientierung 0° (links) und 90° (rechts)

In Abbildung 52 und Abbildung 53 sind die Liniendiagramme der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion für vier Bewehrungsstäbe mit unterschiedlicher

Einbautiefe (90, 120, 150 und 180 mm) dargestellt. Die beiden Abbildungen unterscheiden sich in der Antennenorientierung (90° und 0°).

Der Verlauf der Amplituden, die mit der Hand aufgenommen wurden, entspricht dem Verlauf der Amplituden, die mit dem Bauwerkscanner aufgenommen wurden. Die Liniendiagramme der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexionen, die mit der Hand aufgenommen wurden (rot), liegen aber immer oberhalb der Amplituden, die mit dem Bauwerkscanner aufgenommen wurden. Die Amplituden der Handmessung sind immer größer als die Amplituden der Scannermessung, da die Antenne bei der Handmessung direkt mit der Bauteiloberfläche in Kontakt stand, im Gegensatz zu den Messungen mit dem Bauwerkscanner, bei denen die Antenne immer einen Abstand von etwa 5 mm im Mittel zur Bauteiloberfläche hatte. Durch den Luftspalt zwischen Antenne und Bauteiloberfläche geht ein Teil der von der Antenne abgestrahlten Energie verloren. Dieser Verlust durch den Antennenabstand muss immer bei einer quantitativen Bewertung der Amplituden berücksichtigt werden.

Mit den Handmessungen konnte gezeigt werden, dass die schwachen Streuungen an der Gesteinskörnung auch mit einer örtlich weniger präzisen manuellen Messung anstelle der aufwendigeren Messung mit einem Bauwerkscanner gemessen werden können. Es ist denkbar, in Zukunft an Stahlbetonbauwerken vor Ort die Materialeigenschaften von Beton selber und auch die Eigenschaften des Betons im Hinblick auf die Verfahrensparameter für das Radarverfahren (z. B. Detektionsreichweite) mit einer einfachen Handmessung anstelle einer Messung mit dem Bauwerkscanner zu erfassen.

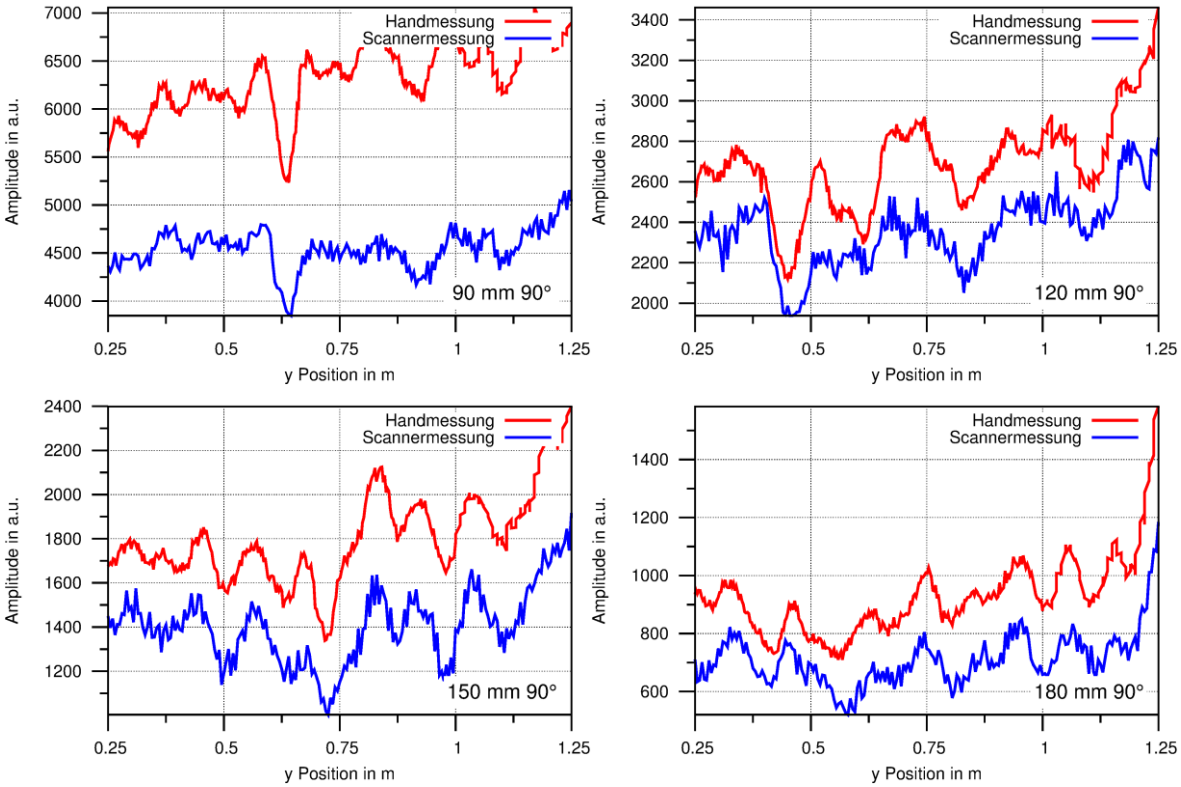

Abbildung 52 Vergleich des Verlaufs der maximalen Reflexionsamplitude entlang einer Geraden oberhalb eines Bewehrungsstabes, aufgenommen mit der Hand (rot) oder mit einem Bauwerkscanner (blau); Einbautiefen der Bewehrung 90 mm (links oben), 120 mm (rechts oben), 150 mm (links unten), 180 mm (rechts unten); Antenne 1,5 GHz; **Antennenorientierung 90°**;Probekörper RPK; Bewehrungsquerschnitt 12 mm

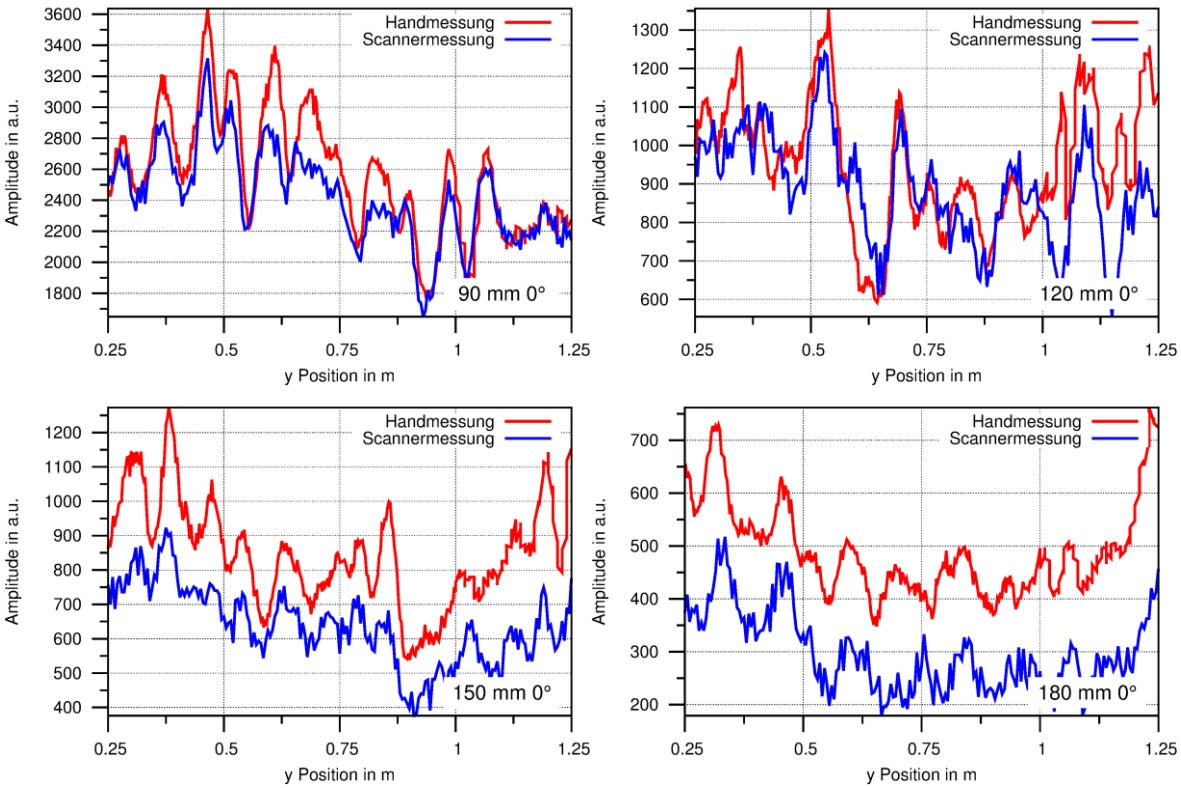

Abbildung 53 Vergleich des Verlaufs der maximalen Reflexionsamplitude entlang einer Geraden oberhalb eines Bewehrungsstabes, aufgenommen mit der Hand (rot) oder mit einem Bauwerkscanner (blau); Einbautiefen der Bewehrung 90 mm (links oben), 120 mm (rechts oben), 150 mm (links unten), 180 mm (rechts unten); Antenne 1,5 GHz; **Antennenorientierung 0°**; Probekörper RPK; Bewehrungsquerschnitt 12 mm

4.4 Statistische Auswertung der mittleren Reflexionsamplituden

Die quantitative Auswertung der maximalen Amplituden der Bewehrungsreflexion in Abhängigkeit vom Bewehrungsquerschnitt, der Einbautiefe, der Antennenfrequenz und der Antennenorientierung ist mit einer punktuellen Messung durch die Streuung der Gesteinskörnung wenig sinnvoll. Die lokalen Änderungen der Amplituden entlang eines Bewehrungsstabes können ohne weiteres um bis zu 40 % schwanken, wie in den vorherigen Abschnitten des Kapitels bereits gezeigt wurde. Die relativen Abweichungen der Amplituden der Bewehrungsreflexion entlang der fünf Bewehrungsstäbe mit den Einbautiefen 60, 90, 120, 150 und 180 mm sind in Abbildung 54 dargestellt.

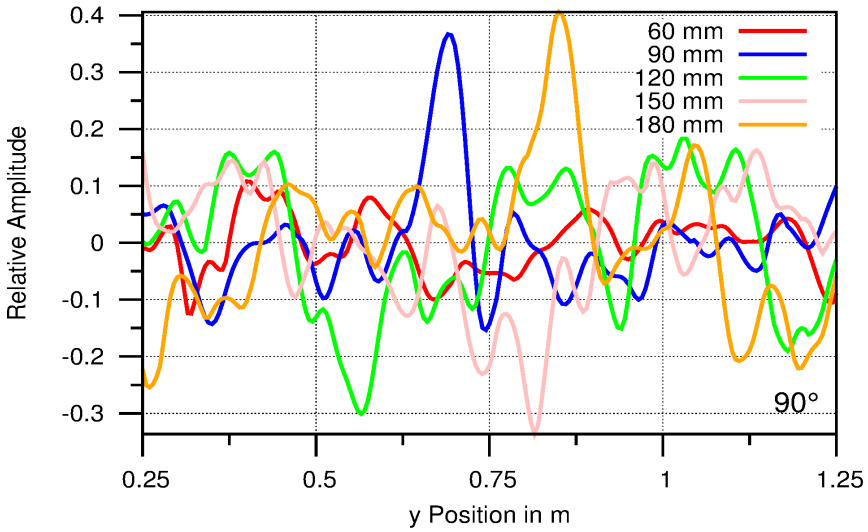

Abbildung 54 Relative Schwankung in Prozent der Reflexionamplitude entlang von Bewehrungsstäben mit unterschiedlicher Einbautiefe

Eine sinnvolle quantitative Auswertung der mittleren Amplitude der Bewehrungsreflexion ist erst bei einer ausreichenden Menge an Messpunkten entlang einer Bewehrung möglich. Dies ist gegeben, wenn der Mittelwert der Amplituden der Bewehrungsreflexion auf einer Länge von einem Meter und einem Messpunktabstand von 5 mm ermittelt wird. Die positiven und negativen Schwankungen (s. Abbildung 54) treten dann ausreichend oft auf, um einen stabilen Mittelwert zu bilden, der nicht von der Anzahl der Messpunkte oder der Länge der Messstrecke abhängt. Für den Mittelwert wurden insgesamt 201 Messwerte verwendet.

In Abbildung 55 und Abbildung 56 sind die Mittelwerte der maximalen Bewehrungsreflexionen für die zwei Bewehrungsquerschnitte 12 mm (grün) und 28 mm (rot) und die fünf Einbautiefen 60, 90, 120, 150 und 180 mm halblogarithmisch dargestellt. Für jeden Bewehrungsquerschnitt wurden die Reflexionen mit der Antennenorientierung 90° und 0° erfasst. Die Messungen wurden sowohl mit der 1,5 GHz-(Abbildung 55) als auch der 2,6 GHz-Antenne (Abbildung 56) durchgeführt.

Alle Verläufe der mittleren Amplituden zeigen eine stetige Abnahme mit teilweisem geraden Verlauf, wobei die Amplituden, die mit der 1,5 GHz-Antenne aufgenommen wurden, besser einem geraden Verlauf entsprechen als die mit der 2,6 GHz-Antenne aufgenommenen Amplituden. Das Verhältnis zwischen den mittleren Amplituden für die zwei um 90° gedrehten Antennenorientierungen ist beim geringeren Bewehrungsquerschnitt von 12 mm größer als beim Bewehrungsquerschnitt von 28 mm. Am größten ist das Verhältnis zwischen den beiden Antennenorientierungen bei der 1,5 GHz-Antenne und dem Bewehrungsquerschnitt von 12 mm. Bei beiden Antennenfrequenzen ist zu beobachten, dass die mittleren Amplituden für den größeren Bewehrungsquerschnitt von 28 mm stärker abnehmen als beim Bewehrungsquerschnitt von 12 mm. Dies führt dazu, dass bei größeren Einbautiefen die mittleren Amplituden des Bewehrungsquerschnittes von 12 mm größer ist als beim größeren Bewehrungsquerschnitt von 28 mm. Dieselben Beobachtungen sind auch in der Arbeit (Feistkorn 2012) gemacht worden. Dies hat zur Folge, dass die dünnere Bewehrung eine größere Detektionstiefe aufweist als die dickere Bewehrung. Bei einer Verallgemeinerung muss aber die Beziehung der Wellenlänge zum Bewehrungsquerschnitt mit berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wurde der Zusammenhang nicht weiter untersucht, weil nur zwei Bewehrungsquerschnitte für systematische Untersuchungen zur Verfügung standen.

Eine weitere interessante Beobachtung ist, dass das Verhältnis der mittleren Amplituden zwischen den Bewehrungsquerschnitten 12 mm und 28 mm für die Antennenorientierung 0° mindestens doppelt so groß ist wie bei einer Antennenorientierung von 90°, bei der die Polarisation parallel zur Bewehrung verläuft. Dieser Zusammenhang kann dazu genutzt werden, Bewehrungen mit unterschiedlichem Bewehrungsquerschnitt aber in der gleichen Einbautiefe besser mit der Antennenorientierung 0° anstelle der gebräuchlichen 90°zu unterscheiden.

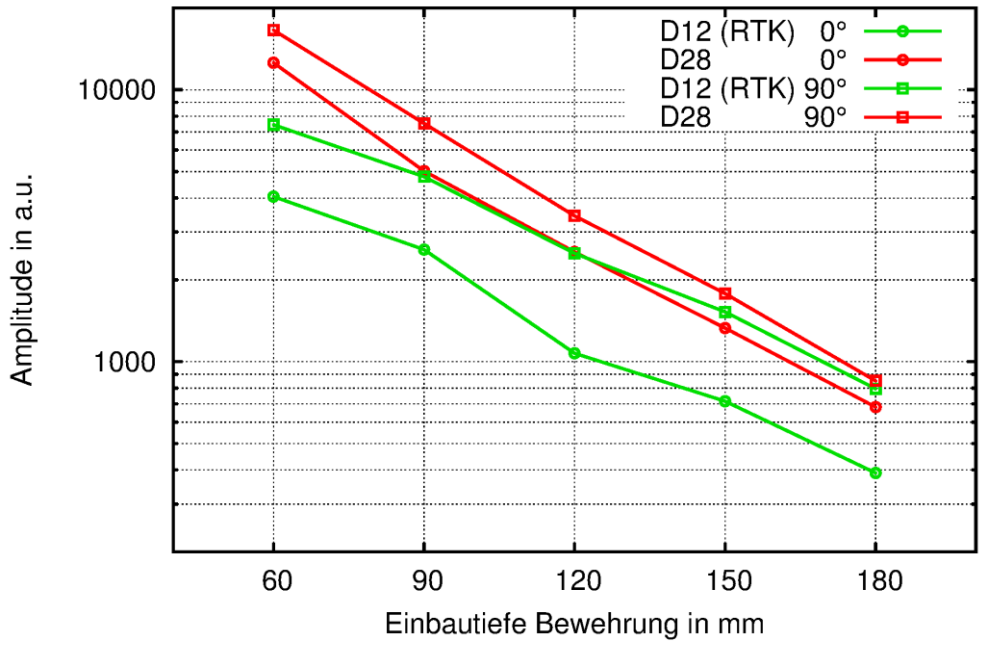

Abbildung 55 Mittelwert der Bewehrungsreflexion für die Einbautiefen 60, 90,120,150 und 180 mm; aufgenommen mit der 1,5 GHz-Antenne

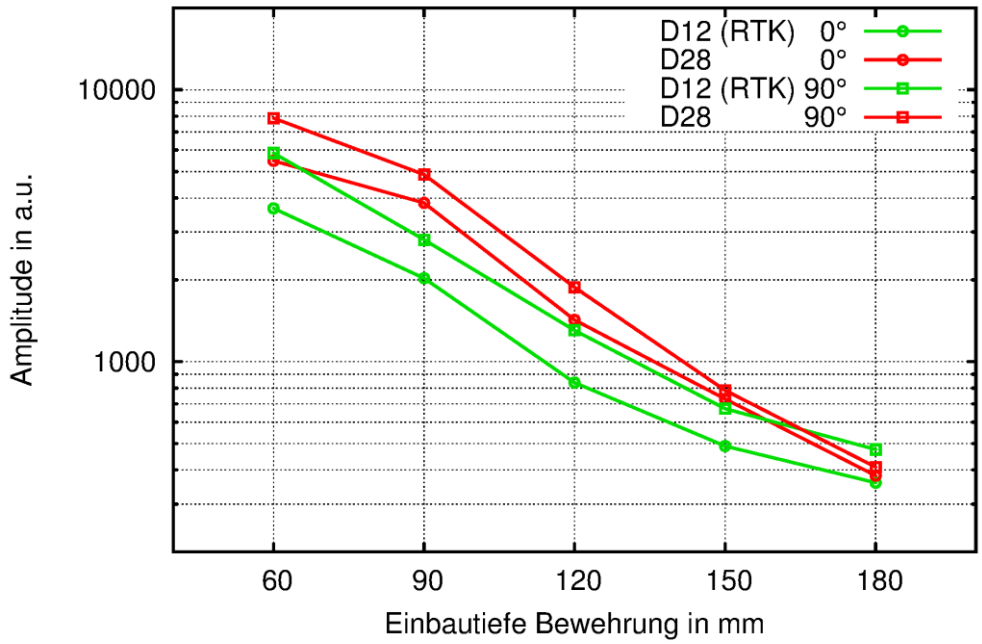

Abbildung 56 Mittelwert der Bewehrungsreflexion für die Einbautiefen 60, 90,120,150 und 180 mm; aufgenommen mit der 2,6 GHz-Antenne

4.5 Vergleichsmessungen mit zwei Schüttungen aus Quarzkies

Der Einfluss der Größe der Gesteinskörnung auf die Streuungen von Radarwellen wurde anhand von Schüttungen aus Quarzkies weitergehend untersucht. Die Versuche wurden an Schüttungen durchgeführt, da der dielektrische Unterschied zwischen den Gesteinskörnern und der umgebenden Luft größer ist als in Beton zwischen den Gesteinskörnern und dem Zementstein, was zu insgesamt stärkeren Streuungen der Radarwellen als in Beton führt. Neben der Ermittlung der Streuungen der Radarwellen an der Gesteinskörnung anhand des Effektivwertes RMS(t) der Schwankungen wurde auch quantitativ die Reflexion an einer Metallplatte in einer Versuchsreihe mit unterschiedlichen Schütthöhen untersucht, die sich einfacher mit Schüttungen durchführen lässt als mit Betonprobekörpern.

Es wurde mit zwei unterschiedlichen Schüttungen gearbeitet mit den Korngrößen 8 - 16 mm (GK16) und 16 - 32 mm (GK32). Als Gesteinsart wurde wie bei den Betonprobekörpern Quarzkies verwendet (s. Abbildung 57). Die zwei unterschiedlichen Schüttungen wurden in zwei Behälter mit einer Grundfläche von 1,2 m x 1,2 m und einer Metallplatte auf dem Boden des Behälters gefüllt. Die Schütthöhe wurde in den Höhen 0,2, 0,3 und 0,4 m variiert. Die zwei Behälter wurden nebeneinander gestellt, so dass der Bauwerkscanner mit den Radarantennen beide Schüttungen gemeinsam überfuhr (Abbildung 58). Die Messungen wurden mit der 1,5 GHz- und der 2,6 GHz-Antenne und den Antennenorientierungen 0°,45° und 90° durchgeführt.

Abbildung 57 Schüttung von Quarzkies mit zwei verschiedenen Korngrößen (16 – 32 mm links, 8 – 16 mm rechts)

Abbildung 58 Versuchsaufbau mit Bauwerkscanner und den zwei unterschiedlichen Schüttungen aus Quarzkies

Zwei Beispiele der Radargramme, die sowohl über dem Größtkorn GK32 und anschließend über GK16 aufgenommen wurden, sind in Abbildung 59 und Abbildung 60 dargestellt. Beide Radargramme unterscheiden sich nur in den verwendeten Antennenfrequenzen (1,5 GHz und 2,6 GHz). In beiden Radargrammen ist gut zu erkennen, dass die Streuungen am GK32 in der linken Hälfte des Radargramms (Position 0 bis 1 m) und zwischen der direkten Welle (0,75 ns) und der Reflexion an der Metallplatte (4 ns) stärker sind als die Streuungen durch das GK16 in der rechten

Hälfte des Radargramms (Position 1 bis 2 m). Der Vergleich zwischen den Radargrammen zeigt, dass die Messungen mit einer kleineren Wellenlänge (2,6 GHz Antenne) zu detailreicheren Streuungen führt, als bei der größeren Wellenlänge der 1,5 GHz-Antenne. Die Messungen bestätigen das Ergebnis aus dem Abschnitt 4.2, das sich beim Vergleich von Zeitschnitten ergab. Die Laufzeit der Reflexion an der Metallplatte zeigt in den Radargrammen keinen wesentlichen Unterschied zwischen den beiden Korngrößen. Dieses Ergebnis entspricht auch den Erwartungen, da der Volumenanteil des Gesteins oder das Hohlraumvolumen beider Sieblinien etwa gleich groß ist und somit auch dieselbe Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Radarwelle angenommen werden kann.

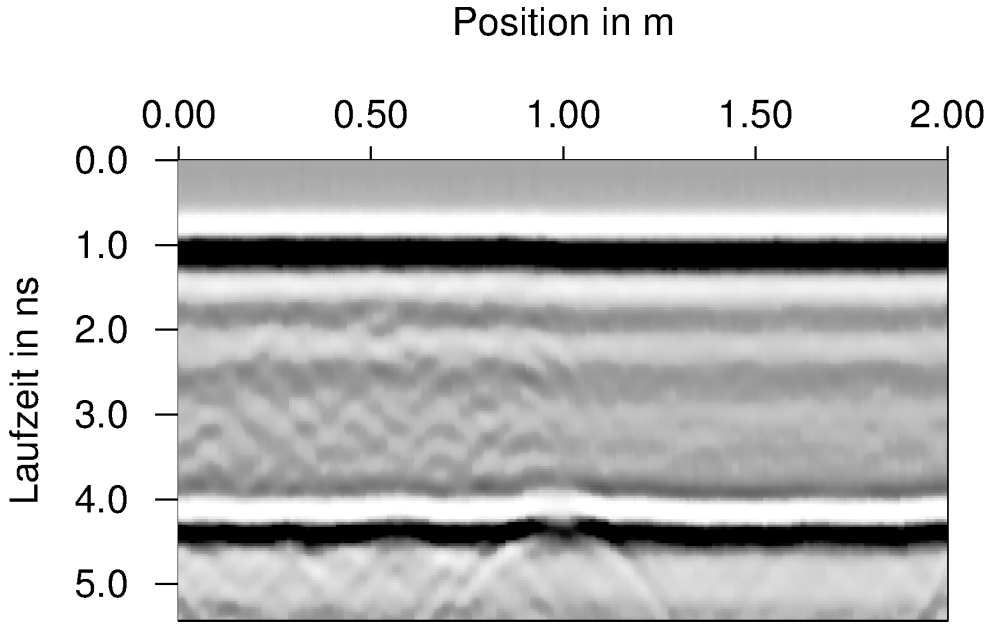

Abbildung 59 Radargramm über zwei verschiedene Quarzkiesschüttungen, aufgenommen mit der 1,5 GHz-Antenne; 0 m – 1 m Korngröße 16 - 32 mm, 1 m – 2 m Korngröße 8 - 16 mm

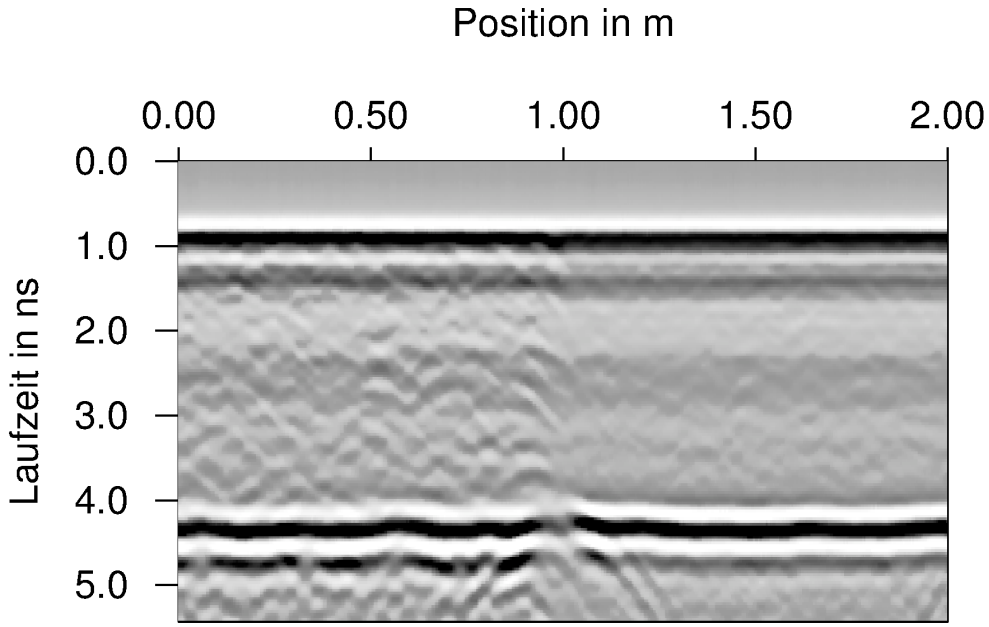

Abbildung 60 Radargramm über zwei verschiedene Quarzkiesschüttungen, aufgenommen mit der 2,6 GHz-Antenne; 0 m – 1 m Korngröße 16 - 32 mm, 1 m – 2 m Korngröße 8 - 16 mm

Der Verlauf der Effektivwerte für die Streuungen an den Gesteinskörnern der Schüttungen wurde entsprechend der Berechnung für die Effektivwerte am Beton (Abschnitt 4.2.4) ermittelt. Der Effektivwert wurde für eine Fläche von 0,4 m x 0.4 m berechnet. Die Fläche ist etwas kleiner als im Abschnitt 4.2 (0,5 m x 0,5 m). Die kleinere Fläche wurde gewählt, damit keine störenden Seitenreflexionen das Ergebnis beeinflussen. Die Verläufe der Effektivwerte, die mit einer 1,5 GHz- und 2,6 GHz Antenne aufgenommen wurden, sind in Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt. Zusätzlich sind die Ausgleichsfunktionen $RMS(t)=A*e^{-t*B}$ eingezeichnet, und die ermittelten Funktionsparameter sind in der Legende aufgeführt.

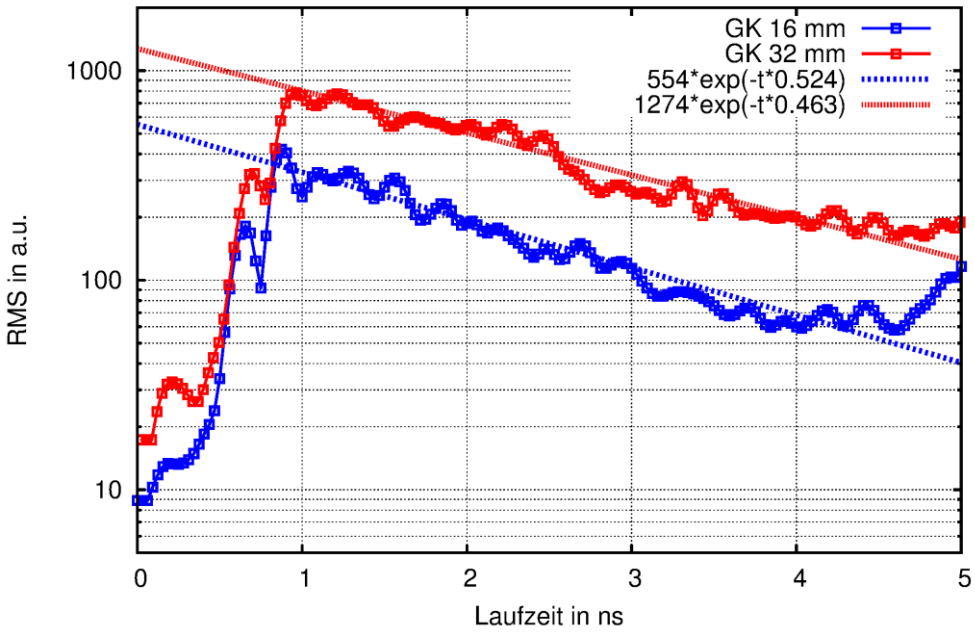

Abbildung 61 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für zwei Schüttungen aus Quarzkies mit der Korngröße 8 - 16 mm (blau) und 16 – 32 mm (rot); 1,5 GHz-Antenne

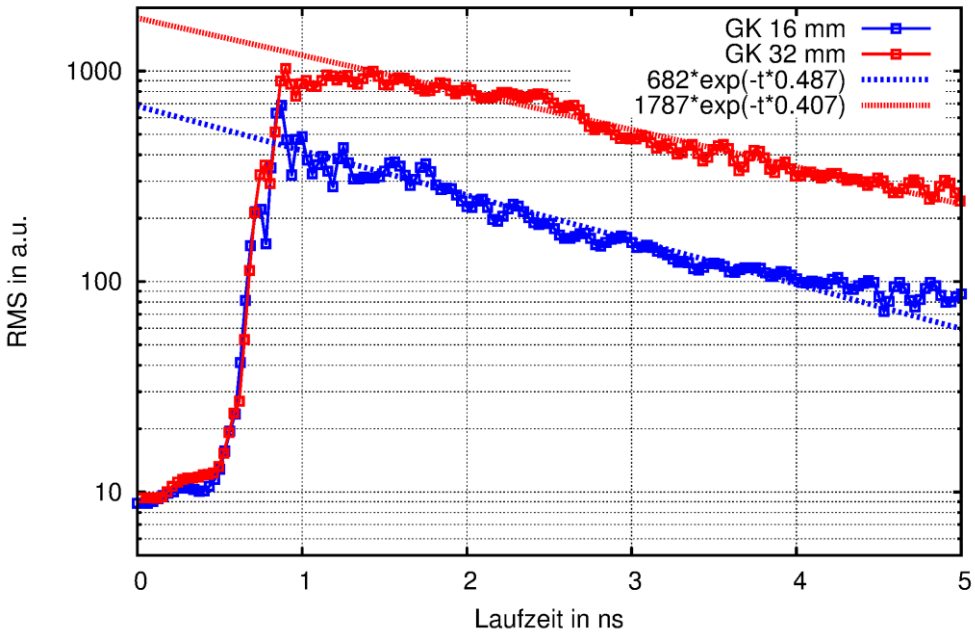

Abbildung 62 Verlauf des Effektivwertes $RMS_{AC}(t)$ für zwei Schüttungen aus Quarzkies mit der Korngröße 8 - 16 mm (blau) und 16 – 32 mm (rot); 2,6 GHz-Antenne

Für beide Antennenfrequenzen sind die Verläufe für den Effektivwert RMS(t) für die Schüttung mit dem Größtkorn GK32 mindestens doppelt so groß wie für das Größtkorn GK16. Im Vergleich zu Beton sind die Verläufe der Effektivwerte der Schüttungen mit dem gleichen Größtkorn weniger stark geneigt d. h., die Effektivwerte der Streuungen im Volumen der Schüttungen nehmen langsamer ab mit der Laufzeit, als für die Streuungen im Volumen der entsprechenden Betonprobekörper. Die Abnahme der Effektivwerte wird durch den Funktionsparameter B, oder noch besser durch den Kehrwert 1/B beschrieben. Der Kehrwert entspricht einer Zeitkonstanten und beschreibt die Dauer der Laufzeit t, bis der Effektivwert eines Zeitschnittes auf 37 % des ursprünglichen Wertes gesunken ist.

Die ermittelten Zeitkonstanten für die beiden Schüttungen (GK16 und GK32) und für die zwei Antennenfrequenzen 1,5 GHz und 2,6 GHz sind zusammen mit den in Abschnitt 4.2.8 ermittelten Zeitkonstanten für die Betonprobekörper in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 Zeitkonstanten (1/B) der exponentiellen Ausgleichfunktion für unterschiedliche Sieblinien, Antennenfrequenzen und Materialien (Schüttung oder Beton)

Antennen-frequenz	GK16			GK32		
	Schüttung	Beton/PK1	Beton/PK2	Schüttung	Beton/PK1	Beton/PK2
1,5 GHz	1,91 ns	1,20 ns	1,13 ns	2,16 ns	1,55 ns	1,49 ns
2,6 GHz	2,16 ns	0,98 ns	0,97 ns	2,46 ns	1,23 ns	1,20 ns

Sowohl bei den Schüttungen als auch bei den Betonprobekörpern führt die Sieblinie mit dem größeren Größtkorn von GK32 zu einer größeren Zeitkonstanten (1/B) der exponentiellen Ausgleichsfunktion. Das bedeutet, dass die Streuungen der Radarwellen an der Gesteinskörnung über eine längere Zeit auf der Oberfläche der Probekörper von der Radarantenne empfangen werden. Die Sieblinie mit dem kleineren Größtkorn von GK16 führt zu einer schnelleren Abnahme der Streuung der Radarwellen an der Gesteinskörnung sowohl für die Probekörper aus Beton als auch für die Probekörper, die nur aus einer Quarzkiesschüttung bestehen.

Die Zeitkonstanten für die beiden Antennenfrequenzen verhalten sich für die reine Schüttung und den Betonprobekörper gegensätzlich. Auch wenn die Ursache dafür noch unklar ist, könnte ein Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der sich ausbreitenden Welle und den Zeitkonstanten bestehen.

Das Abnahmeverhalten der sich ausbreitenden Radarwelle wurde durch die Reflexion an einer Metallplatte für unterschiedliche Höhen der Quarzkiesschüttung ermittelt. Die Schüttung wurde in den drei Höhen 20, 30 und 40 cm variiert. Die maximalen Amplituden der Reflexionen an der Metallplatte wurden auf einer Fläche von 0,4 m x 0,4 m bestimmt. Für die Reflexionsamplituden wurde für jede Schichtdicke der Schüttung die Verteilung der Häufigkeitsdichte ermittelt. Die Häufigkeitsdichteverteilungen für die drei Schichtdicken der Schüttung und die beiden Korngrößen (GK16 und GK32) sind in Abbildung 63 (1,5 GHz) und Abbildung 64 (2,6 GHz) dargestellt.

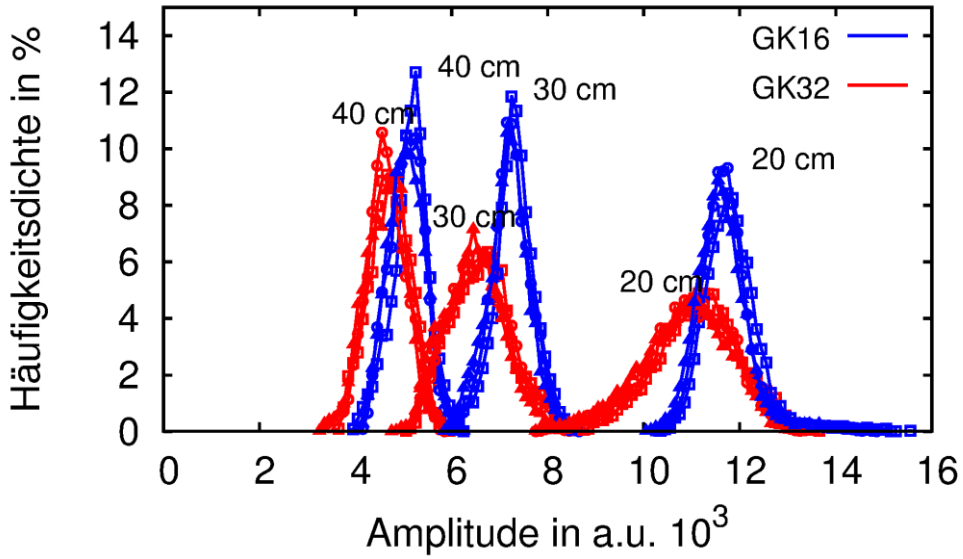

Abbildung 63 Häufigkeitsdichteverteilung der Reflexionsamplituden einer Metallplatte mit unterschiedlichen Höhen (20 cm, 30 cm und 40 cm) der Kiesschüttung;
aufgenommen mit der 1,5 GHz-Antenne; blau GK 16 mm, rot GK 32 mm

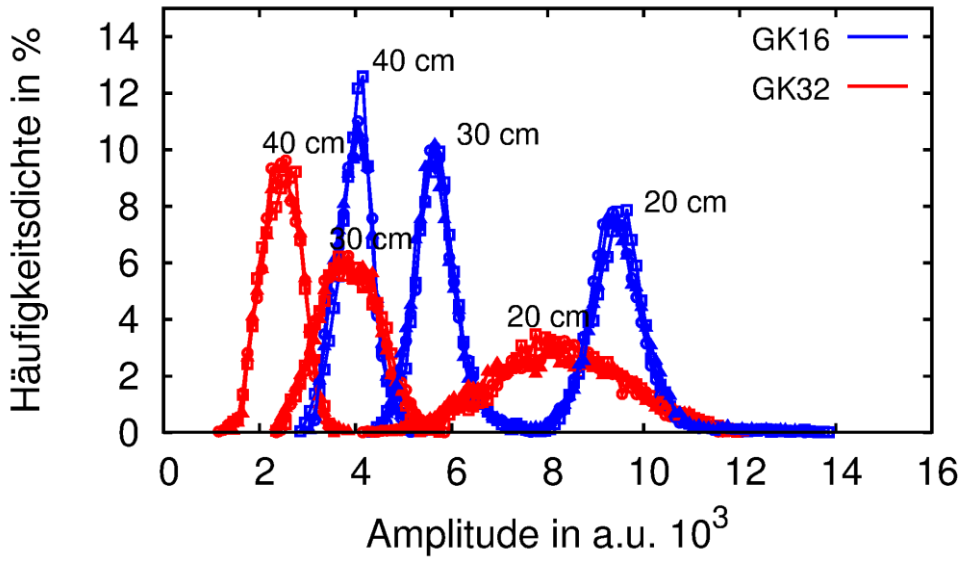

Abbildung 64 Häufigkeitsdichteverteilung der Reflexionsamplituden einer Metallplatte mit unterschiedlichen Höhen (20 cm, 30 cm und 40 cm) der Kiesschüttung;
aufgenommen mit der 2,6 GHz-Antenne; blau GK 16 mm, rot GK 32 mm

Für beide Antennenfrequenzen führt das größere Gesteinskorn GK32 zu kleineren Amplituden im Vergleich zum Gesteinskorn GK16. Die Spitzen der Häufigkeitsverteilungen für GK32 sind immer zu kleineren Werten angeordnet als die Spitzen der Häufigkeitsverteilung für das GK16. Der Vergleich zwischen den beiden Antennenfrequenzen zeigt, dass die Reflexionsamplituden von der Schüttung mit dem GK32 mit zunehmender Schichtdicke bei der Antennenfrequenz von 2,6 GHz stärker abnehmen als bei der Antennenfrequenz von 1,5 GHz. Werden die Verteilungen für das GK32 (rot) und die Schichtdicke von 30 cm in Abbildung 63 und Abbildung 64 betrachtet, fällt auf, dass bei der 2,6 GHz-Antenne die Verteilung so stark zu kleineren Amplituden verschoben ist, dass die Lage der Spitze der Verteilung für GK32 und Schichtdicke 30 cm der Lage der Spitze der Verteilung für GK16 bei Schichtdicke 40 cm entspricht. Bei der 1,5 GHz-Antenne liegen die beiden Spitzen (GK16 und GK32) für die 30 cm dicke Schüttung näher zusammen als zu den benachbarten Spitzen.

5 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Die dichten und präzisen Radarmessungen an Beton in dieser Arbeit zeigen, dass Streuungen an der Gesteinskörnung einen messbaren Einfluss auf herkömmliche Radarmessungen haben. Die Streuungen an der Gesteinskörnung sind genauso wie die Reflexionen an der Bewehrung ein reproduzierbares Echosignal. Der wesentliche Unterschied zu einer Reflexion an einer Bewehrung oder an einer Rückwand ist, dass die Streuungen an der Gesteinskörnung Vielfachreflexionen sind und keine Einfachreflexion wie eine Bewehrungsreflexion. Die Vielfachreflexionen an den Gesteinskörnern führen dazu, dass anhand der Laufzeit der Ort der Entstehung für die Streuung nicht mit herkömmlichen Methoden rekonstruiert werden kann, dass die Amplitude der Streuungen sich aus der Überlagerung vieler Einzelreflexionen ergibt und dass das in den Zeitschnitten zu Interferenzmustern führt. Aus diesen letzten beiden Gründen sind die Streuungen bisher eher als störend bei Radaruntersuchungen von Stahlbetonbauwerken empfunden worden, als dass die Streuungen weiter untersucht worden wären.

Ohne eine Filterung ist eine quantitative Auswertung der Streuung nur für einen eingeschränkten Dynamikbereich möglich. Die Streuungen an der Gesteinskörnung haben ähnliche statistische Verteilungen der Amplituden wie das gerätespezifische Rauschen. Aus diesem Grund müssen die Messdaten für die quantitative und qualitative Auswertung der Streuungen angepasst gefiltert werden (s. Abschnitt 4.2.5), um das gerätespezifische Rauschen zu unterdrücken, ohne aber die eigentlichen Streusignale zu verändern.

Die Messungen (s. Abschnitt 4.2.8) an den Betonprobekörpern mit unterschiedlichen Sieblinien haben gezeigt, dass Unterschiede in der Sieblinie von Beton mit dem Radarverfahren quantitativ gemessen werden können. Als Messgröße wird der Effektivwert der Streuamplituden verwendet. Der Verlauf der Effektivwerte über die Laufzeit wurde exponentiell fallend erkannt und mit einer entsprechenden Ausgleichsfunktion angenähert. Dieselbe Annahme wurde auch bei den Untersuchungen von Austenitischen Stählen mit Ultraschall getroffen (Goebbels 1975). Auch wenn die Effektivwerte der Streuungen sich mit der Sieblinie ändern, muss beachtet werden, dass die Streuungen an der Gesteinskörnung sowohl von der Geometrie als auch von der Permittivität des Gesteins abhängen. Ein Rückschluss vom Verlauf des Effektivwerts der Streuung auf die Sieblinie des Betons ist ohne Kenntnis der Gesteinsart nicht möglich.

Die in dieser Arbeit gezeigte messtechnische Erfassung der Streuung der Radarwellen an der Gesteinskörnung ist die Grundlage für weitergehende Forschung auf dem Gebiet der Ortung von Verdichtungsmängeln in Beton. Typische Verdichtungsmängel sind die Entmischung der Gesteinskörnung und das Vorhandensein von Lufteinschlüssen zwischen der Gesteinskörnung (Kiesnester). Die hier vorgestellten Streumessungen würden die Verdichtungsmängel anhand eines sich ändernden Verlaufs des Effektivwertes der Streuungen für eine bestimmte

Messfläche detektieren. Auch wenn die geometrische Lage und Form von Kiesnestern aufgrund der Vielfachreflexionen nicht rekonstruiert werden kann, ist eine Projektion der Lage eines Verdichtungsmangels auf die Oberfläche des Bauteils denkbar. Die Ermittlung der Tiefe eines Verdichtungsmangels könnte über die Laufzeit, ab der sich der Verlauf des Effektivwertes der Streuung ändert, abgeschätzt werden. Bei den Messungen des Effektivwertes der Streuungen im Volumen wurde die Auswertung in Bereichen durchgeführt, in denen keine Bewehrungsreflexion vorhanden ist. Für zukünftige praktische Anwendungen muss der Einfluss der Bewehrung mit berücksichtigt werden und es müssen Methoden entwickelt werden, die eine Trennung zwischen der starken Bewehrungsreflexion und der schwachen Streuung an der Gesteinskörnung ermöglichen. Bei der Trennung der Bewehrungsreflexion von den Streuungen an der Gesteinskörnung muss berücksichtigt werden, dass auch bei einer gelungenen Trennung der Effektivwert der Streuung größer sein wird als ohne Bewehrung. In diesem Fall wird nämlich die Streuung der Radarwelle an der Gesteinskörnung erzeugt sowohl auf dem Weg zur Bewehrung als auch nach der Reflexion an der Bewehrung.

Die qualitative Darstellung der Streuung der Radarwelle an der Gesteinskörnung durch Zeitschnitte ergibt zweidimensionale Bilder mit einem bestimmten welligen Muster, das aber im direkten Vergleich zwischen mehreren Zeitschnitten nie identisch ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Zeitschnitt einer Radarmessung von einer Betonoberfläche zu einem eindeutigen Muster führt, das nicht gleich einem Zeitschnitt an einer anderen Stelle auf der Bauteiloberfläche ist. Die Zeitschnitte entsprechen trotz ähnlicher Muster einer Einzigartigkeit, wie sie von einem Fingerabdruck bekannt ist. Ähnlich wie beim menschlichen Fingerabdruck können die Muster der Zeitschnitte benutzt werden, Betonteile eindeutig zu identifizieren. Eine mögliche Anwendung wäre z. B. die eindeutige Identifizierung von Fertigbetonteilen.

Die Streumuster der Zeitschnitte von Radarmessungen an Beton haben Ähnlichkeiten mit Specklemustern, wie sie für die Speckle-Interferometrie oder die Shearografie in der Materialforschung angewendet werden. Als Specklemuster „*werden die körnigen Interferenzphänomene bezeichnet, die sich bei hinreichend kohärenter Beleuchtung optisch rauer Objektoberflächen beobachten lassen.*“ (Zitat: http://de.wikipedia.org/Speckle). Die Beschreibung der optischen Specklemuster lässt sich direkt auf die Streumuster von Radar übertragen, nur dass die Dimensionen der verwendeten Wellenlängen und der Abstand der Streuzentren sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden. Sowohl Specklemuster als auch die Streumuster der Zeitschnitte von Radarmessungen an Beton entstehen durch eine konstruktive und destruktive Interferenz von gestreuten elektromagnetischen Wellen. Mit der Speckle-Interferometrie und Shearografie werden in der Materialforschung Verformung von Oberflächen gemessen. Z. B. werden beide Verfahren bei der Qualitätskontrolle und der Inspektion von Flugzeugteilen verwendet.

Im Abschnitt 4.3 und 4.5 konnte gezeigt werden, dass die Amplituden der Reflexionen der Radarwellen sowohl an Bewehrungen als auch an einer Metallplatte teilweise mehr als +/- 30 % vom Mittelwert bei gleicher Überdeckung abweichen können. Die Abweichung vom Mittelwert wird verursacht durch die fortlaufenden Streuungen der einfallenden Radarwelle an den Gesteinskörnern, die statistisch verteilt sind und der Welle fortlaufend Energie entziehen. Die Streuungen führen zu einer „verrauschten“ Wellenfront, die die Bewehrung oder die Rückwand trifft. Die Amplituden dieser Reflexionen sind deshalb auch abhängig von der Heterogenität des davor liegenden Materials. Rückschlüsse auf den Reflektor sind deshalb nicht punktuell möglich, wie z. B. die Bestimmung des Bewehrungsquerschnitts anhand der Amplitude der Bewehrungsreflexion. Ebenso wie bei der Beurteilung der Korrosion von Bewehrungen anhand einer absoluten Amplitude der Bewehrungsreflexionen muss der Bereich der Abweichung der Amplituden vom Mittelwert berücksichtigt werden, der durch die Streuung der Radarwellen an der Gesteinskörnung entsteht.

Durch die Versuche mit Schüttungen aus Quarzkies mit zwei verschiedenen Sieblinien konnte gezeigt werden, dass die Radarwellen unterschiedlich gedämpft werden, da die Amplituden an einer Metallplatte mit steigender Überdeckung für das größere Größtkorn GK32 schneller abnehmen als für das Größtkorn G16. Alleinige Ursache für die unterschiedliche Dämpfung der Radarwelle ist die Streuung an den Gesteinskörnern der Quarzkiesschüttung. Die mittlere Permittivität als Ursache für die unterschiedliche Dämpfung entfällt, da die Laufzeiten der Reflexion an der Metallplatte für beide Kiesschüttungen annähernd gleich sind und die Permittivitäten sich direkt aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten (2 x Überdeckung / Laufzeit) ableitet. Die Wellenlängen der Antennenmittenfrequenzen (1,5 und 2,6 GHz) in Betonprobekörpern oder in den Quarzkiesschüttungen sind immer größer als die beiden verwendeten Größtkörner GK16 und GK32. Der Vergleich der Reflexionsamplituden an der Metallplatte zwischen den beiden Antennenfrequenzen zeigt, dass die Dämpfung und damit auch die Streuung zunehmen, wenn die Abmessung des Größtkorns sich der Wellenlänge nähert.

Bei der Ortung von Bewehrung an verschiedenen Stahlbetonbauwerken kann es große Unterschiede in der maximalen Detektionstiefe von Radar geben, obwohl der Bewehrungsaufbau und die Ausbreitungsgeschwindigkeit ähnlich sind. In (Kind, Trela und Wöstmann 2009) und (Kind, Feistkorn, et al. 2012) wurden bei der Spanngliedortung an Stahlbetonbrücken Unterschiede von mehr als 10 cm in der maximalen Eindringtiefe an zwei unterschiedlichen Bauwerken festgestellt, ohne einen großen Unterschied in der Ausbreitungsgeschwindigkeit festzustellen. Die Versuche mit den Quarzkiesschüttungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die in der Praxis auftretenden Unterschiede in der Detektionstiefe von Radar an Beton durch die heterogenen Materialeigenschaften von Beton und die damit unvermeidbare Streuung an der Gesteinskörnung erklärt werden können. Bei einer Betrachtung der Detektionstiefe von Radar muss neben der Streuung an der Heterogenität aber auch der Bewehrungsgrad berücksichtigt werden, da besonders

die oberflächennahe, schlaffe, kreuzweise verlegte Bewehrung wie zwei Drahtgitterpolarisatoren wirkt. Die an der Bewehrung reflektierte Radarwelle überlagert sich der sich weiter ausbreitenden einfallenden Radarwelle hinter der Bewehrung. Aufgrund der Totalreflexion mit Vorzeichenumkehr an der metallischen Bewehrung ist das resultierende elektromagnetische Feld hinter engmaschiger Bewehrung gedämpft.

Die in dieser Arbeit gezeigten Versuche und Ergebnisse behandeln die Streuungen an der Heterogenität von Beton. Ein vom Aufbau vergleichbarer Baustoff ist Asphalt, der als Befestigung im Straßenbau verwendet wird. Anstelle des Zementsteins von Beton wird bei Asphalt als Bindemittel für die Gesteinskörnung Bitumen verwendet. Das Radarverfahren wird auch zur Schichtdickenmessung des Straßenaufbaues verwendet (J. Hugenschmidt 2010; Saarenketo und Scullion 2000). Die Streuungen der Radarwelle an der Gesteinskörnung von Asphalt kann genauso erfasst werden wie das in dieser Arbeit für Beton gezeigt wurde. Neben der Qualitätskontrolle des Schichtaufbaues mit Radar bietet es sich an, auch die Zusammensetzung des Asphalts (Gesteinskörnung, Verdichtung) bei der Erstellung einer Straße mit Radar zu kontrollieren. Da Asphalt den natürlichen Umweltbedingungen, besonders durch Regen oder Sonneneinstrahlung, ausgesetzt ist, bietet es sich weiter an, die mit Radar gemessenen Streuungen zu verwenden, um eine Alterung des Straßenbelages durch wiederkehrende Radarmessungen zu untersuchen.

Für die Validierung von zerstörungsfreien Prüfmethoden werden Proben benötigt, die reproduzierbare Eigenschaften haben. Für die Validierung des Radarverfahrens zur Ortung und Lageermittlung von Bewehrung werden Betonprobekörper unter definierten Bedingungen hergestellt. Auch wenn die bauphysikalischen Materialparameter, wie z. B. die Sieblinie bei der Herstellung der Betonprobekörper sehr genau eingestellt wird, können sich für das Radarverfahren unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten oder Eindringtiefen ergeben, da die Permittivität der Gesteinskörnung je nach Herkunft des Materials unterschiedlich sein kann. Die Messung des Effektivwertes der Streuungen an der Gesteinskörnung kann bei der Validierung als ein unabhängiges Maß dafür benutzt werden, dass die Betonprobekörper bezüglich der elektromagnetischen Materialeigenschaften identisch sind und den Vorgaben eines Referenzprobekörpers entsprechen. Neben der Validierung des Radarverfahrens könnten so auch identische Betonprobekörper für Ringversuche hergestellt werden, um die Qualität von Laboren und Dienstleistern zu sichern.

6 Schlussbetrachtung

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass das Radarverfahren als zerstörungsfreies Prüfverfahren neben der herkömmlichen Anwendung zur Aufklärung der inneren Struktur von Betonbauwerken, z. B. von Bewehrung, das Potenzial hat, Materialkennwerte von Beton durch die schwache Streuung der Radarwellen an der Gesteinskörnung zu erfassen. Wurden die schwachen Streuungen bisher beim Radarverfahren kaum beachtet und eher als störend empfunden, konnte in dieser Arbeit gezeigt werden, dass Unterschiede in der Sieblinie von Beton auch zu unterschiedlichen Streuungen der Radarwelle führen und deshalb auch quantitativ mit dem Radarverfahren erfasst werden können. Dazu werden nur die schwachen Streuungen im Volumen ausgewertet, ohne dass ein eindeutiger Reflektor in Form einer Rückwand oder Bewehrung nötig ist.

Weiter konnte gezeigt werden, dass die schwachen Streuungen auch einen Einfluss auf die starken Reflexionen von metallischer Bewehrung haben. Scheinbar unbegründete Änderungen der Reflexionsamplituden entlang einer Bewehrung können jetzt besser durch die schwachen Streuungen an der Gesteinskörnung erklärt werden. Punktuelle Einzelmessungen für die quantitative Untersuchung der Reflexionsamplitude von Bewehrung sind deshalb mit einer großen Unsicherheit behaftet. Mit der Erfahrung aus dieser Arbeit sind Messungen an mehreren Stellen einer Bewehrung unumgänglich, um z. B. einen stabilen Mittelwert der Reflexionsamplitude zu erhalten, mit dem auf den Durchmesser einer Bewehrung geschlossen werden kann, oder um die Abnahme der Amplitude einer Radarwelle durch die Messung der mittleren Reflexionsamplitude an einer Metallplatte für verschiedene Betonüberdeckungen zu erfassen.

Die Untersuchungen an zwei Gesteinsschüttungen mit unterschiedlichem Größtkorn als Modellbeton haben gezeigt, dass die Dämpfung der Radarwelle - und damit auch die maximale Detektionsreichweite - deutlich durch die Heterogenität beeinflusst werden. Eine Betrachtung der Detektionsreichweite von Radar allein durch die elektrischen Materialeigenschaften von Beton, wie die mittlere elektrischen Leitfähigkeit oder die mittlere Permittivität, ist unvollständig. Die Messungen in dieser Arbeit haben einen deutlichen Unterschied in der Abnahme der Reflexionsamplituden zwischen den beiden Gesteinsschüttungen gezeigt. Bei beiden Gesteinsschüttungen war die mittlere Permittivität und Leitfähigkeit aber gleich und nur die Größenverteilung der Gesteinskörner unterschiedlich. Die Abschätzung der Detektionsreichweite von Radar in Beton bleibt Gegenstand der Forschung. Durch die Berücksichtigung der Heterogenität von Beton und die Ergebnisse dieser Arbeit können die zukünftigen Forschungsergebnisse wesentlich verbessert werden.

Es ist davon auszugehen, dass die Messung der schwachen Streuungen im Volumen von Beton zukünftig neue Möglichkeiten bietet, das Radarverfahren für eine breitere Anwendung als nur die Ortung der inneren Struktur von Bauwerken zu verwenden.

Das Orten von Verdichtungsmängeln, die Bestimmung der Feuchteverteilung in Beton oder die eindeutige Identifizierung von Betonteilen durch Streumuster sind nur einige Beispiele.

7 Literaturverzeichnis

Al-Qadi, I. L., W. Xie, und R. Roberts. „Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination.“ *NDT & E International*, Issue 6 2008: 441-447.

Annan, A. P. „Electromagnetic Principles of Ground Penetrating Radar.“ In *Ground Penetrating Radar Theory and Applications*, von Harry Jol, 3-40. Elsevier, 2008.

Baysal, E., Kosloff, D., and Sherwood, J.W.C. „Reverse time migration.“ *Geophysics*, 48 1983: 1514–1524.

Bohren, C. F., und A. B. Fraser. „Color of the Sky.“ *Physics Teacher*, Vol. 23, No. 5 1985: 267-272.

Bungey, J. H., S. G. Millard, und M. R. Shaw. „Radar assessment of post-tensioned concrete.“ *Proc. 7th Int. Conf. on Structural faults and repair.* Edinburgh: Engineering Technics Press, 1997. pp. 331-339.

Daniels, D. J. „GPR for Landmine Detection, an Invited Review Paper.“ *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2004).* Delft, The Netherlands: Delft University of Technology, 2004. 7 -10.

—. *Ground Penetrating Radar.* London: The Institution of Engineering and Technology, IET, 2004.

Daniels, D. J. „System design 2.3 Clutter.“ In *Surface-Penetrating Radar*, von D. J. Daniels, 23 - 24. London: IEE The Institution of Electrical Engineers, 1996.

DGZfP. *Merkblatt B10, UA Radar.* Berlin: DGZfP, 2008.

Feistkorn, S. *Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradars.* Berlin: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 603, Beuth Verlag, 2012.

Goebbels, K. „Gefügebeurteilung mittels Ultraschall-Streuung.“ *Materialprüf.*, 1975: 231-233.

Goebbels, K., G. Deuster, und Greter S.-E. *Ultraschallschwächung in Stahl unter besonderer Berücksichtigung der Austenite.* Statusbericht, Saarbrücken: Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für zerstörungsfreie Prüfung, 1976.

Hugenschmidt, J., und R. Mastrangelo. „GPR inspection of concrete bridges.“ *Cement & Concrete Composites*, 28 2006: 384-392.

Hugenschmidt, Johannes. *Geophysics and non-destructive testing for transport infrastructure, with special emphasis on ground penetrating radar, Diss. No. 19255.* Zürich: ETH Zürich, 2010.

Jansohn, R. *Amplitudenstatistik zur Bewertung von Ultraschallrückstreusignalen bei Beton.* Dissertation, Aachen: Shaker, 2000.

Jol, H. *Ground Penetrating Radar Theory and Applications.* Elsevier, 2008.

Jol, H., et al. „Preliminary results from high frequency GPR surveys and a 3D grid: Davis Snow-field, Franz Josef Glacier New Zealand." *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar.* Delft, The Netherland: Delft University of Technology, 2004. 773-776.

Kind, Th., A. Taffe, J. Wöstmann, und J. Kurz. „Ortung und Unterscheidung von Querspanngliedern hinter schlaffer Bewehrung mit dem Radarverfahren in einer Fahrbahnplatte." *DGZfP - Jahrestagung 2013.* Dresden: DGZfP, 2013.

Kind, Th., Feistkorn, S., Ch. Trela, und J. Wöstmann. „Impulsradar für schadensfreie Kernbohrungen an Spannbetonbrücken." *Beton- und Stahlbetonbau*, 2009: 104: 876-881.

Kind, Th., S. Feistkorn, Ch. Trela, und J. Wöstmann. „Kombinierte Radar- und Ultraschalluntersuchungen zum schadfreien Kernbohren im Zuge einer Verstärkung. Beton- und Stahlbetonbau." *Beton- und Stahlbetonbau*, 2012: 107: 255-261.

Kind, Th., und Ch. Maierhofer. „Das Impulsradarverfahren – ein Verfahren zur zerstörungs-freien Strukturaufklärung in Bauwerken." In *Bauphysik-Kalender 2004*, von E. Cziesielski, 333-341. Berlin: Ernst und Sohn, 2004.

Kozlov, A. I., L.P. Ligthart, und A.I. Logvin. *Mathematical and Physical Modelling of Microwave Scattering and Polarimetric Remote Sensing.* New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publisher, 2001.

Kraus, S., und K. Goebbels. *Signalmittelungsverfahren zur Unterdrückung des kohärenten Untergrundes bei Ultraschall-Fehlerprüfung grobkörniger Werkstoffe.* Vierter Zwischenbericht zu RS 102-16, Saarbrücken: Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, 1977.

Krause, M., J. Krieger, und H. Wiggenhauser. „Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbrücken." *Bautechnik*, 76 1999: 16-26.

Kroggel, O., M. Schickert, und J.D. Schnapp. „Statistical Evaluation of Ultrasound Images of Concrete Structures." *8th ECNDT 2002.* Barcelona: Spanish Society for NDT (AEND), 2002. CD-ROM, pp. 1–8.

Lai, W. L., T. Kind, und Wiggenhauser H. „Detection of accelerated reinforcement corrosion in concrete by Ground Penetrating Radar." *13th International Conference on Ground Penetrating Radar.* Lecce: Institute for Archaeological and Monumental Heritage, IBAM-CNR, 2010. CD.

Maierhofer, Ch., und Th. Kind. „Application of impulse radar for non-destructive investigation of concrete structures .“ *Proc. of the 9th International Conference on Ground Penetrating Radar.* Santa Barbara: SPIE, the International Society for Optical Engineering , 2002. 382-387.

Martino, N., R. Birken, K. Maser, und M. Wang. „DEVELOPING A DETERION THRESHOLD MODEL FOR THE ASSESSEMENT OF CONCRETE BRIDGE DECKS USING GROUND PENETRATING RADAR.“ *93rd Annual Meeting of the Transport on Research Board.* Washington, DC, 2014. CD.

Mie, G. „ Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen.“ *Annalen der Physik*, Band 25, No. 3 1908: 377-445.

n.n. *Guidance on radar testing of concrete structures.* Technical Report 48, Slough: The Concrete Society, 1997.

Rayleigh, L. „On the Light from the Sky, Its Polarization and Color.“ *Philosophical Magazine*, Vol. 41 1871: 107-120.

Rayleigh, L. „On the Transmission of Light through an Atmosphere Containing Small Particles in Suspension and on the Origin of the Blue of the Sky.“ *Philosophical Magazine*, Vol. 47 1899: 375-384.

Reeves, B. A., und W. B. Muller. „Traffic-speed 3-D Noise Modulated Ground Penetrating Radar (NM-GPR).“ *14th International Conference on Ground Penetrating Radar.* Shanghai: Tongji University, 2012. 165-172.

Roberts, R., I. L. Al-Qadi, E. Tutumluer, J. Boyle, und T. Sussmann. „Advances in Railroad Ballast Evaluation Using 2GHz Horn Antenna.“ *Proc., 11th International Conference on Ground Penetrating Radar.* Columbus, Ohio: The Ohio State University, 2006. (CD).

Roberts, R., I. L. Al-Qadi, und E. Tutumluer. „Railroad Structure Characterization using GPR in Alaska: A Case History.“ *Proc. 12th International Conference on Ground Penetrating Radar.* Birmingham: University of Birmingham, 2008. (CD).

Saarenketo, Timo, und Tom Scullion. „Road evaluation with ground penetrating radar.“ *Journal of Applied Geophysics, 43*, 2000: 119-138.

Sachs, J., P. Peyerl, und G. Alli. „Ultra-wideband polarimetric GPR-array stimulated by pseudo random binary codes.“ *International Conference on Ground Penetrating Radar.* Delft: Univ. of Technology, 2004. 163-166.

Schickert, M. „Tiefenausgleich verrauschter Ultraschallbilder.“ *DGZfP Jahrestagung 2003, Berichtsband 83 (CD).* Mainz: DGZfP, 2003. CD.

Schubert, F., und B. Köhler. „Numerical modelling of ultrasonic attenuation and dispersion in concrete - The effect of aggregates and porosity.“ *Proc. Int. Symp. NDT in Civil Engineering*, 1997: 143-157.

Schubert, M. „Bachelorarbeit: Entwurf, Aufbau und Test einer universellen Steuereinheit für zeitkritische Anwendungen bei zerstörungsfreien Prüfungen im Bauwesen.“ TU Berlin, 2011.

Simmons, G., et al. *Apollo 17 preliminary science report (NASA SP-330), Surface electrical properties experiment, 15-1 -15-14.* Washignton: NASA, 1973.

Stoppel, M., Milentz, F., Wiggenhauser H. „Automatisierung in der zerstörungsfreien Prüfung.“ In *BetonKalender 2007*, Bd. 1 562-567. Berlin: Ernst & Sohn, 2007.

Streicher, D., Kohl, C., Wiggenhauser, H., Taffe, A. „Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken.“ *Beton- und Stahlbetonbau*, 2006: 101: 330-342.

Taffe, A., Kind, Th., Stoppel, M., Kurz, J. „Bauwerkscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen.“ *Beton- und Stahlbetonbau*, 2011: 106: 267-276.

Takahashi, Kazunori, Jan Igel, und Holger Preetz. „Modeling of GPR Clutter Caused by Soil Heterogenity.“ *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012.

Trela, Ch., Th. Kind, und M. Schubert. „Positioning accuracy of an automatic scanning system for GPR measurements on concrete structures.“ *14th International Conference on Ground Penetrating Radar.* Shanghai: Tongji University, 2012. CD.

Utsi, V., und E. Utsi. „Measurement of reinforcement bar depths and diameters in concrete.“ *Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar.* Delft, 2004. CD.

Wapenaar, K., Draganov, D., Snieder, R., Campman, X., Verdel, A. „Tutorial on seismic interferometry: Part 1 — Basic principles and applications.“ *Geophysics*, 75 2010: 195-209.

Wapenaar, K., Slob, E., Snieder, R., Curtis, A. „Tutorial on seismic interferometry: Part 2 — Underlying theory and new advances.“ *Geophysics*, 75 2010: 211-227.

Watts, R. D., und A. W. England. „Radio-echo Sounding of Temperate Glaciers: Ice Properties and Sounder Design Criteria.“ *Journal of Glaciology*, No. 85. Vol. 21 1976: 39-48.

8 Anhang

8.1 Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

a. u.	Englische Abkürzung für arbitrary units
ADC	Englische Abkürzung für Analog-to-Digital-Converter
LP	Englische Abkürzung für low pass (Tiefpass)
PK	Abkürzung für Probekörper
RMS	Englische Abkürzung für root mean square; entspricht dem quadratischen Mittelwert oder Effektivwert
HP	Englische Abkürzung für high-pass (Hochpass)
$RMS_{AC}(t)$	Effektivwert eines Zeitschnittes zur Laufzeit t ohne Gleichanteil; Messgröße zur Erfassung der schwachen Streuungen
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
x, y	Bezeichnung der Achsen eines kartesischen Koordinatensystem; x entspricht der Abszisse und y der Ordinate
d	Tiefe
t	Laufzeit
t_0	Laufzeit im Scheitelpunkt einer Hyperbel
v	Ausbreitungsgeschwindigkeit
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Relative Permittivität (erste, zweite Schicht)
V_1, V_2	Ausbreitungsgeschwindigkeit (erste, zweite Schicht)
λ	Wellenlänge
TDR	Time Domain Reflectometry
TX	Abkürzung für Sendeantenne
RX	Abkürzung für Empfangsantenne
GK16 GK32	Größtkorn 16 mm oder 32 mm
A	Lageparameter der exponentiellen Ausgleichsfunktion
B	Formparameter (logarithmische Steilheit), Kehrwert entspricht einer Zeitkonstanten

8.2 Glossar

2D-Histogramm	Darstellung eines Histogramms in Abhängigkeit von einem Parameter; die Häufigkeit einer Klasse wird anstelle eines Balkens als farbkodierter Pixel dargestellt
A-Scan	Liniendiagramm, der an einem Punkt empfangenen Reflexionen; wird auch als Einzelspur bezeichnet
Antennenorientierung	Ausrichtung der Antenne, und damit auch Ausrichtung der Antennenpolarisation zu einer Bezugslinie
Antennenpolarisation	Beschreibt die Richtung der ausgesendeten oder bevorzugt empfangenen elektrischen Feldstärkevektoren einer Antenne
B-Scan	s. Radargramm
Bauwerkscanner	Einrichtung für die automatisierte Datenaufnahme mit unterschiedlichen Sensoren, die mit Hilfe von Linearachsen eine Messfläche abfährt
Bewehrung	häufig auch als Armierung bezeichnet; Verstärkung von Beton durch Stahl oder andere Materialien, um zusätzlich Zugkräfte aufzunehmen
Detektionsreichweite	Kennzeichnet die maximale Tiefe, in der mit Radar Reflexionen noch empfangen werden können
Direkte Welle	Welle, die als erstes empfangen wird und sich direkt ohne Reflexion zwischen Empfangs- und Sendeantenne ausbreitet
Effektivwert	Quadratischer Mittelwert einer Wechselgröße
Größtkorn	Gesteinskörner, die die maximale Maschenweite eines Siebes noch passieren; Größe der Maschenweite entspricht Größe des Größtkorns
Heterogenität	Bezeichnet die Veränderung innerhalb eines Materials; die Eigenschaften ändern sich sprunghaft an Grenzflächen
Histogramm	Häufigkeitsverteilung von vorher gebildeten Klassen; meistens als Balkendiagramm dargestellt
Hochpass	Mathematischer Algorithmus oder elektrischer Filter, der Frequenzen unterhalb einer Grenzfrequenz aus einem Signal entfernt; engl. abgekürzt HP

Hyperbel	Kurve im Radargramm, die sich beim Überfahren mit einer Antenne an punkt- oder linienförmigen Reflektoren ergibt
Laufzeit	Zeit, die eine Welle braucht zwischen dem Senden und Empfangen mit einer oder zwei Antennen
Mie-Streuung	Streuung elektromagnetischer Wellen an Objekten, die einen vergleichbaren Durchmesser haben wie die Wellenlänge λ
Permittivität	Dielektrische Leitfähigkeit, kennzeichnet die Durchlässigkeit eines Materials für das elektrische Feld; wird bestimmt durch die Polarisierbarkeit nicht beweglicher Ladungsträger; früher auch als Dielektrizität bezeichnet
Ortsfrequenz	Kehrwert der räumlichen Periodenlänge
Quarzkies	Mineral vorwiegend aus SiO_2 mit runder Gestalt; wird hauptsächlich aus Kiesgruben gewonnen
Radar	Abkürzung für **R**adio **D**etection **a**nd **R**anging; frei übersetzt: „Funkortung und -abstandsmessung“
Radargramm	Graphische Darstellung der empfangenen Reflexionen, die entlang einer Linie mit einer Antenne aufgenommen wurden; auch als B-Scan bezeichnet
Rayleigh-Streuung	Streuung elektromagnetischer Wellen an Objekten, die viel kleiner sind als die Wellenlänge λ
Schüttung	Behälter mit körnigem Material, z. B. Gesteinskörner
Schwache Streuung	Bezeichnung der Streuung von Radarwellen an der Gesteinskörnung; aufgrund des geringen dielektrischen Kontrasts sind die Einzelstreuungen schwach
Sieblinie	Graphische Darstellung der Verteilung der Größen von Gesteinskörnern
Tiefenschnitt	Unter der Annahme einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit wird die Laufzeit eines Zeitschnitts (s. u.) umgerechnet in eine Tiefe und der Zeitschnitt entspricht dann einem Tiefenschnitt
Tiefpass	Mathematischer Algorithmus oder elektrischer Filter, der Frequenzen oberhalb einer Grenzfrequenz aus einem Signal entfernt; engl. abgekürzt LP
Zeitschnitt	Senkrechter Schnitt zur Laufzeitachse eines aus mehreren Radargrammen zusammengesetzten Datenkubus