

Charakterisierung von Gebäudestrukturen mit Mikrowellenmessverfahren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN
(Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Alexander Haas

Tag der mündlichen Prüfung: 25.07.2023

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. John Jelonnek

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek

Kurzfassung

Das erklärte Ziel der deutschen Bundesregierung ist es, den Primärenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2050 auf 50 % des Werts aus dem Jahr 2008 zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen, muss der Verbrauch in allen Sektoren – Industrie, Verkehr, Haushalte etc. – reduziert werden. Der Gebäudesektor macht zwecks Erzeugung von Raumwärme einen Anteil von 26 % am Endenergieverbrauch in Deutschland aus. Einsparungen in diesem Sektor könnten insbesondere durch Dämmsysteme erreicht werden. Um deren Potenzial optimal ausnutzen zu können, bedarf es jedoch präziser Informationen über den Aufbau der zu dämmenden Wände. Dies stellt insofern eine Herausforderung dar, als ein Großteil des Gebäudebestands in Deutschland auf Altbauwohnungen entfällt, die vor oder kurz nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs gebaut wurden. Für einen Großteil dieser Gebäude existieren keine oder nur unzureichende Informationen über den tatsächlichen Wandaufbau. Um diesem Problem anhand präziser Analysen Abhilfe zu schaffen, wird in der vorliegenden Arbeit eine Gesamtmethodik mittels Mikrowellenradar zur Wandcharakterisierung entwickelt. Hierzu wurden erstmals Untersuchungen an mehrschichtigen Wandaufbauten unterschiedlicher Zusammensetzung durchgeführt. Wichtigstes Instrument hierbei ist der Einsatz von Mikrowellenradartechnik. Aus Reflexionsmessungen an der Gebäudehülle werden Echobilder der Wand erzeugt, aus denen Rückschlüsse auf die hinsichtlich einer optimalen Dämmung relevanten Parameter Schichtanzahl, Schichtdicke und Schichtmaterialien der Wand gezogen werden können. Die hier entwickelte Methodik deckt die gesamte Systemkette von der Kalibrierung des Messsystems und der Messdaten bis hin zur Analyse der erzeugten Radarbilder ab. Die Forschungsergebnisse dieser Arbeit dienen als Grundlage für zukünftige, schnell operierende Radarmesssysteme (z.B. auf Flugdrohnen), mit denen in urbanen Umgebungen in Form von Reflexionsmessungen ein Maximum an Informationen über die innere Struktur des jeweils vorhandenen Gebäudebestands extrahiert werden kann.

Abstract

The German government has declared that by 2050, the country aims to reduce its primary energy consumption by 50 percent compared to the level reached in 2008. Germany must take measures to achieve this goal, not only in sectors such as industry and transport but also in the energy used for heating of buildings, which accounts for 26 % of the country's total final energy consumption. The most efficient way to save energy in this sector is to install insulation layers in buildings' walls. To exploit the full potential of insulation systems, precise information about the internal structures of the walls to be insulated is required. Acquiring this information can be rather challenging, though, since a large proportion of the buildings in Germany were constructed either before or shortly after the end of World War II; for a majority of these buildings, there is no or only insufficient information about their walls' actual makeups. The present thesis aims to develop a comprehensive methodology using microwaves for wall characterization, i.e., a methodology that includes all steps starting from the calibration of the measurement systems to the final analysis of the radar images generated. The thesis features first-time investigations on multilayer wall structures of different compositions. The most important instrument used is microwave radiation, as it provides significant benefits in generating high-resolution echo images of a given buildings' envelope. Based on the results gained, one can conclude the number of layers in the wall investigated, the thickness of each layer, and the material used to build these layers. These parameters are key to finding the optimum insulation for each given wall. The research results of this thesis serve as a basis for future, fast operating radar measurement systems – probably drones – that will be used in urban environments to do reflection measurements for extracting a maximum of information about the internal structures of the buildings investigated.

Formelzeichen und Variablen

Großbuchstaben

A_x	Abstandsfunktionswerte
$\bar{A}_{\min,50}$	Mittelwert der ersten 50 Abstandsfunktionswerte
B	Bandbreite
$B_{m(m+1)}$	Backward propagation matrix
\vec{D}_0	Elektrische Flussdichte des Vakuums (Zeitbereich)
\vec{D}	Elektrische Flussdichte im Dielektrikum (Zeitbereich)
$\vec{\bar{D}}$	Elektr. Flussdichte im Dielektrikum (Frequenzbereich)
D_{Ap}	Antennenapertur
\vec{E}_0	Elektrisches Feld im Vakuum (Zeitbereich)
\vec{E}	Elektrisches Feld (Zeitbereich)
$\vec{\bar{E}}$	Elektrisches Feld (Frequenzbereich)
F_{AF}	Faktor zur Anpassung von Messung und Simulation
F_R	Relativer Fehler
$F(k_x, k_y)$	2D-Fourier-Transformation der Zielobjektfunktion
$F_{m(m+1)}$	Forward propagation matrix
$G_{m(m+1)}$	Ausbreitungsmatrix
\vec{H}	Magnetisches Feld (Zeitbereich)
$\vec{\bar{H}}$	Magnetisches Feld (Frequenzbereich)
$L_{m(m+1)}$	Grenzschichtmatrix
N_D	Anzahl Dipolelemente
\vec{M}	Magnetisierung (Zeitbereich)
$\vec{\bar{M}}$	Magnetisierung (Frequenzbereich)
\vec{P}	Polarisation Dielektrikum (Zeitbereich)

\vec{P}	Polarisation Dielektrikum (Frequenzbereich)
P_{RP}	Reference-Plane-Rotationsfaktor
\underline{P}_{θ_m}	Projektionsfunktion
$R_{m(m+1)}$	Reflexionsfaktor nach Fresnel zwischen zwei Schichten
R_{Sim}	Reflexionsfaktor Simulation
R_{Mess}	Reflexionsfaktor Messung
T	Transmissionsfaktor
Z_n	Einzelner Leitungswiderstand
Z_{ges}	Gesamtwiderstand einer Leitungsschaltung

Kleinbuchstaben

a	Breitseite Hohlleiter
b	Schmalseite Hohlleiter
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
d_{AW}	Abstand Antenne-Wand
$d_{max,analytisch}$	Analytisch berechnete Schichtdicke
$d_{Material}$	Schichtdicke (real existierend)
$d_{max,M}$	Schichtdicke aus Messwerten
$f(x, y)$	Zielobjektfunktion
f_{Start}	Startfrequenz
f_m	Mittelfrequenz
f_{Stopp}	Stoppfrequenz
h_v	Vieldeutigkeitsparameter
k_r	Ortskreisfrequenz
k_{zm}	Kreiswellenzahl in Schicht m
k_0	Kreiswellenzahl Vakuum
\underline{p}	Projektionsfunktion

\vec{p}_v	Dipolmoment in einem Volumenelement
\vec{r}	Ortsvektor
$r(f)$	Reflexionsfaktorfunktion (in Abhängigkeit von f)
$\Delta r_{Az,SAR}$	Azimutauflösung: SAR
Δr_{Az}	Azimutauflösung
Δr_{Entf}	Entfernungsauflösung
s	S-Parameter
x_a	Antennenposition
$x_1^{(n+1)}$	Durchstoßpunkt Übergang Schichtgrenze
$(x_{PZ} y_{PZ})$	Koordinaten Punktziel
x_m	Antennenposition

Griechische Buchstaben

α	Dämpfungskonstante
β	Phasenkonstante
γ	Fortpflanzungskonstante
$\varepsilon_{r,z}$	Relative Permittivität im Zeitbereich
$\underline{\tilde{\varepsilon}}_r$	Relative Permittivität im Frequenzbereich
$\tilde{\varepsilon}'_r$	Realteil relative Permittivität im Frequenzbereich
$\tilde{\varepsilon}''_r$	Imaginärteil relative Permittivität im Frequenzbereich
$\underline{\varepsilon}_r$	Relative Permittivität im Frequenzbereich (inkl. ohmscher Verluste)
ε'_r	Realteil relative Permittivität im Frequenzbereich
ε''_r	Imaginärteil relative Permittivität im Frequenzbereich (inkl. ohmscher Verluste)
ε_0	Dielektrizitätskonstante Vakuum
ε	Permittivität

η	Feldwellenwiderstand
η_0	Feldwellenwiderstand des Freiraums
θ_0	Einfallswinkel
θ_m	Beobachtungswinkel
λ	Wellenlänge
λ_c	Cutoff-Wellenlänge
$\mu_{r,z}$	Permeabilität im Zeitbereich
$\tilde{\mu}_r$	Permeabilität im Frequenzbereich
μ_0	Permeabilität Vakuum
ϱ	Residuum
σ	Leitfähigkeit
τ	Laufzeit
φ_{HWB}	Halbwertsbreite
φ_{Mess}	Phase Messsignal
$\varphi_{\text{Ant,P}}$	Phasenfehler Antenne
$\varphi_{\text{Ant,FA}}$	Phasenfehler Antenne (Feed-Apertur)
φ_{Weg}	Phasenfehler Weg
φ_{MT}	Phase Material
φ_{21}	Phase S_{21} -Messung
$\varphi_{\Delta w}$	Phasenversatz durch S_{21} -Messung
$\varphi_{\text{Mess,bereinigt}}$	Phase Messsignal (bereinigt)
Φ	Phase Aufnahmesignal (Prinzip SAR-Aufnahme)
χ_e	Elektrische Suszeptibilität eines Dielektrikums
χ_{el}	Suszeptibilität elektronische Polarisation
χ_{ion}	Suszeptibilität ionische Polarisation
χ_{or}	Suszeptibilität Orientierungspolarisation
χ_{RL}	Suszeptibilität Raumladungspolarisation
Ψ	Residuenquadratsumme
ω	Kreisfrequenz

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	ii
Formelzeichen und Variablen	iii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Stand der Technik	6
1.3 Stand der Forschung.....	8
1.4 Zielstellung der Arbeit	9
1.5 Gliederung der Arbeit	11
2 Elektromagnetische Wellenausbreitung in Mehrschichtsystemen	13
2.1 Polarisierung von Dielektrika.....	13
2.2 Elektromagnetische Wellen im Dielektrikum	17
2.3 Wellenausbreitung in Mehrschichtsystemen.....	23
2.4 Simulation eines Mehrschichtsystems	38
2.5 Zusammenfassung.....	44
3 Charakterisierung von Mehrschichtsystemen	45
3.1 Messaufbau und Kalibrierung der Reflexionsmessung .	46
3.2 Verwendete Materialien	50
3.3 Rückrechnungsmethodik.....	53
3.4 Einschichtige Wandaufbauten.....	55
3.5 Dreischichtiger Wandaufbau	64
3.5.1 Kalksandstein–Luftspalt–Ziegelstein	65
3.5.2 Porenbeton–Luftspalt–Vollziegelstein	68

3.6	Zusammenfassung.....	72
4	Strukturanalyse von Mehrschichtsystemen	74
4.1	Radar mit synthetischer Apertur.....	75
4.2	Bildrekonstruktion mit der Rückprojektionsmethode ...	80
4.3	Einfluss der Mehrwegeausbreitung auf die Azimutauflösung	91
4.4	Zusammenfassung.....	97
5	Untersuchung von bekannten Wandstrukturen	99
5.1	Messaufbau	99
5.2	Wandstrukturen aus Steinen mit homogener Innenstruktur	101
5.3	Steine mit komplexer geometrischer Innenstruktur	107
5.3.1	Luftsäulenstrukturanalyse	108
5.3.2	Gitterstrukturanalyse	116
5.4	Zusammenfassung.....	119
6	Methode zur Charakterisierung unbekannter Wandstrukturen	120
6.1	Beschreibung der Methode.....	120
6.2	Anwendung der Methodik auf ein Mehrschichtsystem	123
6.3	Zusammenfassung.....	130
7	Charakterisierung realer Gebäudestrukturen	132
7.1	Charakterisierung der Testwände in Jülich	132
7.1.1	Messaufbau.....	134
7.1.2	Leichtbetonwand	135
7.1.3	Stahlbetonwand	144
7.1.4	Hochlochziegelsteinwand.....	149
7.2	Charakterisierung eines Altbaugebäudes.....	153
7.2.1	Strukturanalyse.....	156
7.2.2	Rückrechnung auf Wandparameter	160

7.2.3	Fokussierte Bildgebung.....	164
7.3	Zusammenfassung.....	167
8	Schlussfolgerung.....	169
8.1	Zusammenfassung.....	169
8.2	Ausblick	172
Anhang	175
A.1	Nicolson-Ross-Weir-Methode	175
A.2	Fensterfunktionen.....	182
Literaturverzeichnis	187

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die globalen Treibhausgasemissionen und die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre steigen weiter auf Rekordwerte. Im Jahr 2000 betrug die weltweite Emission von CO₂ insgesamt 25,2 Milliarden Tonnen und stieg bis zum Jahr 2020 um 30 % auf insgesamt 34,8 Milliarden Tonnen an [Rit22]. Als primäre Ursachen für den Anstieg der Treibhausgasemissionen werden zum einen das Wirtschaftswachstum sowie zum anderen das Bevölkerungswachstum bei gleichzeitiger Erhöhung des Lebensstandards angesehen [Bmz20]. Die Zunahme der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre führt nach allgemeinem Konsens zu einer Erhöhung der Durchschnittstemperatur der Erde. Je nach Szenario wird dabei eine Erhöhung der globalen Oberflächentemperatur zwischen 1,5°C und 4°C bis zum Jahr 2100 prognostiziert [Ipc18] [Ipc07]. Dieser Anstieg der Temperatur „beeinflusst das komplexe Zusammenspiel aller Komponenten des Systems Landoberfläche-Atmosphäre-Ozean“ [Mon19]. In der Bundesrepublik Deutschland zeigen sich die Auswirkungen des Klimawandels in erster Linie durch die Zunahme von Wetterextremen wie Dürren auf der einen Seite sowie Hagel, Sturm und Starkregen auf der anderen Seite [Dvv16]. Betroffen hiervon ist die Land-, aber auch die Forstwirtschaft, da die Wetterextreme auch Auswirkungen auf den Wald haben und zu einem raschen Baumsterben führen [Fvf16]. Ein weiteres Problem stellt häufiger auftretendes Niedrigwasser im Binnenland dar, welches – wie die zuvor genannten Beispiele – zu erheblichen ökonomischen Verlusten führen kann [Bas18]. Weitere Beispiele und genauere Beschreibungen der möglichen Auswirkungen des Klimawandels in Deutschland finden sich im „Monitoringbericht 2019 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ des Umweltbundesamts [Mon19].

Angesichts dieser Entwicklungen ist es das erklärte Ziel der Bundesregierung, den Primärenergiebedarf Deutschlands bis zum Jahr 2050 auf 50 % des Werts aus dem Jahr 2008 zu senken, was eine Reduktion um knapp

2000 TWh bedeutet. Abbildung 1.1 zeigt den Verlauf des Primärenergie- und Endenergieverbrauchs in Deutschland in den letzten zwanzig Jahren sowie die für die Zukunft anvisierten Energiezielwerte.

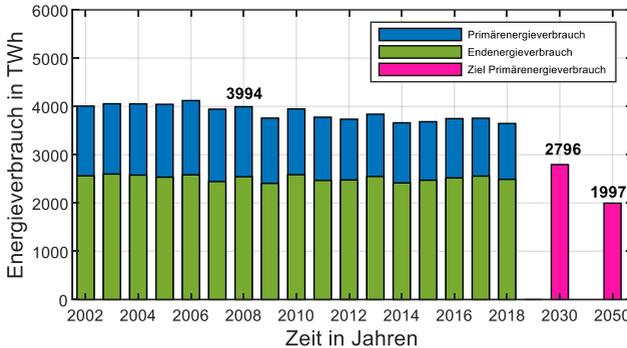


Abb. 1.1: Die Grafik zeigt den faktischen Energieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland zwischen den Jahren 2002 und 2018 sowie den für die Jahre 2030 und 2050 anvisierten Primärenergieverbrauch [UwB20].

Um einen weiteren Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur zu verhindern, ist eine Kombination aus Energieeinsparungen und dem verstärkten Einsatz von regenerativen Energien nötig. Letzteres wird seit geraumer Zeit durch den Ausbau regenerativer Energien forciert. Aktuell beträgt der Anteil des durch regenerative Energien erzeugten Stroms in Deutschland knapp 38 %; bis zum Jahr 2030 soll dieser Wert auf 65 % ansteigen [Eed19] [Uws20]. Auf diese Weise sollen bei der *Produktion* von Strom erhebliche Mengen an CO₂ eingespart werden. Zugleich soll es wie gesagt aber auch beim *Verbrauch* von Strom Einsparungen geben. Ein wesentlicher Baustein zur Reduktion des Primärenergiebedarfs liegt dabei in der effektiven Nutzung der erzeugten Energie. In Abbildung 1.2 ist der Endenergieverbrauch Deutschlands nach Anwendungsbereichen dargestellt. Beachtlich ist hierbei der Anteil des Endenergieverbrauchs zur Erzeugung von Raumwärme, welcher mit 26 % des Gesamtendenergieverbrauchs der Bundesrepublik an zweiter Stelle liegt.

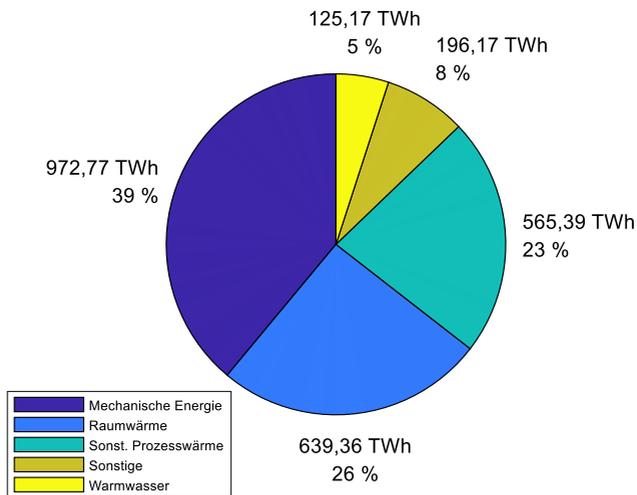


Abb. 1.2: Gesamtenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2018 nach Anwendungsbereichen [Uwb19].

Es stellt sich die Frage, warum der Energieverbrauch gerade in diesem Bereich so hoch ist. Einen ersten Hinweis auf die Antwort zu dieser Frage liefert eine Betrachtung der Verteilung des deutschen Wohngebäudebestands nach Baualter und des flächenbezogenen Endenergieverbrauchs.

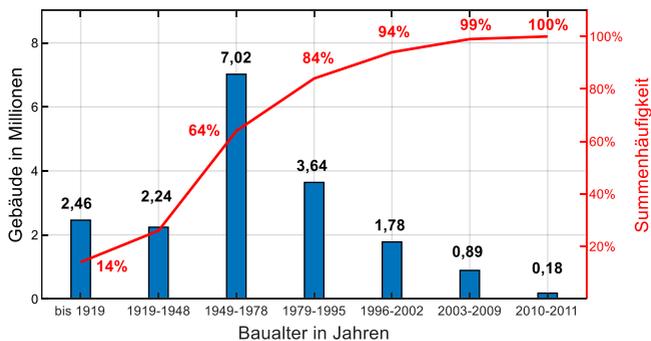


Abb. 1.3: Wohngebäudebestand in Deutschland nach der Volkszählung von 2011 [Zen11].

Wie aus Abbildung 1.3 und Abbildung 1.4 hervorgeht, wurden 64 % der Gebäude in Deutschland vor dem Jahr 1978 erbaut. Diese sind mit einem durchschnittlichen Energieverbrauch von 196 kWh/m² pro Jahr Hauptversucher des Energiebedarfs zur Erzeugung von Raumwärme. Der Grund für den hohen Mittelwert liegt in den unzureichend gedämmten Gebäudehüllen der alten Wohngebäude.

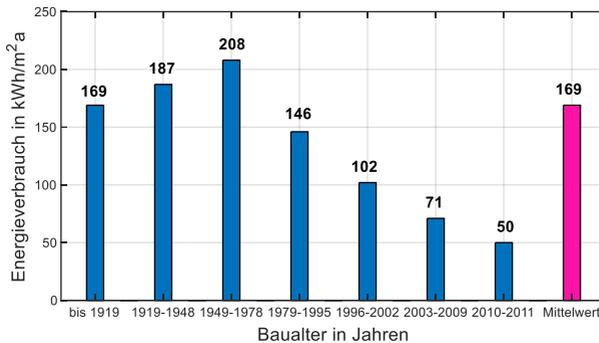


Abb. 1.4: Der flächenbezogene Endenergieverbrauch aller Wohngebäude in Deutschland beträgt im Mittel 169 kWh/m² pro Jahr [Bwe14].

Die Ereignisse rund um die erste und zweite Ölkrise in Deutschland führten im Jahr 1977 zum Erlass der sogenannten Wärmeschutzverordnung, der ersten gesetzlich festgeschriebenen Norm zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Wohngebäuden. Mit den nachfolgend erlassenen Wärmeschutz- und Energieeinsparverordnungen konnte der Endenergieverbrauch für den heutigen Gebäudebestand auf durchschnittlich 50 kWh/m² pro Jahr gesenkt werden. Eine der jüngsten Entwicklungen auf diesem Gebiet ist die Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Diese hat das Ziel, den Gebäudebestand in Deutschland bis zum Jahr 2050 nahezu klimaneutral zu machen [Uwb19], was jedoch nur mit der Einbringung von Isolierschichten in den unisolierten Gebäudebestand gelingen kann. Um eine adäquate Isolierung der Gebäudehülle zum Zwecke einer kostenreduzierten Sanierung des Gebäudebestands sowie der dadurch erzielten Reduzierung des Gebäudeendenergieverbrauchs vorzunehmen, ist die Kenntnis der internen Struktur der Gebäudehülle unerlässlich. Das Interesse am genauen Aufbau derselben ist dementsprechend sehr groß. Die hierbei relevanten Informationen

zu erlangen, stellt jedoch insofern eine Herausforderung dar, als für den Bestand der Gebäude in der Bundesrepublik Deutschland keine allgemeine Untersuchung zur Verbreitung der unterschiedlichen Arten von Mauerwerksaufbauten existiert; die Anzahl der Variationen bezüglich des Maueraufbaus liegt daher in unbekannter Höhe [Kla09].

Die vorliegende Doktorarbeit ist Teil des vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) geförderten Projekts „Gebäudetomograph“ (GTOM) [Bwe14]. Das globale Ziel dieses Projekts ist es, mit Hilfe unterschiedlicher Sensortypen (u.a. Infrarotthermografie, Sonar, Hyperspektraltechnik und Radar) zerstörungsfrei einen digitalen Zwilling eines Gebäudeobjekts zu erstellen und so alle erforderlichen Informationen bezüglich der bestehenden Gebäudehülle möglichst vollständig zu extrahieren. Jeder Sensortyp besitzt hierbei Vor- und Nachteile. Die Infrarotthermografie beispielsweise operiert im optischen Frequenzspektrum elektromagnetischer Wellen und besitzt ein sehr gutes räumliches Auflösungsvermögen. Die Eindringtiefe in Materie ist allerdings gering und auf wenige Millimeter unterhalb der Oberfläche des Gebäudes beschränkt. Aus diesem Grund ist sie für die hier verfolgten Zwecke ungeeignet. In dieser Hinsicht am besten geeignet ist die Mikrowellensensorik, da diese zerstörungsfrei arbeitet, tiefer in die Wand eindringen kann und somit eine detaillierte Analyse des inneren Aufbaus der untersuchten Wand ermöglicht. Da diese Eigenschaft für die hier verfolgten Zwecke entscheidend ist, beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit theoretischen und experimentellen Untersuchungen von Gebäudestrukturen mittels radarbasierten Mikrowellenverfahren.

In den folgenden Unterkapiteln wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik im Sinne der kommerziell erwerblichen Radarsensoren sowie ein Überblick über die zu dieser Thematik verfügbare wissenschaftliche Literatur gegeben. Anschließend wird gezeigt, wie die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen die bereits bestehenden Untersuchungen erweitern und sinnvoll ergänzen.

1.2 Stand der Technik

Das bekannteste Mikrowellensystem ist das Radar. Aktuell befinden sich zum Zweck der Wandanalyse einfache handgetragene Ortungsgeräte auf dem Markt, die Radarsensorik einsetzen. Diese Geräte werden vor allem für das grobe Erkennen von Rohrleitungen, Stromleitungen oder Hohlräumen eingesetzt und sind meist auf Eindringtiefen von wenigen Zentimetern beschränkt. Durch die kleine und kompakte Form der Geräte können zwar schnell Informationen über den unbekanntem Verlauf von Rohren eingeholt werden; aus demselben Grund können jedoch auch nur verhältnismäßig kleine Wandbereiche grob untersucht werden. Weiterentwickelte Geräte dieser Art verfügen über einfache bildgebende Anzeigen mit Tiefenabschätzung der lokalisierten Objekte in der Wand. Zusätzlich zur verbauten Radarsensorik nutzen bestimmte Teile dieser Geräte einen induktiven Sensor, mit dem in eingeschränktem Maß auch auf die Materialart des detektierten Rohrs geschlossen werden kann. Ein Beispiel für ein solches Gerät ist das PS 1000 von Hilti, das auf die Lokalisierung von Bewehrungsseisen in Betonwänden optimiert ist und zusätzlich zur Anzeige am Gerät mit einer Daten- und Visualisierungssoftware geliefert wird, mit der die aufgenommenen Daten nach der Messung bearbeitet werden können. Für den Zweck, für den diese Geräte entworfen wurden, leisten sie zweifellos hervorragende Arbeit; für die hier angestrebte großflächige und detailliertere Analyse eines gesamten Gebäudebestands sind sie jedoch nicht ausreichend. In Tabelle 1.1 findet sich eine Auswahl von kommerziell erwerbbaaren Wandradaren und deren charakteristischen Eigenschaften.

Zu den wesentlichen Parametern, die hinsichtlich einer energietechnischen Sanierung der Gebäudehülle von besonderem Interesse sind, zählen

- die Anzahl an verbauten Schichten,
- die Schichtdicken
- und die in den jeweiligen Einzelschichten verwendeten Baustoffe.

Die auf dem Markt erhältlichen Geräte sind zur Extraktion dieser Parameter wie oben beschrieben nur bedingt brauchbar, da die Eindringtiefe zu gering oder die Auflösung in Azimut- und Entfernungsrichtung nicht

ausreichend ist, um hinreichend genau auf Schichtanzahl, Schichtdicke und Baustoffart zurückschließen zu können. Insbesondere die Bestimmung der Baustoffart stellt große Herausforderungen dar, welche mit dem verwendeten Induktionsprinzip der Geräte nicht ausreichend adressiert werden kann. Die verbaute induktive Sensorik zielt generell auf die Detektion von metallischen Rohren ab. Auf die unzureichende kommerzielle Verfügbarkeit von Radarsystemen wurde bereits 2007 von Kharkovsky und Zounghi hingewiesen [Kha07].

Tab. 1.1: Ortungsgeräte der Firmen Hilti und Bosch, die mit Radarsensorik arbeiten [Hil01] [Hil02] [Bos01] [Bos02].

ProduktHersteller	Hilti		Bosch	
	PS 50	PS 1000	DTECT 120	DTECT 150
Induktive Sensorik	ja	---	ja	ja
Radarsensorik	ja	ja	ja	ja
max. Messtiefe [cm]	15	40	12	15
Mindestabstand zweier Objekte [cm]	4	k.A.	5	4
Besonderheiten	Tiefenbild der Szene in Anzeige Materialerkennung des Objekts	2D-/3D-Ansicht der Szene Darstellungs- und Visualisierungssoftware	Einfache Intensitätsanzeige bei Objekterkennung	Tiefenbild der Szene in Anzeige Materialerkennung des Objekts

In der Produktion von Industrieteilen werden zur Prüfung von Fertigungsgrenzen, beispielsweise in der Lackierung von Autoteilen, Reflexions- und Transmissionsmessungen im THz-Bereich durchgeführt, um fehlerhafte Teile zu detektieren und diese aus der Produktkette zu entfernen [Jon15]. Hier sind Schichtanzahl und Schichtdicke sowie die verwendeten Schichtmaterialien aber bereits bekannt, da sich nur so Abweichungen vom Sollwert genau berechnen lassen. Da der hier verfolgte Zweck aber darin besteht, umgekehrt die Werte für diese Parameter zu ermitteln, sind also auch diese Verfahren nicht geeignet.

1.3 Stand der Forschung

Auf wissenschaftlicher Seite finden sich in [Sch17] erste Untersuchungen zum Einsatz von Radarsystemen mit realer und synthetischer Apertur zur Wandstrukturanalyse, wobei hier Untersuchungen im Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 3 GHz durchgeführt wurden. Weitere Untersuchungen, bei denen Radarsysteme mit synthetischer Apertur eingesetzt wurden, konzentrieren sich auf die Feuchtebestimmung in Betonstrukturen [Bor06] [Fal14] [Has08], auf die Detektion von Bewehrungen und Korrosion von Stahl [Roq11], Spalte und Risse [Koy14], sowie zur Schadensanalyse von Gebäudestrukturen aus Stahlbeton [Zha11] [Zha18] und Holz-Betongebäudestrukturen [Liu16] [Sad20] [Sat14]. In den meisten Fällen waren in diesen Untersuchungen zur Fokussierung der Bilder die Permittivitätswerte der Schichten bereits bekannt. Ferner erstreckten sich die verwendeten Frequenzen immer nur auf Teilbereiche zwischen 1 GHz und 20 GHz. In diesen beiden Hinsichten weichen sie also von der hier erforderlichen Untersuchungsweise ab und sind dementsprechend nur bedingt relevant.

Außerhalb der Wandstrukturanalyse werden bildgebende Verfahren mit synthetischer Apertur im Millimeterwellenbereich zur Detektion von Materialdefekten eingesetzt [Bar15] [Ull19] [Ull21]. Mit Blick auf die Rückrechnung, also auf die Berechnung der unbekannt Parameter eines Mehrschichtsystems, gibt es hinsichtlich der Baustoffbestimmung einer unbekannt Wand gegenwärtig noch keine Untersuchungen. Es gibt zwar Untersuchungen von Ferreira et al. zur Bestimmung der relativen Permittivität südeuropäischer Baustoffe mittels Hohlleitersmessungen [Fer14] [Fer18] sowie Untersuchungen von einschichtigen Baumaterialien, die von Davis et al. mittels Freiraummethode durchgeführt wurden [Dav07]. Da hier neben den Reflexionsmessungen aber auch Transmissionsmessungen verwendet wurden, sind auch diese Arbeiten für die hier durchzuführenden Untersuchungen nur von bedingter Relevanz. Analog verhält es sich bei der Untersuchung zur Bestimmung der Permittivitäten mehrschichtiger Materialien im Millimeterwellenbereich von [Zwi02]. Zum einen werden wie oben Reflexions- und Transmissionsmessungen eingesetzt und zum anderen erfolgt die Messung der Materialproben mit offenen Resonatoren als Strahlungsquelle. Offene Resonatoren wurden für verlustarme, dünne und planare Materialproben entwickelt und

können daher als ungeeignet für die Untersuchung von Baustoffen betrachtet werden. Ferner gibt es Untersuchungen zur Bestimmung der Permittivität einschichtiger Materialien im Millimeterwellenbereich mit einem interferometrischen Messaufbau [Bar17]. Kleine Materialproben lassen sich hier problemlos untersuchen, der Messaufbau ist aber aufgrund seiner Komplexität als unzureichend zur Untersuchung an realen Gebäudestrukturen anzusehen.

1.4 Zielstellung der Arbeit

Wie gezeigt wurde, sind die kommerziell verfügbaren Geräte und Verfahren nicht geeignet, um den Wohngebäudebestand in Deutschland für die oben erläuterten Zwecke mit hinreichender Genauigkeit und in ökonomisch sinnvoller Weise zu untersuchen. Weiter wurde gezeigt, dass in verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen Wanduntersuchungen zwar bereits teilweise mittels Mikrowellenstrahlung durchgeführt, aber noch keine umfassende Methodik zur genauen Extraktion der relevanten Wandparameter eines Mehrschichtsystems entwickelt wurden. Angesichts dieser Limitierungen auf der einen Seite und der Dringlichkeit einer kostenreduzierten energietechnischen Sanierung der größtenteils unbekannteren Gebäudehüllenstrukturen des Altgebäudebestands in Deutschland auf der anderen Seite wird deutlich, dass ein dringender Forschungsbedarf für umfassende Untersuchungen von Gebäudestrukturen mittels Mikrowellenstrahlung sowie der Entwicklung darauf aufbauender Verfahren besteht. Die vorliegende Arbeit soll die diesbezüglich bestehenden wissenschaftlichen Lücken schließen und einen wertvollen Beitrag zur theoretischen und experimentellen Untersuchung von Gebäudestrukturen liefern. Um dem späteren operationellen Betrieb im urbanen Gelände während der durchgeführten Untersuchungen möglichst nahezukommen, wurde im Vorfeld der Arbeit ein Bezugsrahmen aus Anforderungen erarbeitet, durch den die Forschungsarbeiten sinnvoll eingeschränkt werden konnten:

- Zum Zweck der Bestimmung der elektromagnetischen Materialparameter wurde auf leitungsgebundene Systeme wie beispielsweise den Mikrostreifen-Resonator verzichtet. Andere

leitungsgebundene Systeme wie Koaxial- oder Hohlleitersonden scheiden deshalb aus, weil sie direkt an die Hauswand angebracht werden müssen und damit keine zerstörungsfreie Untersuchung gewährleisten. Um kontaktlos zu messen, bietet sich nur die Variante der Freiraummessung mit Antennen an.

- Um die Praxistauglichkeit der Untersuchungsergebnisse zu maximieren, wurden hinsichtlich der Art und Weise, in der die hier durchgeführten Materialuntersuchungen vorgenommen wurden, bewusst Abstriche gemacht. So wurde auf aufwändige Transmissionsmessungen mit zwei Antennen – einer Antenne vor und einer nach der zu untersuchenden Wandstruktur – verzichtet. Stattdessen wurden Reflexionsmessungen mit einer Antenne sowie Quasitransmissionsmessungen mit einer Sende- und einer Empfangsantenne vor dem Untersuchungsobjekt durchgeführt.
- Die Auflösung in Entfernungsrichtung (also in Sicht- und in Blindrichtung der Antennen) ist abhängig von der gewählten Bandbreite. Um eine möglichst hohe Auflösung zu erzielen, wurden Wandstrukturen mit Steghornantennen im Frequenzbereich zwischen 0,8 GHz und 18 GHz untersucht, was einer Auflösung in Entfernungsrichtung von 0,8 cm entspricht.
- Mit dem realen Aperturverfahren lassen sich Entfernungsprofile in bekannter Weise aufnehmen. Die Querauflösung nimmt hierbei jedoch ab, je weiter sich die Antenne vom Ziel entfernt. Radare, welche mit synthetischer Apertur arbeiten, bieten hingegen bei unterschiedlichen Abständen eine gleichbleibende und in Querrichtung zum Zielobjekt sogar verbesserte Auflösung.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der Arbeit darin, die radarbasierten Messverfahren der realen und der synthetischen Apertur mit einer geeigneten Rückrechnungsmethode zu kombinieren, um höchstauflösende Radarbilder einer unbekannteren Wandstruktur zu generieren. Zwar gibt es die oben genannten Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet, doch diese beschäftigen sich mit einzelnen, spezifischen Themen aus dem Bereich der Wandanalyse. In dieser Arbeit wird hingegen erstmalig eine Gesamtmethodik zur Extrahierung aller relevanten Wandparameter vorgestellt. In dieser Methodik werden die aufgenommenen Rohdaten mit Hilfe von bekannten Filtervarianten und der SAR-Prozessierung verarbeitet, um eine

erste Analyse der Wandstruktur durchzuführen. Im anschließenden Prozess werden die Modellparameter extrahiert, die den Suchraum für die Berechnung der Schichtdicken und der Schichtpermittivitäten festlegen. Nachdem die Schichtdicken und Schichtpermittivitäten durch eine vorge-schlagene Minimierungsfunktion berechnet wurden, können diese im anschließenden dritten Schritt zur Fokussierung der SAR-Bilder integriert werden. Als Endresultat entsteht somit ein hochaufgelöstes Radarbild der zu untersuchenden Wand, welches alle relevanten Details der tatsächlichen Wand in möglichst exakter Weise wiedergibt.

Zur Erreichung dieser Zielstellung werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Lösungsvorschläge für die folgenden Problemstellungen erarbeitet:

- Wie kann ein Formalismus entwickelt werden, mit dem auf der Basis von Freiraumreflexionsmessungen an einer unbekanntem Wand auf die Schichtdicken und Schichtmaterialien geschlossen werden kann?
- Wie kann die SAR-Prozessierung im Nahfeld gewinnbringend zur Auflösung komplexer Strukturen innerhalb von Wänden beitragen?
- Kann die SAR-Prozessierung zusätzliche Informationen liefern, um hinreichend genau auf die Anzahl der verbauten Schichten in der Wandstruktur zu schließen?
- Wie wirken sich falsche Annahmen über Schichtpermittivitäten auf die Fokussierung von SAR-Bildern aus?
- Ist eine SAR-Prozessierung notwendig bzw. gewinnbringend?

Die diesbezüglichen Forschungsarbeiten wurden neben der theoretischen Analyse an Laboraufbauten vorgenommen und mit Untersuchungen an realen Gebäudestrukturen ergänzt.

1.5 Gliederung der Arbeit

In **Kapitel 2** wird die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in einem Mehrschichtsystem beschrieben. Die für die Rückrechnung

benötigten mathematischen Formeln zur Berechnung des Reflexionsfaktors eines Mehrschichtsystems werden hergeleitet und ihre Anwendung anhand einzelner Simulationen demonstriert. **Kapitel 3** beschäftigt sich mit der Frage, wie mit Hilfe der in Kapitel 2 hergeleiteten mathematischen Grundlagen die Schichtdicken und die Schichtpermittivitäten einer unbekanntes Wand ermittelt werden können. Hierbei werden reale, ein- und mehrschichtige Wandaufbauten mit homogenen Baustoffen untersucht. Zudem wird eine Methode vorgestellt, mit der auf die unbekanntes Parameter der Wandaufbauten geschlossen werden kann. In **Kapitel 4** werden zunächst die Unterschiede zwischen einem Radar mit realer und synthetischer Apertur (SAR) beschrieben. Um mit dem SAR-Prinzip hochaufgelöste Bilder im Nahbereich zu erzeugen, bedarf es einer entsprechenden Methode zur Fokussierung der aufgenommenen Daten, welche ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt wird. In **Kapitel 5** werden erste Radarbilddaufnahmen von bekannten Steinstrukturen vorgestellt, wobei die im vorherigen Kapitel erarbeitete Methode zur Fokussierung von SAR-Bildern eingesetzt wird. Mit den gewonnenen Informationen aus den Radarbilddaufnahmen aus Kapitel 5 wird im anschließenden **Kapitel 6** die Gesamtmethodik zur vollständigen Charakterisierung einer unbekanntes, mehrschichtigen Wandstruktur vorgestellt. Anhand eines Laboraufbaus werden die Durchführung und die Ergebnisse des Einsatzes dieser Methodik demonstriert. In **Kapitel 7** werden erste Radarbilddaufnahmen realer Gebäudestrukturen vorgestellt. Untersucht wurden drei Testwände mit unterschiedlichen Wandstrukturen: Neben einer Stahlbetonwand in Sandwichbauweise wurden eine Wand mit einem Gitterlochziegelstein sowie eine weitere Wand mit einem Lochbimsstein als Hauptkern aufgebaut. Alle Wände verfügten über eine verputzte Außen- und Innenwand, und zwischen den Steinen kam Mörtel zum Einsatz. Zusätzlich befanden sich in den Wänden an unterschiedlichen Orten platzierte Fremdkörper wie etwa Kupferrohrleitungen, Kupferkabel oder Holzbalken. Anschließend wird die in Kapitel 6 erarbeitete Gesamtmethodik zur Gebäudestrukturcharakterisierung auf ein echtes Wohnhaus mit dreischichtigem Wandaufbau angewendet. Diese Untersuchung stellt den Abschluss des Kapitels dar. In **Kapitel 8** werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

2 Elektromagnetische Wellenausbreitung in Mehrschichtsystemen

Die in dieser Arbeit untersuchte Interaktion elektromagnetischer Wellen mit Materie beschränkt sich auf Festkörpermateriale, also auf Materie, die sich im festen Aggregatzustand befindet. Die in Festkörpern vorhandenen Ladungsteilchen wechselwirken hierbei mit den elektromagnetischen Kräften der eindringenden Welle. Zur Vorbereitung auf die später folgenden, komplexeren Betrachtungen mehrschichtiger Systeme erscheint es zweckmäßig, zunächst die sich im Material abspielenden physikalischen Prozesse für ein homogenes, einschichtiges Material zu beschreiben. Im Anschluss hieran werden die nötigen Formalismen zur Berechnung der Transmission, Reflexion und Absorption in Mehrschichtsystemen hergeleitet.

2.1 Polarisation von Dielektrika

Festkörper lassen sich in Abhängigkeit von ihrer Leitfähigkeit σ [$1/\Omega\text{m}$] in drei Klassen einteilen: Isolatoren, Halbleiter und Leiter (Metalle) [Pue12]. In Isolatoren bzw. Dielektrika gibt es deutlich weniger bewegliche und damit frei verschiebbare Ladungen als in Metallen, dafür aber mehr ortsfeste Teilchen, die eine Ladung besitzen. Zu den ortsfesten Ladungsteilchen zählen u.a. Ionen, Atomkerne und die Elektronen in den Orbitalen der Atome.

Wirkt ein äußeres elektrisches Feld auf die ortsfesten Ladungsteilchen in einem Dielektrikum, kommt es zu einer Verschiebung der Ladungsschwerpunkte der Ladungsteilchen. In entgegengesetzter Feldrichtung zum äußeren Feld werden elektrische Dipolmomente induziert und ausgerichtet. Im Gegensatz dazu gibt es Dielektrika mit bereits vorhandenen permanenten elektrischen Dipolmomenten, welche nicht erst durch das

äußere Feld erzeugt werden. Diese permanenten Dipolmomente richten sich ebenfalls in entgegengesetzter Richtung zum äußeren elektrischen Feld aus. Die Induktion und Ausrichtung von Dipolen in Isolatoren wird als Polarisation bezeichnet. Abbildung 2.1 zeigt hierzu eine schematische Darstellung.

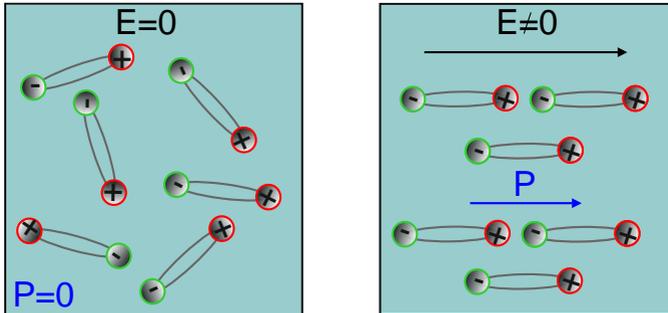


Abb. 2.1: Schematische Darstellung zur Polarisation in einem Dielektrikum. Existiert kein Feld E ist die Verteilung der Dipole innerhalb eines Materials ungerichtet. Sobald ein Feld $E > 0$ existiert, werden die Dipole ausgerichtet und es entsteht eine Polarisation P .

Die Polarisation \vec{P} eines Dielektrikums mit dem Volumen V besitzt die Einheit $[\text{As}/\text{m}^2]$ und ist definiert durch [Dem18]

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \frac{\sum_{v=1}^{N_D} \vec{p}_v(\vec{r}, t)}{V}. \quad (2.1)$$

Hierbei entspricht \vec{r} dem Ortsvektor, t der Zeit, V dem Volumen und N_D der Anzahl der im Volumen enthaltenen Dipolmomente \vec{p}_v . In der Literatur werden vier wesentliche Polarisationsmechanismen unterschieden: die elektronische Polarisation, die ionische Polarisation, die Orientierungspolarisation und die Raumladungspolarisation. Weitere Informationen zu den einzelnen Polarisationsarten und deren genauen Berechnungen finden sich in [Fin15] [Kop07] [Sti09] [Bit72].

Jede Polarisationsart liefert einen Beitrag zur elektrischen Suszeptibilität χ_e eines Dielektrikums. Existieren in einem Dielektrikum alle vier genannten Polarisationsarten zur selben Zeit, lässt sich die elektrische

Suszeptibilität durch eine Addition aller Polarisationsmechanismen wie folgt berechnen [Tif07]:

$$\chi_e = \chi_{el} + \chi_{ion} + \chi_{or} + \chi_{RL}. \quad (2.2)$$

Hier entspricht χ_{el} der Suszeptibilität der elektronischen Polarisation, χ_{ion} der Suszeptibilität der ionischen Polarisation, χ_{or} der Suszeptibilität der Orientierungspolarisation und χ_{RL} der Suszeptibilität der Raumladungspolarisation.

Da es im Vakuum keine induzierten Dipole gibt, setzt sich die Flussdichte folgendermaßen zusammen:

$$\vec{D}_0(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \vec{E}_0(\vec{r}, t). \quad (2.3)$$

Hierbei entspricht \vec{E}_0 dem elektrischen Feld und ϵ_0 [As/Vm] der dielektrischen Feldkonstante. In einem Medium, in dem sich Dipole ausrichten lassen, wird die Flussdichte im Vakuum aus Gleichung 2.3 durch die Polarisation \vec{P} ergänzt, somit ergibt sich

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \vec{E}_0(\vec{r}, t) + \vec{P}(\vec{r}, t). \quad (2.4)$$

Wird das Dielektrikum als lineares System betrachtet, kann die Polarisation \vec{P} auch als Faltungsintegral aus allen vergangenen Werten des elektrischen Feldes mit der Suszeptibilität angegeben werden [Tre20]

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^t \chi_e(\vec{r}, t - t') \vec{E}_0(\vec{r}, t') dt'. \quad (2.5)$$

Die Integrationsvariablen sind auf $t' \in [-\infty, t]$ beschränkt, so dass keine Werte aus der Zukunft integriert werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Antwort des linearen Systems auf eine Anregung kausal bleibt. Gleichung 2.4 kann durch Einsetzen von Gleichung 2.5 und durch Umformen von $\epsilon_0 \vec{E}_0(\vec{r}, t)$ auch als [Tre20]

$$\begin{aligned}\vec{D}(\vec{r}, t) &= \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \delta(\vec{r}, t - t') \vec{E}_0(\vec{r}, t') dt' \\ &\quad + \varepsilon_0 \int_{-\infty}^t \chi_e(\vec{r}, t - t') \vec{E}_0(\vec{r}, t') dt'\end{aligned}\quad (2.6)$$

dargestellt werden. Mit $\tau = t - t'$, $\varepsilon_{r,z}(\vec{r}, \tau) = \varepsilon_0 (\delta(\vec{r}, \tau) + \chi_e(\vec{r}, \tau))$ und $dt' = -d\tau$ wird Gleichung 2.6 zu [Tre20]

$$\begin{aligned}\vec{D}(\vec{r}, t) &= -\varepsilon_0 \int_{\infty}^0 \varepsilon_{r,z}(\vec{r}, \tau) \vec{E}_0(\vec{r}, t - \tau) d\tau \\ &= \varepsilon_0 \int_0^{\infty} \varepsilon_{r,z}(\vec{r}, \tau) \vec{E}_0(\vec{r}, t - \tau) d\tau.\end{aligned}\quad (2.7)$$

Die Variable $\varepsilon_{r,z}$ entspricht hier der relativen Permittivität im Zeitbereich. Durch eine Fourier-Transformation von Gleichung 2.7 gelangt man in den Frequenzbereich und erhält schließlich die Flussdichte in einem Dielektrikum durch eine Multiplikation der relativen Permittivität $\tilde{\varepsilon}_r(\vec{r}, \omega)$ mit dem elektrischen Feld $\vec{E}_0(\vec{r}, \omega)$

$$\vec{D}(\vec{r}, \omega) = \varepsilon_0 \tilde{\varepsilon}_r(\vec{r}, \omega) \vec{E}_0(\vec{r}, \omega).\quad (2.7)$$

Hierbei entspricht $\tilde{\varepsilon}_r$ [Tre20]

$$\tilde{\varepsilon}_r(\vec{r}, \omega) = \int_0^{\infty} \varepsilon_{r,z}(\vec{r}, \tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.\quad (2.8)$$

In einem Wechselfeld verläuft die Polarisation im Dielektrikum aufgrund der Trägheit der polarisierten Teilchen und der Wechselwirkung mit den umgebenden Teilchen zeitlich versetzt zum angelegten elektrischen Feld [Det12]. Diese Tatsache spiegelt sich darin wider, dass die relative Permittivität im Allgemeinen als komplexe Zahl $\tilde{\varepsilon}_r$ beschrieben wird:

$$\underline{\tilde{\epsilon}}_r(\vec{r}, \omega) = \underline{\tilde{\epsilon}}_r'(\vec{r}, \omega) - j\underline{\tilde{\epsilon}}_r''(\vec{r}, \omega). \quad (2.9)$$

In Gleichung 2.9 beschreibt $\underline{\tilde{\epsilon}}_r'$ den Realteil und $\underline{\tilde{\epsilon}}_r''$ den Imaginärteil der relativen Permittivität. Zur besseren Lesbarkeit wird für den weiteren Verlauf der Arbeit die Frequenz- und Ortsabhängigkeit der relativen Permittivität nur implizit angenommen. Gleichung 2.9 wird damit zu

$$\underline{\tilde{\epsilon}}_r = \underline{\tilde{\epsilon}}_r' - j\underline{\tilde{\epsilon}}_r''. \quad (2.10)$$

Die Kausalität fordert, dass $\epsilon_{r,z}(t) = 0$ für $t < 0$ gilt. Um diese Kausalitätsbedingung nicht zu verletzen, muss für passive Medien und einen gewählten Zeitanatz von $e^{j\omega t}$ $\Im\{\underline{\tilde{\epsilon}}_r\} < 0$ gelten [Cul12]. Die Real- und Imaginärteile der relativen Permittivität sind über die Kramer-Kronig-Relation miteinander verknüpft, welche beschreibt, wie sich der Realteil aus dem Imaginärteil und umgekehrt der Imaginärteil aus dem Realteil berechnen lässt [Kro18]. Die relative Permittivität wirkt als Veränderungsvariable, die angibt, wie sich die elektrische Flussdichte durch das Vorhandensein eines Dielektrikums im Vergleich zum Vakuum ändert. Für magnetische Stoffe kann analog verfahren werden. Das magnetische Pendant zur relativen Permittivität $\underline{\tilde{\epsilon}}_r$ ist die relative Permeabilität $\underline{\tilde{\mu}}_r$, welche die Magnetisierung $\vec{M}(\vec{r}, \omega)$ eines Materials bestimmt, das sich in einem äußeren Magnetfeld $\vec{H}(\vec{r}, \omega)$ befindet. Da Bauwerkstoffe in der Regel nicht magnetisierbar sind, gilt für die in dieser Arbeit verwendeten Stoffe eine relative Permeabilität von eins.

2.2 Elektromagnetische Wellen im Dielektrikum

Eine der herausragenden Leistungen Maxwells war es, das Ampèresche Gesetz durch den Verschiebungsstrom zu ergänzen, so dass der Stromkreis bei Wechselfeldanregung durch einen Kondensator vollständig geschlossen werden kann. Auf Basis des so erweiterten Ampèreschen Durchflutungsgesetzes und des Faradayschen Induktionsgesetzes lassen

sich durch geschicktes Einsetzen und Umformen die Telegraphengleichungen der Elektrodynamik für homogene und zeitinvariante Medien herleiten. Für das elektrische Feld gilt im Zeitbereich [Ula14]:

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, t) = \mu_{r,z} \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \mu_{r,z} \mu_0 \epsilon_{r,z} \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t^2}. \quad (2.11)$$

Das elektrische Feld $\vec{E}(\vec{r}, t)$ sei nun gegeben durch die inverse Fourier-Transformation aus dem Spektrum des elektrischen Feldes $\vec{E}(\vec{r}, \omega)$ [Kar14]

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}(\vec{r}, \omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.12)$$

Setzt man Gleichung 2.8 und Gleichung 2.12 in Gleichung 2.11 ein, ergibt sich die Telegraphengleichung im Frequenzbereich mit $\mu_{r,z} \rightsquigarrow \underline{\mu}_r(\vec{r}, \omega) = 1$ zu:

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, \omega) = j\omega \mu_0 \sigma \vec{E}(\vec{r}, \omega) - \mu_0 \underline{\epsilon}_r \epsilon_0 \omega^2 \vec{E}(\vec{r}, \omega). \quad (2.13)$$

Der Term mit $j\omega\mu\sigma$ beschreibt den Leitungsstrom und der Teil mit dem Term $\mu\epsilon\omega^2$ den Verschiebungsstrom. Gleichung 2.13 lässt sich auch als

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, \omega) + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \left(\underline{\epsilon}_r - \frac{\sigma}{j\omega \epsilon_0} \right) \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.14)$$

bzw.

$$\Delta \vec{E}(\vec{r}, \omega) + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \underline{\epsilon}_r \vec{E}(\vec{r}, \omega) = 0 \quad (2.15)$$

darstellen. Die relative Permittivität $\underline{\varepsilon}_r$ beschreibt hier wie auch $\tilde{\varepsilon}_r$ die komplexe Permittivität, beinhaltet hier aber zusätzlich die Leitfähigkeit σ . Die relative Permittivität $\underline{\varepsilon}_r$ ergibt sich somit zu [Tif07]

$$\underline{\varepsilon}_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \varepsilon_r'(1 - j \tan \delta). \quad (2.16)$$

Hier gilt für den Realteil der relativen Permittivität

$$\varepsilon_r' = \tilde{\varepsilon}_r' \quad (2.17)$$

und für den Imaginärteil

$$\varepsilon_r'' = \tilde{\varepsilon}_r'' + \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}. \quad (2.18)$$

Der Verlustfaktor [Kar14] $\tan \delta$ setzt sich aus dem Quotienten des Imaginär- und Realteils aus Gleichung 2.17 und 2.18 zusammen und ergibt sich zu

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}. \quad (2.19)$$

Eine monochromatische ebene Welle, die sich in positive z -Richtung ausbreitet und deren elektrischer Feldvektor in x -Richtung und deren magnetischer Feldvektor senkrecht dazu in y -Richtung zeigt [Ula14] besitzt die Form [Ebe22]

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_{0x} \cos(\omega_0 t - kz - \phi_N). \quad (2.20)$$

Hier bezeichnet ω_0 die feste Kreisfrequenz und ϕ_N die Nullphase [Ebe22]. In komplexer Schreibweise kann Gleichung 2.20 auch umgeformt werden und man erhält

$$\vec{E}(z, t) = \Re \left\{ \vec{E}_0 e^{j(\omega_0 t - kz)} \right\}. \quad (2.21)$$

Hierbei bezeichnet $\vec{E}_0 = (E_{0x} e^{j\phi_{N,x}}, 0, 0)^T$ den Phasor [Ebe22] der elektrischen Feldstärke, der die Nullphase enthält. Durch Einsetzen von Gleichung 2.21 in die Fourier-Transformation des elektrischen Feldes $\vec{E}(\vec{r}, t)$ [Rot01]

$$\vec{E}(\vec{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}(\vec{r}, t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.22)$$

erhält man die Fourier-Transformation von $\vec{E}_x(z, \omega)$ [Rot01] mit

$$\begin{aligned} \vec{E}_x(z, \omega) = \Re \{ E_{0x} e^{-jkz} \} \pi \left(e^{j\phi_{N,x}} \delta(\omega - \omega_0) \right. \\ \left. + e^{-j\phi_{N,x}} \delta(\omega + \omega_0) \right). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Setzt man nun Gleichung 2.23 in Gleichung 2.15 ein und wählt $\sigma = 0$, da in dieser Arbeit nicht von freien Ladungsträgern innerhalb der untersuchten Medien ausgegangen wird, ergibt sich

$$-k^2 = \gamma^2 = -\varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \varepsilon'_r + j(\varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \varepsilon''_r). \quad (2.24)$$

Wobei für die Fortpflanzungskonstante γ

$$\gamma = jk \quad (2.25)$$

gilt. Die Fortpflanzungskonstante γ besteht aus einem Dämpfungsteil α und einer Phasenkonstante β und ergibt sich zu [Zwi13]

$$\gamma = \alpha + j\beta. \quad (2.26)$$

Setzt man nun Gleichung 2.26 in Gleichung 2.24 ein, stellt ein Gleichungssystem auf und führt eine Fallunterscheidung durch [Ula14], erhält man schließlich die Ausdrücke für die Dämpfungs- und die Phasenkonstante einer ebenen Welle [Ula14]:

$$\alpha = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + (\tan \delta)^2}}, \quad (2.27)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r'}{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + (\tan \delta)^2}}. \quad (2.28)$$

Die Dämpfung einer Welle wird also neben der Frequenz und der Vakuumlichtgeschwindigkeit vom Realteil der relativen Permittivität und dem Verlustfaktor bzw. aus dem Quotienten von ϵ_r''/ϵ_r' bestimmt.

Der Kehrwert der Dämpfungskonstante α gibt die Distanz des Ausbreitungswegs im Medium an, bei dem der Betrag der Welle auf das $1/e$ - bzw. 0,37-fache abgefallen ist und wird als Eindringtiefe bezeichnet [Ula14]. Abbildung 2.2 zeigt hierzu exemplarisch den Verlauf der Eindringtiefe für unterschiedliche Wertepaare von ϵ_r' und ϵ_r'' bei einer Frequenz von 4,5 GHz. Eine Vergrößerung des Realteils ϵ_r' bei konstantem Imaginärteil ϵ_r'' führt zu einer Vergrößerung der Eindringtiefe. Eine Vergrößerung des Imaginärteils ϵ_r'' bei konstantem Realteil führt hingegen zu einer Erhöhung der Dämpfungskonstante und damit zu einer verringerten Eindringtiefe ins Ausbreitungsmaterial.

Wenn der imaginäre Anteil der relativen Permittivität eines Stoffes A größer ist als der imaginäre Anteil eines Stoffes B, führt dies nicht zwangsläufig zu einer höheren Dämpfung von Stoff A gegenüber Stoff B.

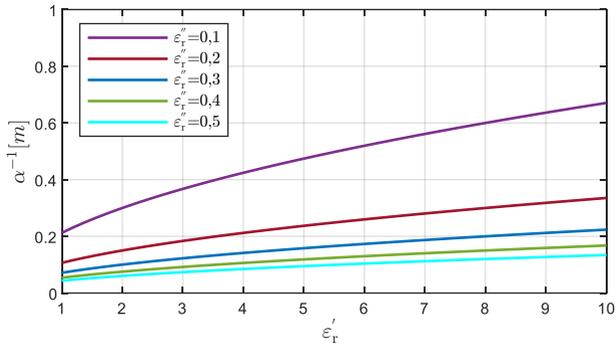


Abb. 2.2: Verlauf der Eindringtiefe α^{-1} für unterschiedliche Real- und Imaginärteile der relativen Permittivität.

So ist die Dämpfung für die komplexen Permittivitäten von $2,5-j0,3$, $4,5-j0,2$ und $6,8-j0,1$ gleich groß; obwohl unterschiedliche Real- und Imaginärteile bzw. Verlustfaktor vorliegen, besitzen alle drei Permittivitäten eine Eindringtiefe von 0,11 m. Für die Eindringtiefe muss neben der Frequenz und der Vakuumlichtgeschwindigkeit immer das Paar aus Real- und Imaginärteil der relativen Permittivität oder Realteil der relativen Permittivität und Verlustfaktor betrachtet werden.

Die Anwesenheit eines äußeren elektrischen Feldes führt also zur Polarisation der im Dielektrikum vorhandenen Ladungsträger. Das Maß zur Charakterisierung der Polarisation stellt die relative Permittivität dar, welche mit ihrem Real- und Imaginärteil wiederum die Dämpfungs- und Phasenkonstante und damit die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle im Dielektrikum entscheidend beeinflusst.

Damit ist die Grundlage für die Analyse der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in mehrschichtigen Dielektrika geschaffen, welche im nächsten Unterkapitel behandelt wird.

2.3 Wellenausbreitung in Mehrschichtsystemen

Trifft eine elektromagnetische Welle auf eine Grenzschicht zweier Materialien mit unterschiedlicher Permittivität, kommt es zur Aufspaltung der Welle in einen Reflexions- und einen Transmissionsanteil. In einem Mehrschichtsystem lassen sich die entsprechenden Felder an jeder Grenzschicht berechnen und später über eine Matrix mathematisch miteinander verbinden. Mit dieser Matrix lassen sich der Reflexions- und der Transmissionsfaktor des gesamten Mehrschichtsystems berechnen. Dieses Verfahren entspricht der aus der Leitungstheorie der Hochfrequenztechnik bekannten Impedanztransformation, bei der ein Abschlusswiderstand Z_V über mehrere Leitungen mit den jeweiligen Wellenwiderständen $Z_{0,n}$, den Fortpflanzungskonstanten γ_n und Längen l_n in einen Gesamtwiderstand Z_{ges} transformiert wird, mit dem sich der Reflexionsfaktor der Gesamtschaltung berechnen lässt.

Beispielsweise wird der Abschlusswiderstand Z_V durch eine verlustlose Leitung mit $\gamma = j\beta$, Z_0 und der Länge l in den Gesamtwiderstand Z_{in} über Gleichung 2.29 transformiert [Zwi13]:

$$Z_{\text{in}} = Z_0 \frac{\frac{Z_V}{Z_0} + j \tan(\beta l)}{1 + j \frac{Z_V}{Z_0} \tan(\beta l)}. \quad (2.29)$$

Der Wellenwiderstand Z_0 lässt sich hierbei durch [Zwi13]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}. \quad (2.30)$$

berechnen, wobei L' [Ωsm^{-1}] für den Induktivitätsbelag und C' [$\text{s}\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$] für den Kapazitätsbelag steht. In Analogie zum Verfahren der Impedanztransformation in der Leitungstheorie kann jede Schicht des Mehrschichtsystems als eine Leitung betrachtet werden, die durch ihren Feldwellenwiderstand η , ihre Ausbreitungskonstante γ und Länge l_n eindeutig

beschrieben wird. Abbildung 2.3 stellt eine schematische Zeichnung dieses Sachverhalts dar.

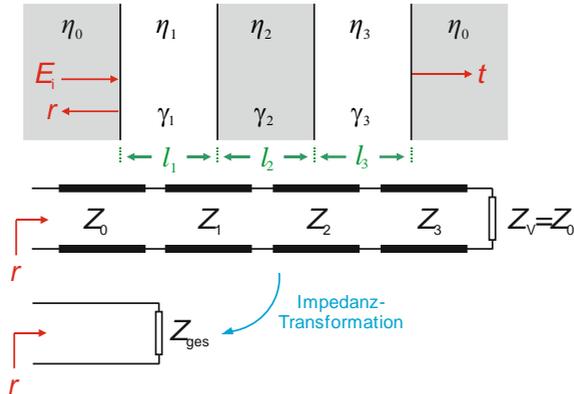


Abb. 2.3: Wandstrukturen können als Mehrschichtsystem betrachtet werden. Beispielhaft ist hier ein im Freiraum (η_0) eingebettetes Dreischichtsystem (η_1, η_2, η_3) dargestellt. Jede Schicht des Dreischichtsystems entspricht einer Impedanz, die durch ihren Feldwellenwiderstand, der Fortpflanzungskonstanten γ und der Länge l_n definiert wird [Bre60].

Der Feldwellenwiderstand tritt hier als Analogon zum Wellenwiderstand Z_0 einer Leitung auf und wird im Allgemeinen wie folgt berechnet [Zac10]:

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu_r\mu_0}{\sigma + j\omega\epsilon_r\epsilon_0}}. \quad (2.31)$$

Für den weiteren Verlauf wird $\underline{\tilde{\mu}}_r(\vec{r}, \omega) = \mu_r = 1$ und $\sigma = 0$ angenommen. Mit diesen Annahmen und dem Feldwellenwiderstand des Vakuums $\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \Omega$ vereinfacht sich Gleichung 2.31 zu:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_r \varepsilon_0}} \approx \frac{377}{\sqrt{\varepsilon_r}} \Omega \approx \frac{377}{n} \Omega. \quad (2.32)$$

Hier entspricht die Variable n der Brechzahl mit $n = \sqrt{\varepsilon_r}$. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird eine horizontal polarisierte ebene Welle betrachtet, die unter dem Einfallswinkel $\theta_0 = 0^\circ$ in z -Richtung auf ein Mehrschichtsystem trifft [Ula81]:

$$E_y = E_{y,0} e^{i(\omega t - k_0 n_m z)}. \quad (2.33)$$

Die Ausdehnung der Schichten wird in x - und y -Richtung als unendlich angenommen, sodass Kanten- und Beugungsfälle hier nicht berücksichtigt werden müssen. k_0 entspricht der Kreiswellenzahl im Vakuum, ω der Kreisfrequenz und n_m der Brechzahl der jeweiligen Schicht (m), wobei hier für den das Mehrschichtsystem umgebenden Freiraum $n_0 = 1$ gilt. Abbildung 2.4 zeigt schematisch den Aufbau eines Mehrschichtsystems der Länge N .

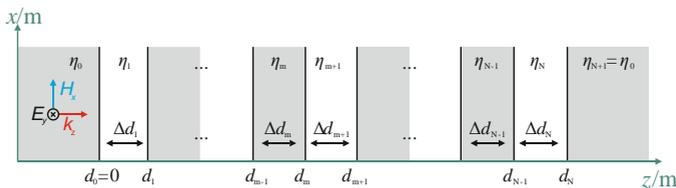


Abb. 2.4: Eine horizontal polarisierte einfallende Welle E_y trifft auf ein Mehrschichtsystem der Länge N . Das Mehrschichtsystem wird jeweils links und rechts von einer Schicht Vakuum umschlossen.

Für den Fall einer vertikal polarisiert einfallenden Welle ins Mehrschichtsystem erhält man die Lösung für den Reflexions- und Transmissionsfaktor, indem man das Dualitätsprinzip anwendet und $E_y, H_x, \mu, \varepsilon$ durch $H_y, -E_x, \varepsilon, \mu$ ersetzt [Ula81]. Die sich im Mehrschichtsystem ausbreitende ebene Welle erfährt an allen Grenzflächen Reflexionen und Transmissionen, welche wiederum an den umliegenden Grenzflächen

transmittiert und reflektiert werden. Um nicht jede Mehrfachreflexion in den Schichten einzeln berechnen zu müssen, können innerhalb jeder Schicht (m) alle reflektierenden Anteile der Welle zu einer kombinierten Rückwärtswelle E_m^- sowie alle transmittierenden Anteile in eine kombinierte Vorwärtswelle E_m^+ zusammengefasst werden [Ula14] [Sal20]. Eine Veranschaulichung hierzu ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

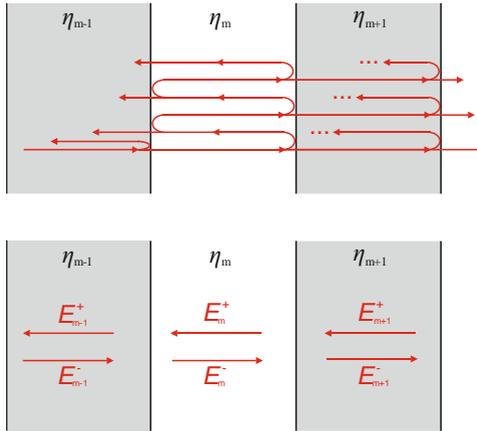


Abb. 2.5: Die Mehrfachreflexionen innerhalb einer Schicht werden zu Gesamtvorwärtswellen E_m^+ und Gesamtrückwärtswellen E_m^- zusammengefasst.

Für das gesamte elektrische Feld in einer Schicht (m) ergibt sich [Ula81]:

$$E_{y,m} = E_{y,m}^+ + E_{y,m}^- \quad (2.34)$$

Für das magnetische Feld gilt entsprechend [Tek78]:

$$H_{x,m} = H_{x,m}^+ + H_{x,m}^- \quad (2.35)$$

Setzt man den ebenen Wellenansatz aus Gleichung 2.33 in Gleichung 2.34 ein, lassen sich die elektrischen Felder innerhalb der Schicht aus den Vorwärts- und Rückwärtswellen wie folgt berechnen:

$$E_{y,m} = (C_m e^{-jk_0 n_m z} + D_m e^{jk_0 n_m z}) e^{j\omega t}. \quad (2.36)$$

C_m und D_m entsprechen den Amplituden der Gesamtsumme der Mehrfachreflexionen für die Vorwärtswellen (C_m) und Rückwärtswellen (D_m). Analog ergeben sich für die magnetische Feldstärke an den Grenzschichten mit Gleichung 2.35 und $H_{x,m} = (j/\omega\mu_0)(\partial E_{y,m}/\partial z)$ [Poc88]:

$$H_{x,m} = \frac{n_m}{c_0\mu_0} (C_m e^{-jk_0 n_m z} - D_m e^{jk_0 n_m z}) e^{j\omega t}. \quad (2.37)$$

Da die tangentialen Feldkomponenten der E - und H -Felder an den Grenzflächen die Stetigkeitsbedingung [Hhe01] [Kli18] nicht verletzen dürfen, muss für jede Grenzfläche folgende Bedingung erfüllt sein:

$$E_{y,m} \Big|_{z=d_m} = E_{y,m+1} \Big|_{z=d_m}. \quad (2.38)$$

Dies gilt analog auch für die Feldkomponenten der magnetischen Feldstärke:

$$H_{x,m} \Big|_{z=d_m} = H_{x,m+1} \Big|_{z=d_m}. \quad (2.39)$$

Aus den Stetigkeitsbedingungen an den einzelnen Grenzflächen des Mehrschichtsystems lassen sich die komplexen Amplitudenwerte der Vorwärts- und Rückwärtswellen berechnen. Für eine Grenzschicht bei $z = d_m$ ergibt sich durch Einsetzen von Gleichung 2.36 in Gleichung 2.38:

$$\begin{aligned} C_m e^{-jk_0 n_m d_m} + D_m e^{jk_0 n_m d_m} \\ = C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_m} + D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_m}, \end{aligned} \quad (2.40)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 2.37 in Gleichung 2.39 ergibt sich:

$$\begin{aligned} (C_m e^{-jk_0 n_m d_m} - D_m e^{jk_0 n_m d_m}) \\ = \frac{n_{m+1}}{n_m} (C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_m} - D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_m}). \end{aligned} \quad (2.41)$$

Ziel ist es, die komplexen Amplituden der Vorwärts- und Rückwärtswellen in Schicht (m) in alleiniger Abhängigkeit von den Anteilen der Wellen der nachfolgenden Schicht (m + 1) zu berechnen, sodass C_m bzw. D_m also nur noch von C_{m+1} und D_{m+1} abhängen. Sobald dieser Schritt erfolgt ist, kann man Gleichung 2.40 nach $C_m e^{-jk_0 n_m d_m}$ sowie nach $D_m e^{jk_0 n_m d_m}$ umformen und in Gleichung 2.41 einsetzen. Man erhält:

$$\begin{aligned} C_m e^{-jk_0 n_m d_m} = \frac{n_m + n_{m+1}}{2n_m} \left(C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_m} \right. \\ \left. + \frac{n_m - n_{m+1}}{n_m + n_{m+1}} D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_m} \right) \end{aligned} \quad (2.42)$$

und

$$\begin{aligned} D_m e^{jk_0 n_m d_m} = \frac{n_m + n_{m+1}}{2n_m} \left(\frac{n_m - n_{m+1}}{n_m + n_{m+1}} C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_m} \right. \\ \left. + D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_m} \right). \end{aligned} \quad (2.43)$$

Mit der Einführung der Fresnelschen Formeln für die Reflexion $R_{m(m+1)}$ und Transmission $T_{m(m+1)}$ an einer Grenzschicht zwischen zwei Medien, mit den Brechzahlen n_m und n_{m+1} und einem Einfallswinkel von $\theta_0 = 0^\circ$ [Ngu16] [Trä12] [Poc88]

$$R_{m(m+1)} = \frac{\eta_{m+1} - \eta_m}{\eta_m + \eta_{m+1}} = \frac{n_m - n_{m+1}}{n_m + n_{m+1}} = -R_{(m+1)m} \quad (2.44)$$

und

$$T_{m(m+1)} = \frac{2\eta_{m+1}}{\eta_m + \eta_{m+1}} = \frac{2n_m}{n_m + n_{m+1}} \quad (2.45)$$

lassen sich die Gleichungen 2.42 und 2.43 weiter vereinfachen zu:

$$C_m e^{-jk_0 n_m d_m} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} (C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_m} + R_{m(m+1)} D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_m}) \quad (2.46)$$

und

$$D_m e^{jk_0 n_m d_m} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} (R_{m(m+1)} C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_m} + D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_m}). \quad (2.47)$$

$R_{m(m+1)}$ und $T_{m(m+1)}$ stehen für den Reflexions- bzw. Transmissionsfaktor für den Einfall der Welle von Schicht (m) in Schicht (m + 1). $R_{(m+1)m}$ bzw. $T_{(m+1)m}$ beschreiben den umgekehrten Fall einer Welle, die sich von Schicht (m + 1) in Schicht (m) ausbreitet.

Multipliziert man die Gleichungen 2.46 und 2.47 mit $e^{jk_0 n_{m+1} d_{m+1}}$ und $e^{-jk_0 n_{m+1} d_{m+1}}$ und führt $\Delta d_{m+1} = d_{m+1} - d_m$ ein, können sie zu

$$C_m e^{-jk_0 n_m d_m} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} (C_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} e^{-jk_0 n_{m+1} d_{m+1}} + R_{m(m+1)} D_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} e^{jk_0 n_{m+1} d_{m+1}}) \quad (2.48)$$

und

$$D_m e^{jk_0 n_m d_m} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} \left(R_{m(m+1)} C_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} e^{-jk_0 n_{m+1} d_{m+1}} + D_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} e^{jk_0 n_{m+1} d_{m+1}} \right) \quad (2.49)$$

umgeformt und in Matrixschreibweise zusammengefasst werden:

$$\begin{pmatrix} C_m e^{-jk_0 n_m d_m} \\ D_m e^{jk_0 n_m d_m} \end{pmatrix} = B_{m(m+1)} \begin{pmatrix} C_{m+1} e^{-jk_0 n_{m+1} d_{m+1}} \\ D_{m+1} e^{jk_0 n_{m+1} d_{m+1}} \end{pmatrix}. \quad (2.50)$$

Hier gilt für $B_{m(m+1)}$:

$$B_{m(m+1)} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} \begin{bmatrix} e^{jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} & R_{m(m+1)} e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} \\ R_{m(m+1)} e^{jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} & e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} \end{bmatrix}. \quad (2.51)$$

$B_{m(m+1)}$ wird im Englischen als „backward propagation matrix“ [Ula81] bezeichnet, weil die Feldamplituden der transmittierten und der reflektierten Wellen der einfallenden Schicht (m) durch die Feldamplituden der nachfolgenden Schicht ($m+1$) ausgedrückt werden. Gleichung 2.51 kann auch als

$$B_{m(m+1)} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} \begin{bmatrix} 1 & R_{m(m+1)} \\ R_{m(m+1)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} & 0 \\ 0 & e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

geschrieben werden, wobei $\Phi_{m+1} = k_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}$ gilt. In Gleichung 2.50 werden die von der Grenzschicht d_{m+1} transmittierten und reflektierten Wellenanteile zunächst über die Länge Δd_{m+1} der Schicht ($m+1$) an die Grenzschicht bei d_m transferiert. Dieser propagierende Teil der Vorwärts- und Rückwärtswellen in der Schicht ($m+1$) wird durch die zweite Matrix

$$L_{(m+1)} = \begin{bmatrix} e^{j\phi_{m+1}} & 0 \\ 0 & e^{-j\phi_{m+1}} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

in Gleichung 2.52 beschrieben. Um nun die Feldanteile der propagierten Vorwärts- und Rückwärtswellen aus der Schicht $(m + 1)$ mit denen aus der Schicht (m) in Verbindung zu bringen, müssen erneut die Stetigkeitsbedingungen an der Grenzschicht d_m erfüllt werden. Diese Bedingung wird durch die erste Matrix in Gleichung 2.52 beschrieben:

$$G_{m(m+1)} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} \begin{bmatrix} 1 & R_{m(m+1)} \\ R_{m(m+1)} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.54)$$

Dieser Teil der Gleichung stellt die Stetigkeitsbedingungen zweier angrenzender Schichten durch die Transmissions- und Reflexionsfaktoren dar [Poc88] und soll im Folgenden genauer erläutert werden. Dazu werden die in Abbildung 2.6 dargestellten Vorwärts- und Rückwärtswellen an der Grenzschicht bei d_m betrachtet, welche formeltechnisch durch die Gleichungen 2.55 und 2.56 miteinander verknüpft sind:

$$E_{m+1,A}^+ = T_{m(m+1)} E_{m,B}^+ + R_{(m+1)m} E_{m+1,A}^- \quad (2.55)$$

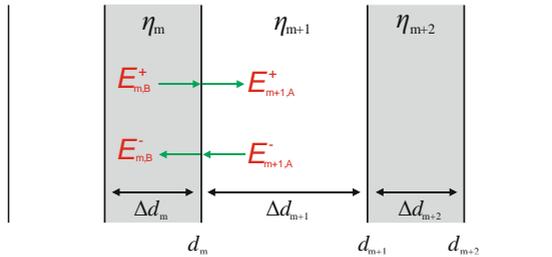


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der sich ausbreitenden Wellenanteile an einer Grenzschicht d_m .

Hierbei sind $E_{m+1,A}^+$ und $E_{m+1,A}^-$ die Vorwärts- und Rückwärtswellen an der Schichtgrenze $z = d_m$, aus der Schicht $(m + 1)$ kommend. $E_{m,B}^+$ und $E_{m,B}^-$ hingegen sind die Vorwärts- und Rückwärtswellen an der Schichtgrenze $z = d_m$, aus der Schicht (m) kommend:

$$E_{m,B}^- = T_{(m+1)m} E_{m+1,A}^- + R_{m(m+1)} E_{m,B}^+ \quad (2.56)$$

Durch Umstellen von Gleichung 2.55 nach $E_{m,B}^+$ ergibt sich

$$E_{m,B}^+ = \frac{1}{T_{(m+1)m}} E_{m+1,A}^+ - \frac{R_{(m+1)m}}{T_{(m+1)m}} E_{m+1,A}^- \quad (2.57)$$

Die Vorwärtswelle aus Schicht (m) hängt somit nur noch von den Vorwärts- und Rückwärtswellen der nachfolgenden Schicht $(m + 1)$ ab. Setzt man Gleichung 2.57 in Gleichung 2.56 ein, ergibt sich für $E_{m,B}^-$:

$$E_{m,B}^- = \frac{R_{m(m+1)}}{T_{(m+1)m}} E_{m+1,A}^+ + \frac{T_{(m+1)m} T_{m(m+1)} - R_{(m+1)m} R_{m(m+1)}}{T_{(m+1)m}} E_{m+1,A}^- \quad (2.58)$$

Setzt man die Fresnelschen Gleichungen 2.44 und 2.45 in den Ausdruck $T_{(m+1)m} T_{m(m+1)} - R_{(m+1)m} R_{m(m+1)}$ aus Gleichung 2.58 ein, zeigt sich, dass $T_{(m+1)m} T_{m(m+1)} - R_{(m+1)m} R_{m(m+1)} = 1$ gilt. Gleichung 2.58 wird damit zu:

$$E_{m,B}^- = \frac{R_{m(m+1)}}{T_{(m+1)m}} E_{m+1,A}^+ + \frac{1}{T_{(m+1)m}} E_{m+1,A}^- \quad (2.59)$$

Damit können die Vorwärtswellen $E_{m,B}^+$ und die Rückwärtswellen $E_{m,B}^-$ der Schicht (m) aus den Gleichungen 2.57 und 2.58 in Matrixschreibweise wie folgt ausgedrückt werden:

$$\begin{pmatrix} E_{m,B}^+ \\ E_{m,B}^- \end{pmatrix} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} \begin{bmatrix} 1 & -R_{m(m+1)m} \\ R_{m(m+1)} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{m+1,A}^+ \\ E_{m+1,A}^- \end{pmatrix}. \quad (2.60)$$

Da $R_{m(m+1)} = -R_{(m+1)m}$ gilt, wird Gleichung 2.60 zu:

$$\begin{pmatrix} E_{m,B}^+ \\ E_{m,B}^- \end{pmatrix} = \frac{1}{T_{m(m+1)}} \begin{bmatrix} 1 & R_{m(m+1)} \\ R_{m(m+1)} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{m+1,A}^+ \\ E_{m+1,A}^- \end{pmatrix}. \quad (2.61)$$

Die Vorwärts- und Rückwärtswellen an zwei angrenzenden Schichten sind somit über die in Gleichung 2.54 beschriebene Matrix $G_{m(m+1)}$ definiert. Setzt man Gleichung 2.54 in Gleichung 2.60 ein, ergibt sich:

$$\begin{pmatrix} E_{m,B}^+ \\ E_{m,B}^- \end{pmatrix} = G_{m(m+1)} \begin{pmatrix} E_{m+1,A}^+ \\ E_{m+1,A}^- \end{pmatrix}. \quad (2.62)$$

Auf dieser Basis kann nun der Ausbreitungsweg innerhalb einer Schicht Δd_{m+1} erklärt werden, der durch die Matrix $L_{(m+1)}$ dargestellt wird. Abbildung 2.7 zeigt die in Schicht (m + 1) vorhandenen Vorwärts- und Rückwärtswellen an den Stellen d_m und d_{m+1} . Diese sind durch die Gleichungen 2.63 und 2.64 folgendermaßen miteinander verknüpft:

$$E_{m+1,B}^+ = E_{m+1,A}^+ e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} \quad (2.63)$$

Hier beschreibt $E_{m+1,B}^+$ die Vorwärtswelle und $E_{m+1,B}^-$ in Gleichung 2.66 die Rückwärtswelle an der Stelle $z = d_{m+1}$.

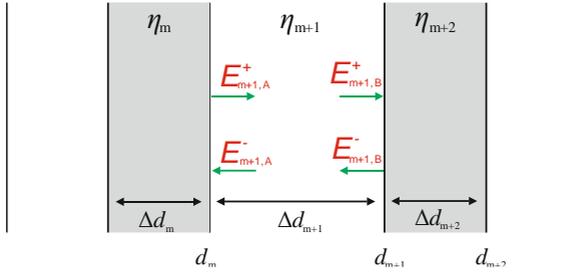


Abb. 2.7: Schematische Darstellung der sich ausbreitenden Wellenanteile an einer Grenzschicht d_m .

$$E_{m+1,A}^- = E_{m+1,B}^- e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} \quad (2.64)$$

Löst man Gleichung 2.63 nach $E_{m+1,A}^+$ auf, kann man $E_{m+1,A}^+$ und $E_{m+1,A}^-$ in Matrixschreibweise wie folgt zusammenfassen:

$$\begin{pmatrix} E_{m+1,A}^+ \\ E_{m+1,A}^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e^{jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} & 0 \\ 0 & e^{-jk_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{m+1,B}^+ \\ E_{m+1,B}^- \end{pmatrix} \quad (2.65)$$

Durch Einsetzen von Gleichung 2.53 in Gleichung 2.51 und unter Berücksichtigung der Gleichung $\Phi_{m+1} = k_0 n_{m+1} \Delta d_{m+1}$ wird Gleichung 2.65 zu

$$\begin{pmatrix} E_{m+1,A}^+ \\ E_{m+1,A}^- \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\Phi_{m+1}} & 0 \\ 0 & e^{-j\Phi_{m+1}} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{m+1,B}^+ \\ E_{m+1,B}^- \end{pmatrix} = L_{m+1} \begin{pmatrix} E_{m+1,B}^+ \\ E_{m+1,B}^- \end{pmatrix}. \quad (2.66)$$

Setzt man Gleichung 2.66 in Gleichung 2.62 ein, erhält man

$$\begin{pmatrix} E_{m,B}^+ \\ E_{m,B}^- \end{pmatrix} = G_{m(m+1)} \begin{pmatrix} E_{m+1,A}^+ \\ E_{m+1,A}^- \end{pmatrix} = G_{m(m+1)} L_{m+1} \begin{pmatrix} E_{m+1,B}^+ \\ E_{m+1,B}^- \end{pmatrix} \quad (2.67)$$

und damit den in Gleichung 2.52 dargestellten Zusammenhang zwischen der „backward propagation matrix“ $B_{m(m+1)}$, der Stetigkeitsbedingungs-
matrix $G_{m(m+1)}$ und der Ausbreitungsmatrix L_{m+1} , welche schematisch
in der Abbildung 2.8 dargestellt ist.

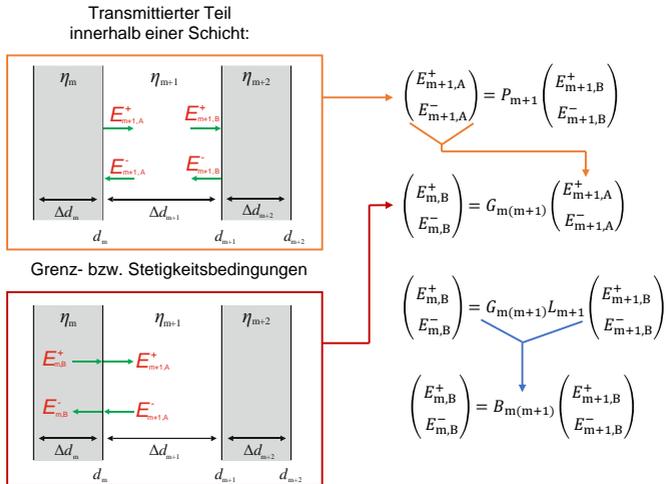


Abb. 2.8: Schematische Darstellung der sich ausbreitenden Wellenanteile innerhalb eines Mediums $(m + 1)$ an einer Grenzschicht d_m sowie die sich daraus ergebende „backward propagation matrix“ $B_{m(m+1)}$.

Die vorwärts- und rückwärtslaufenden Wellenanteile an der Schicht-
grenze d_m mit den Wellenanteilen an der Schichtgrenze d_{m+1} können
also mittels $B_{m(m+1)}$ ausgedrückt werden. Das erlaubt es, ein N -schichti-
ges Mehrschichtsystem durch eine Verkettung mehrerer Matrizen darzu-
stellen, wobei die Verkettung der einzelnen Matrizen in eine Gesamtmat-
rix B_{ges} zusammengefasst werden kann:

$$\begin{aligned}
 B_{\text{ges}} &= \left(\prod_{m=0}^N G_{m(m+1)} L_{m+1} \right) G_{N(N+1)} \\
 &= \left(\prod_{m=0}^N B_{m(m+1)} \right) G_{N(N+1)}.
 \end{aligned} \tag{2.68}$$

Hierbei beschreiben die Matrix B_{01} die Grenzschicht- und Wellenausbreitungsbedingungen der ersten Schicht in den Freiraum am Anfang des Mehrschichtsystems sowie die Matrix $B_{(N-1)N}$ die Grenzschicht- und Wellenausbreitungsbedingungen von der N -ten in die $(N-1)$ -te Schicht. $G_{N(N+1)}$ stellt dabei die Grenzschichtbedingung am Ende des Mehrschichtsystems bei $z = d_N$ dar und verknüpft somit den Freiraum ($(N+1)$ -te Schicht) mit der letzten Schicht N .

Die aus dem Freiraum an der Stelle $z = d_0$ am Anfang einfallenden und reflektierten Wellenanteile C_0 und D_0 sowie die in den Freiraum an der Stelle $z = d_N$ am Ende des Mehrschichtsystems transmittierenden Anteile C_{N+1} mit B_{ges} und $n_0 = n_{N+1} = 1$ folgendermaßen dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} C_0 e^{-jk_0 d_0} \\ D_0 e^{jk_0 d_0} \end{pmatrix} = B_{\text{ges}} \begin{pmatrix} C_{N+1} e^{-jk_0 d_N} \\ D_{N+1} e^{jk_0 d_N} \end{pmatrix}. \tag{2.69}$$

Da am Ende des Mehrschichtsystems keine Reflexion aus dem Unendlichen zu erwarten ist, wird $D_{N+1} = 0$ gesetzt. Dies ergibt in Verbindung mit $d_0 = 0$ m

$$\begin{pmatrix} C_0 \\ D_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{\text{ges},11} & B_{\text{ges},12} \\ B_{\text{ges},21} & B_{\text{ges},22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{N+1} e^{-jk_0 d_N} \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{2.70}$$

Indem man die Summe der rücklaufenden Anteile der Wellen D_0 durch den Anteil der am Anfang in das Mehrschichtsystem einfallenden Welle C_0 teilt [Poc88], erhält man den Reflexionsfaktor r des Gesamtsystems:

$$r = \frac{C_0}{A_0}. \quad (2.71)$$

Die Gesamttransmission t des Mehrschichtsystems wird berechnet, indem man den transmittierten Anteil $C_{N+1}e^{-jk_0d_N}$ durch die einfallende Welle teilt [Poc88]:

$$t = \frac{C_{N+1}e^{-jk_0d_N}}{A_0}. \quad (2.72)$$

Löst man Gleichung 2.70 nach A_0 sowie C_0 auf und setzt sie in Gleichung 2.71 ein, ergibt sich für den Gesamreflexionsfaktor [Poc88]:

$$r = \frac{B_{\text{ges},21}}{B_{\text{ges},11}}. \quad (2.73)$$

Dem gleichen Schema folgend, ergibt sich für den Gesamttransmissionsfaktor [Poc88]:

$$t = \frac{1}{B_{\text{ges},11}}. \quad (2.74)$$

Diese Gleichung beschreibt den Fall für die horizontale Polarisation. Für den hier beschriebenen Fall einer einfallenden Welle mit dem Einfallswinkel von $\theta_0 = 0^\circ$ ergibt sich für die vertikale Polarisation die „backward propagation matrix“ aus Gleichung 2.51. Dies gilt aber nur für den Sonderfall eines Einfallswinkels von $\theta_0 = 0^\circ$. Anhand der Gleichungen 2.70 bis 2.72 lässt sich auf den Reflexions- und Transmissionsfaktor zurückrechnen.

Eine ausführliche Betrachtung der Herleitung des Reflexions- und Transmissionsfaktors eines Mehrschichtsystems und für Einfallswinkel $\theta_0 > 0^\circ$, findet man in [Poc88] [Ula81] [Ula14].

2.4 Simulation eines Mehrschichtsystems

Mit den in Unterkapitel 2.3 angeführten Formeln lassen sich nun Simulationsrechnungen für unterschiedliche Wandstrukturen erstellen. Den einfachsten möglichen Fall stellt ein einschichtiges Medium mit endlicher Länge d dar. Im nachfolgenden Beispiel werden die Ergebnisse einer Simulation eines Zweischichtsystems vorgestellt und Probleme diskutiert, die eine Rückrechnung auf die Schichtdicken und Permittivitäten erschweren können.

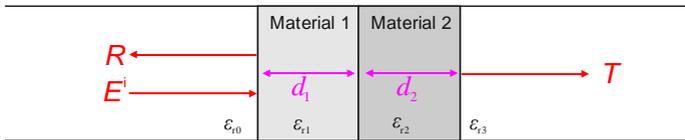


Abb. 2.9: Schematische Darstellung eines Zweischichtsystems.

Für die erste Schicht mit ϵ_{r1} wird Schaumglas und für die zweite Schicht mit ϵ_{r2} wird Beton gewählt. Zur Berechnung des Reflexionsfaktors werden zunächst die in Tabelle 2.1 angesetzten Parameter in die Simulation implementiert; anschließend wird für jeden der 1601 einzelnen Frequenzpunkte der Reflexionsfaktor $r(f)$ als Funktion der Frequenz und für einen Einfallswinkel von $\theta_0 = 0^\circ$ berechnet.

In Abbildung 2.10 kann der Betrag des Reflexionsfaktors für das Zweischichtsystem abgelesen werden. Zusätzlich sind die Reflexionsfaktoren für den einschichtigen Fall von Beton und Schaumglas abgebildet; die Dicken der einschichtigen Baustoffe in der Simulation betragen 20 cm. Die auftretenden Maxima und Minima im Kurvenverlauf aller Reflexionsfaktoren über der Frequenz sind auf die multiplen Reflexionen zurückzuführen, die an den Grenzschichten zweier Materialien entstehen.

Die einzelnen Reflexionen der Wellen an den Grenzschichtübergängen überlagern sich sowohl am Sende- als auch am Empfangsort zu konstruktiven und destruktiven Interferenzen und erzeugen somit einen Kurvenverlauf, der eindeutig einer Kombination aus der gewählten Anzahl an Schichten, den Permittivitäten und den Schichtdicken in einem bestimmten Frequenzbereich zuordenbar ist. Klar erkennbar ist die mit zunehmender Frequenz ansteigende Dämpfung der Reflexionssignale. Im Fall der Betonschicht zeigt sich dieser Effekt besonders deutlich. Bei hohen Frequenzen gelangen keine Teile der einfallenden Welle mehr an das Ende der Betonschicht, die zurück zum Empfangsort reflektiert werden und dort zur Gesamtreflexion beitragen könnten.

Tab. 2.1: Simulationsparameter für ein Zweischichtsystem bestehend aus Schaumglas und Beton. Die Quelle für ϵ_{r1} und ϵ_{r2} ist [Gue99].

	Variable	Wert
	$\mu_{r,0}; \mu_{r,1}; \mu_{r,2}; \mu_{r,3}$	1
Luft	$\epsilon_{r0}, \epsilon_{r3}$	1
Schaumglas	ϵ_{r1}	1,2-j0,1
Beton	ϵ_{r2}	6,4-j0,45
Schaumglas	d_1	20,0 cm
Beton	d_2	20,0 cm
	$f_{\text{Start}}; f_{\text{Stopp}}$	1 GHz; 8 GHz

Im Frequenzbereich ab 4 GHz sind entsprechend keine Maxima und Minima im Kurvenverlauf des Beton-Reflexionsfaktors mehr zu erkennen. Für diesen Frequenzbereich kann die Betonschicht daher als unendlich lange Schicht betrachtet werden, sodass das Simulationsergebnis in diesem Bereich nur noch vom fresnelschen Reflexionsfaktor abhängt (siehe Gleichung 2.20), der sich hier auf einen Wert um -7,25 dB einpendelt und dann konstant bleibt.

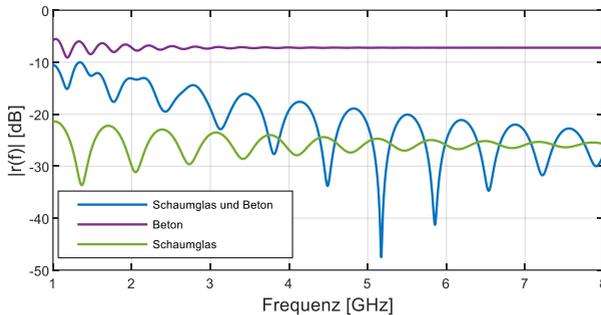


Abb. 2.10: Betrag des normierten Reflexionsfaktors für das Zweischichtsystem aus Abbildung 2.9 sowie für die Einzelschichten aus Beton und Schaumglas gleicher Dicken.

Beim Einschichtsystem Schaumglas tritt der umgekehrte Fall ein: Die Maxima und Minima im Verlauf der Reflexionskurve treten bei Frequenzen größer als 4 GHz auf. In der Summe werden aufgrund des kleineren fresnelschen Reflexionsfaktors zwischen Luft und Schaumglas aber weniger Anteile der einfallenden Welle an den Grenzschichten reflektiert. Der wesentlich größere Teil der eingestrahlenen Leistung wird durch die Schaumglasschicht transmittiert. Der Reflexionsfaktor des Zweischichtsystems stellt eine Kombination aus beiden Reflexionsfaktoren dar, wobei die Betonschicht wie ein starker Reflektor hinter der Schaumglasschicht wirkt. Die Wellenanteile, die normalerweise durch das Schaumglas transmittiert würden, werden nun zum Sender zurückreflektiert. Dies zeigt sich in der – im Vergleich zur Kurve der einzelnen Schaumglasschicht – deutlichen Anhebung des Kurvenverlaufs für den Reflexionsfaktor des Zweischichtsystems um bis zu 10 dB.

Mit der Betragsinformation und der Phase des Reflexionsfaktors kann durch eine inverse Fourier-Transformation vom Frequenzbereich in den Zeitbereich gerechnet werden. Das Ergebnis dieser Transformation für das Zweischichtsystem Schaumglas–Beton ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Um ein Entfernungsprofil zu erhalten, wird die Zeitachse durch das Multiplizieren mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum in den Entfernungsbereich umgerechnet, wobei die im Diagramm eingezeichneten Abstände (d_1 , d_2) der einzelnen Maxima nicht die tatsächlichen Schichtdicken repräsentieren. Hierfür müsste jede einzelne Schicht mit der jeweils

zugehörigen Permittivität normiert werden. Der Wert für die erste Stoßstelle bei 0,0 m ist um 6 dB kleiner als der für die nachfolgende Stoßstelle bei 0,22 m in Entfernungsrichtung, die den Übergang Schaumglas–Beton darstellt. Hier macht sich bemerkbar, dass der Betrag des Reflexionsfaktors beim Übergang Luft–Schaumglas mit $R_{01} = 0,26$ deutlich kleiner ist als der Betrag des Reflexionsfaktors Schaumglas–Beton mit $R_{12} = 0,58$. Ein erheblich größerer Teil der eingestrahlten Leistung wird erst an der zweiten Grenzschicht bei 0,22 m reflektiert und führt dort zum Maximum im Entfernungsprofil.

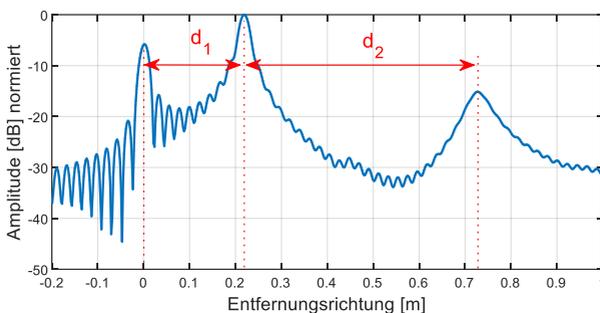


Abb. 2.11: Inverse Fourier-Transformation (IFFT) des Reflexionsfaktors eines Zweischichtsystems bestehend aus Schaumglas und Beton.

Die theoretische Auflösung in Entfernungsrichtung (Blickrichtung der Antenne), bei der der Wert des Leistungsdiagramms – bezogen auf das Hauptmaximum – auf die Hälfte (-3 dB) abgefallen ist, ergibt sich nach [Sko01] zu

$$\Delta r_{\text{Entf}} = 0,89 \frac{c_0}{2B \Re\{\sqrt{\epsilon_r}\}}. \quad (2.75)$$

Die Entfernungsauflösung ist von der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 , der Bandbreite B und dem Realteil der Wurzel der Permittivität ϵ_r abhängig. In [Kin99] und weiteren Quellen wird der Vorfaktor 0,89 meist vernachlässigt, sodass die Entfernungsauflösung nur näherungsweise durch

$$\Delta r_{\text{Entf}} \approx \frac{c_0}{2B\Re\{\sqrt{\epsilon_r}\}} \quad (2.76)$$

berechnet wird. Bezüglich Gleichung 2.76 spricht man auch von der 3,9dB-Bandbreite [Ang20]. Da sich die Wellen innerhalb eines Mediums mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegen, können Punktziele innerhalb des Mediums, die theoretisch durch die vom Radarsystem vorgegebene Bandbreite nicht voneinander trennbar darzustellen sind, voneinander getrennt aufgelöst werden. Dies ist, wie Gleichung 2.61 nahelegt, durch die Permittivität des Schichtmediums bedingt. Bei einer Bandbreite von 7 GHz ergibt sich nach Gleichung 2.75 eine Entfernungsauflösung von 1,9 cm im Vakuum. Für das Schaumglas ergibt sich eine Entfernungsauflösung von 1,7 cm und für den Beton eine Entfernungsauflösung von 0,75 cm.

Durch die Multiplikation des Reflexionsfaktors im Frequenzbereich mit einer Fensterfunktion können die Nebenkeulen der einzelnen Maxima in Abbildung 2.11 reduziert werden. Abbildung 2.12 zeigt die Entfernungsprofile, die durch eine Multiplikation des Reflexionsfaktors mit dem von-Hann- und Blackman-Fenster entstehen.

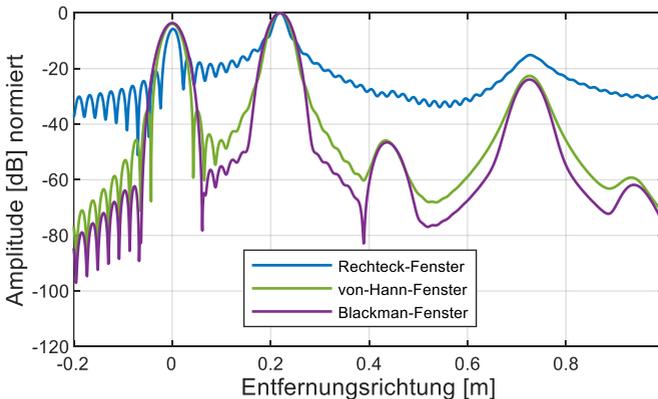


Abb. 2.12: Inverse Fourier-Transformation (IFFT) des ungefilterten sowie des gefilterten Reflexionsfaktors eines Zweischichtsystems bestehend aus Schaumglas und Beton.

Im Falle einer Multiplikation mit einem Rechteckfenster ergibt sich eine Nebenkeulendämpfung von $-13,3\text{dB}$ zwischen dem Hauptmaximum und der ersten Nebenkeule des Hauptmaximums. Die ersten Nebenkeulenniveaus beim von-Hann- sowie beim Blackman-Fenster liegen bei $-31,5\text{dB}$ bzw. bei -58dB . Wie man in Abbildung 2.12 durch die Verbreiterung der Halbwertsbreite am ersten Maximum, welche den Übergang Freiraum–Schaumglas darstellt, deutlich erkennt, wird die Reduktion der Nebenkeulen durch eine Verbreiterung der Hauptkeule erkauft. Diese lässt sich analytisch quantifizieren, indem man in Gleichung 2.75 den Vorfaktor an die Filtermethode anpasst. Gleichung 2.75 wird dann zu:

$$\Delta r_{\text{Entf}} = v_{3\text{dB}} \frac{c_0}{2B\Re\{\sqrt{\epsilon_r}\}} \quad (2.77)$$

Hierbei ist $v_{3\text{dB}}$ der fensterfunktionsspezifische Vorfaktor. Im Fall des von-Hann-Fensters beträgt der Vorfaktor 1,2 und für das Blackman-Fenster 1,68 [Har78]. Bei einer Bandbreite von 7 GHz ergibt sich gemäß Gleichung 2.63 eine Entfernungsauflösung von 2,6 cm im Vakuum für die von-Hann-Fensterung sowie von 3,6 cm für die Blackman-Fensterung. Für das Schaumglas ergibt sich für die von-Hann-Fensterung eine Entfernungsauflösung von 2,4 cm, für Beton eine Entfernungsauflösung von 1,1 cm. Für die von Blackman-Fensterung beträgt die Entfernungsauflösung im Schaumglas 3,3 cm und im Beton 1,4 cm. Die Filterung des Reflexionsfaktors zeigt an der Stelle 0,44 m sehr deutliche Effekte. Dort ist ein weiterer Peak zu erkennen, der eine Mehrfachreflexion des Schaumglases darstellt. Im ungefilterten Entfernungsprofil geht diese Reflexion in den Nebenkeulen der Reflexionen des Wandanfangs sowie den Übergängen Schaumglas–Beton und Beton–Freiraum unter. Im Anhang [A2] wird noch einmal gesondert auf das von-Hann- und das Blackman-Fenster eingegangen.

Ohne A-priori-Wissen ist es nicht möglich, das Entfernungsprofil eines unbekanntes Mehrschichtmediums eindeutig zu interpretieren und daraus die interessierenden Parameter Schichtanzahl, Schichtdicke und Permittivität zu ermitteln. Im Falle der durchgeführten Simulationen von Ein- und Zweischichtsystemen spricht man auch von Vorwärtsrechnung. Hierbei sind alle Parameter, die nötig sind, um den Reflexionsparameter zu berechnen, bereits gegeben und bestimmen in jedem Fall eine eindeutige

Lösung. Im umgekehrten Fall ist der Reflexionsfaktor bzw. das Entfernungsprofil einer unbekanntem Wandstruktur gegeben, der Aufbau der Wand hingegen ist unbekannt. Wie dieses inverse Problem gelöst werden kann – und damit, wie auf die für die Praxis interessierenden Wandparameter zurückgerechnet werden kann –, soll im nachfolgenden Kapitel geklärt werden.

2.5 Zusammenfassung

Trifft eine elektromagnetische Welle auf einen Festkörper eines Dielektrikums, kommt es innerhalb des Körpervolumens zu einem Polarisationsprozess. Hierbei werden die ortsfesten Ladungsträger so verschoben, dass Dipolmomente entstehen, die sich entlang des äußeren elektrischen Feldes ausrichten. Die relative Permittivität gibt dabei an, wie gut sich ein Dielektrikum polarisieren lässt. Die Polarisation verläuft zeitlich versetzt zum äußeren Feld. Aufgrund dieser Trägheit muss die relative Permittivität anhand eines Real- und eines Imaginärteils beschrieben werden. Der Real- und der Imaginärteil beeinflussen neben der Frequenz entscheidend die Dämpfungs- und die Phasenkonstante der Fortpflanzungskonstante der elektromagnetischen Welle im Medium. Sind die Schichtdicken und die Permittivitäten eines Mehrschichtsystems bekannt, kann dieses analog zu der aus der Leitungstheorie bekannten Impedanztransformation zu einem Gesamtwiderstand zusammengefasst und damit schließlich der Reflexions- und der Transmissionsfaktor des Mehrschichtsystems bestimmt werden. Dieses Vorgehen, bei dem alle determinierenden Variablen bereits bekannt sind und auf dieser Basis der Reflexionsfaktor berechnet werden kann, stellt die Vorwärtsrechnung dar. Bei der Rückrechnung hingegen geht es umgekehrt darum, von empirisch ermittelten Messwerten auf die unbekanntem Variablen Schichtdicke, Schichtpermittivität und Schichtanzahl zu schließen. Wie dieses inverse Problem gelöst werden kann, wird im folgenden Kapitel 3 gezeigt.

3 Charakterisierung von Mehrschichtsystemen

Unter Laborbedingungen bieten sich zur Ermittlung der relativen Permittivität eines einzelnen Materials unterschiedliche Messmethoden an. Bei Untersuchungen von echten Hauswänden sind die zur Verfügung stehenden Methoden jedoch begrenzt, da bei der Verwendung von Koaxial- oder Hohlleitersonden keine zerstörungsfreie Untersuchung gewährleistet werden kann. Ferner handelt es sich zumeist auch um mehrschichtige Probleme. Eine unter brauchbaren Bedingungen probate Messmethodik stellt hingegen die Freiraummessmethode dar, die berührungslose und damit zerstörungsfreie Messungen aus unterschiedlichen Entfernungen ermöglicht. Das Ziel der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen war, mit der alleinigen Methode der Reflexionsmessung auf die Parameter Schichtdicke, Schichtanzahl und Schichtpermittivität zu schließen. Die nachfolgend erläuterten Untersuchungen beschränken sich dabei auf monostatische Reflexionsmessungen unter 0° Einfallswinkel. Als Radar fungiert in dieser Messkonfiguration ein Netzwerkanalysator (NWA), mit dem der Streuparameter S_{11} (Reflexionsfaktor) der zu untersuchenden Messszene ermittelt wird. Abbildung 3.1 zeigt hierzu eine schematische Zeichnung des Messaufbaus.

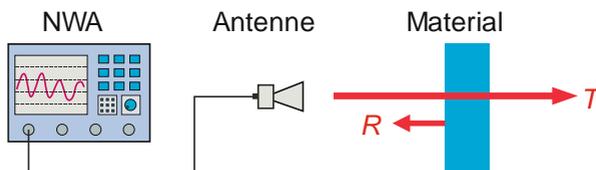


Abb. 3.1: Schematischer Aufbau einer monostatischen Freiraummessung.

Der Messaufbau besteht aus dem Netzwerkanalysator und einer breitbandigen Steghornantenne, die durch eine Koaxialleitung miteinander verbunden sind. Trotz dieses relativ schlichten Messaufbaus entstehen Messfehler, die das eigentliche Messsignal überlagern. In Unterkapitel 3.1 wird

dementsprechend auf die Kalibrierung und Fehlerkorrekturen des Messsystems eingegangen. Im darauf folgenden Unterkapitel 3.2 werden die anhand von Reflexionsmessungen untersuchten Baustoffe vorgestellt, die aus handelstypischen Materialien bestehen. Aufbauend auf diesen Reflexionsmessungen wird im folgenden Unterkapitel 3.3 die Grundmethodik zur Berechnung der Schichtdicke und der Permittivität vorgestellt. Mit dieser Methodik werden in Unterkapitel 3.4 einschichtige sowie im darauf folgenden Unterkapitel 3.5 mehrschichtige Wandaufbauten untersucht, wobei das Ziel darin besteht, auf die Wandparameter zurückzurechnen.

Da nach [Kla09] im Altbaubestand der Bundesrepublik mehrheitlich dreischichtige Aufbauten existieren, liegt der Fokus dieses Unterkapitels entsprechend auf der Untersuchung unterschiedlicher dreischichtiger Mauerwerkaufbauten mit einer Luftschicht in der Mitte, die als Trennschicht fungiert.

3.1 Messaufbau und Kalibrierung der Reflexionsmessung

Das nichtideale Verhalten der im Netzwerkanalysator (NWA) verbauten Schaltungselemente verursacht systematische Fehler, die einen enormen Einfluss auf die Messgenauigkeit des NWA haben. Auch die Koaxialleitung, welche den NWA mit der Antenne verbindet, sowie die Antenne selbst haben degradierenden Einfluss auf das Messsignal. Diese systematischen Fehler lassen sich jedoch beseitigen, indem der NWA und die Leitung anhand einer OSL-Kalibrierung (Open-Short-Load-Kalibrierung) auf das Ende der Leitung kalibriert werden [Thu98]. Eine weitere systematische Fehlerquelle liegt in den frequenzabhängigen Phasenzentren der Antenne (Dispersion), da diese zu unterschiedlichen Ausbreitungslängen der elektromagnetischen Wellen zwischen dem Radarsystem und dem Zielobjekt führen. Zusätzlich zu diesem Phasenzentrumsfehler der Antenne kommt es aufgrund der Übergänge Leitung–Speisepunkt und Antennenapertur–Freiraum zu starken Mehrfachreflexionen, die das gewünschte Messsignal ebenfalls überlagern.

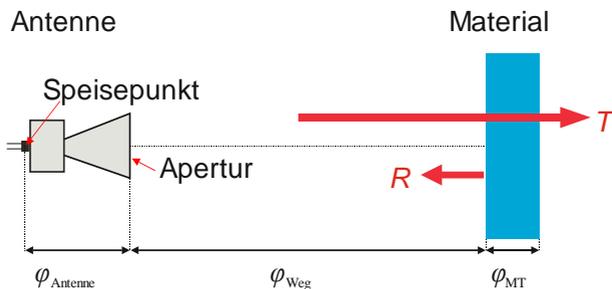


Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Ausbreitungswegs des Sendesignals.

Wenn das Radarsystem auf das Ende der Leitung (am Speisepunkt der Antenne) kalibriert wurde, ergibt sich die Gesamtphase φ_{Mess} des Messsignals $s_{\text{Mess}}(t)$ zwischen Radarsystem und Zielobjekt und wieder zurück zu

$$\varphi_{\text{Mess}} = 2 \left(\varphi_{\text{Ant,P}} + \varphi_{\text{Ant,FA}} + \varphi_{\text{Weg}} + \varphi_{\text{MT}} \right). \quad (3.1)$$

Der Phasenfehler φ_{Antenne} , der durch die Antenne verursacht wird, besteht aus $\varphi_{\text{Ant,P}}$ und $\varphi_{\text{Ant,FA}}$. Hierbei entspricht $\varphi_{\text{Ant,P}}$ dem Phasenfehler, der durch die unterschiedlichen Phasenzentren der Sendefrequenzen erzeugt wird. $\varphi_{\text{Ant,FA}}$ steht für die Anteile in der Phase, die durch die Reflexionen an den Übergängen Kabel–Speisepunkt und Antenne–Freiraum erzeugt werden. φ_{Weg} beschreibt den Ausbreitungsweg bis zum Anfang des Materials. Die Phase φ_{MT} enthält die gesuchten Materialeigenschaften des zu untersuchenden Materials.

Der Wert für den unbekanntenen Phasenterm $\varphi_{\text{Ant,P}}$ lässt sich durch eine S_{21} -Messung zweier baugleicher Antennen ermitteln. Stehen sich die beiden Antennen in einem Abstand von Δw gegenüber, so ergibt sich die Phase der S_{21} -Messung zu [Sun21]

$$\varphi_{21} = 2\varphi_{\text{Ant,P}} + \varphi_{\Delta w}. \quad (3.2)$$

Durch Subtraktion von 3.1 mit 3.2 kann $\varphi_{\text{Ant,P}}$ im Messsignal eliminiert werden. Der bekannte Phasenversatz $\varphi_{\Delta w}$, der durch den Abstand Δw der beiden Antennen vorgegeben ist, lässt sich ebenfalls durch eine einfache Subtraktion eliminieren.

Der Phasenfehler $\varphi_{\text{Ant,FA}}$ lässt sich anhand einer Reflexionsmessung mit einer Antenne in einem echofreien Raum (z.B. durch Ausrichtung der Antenne in Richtung Himmel oder durch Messung in einer echofreien Kammer) ermitteln. Die Reflexionsmessung enthält unter diesen Bedingungen nur Messanteile, die durch die Antenne verursacht werden. Subtrahiert man schließlich die Phase dieser Reflexionsmessung von φ_{Mess} , so erhält man die bereinigte Phase des Messsignals:

$$\varphi_{\text{Mess,bereinigt}} = 2 \left(\varphi_{\text{Weg}} + \varphi_{\text{MT}} \right). \quad (3.3)$$

Nachdem die Kalibrierung abgeschlossen wurde, können die eigentlichen Messungen vorgenommen werden. Diese werden im Frequenzbereich zwischen 1GHz und 8GHz sowie in einem Abstand von 20cm zum Wandaufbau durchgeführt. Der Frequenzbereich ergab sich empirisch durch Messungen mit unterschiedlichen Bandbreiten. Die Messwerte oberhalb von 8GHz sind in der Regel so stark gedämpft, dass sie bei der Ermittlung der Permittivität keinen nennenswerten Beitrag mehr liefern. Auf der anderen Seite führen Abstände zwischen Antenne und Wandanfang, welche kleiner als 20cm sind, zu Mehrfachreflexionen zwischen dem Wandanfang und der Antenne, die das gewünschte Messsignal überlagern und somit eine korrekte Rückrechnung auf die Permittivität stark erschweren oder gar unmöglich machen.

Bei einer Aperturlänge der Antenne von 25 cm befindet man sich über den gesamten Frequenzbereich hinweg im Nahfeld der Wellenausbreitung der Antenne. Die zur Ermittlung der interessierenden Parameter verwendete Rückrechnungsmethode baut auf den in Kapitel 2 vorgestellten Berechnungen zur Wellenausbreitung in Mehrschichtsystemen auf. Der hierbei verwendete Algorithmus zur Berechnung der simulierten Reflexionsfaktoren berücksichtigt nur ebene Wellenausbreitung. Die Signalstärken der reflektierten Wellen sind stärker gedämpft als man entsprechend des Fernfeldmodells, welches in Unterkapitel 2.3 beschrieben wurde, annehmen

würde. Dies soll kurz an einem Beispiel erläutert werden. In 20cm Abstand von der Sende- und Empfangsantenne ist eine Ziegelsteinwand aufgebaut. Die Dicke der Wand beträgt 11,5cm. Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf des Realteils des Reflexionsfaktors der Reflexionsmessung im Frequenzbereich von 1 GHz bis 8 GHz im Vergleich mit dem simulierten Reflexionsfaktor. Für die Simulation wurde eine Permittivität von $3,6-j0,05$ für die Ziegelsteinschicht gewählt. Deutlich erkennbar ist, dass der Algorithmus sehr viel höhere Werte liefert.

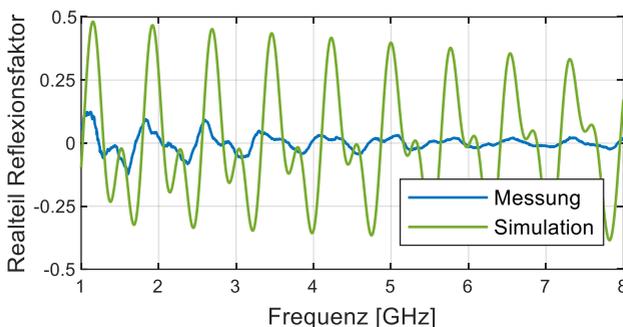


Abb. 3.3: Reflexionsfaktor für die Reflexionsmessung eines Vollziegelsteins (blaue Kurve) und der simulierte Reflexionsfaktor (grüne Kurve) mit dem aus Kapitel 2 vorgestellten Algorithmus.

Als Konsequenz muss eine Anpassung der simulierten Werte an die gemessenen Werte vorgenommen werden. Die Anpassung wurde empirisch ermittelt und wird durch den frequenzabhängigen Faktor F_{AF} repräsentiert, welcher durch die folgende Gleichung gegeben ist:

$$F_{AF}(f) = \frac{\frac{c_0}{2fd_{AW}}}{\frac{2c_0}{fb_k} + 1}. \quad (3.4)$$

In dieser Gleichung beschreibt d_{AW} den Weg von der Apertur der Antenne bis zur Wandoberfläche und b_k entspricht einem Korrekturfaktor zur Einheitenanpassung, sodass der Anpassungsfaktor F_{AF} einheitenlos bleibt:

$$b_k = 1 \text{ m.} \quad (3.5)$$

Die Angleichung an das empirisch ermittelte Messsignal erfolgt durch Multiplizieren von $F_{AF}(f)$ mit den simulierten Reflexionsfaktoren. Für das vorgestellte Beispiel des Ziegelsteins ergibt sich der in Abbildung 3.4 gezeigte Verlauf für den simulierten Reflexionsfaktor.

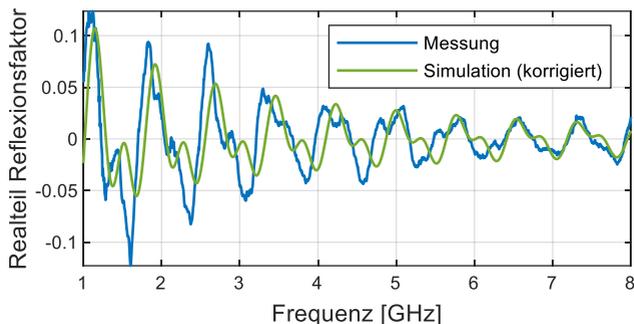


Abb. 3.4: Reflexionsfaktor für die Reflexionsmessung eines Vollziegelsteins (blaue Kurve) und der simulierte Reflexionsfaktor, welcher mit dem Anpassungsfaktor aus Gleichung 3.4 multipliziert wurde.

Deutlich erkennbar sind die gedämpften bzw. korrigierten Werte der Simulation. Diese lässt sich nun deutlich besser mit dem Messdatensatz vergleichen.

3.2 Verwendete Materialien

In den nachfolgenden Untersuchungen werden drei unterschiedliche in der Baubranche häufig verwendete homogene Steinarten untersucht: Porrenbeton, Ziegelstein und Kalksandstein. In Tabelle 3.1 sind alle für die Zwecke dieser Arbeit relevanten Parameter dieser Steinarten aufgelistet.

Tab. 3.1: Wesentliche Eigenschaften der Steinproben.

Baustein	Porenbeton	Ziegelstein	Kalksandstein
Länge x Breite x Höhe [cm]	60 x 17,50 x 19,9	24 x 11,5 x 7,1	24 x 11,5 x 7,1
Gewicht [kg]	10	2	3,9
Dichte [kg/m ³]	500	1000	2000
rel. Permittivität (Hohlleiternessung)	1,7-;0,05	3,6-;0,05	3,8-;0,13
Eindringtiefe [cm] (analytisch berechnet)	$f = 0,8$ GHz	4,4	1,5
	$f = 9,4$ GHz	0,27	0,14
	$f = 18$ GHz	0,14	0,07
Betrag des fresnelschen Reflexionsfaktor zum Vakuum (analytisch berechnet)	0,13	0,3	0,32

Um die relative Permittivität der einzelnen Steinarten zu bestimmen, wurden homogene Proben aller Steinarten auf die passende Hohlleitergröße zurechtgeschnitten und im Ofen getrocknet, um anschließend eine Hohlleitermessung durchführen zu können. Anschließend wurde mit der Nicolson-Ross-Weir-Methode (NRW-Methode) der Real- und der Imaginärteil der Permittivität berechnet [Nic70] [Wei74]. Die Methode wird in [A1] genauer vorgestellt. Gemessen wurden jeweils zwei Proben pro Steinart mit Dicken von 5 und 10 cm im Frequenzbereich zwischen 1,7 GHz und 2,6 GHz. Die in der Tabelle 3.1 angeführten Permittivitätswerte repräsentieren dabei den Mittelwert über den gemessenen Frequenzbereich. Für den Real- und Imaginärteil stellen sich Varianzen $< 1 \%$ ein. Die Ergebnisse der Berechnung der Permittivitäten der Steinartproben können in [A1] am Ende des Kapitels nachgeschlagen werden.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, besitzen der Porenbetonstein und der Ziegelstein eine geringere Dichte als der Kalksandstein. Dies äußert sich vor allem im Imaginärteil der Permittivität, welcher bei den beiden erstgenannten Steinarten mit einem Wert von 0,05 um den Faktor drei kleiner ist als der Imaginärteil der Permittivität des Kalksandsteins. Beim Porenbeton handelt es sich um einen hochporösen Baustoff, was bedeutet, dass das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen sehr viel größer ist als beim Ziegel- und beim Kalksandstein. Dies erklärt den wesentlich kleineren Realteil der relativen Permittivität des Porenbetons von 1,7 im Vergleich zum Realteil der Permittivität von 3,9 für den Kalksandstein.

Weiterhin dargestellt sind die Eindringtiefen in die verschiedenen Steinarten für unterschiedliche Frequenzen. Die Eindringtiefe gibt den Punkt an, an dem sich die Amplitude der Welle nach dem Eindringen ins Medium auf $1/e$ der Ausgangsamplitude verringert hat [Ula14]. Interessant ist, dass der Kalksandstein in etwa doppelt so stark dämpft wie der Porenbeton und dass die Eindringtiefe in den Porenbeton über alle drei berechneten Frequenzpunkte geringer ausfällt als beim Ziegelstein. So beträgt die Eindringtiefe in den Porenbeton bei einer Frequenz von 9,4 GHz 0,27 m, wohingegen die Eindringtiefe in den Ziegelstein bei 0,38 m liegt.

Zusätzlich ist in der Tabelle der Betrag des fresnelschen Reflexionsfaktors

$$|R_{01}| = \left| \frac{\eta_0 - \eta_B}{\eta_0 + \eta_B} \right| \quad (3.6)$$

für den Grenzschichtübergang zwischen Freiraum und Bausteinart angegeben. Wobei hier η_0 dem Feldwellenwiderstand des Freiraums und η_B dem Feldwellenwiderstand der Bausteinart entspricht. Der Reflexionsfaktor gilt für einen Einfallswinkel von $\theta_0 = 0$. Der Wert für den Porenbetonstein liegt hier bei 0,13, während der Ziegelstein und der Kalksandstein einen Reflexionsfaktor von jeweils 0,3 und 0,32 besitzen. Die Reflexionsfaktoren des Ziegel- und Kalksandsteins sind damit knapp dreimal so groß wie der Reflexionsfaktor für den Luft-Porenbeton-Übergang.

3.3 Rückrechnungsmethodik

Wie in Unterkapitel 3.1 beschrieben, muss das Radarsystem vor Beginn der Untersuchungen kalibriert werden, um das Auftreten systematischer Messfehler zu verhindern. Nach dieser Kalibrierung des Messsystems erfolgt eine erste Reflexionsmessung am Wandaufbau. Bei dieser Aufnahme entstehen jedoch noch immer unerwünschte Phasenanteile durch die Antenne, die das eigentliche Messsignal überlagern. Erst nach einer entsprechenden Korrektur des Messsignals, durch welche die unerwünschten Phasenfehler korrigiert werden, liegt das eigentliche Messsignal im Frequenzbereich vor, mit dem anhand einer inversen Fourier-Transformation das Entfernungsprofil des Messobjekts erzeugt werden kann. Mit diesem wiederum lässt sich eine erste Strukturanalyse vornehmen. Auf Basis der Maxima im Entfernungsprofil kann auf die Anzahl der Schichtübergänge und damit auf die Anzahl der Schichten geschlossen werden. Mit der Anzahl der Schichten und einem vorgegebenen Variationsbereich für die Permittivitäten werden nun alle kombinatorisch möglichen Reflexionsfaktoren berechnet. Anschließend wird mit Hilfe einer Minimierungsfunktion das Messsignal mit den simulierten Reflexionsfaktoren nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate verglichen. Jeder einzelnen simulierten Wandkonfiguration kann auf diese Weise ein Abstandswert zum Messsignal zugewiesen werden. Die berechneten Abstandswerte lassen sich anschließend der Größe nach ordnen und

analysieren. Mit Hilfe der Rückrechnungsanalyse lassen sich dann modellbasierte Abschätzungen zu realitätsgetreuen Werten für die Schichtdicken und Schichtpermittivitäten der verwendeten Materialien ermitteln. Diese Vorgehensweise ist auch als *brute-force*-Methode bekannt [Mue17]. Die beste Lösung (minimaler Abstandswert) wird hierbei durch Ausprobieren aller potenziellen Lösungen ermittelt [Ras17].

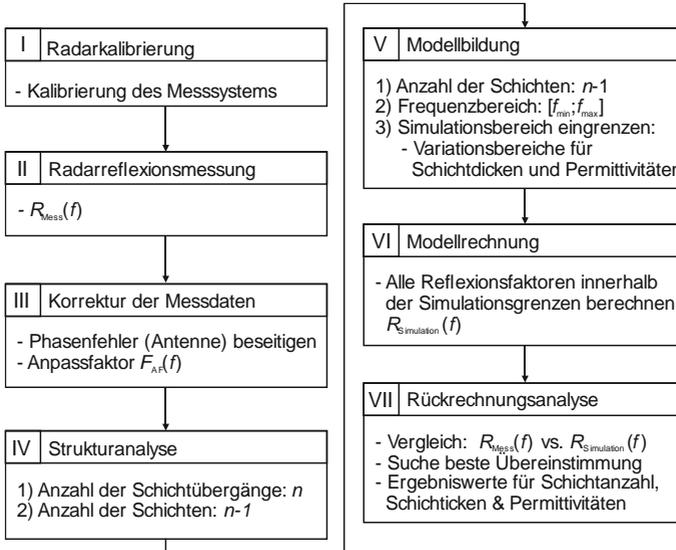


Abb. 3.5: Wesentliche Prozessschritte zur Ermittlung der Schichtdicken und der relativen Permittivitäten der in einem mehrschichtigen Wandaufbau verwendeten Schichtmaterialien.

Beton befindet sich im oberen Spektrum der relativen Permittivität mit einem Realteil von bis zu 6,4 [Gue99] und einem Imaginärteil von 0,45 [Gue99]. Daher wird die Wahl für den Variationsbereich der Permittivitäten sowie deren Schrittweiten für die erste Berechnungsiteration großzügig zwischen 1 und 10 für den Realteil und zwischen 0,05 und 0,7 für den Imaginärteil festgelegt. Die Schichtdicken ergeben sich aus den Formeln, die in Unterkapitel 3.4 vorgestellt werden. Nach dieser ersten Iteration lassen sich bereits unrealistische Werte für die Permittivität ausschließen und eine Verfeinerung der Daten hinsichtlich der Ober- und

Untergrenzen der Real- und Imaginärteile der Permittivitäten, als auch deren Schrittweiten vornehmen.

3.4 Einschichtige Wandaufbauten

Aus den drei oben genannten Bausteinarten wurden ohne Putz und Mörtel einzelne Wandsegmente aufgebaut und anschließend für jeden Wandaufbau Reflexionsmessungen durchgeführt. Die hierbei verwendeten Messparameter sind in Tabelle 3.2 aufgeführt. Der Abstand zwischen Antenne und Wandoberfläche betrug knapp 20 cm. Gemessen wurde in einem Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 8 GHz mit 1601 Frequenzpunkten und bei einer Ausgangsleistung von 0 dBm in vertikaler Polarisation. Bei einer Bandbreite von 7 GHz ergibt sich nach Gleichung 2.75 eine Entfernungsauflösung von 1,9 cm im Vakuum. Die Entfernungsauflösung im Ytong beträgt 1,4 cm, im Ziegelstein und im Kalksandstein 1 cm.

Tab. 3.2: Messparameter zur Reflexionsmessung der einzelnen Steinarten aus Tabelle 3.1.

Variable	Wert
Abstand Antenne–Wand	19 cm
$f_{\text{Start}}; f_{\text{Stopp}}$	1 GHz; 8 GHz
Frequenzpunkte	1601
Zwischenfrequenzbandbreite	1 kHz
Sendeleistung	0 dBm
Polarisation	vertikal

Nach der Kalibrierung des Messsystems und der Messsignale erfolgt die inverse Fourier-Transformation der Reflexionsfaktoren der einzelnen Wandaufbauten. Die inversen Fouriertransformierten für alle drei Steinarten sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

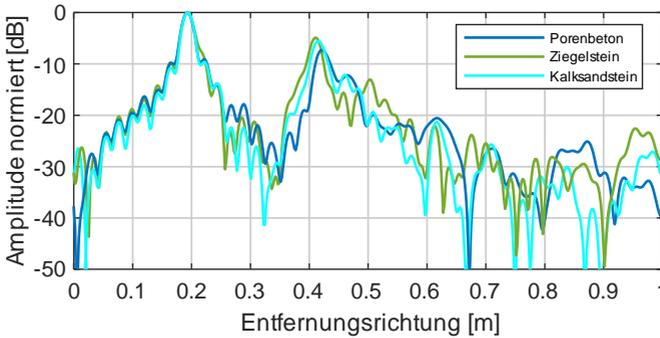


Abb. 3.6: Inverse Fourier-Transformation der Ergebnisse der Reflexionsmessungen an den drei einschichtigen Steinwänden. Die Entfernungsrichtung ist auf die Vakuumlichtgeschwindigkeit normiert.

Bei 0,19 m Abstand der Wand in Entfernungsrichtung ist das erste Maximum für den Porenbeton, den Ziegelstein und den Kalksandstein zu erkennen, was dem Übergang zwischen Luft und Steinoberfläche entspricht. Aus den Entfernungsweiten der ersten beiden Maxima pro Steinwand lassen sich für jede Steinart die maximalen Schichtdicken ermitteln. Nach der inversen Fourier-Transformation der Frequenzprofile liegen die Entfernungsprofile im Zeitbereich vor. Unter Annahme einer Ausbreitung der Messsignale mit c_0 lässt sich das Reflexionsprofil in Entfernungsrichtung berechnen. Die Entfernungsrichtung ist hierbei aber auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Messsignale im Vakuum normiert. Da die Ausbreitung der entsprechenden elektromagnetischen Wellen je nach Baumaterial unterschiedlich stark verzögert wird, erscheinen die Dicken der Bausteine in der gewählten Darstellung größer als sie in Wirklichkeit sind. Für den Porenbeton ergibt sich aus den durchgeführten Messungen (unter der Annahme einer Wellenausbreitung mit Vakuumlichtgeschwindigkeit) eine maximale Schichtdicke $d_{\max, \text{Messung}}$ von 22,7 cm; für den Ziegelstein liegt dieser Wert bei 21,85 cm und für den Kalksandstein bei 22,3 cm. Mit den in Tabelle 3.1 aufgelisteten Permittivitäten $\epsilon_{r, \text{Material}}$ und Schichtdicken d_{Material} der einzelnen Baustoffe kann anhand von Gleichung 3.7 die analytische Schichtdicke für c_0 berechnet werden:

$$d_{\max,\text{analytisch}} = \Re\{\sqrt{\varepsilon_{r,\text{Material}}}\} \cdot d_{\text{Material}}. \quad (3.7)$$

Bei einem Vergleich der auf diese Weise analytisch berechneten Werte mit den Dicken der Messungen ergeben sich relative Abweichungen F_R [Pue15] von unter einem Prozent, was auf eine korrekte Bestimmung der Permittivitäten gemäß der NRW-Methode [A1] zurückschließen lässt. Die analytischen und gemessenen Werten liegen alle um 22 cm, dies liegt daran, dass der Ziegel- und der Kalksandstein annähernd den selben Realteil der Permittivität bei gleicher Länge von 11,5 cm besitzen. Der Porenbeton besitzt zwar einen kleineren Realteil der Permittivität ist aber mit einer Gesamtlänge von 17,5 cm deutlich größer als der Ziegel- und Kalksandstein.

Tab. 3.3: Vergleich der gemessenen Schichtdicken (bei einer Wellenausbreitung im Vakuum) mit den analytisch berechneten Schichtdicken.

Baumaterial	$d_{\max,M}$	$d_{\max,\text{analytisch}}$	F_R	reale Steindicke
Porenbeton	22,7 cm	22,8 cm	0,44 %	17,5 cm
Ziegelstein	21,85 cm	21,82 cm	0,14 %	11,5 cm
Kalksandstein	22,3 cm	22,41 cm	0,50 %	11,5 cm

Die Normierung der Entfernungsrichtung auf Vakuumlichtgeschwindigkeit bietet den Vorteil, dass sehr schnell und effektiv auf $d_{\max,M}$ geschlossen werden kann und dass damit, anhand von Gleichung 3.7, alle weiteren möglichen (d_{Material})-($\varepsilon_{r,\text{Material}}$)-Wertepaare berechnet werden können. Zunächst ist hierfür aus den Maxima der inversen Fourier-Transformationen $d_{\max,M}$ für den Fall der Wellenausbreitung in Vakuum abzulesen. Anschließend sind mit

$$d_{\text{Material}} = \frac{d_{\max,M}}{\Re\{\sqrt{\varepsilon_{r,\text{Material}}}\}} \quad (3.8)$$

alle (d_{Material}) - $(\epsilon_{r,\text{Material}})$ -Wertepaare zu berechnen. Wie viele Wertepaare berechnet werden, hängt von der gewählten Obergrenze für $\epsilon_{r,\text{Material}}$ und der Schrittweite $\Delta\epsilon_{r,\text{Material}}$ ab. Da es in der Realität für jeden Permittivitätswert nur eine mögliche Schichtdicke gibt (und nicht, wie man annehmen könnte und wie in Abbildung 3.7 links zur Veranschaulichung angedeutet werden sollte, mehrere Schichtdicken), ergeben sich die rechts im Bild dargestellten Schichtdicken-Schichtpermittivitäten-Paare. Alle Kurvenverläufe wurden anhand von Gleichung 3.8 auf Basis der in Abbildung 3.6 dargestellten Maximaldicken berechnet. Alle Punkte, die außerhalb der Kurven in Abbildung 3.7 rechts liegen, kommen als Lösung für die Rückrechnung nicht in Frage, da diese Wertepaare nicht zu den Abständen der ersten beiden Peaks in Abbildung 3.6 passen würden.

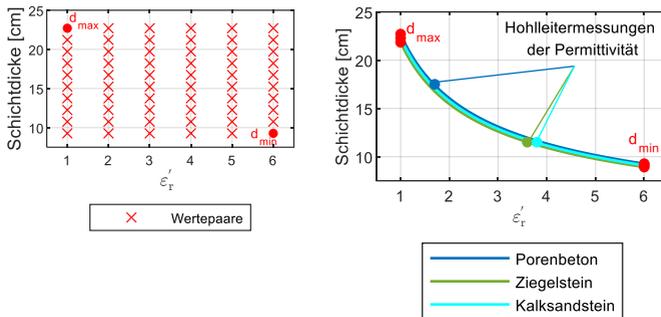


Abb. 3.7: Links: Theoretisch mögliche Wertepaare für eine Materialmessung. Rechts: Einschränkung der Wertepaare durch Kenntnis von $d_{\max,M}$.

Mit den so ermittelten, korrekten Wertepaaren lassen sich anhand der in Unterkapitel 2.3 beschriebenen Methode nun alle Reflexionsfaktoren berechnen. Der Reflexionsfaktor der Simulation $R_{\text{Sim},x}$ hängt dabei von den Variablen $\epsilon'_{r,n}$, $\epsilon''_{r,n}$, d_n und f ab. Der Index x kennzeichnet dabei einen von insgesamt N_w simulierten Reflexionsfaktoren, wobei jeder Reflexionsfaktor für ein genaues Schichtdicken-Permittivitätspaar steht. Die Wertebereiche der einzelnen Variablen zur Berechnung der simulierten Reflexionsfaktoren können Tabelle 3.4 entnommen werden. Für die Maximaldicken werden die Messwerte aus Tabelle 3.3 verwendet, woraus

sich mit den gewählten Obergrenzen der Permittivitäten nach Gleichung 3.4 die Minimaldicken für jede untersuchte Steinart ergeben. Durch die Wahl der Wertebereiche lassen sich dann pro Stein $N_w \times N_{FP}$ frequenzabhängige Reflexionsfaktoren berechnen. N_w entspricht hierbei der Anzahl an möglichen Lösungen für die Schichtdicken-Permittivitätspare und N_{FP} beschreibt die Anzahl an Frequenzpunkten für die die Reflexionsfaktoren (pro Schichtdicken-Permittivitätspaar) berechnet werden. Insgesamt wurden durch die Wahl der Wertebereiche für den Porenbeton 561×1601 sowie für den Ziegel- und für den Kalksandstein jeweils 539×1601 Reflexionsfaktoren berechnet.

Tab. 3.4: Wertebereiche zur Berechnung der simulierten Reflexionswerte, welche anschließend mit den Werten der Messung verglichen werden.

Variable	Wert
$[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$	[1,0; 5,0]
$[\varepsilon''_{r,\min}; \varepsilon''_{r,\max}]$	[0,0; 0,5]
Porenbeton: $d_{\min}; d_{\max}$ [cm]	[10,2; 22,7]
Ziegelstein: $d_{\min}; d_{\max}$ [cm]	[9,8; 21,85]
Kalksandstein: $d_{\min}; d_{\max}$ [cm]	[10,0; 22,3]
Inkrement Schichtdicke: Δd	0,25 cm
Inkrement Imaginärteil Permittivität: $\Delta\varepsilon''$	0,05

Mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate können nun die Abstandswerte zwischen den simulierten Reflexionsfaktoren und den Reflexionsfaktoren der Messung berechnet werden. Im Englischen wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate „least-square-method“ genannt und ist gegeben durch [Wol06]-[Teu07]:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N w_i |q|^2 = \sum_{i=1}^N w_i |Y_i - y(\zeta_i)|^2. \quad (3.9)$$

g beschreibt hier das Residuum, also die Abweichung bzw. Differenz, die eine Funktion $y(\zeta_i)$ von einer Vergleichsfunktion Y_i besitzt. w_i beschreibt einen Gewichtungsfaktor, der von nun an zu $w_i = 1$ gesetzt wird. N gibt die Anzahl der Elemente von $y(\zeta_i)$ und Y_i an. Die Größe y hängt von den Funktionsparametern ζ_i und $\vec{\Gamma}_n$ ab. y wird über:

$$y(\zeta_i) = y(\zeta_i, \vec{\Gamma}) \quad (3.10)$$

modelliert. $\vec{\Gamma}$ beschreibt dabei einen Vektor, der die Funktionsparameter Γ_n von $y(\zeta_i)$ enthält. Im Fall der Rückrechnung setzt sich dieser aus der Permittivität und der Schichtdicke zusammen:

$$\vec{\Gamma} = [\varepsilon'_{r,n}, \varepsilon''_{r,n}, d_n]. \quad (3.11)$$

Ψ gibt die Summe aller quadrierten Beträge der Residuen an und wird in der Literatur Residuenquadratsumme [Fah07] genannt. Wobei zu beachten ist, dass in der obigen Formel der Betrag der Residuen vor der Quadrierung gebildet wird. Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Werte von Ψ_1 bis Ψ_{N_w} , die zu einem Schichtdicken-Permittivitätspaar gehören, als Abstandsfunktion bezeichnet. Durch eine Minimierung der Summe der Fehlerquadrate kann dann das Minimum $A_{x,\min}$ der Abstandsfunktion berechnet werden:

$$A_{x,\min} = \min_{\vec{\Gamma}} \sum_{i=1}^N |Y_i - f(\zeta_i, \vec{\Gamma})|^2. \quad (3.12)$$

In den vorliegenden Untersuchungen werden die Residuen der Real- und Imaginärteile der Reflexionswerte der Messung R_{Mess} und $R_{\text{Sim},x}$ gebildet:

$$A_{x,\text{Real}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{FP}}} (\Re\{R_{\text{Mess}}(f_i, \vec{r}_M)\} - \Re\{R_{\text{Sim},x}(f_i, \vec{r})\})^2 \quad (3.13)$$

und

$$A_{x,\text{Imag}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{FP}}} (\Im\{R_{\text{Mess}}(f_i, \vec{r}_M)\} - \Im\{R_{\text{Sim},x}(f_i, \vec{r})\})^2. \quad (3.14)$$

\vec{r}_M enthält die tatsächlichen Werte der Schichtdicken und Permittivitäten, der zu untersuchenden Wand. Zusätzlich werden die Abstandswerte für den Betrag der inversen Fourier-Transformationen der Reflexionsfaktoren berechnet. Bei den Absolutbeträgen der IFFT werden nur die Werte im Entfernungsbereich zwischen $r_{\text{min}} = 0$ m und dem Peak, der das Ende des Steins (r_{Ende}) charakterisiert, betrachtet. Für den Entfernungsbereich gilt allgemein:

$$Y(r, \vec{r}) = \mathcal{F}^{-1}\{R(f_i, r, \vec{r})\}. \quad (3.15)$$

Die Abstandswerte der Entfernungsprofile werden mit

$$A_{x,\text{IFFT}} = \sum_{i=1}^{N_r} (|Y_{\text{Mess}}(r_i, \vec{r}_M)| - |Y_{\text{Sim},x}(r_i, \vec{r})|)^2 \quad (3.16)$$

berechnet. Wobei hier die Summe von $i = 1$ bis zur maximalen Anzahl an Entfernungspunkten N_r gebildet wird. Insgesamt ergibt sich also für den minimalen Abstandswert pro Schichtdicken-Permittivitätspaar:

$$A_{x,\text{min}} = \min_{\vec{r}} (A_{x,\text{Real}} + A_{x,\text{Imag}} + A_{x,\text{IFFT}}) \quad (3.17)$$

Mit Gleichung 3.13 bis 3.17 konnten alle Abstandswerte über den benutzten Frequenzraum hinweg ermittelt werden. Als Ergebnis erhält man

einen Abstandswert, der eindeutig einer Kombination aus $(\varepsilon'_{r,n}, \varepsilon''_{r,n}, d_n)$ zugeordnet werden kann. Die Ermittlung von $A_{x,\min}$ erfolgt programmier-technisch durch eine Sortierung der einzelnen Residuenquadratsummen Ψ für jedes Schichtdicken-Permittivitätspaar der Größe nach.

Abbildung 3.8 zeigt den Verlauf der logarithmierten Residuenquadratsummen in Abhängigkeit vom Real- und Imaginärteil der relativen Permittivität für den Porenbeton (links) und den Ziegelstein (rechts).

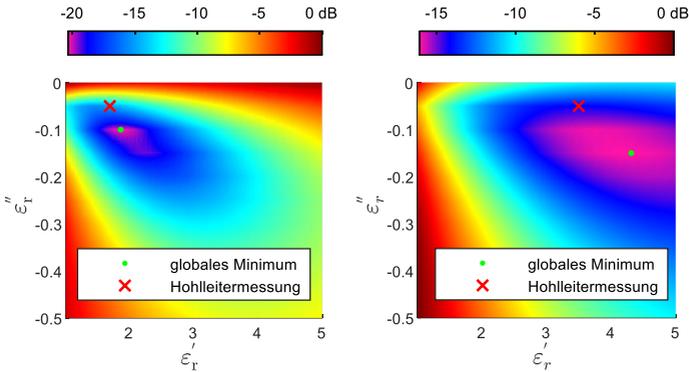


Abb. 3.8: Verlauf der Abstandsfunktion in Abhängigkeit vom Real- und Imaginärteil der relativen Permittivität (logarithmisch dargestellt). Links die Ergebnisse für den Porenbeton, rechts für den Ziegelstein.

In der Abbildung 3.8 links ist der Verlauf der Residuenquadratsummen für den Porenbeton dargestellt. Der violett eingefärbte Bereich entspricht dabei den minimalen Abstandswerten. Das globale Minimum der Abstandsfunktion des Porenbetons liegt bei einem Wert von 1,87 für den Realteil und -0,1 für den Imaginärteil. Da sich die Wellenausbreitung nach Gleichung 2.20 bzw. nach Gleichung 3.4 anhand der Wurzel der relativen Permittivität ausdrücken lässt, ist es zweckmäßig, die Wurzelwerte der Permittivität der Hohlleitermessung mit den Rückrechnungsergebnissen für die globalen Minima zu vergleichen. Dabei ergibt sich für den Porenbeton eine relative Abweichung zum Hohlleitermesswert von 5 %; für den Imaginärteil liegt eine relative Abweichung von 41 % vor. Beim Ziegelstein sind die minimalen Werte der Abstandsfunktion breiter um das

globale Minimum bei $4,3-j0,15$ gestreut. Die Abweichung zur Hohlleitermessung beträgt für den Realteil 11 % und für den Imaginärteil 73 %.

Die minimalen Abstandswerte für den Kalksandstein (siehe Abbildung 3.9 links) sind um das globale Minimum bei $5-j0,15$ gestreut, was einer Abweichung im Vergleich zur Hohlleitermessung von 15 % für den Realteil und einer Abweichung von 0 % für den Imaginärteil entspricht. Die Verteilungen der Abstandsfunktionen der einzelnen einschichtigen Steinuntersuchungen liefern im Bereich um 3 dB des globalen Minimums für den Realteil der Permittivität allesamt Werte, deren Abweichungen vom gemessenen Hohlleiterwert unter 15 % liegen.

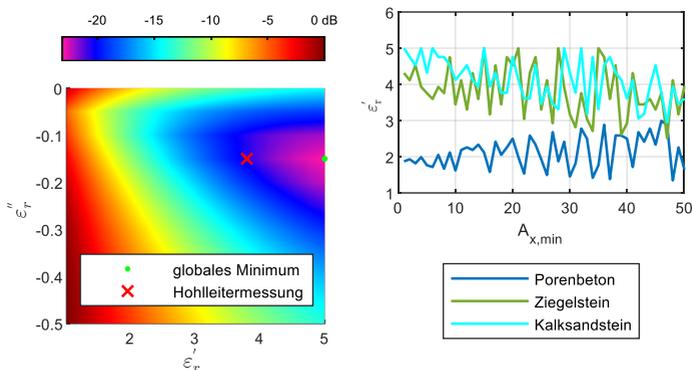


Abb. 3.9: Links: Ergebnisse der dB-normierten Abstandsfunktion für den Kalksandstein. Rechts: Realteile der Permittivitäten für die 50 besten Abstandsfunktionswerte pro Baumaterial.

In Abbildung 3.9 rechts ist der Verlauf des Realteils der relativen Permittivität über die ersten 50 Abstandsfunktionen mit dem minimalen Abstand zur Messung aufgetragen. Es lässt sich erkennen, dass die Werte pro Steinart etwa um einen Mittelwert $\bar{A}_{\min,50}$ pendeln. Für den Porenbeton beträgt dieser Mittelwert 2,1, für den Ziegelstein 3,8 und für den Kalksandstein 4,1. Nach Gleichung 3.7 lässt sich die Verzögerung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und damit die Verlängerung der eigentlichen Schichtdicke anhand der Wurzel aus der Permittivität beschreiben. Werden die Wurzelwerte der berechneten Mittelwerte mit den

Wurzelwerten der Permittivitäten aus der Hohlleitermessung verglichen, kommt es zu einer relativen Abweichung von +11 % für den Porenbeton, +3 % für den Ziegelstein und +4 % für den Kalksandstein. Diese Abweichungen können als vertretbar angesehen werden, da Radarbilder unbekannter Strukturen selbst bei relativen Abweichungen von 15 % mit der SAR-Prozessierung hinreichend genau fokussiert werden können. Dieser Umstand wird in Kapitel 4 ausführlich diskutiert.

Zum Abschluss dieses Unterkapitels werden in Tabelle 3.5 die relativen Messabweichungen der gemittelten 50 besten Rückrechnungswerte von den Hohlleitermessungen zusammengefasst.

Tab. 3.5: Relativer Fehler der Wurzel des gemittelten Realteils der relativen Permittivität der 50 besten Abstandsfunktionen im Vergleich zur Hohlleitermessung.

Baustein	Hohlleitermessung	$\bar{A}_{\min,50}$	$F_{R,Realteil}$
Porenbeton	1,7-j0,05	2,1-j0,14	+11 %
Ziegelstein	3,6-j0,05	3,8-j0,14	+3 %
Kalksandstein	3,8-j0,15	4,1-j0,14	+4 %

Im nachfolgenden Unterkapitel wird die hier beschriebene Methode zur Rückrechnung auf dreischichtige Wandaufbauten angewendet.

3.5 Dreischichtiger Wandaufbau

Die in den vorigen Unterkapiteln beschriebenen Untersuchungen lassen erkennen, dass sich mit der *brute-force*-Methode hinreichend verwertbare Lösungen für einschichtige Steinaufbauten berechnen lassen. In diesem Unterkapitel werden nun die Rückrechnungsergebnisse für dreischichtige Wandaufbauten vorgestellt. Im ersten Abschnitt wird der Wandaufbau Kalksandstein–Luftspalt–Ziegelstein untersucht; im nächsten Abschnitt folgen die Untersuchungen zum Wandaufbau Porenbeton–Luftspalt–Ziegelstein und zum Wandaufbau Ziegelstein–Luftspalt–Porenbeton.

3.5.1 Kalksandstein–Luftspalt–Ziegelstein

Die Dicken der in diesem Abschnitt untersuchten Schichten betragen 11,5 cm für den Vollkalksandstein, 8,6 cm für den Luftspalt und 11,5 cm für den Vollziegelstein (vgl. Tabelle 3.2). Die inverse Fourier-Transformation der Reflexionsmessung ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

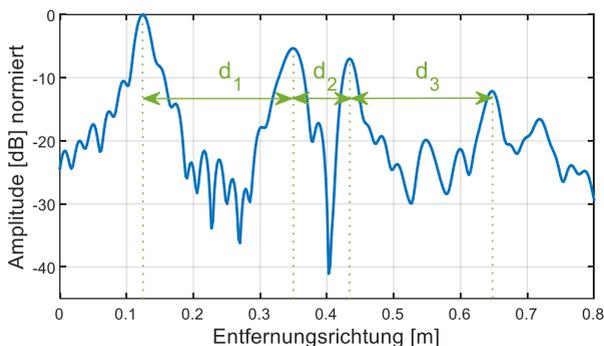


Abb. 3.10: Inverse Fourier-Transformation der Reflexionsmessung des dreischichtigen Aufbaus: Kalksandstein–Luftspalt–Ziegelstein. Die Entfernungsrichtung ist auf die Vakuumlichtgeschwindigkeit normiert.

Aus der Abbildung lassen sich die Anzahl der Schichten und die maximalen Schichtdicken ablesen. Für den Kalksandstein ergibt sich eine Schichtdicke d_1 von 22,5 cm, für den Luftspalt eine maximale Dicke d_2 von 8,6 cm und für den Vollziegelstein die Dicke d_3 21,2 cm. Analog zu den Rückrechnungen für einschichtige Materialien aus dem vorherigen Unterkapitel können die Maximaldicken anhand der gewählten Obergrenzen für die Realteile der relativen Permittivitäten bestimmt werden. Mit der Wahl der Inkremente für die Schrittweite des Realteils und des Imaginärteils der relativen Permittivität lassen sich alle Reflexionsfaktoren für alle Schichtkombinationen berechnen. Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die hierbei verwendeten Simulationsparameter. In der Summe ergeben sich knapp 148.000 Schichtkombinationen, für die der Reflexionsfaktor berechnet wird.

Wie zuvor werden die simulierten Reflexionsfaktoren mit den gemessenen Reflexionsfaktoren verglichen und die Abstandswerte für jede

simulierte Wandkonfiguration berechnet. Anschließend wird die Sortierung der Abstandswerte vorgenommen. Die sortierten Abstandswerte werden erneut gefiltert, indem man sich die bekannte Gesamtdicke des Dreischichtaufbaus zunutze macht.

Tab. 3.6: Wertebereiche zur Berechnung der Reflexionsfaktoren.

Variable	Wert
Schicht 1: $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$,	[2,0; 5,0]
Schicht 2: $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$,	[1,0; 2,5]
Schicht 3: $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$,	[1,0; 4,0]
Für alle Schichten: $[\varepsilon''_{r,\min}; \varepsilon''_{r,\max}]$,	[0,0; 0,2]
Inkrement Realteil Permittivität $\Delta\varepsilon'_r$:	0,25
Inkrement Imaginärteil Permittivität $\Delta\varepsilon''_r$:	0,05
$d_{1,\min}; d_{1,\max}$ in [cm]	[10; 22,5]
$d_{2,\min}; d_{2,\max}$ in [cm]	[3,8; 8,6]
$d_{3,\min}; d_{3,\max}$ in [cm]	[9,5; 21,2]

Die Gesamtdicke der untersuchten Wandaufbauten beträgt 31,5 cm. Aus den bereits sortierten Simulationsergebnissen werden nun die Ergebnisse ausgewählt, laut denen die Gesamtdicke zwischen 30,5 und 32,5 cm liegt. Alle Ergebnisse, die außerhalb dieser Grenzen liegen, können als unrealistische Werte angesehen und damit ignoriert werden. Nach dieser Filtrierung verbleiben 31.000 der ursprünglich 148.000 simulierten Wandkonfigurationen. Bezüglich dieser 31.000 verbliebenen Wandkonfigurationen besitzt das globale Minimum einen Abstandswert von 3,5 und das Maximum einen Abstandswert von 20,9. Abbildung 3.11 zeigt die Amplitudendichteverteilung der einzelnen Schichtpermittivitäten der besten 1000

Ergebnisse nach der Filterung. Die so gewonnenen Werte weisen eine relative Abweichung von unter 15 % zum globalen Minimum der Abstandswerte auf.

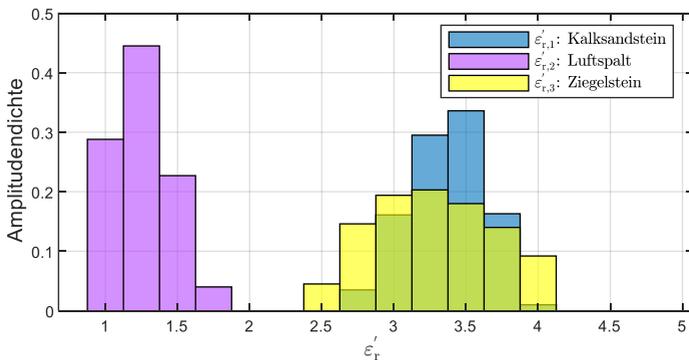


Abb. 3.11: Amplitudendichteverteilung des Realteils der relativen Permittivität der einzelnen Schichten der Dreischichtmessung Kalksandstein ($\epsilon'_{r,1}$) – Luftspalt ($\epsilon'_{r,2}$) – Ziegelstein ($\epsilon'_{r,3}$).

Für die erste Schicht – den Kalksandstein – zeigt die Häufigkeitsverteilung ein Maximum bei einer relativen Permittivität von 3,5. Für die zweite Schicht – den Luftspalt – liegt das Maximum der Häufigkeitsverteilung bei einer Permittivität von 1,12. Der Verlauf der Häufigkeitsverteilung der relativen Permittivität der dritten Schicht dem Ziegelstein – besitzt ein Maximum bei 3,125. Wird nun, wie in der Einschichtuntersuchung, wiederum über die 50 besten Ergebnisse der Abstandswerte gemittelt, so ergeben sich die in Tabelle 3.7 ablesbaren Werte für die Permittivität der einzelnen Schichten und deren relative Abweichungen zu den Hohlleitmessungen.

Der Realteil der relativen Permittivität weist für den Kalksandstein eine Abweichung von -9,7 %, für den Ziegelstein eine Abweichung von +4,2 % und für die Luftschicht eine Abweichung von +14 % zur Hohlleitmessung auf. Diese liegen damit unterhalb des zulässigen Fehlers für die SAR-Prozessierung und auch die Bestimmung der Wärmeleitung.

Tab. 3.7: Relativer Fehler der Wurzel des gemittelten Realteils der relativen Permittivität der 50 besten Abstandsfunktionen der Dreischichtmessung (Kalksandstein - Luft - Ziegelstein) im Vergleich zur Hohlleitermessung.

Wandschicht	Hohlleitermessung	$\bar{A}_{\min,50}$	$F_{R,\text{Realteil}}$
Kalksandstein	3,8-j0,15	3,1-j0,06	-9,7 %
Luft	1	1,3-j0,2	+14 %
Ziegelstein	3,6-j0,05	3,3-j0,16	-4,2 %

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass also auch hier eindeutig gezeigt werden kann, dass sich mit der in Abbildung 3.5 beschriebenen Methode hinreichend genau auf die Permittivitäten bzw. Schichtdicken schließen lässt. Zusätzlich lassen sich für jede einzelne Schicht der Wandkonfiguration Wertebereiche bestimmen, innerhalb derer mögliche Lösungen für den tatsächlichen Wandaufbau liegen. Dass die Trennschicht zwischen Kalksandstein und Vollziegelstein aus Luft bestand, stellte sich bezüglich der hier durchgeführten Dreischichtmessung als Vorteil heraus. Denn der dadurch bedingte fresnelsche Reflexionsfaktor an den jeweiligen Schichtübergängen ermöglichte eine genaue Einschätzung der Maximaldicken.

Im folgenden Abschnitt wird, im Gegensatz zu dem hier untersuchten System, ein Dreischichtsystem untersucht, bei dem mindestens einer der Schichtübergänge zwischen zwei Materialien einen kleinen fresnelschen Reflexionsfaktor $< 0,2$ aufweist, da die Permittivitäten der beiden Schichten nah beieinander liegen.

3.5.2 Porenbeton–Luftspalt–Vollziegelstein

Die Dicke des hier untersuchten Porenbetonsteins beträgt 17,5 cm, die des Luftspalt 8,7 cm und die des Ziegelsteins 11,5 cm. Der Übergang vom Porenbeton zum Luftspalt besitzt aufgrund der nah beieinander liegenden relativen Permittivitäten einen fresnelschen Reflexionsfaktor von 0,13. An dieser Grenzschicht wird dreimal weniger Leistung zum Radarsystem reflektiert als beim Übergang Luftschicht–Ziegelstein. In Abbildung 3.12 ist die inverse Fourier-Transformation der Reflexionsmessung des

dreischichtigen Aufbau dargestellt. An der Stelle 0,35 m in Entfernungsrichtung befindet sich der Peak, der den Übergang Porenbeton–Luftspalt kennzeichnet, bei $-8,5$ dB. Der Übergang vom Luftspalt zum Ziegelstein wird durch den Peak bei 0,44 m dargestellt und tritt mit -3 dB wesentlich dominanter in Erscheinung als der Übergang Porenbeton–Luftspalt.

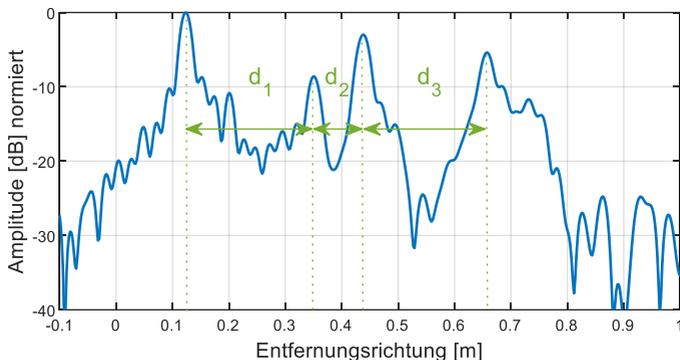


Abb. 3.12: Inverse Fourier-Transformation der Reflexionsmessung des dreischichtigen Aufbaus Porenbeton–Luftspalt–Ziegelstein.

Aus den in Abbildung 3.12 dargestellten Kurven lassen sich die maximalen Dicken für eine Wellenausbreitung im Vakuum ermitteln, indem die Abstände zwischen den einzelnen Hauptpeaks berechnet werden. Für die erste Schicht d_1 ergibt sich eine maximale Dicke von 22,7 cm; die Dicke des Luftspalts beträgt 8,7 cm und der Vollziegelstein besitzt eine Dicke von 21,7 cm. Für die Simulation wurden die in Tabelle 3.6 angegebenen Parameter gewählt; lediglich die Wertebereiche für die maximalen und die minimalen Schichtdicken mussten noch an die neuen, in Abbildung 3.12 dargestellten Werte angepasst werden. Die Simulation ergab erneut 148.000 Schichtkombinationen. Abbildung 3.13 zeigt die Amplitudendichteverteilung der besten 1000 Ergebnisse mit den geringsten Abstandswerten.

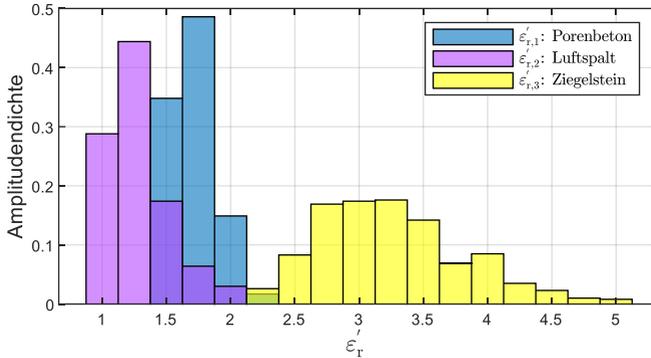


Abb. 3.13: Amplitudendichteverteilung der einzelnen Schichten der Dreischichtmessung Porenbeton ($\epsilon'_{r,1}$) – Luftspalt ($\epsilon'_{r,2}$) – Ziegelstein ($\epsilon'_{r,3}$).

Die 148.000 berechneten Wandkonfigurationen wurden abermals anhand eines festgesetzten Gesamtdickenbereichs gefiltert. In dem so gefilterten Datensatz befinden sich nur solche Wandkonfigurationen, die eine Gesamtdicke zwischen 36 und 39 cm besitzen. Die Permittivitätswerte für die erste Schicht – der Porenbeton – liegen im Bereich zwischen 1,5 und 2,25, das Maximum liegt bei einer Permittivität von 1,75. Die Werte der zweiten Schicht – Luft – liegen im Bereich zwischen 1 und 2 und besitzen ein Maximum bei 1,25.

Tab. 3.8: Relativer Fehler der Wurzel des gemittelten Realteils der relativen Permittivität der 50 besten Abstandsfunktionen für den dreischichten Wandaufbau bestehend aus Porenbeton, Luft und Ziegelstein.

Wandschicht	Hohlleitermessung	$\bar{A}_{\min,50}$	$F_{R, \text{Realteil}}$
Porenbeton	1,7–j0,05	1,8–j0,04	+3 %
Luft	1	1,35–j0,2	+16,2 %
Ziegelstein	3,6–j0,05	2,8–j0,15	-11,8 %

Die Ergebnisse für die dritte Schicht – Vollziegelstein – liegen im Wertebereich zwischen 2,25 und 5 und besitzen ein Maximum bei einer relativen Permittivität von 3,25. Die über die besten 50 Messergebnisse

gemittelten Permittivitätswerte sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst. Besonders hervorzuheben ist hier die geringfügige Abweichung der berechneten Permittivität des Porenbetons gegenüber der Hohlleitermessung von nur +3 %. Für den Luftspalt ergibt sich eine Abweichung von +16 % gegenüber der tatsächlichen Permittivität, und für die Permittivität des Vollziegelsteins lässt sich eine Abweichung von -11,8 % ablesen.

Interessant ist auch der umgekehrte Fall des Wandaufbaus. Befindet sich der Ziegelstein an erster Stelle, wird an diesem ersten Übergang ein großer Teil der eingestrahlenen Leistung reflektiert. Beim Übergang zum Luftspalt wird erneut ein erheblicher Teil der Energie reflektiert, was dazu führt, dass zwar noch der Übergang Luftspalt–Porenbeton, jedoch nicht mehr das Ende des Wandaufbaus erkennbar ist. Das Ende der Wand lässt sich in dieser Konstellation nur dann sichtbar machen, wenn dort eine Metallplatte platziert wird. Auf diese Weise kann ein Wert für die Dicke der dritten Schicht ermittelt werden. Die Entfernungprofile für beide Fälle – mit und ohne Metallplatte – sind in Abbildung 3.14 dargestellt.

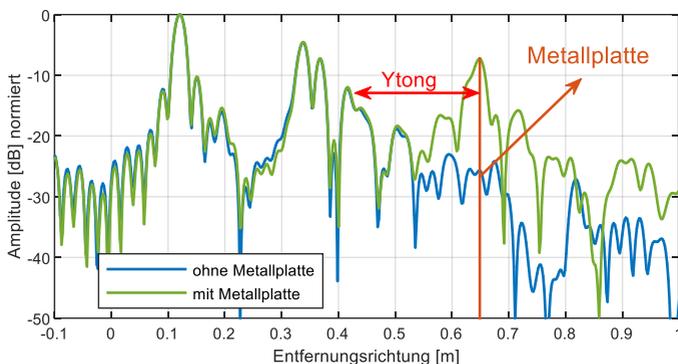


Abb. 3.14: Inverse Fourier-Transformationen des dreischichtigen Wandaufbaus bestehend aus Vollziegelstein–Luft–Porenbeton mit und ohne Metallplatte am Ende des Wandaufbaus.

Auf Basis der so ermittelten Schichtdickenwerte und der Suchraumgrenzen kann mit der Rückrechenmethode wiederum auf die gesuchten Schichtparameter geschlossen werden. Die Ergebnisse sind in Form einer Häufigkeitsverteilung für die relativen Permittivitätswerte der einzelnen Schichten in Abbildung 3.15 dargestellt.

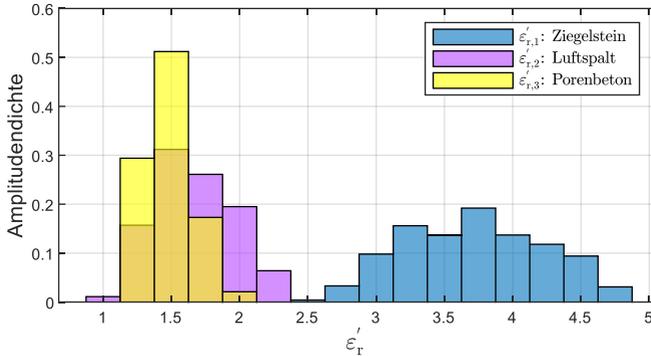


Abb. 3.15: Amplitudendichteverteilung der einzelnen Schichten der Dreischichtmessung Vollziegelstein ($\epsilon_{r,1}'$) – Luftspalt ($\epsilon_{r,2}'$) – Porenbeton ($\epsilon_{r,3}'$).

Auch hier lässt sich eindeutig erkennen, dass sich gerade mit Blick auf die letzte Schicht – den Porenbeton – unter den besten 1000 Werten keine unrealistischen Werte ($>2,5$) befinden. Hier tritt als wahrscheinlichster Wert für die Permittivität ein Wert von 1,5 auf. Allerdings zeigt sich, dass die relativen Permittivitäten der zweiten und dritten Schicht in der Häufigkeitsverteilung nah beieinander liegen. Dies schlägt sich auch in der Mittelung der besten 50 Werte nieder, wo der Luftspalt eine relative Permittivität von 1,72 und der Porenbetonstein eine relative Permittivität von 1,5 besitzt. Diese Ergebnisse bedeuten, dass es, wenn die erste Schicht einen großen fresnelschen Reflexionsfaktor besitzt und die beiden nachfolgenden Schichten in ihrer jeweiligen Permittivität nah beieinander liegen, schwierig ist, nach der ersten Schicht auf exakte Werte zu schließen.

3.6 Zusammenfassung

In Kapitel 3 wurde die entwickelte Methode vorgestellt und untersucht, inwiefern sich mit monostatischen Reflexionsmessungen an homogen geschichteten Wandstrukturen sinnvoll auf die Wandparameter Schichtdicke, Schichtpermittivität und Schichtanzahl zurückrechnen lässt. Sowohl für den einschichtigen als auch für den dreischichtigen Aufbau zeigte sich, dass in Bezug auf die gedachte Anwendung hinreichend genau auf den

Realteil der relativen Permittivität und auf die Schichtdicken zurückgerechnet werden kann. Wird die Entfernungsachse der inversen Fourier-Transformation auf die Lichtgeschwindigkeit der Welle im Vakuum normiert, lassen sich die maximalen Schichtdicken für die einzelnen Schichten für den Fall $\varepsilon_r = 1$ bestimmen. Damit lässt sich der Wertebereich der möglichen Permittivitäts-Schichtdicken-Paare massiv eingrenzen, wodurch wiederum die Rechenzeit verkürzt wird. Für die Ausbreitung in mehrschichtigen Aufbauten ist als a priori gegebene Information die Gesamtdicke der Wand von Bedeutung, da auf dieser Basis bei einer vorgegebenen Varianz zur tatsächlichen Gesamtwanddicke unrealistische Werte für berechnete Wandkonfigurationen ausgeschlossen werden können. Der Vergleich zwischen den simulierten und den gemessenen Werten ergab Abweichungen von nicht mehr als 16 % für die Wurzel des Realteils der Permittivitätswerte der Einzelschichten.

Nicht Teil dieser Arbeit waren Untersuchungen zum Zusammenhang von Wärmeleitkoeffizient und Permittivität von gewöhnlichen Bausteinen in Deutschland. Mit Unterstützung des Instituts für Solarforschung des DLR wurde die Permittivität von mehreren unterschiedlichen Bausteinen bestimmt [Gor21]. Dabei zeigte sich, dass die Bausteine anhand der Permittivität in die Steinklassen Leichtbeton, Porenbeton, Ziegelsteine und Kalksandsteine einteilbar sind. Mit den berechneten Häufigkeitsverteilungen für die Schichtpermittivitäten der einzelnen Wandkonfigurationen lassen sich nun realistische Wertebereiche für den Realteil der Permittivität festlegen und somit wahrscheinliche Szenarien für den verbauten Steintyp in der unbekanntenen Wand eruieren. Anhand anderer verfügbarer Informationen, wie z.B. dem Baualter oder der Bauregion kann damit weiter präzisiert werden, welcher Baustein im untersuchten Gebäude verbaut wurde.

Ergänzend zu den hier durchgeführten Reflexionsuntersuchungen zur Materialcharakterisierung wird im nachfolgenden Kapitel das Radarprinzip mit synthetischer Apertur (SAR) vorgestellt, mit dem die Azimutauflösung erhöht und somit eine verbesserte Strukturanalyse eines unbekanntenen Wandaufbaus ermöglicht wird.

4 Strukturanalyse von Mehrschichtsystemen

Die Ortsauflösung eines Radarbildes beschreibt den räumlichen Abstand, bei dem zwei unterschiedliche Radarsignale noch getrennt und damit unterschieden werden können. Die örtliche Auflösung in Blickrichtung der Antenne hängt von der gewählten Bandbreite des Messsignals ab [Pra20]. Zusätzlich zur axialen Auflösung kann die Antenne auch lateral zum erfassenden Zielszenario bewegt werden und somit die Auflösung quer zur Blickrichtung der Antenne um eine weitere Raumdimension ergänzen. Zukünftig wird in dieser Arbeit die axiale Raumrichtung als Entfernungsrichtung und die laterale Raumrichtung als Azimutrichtung bezeichnet. Um die Entfernungsrichtung zu erweitern, wird die Antenne entlang der Azimutrichtung bewegt und es werden Reflexionsmessungen vom Zielgebiet durchgeführt. Voneinander zu unterscheiden sind hierbei Radarsysteme, die mit realer Apertur und solche, die mit synthetischer Apertur arbeiten. Bei Radarsystemen mit realer Apertur wird eine Richtdiagrammfokussierung mit einer großen Aperturabmessung der Antenne erzeugt; als Beispiel sind hier Parabolantennen zu nennen. Antennen mit hohem Gewinn besitzen eine kleinere Halbwertsbreite der Hauptkeule; je kleiner die Halbwertsbreite, umso höher ist die Azimutauflösung bei Radarsystemen mit realer Apertur. Bei Radarsystemen mit synthetischer Apertur werden große Aperturabmessungen der Antenne synthetisiert, indem das zu untersuchende Messszenario entlang einer bekannten Fahrstrecke mit einer kleinen Antenne gescannt wird, die jedoch über eine großen Halbwertsbreite verfügt. Die entlang der Fahrstrecke durchgeführten Reflexionsmessungen werden anschließend kohärent aufsummiert und ergeben auf diese Weise rechnerisch die synthetische Apertur. Die nachfolgenden Unterkapitel erarbeiten – auf der Grundlage einer Einführung in die grundlegenden Eigenschaften des Radarprinzips mit synthetischer Apertur (SAR) [Oez17–Mor18] – die Einsatzmöglichkeiten des SAR-Prinzips zur Strukturanalyse von Mehrschichtmedien.

4.1 Radar mit synthetischer Apertur

Abbildungssysteme mit realer Apertur versuchen, eine kleine Halbwertsbreite mittels Antennen großer Apertur zu erzeugen. Dies geschieht beispielsweise durch den Einsatz von Parabolspiegeln bei Antennen in Cassegrain-Ausführung [Haa16]. Die erreichbare Azimutauflösung für ein System mit realer Apertur beträgt näherungsweise [Lud08]

$$\Delta r_{\text{Az}} = d_0 \frac{\lambda}{D_{\text{Ap}}} \quad (4.1)$$

Hierbei entspricht d_0 dem Abstand zwischen Antenne und Zielobjekt, λ der Wellenlänge und D_{Ap} der Länge der Apertur der verwendeten Antenne. Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Zeichnung zu Gleichung 4.1.

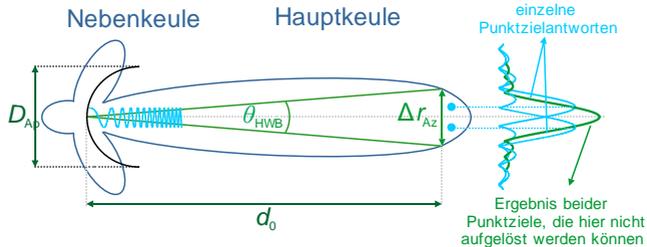


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Auflösung eines Radars mit realer Apertur. θ_{HWB} entspricht dabei der Halbwertsbreite der Antenne.

Um z.B. bei einer Entfernung von 500 km eine Azimutaufloesung von 3 m bei einer Wellenlänge von 3 cm (10 GHz) zu erzielen, ergibt sich nach 4.1 eine Länge der Apertur von 5 km. Da der Aufwand, Aperturen in dieser Größenordnung herzustellen, immens bis unmöglich ist, werden in der Radartechnik anstelle von Antennensystemen mit realen Aperturen solche mit synthetischen Aperturen eingesetzt (beispielsweise in der abbildenden Radarfernerkundung).

Das Prinzip eines Radars mit synthetischer Apertur ist schematisch in Abbildung 4.2 dargestellt. Ein wesentliches Merkmal des SAR-Prinzips ist das Abtasten des Messziels entlang einer bekannten Fahrstrecke. Pro Messposition x_m wird eine Reflexionsmessung $\underline{p}(x_m, \tau_m)$ des Messszenarios durchgeführt:

$$\underline{p}_{x_m}(r(\tau_m)) = \underline{p}_{x_m}(R_m) = |\underline{p}_{x_m}|e^{-j\phi(R_m)}. \quad (4.2)$$

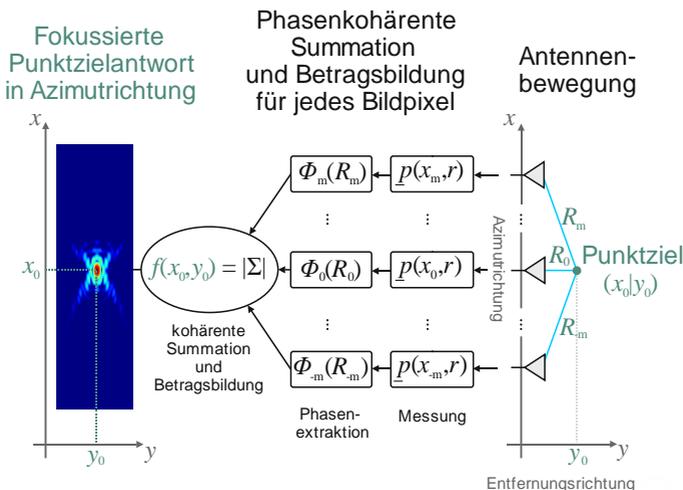


Abb. 4.2: Prinzip einer SAR-Aufnahme.

τ_m beschreibt hierbei die Laufzeit zwischen Punktziel und Messposition und kann durch eine Multiplikation mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit in die Entfernung R_m umgerechnet werden. Nachdem die gesamte Fahrstrecke abgefahren und alle Reflexionsmessungen durchgeführt wurden, wird eine Pixelmatrix erstellt und in jedem Pixel der Matrix die Summe der komplexen Feldamplituden aller Messpositionen phasenrichtig aufsummiert. Die substantielle Bildinformation liegt also in der Phase $\Phi(R_m)$ der einzelnen Reflexionssignale. Zwingend erforderlich für die korrekte Summation der Signale in den richtigen Pixeln ist hierbei eine kohärente Phasenbeziehung zwischen Sendesignal und Empfangssignal an den einzelnen Messpositionen. Zum Abscannen des Messszenarios werden

kleine Antennen – deren Größe im Zentimeter- bis Meterbereich liegt – mit großem Öffnungswinkel zur Synthese großer Aperturen im Meter- bis Kilometerbereich eingesetzt. Das Erzeugen einer großen Apertur ist aber nur dann möglich, wenn die zu untersuchende Geometrie auch vollständig durch den Öffnungswinkel der benutzten Antenne abgetastet werden kann. Abbildung 4.3 vermittelt hierzu die geometrischen Verhältnisse für das Abscannen eines Messszenarios anhand einer Punktquelle.

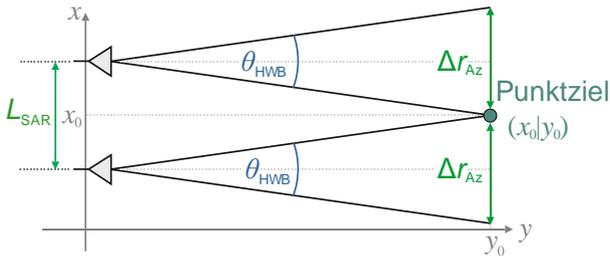


Abb. 4.3: Die synthetische Apertur L_{SAR} hängt von der verwendeten Halbwertsbreite der Send- und Empfangsantennen ab.

Das Punktziel an der Stelle $(x_0 | y_0)$ tritt an der oberen Stelle der Antennenposition in die Hauptkeule des Antennendiagramms ein und an der unteren wieder aus; die dabei abgefahrte Wegstrecke entlang der x -Achse entspricht der Länge der synthetischen Apertur. Eine größere Fahrstrecke als L_{SAR} würde in diesem Fall nicht zu einer verbesserten Auflösung in Azimutrichtung beitragen, da das Punktziel oberhalb der ersten und unterhalb der letzten Antennenposition in Abbildung 4.3 nicht erfasst wird und somit keine Signalbeiträge entstehen. Die Halbwertsbreite der Richtcharakteristik der verwendeten Antennen ist folglich eine entscheidende Größe für die generierbare Länge der synthetischen Apertur. In der Literatur [Kla00] [Men91] [Uln14] wird die Auflösung in Azimutrichtung für ein Radar mit synthetischer Apertur angegeben durch

$$\Delta r_{Az,SAR} = \frac{c_0}{4 f_m \sin\left(\frac{\theta_{HWB}}{2}\right)} \quad (4.3)$$

c_0 entspricht hierbei der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, f_m der Mittenfrequenz des Radarsystems und θ_{HWB} der Halbwertsbreite der verwendeten Antennen. In der vorliegenden Arbeit wurde sowohl zur Untersuchung im Labor als auch im Feldeinsatz eine breitbandige Steghornantenne der tschechischen Firma RFspin [Rfs21] verwendet. Die Bandbreite dieser Antenne erstreckt sich von 0,8 GHz bis 18 GHz. In Abbildung 4.4 ist die Halbwertsbreite der Antenne in der H-Ebene angegeben. Zusätzlich zeigt die Abbildung die theoretischen Auflösungen in Azimutrichtung für den Fall der synthetischen (SAR) und der realen Apertur bei einer Zielentfernung von 0,3 m.

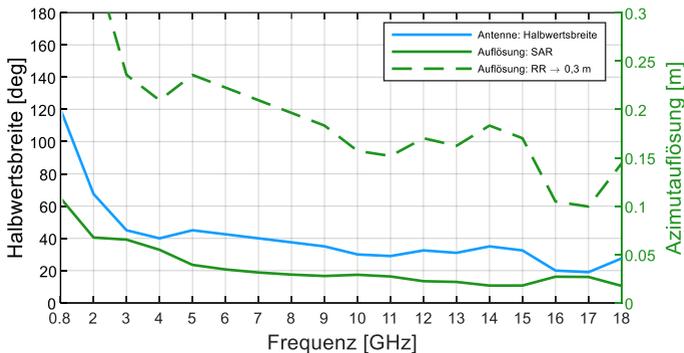


Abb. 4.4: Kurvenverläufe für die Halbwertsbreite der Antenne und die Azimutaufklärung für die synthetische und die reale Apertur.

Die blaue Kurve beschreibt den Verlauf der Halbwertsbreite der verwendeten Steghornantenne im Bereich von 0,8 GHz bis 18 GHz. Sofern das Zielszenario mit dem kompletten Öffnungswinkel der Antennenhalbwertsbreite ausgeleuchtet wird, ergibt sich der grüne Kurvenverlauf, der die Azimutaufklärung nach Gleichung 4.3 beschreibt. Wird die komplette Bandbreite von 17,2 GHz ausgenutzt, liegt die Mittenfrequenz bei 9,4 GHz, was nach Gleichung 4.3 eine Azimutaufklärung von 2,8 cm ergibt. Die gestrichelte grüne Linie stellt die Azimutaufklärung für den Fall

der realen Apertur eines in 0,3 m platzierten Ziels dar. Bei einer Frequenz von 9,4 GHz ist eine Auflösung von 28 cm in Azimutrichtung erreichbar. Für weiter als 0,3 m entfernte Ziele wird die Azimutauflösung zunehmend schlechter, der Wert also größer. Dieser Fall tritt bei einem Radar mit synthetischer Apertur nicht auf, solange die sich durch den Öffnungswinkel und die Zielentfernung des Punktziels ergebende Länge der synthetischen Apertur abgefahren werden kann. Gleichung 4.4 stellt den formalen Zusammenhang für die Azimutauflösung einer Punktquelle in Abhängigkeit von der Zielentfernung und der abgefahrenen synthetischen Apertur dar [Hei13]:

$$\Delta r_{Az,SAR} = \frac{c_0 \sqrt{\left(\frac{L_{SAR}}{2}\right)^2 + y_0^2}}{4 f_m \frac{L_{SAR}}{2}}. \quad (4.4)$$

Um bei einer Frequenz von 9,4 GHz eine Azimutauflösung von 2,8 cm in einer Entfernung von 0,3 m zu erhalten, muss also eine Strecke von 0,175 m abgefahren werden. Wollte man mit einem Radar mit realer Apertur eine Azimutauflösung von 2,8 cm generieren, so wäre bei identischer Frequenz und identischem Zielabstand eine Länge der Apertur von 34 cm nötig. Bei einer Zielentfernung von 0,5 m betrüge die Länge der Apertur 57 cm, und für eine Zielentfernung von 1,0 m läge die Länge der Apertur bei 1,14 m. Solch große und entsprechend schwere Antennen würden bei Einsätzen in der Praxis, bei denen die Messungen an Hauswänden mit Drohnen aus der Luft vorgenommen werden, ein großes Hindernis darstellen. Deutlich unkomplizierter ist in dieser Hinsicht der Einsatz von Radarsystemen mit synthetischer Apertur, da mit weniger Gewicht und in weniger unhandlicher Weise gearbeitet werden kann. Zudem kann flexibler in weite Entfernungen gemessen werden, ohne an Azimutauflösung zu verlieren (zumindest sofern die zur Erzeugung der Auflösung notwendige Länge der synthetischen Apertur im Messgebiet abgefahren werden kann). Um mit dem Verfahren der synthetischen Apertur eine hohe Auflösung in Azimutrichtung zu erreichen, sind also die Änderungen der räumlichen Lage zwischen dem Ziel und dem Aufnahmesystem entscheidend. Ob sich dabei das Radarsystem relativ zum Ziel oder das Ziel relativ zum Radarsystem bewegt, ist für das Ergebnis unerheblich. Was in der SAR-Prozessierung hingegen eine sehr wichtige Rolle

spielt, ist die kohärente Summation der Amplituden- und Phasenwerte der Reflexionsmessungen in die Bildmatrix. Welche Algorithmen zu diesem Zweck eingesetzt werden können und warum in der vorliegenden Arbeit mit der Methode der Rückprojektion gearbeitet wird, wird im nachfolgenden Unterkapitel erläutert.

4.2 Bildrekonstruktion mit der Rückprojektionsmethode

Ziel der Bildrekonstruktion ist die Berechnung der Intensitätsverteilung $f(x, y)$ einer unbekanntnen Szene bzw. eines unbekanntnen Zielobjekts anhand eines Messdatensatzes, der zuvor an unterschiedlichen Messpositionen x_m aufgenommen wurde. Das Zielobjekt besteht im einfachsten Fall aus einer einzigen Punktquelle. Die Intensitätsverteilung stellt ein Maß für die Reflektivität [Kla00] des zu untersuchenden Messszenarios dar. Der Messdatensatz besteht aus den Projektionen des Zielobjekts. Eine Projektion des Zielobjekts

$$p_{x_m}(r) = p_{\theta_m}(r) \quad (4.5)$$

wird durch das Abtasten des Messszenarios entlang der Azimutrichtung erzeugt. Die Antennenposition x_m kann hierbei auch durch den Beobachtungswinkel θ_m dargestellt werden. r stellt die Entfernungsrichtung zwischen Antennenposition x_m und dem Zielobjekt unter dem Beobachtungswinkel θ_m dar. Abbildung 4.5 zeigt das Aufnahmeszenario eines Punktziels anhand einer linearen Apertur. Die abgefahrene Strecke L_{SAR} ergibt sich durch die Beleuchtungszeit des Punktziels, welche wiederum durch den Abstand r und den Öffnungswinkel θ_{HWB} der Antenne zwischen Punktziel und Antenne vorgegeben ist.

Das Radar bewegt sich schrittweise entlang der Fahrstrecke L_{SAR} und nimmt die Projektionsprofile auf. Abbildung 4.6 zeigt exemplarisch die Entstehung zweier Projektionsprofile im Ortsbereich durch die Projektion der zweidimensionalen Szene auf die durch die Blickrichtung θ_m vorgegebene Projektionsgerade.

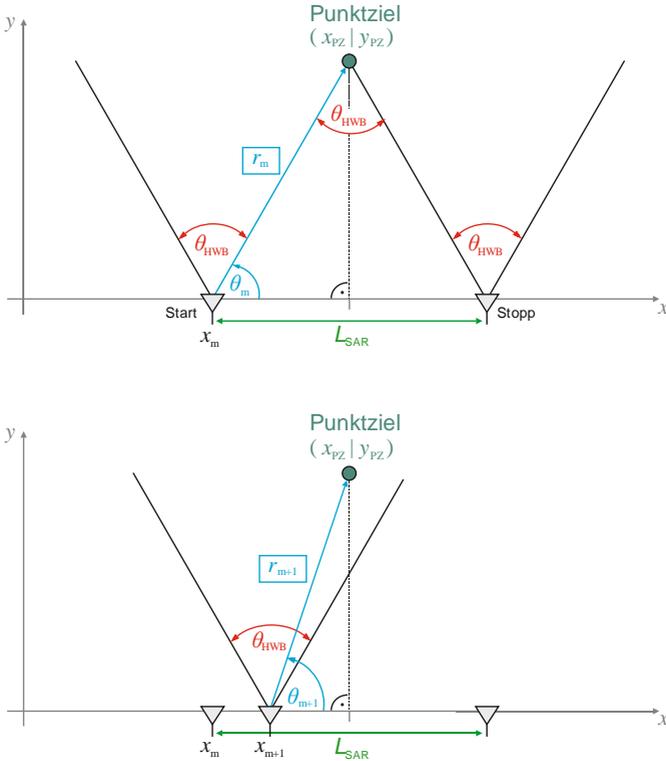


Abb. 4.5: Die geometrischen Verhältnisse bei der Abtastung eines Punktziels mit einer endlichen Apertur L_{SAR} im oberen Bild. Das untere Bild zeigt die Antenne an der Position x_{m+1} , den dazugehörigen Beobachtungswinkel θ_{m+1} und den Punktzielabstand r_{m+1} .

Für den hier beschriebenen Fall eines Punktziels an der Stelle $(x_{PZ}|y_{PZ})$ enthält jede Messung entlang der Fahrstrecke die Entfernungsinformation zwischen Antennenposition und Punktziel. Werden alle Projektionsprofile in einer Grafik zusammengefasst, entsteht der sogenannte Entfernungsverlauf des Punktziels. Der Abstand r zwischen dem Aufnahmesystem und Punktziel $(x_{PZ}|y_{PZ})$ wird durch Gleichung 4.6 beschrieben:

$$r_m = r(x_m) = \sqrt{(x_{pZ} - x_m)^2 + y_{pZ}^2}. \quad (4.6)$$

Hierbei entspricht die Variable x_m der Antennenposition auf der Fahrstrecke. r_m wird auch als Zielentfernungsänderung bezeichnet und nimmt, wenn x_m gegen unendlich strebt, den Charakter einer Geraden an.

Im Bereich der endlichen Fahrstrecke beschreibt die Zielentfernungsänderung einen parabelähnlichen Verlauf, welcher in Abbildung 4.7 deutlich zu erkennen ist.

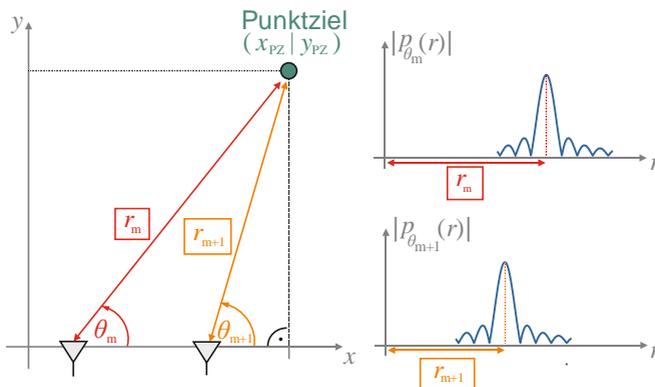


Abb. 4.6: Entstehung zweier Projektionen $p_{\theta_m}(r)$ und $p_{\theta_{m+1}}(r)$ eines Punktziels.

Der Projektionsdatensatz bzw. der Entfernungsverlauf für das abgefahrte Messszenario ist schwer zu analysieren und zu interpretieren, da die Auflösung in Azimutrichtung erst über einen Algorithmus aus den Projektionen prozessiert werden muss. Für die Berechnung der gesuchten Intensitätsverteilung $f(x, y)$ aus den Projektionen gibt es zwei Arten von Rekonstruktionsalgorithmen [Bak15]:

- iterative Rekonstruktionsalgorithmen und
- analytische Rekonstruktionsalgorithmen.

Beim Einsatz iterativer Rekonstruktionsalgorithmen wird im ersten Prozessschritt anhand vorgegebener Objektparameter eine Objektverteilung $f(x, y)$ des Zielobjekts abgeschätzt. Im zweiten Schritt werden die sich aus dieser Schätzung ergebenden Projektionen mit den Originalprojektionen abgeglichen; bei Bedarf – also dann, wenn die Abweichung zu groß ist – wird ein neuer Iterationsschritt eingeleitet. Mit diesem Iterationsschritt wird eine Korrektur der Objektparameter vorgenommen, woraus sich eine neue Objektverteilung ergibt.

Projektions- bzw. Entfernungsprofile

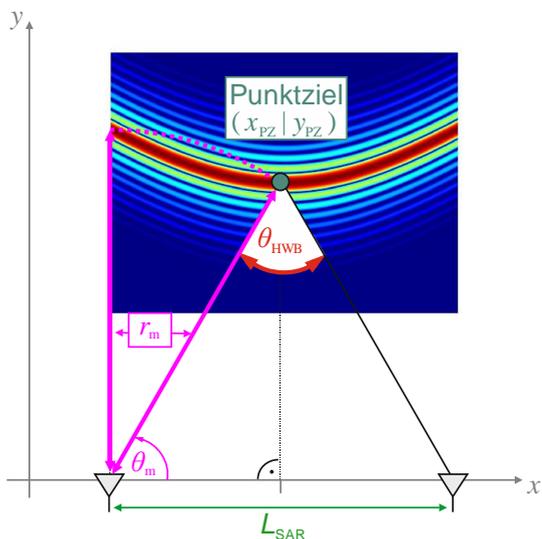


Abb. 4.7: Darstellung des Entfernungsprofils einer Punktzielantwort nach dem Abfahren einer endlichen Apertur.

Dieser Prozess – Abgleichen und Optimieren – wird so lange iteriert, bis ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt ist. Iterative Algorithmen sind im Allgemeinen zwar mit längeren Rechenzeiten verbunden als analytische Rekonstruktionsalgorithmen [Dre17]; ihr entscheidender Vorteil besteht jedoch darin, dass die Objektverteilung mit jedem Iterationsschritt anhand akkurater physikalischer Modellierungen des Zielobjekts

angepasst werden kann [Dre17]. Wenn man die langen Rechenzeiten in Kauf nimmt, können diese iterativen Anpassungen zu einer wesentlichen Verbesserung der Bildqualität von $f(x, y)$ führen [Lal04].

Analytische Rekonstruktionsalgorithmen hingegen verbinden die gesuchte Zielobjektverteilung $f(x, y)$ über eine Integraltransformation mit den aufgenommenen Projektionen. Hier wird durch Inversion der Integraltransformation analytisch auf die gesuchte Intensitätsverteilung des Zielobjekts zurückgerechnet [Sto16]. Zu diesen Algorithmen zählen beispielsweise die Fourier-Rekonstruktion [Doe00] [Ric15] und die Methode der Rückprojektion. Beiden Algorithmen liegt das Fourier-Scheiben-Theorem zu Grunde, welches den formalen Zusammenhang zwischen Zielobjektverteilung und den aufgenommenen Projektionen herstellt [Gar11]. Aufgrund seiner Wichtigkeit für die folgenden Untersuchungen soll das Fourier-Scheiben-Theorem an dieser Stelle genauer erläutert werden.

Die 2D-Fouriertransformierte im Ortskreisfrequenzraum einer Zielobjektverteilung $f(x, y)$ sei gegeben durch $F(k_x, k_y)$ [Doe00]:

$$f(x, y) \circ\bullet F(k_x, k_y). \quad (4.7)$$

Hierbei entsprechen die Variablen k_x und k_y den Ortskreisfrequenzen in x - und y -Richtung. Die Funktion $F(k_x, k_y)$ besitzt die Einheit m^{-2} . Die Ortskreisfrequenz k ist im Allgemeinen wie folgt definiert:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (4.8)$$

λ steht hier für die Wellenlänge. Ferner sei die 1D-Fourier-Transformation der Projektion $p_{\theta_m}(r)$ des abgetasteten Messszenarios gegeben durch:

$$p_{\theta_m}(r) \circ\bullet P_{\theta_m}(k_r), \quad (4.9)$$

wobei die Funktion $P_{\theta_m}(k_r)$ die Einheit m^{-1} besitzt. k_r wird durch Gleichung 4.8 aus den Ortskreisfrequenzen k_x und k_y gebildet:

$$k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}. \quad (4.10)$$

Abbildung 4.8 vermittelt einen bildhaften Eindruck von Gleichung 4.7.

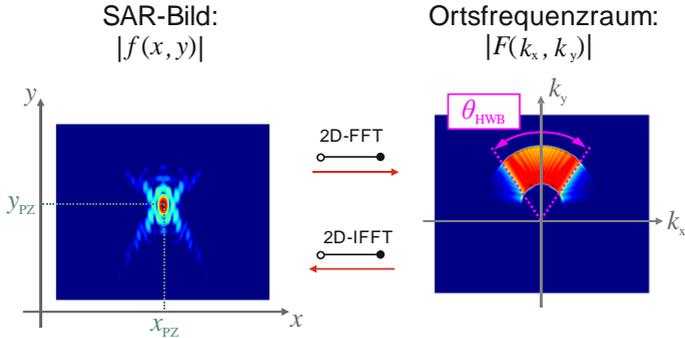


Abb. 4.8: Das SAR-Bild (links) ist über eine 2D-FFT mit dem Ortsfrequenzraum (rechts) verbunden. Das Spektrum im Ortsfrequenzraum wird durch den Beobachtungswinkel θ_{HWB} aufgespannt.

Im linken SAR-Bild ist schematisch die Intensitätsverteilung eines Punktziels abgebildet, während im rechten Bild der Intensitätsverlauf der 2D-Fourier-Transformation für den Ortskreisfrequenzraum dargestellt ist. Die Zielobjektverteilung und das Ortsfrequenzspektrum sind durch Gleichung 4.11 miteinander verknüpft:

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y) e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y. \quad (4.11)$$

Gleichung 4.11 kann durch Einführen von Zylinderkoordinaten auch durch

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} F(k_r, \theta_m) e^{jk_r(x \cos \theta_m + y \sin \theta_m)} |k_r| dk_r d\theta_m \quad (4.12)$$

beschrieben werden. Im nächsten Schritt werden die Integrationsgrenzen geändert. Die Integrationsfläche über $d\theta_m$ wird verkleinert, indem nur noch über die obere Halbebene integriert wird; dafür muss aber die Integrationsfläche über dk_r von minus bis plus unendlich angepasst werden [Jae89]. Die gesamte Integrationsfläche bleibt von der Änderung der einzelnen Integrationsflächen aber unbeeinflusst und somit identisch. Bei der Änderung ist zusätzlich darauf zu achten, dass k_r in den Betrag gesetzt werden muss, damit keine negativen Integrationsflächen entstehen. Die beschriebenen Änderungen überführen Gleichung 4.12 in

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_r, \theta_m) e^{jk_r(x \cos \theta_m + y \sin \theta_m)} |k_r| dk_r d\theta_m. \quad (4.13)$$

Der Abstand r unter dem Beobachtungswinkel θ_m zwischen Ziel und Antenne wird im Allgemeinen durch

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.14)$$

beschrieben, kann aber auch durch den Winkel θ_m und die kartesischen Koordinaten x und y ausgedrückt werden. Da $x = r \cos \theta_m$ und $y = r \sin \theta_m$ gilt, kann r in Gleichung 4.14 auch durch

$$r = \sqrt{xr \cos \theta_m + yr \sin \theta_m} \quad (4.15)$$

ausgedrückt werden. Eine anschließende Quadrierung der Gleichung und Kürzen von r auf der linken und rechten Seite führt zu [Chy03]

$$r = x \cos \theta_m + y \sin \theta_m. \quad (4.16)$$

Gleichung 4.16 kann nun in den Exponenten von Gleichung 4.13 eingesetzt werden. Diese wird damit zu

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_r, \theta_m) e^{jk_r r} |k_r| dk_r d\theta_m. \quad (4.17)$$

Das Fourier-Scheiben-Theorem besagt nun, dass die 1D-Fourier-Transformation der Projektionen $p_{\theta_m}(r)$ die Werte von $F(k_x, k_y)$ auf einem Radialstrahl zum Winkel θ_m beschreiben [Zeg10] [Doe00]. Anders ausgedrückt wird durch das Fourier-Scheiben-Theorem folgender formaler Zusammenhang beschrieben:

$$F(k_r, \theta_m) = P_{\theta_m}(k_r). \quad (4.18)$$

Eine schematische Darstellung des Fourier-Scheiben-Theorems findet sich in Abbildung 4.9. Hier entspricht das linke Bild dem Intensitätsverlauf der Projektionen des abgefahrenen Mess szenarios eines einzelnen Punktziels, welches sich am Ort $(x_{pZ}|y_{pZ})$ befindet. Der Kurvenverlauf der 1D-Fourier-Transformation von $p_{\theta_v}(r)$ beschreibt nach dem Fourier-Scheiben-Theorem den Radialstrahl von $P_{\theta_v}(k_r)$ unter dem Beobachtungswinkel θ_v im Ortskreisfrequenzraum.

Setzt man nun 4.18 in 4.17 ein, führt dies zu

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\theta_m}(k_r) e^{jk_r r} |k_r| dk_r d\theta_m. \quad (4.19)$$

Unter dem Integral über $d\theta_m$ und für $|k_r| = 1 \text{ m}^{-1}$ steht dann nichts anderes als die inverse 1D-Fourier-Transformation von $P_{\theta_m}(k_r)$, welche die Funktion der Projektionen $p_{\theta_m}(r)$ beschreibt.

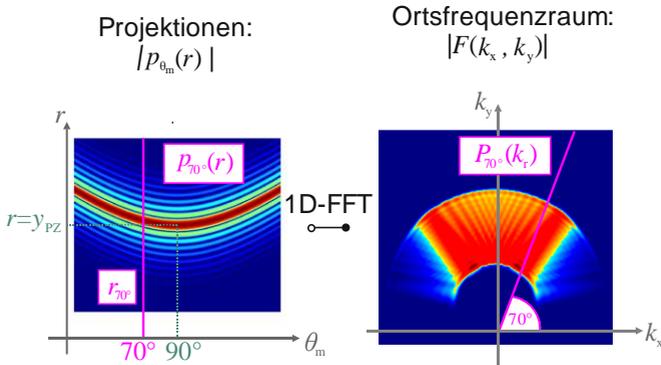


Abb. 4.9: Schematische Darstellung des Fourier-Scheiben-Theorems: Die 1D-Fourier-Transformation der Projektion $p_{70^\circ}(r)$ im linken Bild beschreibt die Werte von $F(k_x, k_y)$ auf einem Radialstrahl unter dem Beobachtungswinkel bei 70° .

Die gesuchte Intensitätsverteilung $f(x, y)$ kann damit aus einem Integral über die gemessenen Projektionsprofile des Messszenarios berechnet werden:

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi p_{\theta_m}(r) d\theta_m. \quad (4.20)$$

Setzt man nun $r = x \cos \theta_m + y \sin \theta_m$ für den Richtungsvektor r in Gleichung 4.20 ein, so erhält man

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^\pi p_{\theta_m}(x \cos \theta_m + y \sin \theta_m) d\theta_m. \quad (4.21)$$

Da der abgetastete Bereich des Messszenarios vom Öffnungswinkel der Antenne abhängt, müssen die obere und untere Integrationsgrenze angepasst werden:

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{\theta_m - \frac{\theta_{HWB}}{2}}^{\theta_m + \frac{\theta_{HWB}}{2}} p_{\theta_m}(x \cos \theta_m + y \sin \theta_m) d\theta_m. \quad (4.22)$$

Um den gesuchten Intensitätswert eines vorgegebenen Punktes (x, y) zu berechnen, müssen also von allen Projektionen p_{θ_m} an der Stelle $x \cos \theta_m + y \sin \theta_m$ die Werte berechnet und anschließend im Bildpixel aufsummiert werden. Diesen Vorgang nennt man Rückprojektion. Eine anschauliche Erklärung der SAR-Aufnahme und Rückprojektion wird in Abbildung 4.10 gezeigt.

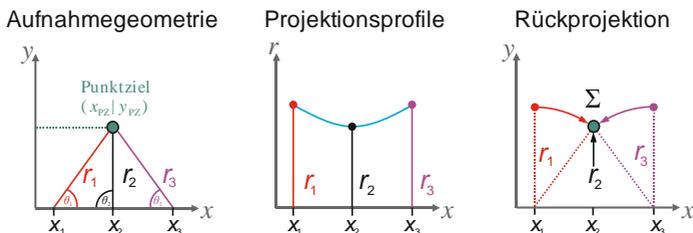


Abb. 4.10: Veranschaulichung des Rückprojektionsalgorithmus gemäß einer linearen Abtastung eines Punktziels in x -Richtung.

Das Radar bewegt sich in x -Richtung und führt schrittweise Radarmessungen an den Positionen x_m durch. Dabei werden die Abstände r_m zum Punktziel an der Position $(x_{pz}|y_{pz})$ gemessen. In dieser Arbeit wird ein Netzwerkanalysator als Send- und Empfangseinheit verwendet. Die aufgenommenen Daten des Punktzielszenarios liegen also zunächst im Ortsfrequenzbereich vor und können durch eine inverse Fourier-Transformation in den Ortsbereich transformiert werden. Werden die dadurch entstandenen einzelnen Abstandsdaten über der Messposition gezeigt, erkennt man den in Abbildung 4.10 mittig dargestellten, parabelähnlichen Verlauf der Zielentfernungsänderung. Der hier gezeigte Abstand r_2 stellt dabei die minimale Entfernung zwischen Ziel und Antenne dar. Der Scheitel des Entfernungprofilverlaufs entspricht der Position des Punktziels an der Stelle $(x_{pz}|y_{pz})$. Nun kann der Rückprojektionsalgorithmus auf den aufgenommenen Projektionsdatensatz (Entfernungprofil des Punktziels) angewendet werden. Da jeder Pixel der Bildmatrix durch die

Funktion $r(x, y, \theta_m) = x \cos \theta_m + y \sin \theta_m$ repräsentiert wird und der Projektionsdatensatz des Punktziels nur aus den Entfernungen $r(x_{PZ}, y_{PZ}, \theta_m) = x_{PZ} \cos \theta_m + y_{PZ} \sin \theta_m$ besteht, kommt es bei der Rückprojektion zu einer Summenbildung aller Intensitätswerte dieser Funktion $r(x_{PZ}, y_{PZ}, \theta_m)$ des Projektionsdatensatzes in Pixel $(x_{PZ}|y_{PZ})$ und dort somit zu einem Intensitätsmaximum. Abbildung 4.11 zeigt schematisch, wie sich durch das schrittweise Aufsummieren aller Abstandswerte in die Pixel der Zielobjektverteilung die Punktzielantwort eines Punktzielszenarios gemäß Abbildung 4.5 ergibt.

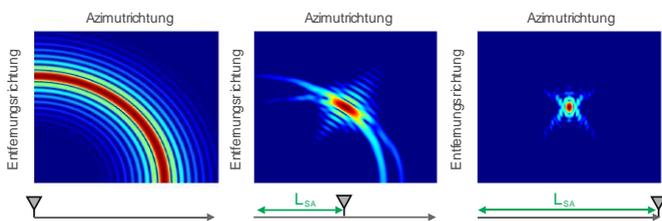


Abb. 4.11: Evolutionäre Darstellung des Prinzips der Rückprojektion für einen monostatischen Messaufbau im Streifenmodus zur Abbildung der Punktzielantwort.

Im linken Bild sind alle Werte der ersten Projektion $p_0(r)$ in die Pixelmatrix der Zielobjektverteilung eingetragen. Im mittleren Bild sind 50 % der Fahrstrecke abgefahren, und es wurden die Werte der Projektionen von $p_0(r)$ bis $p_{L_{SAR}/2}(r)$ in die Pixelmatrix der Zielobjektverteilung aufsummiert. Die Form einer Punktzielantwort ist bereits ansatzweise erkennbar. Das Bild auf der rechten Seite zeigt das Ergebnis einer vollständig abgefahrenen Fahrstrecke. Die Werte aller Projektionsfunktionen $p_{L_{SAR}}(r)$ wurden phasenkohärent in die Pixelmatrix aufsummiert und ergeben somit das prozessierte Radarbild einer Punktzielantwort. Der hier beschriebene Aufnahmemodus, bei dem der Öffnungswinkel der Antenne kontinuierlich vertikal zum Messzenario entlang einer linearen Achse bewegt wird, wird auch lineares SAR bzw. Stripmap-SAR genannt [Kra02] [Sce11].

4.3 Einfluss der Mehrwegeausbreitung auf die Azimutauflösung

In den vorangehenden Unterkapiteln wurde angenommen, dass sich die elektromagnetischen Wellen im Vakuum ausbreiten. Diese Annahme ist bei der Ausbreitung in Mehrschichtmedien nicht mehr zulässig. Die unterschiedlichen Permittivitäten der einzelnen Schichten führen zu einer Verlangsamung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen und somit zu einer Verlängerung des Ausbreitungszeit. Diese Verlängerung muss bei der Rückprojektion miteinberechnet werden, um kohärent in die Pixelwerte der Bildmatrix aufsummieren zu können. Das Fermatsche Prinzip besagt, dass elektromagnetische Wellen zwischen Quelle und Zielpunkt immer dem kürzesten optischen Weg folgen, d.h. dem Weg mit der geringsten Laufzeit [Mes08]. Abbildung 4.12 zeigt hierzu schematisch den Ausbreitungsweg für einen einschichtigen und zweischichtigen Fall.

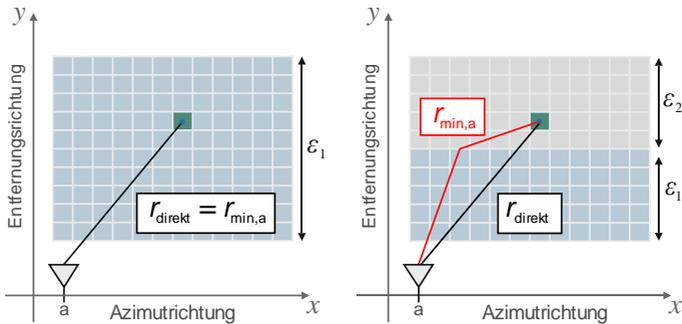


Abb. 4.12: In einem Einschichtsystem (links) entspricht der minimale Ausbreitungsweg der Geraden zwischen Antennenposition und Zielpixel. In einem Mehrschichtsystem ($\epsilon_2 > \epsilon_1$) müssen die Wege über das Fermatsche Prinzip berechnet werden. Die Antenne befindet sich in Medium 1.

Im einschichtigen Fall (links) lässt sich der minimale Ausbreitungsweg zwischen Antenne und Zielpixel aus der Geraden zwischen Antennenposition und Zielpixel berechnen. Für den zweischichtigen Fall (rechts) kann es aufgrund des mehrschichtigen Aufbaus hingegen sein, dass der direkte Weg von Antenne ins Zielpixel nicht dem Weg mit der kürzeren Laufzeit

entspricht. Den kürzesten Weg in das Zielpixel erhält man in diesem Fall stattdessen, indem alle möglichen Ausbreitungswege innerhalb vorgegebener Grenzen von der Antennenposition in das Zielpixel berechnet werden und aus den so berechneten Ausbreitungswegen die kürzeste Variante ausgewählt wird. Dieser Vorgang wird für alle Pixel in der Bildmatrix wiederholt, bis das Ende der Fahrstrecke erreicht ist.

Anhand zweier Beispiele sollen im Folgenden die Auswirkungen einer Nichtberücksichtigung der korrekten Ausbreitungswege auf die Fokussierung eines Punktziels erläutert werden. Zunächst wird ein Punktzielszenario im einschichtigen Fall bei einer Ausbreitung im Vakuum für eine Permittivität von $\epsilon'_r = 1$ betrachtet. Das Punktziel befindet sich hier am Ort ($x_{\text{PZ}} = 1 \text{ m} | y_{\text{PZ}} = 1 \text{ m}$). Im zweiten Beispiel befindet sich die Punktquelle in einem Zweischichtmedium, dessen erste Schicht eine Permittivität von 1 und dessen zweite Schicht eine Permittivität von 2 besitzt. Das Punktziel befindet sich auch hier am Ort ($x_{\text{PZ}} = 1 \text{ m} | y_{\text{PZ}} = 1 \text{ m}$) im Medium 2. Abbildung 4.13 oben zeigt schematisch das Simulationsszenario für den ein- bzw. zweischichtigen Fall. Der Beobachtungswinkel der Antenne beträgt für die Simulation 90° ; damit kann das Punktziel über eine Fahrstreckenlänge von 2 m ausgeleuchtet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind alle Simulationsparameter in der nachfolgenden Tabelle noch einmal vollständig aufgelistet:

Tab. 4.1: Parameter für die Simulation der Punktzielszenarien eines Einschicht- und eines Zweischichtsystems.

Variable	Wert
Position Punktquelle ($x_{\text{PZ}} y_{\text{PZ}}$)	(1 m 1 m)
Länge Schicht 1 [m]	0,9
Länge Schicht 2 [m]	1,0
Permittivität Schicht 1: $\epsilon'_{r,1}$	1,0
Permittivität Schicht 2: $\epsilon'_{r,2}$	2,0
Frequenzbereich [GHz]	1 - 8
Fahrstrecke L_{SA} in Azimutrichtung [m]	2
Schrittweite Δx [cm]	1,0
Halbwertsbreite Antenne	90°

In Abbildung 4.13 links unten ist die SAR-Punktzielantwort für den Fall der Ausbreitung im Vakuum dargestellt; ergänzend dazu ist im Bild rechts unten die unfokussierte SAR-Punktzielantwort des Zweischichtsystems abgebildet.

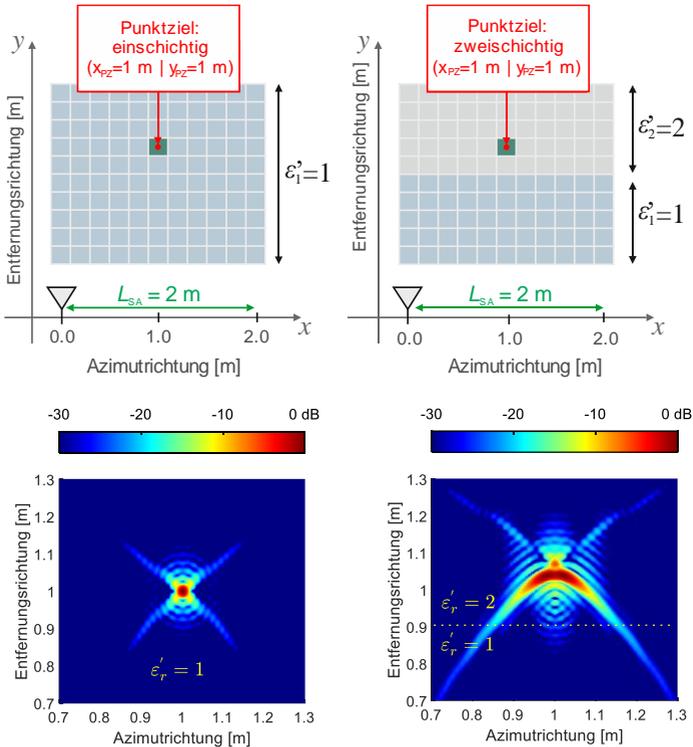


Abb. 4.13: Links unten: SAR-Bild einer Punktzielantwort, die sich im Vakuum befindet. Rechts unten: Einfluss einer zweiten Permittivität auf das SAR-Bild, wenn diese bei der Rückprojektion nicht berücksichtigt wird.

Unfokussiert heißt in diesem Fall, dass bei der Rückprojektion die Ausbreitungswege für den einschichtigen Fall des Vakuums angenommen wurden. Deutlich erkennbar wird im Bild rechts dementsprechend die Degradierung der Zielantwort entlang der Azimutrichtung. Zusätzlich zu dieser Degradierung wird das Punktziel nicht korrekt am Ort

($x_{pZ} = 1 \text{ m} | y_{pZ} = 1 \text{ m}$) dargestellt, sondern erscheint auf der Höhe von $y_{pZ} = 1,05 \text{ m}$. Um solche Fehler zu vermeiden, ist es notwendig, die korrekten Ausbreitungswege zwischen Antenne und Zielpixel zu berechnen. Sind die Anzahl der Schichten, die Schichtpermittivitäten und die Schichtdicken bekannt, bietet es sich zunächst an, mit der *brute-force*-Methode jeden möglichen Ausbreitungsweg zwischen Antennenposition und Zielpixel der Bildmatrix zu berechnen und anschließend für jedes Antennenposition-Zielpixel-Paar das Minimum aus den berechneten Ausbreitungswege zu wählen [Est05]-[Hei16].

Für ein Zweischichtproblem, einer Bildmatrix der Größe 500×500 und 200 Antennenmesspositionen ergibt sich hierbei schnell eine Anzahl möglicher Ausbreitungswege, die in der Größenordnung $>10^7$ liegt. Da die Berechnungsdauer für alle möglichen Ausbreitungswegkombinationen mit jeder weiteren Schicht zunimmt, wurde in dieser Arbeit ein Algorithmus auf Basis des Newton-Verfahrens entwickelt, um iterativ den minimalen Ausbreitungsweg in jeden Pixel für Zwei-, Drei- und Vierschichtsysteme in möglichst kurzer Zeit zu berechnen. Der Ausbreitungsweg für ein Zweischichtproblem ist gegeben durch:

$$\begin{aligned} r(x_a, x_p, y_p) &= \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{(x_a - x_1)^2 + y_1^2} \\ &+ \sqrt{\varepsilon_2} \cdot \sqrt{(x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2}. \end{aligned} \tag{4.23}$$

Der Punkt $(x_1 | y_1)$ beschreibt hier den Durchstoßpunkt an der Grenze von Schicht eins zu Schicht zwei. x_a stellt den Ort der Antennenposition dar und ist wie der Pixelwert $(x_p | y_p)$ gegeben. Ziel ist es, nun den Wert x_1 zu ermitteln, sodass r minimal wird. Die Berechnung von x_1 erfolgt anhand des Approximationsalgorithmus auf der Basis des Newton-Verfahrens; der formale Zusammenhang zur Berechnung der Extremwerte für ein Optimierungsproblem ist in Gleichung 4.24 gegeben [Ulb12]:

$$\chi_1^{(n+1)} = \chi_1^{(n)} - \frac{\frac{\partial r}{\partial \chi_1}}{\frac{\partial^2 r}{\partial \chi_1^2}}. \quad (4.24)$$

Als Startwert für χ_1^0 wird der Punkt auf der Abszisse des Schnittpunkts gewählt, der entsteht, wenn die Gerade von der Antennenposition in das Zielpixel den Grenzübergang von Schicht eins in Schicht zwei schneidet. Nach fünf Iterationsschritten konnten alle Werte für χ_1 mit hinreichender Genauigkeit gefunden werden. Mit dieser Kenntnis der χ_1 -Werte können nun die korrekten Abstandswerte nach Gleichung 4.14 berechnet und in die Rückprojektion implementiert werden. Die Implementierung der korrekten Abstandswerte führt zu der in Abbildung 4.14 dargestellten Punktzielantwort.

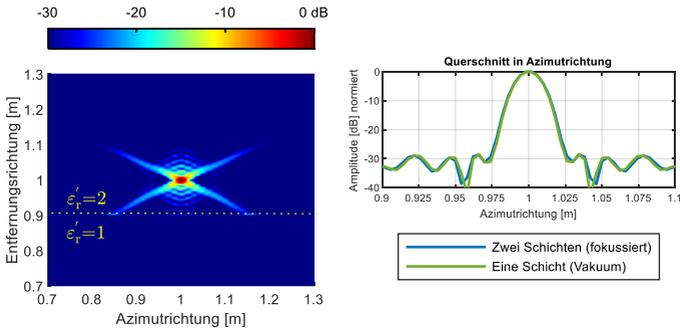


Abb. 4.14: Links: Fokussierte Zielantwort des Punktziels. Rechts: Querschnitt entlang der Azimutachse für die fokussierte Zielantwort und die Ausbreitung im Vakuum aus Abbildung 4.13 rechts.

Die Punktzielantwort erscheint nun nicht mehr „verschmiert“, sondern ortskorrekt am Punkt ($x_{pZ} = 1 \text{ m} \mid y_{pZ} = 1 \text{ m}$). Wird der Querschnitt entlang des Punktziels auf der Höhe von 1,0 m entlang der Azimutrichtung betrachtet, so ergibt sich der in Abbildung 4.14 rechts in blau dargestellte Kurvenverlauf für das fokussierte Punktziel sowie der in grün dargestellte Kurvenverlauf für den Querschnitt in Azimutrichtung für die Punktzielantwort aus Abbildung 4.13 links. Durch die Berücksichtigung der korrekten Ausbreitungswege erhält man in beiden Fällen die gleiche

Auflösung in Azimutrichtung, die durch die Fahrachsenlänge bzw. den Beobachtungswinkel vorgegeben wird. In Entfernungsrichtung kommt es bei der Punktzielantwort in Abbildung 4.14 links zusätzlich zu einer Verbesserung der Auflösung in Entfernungsrichtung. Im Fall der Simulation beträgt die Entfernungsaufklärung 1,9 cm bei einer Bandbreite von 7 GHz im Vakuum. Da die Brechzahl miteinberechnet werden muss, ergibt sich eine Auflösung von 1,4 cm.

Eine weitere interessante Untersuchung betrifft den Einfluss falscher Annahmen über Permittivitätswerte auf die Berechnung der Ausbreitungswege zwischen Zielszenario und Sendesystem. Abbildung 4.15 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Permittivitäten auf die Azimutaufklärung eines Punktzielszenarios in einem Zweischichtsystem. Das Punktziel befindet sich hier an der Stelle ($x_{PZ} = 1 \text{ m} | y_{PZ} = 1 \text{ m}$). Die erste Schicht besitzt eine Permittivität von $\epsilon'_{r,1} = 1$, die zweite Schicht eine Permittivität von $\epsilon'_{r,2} = 4$. Alle weiteren Simulationsparameter sind in Tabelle 4.1 angegeben.

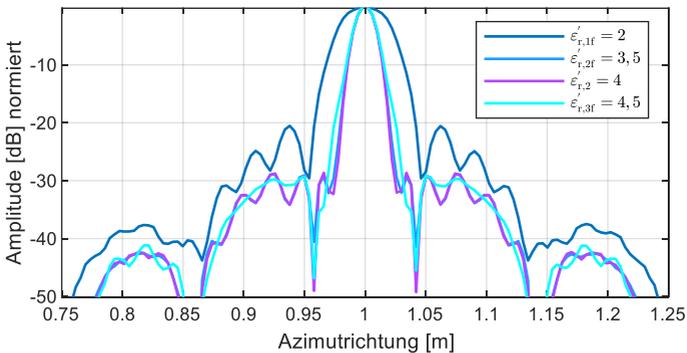


Abb. 4.15: Die Abbildung zeigt den Querschnitt in Azimutrichtung durch eine Punktzielantwort in einem Zweischichtsystem. Werden falsche Permittivitätswerte für die Berechnung der Ausbreitungswege in der zweiten Schicht angenommen, kommt es zu einer unerwünschten Verschlechterung der Azimutaufklärung.

Für eine fälschlich angenommene Permittivität von $\epsilon'_{r,1f} = 2$ für das zweite Medium zeigt sich in Form der sichtbaren Verbreiterung der 3 dB-Breite eine deutliche Abweichung in der Azimutaufklärung. Die

Azimutauflösung beträgt hier 4 cm und hat sich damit gegenüber der eigentlichen Auflösung von 1,6 cm mehr als verdoppelt. Für die Permittivitäten von $\epsilon'_{r,2f} = 3,5$ und $\epsilon'_{r,3f} = 4,5$ ergeben sich vernachlässigbare Abweichungen von wenigen mm. Die relativen Abweichungen der beiden Permittivitäten liegen unterhalb von 10 %, wenn die Wurzelwerte der Permittivitäten mit dem Wurzelwert der eigentlichen Permittivität von $\epsilon'_{r,2} = 4$ verglichen werden. Die relativen Abweichungen liegen hier in derselben Größenordnung wie die relativen Fehler aus den Rückrechnungen in Kapitel 3. Die SAR-Algorithmik verzeiht hier also kleinere Fehler bezüglich der Auflösung in Azimutrichtung. Die Betrachtungen dieses Kapitels und denjenigen in Kapitel 3 geben daher die wichtige Erkenntnis, dass die Berücksichtigung der Permittivität unverzichtbar ist, dass aber gleichzeitig realistische Abweichungen in der Genauigkeit der Kenntnis der Permittivität toleriert werden können.

Die Ergebnisse der hier angestellten Überlegungen und Messungen stellen somit eine vielversprechende Grundlage für bildgebende Untersuchungen von unbekanntem Gebäudestrukturen dar.

4.4 Zusammenfassung

In Kapitel 4 wurde die entwickelte Methodik zur Berechnung der Permittivitäten für die einzelnen Schichten eines Mehrschichtsystems mit unbekanntem Parametern vorgestellt. Neben der Berechnung der Permittivität kann die bildhafte Darstellung der zu untersuchenden Wandstruktur als ein elementares Werkzeug zur Beurteilung eines unbekanntem Wandaufbaus angesehen werden. Die Auflösung in Entfernungsrichtung, also in Blickrichtung der Antenne zur Wand hin, wird hierbei durch die Bandbreite des Radarsystems vorgegeben. Zusätzlich lässt sich die Wandstruktur nun auch lateral, also in Azimutrichtung fokussiert darstellen. Mit Hilfe des Prinzips der synthetischen Apertur (SAR) können auch mit kleinen Antennen große Aperturen erzeugt werden, wodurch die Auflösung in Azimutrichtung erhöht werden kann. Vereinfacht ausgedrückt wird beim Abfahren des Messszenarios das Ortsfrequenzspektrum abgetastet. Mit Hilfe des Rückprojektionsalgorithmus kann aus den durchgeführten Radarmessungen ein erstes Rohdatenbild rekonstruiert werden.

Laufzeitverlängerungen des Ausbreitungswegs zwischen Sendesystem und Zielobjekt, die gegebenenfalls durch die unterschiedlichen Schichtpermittivitäten in mehrschichtigen Messszenarios erzeugt werden, führen bei der Bildrekonstruktion zu Verschmierungseffekten der Zielantwort, wenn die Permittivität nicht berücksichtigt wird. Sind die Anzahl der Schichten, die Schichtpermittivitäten und die Schichtdicken bekannt, können mit Hilfe des Newton-Verfahrens jedoch die richtigen Ausbreitungswege berechnet werden. Mit den so berechneten korrekten Ausbreitungswegen können die Rohdaten korrigiert und somit das SAR-Bild fokussiert werden. Es konnte gezeigt werden, dass Abweichungen in einer Größenordnung unterhalb von 10 % gegenüber den korrekten Permittivitäten nicht zwangsläufig zu einer Degradierung des SAR-Bildes eines Punktzielszenarios führen. Im nachfolgenden Kapitel werden nun erste SAR-Aufnahmen von Wandstrukturen vorgestellt, die deutlich von der Einfachheit der Punktzielantwort abweichen.

5 Untersuchung von bekannten Wandstrukturen

In den beiden vorangegangenen Kapiteln wurden die entwickelten Methoden vorgestellt, die eine möglichst realitätsnahe Bildgebung und Strukturinformation bezüglich einer unbekanntem Wandstruktur erlauben. In diesem Kapitel werden die vorgestellten bildgebende Verfahren an bekannten Wandaufbauten vorgestellt. Die Untersuchungen in diesem Kapitel behandeln Wandaufbauten aus einer einzigen Steinart. Die dabei verwendeten Steine können, wie in Kapitel 3 erwähnt, über eine einfache, homogene oder aber über eine komplexe, inhomogene Innengeometrie verfügen. Steine mit komplexer Innengeometrie kann man auch als Sonderfall eines mehrschichtigen Wandaufbaus betrachten, bei denen sich jedoch die Schichtung in Azimutrichtung schnell verändert. Zunächst soll aber in Kürze der verwendete Messaufbau vorgestellt werden.

5.1 Messaufbau

Die integralen Bestandteile des Messaufbaus sind eine Motorsteuereinheit zur Steuerung eines Schrittmotors, eine lineare Fahrachse und ein PC zur Ansteuerung aller Komponenten. Als Radar fungiert in dieser Messkonfiguration ein Netzwerkanalysator, mit dem die Reflexionsmessungen an den Wandaufbauten durchgeführt werden. Die zu untersuchenden Messszenarien wurden sowohl mit einer als auch mit zwei Antennen abgefahren, und je nach Aufnahmekonfiguration wurde eine S_{11} -Messung oder eine S_{21} -Messung vorgenommen. Die zu untersuchende Wand wurde hierbei in einer echofreien Kammer im Labor aufgebaut, um mögliche Reflexionen von der Umgebung auszuschließen. Die Antenne wurde auf einem Gestell montiert, welches variable Abstände zwischen Antenne und Wand zulässt. Um in Entfernungsrichtung eine möglichst hohe Auflösung ($<3\text{ cm}$) zu erreichen, wurden Breitbandantennen eingesetzt. In der Anfangsphase dieser Arbeit wurden hierzu ein Steghorn [Ain14] im Frequenzbereich von 1 GHz bis 8 GHz und ein Quad-Ridged-Horn [Ain08]

im Frequenzbereich von 2 GHz bis 18 GHz eingesetzt. Später wurden die Untersuchungen mit einer Steghornantenne der Firma RF Spin [Rfs21] fortgesetzt, da diese die Vorteile der beiden zuvor genannten Antennen in sich vereint, indem sie eine möglichst hohe Bandbreite bei gleichzeitiger Abdeckung der Frequenzen im unteren sowie im oberen Frequenzbereich ($<2\text{ GHz}$ und $>8\text{ GHz}$) ermöglicht. Die Antenne arbeitet im Rahmen der hier durchgeführten Messungen im Frequenzbereich zwischen 0,8 GHz und 18 GHz.

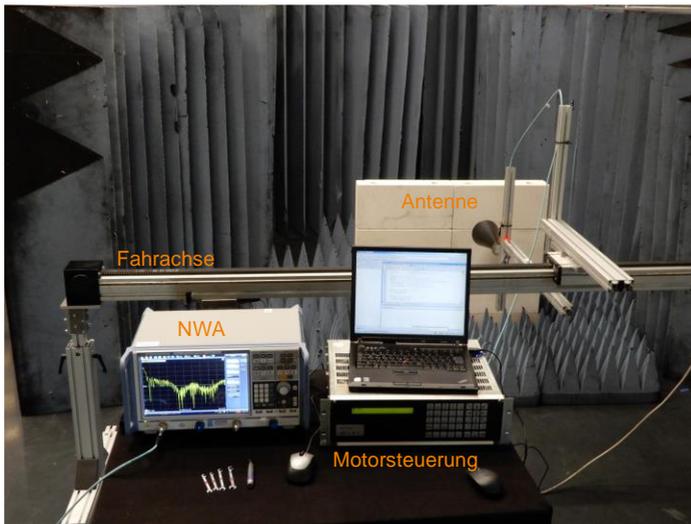


Abb. 5.1: Foto des Messaufbaus. Der Wandaufbau befindet sich innerhalb einer echofreien Kammer. Dargestellt sind unter anderem der Netzwerkanalysator, die Motorsteuerung, der PC und die Antenne. Das verwendete Material für die Steinreihe ist im dargestellten Fall Lochkalksandstein.

In Tabelle 5.1 sind die Merkmale aller verwendeten Antennen sowie die zugehörigen Parameter aufgelistet. Wie man sieht, besitzt Steghorn 2 [Rfs21] mit einer Bandbreite von 17,2 GHz eine wesentlich höhere Bandbreite als Steghorn 1 mit einer Bandbreite von 7 GHz. Steghorn 1 besitzt im unteren Frequenzbereich jedoch eine besser fokussierende Halbwertsbreite. Diese beträgt beispielsweise 56° bei 1 GHz, wohingegen

Steghorn 2 hier eine Halbwertsbreite von knapp 100° besitzt. Eine kleinere Halbwertsbreite kann einen Vorteil bei der Erzeugung einfacher Entfernungprofile ohne SAR-Fokussierung darstellen, da sich Kanteneffekte weniger stark im Bild niederschlagen und weil bei größeren Halbwertsbreiten Reflexionen in der Blickrichtung der Antenne durch Signale aus dem äußersten Sichtbereich der Antenne zu Artefakten im Bild führen können. Größere Halbwertsbreiten können jedoch ebenfalls Vorteile haben; beispielsweise können sie genutzt werden, um eine bessere Azimutauflösung zu generieren, wenn zur Bildgebung das SAR-Prinzip angewendet wird.

Tab. 5.1: In der Tabelle sind die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Breitbandantennen zur Untersuchung der Steinstrukturen dargestellt.

Antenne	Steghorn 1	Quad-Ridged-Horn	Steghorn 2
			
Frequenzbereich [GHz]	1–8	2–18	0,8–18
Halbwertsbreite [deg]	56–37	80–30	120–20
Gewinn [dBi]	1–11	8,5–19	1–14

Im nachfolgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse der Untersuchungen an Steinen mit homogener Innenstruktur vorgestellt.

5.2 Wandstrukturen aus Steinen mit homogener Innenstruktur

Zunächst werden repräsentative Messergebnisse für einschichtige Wandstrukturen aus Steinen mit homogener Innenstruktur vorgestellt. Für diese

Untersuchungen wurde ein Wandsegment bestehend aus drei nebeneinander gereihten Vollziegelsteinen aufgebaut. Die Höhe des Wandsegments betrug ebenfalls drei Steinreihen. Das Wandsegment hatte somit eine Länge von 63 cm und eine Höhe von 21 cm. Die Steine wurden aber ohne verbindenden Mörtel nebeneinander bzw. aufeinander gesetzt. Der Abstand zwischen der Antenne und der Wand betrug knapp 10 cm. Die Aufnahme erfolgte im monostatischen Messbetrieb (S_{11}) mit Steghorn 1 (siehe Tabelle 5.1). Sofern im Text nicht anders angeführt, gelten die folgenden Messparameter:

Tab. 5.2: Messparameter für die Vollziegelsteinmessung.

Variable	Wert
Abstand Antenne–Wand	10 cm
Frequenzbereich	1 – 8 GHz
Frequenzpunkte	1601
Zwischenfrequenzbandbreite	1 kHz
Sendeleistung	0 dBm
Abtastschrittweite in Azimut	1 cm
Polarisation	vertikal

Werden die einzelnen Entfernungsprofile nacheinander in einen Plot aufgetragen, ergibt sich das sogenannte Wasserfallplot (Wasserfalldiagramm) [Kno04]. Abbildung 5.2 zeigt im linken Teil des Bildes den ungefilterten Wasserfallplot der Radaraufnahme und im rechten Teil des Bildes eine gefilterte Variante derselben Bildaufnahme. Bei der Filterung wurde das Von-Hann-Fenster benutzt [Kam09]. Der positive Effekt einer Filterung im Frequenzbereich mit dem Von-Hann-Fenster besteht in der Reduzierung der Nebenkeulen im Bild; der Nachteil besteht darin, dass sich dadurch allerdings die Auflösung in Entfernungsrichtung verschlechtert und zwar von 1,9 cm auf 2,6 cm [And14] [A2]. In Abbildung 5.2 links lässt sich die erste Schicht anhand des starken Reflexionssignals bei ① entlang der Azimutrichtung in Entfernungsrichtung bei 0,1 m erkennen. Das Ende des Steins wird durch die Reflexion bei ② durch die ebenfalls dominante Reflexion entlang der Azimutrichtung dargestellt. Innerhalb der beiden Reflexionen sind vereinzelt die Nebenkeulen der ersten

Übergangsgrenze Luft–Stein erkennbar; diese dominieren noch sehr stark und bewegen sich bis hin zu 15 cm in Entfernungsrichtung um das Niveau von -10 dB. Der positive Effekt, der von der Von-Hann-Filterung ausgeht, zeigt sich im Bild rechts [A2]. Hier werden durch die Filterung die Nebenkeulen der Übergangsreflexionen gedämpft. Beispielsweise erscheint die erste Reflexion bei ③ im Bild rechts wesentlich kontrastreicher und hebt sich somit stärker von der Umgebung ab als im ungefilterten Bild links. Im rechten wie im linken Bild treten an den Stoßstellen Intensitätsminima entlang des Endes des Steins bei ⑤, ⑥, ⑦ und ⑧ auf.

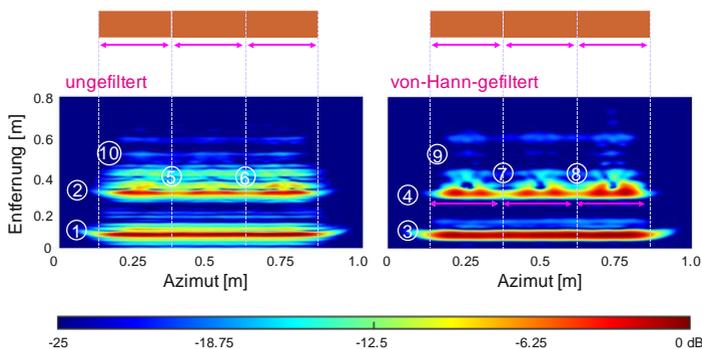


Abb. 5.2: Abgebildet sind die Wasserfallplots der Vollziegelsteinaufnahme. Links: Ungefilterte Aufnahme, rechts: Von-Hann-gefilterte Variante.

Es sei hierbei nochmals erwähnt, dass die Steine bündig aneinandergereiht wurden, sodass zwischen den einzelnen Steinen keine merklichen Spalte bestanden. Ferner zeigen sich Mehrfachreflexionen des Steins und des Systems Stein–Antenne nach dem Ende des Steins (②) in den Bereichen bei ⑩ im linken und bei ⑨ im rechten Bild entlang der Azimutrichtung.

In Abbildung 5.3 sind die SAR-Ergebnisse der Rückprojektion dargestellt, welche auf die Entfernungsprofile aus Abbildung 5.2 angewendet wurde.

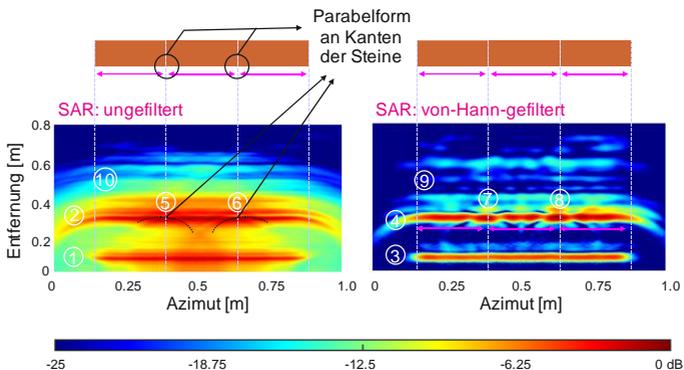


Abb. 5.3: Dargestellt sind die SAR-prozessierten Bilder der Vollziegelsteinreihe aus Abbildung 5.2. Links: Ungefiltertes SAR-Bild; rechts: Von-Hann-gefiltertes SAR-Bild.

An den Stellen ⑤ und ⑥ lässt sich durch die SAR-Prozessierung eine weitere Beobachtung ableiten. Hier kommt es zu zwei auffälligen Mustern, die einer Kreis- bzw. Parabelform ähneln. Verdeutlicht wird dies durch die gestrichelte Linie bei ⑥. In ähnlicher Weise treten diese Muster auch bei ⑦ und ⑧ in der Abbildung rechts auf. Diese Muster können als Indikator für einen Spalt bzw. einen Übergang zwischen zwei Steinen dienen und somit zukünftig bei der Auswertung unbekannter Wandstrukturen Aufschluss über die Längendimensionen der Steine geben. In Abbildung 5.3 rechts lässt sich der Summationseffekt innerhalb der beiden Hauptreflexionen nach der Anwendung der Rückprojektionsmethode nicht erkennen, da hier die dafür notwendigen Nebenkeulenwerte durch die Anwendung des Von-Hann-Filters unterdrückt wurden. An den Stellen ⑦ und ⑧ kommt es an den Stoßstellen der Steine zu einer Erhöhung der Signalpegel. In den Wasserfallplots der Entfernungprofile sind die Stoßstellen durch Intensitätsminima gekennzeichnet; in den SAR-prozessierten Bildern ergeben sich hier hingegen Intensitätsmaxima und zusätzlich die Parabelverläufe, die je nach gewähltem Dynamikbereich stärker oder schwächer auftreten. Ein anderes Aussehen zeigt sich in Abbildung 5.4. Hier wurden für beide SAR-Bilder bei der SAR-Prozessierung nun die korrekten Permittivitäten für den Ziegelstein berücksichtigt.

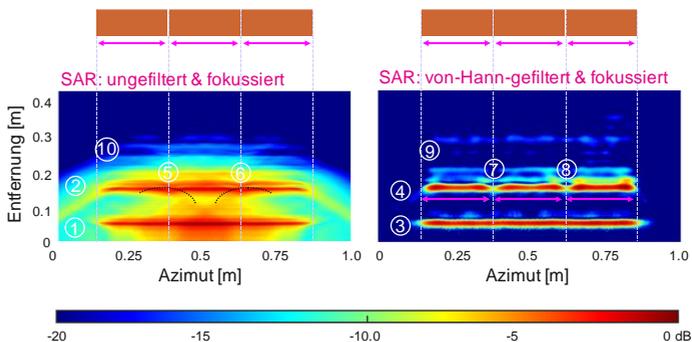


Abb. 5.4: Fokussierte SAR-Bilder aus Abbildung 5.3 unter Berücksichtigung der korrekten Permittivität.

Dadurch ergibt sich in Entfernungsrichtung eine verbesserte Auflösung, was sich in der Verkleinerung der Halbwertsbreiten der Reflexionsmaxima im Bildverlauf bei ①, ②, ③ und ④ zeigt. Im linken, ungefilterten Bild dominieren weiterhin die hohen Signalanteile im Bild, die durch die Nebenkeulen der Entfernungsprofile entstehen. Hier zeigt sich kein besonderer Vorteil durch die Integration der Permittivität des Ziegelsteins in der Prozessierung. Lediglich die Intensitätsmaxima bei ⑤ und ⑥ verschwinden und es erscheinen Intensitätsminima an den Stoßstellen der Steine. Anders hingegen stellt sich die Situation im Von-Hann-gefilterten SAR-Bild rechts dar. Hier zeigt sich klar ein Vorteil der Filterung der Entfernungsprofile und der Miteinbeziehung der Permittivität in die SAR-Prozessierung: Die Stoßstellen der Steine bei ⑦ und ⑧ sind hier deutlich erkennbar, woraus sich die Längen der einzelnen Steine eindeutig ablesen lassen.

In Abbildung 5.5 sind die SAR-prozessierten Ergebnisse einer vierreihigen Vollziegelsteinwand dargestellt. Bei dieser Messung wurde das Quad-Ridged-Horn (siehe Tabelle 5.1) verwendet und die komplette Bandbreite von 2 GHz bis 18 GHz ausgenutzt.

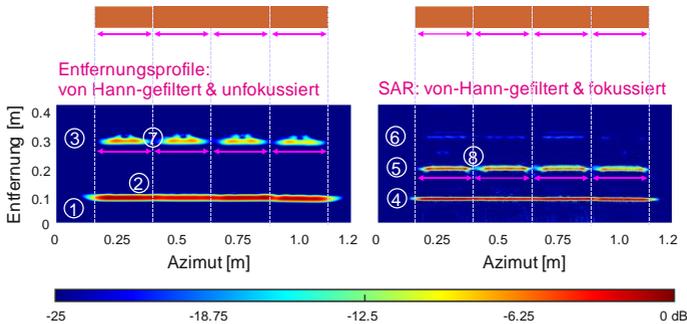


Abb. 5.5: Radarbilder einer vierreihigen Ziegelsteinwand. Links: Wasserfallplot der unfokussierten Entfernungprofile. Rechts: Fokussiertes SAR-Bild unter Einbeziehung der Permittivität, welches aus den im linken Bild zu sehenden Entfernungprofilen prozessiert wurde.

Beim linken Bild handelt es sich um den Wasserfallplot der Von-Hann-gefilterten Entfernungprofile. Auffällig ist hier vor allem die verbesserte Entfernungsauflösung, welche in diesem Fall bei 0,8 cm liegt und damit um das 2,4-fache besser ist als die Entfernungsauflösung der zuvor gezeigten dreireihigen Ziegelsteinaufnahmen. Wie schon im Fall der vorigen Wandaufbauaufnahmen ersichtlich, treten auch hier bei ① und ③ in Azimutrichtung die Reflexionen des Steinanfangs und -endes auf. In Abbildung 5.2 rechts sind noch deutliche Intensitätsverläufe nach der Reflexion des Wandanfangs und des Wandendes erkennbar. Eigentlich wäre zu erwarten, dass diese auch bei ② und nach ③ in Abbildung 5.5 links wieder auftreten, was jedoch nicht der Fall ist. Dies hat zwei Ursachen: Erstens werden bei der Bildgenerierung die Signalanteile im unteren Frequenzbereich ($< 8\text{ GHz}$) aufgrund der hohen prozessierten Bandbreite weniger stark gewichtet als in den Aufnahmen aus Abbildung 5.2 (Frequenzbereich zwischen 1 und 8 GHz), und zweitens fällt der Frequenzbereich unterhalb von 2 GHz komplett weg. Dies führt dazu, dass die Stoßstellen der Steine aufgrund der fehlenden Reflexionsartefakte im Wasserfallplot deutlicher hervortreten (z.B. bei ②). Wird nun die Rückprojektion auf die gefilterten Entfernungprofile aus Abbildung 5.5 links angewendet, so erhält man das rechts dargestellte SAR-Bild. Hier wurde bei der Prozessierung die Permittivität des Vollziegelsteins berücksichtigt. Die Reflexionen ④ und ⑤ erscheinen dadurch schmaler als in der unfokussierten Variante bei ① und ③ im Bild links. Wie im Wasserfallplot links zeigen sich auch hier die Stoßstellen der aneinandergereihten Steine (z.B. bei ⑥).

Zusätzlich erscheinen die Enden der Steine bei © ohne Intensitätsabfall in der Mitte jedes Einzelsteins; hier tritt für jeden Stein eine konstante Intensitätsverteilung entlang der Azimutrichtung auf.

Aus den vorgestellten Messergebnissen wird deutlich, dass die berücksichtigte prozessierte Bandbreite einen wertvollen Beitrag zur Beurteilung unbekannter Wandstrukturen liefern kann. Dies soll im nachfolgenden Unterkapitel anhand von Untersuchungen an komplexen Bausteinen weiter vertieft werden.

5.3 Steine mit komplexer geometrischer Innenstruktur

Um Material einzusparen, war die Bauindustrie ab dem Jahr 1925 auf der Suche nach Alternativen zu vollhomogenen Steinen. Auf diese Weise wurden zwei Varianten von Steinen mit Luftstrukturen im Inneren entwickelt: der Langlochziegelstein und der Hochlochziegelstein. Letztlich setzte sich der Hochlochziegelstein gegenüber dem Langlochziegelstein durch, da er aufgrund seiner höheren Belastbarkeit wesentlich besser dazu geeignet war, um Großgebäude zu bauen [Hen11]. In Tabelle 5.3 findet sich neben den charakteristischen Daten auch eine schematische Darstellung des in diesem Unterkapitel untersuchten Hochlochziegelsteins, die den Stein von oben zeigt. Ergänzt werden die nachfolgenden Untersuchungen am Hochlochziegelstein durch Untersuchungen eines Kalksandsteins mit fünf integrierten Luftsäulen; auch für diesen Stein findet sich in Tabelle 5.3 eine schematische Darstellung.

Aufgrund ihrer unterschiedlichen internen Struktur besitzen beide Steinarten bei gleichen Abmessungen unterschiedliche Gewichte. So ist der Lochkalksandstein mit einem Gewicht von 20 kg fast doppelt so schwer wie der Hochlochziegelstein. Der Durchmesser der einzelnen Löcher des Lochkalksandsteins beträgt 5,5 cm. Der Hochlochziegelstein ist von mehreren kleinen Luftgittern durchzogen, die sich periodisch über den Stein verteilen und eine Breiten- und Längenabmessung von je 2,75 cm auf 1,15 cm besitzen. An den äußeren Enden des Hochlochziegelsteins

befinden sich jeweils zwei große Luftquader mit einer Kantenlänge von 3 cm auf 3 cm.

Tab. 5.3: Typische Vertreter von Baustoffen mit integrierten Luftkammern, einmal in der Ausführung als Ziegelstein mit integrierter Gitterstruktur und einmal in der Ausführung als Kalksandstein mit integrierter Luftsäulenstruktur.

Steinart	Lochkalksandstein	Hochlochziegelstein (Gitterstein)
Perspektive von oben		
Länge x Breite x Höhe [cm]	50 x 11,5 x 23,8	50 x 11,5 x 23,8
Gewicht [kg]	20	11
Lochdurchmesser [cm]	5,5	–
Gitterlänge x Gitterbreite [cm]	–	2,75 x 1,15
Großquader [cm]	–	3,0 x 3,0

5.3.1 Luftsäulenstrukturanalyse

Abbildung 5.6 zeigt das ungefilterte Entfernungprofil von zwei nebeneinander gesetzten Lochkalksandsteinen, welche in einem Abstand von 15 cm gescannt wurden. Der Frequenzbereich in dieser Messung erstreckt sich von 0,8GHz bis 18GHz. Alle weiteren Messparameter wurden wie bei der im vorigen Unterkapitel beschriebenen Messung der Vollziegelsteinreihen gewählt. Erneut zeigt sich klar die erste Reflexion bei ① auf einer Höhe von 0,15m in Entfernungsrichtung. Auf der Höhe von 0,4m bei ② ist das Ende der Steine durch drei starke Reflexionen an den äußeren Rändern sowie in der Mitte, wo sich beide Steine berühren, erkennbar. Diese Bereiche kennzeichnen den homogenen Bereich der Steine

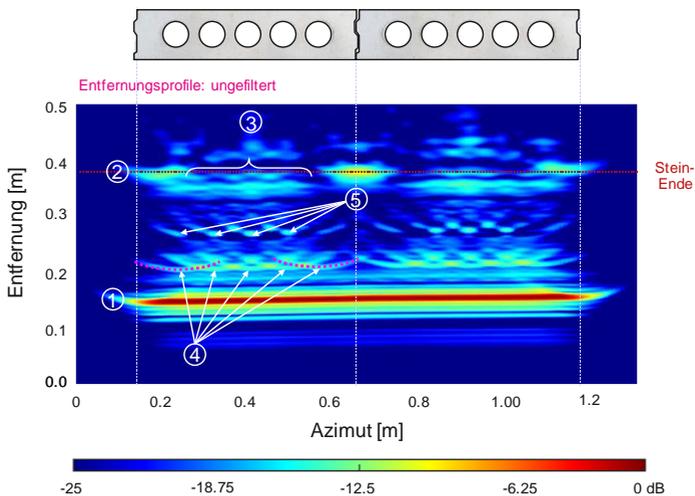


Abb. 5.6: Abgebildet ist das ungefilterte Entfernungprofil für zwei nebeneinander platzierte Kalksandsteine ohne Korrektur der Permittivität.

Das Ende der Steinreihen erscheint zwischen den klar erkennbaren Endreflexionen im Bereich von ③ für den linken Stein verschwommen, da die Wellen zuvor die Lochstrukturen passieren müssen, wodurch es zu stark ausgeprägten Streu- und Beugungseffekten und damit verschiedenen Laufzeiten kommt. Die Reflexionen bei ③ treten ca. 5 cm vor der Reflexion bei ② auf, was durch die schnellere Ausbreitung der Wellen durch das Mehrschichtsystem Kalksandstein–Luftlöcher–Kalksandstein bedingt ist. An den Stellen bei ④ sind für die fünf Einzellöcher parabelähnliche Reflexionsmuster zu erkennen, die durch die gestrichelte Linie für das linke und rechte äußere Loch des linken Kalksandsteins hervorgehoben wurden. Die Lochstrukturen verhalten sich ähnlich wie eine Punktquelle und stellen robuste Streuzentren dar, die über den vollen Winkelbereich der Antenne hinweg beobachtet werden können. In der Mitte von je zwei einzelnen Lochstrukturen kommt es zur Überlagerung der parabelähnlichen Reflexionsmuster, welche fälschlicherweise als Hauptreflexion gedeutet werden könnten. Durch die Beuge- und Streueffekte der Lochstrukturen ergeben sich an den Stellen bei ⑤ periodische Reflexionsmuster entlang der Azimutrichtung. Wenn man die Scheitelpunkte der Parabelreflexionen betrachtet, wird erkennbar, dass sich hinter jedem Scheitelpunkt eine eindeutig identifizierbare Reflexion befindet. Da große Teile der

Welle durch die Struktur der Löcher bereits zu Beginn der Lochstrukturen gestreut werden, ergibt sich hier pro Loch ein weniger stark ausgeprägtes Streuzentrum.

Abbildung 5.7 stellt das von-Hann-gefilterte Entfernungprofil der Wandstruktur dar. Wie bei den homogenen Wandstrukturen im vorherigen Unterkapitel bewirkt auch hier die Filterung eine Reduktion der Nebenkeulen im Bild.

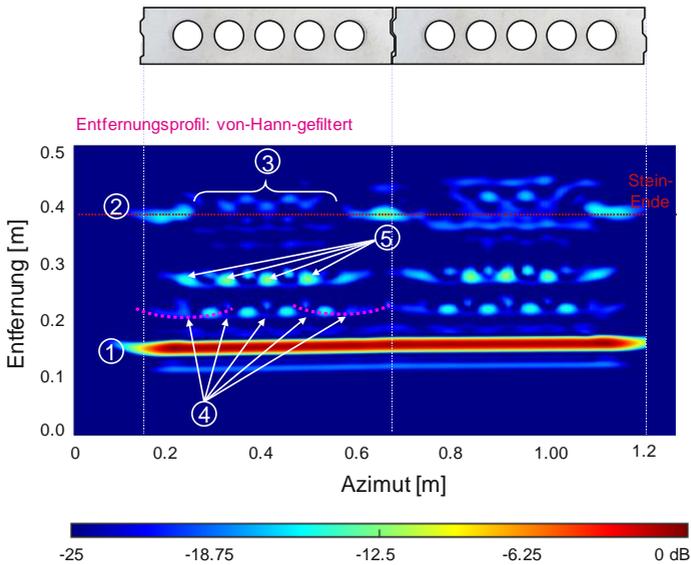


Abb. 5.7: Wasserfallplot der zweireihigen Kalksandsteinreihe aus Abbildung 5.6, auf die das Von-Hann-Fenster angewendet wurde.

In diesem Dynamikbereich kommt es nun aber zu dem Effekt, dass die überlagerten Reflexionen der Parabelmuster der Lochstrukturen stärker zur Geltung kommen. Die Bereiche, an denen zuvor klar die Scheitelpunkte der parabelähnlichen Reflexionsmuster erkennbar waren, werden hier weggefiltert. Umgekehrt treten die Reflexionen, die hinter den Scheitelpunkten das Ende der Lochstrukturen repräsentieren, dominanter auf. Man könnte also davon ausgehen, dass es vier Streuzentren in der vorderen Hälfte jedes Lochkalksandsteins auf der Höhe von ④ und vier weitere versetzt dazu liegende Streuzentren auf der Höhe von ⑤ gibt. Ein

wesentlich klareres und besser der Realität entsprechendes Bild liefert Abbildung 5.8. Hier wurde auf die Entfernungsprofile aus Abbildung 5.7 die Rückprojektion angewendet.

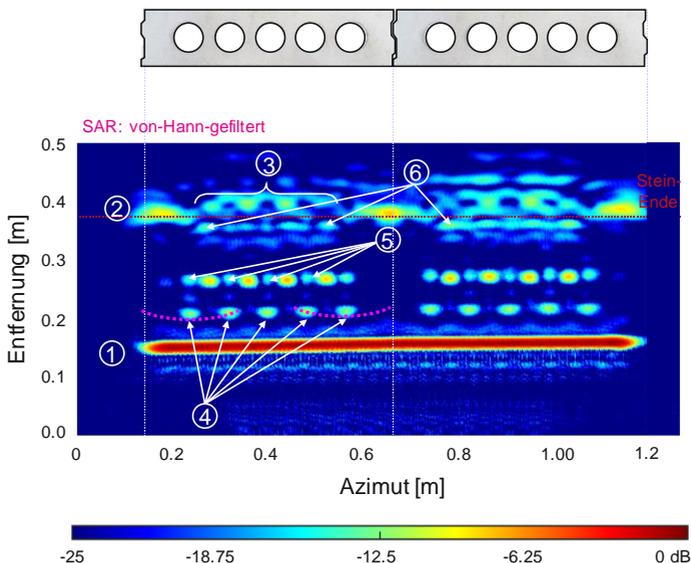


Abb. 5.8: Mit Hilfe der Rückprojektion aus dem in Abbildung 5.7 dargestellten von-Hann-gefilterten Entfernungsprofil Datensatz erzeugtes SAR-Bild.

Im Gegensatz zu Abbildung 5.7 zeigen sich an den Stellen bei ④ fünf klar erkennbare, fokussierte Reflexionen, die jeweils den Beginn der Lochstrukturen charakterisieren. Der Überlagerungseffekt der Parabelreflexionen zwischen den Löchern, der in den Entfernungsprofilen aufgetreten war, verschwindet hier vollständig. Auch die Reflexionen, die die Enden der Löcher charakterisieren (⑤), treten auf derselben Höhe auf wie die Reflexionen bei (④). Weiterhin erkennbar sind bei ③ deutlich ausgeprägte Reflexionen, die das Ende der Steine mit Bezug auf die homogenen Teile der Steine repräsentieren; dies wird durch die Einzelreflexionen bei ⑥ ersichtlich. Die Reflexionen der Lochenden bei ⑤ sind weniger stark ausgeprägt als die Reflexionen zwischen den Lochstrukturen. Diese Reflexionen sind als Artefakte der Messung zu betrachten. Der SAR-Algorithmus ist hier nicht in der Lage, die Artefakte zu verhindern. Aufgrund

der eng beieinander liegenden Löcher kommt es bei der Rückprojektion zu falsch aufsummierten Intensitäten zwischen den Löchern. Dieser Effekt soll im Folgenden am Porenbetonstein (siehe Tabelle 3.1) näher untersucht werden, da hier die Dämpfung weniger stark wirkt und der Realteil der Permittivität des Steins um knapp 50 % geringer ist als beim Kalksandstein.

In Abbildung 5.9 ist der Wasserfallplot der ungefilterten Entfernungsprofile von zwei aneinander gereihten Porenbetonsteinen abgebildet.

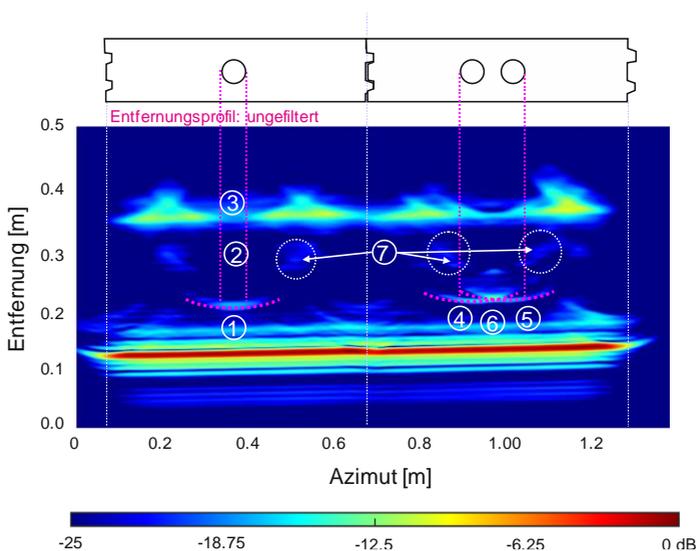


Abb. 5.9: Ungefilterter Wasserfallplot der Entfernungsprofile zweier Porenbetonsteine mit Lochstruktur.

In den linken Porenbetonstein wurde ein Loch mit einem Durchmesser von 5,5 cm gebohrt. Im rechten Stein sind zwei Löcher vorhanden, welche ebenfalls einen Durchmesser von 5,5 cm besitzen. Von den jeweiligen Mittelpunkten dieser Bohrungen aus gemessen beträgt der Abstand beider Bohrungen zueinander 8 cm; misst man den Abstand zwischen den jeweils nebeneinander liegenden Rändern der Bohrlöcher, beträgt dieser 2,5 cm. Auffällig sind auch hier die parabelähnlichen Reflexionsmuster, welche die Anfänge der Lochstrukturen im Stein kennzeichnen. Im linken Stein

zeigt sich dieses Muster sehr deutlich für den vorderen Teil der Kreisstruktur bei ①. An der Stelle ② ist keine Reflexion für den Übergang Lochstruktur–Porenbeton erkennbar. An der Stelle ③ ist ein Intensitätsminimum erkennbar, das sich aus den vorherigen Reflexionen ergibt. Obwohl der Porenbeton gute transmissive Eigenschaften besitzt, ist dieses Minimum deutlich erkennbar. Im rechten Stein kommt es zum bekannten Überlagerungseffekt (⑥) der einzelnen parabelähnlichen Reflexionsmuster ④ und ⑤. An den mit ⑦ gekennzeichneten Stellen sind Reflexionen erkennbar, die auf die hintere Hälfte der Lochstrukturen hindeuten könnten. Im rechten Stein erkennt man auch hier Überlagerungen, die zu Artefakten in der Darstellung des Bereichs zwischen den Lochstrukturen führen. Eine Filterung der aufgenommenen Daten mit dem von-Hann-Fenster liefert auch in diesem Fall ein Bild der Szenerie mit unterdrückten Nebenkeulen, welches in Abbildung 5.10 dargestellt ist.

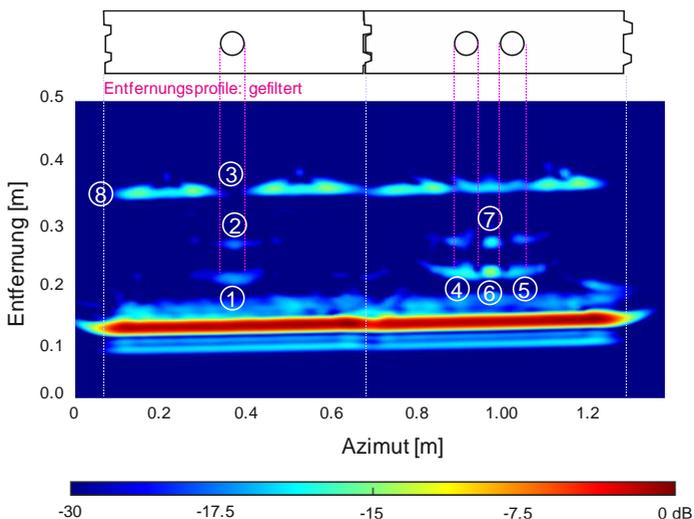


Abb. 5.10: Von-Hann-gefilterter Wasserfallplot der zweireihigen Porenbetonaufnahme.

Deutlich sichtbar sind für alle drei Bohrungen die Anfänge der Lochstrukturen bei ①, ④ und ⑤. Im rechten Stein bleibt der Überlagerungseffekt bei ⑥ bestehen. Durch die Filterung zeigen sich nun aber doch Reflexionen hinter den Punkten ① im linken Stein an der Stelle ② und weniger

stark, aber dennoch sichtbar hinter den Reflexionen bei ④ und ⑤. Auch hier tritt, genau wie im Lochkalksandsteinbild, bei ⑦ zwischen den beiden Lochstrukturen im rechten Stein eine Reflexion auf.

Durch Anwendung der Rückprojektionsmethode auf den Datensatz aus Abbildung 5.10 ergibt sich das in Abbildung 5.11 dargestellte SAR-Bild der Wandstruktur.

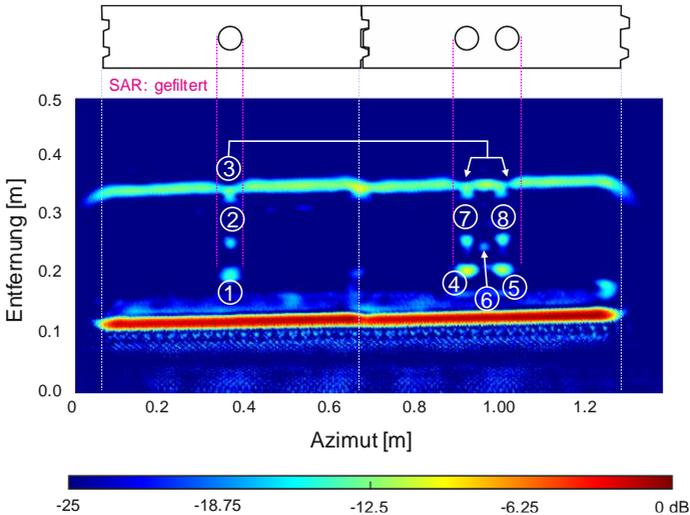


Abb. 5.11: SAR-Bild des von-Hann-gefilterten Wasserfallplots aus Abbildung 5.10 ohne Berücksichtigung der Permittivitäten.

Die Anfänge (①, ④, ⑤) und Enden der Lochstrukturen (②, ⑦, ⑧) werden hier stark hervorgehoben. Im rechten Stein befinden sich kein Artefakte mehr zwischen den beiden Lochstrukturen zu Beginn bei ④ und ⑤. Zwar ist nun an der Stelle ⑥ ein Artefakt zu erkennen. Hervorzuheben ist allerdings, dass das Reflexionsartefakt in diesem Fall weniger stark ausgeprägt ist als die Reflexionsartefakte im Lochkalksandstein. An den Stellen ③ sollten eigentlich Intensitätsminima auftreten, da die Löcher die Endreflexion durch das Steinende abschatten. Wird die Rückprojektion auf die Entfernungsprofile aus Abbildung 5.11 angewendet und wird für das Innere des Steins eine Permittivität des Porenbetons von 1,7 angenommen, so ergibt sich das in Abbildung 5.12 dargestellte SAR-Bild. Hier

erscheinen drei Intensitätsminima bei ③, da nun ortskorrekt in die Pixel aufsummiert wird und es an diesen Stellen zur Fokussierung kommt. Die Reflexionen für die Anfänge (①, ④, ⑤) und Enden (②, ⑦, ⑧) der Lochstrukturen innerhalb des Steins sind auch hier wieder deutlich erkennbar. Zusätzlich zum Artefakt zwischen den beiden Lochbohrungen aus Abbildung 5.11 ist nun etwas weiter vorne ein weiteres Artefakt im rechten Stein sichtbar. Eine Fokussierung mit der bekannten Permittivität bringt hier also nicht nur Vorteile, sondern auch Nachteile: Die Streuzentren aus den Wasserfallplots können falsch in die Pixel aufsummiert werden, da die tatsächlichen geometrischen Verhältnisse im Inneren des Steins unbekannt sind.

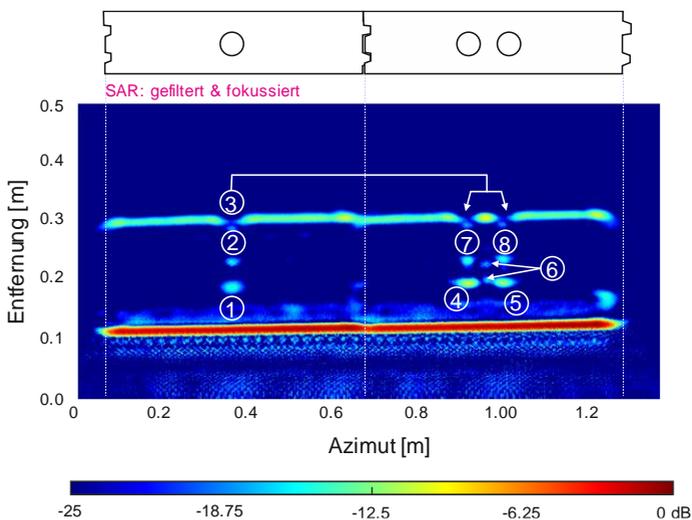


Abb. 5.12: Fokussiertes SAR-Bild des von-Hann-gefilterten Wasserfallplots aus Abbildung 5.10 mit Berücksichtigung der Permittivitäten.

Festzuhalten ist an dieser Stelle, dass Lochstrukturen mit der SAR-Algorithmik im Stripmap-Mode nicht vollständig kenntlich gemacht werden können. Jedoch lassen sich durch die Kombination aus gefilterten und ungefilterten Entfernungprofilen sowie durch die Anwendung der Rückprojektionsmethode und das Einbeziehen der richtigen Permittivitäten genügend Informationen zusammentragen, um in der zukünftigen Praxis besser auf vermeintliche Lochstrukturen in unbekanntem Wandstrukturen

schließen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Lochdurchmesser, der Abstand zwischen den Löchern und das Steinmaterial zu unterschiedlichen, aber nicht ununterscheidbaren Reflexionsbildern führen, wobei die Bildung von Artefakten von den zuvor genannten Parametern abhängt.

5.3.2 Gitterstrukturanalyse

In diesem Abschnitt wird der in Tabelle 5.3 charakterisierte Hochlochziegelstein untersucht. Dazu werden zwei Hochlochziegelsteine nebeneinander platziert und mit den in Tabelle 5.2 genannten Messparametern untersucht. Als Antenne wird die in Tabelle 5.1 beschriebene Steghornantenne 1 im Frequenzbereich von 1 GHz bis 8 GHz verwendet, woraus sich eine Entfernungsauflösung von 2,14 cm ergibt. In Abbildung 5.13 sind die ungefilterten Entfernungsprofile der beiden Hochlochziegelsteine dargestellt. Im oberen Bild ist die Aufnahme der HH-Polarisationsaufnahme und im unteren Bild die VV-Polarisationsaufnahme dargestellt. HH bedeutet hier, dass die Antenne eine horizontal (H) zur Ausbreitungsrichtung ausgerichtete Welle aussendet und nur die Anteile misst, die horizontal zum Sensor zurückkehren. VV bedeutet dementsprechend genau das Gleiche nur, dass die elektrische Feldvektor vertikal (V) zur Ausbreitungsrichtung ausgerichtet ist. An den Stellen ① und ② sind in beiden Bildern jeweils die Reflexionen für den Anfang und das Ende des Steines zu erkennen. Für beide Polarisationsaufnahmen sind in der Mitte der Aufnahme, wo die beiden Steine sich berühren, auffällig viele Reflexionen sichtbar. Diese Reflexionen waren so zuvor weder bei den Aufnahmen der Vollziegel-, Porenbeton- oder Kalksandsteinen mit homogener Lochstruktur erkennbar. Die Gitterstruktur des Hochlochziegelsteins erstreckt sich über den gesamten Stein hinweg und damit auch bis kurz vor die Verbindungskanten an den Außenseiten. Hierbei handelt es sich nicht um rein homogene Übergänge. Teile der Gitterstruktur liegen noch im Sichtbereich der Halbwertsbreite der Antenne und sind entsprechend im Radarbild erkennbar. In beiden Polarisationsaufnahmen ist jeweils im linken Stein an den Stellen ③ und ④ das Reflexionsmuster für den Großquader zu sehen. Die innere Struktur des Steins bleibt hingegen unklar; so könnte man allein ausgehend von der HH-Aufnahme zu dem Schluss kommen, dass mittig in beiden Steinen keine oder nur schwach ausgeprägte

Strukturen vorhanden sind, die zu Reflexionen führen. Im Gegensatz dazu zeigt die VV-Polarisationsaufnahme drei Reflexionslinien entlang der Azimutrichtung in der Mitte jedes Steins zwischen den Luftquadern. Hier ist in beiden Steinen die mittlere Reflexionslinie weitaus stärker ausgeprägt als die umrahmenden äußeren Reflexionen.

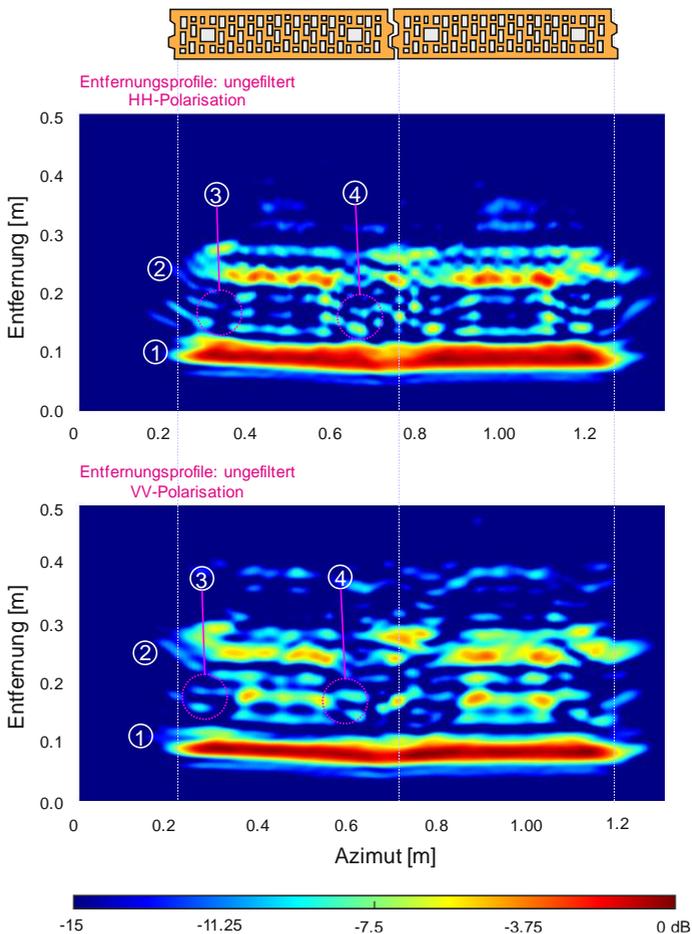


Abb. 5.13: Ungefilterter Wasserfallplot zweier nebeneinander platzierter Hochlochziegelsteine für eine HH- und VV-polarisierte Aufnahme.

Wendet man nun die Rückprojektionsmethode auf die HH- bzw. VV-polarisierten Entfernungprofile an, ergeben sich die in Abbildung 5.14 dargestellten SAR-Bilder.

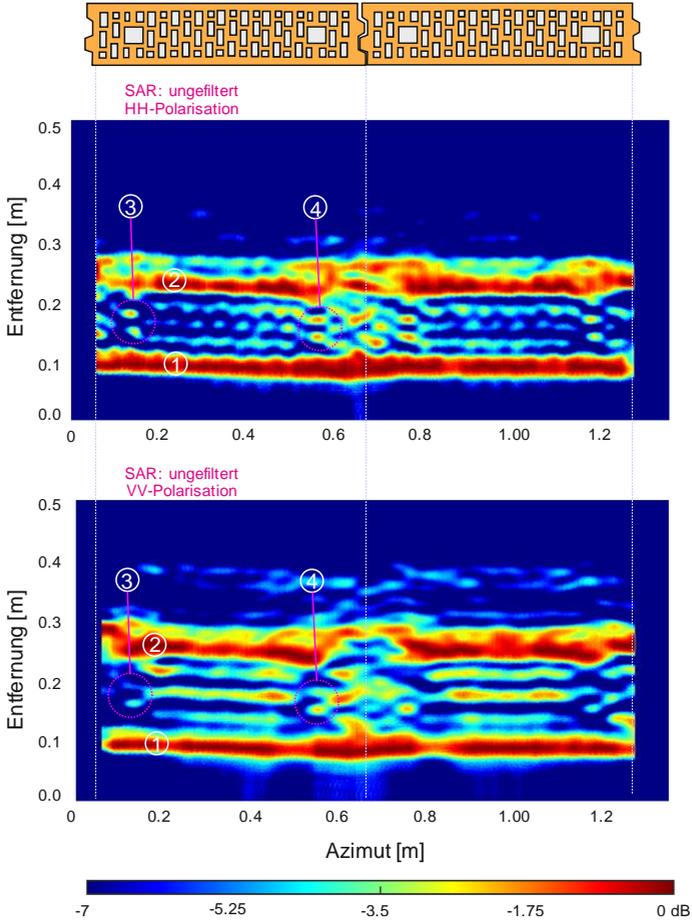


Abb. 5.14: SAR-Bild der beiden Hochlochziegelsteine für die HH- und VV-Polarisation.

Im Gegensatz zu den zuvor gezeigten SAR-Bildern ist die abgebildete Intensitätsverteilung der Radarbilder nicht auf das globale Maximum der

Messung normiert. Jedes einzelne Entfernungsprofil pro Messpunkt wird hier lokal auf sein Maximum normiert. Dadurch werden einzelne Strukturen stärker hervorgehoben und damit besser erkennbar. Würde man die Darstellung mit dem globalen Maximum anwenden, käme es in der Mitte der Steine zu Intensitätserhöhungen, welche zwischen 5 und 10 dB stärker hervorträten als die Intensitätswerte an den Rändern der Steine links und rechts außen. Besonders im HH-Polarisationsbild zeigt sich die große Stärke der SAR-Prozessierung, da die Gitterstruktur im Inneren des Steins sichtbar wird. Entlang der drei starken Reflexionen zwischen dem Anfang ① und dem Ende ② des Steins sind Intensitätsmaxima und -minima erkennbar, die auf die kleinen Luftkammerchen innerhalb des Steins bzw. auf die homogene Schicht entlang der Entfernungsrichtung des Steins hindeuten. Klar erkennbar sind auch der Anfang und das Ende der großen Luftquader in jedem Stein; für den linken Stein sind sie jeweils durch ③ und ④ markiert. In der HH-polarisierten Aufnahme des linken Steins treten diese Luftquader wesentlich deutlicher hervor als in der VV-polarisierten SAR-Aufnahme.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden erste Entfernungsprofil- und SAR-Aufnahmen unterschiedlicher Steinstrukturen vorgestellt. Homogene Schichten sind klar durch zwei Hauptreflexionen gekennzeichnet, die jeweils den Anfang und das Ende der Steine repräsentieren. Ihre große Stärke zeigt die SAR-Prozessierung bei Steinen mit komplexer Innengeometrie. So konnten am Beispiel des Lochkalksandsteins und des Hochlochziegelsteins Strukturen aufgelöst werden, welche in den normalen Entfernungsprofilen nicht deutlich sichtbar wurden. Ferner zeigte sich, dass mit dem Wissen über die Permittivitäten der einzelnen Steine Strukturen besser fokussiert werden können.

Im nachfolgenden Kapitel werden die hier gewonnenen Erkenntnisse in eine Gesamtmethodik überführt, mit der zukünftig bei der Untersuchung unbekannter Wandstrukturen aus den durchgeführten Reflexionsmessungen ein Höchstmaß an Informationen extrahiert werden kann.

6 Methode zur Charakterisierung unbekannter Wandstrukturen

Gebäudewände setzen sich in der Regel aus unterschiedlichen Materialien in verschiedenen Konfigurationen zusammen. In einfachen Fällen bestehen diese Wandsegmente aus homogenen Steinstrukturen, deren Merkmale sich mit den in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Untersuchungsmethoden hinreichend genau bestimmen lassen. Erschwert wird die Analyse unbekannter Strukturen, wenn sich innerhalb der zu untersuchenden Wand Steine befinden, die innerhalb ihres Hauptkerns reflexionsbegünstigende Geometrien besitzen. Es spielt dabei keine Rolle, ob sich diese Strukturen periodisch entlang des abgetasteten Wandsegments wiederholen oder ob sie zufällig im Mauersegment verteilt sind. In beiden Fällen wird die Interpretation der Radarbilder durch reflexionsbegünstigende Geometrien innerhalb der Wand erschwert. In diesem Kapitel werden nun die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen zu einer Gesamtmethode zusammengeführt. Anschließend werden mit dieser Gesamtmethode hochaufgelöste Radarbilder generiert, mit deren Hilfe möglichst genau auf die tatsächliche Struktur unbekannter Wände geschlossen werden kann.

6.1 Beschreibung der Methode

Die hier entwickelte Methode lässt sich in die drei Hauptblöcke Messung, Rückrechnung und Bildgebung unterteilen. Zunächst werden durch die Kalibrierung des Messsystems bei den durchzuführenden Reflexionsmessungen systematische Fehlerquellen eliminiert. Anschließend wird das zu untersuchende Messszenario entlang der Azimutrichtung abgefahren. Der dabei aufgenommene Datensatz stellt den Rohdatensatz dar, aus dem die einzelnen Entfernungsprofile der Wand berechnet werden können. Bevor diese geplottet werden können, müssen die Messsignale jedoch vom

Phasenfehler der verwendeten Antennen bereinigt werden. Wird im Sende- oder Empfangspfad ein Verstärker verbaut, muss das Messsignal zudem von dem daraus entstehenden Phasenfehler des aktiven Bauelements bereinigt werden. Streng genommen sind diese zwei Schritte der Kalibrierung zuzuordnen. Die einzelnen Entfernungsprofile werden anschließend zu einem Wasserfallplot zusammengesetzt und ergeben somit das Radarbild der aufgenommenen Messszene. Prinzipiell ist es möglich, hierbei eine frequenzselektive Prozessierung der Daten vorzunehmen. Weiterhin möglich ist die Filterung der Aufnahmen mit gängigen Fensterfunktionen wie etwa dem von-Hann-Fenster, dem Blackman-Fenster oder dem Hamming-Fenster. Mit dem Fenster des Frequenzspektrums der aufgenommenen Daten geht eine Reduzierung der Nebenkeulen einher, was zu einer deutlichen Verbesserung der visuellen Erkennbarkeit von Strukturen in der Wand führt. Ein Nachteil dieser Methode stellt jedoch die Verschlechterung der Entfernungsauflösung durch eine Verbreiterung der Hauptkeule der Maxima im Entfernungsprofil dar [And14]. Die gefilterten Entfernungsprofile können anschließend mit der Rückprojektion zu einem SAR-Bild prozessiert werden. Zu diesem Zeitpunkt liegen noch keine Informationen über die Verteilung der Permittivitäten vor, daher sind die SAR-prozessierten Bilder noch nicht fokussiert. Dennoch lässt sich aus der so gewonnenen Datenbasis eine erste visuelle Strukturanalyse erstellen. Hiermit kann die Anzahl der Schichtübergänge festgestellt und von diesen wiederum auf die Anzahl der einzelnen Schichten geschlossen werden. Mit Hilfe der Strukturanalyseparameter können zudem die Modellparameter für die Rückrechnung angepasst werden. Die hierbei verwendete Rückrechnungsmethode wurde in Kapitel 3 ausführlich vorgestellt. Bei dieser werden anhand der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Real- und die Imaginärteile der Messungen mit allen simulierten Reflexionssignalen verglichen. Für jede simulierte Schichtkombination entsteht dabei ein Abstandswert zur Messung. Diese Abstandswerte werden zunächst der Größe nach sortiert. Anschließend wird in der Rückrechnungsanalyse über die 50 besten Ergebnisse pro Schicht gemittelt. Diese gemittelten Werte können nun in die SAR-Prozessierung integriert werden, um eine fokussierte Darstellung der Radarbilder zu erreichen. Lassen sich durch die Fokussierung der Bilder neue Erkenntnisse ableiten, kann die Methode gegebenenfalls ab Schritt IV wiederholt und/oder modifiziert werden.

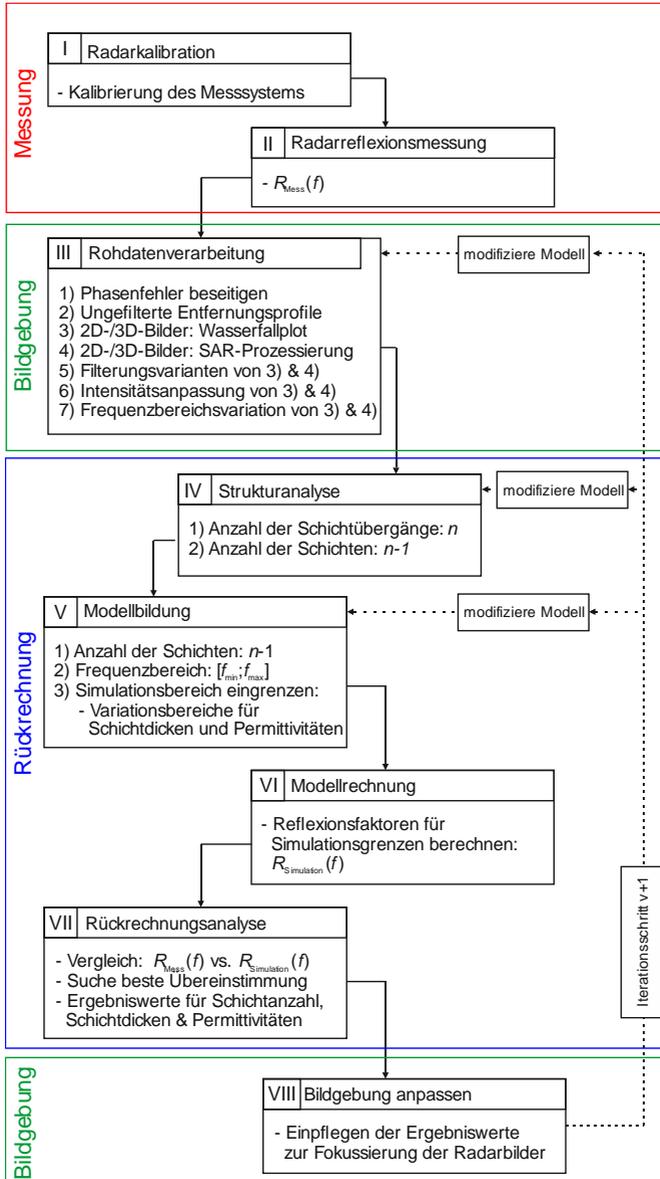


Abb. 6.1: Im Flussdiagramm sind die wesentlichen Schritte der Methodik zur Charakterisierung unbekannter Wandstrukturen zusammengefasst.

Aus den per Rückrechnung berechneten Werten für die Schichtdicken und die Permittivitäten des Wandsegments kann der Wärmeleitkoeffizient abgeleitet und somit eine Aussage über den Wärmeverbrauch des Hauses getroffen werden. Der Zusammenhang zwischen Permittivität und Wärmeleitkoeffizient wurde in [Gor21] veröffentlicht und stellt eine Kooperationsarbeit der Institute für „Solarforschung“ und „Hochfrequenztechnik und Radarsysteme“ des DLR dar. Bevor im folgenden Unterkapitel die Anwendung der hier beschriebenen Methode zur Charakterisierung unbekannter Wandstrukturen an einer dreischichtigen Wandkonfiguration vorgestellt wird, findet sich in der untenstehenden Abbildung 6.1 eine Übersicht über deren wesentliche Arbeitsschritte.

6.2 Anwendung der Methodik auf ein Mehrschichtsystem

Im Folgenden wird die soeben vorgestellte Messmethodik auf das in Abbildung 6.2 schematisch gezeigte Wandsegment angewendet. Dessen erste Schicht besteht aus einem 11,5 cm dicken Vollziegelstein, einem 10 cm dicken Luftspalt und dem in Tabelle 5.2 dargestellten Hochlochziegelstein. Im Frequenzbereich von 1 GHz bis 8 GHz wurde in einer monostatischen Messung das Wandsegment in 1 cm-Schritten abgefahren. Der Wasserfallplot der ungefilterten Entfernungsprofile ist in Abbildung 6.2 unten dargestellt.

Im Bereich um ① sind entlang der Azimutrichtung vermehrt Nebenkeulen in Entfernungsrichtung sichtbar, ebenso im Bereich um ②. Diese Intensitätserhöhungen könnten auf eine inhomogene Wandstruktur schließen lassen. Der Bereich ③ stellt die Hochlochziegelsteine dar. Hier sind, genau wie bei der im vorigen Unterkapitel erläuterten Messung, Reflexionen innerhalb von d_3 erkennbar. Insgesamt ist das Radarbild aufgrund der vielen Intensitätsmaxima und -minima zwischen den Hauptreflexionen nur bedingt interpretierbar.

Werden nun entlang der Azimutrichtung für jeden Entfernungspunkt die Amplitudenwerte aufsummiert und wird anschließend über alle Messpunkte gemittelt, so ergibt sich für den ungefilterten Wasserfallplot ein

gemitteltes Gesamtentfernungsprofil. Dieses ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

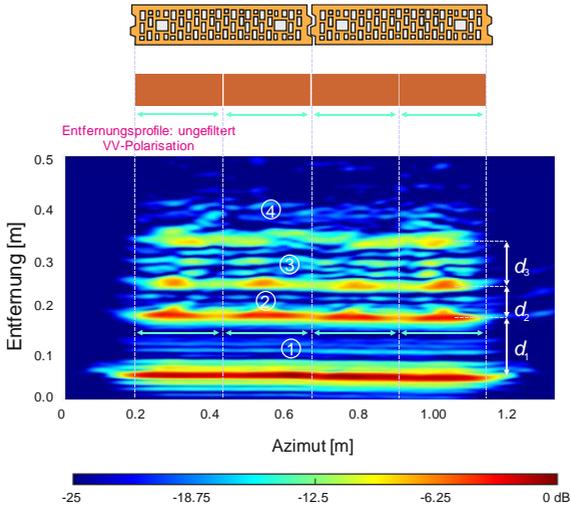


Abb. 6.2: Ungefilterter Wasserfallplot der Wandkonfiguration Vollziegelstein–Luftspalt–Hochlochziegelstein für einen Frequenzbereich von 1 GHz bis 8 GHz.

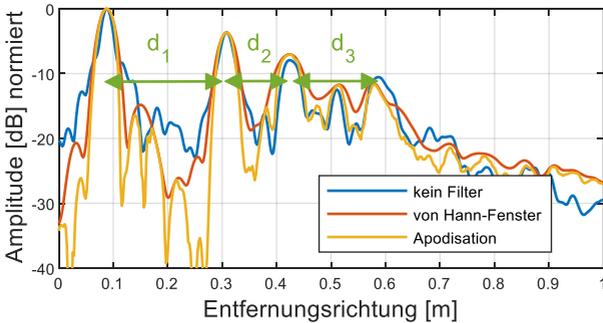


Abb. 6.3: Wird über die einzelnen Messsignale aus Abbildung 6.2 entlang der Azimutrichtung für jede Entfernungsrichtung aufsummiert und gemittelt, entstehen die in der Abbildung dargestellten gemittelten Gesamtentfernungsprofile.

Zusätzlich zur ungefilterten Variante ist in Abbildung 6.3 das Gesamtentfernungsprofil für eine Filterung mit dem von-Hann-Fenster und der Apodisations-Methode [Sta95] dargestellt. Die Apodisations-Methode wird zur Nebenkeulenunterdrückung bei gleichzeitigem Erhalt der Entfernungsauflösung eingesetzt. Sie stellt im hier gezeigten Beispiel eine Kombination aus dem ungefilterten und dem von-Hann-gefilterten Entfernungsprofil dar.

Die Abstände der Maxima entlang der Entfernungsrichtung erlauben hierbei eine erste Abschätzung der Schichtanzahl und Schichtdicken. Ist die Achse in Entfernungsrichtung auf die Permittivität für das Vakuum normiert, lässt sich pro Schicht die Schichtdicke für eine Permittivität von $\epsilon'_{r,1,2,3}$ ermitteln. Diese Schichtdicken stellen die maximalen Schichtdicken dar. Für die erste, zweite und dritte Schicht (d_1, d_2, d_3) ergeben sich die Werte 21,4 cm, 11 cm und 16,3 cm. Mit Hilfe von Gleichung 3.5 können nun alle gültigen Schichtdicken-Permittivitäts-Paare berechnet werden. Hierzu müssen allerdings zuerst die Maximalwerte für die Permittivitäten und die jeweiligen Schrittweiten festgelegt werden.

Für den Realteil der Permittivität aller drei Schichten wird für die Simulation ein Wertebereich von 1 bis 5 angenommen; die Schrittweite wird mit 0,1 festgesetzt. Für den Imaginärteil wird ein Wertebereich von 0 bis 0,35 angenommen und eine Schrittweite von 0,05 festgesetzt. Pro Messung werden 1601 Messpunkte im Frequenzbereich von 1 GHz bis 8 GHz aufgenommen.

Die Gesamtwandstärke von 33 cm ergibt sich aus der Summe der tatsächlichen Dicken der einzelnen Schichten. Es werden dabei nur die simulierten Reflexionsfaktoren berechnet, die eine Gesamtwandstärke von 32 bzw. 34 cm nicht unter- oder überschreiten. In Tabelle 6.1 sind noch einmal alle wichtigen Simulationsparameter aufgelistet.

Mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird die Abweichung der Simulationswerte gegenüber den Werten aus der Messung berechnet. Als Messwerte dienen für die Simulation die Real- und Imaginärteile der gemittelten ungefilterten Messreihe sowie die Absolutbeträge der inversen Fourier-Transformation der Reflexionsfaktoren im Wertebereich von 0 bis 0,8 m.

Tab. 6.1: Simulationsparameter zur Berechnung der Schichtdicken und der Schichtpermittivitäten.

Variable	Wert
Schicht 1 und 3: $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$	[2,0;5,0]
Schicht 2: $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$	[1,0;2,5]
Schicht 3: $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$	[1,0;4,0]
Für alle Schichten: $[\varepsilon''_{r,\min}; \varepsilon''_{r,\max}]$,	[0,0;0,2]
Inkrement Realteil Permittivität: $\Delta\varepsilon'_r$	0,1
Inkrement Imaginärteil Permittivität: $\Delta\varepsilon''_r$	0,05
$d_{1,\min}; d_{1,\max}$ in [cm]	[9,6;21,4]
$d_{2,\min}; d_{2,\max}$ in [cm]	[4,9;11]
$d_{3,\min}; d_{3,\max}$ in [cm]	[7,3;16,3]

Wie in Kapitel 3 beschrieben wird pro Schicht über die besten 50 Ergebnisse gemittelt. Die Ergebnisse dieser Mittelung für jede Schicht sind in Tabelle 6.2 aufgelistet. Auch hier werden die Wurzeln der Permittivitäten betrachtet, um die Abweichungen zu berechnen. Für die erste Schicht zeigt sich hierbei eine Abweichung von 8,6 % gegenüber der Hohlleitermessung für den Vollziegelstein und eine Abweichung von 7 % gegenüber der tatsächlichen Steindicke.

Tab. 6.2: Simulationsergebnisse aus der Rückrechnung. Die Permittivitäts- und Schichtdickenwerte wurden aus den besten 50 Ergebnissen der jeweiligen Schicht gemittelt.

Parameter/Schicht		$\bar{A}_{\min,50}$	Hohlleiter- messung	F_R
Vollziegel- stein	$\varepsilon'_{r,1}$	4,25	3,5	+10 %
	d_1	10,7 cm	11,5 cm	-7 %
Luft	$\varepsilon'_{r,2}$	1,0	1,0	0 %
	d_2	11,8 cm	11,8 cm	0 %
Gitterloch- ziegelstein	$\varepsilon'_{r,3}$	2,0	1,9	+2,5 %
	d_3	10,9 cm	11,5 cm	-5,3 %

Die Permittivität des Luftspaltes wurde korrekt bestimmt, und es ergaben sich keine Abweichungen, weder in der Permittivität noch in der Schichtdicke. Bezüglich des Hochlochziegelsteins wurde in dieser Untersuchung eine gemischte Permittivität von 60 % Luft und 40 % Vollziegelstein angenommen. Hierbei ergab sich eine Abweichung von 2,5 % gegenüber der angenommenen gemischten Permittivität sowie eine Abweichung von 5,3% gegenüber der tatsächlichen Schichtdicke des Hochlochziegelsteins. Sofern eine hinreichend große Differenz zwischen den Permittivitätswerten der einzelnen Schichten besteht, lässt sich also auch hier auf die tatsächlichen Permittivitäten und Schichtdicken zurückrechnen. Werden die Ergebnisse nun in die SAR-Bildgebung inkludiert, erhält man für die von-Hann-gefilterten Entfernungsprofile das in Abbildung 6.4 rechts gezeigte Radarbild. Im linken Bild ist zur Veranschaulichung das unfokussierte SAR-Bild für die von-Hann-gefilterten Entfernungsprofile abgebildet.

An den Stellen ①, ②, ③ und ④ im Bild links sind die Schichtübergänge erkennbar. Eine Filterung der Entfernungsprofile und eine anschließende SAR-Prozessierung führt hier zu einer Intensitätserhöhung an der Stelle ②. Weiterhin erkennbar sind die unterdrückten Nebenkeulen zwischen ① und ② bzw. ② und ③, die zu einer wesentlich besseren Darstellung des Vollziegelsteins und des Luftspaltes führen. Deutlich erkennbar sind auch die Reflexionen innerhalb der letzten Steinschicht, die klar auf eine inhomogene Steinstruktur hindeuten.

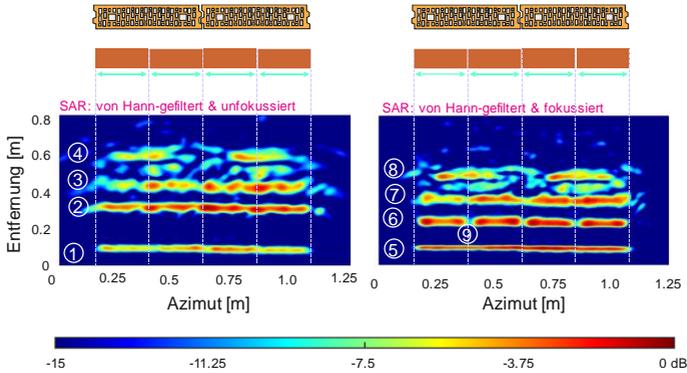


Abb. 6.4: Links ist das von-Hann-gefilterte, unfokussierte SAR-Bild der Wandstruktur abgebildet. Im Bild rechts sind die Permittivitäten und die Schichtdicken bei der Verwendung der Rückprojektionsmethode berücksichtigt, was zu einer deutlich besseren Fokussierung der Steinstrukturen im Bild führt.

Die Detailinformationen, besonders innerhalb des Hochlochziegelsteins, verschwinden dadurch aber. Der Übergang Luft zu Vollziegelstein bei ⑤ wirkt im fokussierten Bild ebenfalls dominanter als im unfokussierten Bild links. Die Stoßstellen der einzelnen Vollziegelsteine werden durch das Fokussieren sichtbar (⑥). Ein ähnlicher Effekt lässt sich am Übergang Luftspalt–Hochlochziegelstein bei ⑦ erkennen. Hier zeigt sich entlang der Azimutrichtung das Reflexionssignal wesentlich konstanter, und an der Position jeder Stoßstelle ist auch hier ein Intensitätsminimum zu erkennen. Innerhalb des Hochlochziegelsteins kommt es aufgrund der Filterung mit dem von-Hann-Fenster und der verschlechterten Auflösung in Entfernungsrichtung zur Ausbildung von nur einer sichtbaren Reflexion. Dies stellt im Vergleich zum unfokussierten Bild links jedoch weiterhin eine Verbesserung dar. Dort erscheinen die Reflexionen innerhalb des Hochlochziegelsteins noch diffus und zufällig verteilt, wohingegen im rechten Bild eine klarere Reflexionslinie entlang der Azimutrichtung auftritt. Die Darstellung des Hochlochziegelsteins verliert durch die Filterung mit dem von-Hann-Fenster enorm an Detailreichtum. Im Folgenden wird daher die Rückprojektion der ungefilterten Aufnahme für den Bereich des Lochziegelsteins betrachtet.

Werden für die ersten beiden Schichten (Vollziegelstein und Luftspalt) die in Tabelle 6.2 angegebenen Permittivitäten und Schichtdicken berücksichtigt und wird für den Hochlochziegelstein eine Permittivität von 1 angesetzt, so erhält man für den Hochlochziegelstein in Abbildung 6.5 unten gezeigte Radarbildaufnahme. Für den Hochlochziegelstein wurde eine Permittivität von 1 angesetzt, um die Bilder besser mit den Einzelstein-aufnahmen aus Abbildung 5.14 vergleichen zu können. Die Aufnahme aus Abbildung 5.14 ist in Abbildung 6.5 oben und damit über der Zoom-Aufnahme des Hochlochziegelsteins der Mehrschichtaufnahme dargestellt.

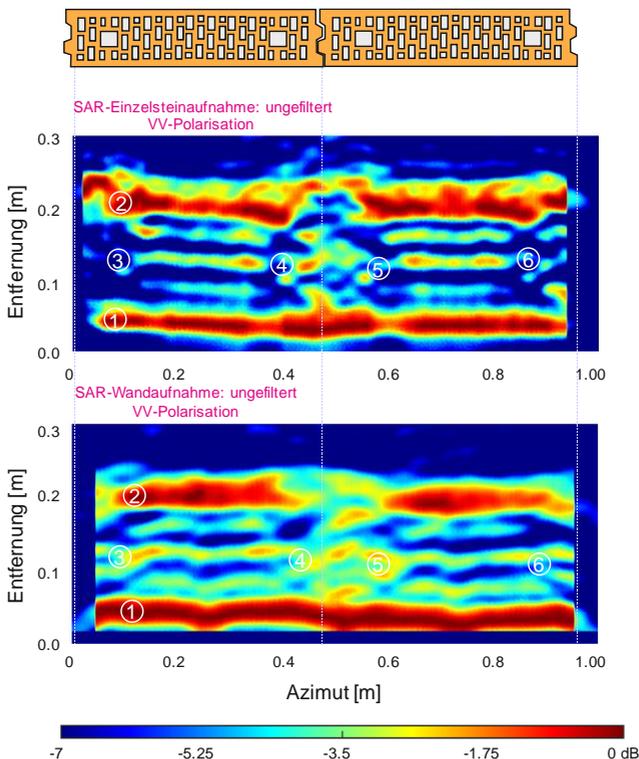


Abb. 6.5: Vergleich der Radarbilder des Hochlochziegelsteins aus der ungefilterten SAR-Aufnahme der Einzelsteinmessung (oben) und des dreischichtigen Wandaufbaus Vollziegelstein–Luftspalt–Hochlochziegelstein.

In Abbildung 6.5 sind bei ① und ② der Beginn und das Ende des Hochlochziegelsteins sichtbar. An den Stellen ③ und ④ bzw. ⑤ und ⑥ befinden sich in der Einzelsteinreihenaufnahme die Reflexionen für den Anfang und das Ende der Luftquader. Diese treten im unteren Bild nur an der Stelle ⑤ auf. Die drei langen Reflexionen entlang der Azimutrichtung zwischen ③ und ④ bzw. ⑤ und ⑥ sind aber in beiden Radaraufnahmen sichtbar. Lediglich die Intensitätsverteilung ist unterschiedlich.

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Methodik zur vollständigen Charakterisierung einer unbekanntes Wandstruktur vorgestellt. Grundsätzlich lässt diese sich in vier Hauptelemente einteilen:

1. Kalibrierung des Messsystems,
2. Bildgebung der Wandstruktur,
3. Rückrechnung auf die Zielparameter und
4. erneute Bildgebung der Wandstruktur unter Berücksichtigung der berechneten Zielparameter.

Sofern sich aus dem optimierten Bilddatensatz neue Erkenntnisse ableiten lassen, die eine verbesserte Rückrechnung ermöglichen, kann die Methodik ab dem Punkt Rückrechnung wiederholt werden.

Die Anwendung der Methodik wurde erfolgreich an einem dreischichtigen Wandaufbau demonstriert. Es wurden die Schichtdicken und die Schichtpermittivitäten berechnet, wobei der relative Fehler gegenüber den realen Werten unterhalb von 10 % lag. Diese Werte ermöglichten eine zweckmäßige Verbesserung der Bildgebung, deren Ergebnisse die ersten visuellen Analysen der unfokussierten Aufnahmen bestätigten (Annahme zur Schichtanzahl) und darüber hinaus Unstimmigkeiten beseitigen konnte (Eindeutigkeit homogener Schichten, Feinstrukturerkennung im Hohllochziegelstein). Dies zeigt bereits das große Potential der entwickelten Methodik zur zerstörungsfreien und berührungslosen Analyse von Wandstrukturen, welche in hohem Maße relevante Informationen liefert.

Im folgenden Kapitel wird die Methodik auf reale Gebäudestrukturen angewendet.

7 Charakterisierung realer Gebäudestrukturen

In den bisherigen Laboruntersuchungen ging es vorwiegend um einzelne Steine und konstruierte Mehrschichtsysteme. Der Einfachheit geschuldet, wurden in den Mehrschichtuntersuchungen keine realitätsnahen Elemente eingefügt. Diese umfassen beispielsweise Mörtelfugen, Innen- oder Außenputz, Stromkabel oder auch Kupferrohrleitungen. In den nachfolgenden Untersuchungen an realen Gebäudestrukturen besitzen alle Wandtypen einzelne oder mehrere der genannten zusätzlichen Wandelemente. Um möglichst realitätsnahe Radaruntersuchungen an gewöhnlichen Mauerstrukturen durchzuführen, wurden drei Testwände am DLR Standort in Jülich aufgebaut. Die Untersuchungen an den Testwänden werden durch die Gebäudecharakterisierung eines verlassenen Klinkerhauses ergänzt.

7.1 Charakterisierung der Testwände in Jülich

In der untenstehenden Abbildung 7.1 ist ein Bild der unverputzten Testwände in Jülich zu sehen. Der Kern des linken Wandsegments besteht aus Hohlblockleichtbetonsteinen, die hintere Wand aus Stahlbeton. Der Kern der rechten Wand wird durch Hochlochziegelsteine gebildet. Die Form und die Ausbildung der Leichtbeton- und der Hochlochziegelsteine sind in Tabelle 7.1 schematisch dargestellt. Die Längen und Höhen sind vergleichbar mit denen der Steine aus den Laboruntersuchungen der vorherigen Kapitel. Die Leichtbetonsteine haben eine Länge von 50 cm und die Hochlochziegelsteine eine Länge von 34 cm; beide Steinarten haben eine Höhe von 24 cm. Mit ebenfalls 24 cm sind die Steine mehr als doppelt so dick wie die aus den Laboruntersuchungen. Die Aushöhlungen innerhalb der Steine sind ungefüllt. Alle Wandsegmente haben eine Höhe von 2 m und eine Länge von 4 m. Für die Leichtbeton- bzw. die Hochlochziegelsteinwände bedeutet dies, dass diese ca. 8 bzw. 11 Steine lang und 6 Steine hoch sind. In die Leichtbetonwand wurde ein Holzsturz

implementiert, welcher innen- wie außenseitig von einem Metallgitter umgeben ist. Allen Wänden ist gemein, dass sie eine Innenputzschicht mit einer Dicke von 1 bis 1,5 cm besitzen. Die Stahlbetonwand besitzt keinen Außenputz; die beiden anderen Wände hingegen besitzen einen Außenputz mit einer Dicke von 1,5 bis 1,8 cm. In allen Wandaufbauten finden sich Kupferrohrleitungen, die in Abbildung 7.1 für die Leichtbeton- und die Hochlochziegelsteinwand hervorgehoben sind. In die Hochlochziegelsteinwand ist ein Betonsturz integriert, der hier aber nicht von einem Metallgitter umschlossen wird. Die Stahlbetonwand besteht aus einer äußeren und einer inneren Stahlbetonschicht. Die Innenschicht besitzt eine Dicke von 10 cm, die äußere Schicht eine Dicke von 8 cm. Zwischen den Stahlbetonelementen befindet sich eine Dämmschicht mit einer Dicke von 6 cm. Innerhalb der Stahlbetonwände befinden sich Eisen- bzw. Bewehrungsmatten, wobei der Durchmesser der einzelnen Eisenstangen bei 1 cm liegt. Der Abstand der einzelnen Eisenstangen beträgt 10 bis 15 cm.

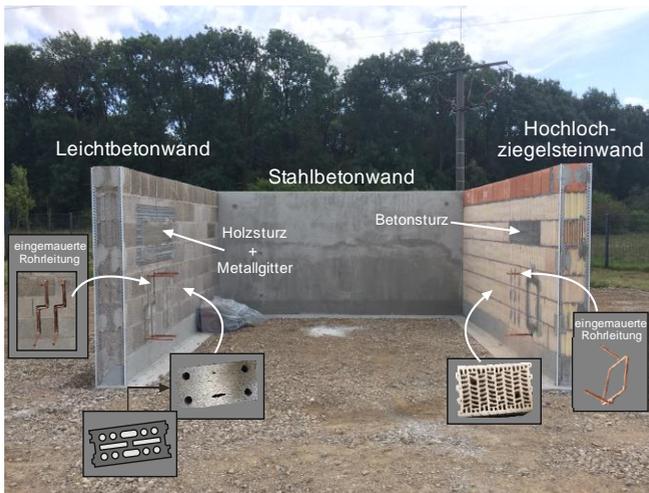
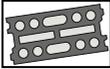
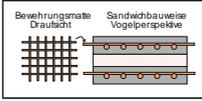


Abb. 7.1: Unverputzte Mauersegmente der Testwände in Jülich. Links: Leichtbetonwand, mittig: Stahlbetonwand, rechts: Hochlochziegelsteinwand. Die Messungen wurden aber in verputztem Zustand vorgenommen.

Die verputzten Außenwände wurden schließlich noch gestrichen und auf der Konstruktion wurde ein Blechdach inklusive Dachrinnen und

Abflussrohren installiert. Verschluss wurde der Testwandaufbau auf der noch offenen Seite mit einer Wand aus Grobspanplatten mit integrierter Tür.

Tab. 7.1: Wesentliche Wandparameter für die einzelnen Wandsegmente des Testaufbaus in Jülich.

Wandausführung	Leichtbeton/ Bimsstein	Stahlbeton/ Sandwichbauweise	Hochlochziegel- stein
			
Länge x Höhe [m] Wand	4,0 x 2,0	4,0 x 2,0	4,0 x 2,0
Länge x Breite x Höhe [cm] Einzelstein	50 x 24 x 24	–	37 x 24 x 24
Stahlbetonaufbau	–	Innenschale: 8 cm Dämmung: 6 cm Außenschale: 10 cm	–
Innenputz [cm]	1,0–1,5	1,0–1,5	1,0–1,5
Außenputz [cm]	1,5–1,8	–	1,5–1,8

7.1.1 Messaufbau

In den Laboruntersuchungen wurde eine Fahrachse benutzt, mit der maximal 1,5 m Fahrweg abgefahren werden konnte. Um eine möglichst lange Fahrstrecke abfahren zu können, wurde für die Untersuchungen an den realen Wandstrukturen eine Fahrachse mit einer maximal fahrbaren Länge von 6,5 m aufgebaut. Im Gegensatz zum Vorgehen im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden die realen Wandstrukturen mit zwei Antennen

in bistatischer Anordnung vermessen. Für einen späteren Einsatz in der Praxis mit angepasster schneller Aufnahmehardware eignen sich bistatische Messungen eher als monostatische Messungen mit nur einer Antenne. Da Zirkulatoren, die in einem Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 18 GHz funktionieren, kommerziell nicht erwerbbar sind, kommen die hier vorgenommenen bistatischen Messungen dem Aufnahmefall an realen Gebäudestrukturen am nächsten. Der bistatische Messaufbau ermöglicht das Einbringen eines Verstärkers in den Sendezweig des Messaufbaus. Als Verstärker wurde der AMF-7D-00101800-30-10P mit einer maximalen Ausgangsleistung von 10 dBm gewählt. Für die Kalibrierung des Messsystems bedeutete dies, dass zunächst eine OSL-Kalibrierung (Open-Short-Load) am NWA stattfand, allerdings nur mit den verwendeten Kabeln und ohne den Verstärker. Anschließend wurde eine S_{21} -Messung in Richtung Himmel mit angeschlossenem Verstärker vorgenommen (echofreie Messung). Auf der Basis dieser S_{21} -Messung konnte somit das Übersprechen der beiden Antennen aus den Messergebnissen entfernt werden. Ferner musste die Phase des Messergebnisses von den Verzerrungseffekten des Verstärkers bereinigt werden. Dies gelingt, indem man den Verstärker alleine am NWA per S_{21} -Messung charakterisiert. Dadurch kann dessen Phase ermittelt und anschließend von der Phase der Messergebnisse abgezogen werden.

7.1.2 Leichtbetonwand

Abbildung 7.2 zeigt die in diesem Abschnitt untersuchte, unverputzte Leichtbetonwand. Entsprechend der in Tabelle 7.1 genannten Merkmale handelt es sich hier um einen Wandaufbau, dessen Kernelement ein Leichtbetonstein darstellt. In der Abbildung 7.2 werden die Ergebnisse zweier Messreihen in unterschiedlichen Höhen gezeigt. In der ersten Messreihe wurde die zweite Steinreihe von oben entlang des Mauersegments abgefahren und es wurden kreuzpolare sowie kopolare Messungen durchgeführt. Anschließend wurde die vierte Steinreihe von oben abgefahren. Kennzeichnend für die obere Steinreihe ist der eingebaute Betonsturz, der innen- wie außenseitig von einem Metallgitter umrandet wird. Ferner befindet sich auf beiden Messhöhen jeweils in der Mitte der Steinreihen ein Wärmeleitsensor. Die Wärmeleitsensoren wurden während des Aufbaus in die Wand integriert. Abbildung 7.3 zeigt für die obere

Messreihe das ungefilterte Radarbild der Entfernungsprofile. Gemessen wurde hier im Frequenzbereich zwischen 0,8 GHz und 18 GHz, was einer Bandbreite von 17,2 GHz entspricht und zu einer theoretischen Auflösung von 0,9 cm in Entfernungsrichtung führt. Sofern nicht anders angegeben, befanden sich die Empfangs- und die Sendeantenne für alle Messungen in einem Abstand von 0,6 m zur Wand. Entsprechend zeigt sich die erste Reflexion in Abbildung 7.3 bei 0,6 m in Entfernungsrichtung.

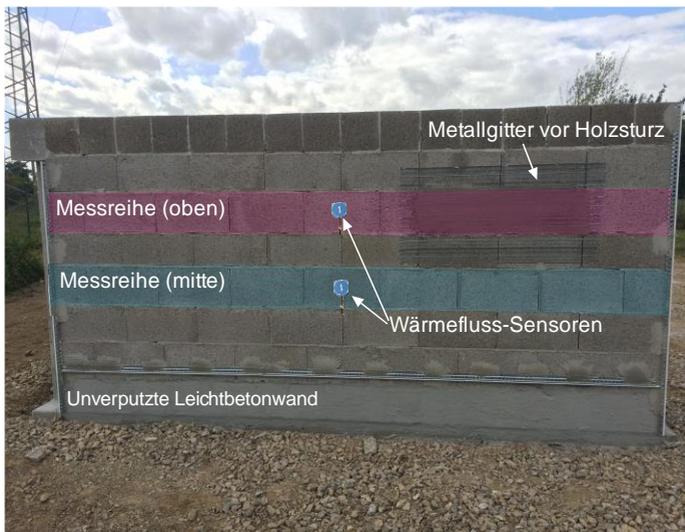


Abb. 7.2: Seitenansicht der unverputzten Leichtbetonwand. In der Mitte beider Steinreihen befindet sich jeweils ein Wärmeflussensensor.

Bei 0,65 m in Entfernungsrichtung treten entlang der Azimutrichtung im Bereich zwischen 0,5 und 1,3 m verstärkt Reflexionssignale auf. Außerhalb dieses Bereichs variieren die Intensitäten der Reflexionssignale von Zeit zu Zeit. Der Bereich zwischen 0,6 und 0,65 m repräsentiert die Putzschicht. In Azimutrichtung ist an der Stelle zwischen 2,1 und 3,3 m die Holzsturzkonstruktion zu erkennen. Das starke Reflexionssignal tritt hier bei 0,65 m in Entfernungsrichtung auf. Da es sich an dieser Stelle um das Metallgitter handelt, ist davon auszugehen, dass die Schicht zwischen 0,55 und 0,59 m den Außenputz repräsentiert. Nimmt man nun die 1,8 cm Schichtdicke für den Putz aus dem Bauplan an, beträgt der Realteil der

Permittivität für die Außenputzschicht $\varepsilon_{\text{Putz}} = 5$. Dies führt zu einem Reflexionsfaktor von $r_{\text{Luft-putz}} = 0,67$, was bedeutet, dass bereits am ersten Schichtübergang (Luft–Außenputz) mehr als 60 % der eingestrahnten Leistungsenergie reflektiert wird. Zwischen 0,5 und 2 m in Azimutrichtung sind eindeutig vier Reflexionsmuster zu erkennen. Besonders stark treten im Radarbild zwei 20 cm lange Reflexionslinien entlang der Azimutrichtung an den Stellen ①, ②, ③ und ④ auf.

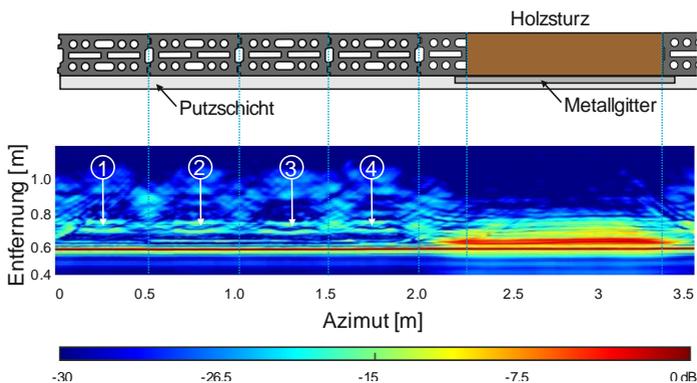


Abb. 7.3: Ungefilterte Entfernungsskizze für das obere Mauersegment aus Abbildung 7.2. Links sind eindeutig $4 \frac{1}{2}$ Leichtbetonsteine zu erkennen. Im rechten Teil des Bilds ist der verarbeitete Holzsturz und das abdeckende Metallgitterdavor zu erkennen.

Ferner sind zwischen den 20 cm langen Reflexionen weitere Reflexionen sichtbar, die die Steinübergänge darstellen (blaue gestrichelte Linien). Betrachtet man die schematisch dargestellte Steinreihenkonfiguration, so lässt sich erkennen, dass sich zwischen den einzelnen Steinen ein Lochquader mit den Abmessungen 9×5 cm befindet. Der Lochquader hat keine rechteckige Anordnung, sondern besitzt aufgrund der Steinverzahnungselemente Steigungen, welche zu nicht vernachlässigbaren Streuungen innerhalb des Ausbreitungsweges der Wellen führen und so eine klare Detailerkennung unmöglich machen.

In Abbildung 7.4 ist der linke Teil der Radaraufnahme bis zum Holzsturz aus Abbildung 7.3 noch einmal vergrößert dargestellt. Hier können die einzelnen Reflexionsstrukturen den Steinstrukturen zugeordnet werden.

Interessant ist, dass sich in Abbildung 7.3 eine parabelähnliche Reflexionsstruktur um 1,75 m in Azimutrichtung und zwischen 0,6 und 0,65 m erkennen lässt. In Abbildung 7.4 ist diese Struktur noch einmal rechts unten im Bild durch die rote gestrichelte Linie hervorgehoben. Diese Reflexionsstruktur lässt sich dem Wärmeflussensor zuordnen, welcher mittig am Stein integriert wurde. Der Wärmeflussensor verhält sich hier also wie eine Punktzielantwort.

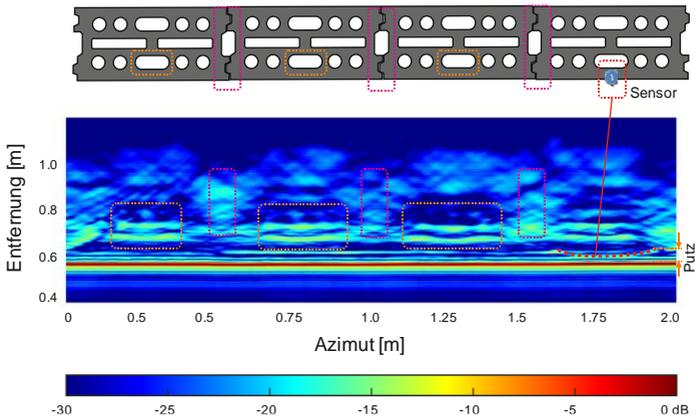


Abb. 7.4: Schematische Darstellung der Reflexionssignale aus Abbildung 7.3.

Abbildung 7.5 zeigt eine Infrarotkamera-Aufnahme der Leichtbetonwand, in welcher sich der Holzsturz klar vom Rest der Wand abhebt. Eine Aussage darüber, was genau sich in der Wand verbirgt, ist vom IR-Bild nur schwer abzuleiten.

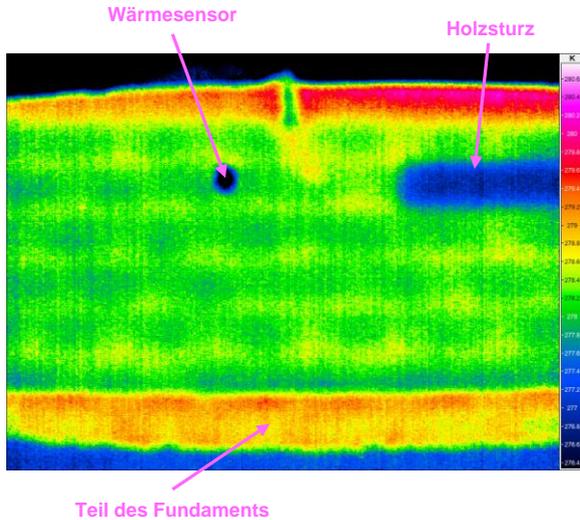


Abb. 7.5: Infrarotkamera-Aufnahme des Leichtbetonwandsegments. Der Holzsturz ist klar erkennbar [Pat18].

An diesen Aufnahmen wird noch einmal deutlich, dass die Radaraufnahmen die IR-Aufnahmen in entscheidender Weise ergänzen bzw. substantiell erweitern können. Bereits im ungefilterten Radarbilder der Entfernungsprofile lassen sich Strukturen erkennen, die den Strukturen im tatsächlichen Stein zugeordnet werden können. Ein erheblicher zusätzlicher Informationsgewinn lässt sich generieren, wenn die Entfernungsprofile mit dem Blackman-Filter gefenstert und anschließend mit der Rückprojektion zum SAR-Bild prozessiert werden. Das Ergebnis dieser Verarbeitung ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

Das Blackman-Fenster unterdrückt die Nebenkeulen stärker, die Entfernungsauflösung wird dadurch aber verschlechtert [A2]. Durch die Filterung lassen sich einige Details hervorheben. Bei 1,75 m in Azimutrichtung und 0,6 m in Entfernungsrichtung ist der oben angesprochene Wärmeflussensor erkennbar; durch die Rückprojektion können die Ergebnisse aus den Entfernungsprofilen in diesen Punkt aufsummiert werden.

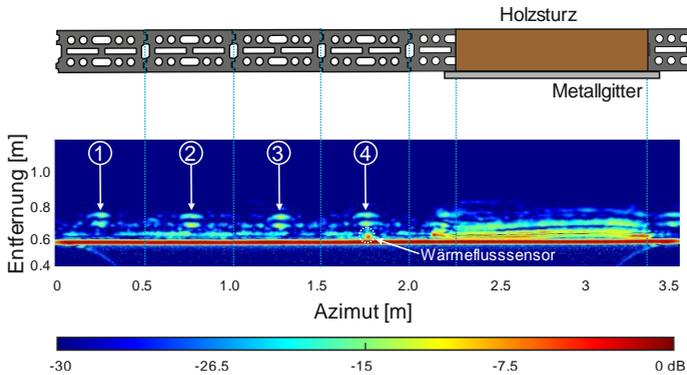


Abb. 7.6: SAR-prozessiertes Bild der oberen Leichtbetonwand aus Abbildung 7.2. Die einzelnen Entfernungprofile wurden zuvor mit dem Blackman-Fenster gefiltert.

Der Wärmefflussensor verhält sich also wie ein Punktziel. Gut sichtbar sind an den Stellen ①, ②, ③ und ④ jeweils hintereinander zwei langgezogene Reflexionslinien, welche die Längsquader im Leichtbetonstein repräsentieren. Aus dem ungefilterten Radarbild aus Abbildung 7.3 ergibt sich eine Länge von 20 cm für die jeweiligen langgezogenen Reflexionen. Da durch die verbesserte Auflösung im SAR-Betrieb die Kanten als robustes Streuzentrum interpretiert und somit die Reflexionssignale ortsrichtig aufsummiert werden, verkürzt sich die Länge auf durchschnittlich 12 cm, was der tatsächlichen Länge von 12,5 cm wesentlich näher kommt. Wie schon bei den Laboruntersuchungen am Kalksandstein tragen eine Filterung zur Unterdrückung der Nebenkeulen und eine anschließende Rückprojektion zur Detailerkennung in den Radarbildern bei; so sieht man – genau wie in den Kalksandsteinbildern – deutlich die Anfänge der einzelnen Luftsäulen auf der Höhe von 0,7 m in Entfernungsrichtung. Um die Anfänge der Lochstrukturen noch deutlicher hervorzuheben, wurden die Bildanteile bis zum Übergang Putzschicht–Leichtbeton unterdrückt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.7 zu sehen. Die Luftsäulen sind nun wesentlich besser zu erkennen. Besonders zwischen 0,75 und 2 m in Azimutrichtung lassen sich die Reflexionen deutlich erkennen. Die einzelnen Lochreflexionen haben einen Abstand von 7,5 cm, was exakt dem Wert der realen Steine entspricht.

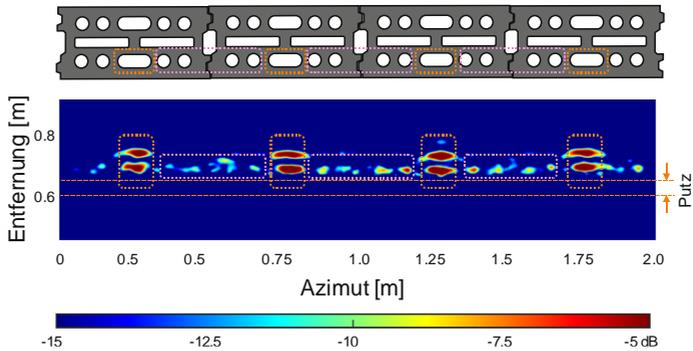


Abb. 7.7: Hervorhebung der Reflexionssignale aus Abbildung 7.6 durch manuelle Unterdrückung der Reflexionssignale der Luft-Putz-Stein-Übergänge..

Wird die Permittivität des Putzes und der Leichtbetonsteine in die SAR-Prozessierung implementiert, so ergibt sich das in Abbildung 7.8 dargestellte Bild. Die Reflexionen der Löcher der Luftsäulen treten nun deutlicher hervor.

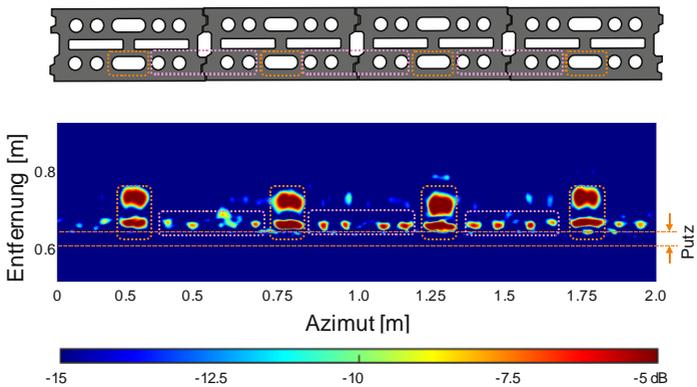


Abb. 7.8: Wird die Permittivität des Außenputzes und die des Leichtbetons benutzt, kann das SAR-Bild aus Abbildung 7.7 fokussiert werden.

In Abbildung 7.9 ist das Blackman-gefilterte SAR-Bild für die VV- und HH-Polarisation des mittleren Wandstücks aus Abbildung 7.2 dargestellt. Da sich im hier abgefahrenen Wandsegment kein einbetonierter Holzsturz

befindet, wurden insgesamt sieben Steine abgefahren. Die fokussierten SAR-Bilder des mittleren Wandsegments lassen deutlich die Luftsäulenstrukturen der Leichtbetonsteine erkennen. Im VV-Polarisationsbild zeigen sich neben den ersten Reflexionen zu Beginn der Luftsäulen auch vereinzelt Reflexionen zum Ende der Luftsäulen. Interessanterweise tritt im VV-Polarisationsbild für die letzten drei Steine eine zusätzliche Reflexion vor den Luftsäulenstrukturen auf der Höhe des Ende des Putzes auf. Im HH-Polarisationsbild ist diese Reflexion nicht sichtbar.

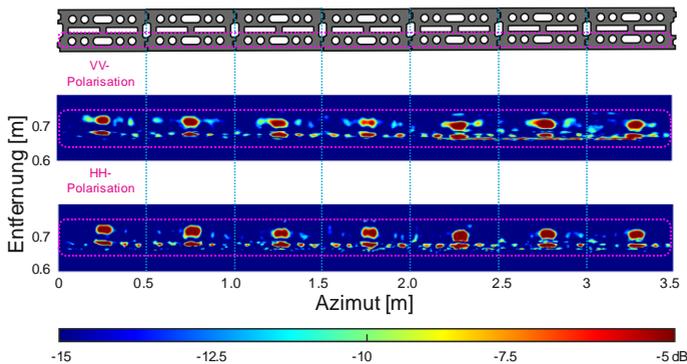


Abb. 7.9: Fokussiertes VV- und HH-Polarisationsergebnis der SAR-Prozessierung für das mittlere Wandsegment aus Abbildung 7.2.

Abbildung 7.10 liefert hierfür eine Erklärung, indem neben der VV- und HH-Aufnahme auch die kreuzpolare Aufnahme HV abgebildet ist.

Die im HH-Polarisationsbild fehlenden Signalanteile sind im HV-Polarisationsbild sichtbar. Dies legt den Schluss nahe, dass sich an dieser Stelle Strukturen im Stein befinden, welche die H-Polarisationsanteile der Welle um 90° drehen. Dies könnte durch das große Metallgitter auf der Höhe des Holzsturzes verursacht werden, welches die Steinreihe über der Messsteinreihe mitabdeckt. In einem Abstand von ca. 50 cm zur Wand liegen Teile des Metallgitters noch im Hauptkeulenbereich der Antennen und werden entsprechend auch aufgenommen. Innerhalb des Leichtbetonsteins kommt es zu acht Schichtübergängen; zählt man den Putz mit, ergeben sich insgesamt sogar neun Schichtübergänge. Ab der dritten Schicht – also nach der ersten Schicht Luftsäulen – lassen sich Strukturen innerhalb der Steine nur sehr schwer erkennen. Die Erklärung hierfür ist,

dass die eindringenden Wellen durch die vielen Schichtübergänge auf ihrem Weg den größten Teil ihrer Leistung verlieren. Darüber hinaus kommt es aufgrund der Strukturen im Inneren des Steins – vor allem durch die der Luftsäulen – zu Ausbreitungseffekten, die eine effektive Implementierung des SAR-Algorithmus verhindern: Die Streuzentren hinter den ersten Luftlochstrukturen stellen keine robusten Streuzentren mehr dar und liefern dementsprechend nichtgenügend Informationen über die interne Struktur des Steins, anhand derer das Radarbild durch die Rückprojektion fokussiert werden könnte.

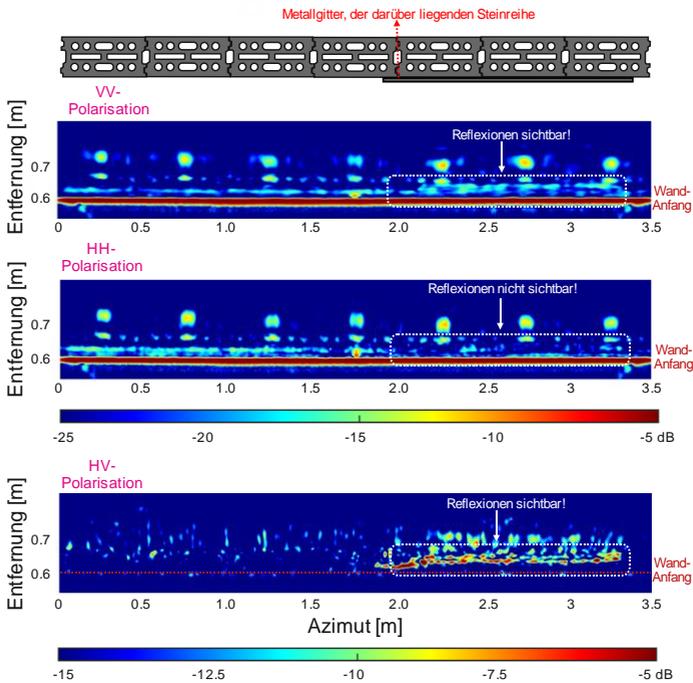


Abb. 7.10: Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Polarisationsaufnahmen fällt auf, dass für die HH-Polarisation Reflexionssignale auf der Höhe des Putzendes fehlen, während diese im VV-Polarisationsbild sichtbar sind. Wahrscheinlich werden die H-polarisierten Wellen durch das Metallgitter um 90° gedreht und sind daher im HV-Polarisationsbild sichtbar.

Trotz dieser Hindernisse lassen sich jedoch repetitive Muster im Wandsegment erkennen. Der Holzsturz konnte dadurch klar von den Steinstrukturen diskriminiert werden. Vor allem für die ersten drei Schichten konnte eine klare Strukturanalyse durchgeführt werden. Auch ohne Implementierung der Permittivität in den SAR-Algorithmus konnte hinreichend genau auf die Längen der ersten Längsquader in den Steinen geschlossen werden. Ferner konnten aufgrund der verbesserten Azimutauflösung die einzelnen Luftsäulen kenntlich gemacht werden. Hier zeigte sich – wie schon in den Laboruntersuchungen an den Steinen mit integrierten Luftsäulen –, dass eine Filterung der Entfernungsprofile mit dem von-Hann- oder dem Blackman-Fenster mit anschließender Rückprojektion auf die gefilterten Entfernungsprofile zu Ergebnissen führt, die einer ungefilterten SAR-Prozessierung deutlich überlegen sind. Mittels einfacher Ausbreitungsweganalysen konnte die Permittivität in die Prozessierung integriert werden, was es wiederum erlaubte, die SAR-Bilder zu fokussieren. Ferner konnte aufgrund der Kreuzpolarisationsmessung erklärt werden, warum Reflexionen im HH-Polarisationsbild ausblieben, während sie im VV-Polarisationsbild sichtbar waren. Dies ist auch die Ursache für die im Vergleich zu den Steinreihen stellenweise schwächeren Luftsäulenreflexionen im Metallgitterabschnitt, die zuvor ohne Gittereinfluss abgefahren wurden.

7.1.3 Stahlbetonwand

Als zweite untersuchte Wand ist in Abbildung 7.11 die Stahlbetonwand dargestellt. Sie besteht aus einem dreischichtigen Wandaufbau mit einer Außen- und Innenwand aus Stahlbeton zu je 10 cm und 8 cm Dicke sowie einer mittleren Dämmschicht des Typs „Roofmate SL-AP“ der Firma Dow, welche eine Dicke von 6 cm besitzt. Wie zuvor werden auch in diesem Abschnitt die Ergebnisse aus zwei Messreihenhöhen präsentiert.

Abbildung 7.12 zeigt Radaraufnahmen im Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 5 GHz. Die Entfernungsprofile wurden mit einem Blackman-Fenster gefiltert. Im oberen Radarbild ist das Entfernungsprofil der Aufnahme aus der obersten Messreihe für die HH-Polarisation zu sehen. Um die Wandstrukturen deutlicher sichtbar zu machen, wurde die erste Reflexion bei 0,55 m in Entfernungsrichtung im Bild unterdrückt. Für die

weitere Betrachtung lässt sich das Radarbild grob in einen linken Bereich – von 0 bis 1,5 m in Azimutrichtung – und einen rechten Bereich – von 1,5 bis 3,5 m in Azimutrichtung – einteilen.



Abb. 7.11: Die Stahlbetonwand ist in Sandwichausführung gefertigt und besteht aus einem dreischichtigen Aufbau: Stahlbeton–Dämmschicht–Stahlbeton.

Im rechten Teil des Radarbilds sind einzelne Reflexionsstellen zu erkennen (beispielhaft dargestellt durch ① und ② im Bild), welche die horizontal liegenden Eisenteile der Stahlmatte repräsentieren. Die Eisenteile verursachen aufgrund der Totalreflexion der Welle einen Abschattungseffekt, sodass für den dahinterliegenden Bereich der Wand keine Energieteile der Welle zu Reflexionen beitragen. Aus diesem Grund erscheint der Übergang von der ersten Betonschicht zur Dämmschicht nicht als durchgezogene Reflexionslinie entlang der Azimutrichtung auf der Höhe von 0,7 m in Entfernungsrichtung, sondern als Signalmuster, welches sich abwechselnd aus einem Reflexionssignal (ohne Eisen davor) und keiner Reflexion ergibt. Interessanterweise erzeugen die einzelnen Eisenelemente im Bereich zwischen 1,5 m und 2 m stärkere Reflexionen als im Bereich zwischen 2 m und 3,5 m. Der Energieverlust im zuletzt genannten Bereich lässt sich unter Hinzuziehung des Radarbilds der Kreuzpolarisation jedoch erklären. Dort zeigen sich im Bereich von 2 m bis 3,5 m in Azimutrichtung starke Reflexionen (rot gestricheltes Kästchen), die darauf hindeuten, dass die Strukturen in der ersten Stahlbetonschicht den elektrischen Feldvektor der H-polarisierten Welle um 90° drehen.

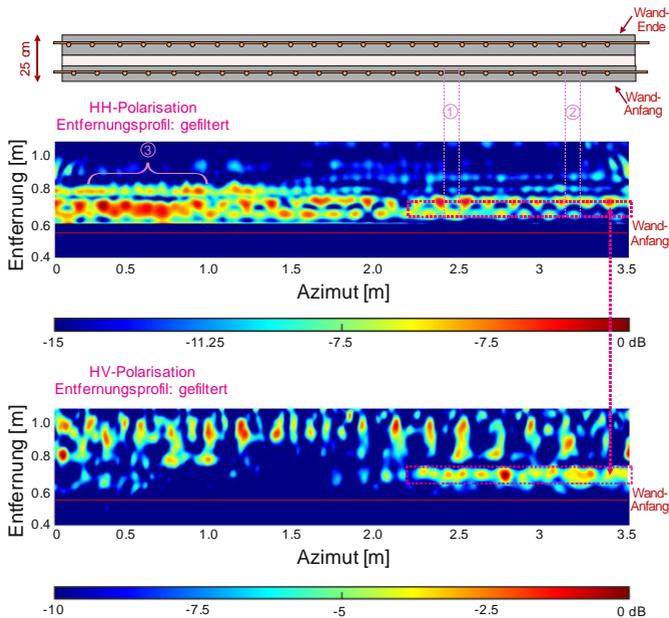


Abb. 7.12: Entfernungprofilbilder der Stahlbetonwand im Frequenzbereich von 0,8GHz bis 5GHz für die HH- und HV-Polarisationsaufnahmen.

Im linken Teil des HH-polarisierten Radarbildes zeigen sich die einzelnen Stahlelemente stärker verschwommen; dies ist besonders im Bereich zwischen 0,4 und 1,0m in Azimutrichtung auf der Höhe von 0,7m in Entfernungsrichtung erkennbar (③). Nach der Auswertung der Ergebnisse für den Frequenzbereich zwischen 0,8GHz und 13GHz ergeben sich die in Abbildung 7.13 dargestellten Radaraufnahmen. Im oberen Bild ist das Entfernungprofil für eine Blackman-Filterung dargestellt. Die Eisenelemente sind im linken Bereich des Radarbildes nun deutlich besser erkennbar als im Radarbild aus Abbildung 7.12 oben.

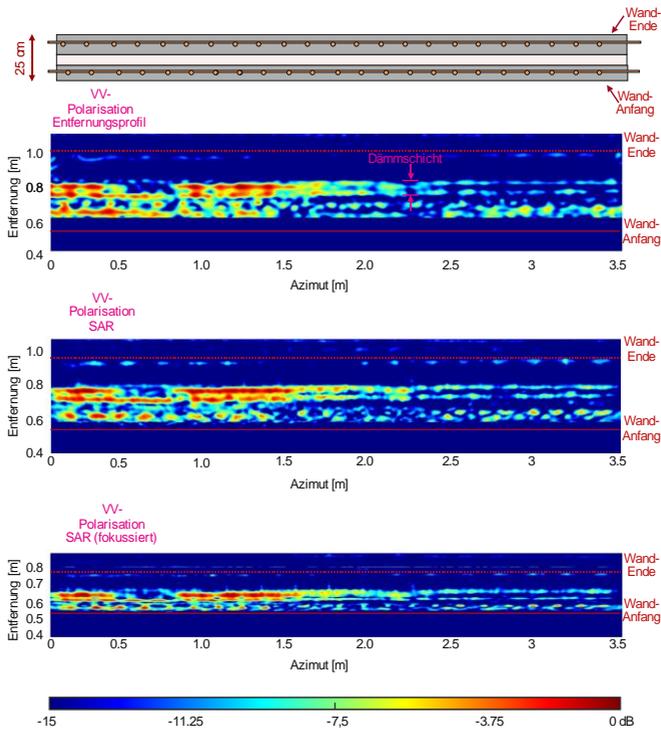


Abb. 7.13: Entfernungprofil- und SAR-Aufnahmen im Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 13 GHz der oberen Messreihe der Stahlbetonwand für die HH-Polarisation.

Wird nun auf den Entfernungprofil Datensatz die Rückprojektionsmethode angewendet, so ergibt sich für die Stahlbetonwand das mittlere Radarbild in Abbildung 7.13. Im Entfernungprofil erscheinen die einzelnen Stahlelemente zwischen 0,6 und 0,7 m in Entfernungsrichtung noch als zusammenhängende, feste Struktur. Durch die verbesserte Auflösung in Azimutrichtung lassen sich die einzelnen Stahlelemente hier jedoch voneinander unterscheiden. So sind gerade im rechten Teil des Bildes versetzte Strukturen erkennbar. Da die Dicke der Schichten bekannt ist, lässt sich anhand der aus dem Bild ermittelbaren Abstände der einzelnen Schichten auf die Permittivitäten der einzelnen Schichten schließen.

Werden diese bei der Anwendung der Rückprojektion miteinbezogen, so ergibt sich das untere Bild in Abbildung 7.13. Dieses Bild stellt die fokussierte SAR-Aufnahme dar. Die Stahlelemente in der ersten Schicht, die im oberen Bild teilweise noch verschwommen erschienen, werden im linken Bereich des unteren Bildes nun fokussierter dargestellt.

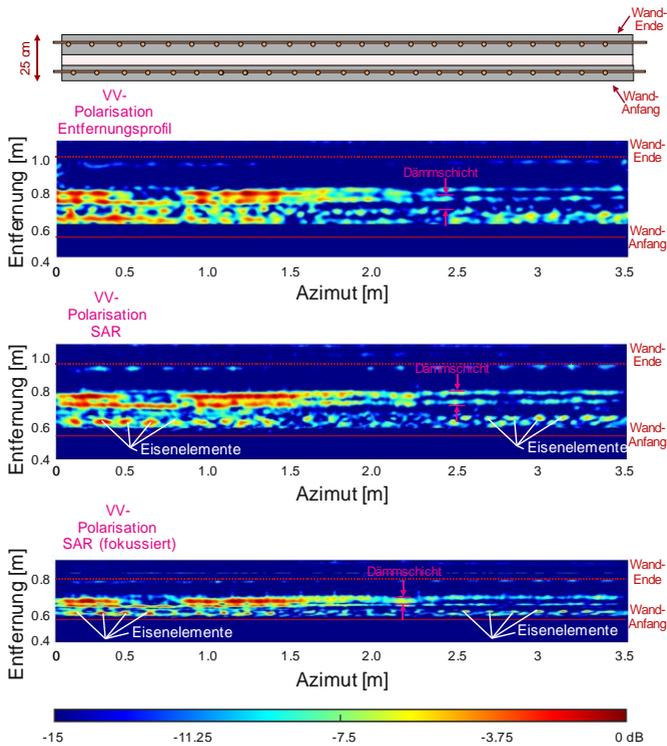


Abb. 7.14: Entfernungsprofil- und SAR-Aufnahmen im Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 13 GHz der oberen Messreihe der Stahlbetonwand für die VV-Polarisation.

Ähnliche Rückschlüsse auf die innere Stahlelementstruktur lassen sich ziehen, wenn die VV-polarisierten Radaraufnahmen untersucht werden, welche in Abbildung 7.14 dargestellt sind. Analog zur Darstellung in Abbildung 7.13 stellt das obere Bild das Entfernungsprofil mit Blackman-

Filterung dar. Das mittlere und das untere Bild in Abbildung 7.13 stellen die Ergebnisse der Rückprojektionen mit und ohne Einberechnung der Permittivitäten der einzelnen Schichten dar. Auch hier zeigt sich die besondere Stärke der SAR-Methodik, da durch die verbesserte Azimutauflösung die Stahlelemente in der ersten Schicht deutlich sichtbar dargestellt werden können. Weiterhin erkennbar ist, dass die Hauptreflexionen der Stahlelemente im linken Teil des Bildes von 0 bis 1,5 m mit denen des HH-polarisierten Bildes übereinstimmen, was auf vertikale Stahlelemente hinweist. In den rechten Teilen beider Bilder zeigt sich nun aber, dass die vertikalen Stahlelemente im VV-polarisierten Bild deutlicher hervortreten als im HH-polarisierten Bild. Die Dämmschicht ist klar durch die langgezogenen Reflexionssignalanteile entlang der Azimutrichtung in den SAR-Bildern erkennbar. Der Schattierungseffekt ist hier im Vergleich zur Entfernungprofilaufnahme aus Abbildung 7.12 nur schwach ausgeprägt. Dennoch lässt sich in den VV- und HH-polarisierten Bildern besonders im rechten Teil der Bilder der Verlauf von Schatten und Reflexion entlang des Übergangs der ersten Betonschicht zum Dämmmaterial erkennen. Im linken Bereich der Radarbilder lässt sich dieser Verlauf im angezeigten Dynamikbereich nicht gut erkennen; wird aber der Dynamikbereich von 0 bis -8 dB angezeigt, zeigt sich auch hier ein deutlich erkennbarer Radarschatten hinter den Stahlelementreflexionen.

7.1.4 Hochlochziegelsteinwand

Abbildung 7.15 zeigt die unverputzte Hochlochziegelsteinwand. In der zweiten Steinreihe von oben wurde ein Betonsturz mit einer Länge von 90 cm in das Wandsegment eingebaut. Ummantelt wird die Wand wie im Fall zuvor von einer Innen- und Außenputzschicht mit Dicken von je 1,5 und 2 cm. Auch hier wurden zwei Messreihen durchgeführt. Die Wand wurde entlang der zweiten Steinreihe und der vierten Steinreihe von oben abgefahren. Wie bei der Leichtbeton- und der Stahlbetonwand fanden auch bezüglich der Hochlochziegelsteinwand kopolare (VV- und HH-Polarisation) und kreuzpolare (HV-Polarisation) Messungen statt.

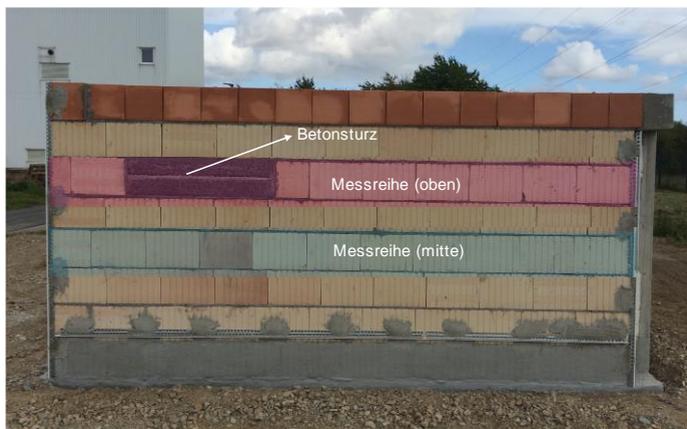


Abb. 7.15: Unverputzte Hochlochziegelsteinwand mit eingebautem Betonsturz in linken oberen Teil der Wand.

Abbildung 7.16 zeigt die SAR-Aufnahmen der oberen Messreihe im Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 8 GHz. Als Prozessierungsmethode wurde erneut die klassische Rückprojektion auf die Entfernungprofile angewendet. Als Filtermethode für die Entfernungprofile wurde hier sowie in allen nachfolgenden prozessierten Bildaufnahmen die Apodisation [Sta95] angewendet. Im oberen Bild ist die HH- und im unteren Bild die VV-polarisierte Aufnahme dargestellt. Deutlich sichtbar ist in beiden Bildern die erste Reflexion bei 0,55 m. Zwischen 0,6 und 1,6 m in Azimutrichtung ist klar der reflexionsarme Raum erkennbar, der das Reflexionssignal des Betonsturzes darstellt (①). In diesem Bereich sind vor allem im HH-polarisierten Bild noch Signalanteile zwischen 0,55 und 0,7 m in Entfernungsrichtung erkennbar (②). Diese Signalanteile der umliegenden Hochlochziegelsteine werden bei der Anwendung der Rückprojektion in die Randbereiche der Bildpixel des Betonsturzes geschrieben und aufsummiert; sie stellen somit keine echten Reflexionen dar, sondern Artefakte, die durch die Rückprojektion entstehen. In den Entfernungprofilen (hier nicht gezeigt) entfallen diese komplett und es ist nur die erste Reflexion bei 0,55 m sichtbar. Zwischen 4 und 4,5 m in Azimutrichtung am äußeren rechten Rand im Bild ist der kleine Teil der angebundenen Stahlbetonwand sichtbar (③). Auf der Höhe von ca. 0,8 m ist dort der Beginn des Stahlbetonwandsegments ersichtlich, welcher eigentlich mit dem Ende der Ziegelsteinwand bündig abschließen müsste.

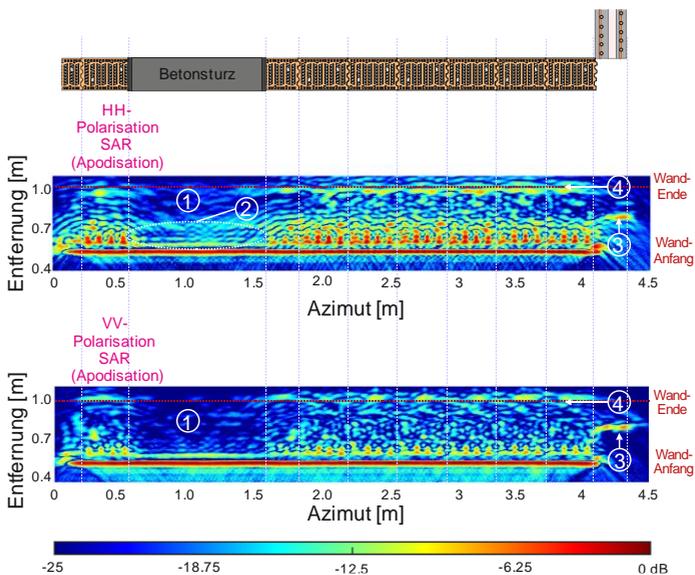


Abb. 7.16: SAR-Aufnahmen der oberen Messreihe der Hochlochziegelsteinwand mit implementiertem Betonsturz.

Durch den verlängerten Ausbreitungsweg der Wellen im Hochlochziegelstein zeigt sich das Ende der Lochziegelsteinwand jedoch versetzt bei 1,0m (Ⓞ). Die innere Struktur der Hochlochziegelsteine ist besonders im Bereich zwischen 0,55 und 0,8m in Entfernungsrichtung im HH-Polarisationsbild erkennbar. Hier lassen sich periodische Strukturen entlang der Azimutrichtung erkennen. Interessanterweise treten diese Strukturen nur für die erste Hälfte der Steine in Entfernungsrichtung auf; danach werden die reflektierten Signalanteile schwächer und das periodische Reflexionsmuster verschwindet zunehmend. Das Ende der Wand tritt deutlich bei 1,0m in Entfernungsrichtung hervor.

In Abbildung 7.17 ist die mittlere Messreihe an der Hochlochziegelsteinwand dargestellt. Wie in Abbildung 7.16 handelt es sich hier um die VV- und HH-polarisierten Aufnahmen des Wandsegments. In diesem Fall wurde die Reflexion, die den Wandanfang repräsentiert, jedoch unterdrückt, um die nachfolgenden Strukturen deutlicher hervortreten zu lassen. Erneut zeigen sich starke Reflexionsmuster entlang der

Azimutrichtung, welche sich periodisch wiederholen. Pro Stein treten dabei vier Reflexionsmuster in Erscheinung, die in Entfernungsrichtung schwächer werden, je weiter man sich dem Ende der Wand nähert.

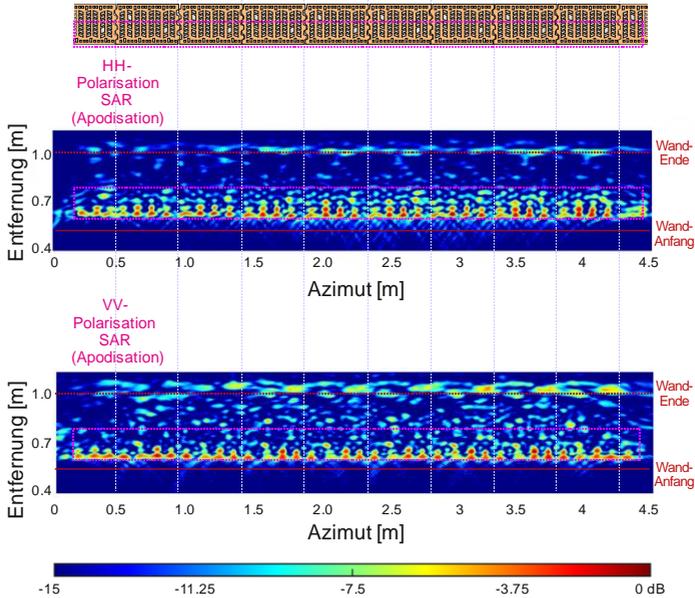


Abb. 7.17: SAR-Aufnahmen der mittleren Messreihe der Hochlochziegelsteinwand. Die Reflexion des Wandanfangs wurde hier unterdrückt.

Ähnliche Abschwächungen in der hinteren Hälfte der Steinreihe sind auch im HV-polarisierten SAR-Bild ersichtlich. In Abbildung 7.17 ist ein Vergleich zwischen der HH- und der HV-polarisierten SAR-Aufnahme dargestellt. Interessanterweise zeigt die HH-polarisierte Aufnahme im Gegensatz zur HV-polarisierten Aufnahme keine Reflexionen zwischen den einzelnen Steinen. Im gewählten Dynamikbereich von 0 bis -10 dB zeigt sich dies durch vier kleine Reflexionspunkte, die jeweils an den Übergängen zwischen den einzelnen Steinen auftreten und unten mit kleinen roten Kreisen (⊙) markiert sind.

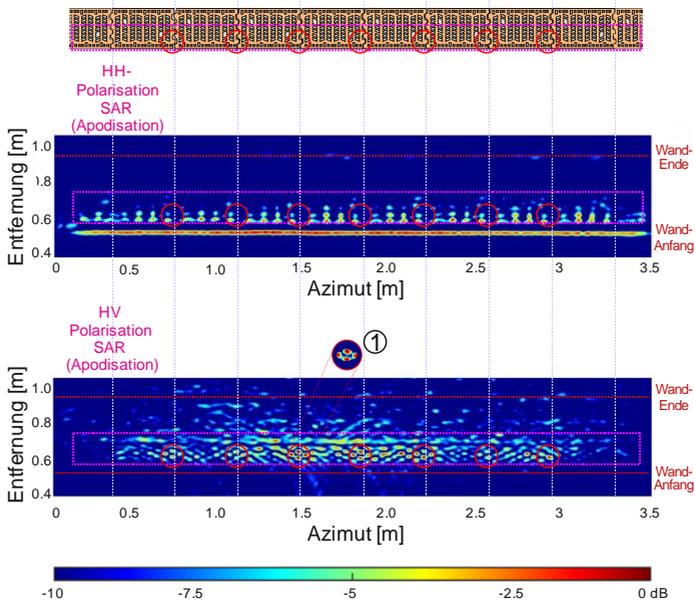


Abb. 7.18: Vergleich der Kopolar- und der Kreuzpolarisierung der mittleren Hochlochziegelsteinaufnahme.

Erneut zeigt sich eindeutig, dass kopolare Untersuchungen an Gebäudewänden durch kreuzpolare Messungen gewinnbringend ergänzt werden können. Zum Abschluss des Kapitels wird im nachfolgenden Abschnitt ein reales Wohnhaus untersucht.

7.2 Charakterisierung eines Altbaubäudes

Auf der Grundlage eines von der RWE AG Liegenschaft ausgehändigtem Dossiers kann eine grobe Beschreibung des zu untersuchenden Gebäudes erstellt werden. Das Haus befindet sich in der in Nordrhein-Westfalen gelegenen Kleinstadt Morschenich, südlich des Tagebaus Hambach. Zum Zeitpunkt der Messung war das Haus leerstehend und seit mehreren Jahren unbewohnt. Das Baujahr liegt schätzungsweise in den 1960er Jahren.

Die Außenwände des Gebäudes haben einen dreischichtigen Aufbau; laut Dossier besitzt die Klinkerfassade eine Dicke von 11,5 cm, gefolgt von einer Luftschicht von 2 cm, hinter der sich das eigentliche Mauerwerk aus Ziegel- oder Bimssteinen mit einer Dicke von 24 cm inklusive des Innenputzes und der Tapeten befindet. Eine schematische Zeichnung dazu ist in Abbildung 7.19 oben dargestellt. Das Mauerwerk der Außenfassade ist im Märkischen Verband [Czi97] aufgebaut, bei dem sich in einer Steinreihe jeweils zwei Läufer (längsseitige Steine) mit einem Binder abwechseln.

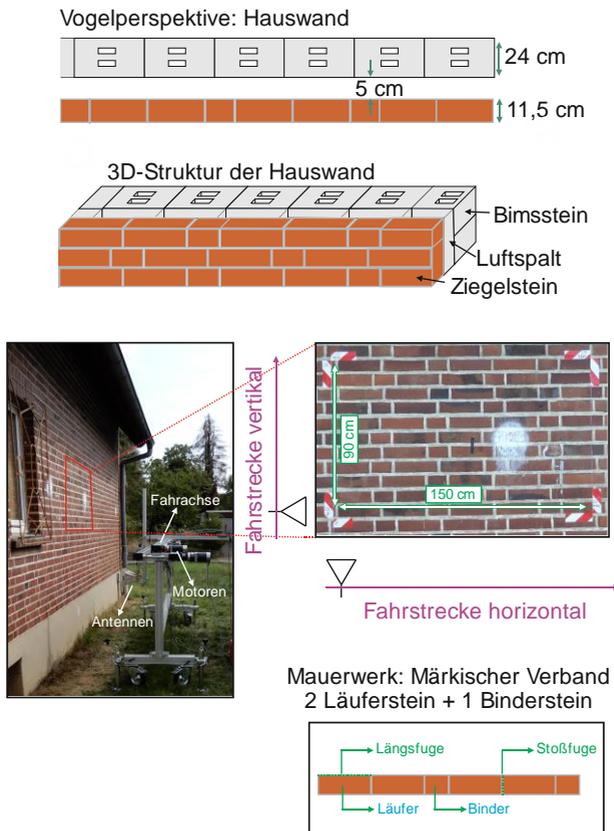


Abb. 7.19: Westseite des Klinkergebäudes in Morschenich. Das rechts abgebildete Wandsegment wurde zusätzlich zur horizontalen Abtastung (mit einer Abtastschrittweite von 1 cm) in Schritten von 2 cm Länge vertikal abgefahren.

Dies hat zur Folge, dass die Stoßfugen jeder zweiten Steinreihe übereinanderliegen. In Abbildung 7.19 sind zusätzlich unten die Westseite des Gebäudes sowie Teile des Aufnahmesystems im linken Bild dargestellt. In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurde primär eine Strukturanalyse des Mauerwerks angestrebt. Dabei ging es zunächst um grundlegende Fragen wie „Besitzen die Klinker der Außenfassade eine homogene oder eine inhomogene innere Struktur?“ Ähnliche Fragen stellten sich bezüglich der Wand, die der Innenseite des Gebäudes zugewandt ist, da dem Dossier nicht zu entnehmen war, ob es sich um Lochbimssteine oder um homogene Bimssteine handelt. Um eine Aussage über die Anzahl der vorhandenen Schichten sowie über eventuell bestehende Inhomogenitäten in der Wand zu treffen, wurde zunächst das in Abbildung 7.19 gezeigte Wandsegment zweidimensional abgefahren. Die Wand wurde hierbei zusätzlich zur vertikalen Abtastung in Schritten von 2 cm in vertikaler Richtung abgefahren, woraus sich in der Summe 45 Wandprofilaufnahmen in vertikaler Richtung ergaben. Die diesen Aufnahmen zu Grunde liegenden Messparameter können Tabelle 7.2 entnommen werden.

Tab. 7.2: Werte für die Permittivitäten und Schichtdicken der einzelnen Wand-schichten, die durch Messung oder Probebohrung ermittelt wurden.

Parameter/Schicht		Probebohrung/Hohlleiter	Zusatzinformation
Klinkerstein	$\epsilon'_{r,1}$	3,9	
	d_1	11,5 cm	gemessen
Luft	$\epsilon'_{r,2}$	1,0	
	d_2	2-6 cm	Probebohrung mit anschließender Messung
Bimsstein	$\epsilon'_{r,3}$	unbekannt	nicht vermessen
	d_3	24-27 cm	Schätzung
Gesamtdicke	d_{ges}	43,5 cm	gemessen

Ein erstes interessantes Ergebnis betrifft das Verhältnis von Mörtel zu Klinkerstein in der ersten Schicht. Auf einen Quadratmeter ausgedrückt

verteilen sich 27 % der Fläche auf den Mörtel und 73 % auf die Klinkersteine. Die einzelnen Lager- und Stoßfugen besitzen hierbei eine Dicke von 2 cm.

7.2.1 Strukturanalyse

Das sequenzielle Abfahren des Wandsegments in unterschiedlichen vertikalen Höhenabschnitten bringt den Vorteil, dass im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen nicht nur Einzelsegmente der Wand untersucht und interpretiert werden können, sondern – durch die Hinzunahme der vertikalen Richtung – auch eine flächenbezogene Interpretation möglich ist. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Implementierung der vertikalen Informationsaufnahmen in den Rückprojektionsalgorithmus. Hiermit lässt sich das Radarbild auch in der vertikalen Ebene fokussieren, was einer verbesserten Auflösung in vertikaler Richtung entspricht.

Abbildung 7.20 zeigt hierzu ein horizontal und vertikal fokussiertes SAR-Bild, welches der Mitte der zweiten Steinreihe von unten entspricht. Der prozessierte Frequenzbereich beträgt hier 0,8 GHz bis 5 GHz, was zu einer Entfernungsauflösung von 3,2 cm führt. Deutlich ist hier die erste Reflexion bei 0,3 m in Entfernungsrichtung zu erkennen; nachfolgend sind erst ab 0,5 m in Entfernungsrichtung wieder Reflexionen entlang der Azimutrichtung sichtbar. Weitere starke Reflexionen sind bei 0,55 m ersichtlich. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um den im Dossier erwähnten Luftspalt handelt. Probebohrungen haben diese Vermutung bestätigt. Aus den beiden Reflexionen bei 0,5 m und 0,55 m lässt sich jedoch schließen, dass die Größe des Luftspalts an dieser Stelle in der Größenordnung von etwa 5 cm liegen muss und nicht, wie im Dossier angegeben, bei etwa 2 cm. Zwischen 0,55 m und 0,75 m (magentafarben gestrichelte Linie) befinden sich drei klar ersichtliche Doppelreflexionen an den Stellen bei 0,25 m, 0,5 m und 0,8 m in Azimutrichtung. An denselben Stellen in Azimutrichtung sind zwischen 0,75 m und 0,9 m ebenfalls Doppelreflexionen erkennbar.

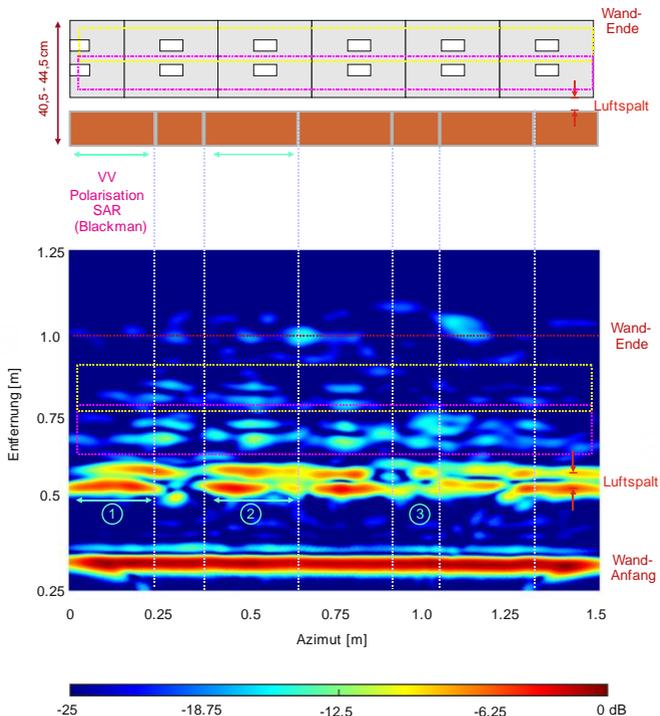


Abb. 7.20 : SAR-Bild der zweiten Steinreihe von unten des in Abbildung 7.19 dargestellten Wandsegments für den Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 5 GHz.

Die sechs Doppelreflexionen lassen vermuten, dass zumindest in diesem Segment der Wand Steine verbaut wurden, die zwei Lochkammern beinhalten. An einer anderen Stelle der Westwand wurden Teile der Innenwand herausgeschlagen, um zu prüfen, welche Steinart verbaut wurde. Wie sich herausstellte, handelt es sich, wie im Dossier beschrieben, um Bimssteine. Ferner konnte festgestellt werden, dass an den aufgeschlagenen Stellen Bimssteine mit zwei Hohlraumkammern verbaut wurden. Dies wurde in der Schemazeichnung des Wandsegments in Abbildung 7.20 für die hintere Steinreihe berücksichtigt. Es ist aber nicht auszuschließen, dass auch Bimssteine ohne Hohlraumkammern verbaut wurden.

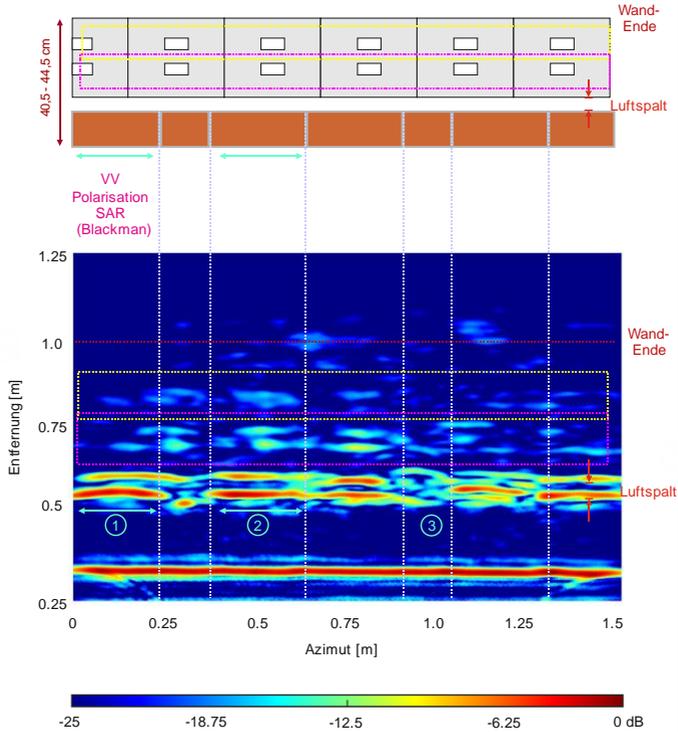


Abb. 7.21: SAR-Bild der zweiten Steinreihe von unten des in Abbildung 7.20 dargestellten Wandsegments für den Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 13 GHz.

Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangt man, wenn der Frequenzbereich zwischen 0,8 GHz und 13 GHz prozessiert wird (Abbildung 7.21). Unter Einbeziehung der zusätzlichen Frequenzanteile von 5 GHz bis 13 GHz ergibt sich eine Entfernungsauflösung von 1,1 cm. Es lassen sich ähnliche Strukturverteilungen erkennen wie im zuvor gezeigten SAR-Bild aus Abbildung 7.20. An der Reflexionslinie bei 0,5 m in Entfernungsrichtung ergeben sich nun aber stellenweise klarere Reflexionen, die eindeutiger auf die einzelnen Schichtgrenzen hinweisen. Dies lässt sich vor allem bei den beiden ersten Läufersteinen ① und ② zeigen; insbesondere bei ② zeigt sich die hintere Seite des Steins über die gesamte Länge des Steins hinweg sehr deutlich. Bezüglich des Bindersteins zwischen ① und ② ist davon

auszugehen, dass dieser nicht bündig mit dem Bimsstein abschließt und sich das Ende des Bindersteins sogar 2 cm vor den umliegenden Läufern ① und ② befindet (bezgl. Läufer- und Binderstein siehe Abbildung 7.19). In der Regel werden die Binder aus den Läufern hergestellt, indem diese in der Mitte durchgesägt oder entsprechend abgeschlagen werden. Im untersuchten Fall scheint es nicht unwahrscheinlich, dass es sich um einen Stein handelt, der etwas zu kurz abgeschlagen wurde. Eine weitere Untersuchung in Form einer Probebohrung mit dem Endoskop im Luftspalt ergab zudem, dass die Klinkerfassade nicht über die Binder mit der Bimssteinwand verbunden zu sein scheint. Dieses Ergebnis ist jedoch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Insbesondere für den Binder ③ zwischen 0,9 und 1,1 m kann keine eindeutige Reflexion auf der Höhe der umliegenden Läuferenden gefunden werden. Lediglich eine schwache Reflexion in Entfernungsrichtung bei 0,55 m deutet den Übergang Klinkerstein–Bimsstein an. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass innerhalb des Luftspalts zwischen den Klinkersteinen und den Bimssteinen Mörtelbrücken vorhanden sind, die durch unsaubere Mauerwerksarbeiten entstanden. Auch an anderen Stellen sind keine eindeutigen Reflexionen erkennbar, die eine klare Trennung zwischen den Übergängen Klinker–Luftspalt und Luftspalt–Bimsstein ermöglichen würden. Dennoch lässt sich durch die visuelle Auswertung ein dreischichtiger Wandaufbau erkennen; dieser Eindruck wird durch Abbildung 7.22 verstärkt.

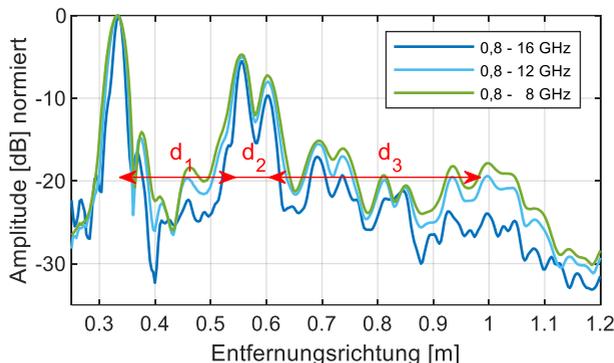


Abb. 7.22: Aufsummierte SAR-Profile entlang der Azimutrichtung.

Die Abbildung zeigt die Durchschnittsprofile der zweiten Steinreihe von unten aus Abbildung 7.20, wobei für verschiedene Frequenzbereiche entlang der Azimutrichtung alle SAR-Profile aufsummiert und normiert wurden. Die ersten beiden Schichten sind als homogen anzusehen. Positiv hervorzuheben ist dabei, dass sich Dicke der zweiten Schicht trotz der Unregelmäßigkeiten entlang der Azimutrichtung eindeutig auf 4,8 cm bestimmen lässt. Von $d_2 = 0,7$ m bis 0,74 m sowie von $d_2 = 0,81$ m bis 0,85 m erscheinen die Doppelreflexionen, die durch die Luftspalten innerhalb der Bimssteine verursacht werden. Das Ende des Steins ist nunmehr – je nachdem, in welchem Bereich gemessen wird – an der Stelle 0,93 m oder bei 1,0 m auszumachen: Da sich die Wellen im Bereich der Luftspalten schneller ausbreiten und damit früher ans Ende der Wand gelangen, erscheint das Ende des Steins hier bei 0,94 m, wohingegen sich für die homogenen Teile des Bimssteins ein längere Ausbreitungszeit ergibt, der zu einem Ende bei $d_3 = 1,0$ m führt.

7.2.2 Rückrechnung auf Wandparameter

Die oben dargestellte 2D-Abtastung der Wand mit anschließender SAR-Prozessierung in vertikaler und horizontaler Richtung vermittelt einen guten ersten Eindruck von der Struktur des Wandaufbaus. Der in den vorherigen Kapiteln vorgestellte Rückrechneralgorithmus ist allerdings auf monostatische Messungen ausgelegt und berücksichtigt keinen Verstärker im Sendezweig. Aus diesem Grund wurde für die Ermittlung der Wandparameter ein Wandsegment abgefahren, wobei monostatische Messungen vorgenommen wurden. Das abgefahrte Wandstück ist in Abbildung 7.23 dargestellt. Rechts oben – neben der Abfahrmarkierung – befindet sich das Wandsegment, das im Abschnitt zuvor untersucht wurde. Wie im vorigen Abschnitt ergab die Auswertung der Strukturanalyse einen dreischichtigen Aufbau mit je zwei homogenen Schichten (Klinkerstein, Luftspalt) und einer Schicht aus inhomogenen Steinen (Bimsstein). Die SAR-prozessierte Aufnahme der Wandmessung ist in Abbildung 7.25 oben für einen Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 8 GHz dargestellt.



Abb. 7.23: Untersuchtes Wandsegment zur Berechnung der Wandparameter.

Mit Hilfe der visuellen Auswertung der Entfernungprofile, der SAR-Bilder in verschiedenen Frequenzbereichen und unterschiedlichen Filtermethoden konnten die Simulationsparameter bestimmt werden, die in Tabelle 7.2 aufgelistet sind. Zusätzlich halfen die im vorherigen Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse aus den 2D-SAR-Bildern. Im Großen und Ganzen lieferten die beiden Analysen größtenteils ähnliche Ergebnisse. Lediglich für den Luftspalt wurde für den gescannten Bereich aus Abbildung 7.23 als Startwert für d_2 eine Dicke von 5,5 cm gewählt. Die Reflexionsfaktoren wurden hier im Frequenzbereich von 0,8 GHz bis 8 GHz berechnet und mit dem Durchschnittsprofil des gescannten Bereichs verglichen. Der ermittelte Wert für die Gesamtdicke der Wand belief sich somit auf 43,5 cm. Mit diesem Wert ließen sich die berechneten Reflexionsfaktoren weiter filtern, woraus die in Abbildung 7.24 gezeigte Häufigkeitsverteilung der Permittivitäten für die einzelnen Schichten generiert werden konnte. Für die erste Schicht ergab sich ein Maximalwert von 4, für die zweite Schicht ein Maximalwert von 2 und für die dritte Schicht ein Maximalwert von 2,5. Auffallend ist, dass die Häufigkeitsverteilung bezüglich der ersten Schicht vom Wert 4 bis zum Wert 2 linear abnimmt. Die Häufigkeitsverteilung für die zweite Schicht – Luft – besitzt ihr Maximum bei 2; danach folgen die Werte 1,75, 1,5 und 1,25. Es treten allerdings auch Werte auf, die nahe beim Verteilungsmaximum für den Klinkerstein, also bei einem Wert von 4, liegen. Die Luftschicht wird in diesem Fall nicht als Luftschicht, sondern als Teil der ersten Schicht von der Welle

gesehen. Es wäre hier auch laut [Gor21] möglich, dass es sich bei der Schicht um einen Leichtbeton oder Porenbeton handeln könnte.

Tab. 7.4: Simulationsparameter zur Berechnung der Schichtdicken und Schichtpermittivitäten.

Variable	Wert
Schicht 1: Vollziegelstein $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$,	[2,0 ; 4,0]
Schicht 2: Luft $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$,	[1,0 ; 4,0]
Schicht 3: Bimsstein $[\varepsilon'_{r,\min}; \varepsilon'_{r,\max}]$,	[1,0 ; 4,0]
Für alle Schichten: $[\varepsilon''_{r,\min}; \varepsilon''_{r,\max}]$,	[0,05 ; 0,25]
Inkrement Realteil Permittivität: $\Delta\varepsilon'_r$	0,1
Inkrement Imaginärteil Permittivität: $\Delta\varepsilon''_r$	0,05
$d_{1,\min}; d_{1,\max}$ in [cm]	[15,9 ; 22,5]
$d_{2,\min}; d_{2,\max}$ in [cm]	[2,8 ; 5,5]
$d_{3,\min}; d_{3,\max}$ in [cm]	[21,4 ; 42,8]

Wie in den Kapiteln 3 und 6 beschrieben, wird pro Schicht über die besten 50 Ergebnisse gemittelt. Die Ergebnisse dieser Mittelung für jede Schicht sind in Tabelle 7.5 aufgelistet. Die Ergebnisse für den Klinkerstein liegen bei einem durchschnittlichen Wert von 3,5, wobei die ermittelte Dicke von 12,1 cm nur -5 % von den realen Werten entfernt liegt. Die Abweichung des Durchschnittswerts für die Permittivität des Luftspalts hingegen ist mit +37 % relativ stark ausgeprägt. Hierbei ist allerdings zu

berücksichtigen, dass die absoluten Werte sehr klein sind, sodass der relative Fehler auch bei kleinen absoluten Abweichungen prozentual stärker ins Gewicht fällt als bei großen absoluten Messwerten.

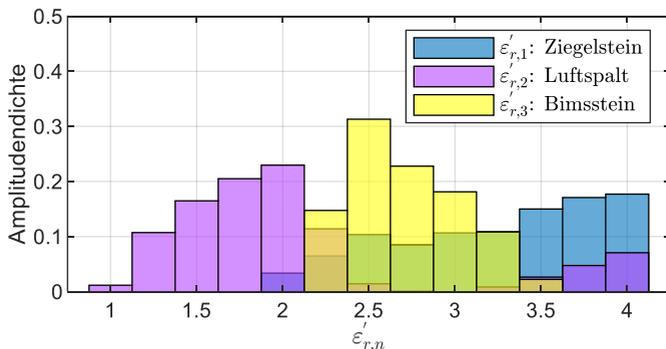


Abb. 7.24: Amplitudendichteverteilung der einzelnen Schichten der Dreischichtmessung Klinkerstein ($\epsilon'_{r,1}$) – Luftspalt ($\epsilon'_{r,2}$) – Bimsstein ($\epsilon'_{r,3}$).

Bezüglich der berechneten Durchschnittsdicke des Luftspalts ergibt sich je nach Vergleichswert (Probebohrung oder Dossier) ein relativer Fehler von maximal 50 %. Für den Bimsstein liegt kein anhand einer Hohlleitmessung ermittelter Permittivitätswert vor. In der Regel werden Bimssteine den Porenbetonsteinen zugeordnet, deren Permittivitätswerte üblicherweise zwischen 1,5 und 2,5 liegen [Gor21].

Geht man vom ermittelten Schichtdickenwert von 27,4 cm aus, so ergibt sich je nach Referenzwert für die gemessene Schichtdicke eine Abweichung von -1,5 % oder -9,6 %. Abweichungen in dieser Größenordnung sind aufgrund des formalen Zusammenhangs zwischen der Schichtdicke und der Permittivität auch mit Bezug auf die Permittivitätswerte des Bimssteins zu erwarten. Auffallend ist, dass die Abweichungen bezüglich des Luftspalts besonders stark ausgeprägt sind und dass die Häufigkeitsverteilung sich um den Wert 2 konzentriert. In den Laboruntersuchungen waren hier eindeutigere Ergebnisse vorhanden. Diesbezüglich sind also weitere Untersuchungen nötig, bei denen verschiedene Schichtdicken für den Luftspalt angenommen werden müssen. Darüber hinaus ist zu konstatieren, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Anzahl der

gemessenen Frequenzpunkte eine wichtige Rolle bei der Berechnung der simulierten Werte spielt.

Tab. 7.5: Simulationsergebnisse aus der Rückrechnung. Die Permittivitäts- und Schichtdickenwerte wurden über die besten 50 Ergebnisse der jeweiligen Schicht gemittelt.

Parameter/Schicht		$\bar{A}_{\min,50}$	Hohlleitermes- sung/Bohrung	F_R
Vollziegelstein	$\epsilon'_{r,1}$	3,5	3,9	-5,6 %
	d_1	12,1 cm	11,5 cm	-5,2 %
Luft	$\epsilon'_{r,2}$	1,87	1,0	+37 %
	d_2	4 cm	2–6 cm	max. 50 %
Bimsstein	$\epsilon'_{r,3}$	2,4	unbekannt	–
	d_3	27,4 cm	25–27 cm	-1,5 bis -9,6 %

7.2.3 Fokussierte Bildgebung

Trotz der oben erläuterten Abweichungen konnten genau wie bei den Laboruntersuchungen Werte ermittelt werden, anhand derer sich der Wertebereich berechneten Permittivitäts- und Schichtdickenwerte für die in der Wand verbauten Materialien in sinniger Weise eingrenzen lässt. Pfllegt man die aus den 50 besten Messungen berechneten Durchschnittswerte aus Tabelle 7.5 in die Prozessierung der Rückrechnungsmethode ein, so erhält man das in Abbildung 7.26 gezeigte SAR-Bild. Abbildung 7.25 entspricht dem unfokussierten SAR-Bild, d.h., die Ausbreitungswege in die Pixel wurden hier ohne Berücksichtigung des Einflusses der Permittivitäten berechnet.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass durch die Berücksichtigung der Permittivitäten in Abbildung 7.26 die Auflösung in Entfernungsrichtung kleiner wird und dass die 3dB-Breite der Reflexions-Peaks dadurch schmaler erscheint als im unfokussierten Bild. Die Implementierung der Permittivitäts- und Schichtdickenwerte macht sich aber auch in anderer Weise

bemerkbar. So treten die Reflexionen bei ① und ② der beiden Läufersteine, die bei ca. 0,2m in Entfernungsrichtung den Übergang Klinkerstein–Luftspalt repräsentieren, deutlich hervor.

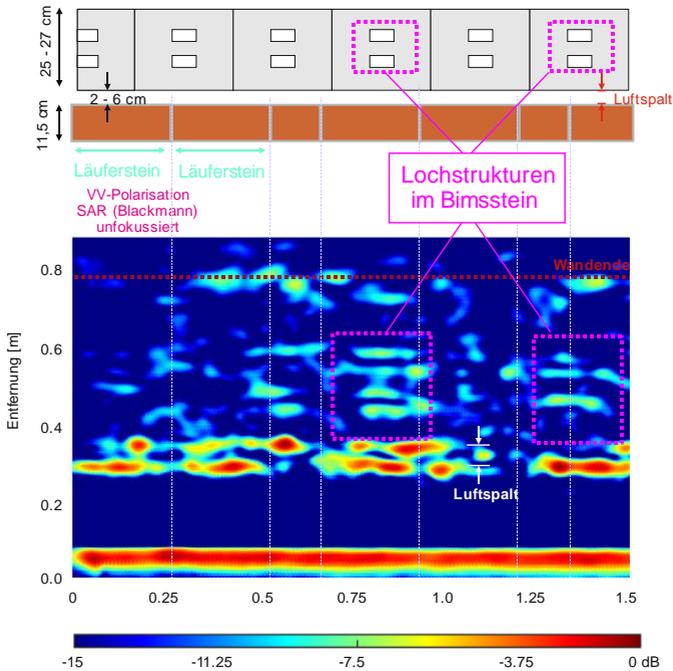


Abb. 7.25: SAR-Bild des in Abbildung 7.23 dargestellten Wandstücks. Die Schicht-Permittivitäten wurden bei der Prozessierung nicht berücksichtigt. Der prozessierte Frequenzbereich geht von 0,8GHz bis 13GHz

Ist im unfokussierten Bild eine langgezogene Reflexion über beide Steine hinweg erkennbar, sieht man hier zwei klar voneinander zu unterscheidende und den jeweiligen Steinen zuzuordnende Reflexionen dar. Hier ist deutlich zu erkennen, dass beide Steine durch eine Stoßfuge voneinander getrennt sind; ein Effekt, der schon in den Laboruntersuchungen der Ziegelsteine erkennbar war (ohne Mörtel). Durch die Berücksichtigung der

Permittivität konnten die Steine auch an den Stoßstellen eindeutig voneinander diskriminiert werden. Hier muss man natürlich den Effekt der Fugenbreite von ca. 2 cm berücksichtigen, der zur Breite des Reflexionslochs beiträgt. An Position ③ zeigt sich keine Reflexion des Bindersteins auf der Höhe der links gelegenen Läufersteine bei ① und ②. Erst beim Übergang Luftspalt–Bimsstein wird bei 0,24 m in Entfernungsrichtung eine Reflexion sichtbar. Es wäre denkbar, dass es sich hierbei um eine Irregularität im Wandaufbau handelt.

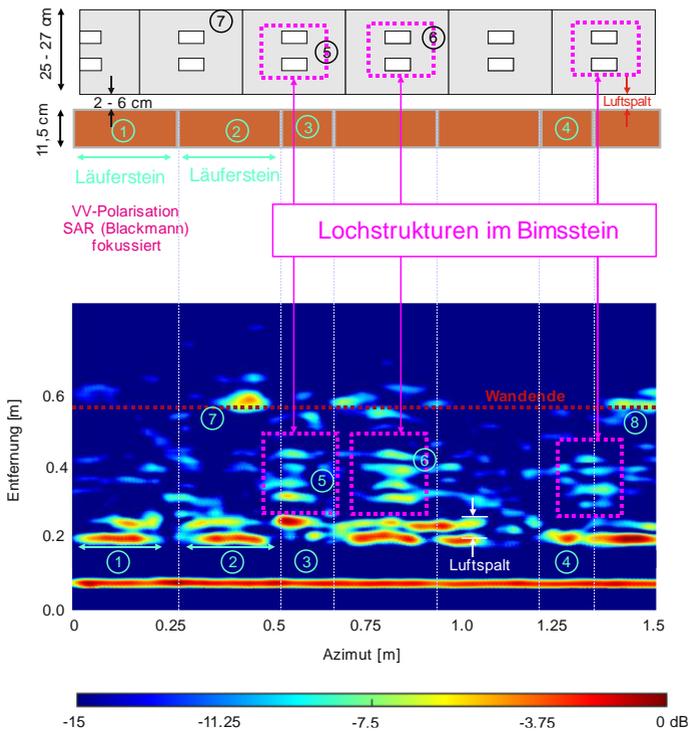


Abb. 7.26: SAR-Bild des abgefahrenen Wandstücks aus Abbildung 7.23 wenn die berechneten Schichtpermittivitäten aus Tabelle 7.5 bei der Prozessierung berücksichtigt werden. Der Frequenzbereich liegt zwischen 0,8 GHz und 13 GHz.

An Position ④ befindet sich ein weiterer Binderstein. In diesem Fall tritt die Reflexion des Übergangs Ziegelstein-Luftspalt bei 0,18 m in

Entfernungsrichtung auf, wird aber von keiner weiteren Reflexion begleitet, die den Übergang Luftschicht-Bimsstein repräsentieren könnte. Interessant ist hier vor allem, dass die Reflexion in der unfokussierten Variante leicht nach rechts versetzt erscheint, im fokussierten Bild tritt die Stelle aber als kleine, langgezogene Reflexion auf, die jeweils rechts wie links von einer Fuge eingerahmt wird und nicht versetzt erscheint. Weitere Reflexionen, welche den Übergang Luftschicht-Bimsstein darstellen, sind an den Positionen ①, ② und ③ in Entfernungsrichtung auf einer Höhe von ca. 0,2 m erkennbar.

An den Stellen ⑤ und ⑥ sind wieder die Doppelreflexionen zu sehen, die bereits in der Strukturanalyse in Abschnitt 7.2.1 besprochen wurden. Es handelt sich hierbei um die Luftkammern der Bimssteine. Diese sind hier allerdings deutlicher zu erkennen als Abbildung 7.25. Bei ⑤ zeigen sich die ersten beiden Reflexionen in Abbildung 7.25 noch versetzt und die hinteren beiden Reflexionen sind nur ansatzweise erkennbar. Nach der Fokussierung in Abbildung 7.26 erscheinen die Reflexionen genau in der Weise hintereinander, wie man es erwarten würde. An den Stellen ⑦ und ⑧ ist das Ende der Wand zu sehen. Es ist davon auszugehen, dass der Bimsstein an diesen Stellen keine Luftkammern besitzt und dass die Welle hier ungestört bis zum Ende des Steins vordringen und so die deutlich erkennbaren Reflexionen verursachen.

7.3 Zusammenfassung

In den insgesamt 120 im Zuge der Jülich-Messkampagne durchgeführten Messreihen wurden insgesamt 430 m Wandstrecke abgefahren. Alle untersuchten Strukturen verfügten über einen mehrschichtigen Aufbau, wobei zwei der drei untersuchten Testwände einen Kernstein mit komplexem Innenaufbau besaßen. Dies war zum einen der Hochlochziegelstein und zum anderen der Lochbetonstein. Mit einer Steindicke von je 24 cm waren die Steine mehr als doppelt so dick wie die in Kapitel 5 untersuchten Steine. Diese Tatsache spiegelte sich darin wider, dass die Signale, nachdem sie etwa die Hälfte des Steins durchdrungen hatten, weniger stark reflektiert wurden. Ab diesem Punkt war es daher schwierig, in verlässlicher Weise gehaltvolle Aussagen über den Innenaufbau der Steine bzw.

der Wand zu treffen. Einfache Reflexionsmessungen, die sich dem Stripmap-Mode-Verfahren bedienen, stoßen hier an ihre Grenzen.

Bei der dritten Wand der Jülicher Testwände handelte es sich um eine Stahlbetonwand in Sandwichbauweise. Insbesondere bei der Analyse der ersten Schicht konnten die Stärken des SAR-Algorithmus demonstriert werden. Auch hier traten ab einer Durchdringungstiefe von etwa 50 % der Gesamtdicke der Wand allerdings Dämpfungen im Signal auf, die eine zweifelsfrei korrekte Interpretation der Bilddaten im hinteren Wandteil-unmöglich machen.

Trotz dieser Limitationen kann festgehalten werden, dass die bezüglich aller drei Testwände gesammelten Informationen eine große Detailtiefe aufweisen. Die unterschiedlichen Polarisationsarten konnten in sinnvoller Weise miteinander kombiniert werden und so ein recht klares Bild der Wandstruktur liefern, in dem Einzelstrukturen über den gesamten abgefahrenen Wandbereich hinweg erkennbar waren.

Im letzten Unterkapitel wurde ein echtes Gebäude aus den 1960er Jahren untersucht. Die Vermutung, dass die Wände aus den drei Schichten Klinkerstein, Luftspalt und Bimsstein mit Lochkammern bestehen, konnte bestätigt werden. Auch hier konnten die Vorteile der SAR-Algorithmik unter Beweis gestellt werden; besonders die Anwendung der 2D-SAR-Algorithmik führte zu einer deutlichen Erhöhung der Auflösung in vertikaler Richtung und damit zu einer verbesserten Sichtbarkeit von Einzelstrukturen im Bild. Die in Kapitel 3 vorgeschlagene Methodik zur Berechnung der Schichtpermittivitäten lieferte nützliche Permittivitäts- und Schichtdickenwerte für die Einzelschichten, mit denen die Ergebnisse aus den Laborversuchen bestätigt werden konnten. Die über das „Morschenichhaus“ gesammelten Daten trugen zur Entwicklung einer generellen Methode zur Ermittlung des Wärmeleitkoeffizienten von Gebäudestrukturen bei, die erforderlich ist, um fundierte Aussagen über den Energieverbrauch von Gebäuden zu erstellen und letztlich, um individuell auf das untersuchte Gebäude abgestimmte Dämmmaßnahmen zu entwickeln.

8 Schlussfolgerung

8.1 Zusammenfassung

Die globale Erderwärmung und die daraus resultierenden Folgen zwingen unsere Gesellschaft zu Einsparungen beim Primärenergiebedarf. Hierbei rückt insbesondere der Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme in den Fokus, da dieser mit einem Anteil von 26 % an zweiter Stelle des Gesamtendenergieverbrauchs der Bundesrepublik liegt. Durch entsprechende Isolierungsmaßnahmen bei älteren Baugebäuden wäre eine signifikante Reduzierung des Gebäudeenergieverbrauchs durchaus möglich. Um diese Maßnahmen in adäquater Weise umzusetzen, bedarf es allerdings genauer Kenntnisse des strukturellen Aufbaus der Gebäudehüllen des Wohngebäudebestands in Deutschland. Diesbezüglich besteht aktuell eine große Wissenslücke, da mangels einer geeigneten Methodik bisher keine allgemeinen Untersuchungen zur Verbreitung der unterschiedlichen Arten von Mauerwerksaufbauten vorgenommen werden konnten.

Um diesem Problem Abhilfe zu schaffen, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methodik zur Wandcharakterisierung entwickelt, anhand derer sich die hier relevanten Parameter Schichtanzahl, Schichtdicke und Schichtpermittivität auch für unbekannte Wandstrukturen bestimmen lassen. Die wesentlichen Bausteine der hier entwickelten Methodik sind die Radarbildgebung zur Ermittlung der Schichtanzahl sowie die Rückrechnung zur Bestimmung der Faktoren Schichtdicke und Schichtpermittivität. Ferner lassen sich an den Radarbildern auch weitere strukturelle Informationen wie Inhomogenitäten oder Periodizitäten bestimmen. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, dass sie sich durch eine hohe Praxistauglichkeit auszeichnet, da die eingesetzten Reflexionsmessungen nur von außerhalb der zu untersuchenden Wände durchgeführt werden müssen, wohingegen auf einen Empfangszweig hinter der Wand – also im typischerweise bewohnten Gebäudeinneren – verzichtet werden kann.

Nach einer allgemeinen Einführung in das Verhalten elektromagnetischer Wellen in Mehrschichtmedien wurden in Kapitel 3 erste Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Permittivitäten und Schichtdicken von üblichen Baustoffen für den einschichtigen und dreischichtigen Fall vorgestellt. Es zeigte sich, dass Messungen im Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 8 GHz hinreichend genaue Ergebnisse liefern, auf Basis derer eindeutig auf die Schichtdicken und die Permittivitäten unbekannter Mehrschichtsysteme zurückgerechnet werden kann. Die relativen Abweichungen gegenüber den Hohlleitersmessungen der Baumaterialien betragen für den Realteil der Permittivitäten nicht mehr als 10 %. Für den Imaginärteil lag dieser Wert hingegen bei weit über 10 %, was bedeutet, dass die Rückrechnungsmethode für den Real-, nicht jedoch für den Imaginärteil geeignet ist. In diesem Punkt sind also weitere Untersuchungen nötig. Allen voran die Kalibrierung des Messsystems muss optimiert werden, wobei besonderes Augenmerk auf die Dispersionseffekte der Antenne sowie auf die radiale Ausbreitung der Wellen aufgrund der Nahfeldbetrachtungen zu legen ist.

Radarsysteme mit synthetischer Apertur, wie das in dieser Arbeit eingesetzte, eignen sich hervorragend, um anhand von bildgebenden Verfahren einzelne kleinere Objektstrukturen innerhalb von Wänden wie Löcher oder Fugen zu detektieren. Allerdings sind hierfür entsprechend hohe Auflösungen erforderlich. Im Rahmen der hier entwickelten Methodik gelingt dies durch die Kombination einer hohen Bandbreite mit einem großen Öffnungswinkel der verwendeten Antennen. In der vorliegenden Arbeit wurden Antennen im Frequenzbereich zwischen 0,8 GHz und 18 GHz verwendet. Bei einer Bandbreite von 17,2 GHz ermöglicht dies eine Entfernungsauflösung von 0,8 cm. In Azimutrichtung sind Auflösungen im Bereich von 2,8 cm möglich, indem die aufgenommenen Entfernungsprofile mittels der SAR-Algorithmik sowie mit Hilfe der Rückprojektionsmethode prozessiert werden.

Die Brechung der Wellen an den Schichtgrenzen führt zu unterschiedlichen physikalischen Laufwegen der Wellen. Dieser Effekt muss bei der Prozessierung der Daten berücksichtigt werden, da die Strukturen innerhalb der Wand in den Radarbildern andernfalls nicht ortskorrekt dargestellt werden können. Aus diesem Grund wurde, ausgehend vom Fermatschen Prinzip, mit Hilfe des Newton-Verfahrens ein

Fokussierungsalgorithmus entwickelt, der in Kapitel 4 vorgestellt wird. Der Algorithmus findet aus allen möglichen Ausbreitungswegen denjenigen Weg zwischen Zielpixel und Antennenposition mit der geringsten Laufzeit. Sind alle Ausbreitungswege in die Bildmatrix berechnet, können diese in den Rückprojektionsalgorithmus implementiert werden. Anschließend kann das fokussierte SAR-Bild berechnet werden. Die berechneten Permittivitäts- und Schichtdickenwerte aus der Rückrechnung sind also essenziell, um fokussierte Radarbilder nach dem SAR-Prinzip zu erzeugen.

Indem man die Rückrechnung mit der Methode der SAR-Bildgebung koppelt, lassen sich geometrisch repräsentative Bilder der Wandaufbauten generieren, auf Basis derer zuverlässig auf die gesuchten Wandparameter Schichtanzahl, Schichtdicke und Schichtpermittivität zurückgeschlossen werden kann. Diese Bilder werden in den Kapiteln 5, 6 und 7 vorgestellt. Wird die Methode in Kapitel 6 noch auf einen dreischichtigen Laboraufbau angewendet, finden sich in Kapitel 7 erstmalige Untersuchungen an realen Gebäudestrukturen. Da die Gesamtmethode zur Extraktion der interessierenden Wandparameter an einem Wohnhausgebäude verifiziert werden konnte, lässt sich sagen, dass die SAR-Methodik für den Einsatz in der Praxis geeignet ist und gute Ergebnisse liefert. Denn wie in den Rückrechnungsuntersuchungen aus Kapitel 3 konnte auch hier hinreichend genau (d. h., mit relativen Fehlern unterhalb von 10 %) auf die Schichtdicken und Schichtpermittivitäten geschlossen werden. Zudem konnte ermittelt werden, dass der dreischichtige Aufbau aus einem homogenen Stein in der ersten Schicht, einer Luftschicht in der Mitte sowie einem weiteren Stein mit implementierten Luftschichten in der dritten Schicht bestand. Deutlich zu erkennen waren auch die Stoßfugen der ersten Steinschicht sowie die Unterschiede zwischen den Läufer- und Bindersteinen. Um diese Informationen zu erhalten, wurden neben einfachen 1D-Radarbildern auch 2D-Aufnahmen des Wandsegments prozessiert. Dies erlaubte wesentlich detailreichere Bilder, da zusätzlich zur Auflösung in der vertikalen nun auch die horizontale Raumrichtung berücksichtigt werden konnte.

Nachteilig auf die Qualität der Bilder wirken sich die Intensitätsverluste des ausgesendeten Wellensignals aus, die durch die Vielzahl von Reflexionen innerhalb der Steinstrukturen, insbesondere in den hinteren

Bereichen der Wände, verursacht werden. Da die Signalanteile aufgrund dieser Reflexionen zu großen Teilen im Rauschen untergehen, konnten keine robusten Streuzentren erzeugt werden. Trotz Rückrechnung und SAR-Prozessierung konnten die Bilder daher nicht in den hinteren Wandbereichen fokussiert werden.

8.2 Ausblick

Um die Ziele der Bundesregierung in puncto Energieeinsparungen zu erreichen, ist ein schnell arbeitendes Radarsystem erforderlich, das in möglichst kurzer Zeit große Gebäudeflächen abtasten kann. Eine Option für die Zukunft wäre der Einsatz drohnenbasierter Radarsysteme, die über die nötigen Freiheitsgrade verfügen, um ein schnelles Scannen urbaner Regionen in allen Raumdimensionen zu ermöglichen. Bevor diese Vision umgesetzt werden kann, sind jedoch noch einige wissenschaftliche Vorarbeiten zu leisten. Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methodik kann in diesem Sinne als Grundlagenarbeit für die weitere Entwicklung zukünftiger Radarsysteme zur Gebäudehüllencharakterisierung betrachtet werden.

Die noch erforderlichen Untersuchungen lassen sich grob in die Bereiche der Aufnahmegeometrie und der automatischen Mustererkennung mit Hilfe von neuronalen Netzen einteilen:

In dieser Arbeit wurde zur Abtastung des Zielszenarios der Stripmap-Modus verwendet. Bei dem Verfahren des Spotlight-Modus wird die Antenne für einen längeren Zeitraum auf ein festes Zielgebiet (Spot) gerichtet. Eine längere Beleuchtungszeit vergrößert den Beobachtungswinkel der Messumgebung und ermöglicht dadurch eine verbesserte Auflösung in Azimutrichtung. Die Verbesserung der Auflösung erkaufte man sich durch eine Verlängerung der Messdauer, da bereits abgefahrene Wegstrecken für einen Spot wiederholt abgefahren werden müssen um einen benachbarten Spot aufzunehmen. Ergänzend zu den Spotlight-Aufnahmen können zur Untersuchung von Hauswänden auch bistatische bzw. multistatische Messungen vorgenommen werden. Sende- und Empfangsantenne sind dabei entweder starr oder beweglich auf unterschiedlichen

Plattformen montiert und können die zu untersuchende Messszenerie unter verschiedenen Aspektwinkeln aufnehmen. Durch die multistatische Abtastung der Gebäudewände werden Streuantworten der Gebäudewände produziert, die sich von den in dieser Arbeit demonstrierten linearen Stripmap-Modus-Messungen insofern unterscheiden, als sie ein gänzlich anderes Radarbild der zu untersuchenden Szenerie produzieren, was dabei helfen könnte, mögliche Artefakte im Bild besser detektieren zu können. Werden solche Artefakte identifiziert, lässt sich das Radarbild präziser interpretieren und es kann besser auf die tatsächlichen Objektstrukturen innerhalb der Wand geschlossen werden.

Das zweite Gebiet, auf dem weiterführender Forschungsbedarf besteht, ist die automatische Mustererkennung mit Hilfe von maschinellem Lernen. Die Erforschung dieser Technologie zur Lösung diverser Probleme gewann in den letzten Jahren in den Naturwissenschaften einen immer größer werdenden Stellenwert. Kurz gesagt werden beim maschinellen Lernen neuronale Netze mit einer großen Menge von Daten angelern, um die jeweils gesuchten Parameter schnell und präzise zu extrahieren. Ein bekanntes Beispiel aus der Informatik ist die Schrifterkennung, welche bereits im Jahr 1989 durch LeCun et al. [Cun89] erforscht wurde. Der Erfolg wurde dabei im Wesentlichen durch zwei Entwicklungen beflügelt: erstens durch immer größer werdende Trainingsdatensätze sowie zweitens durch den Einsatz von GPUs zur schnellen und effizienten Ausführung von Rechenoperationen [Cir10]. Grundsätzlich ließe sich das maschinelle Lernen auch auf die in dieser Arbeit untersuchte Thematik anwenden, um die interessierenden Parameter Schichtanzahl, Schichtdicken und Schichtpermittivitäten zu bestimmen. Essenziell hierfür wäre das Vorhandensein eines hinreichend großen Datensatzes an Radarbildern von echten Wandstrukturen. Zu diesem Zweck wäre es denkbar, mit dem Radar diverse echte Wandkonfigurationen aufzunehmen, wie sie in [Kla09] beschrieben sind. Dieser Datensatz würde dann dazu dienen, ein neuronales Netz anzulernen, das automatisch auf die Wandkonfigurationen in unbekanntem Wandstrukturen schließen kann. Sinnvoll ergänzen ließen sich die empirisch gewonnenen Messdatensätze durch Simulationen von Wandkonfigurationen am Rechner. Diese könnten mit diversen Field-Solver-Programmen wie etwa Ansys HFSS oder CST Microwave Studio erstellt werden. Der Vorteil solcher Simulationen ist, dass wesentlich mehr

Freiheitsgrade hinsichtlich der Einstellung der Feinbereiche für die Schichtdicke und Schichtpermittivität vorhanden sind.

Im Forschungsgebiet GPR (Ground Penetrating Radar) existieren bereits erste allgemeine Untersuchungen zur Mustererkennung anhand von Radarbildern. Einen Eindruck davon, wie die Mustererkennung unter Verwendung von neuronalen Netzen eingesetzt werden kann – in diesem Fall zur Landminendetektion bzw. zur Identifizierung von Straßenbelägen –, vermitteln die Beiträge in [Lam17] und [Kim18].

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die momentane und zukünftige Situation vieler Menschen machen auf politischer Ebene rasche Entscheidungen sowie auf wissenschaftlicher Ebene vertiefte Untersuchungen nötig. Mit der vorliegenden Dissertation wurde ein Grundstein für weitere Untersuchungen gelegt. In der Zukunft können die hier gewonnenen Erkenntnisse mit den zuletzt angesprochenen Technologien des maschinellen Lernens und der Trajektorie-Untersuchung kombiniert werden. Der dadurch erzielte Fortschritt bei der Charakterisierung unbekannter Gebäudestrukturen mit Mikrowellenstrahlung wäre nicht nur von wissenschaftlicher Bedeutung, sondern würde auch einen wertvollen Beitrag zur Erreichung der von der Bundesregierung gesteckten Klimaziele leisten.

Anhang

A.1 Nicolson-Ross-Weir-Methode

Es gibt mehrere Methoden, um die komplexe Permittivität und Permeabilität eines nichtleitenden, isotropen und homogenen Materials mit Hilfe der Messung von Streuparametern zu berechnen. Unter anderem zählen hierzu die „effective parameter“-Methode [Che04] sowie die „Hakki and Coleman“-Methode [Che04]. In dieser Arbeit wurde die Nicolson-Ross-Weir-Methode (benannt nach A.M. Nicholson, G.F. Ross und W. B. Weir [Nic70] [Wei74]) zur Berechnung der Permittivitäten der in Kapitel 3 vorgestellten Baustoffe verwendet. Die nachfolgenden Seiten stellen eine Einführung in die Bestimmung der Permittivität der Steine anhand dieser Methode dar. Dieses Hohlleiterverfahren benutzt die TE₁₀-Mode des Rechteckhohlleiters und eine quaderförmige Probe, die den Hohlleiter ganz ausfüllt. Durch das Messen aller vier Streuparameter ($s_{11}, s_{21}, s_{22}, s_{12}$) lassen sich die komplexe Permittivität und die komplexe Permeabilität bestimmen. Die Vermessung der Steinproben wurde im Frequenzbereich von 1,7 GHz bis 2,6 GHz durchgeführt. Dieser Frequenzbereich wird vom R22-Hohlleiter mit einer Abmessung von 10,9 cm × 5,46 cm abgedeckt. Die Cutoff-Frequenz für den luftgefüllten R22-Hohlleiter liegt bei 1,27 GHz [Kar14] ändert sich aber sobald sich im Hohlleiter ein Dielektrikum befindet. Für einen Rechteckhohlleiter und $\mu_r = 1$ gilt allgemein für die Cutoff-Frequenz [Poz12]

$$f_{c,mn} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad (\text{A.1})$$

wobei hier a für die Länge der Breitseite und b für die Länge der Schmalseite der Hohlleiterabmessung stehen. Abbildung A.1 zeigt hierzu eine schematische Skizze. Die Indizes m und n geben an, um welche Mode es sich handelt.

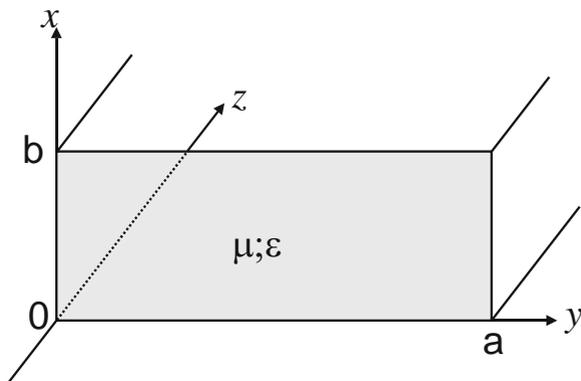


Abb. A.1: Abmessungen eines Rechteckhohlleiters mit der Breitseite a und Schmalseite b .

Für die TE_{10} -Mode gilt demnach für die Cutoff-Frequenz [Poz12]:

$$f_{c,10} = \frac{c_0}{2a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{A.2})$$

Die Ausbreitungskonstante der TE_{10} -Mode für den leeren Hohlleiter ergibt sich durch [Bak93] [Mar86]

$$\gamma_0 = j \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2}. \quad (\text{A.3})$$

Für den materialgefüllten Hohlleiter gilt [Bak93] [Mar86]

$$\gamma = j \sqrt{\epsilon_r \mu_r \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 - \left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2}. \quad (\text{A.4})$$

wobei $\lambda_C=2a$ die Grenzwellenlänge der TE₁₀-Mode mit der Breitseite a darstellt. Gleichung A.4 lässt sich umformen, sodass sich für das Produkt aus der relativen Permittivität und der Permeabilität

$$\varepsilon_r \mu_r = \left(\frac{c_0}{\omega}\right)^2 \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda_C}\right)^2 - \gamma^2 \right) \quad (\text{A.5})$$

ergibt. Weiterhin sei der Fresnelsche Reflexionsfaktor zwischen der ungefüllten Schicht und dem Material innerhalb des Hohlleiters für eine TE-Welle gegeben durch [Bou97] [Mar86]

$$R_{01} = \frac{\gamma_0 - \frac{\gamma}{\mu_r}}{\gamma_0 + \frac{\gamma}{\mu_r}} \quad (\text{A.6})$$

Der Reflexionsfaktor R_{01} entspricht hier dem Fall einer unendlich ausgehenden Materialdicke für Materialprobe [Nic70]. Gleichung A.6 kann nach μ_r aufgelöst werden und man erhält:

$$\mu_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left(\frac{1 + R_{01}}{1 - R_{01}} \right). \quad (\text{A.7})$$

Gleichung A.7 kann man wiederum in Gleichung A.5 einsetzen und dann nach der relativen Permittivität auflösen [Bou97] [Vic11]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\left(\frac{c_0}{\omega}\right)^2 \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda_C}\right)^2 - \gamma^2 \right)}{\frac{\mu_r}{\left(\frac{c_0}{\omega}\right)^2 \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda_C}\right)^2 - \gamma^2 \right)}} \\ &= \frac{\gamma}{\gamma_0} \left(\frac{1 + R_{01}}{1 - R_{01}} \right). \end{aligned} \quad (\text{A.8})$$

Die relative Permittivität lässt sich also berechnen, sofern die Ausbreitungskonstante γ und der Fresnelsche Reflexionsfaktor R_{01} bekannt sind.

Nicolson, Ross und Weir haben in ihren Veröffentlichungen [Nic70] [Wei74] Formalismen vorgestellt, anhand derer sich mit Hilfe von Streuparametermessungen an der Hohlleiterprobe auf die Unbekannten γ und R_{01} schließen lässt.

Der Reflexionsfaktor und der Transmissionsfaktor eines Einschichtsystems entsprechen den zu messenden Streuparametern s_{11} und s_{21} . Abbildung A.2 zeigt hierzu die Bezugsebenen und die Endflächen einer Materialprobe mit der Länge d_1 innerhalb eines Hohlleiters.

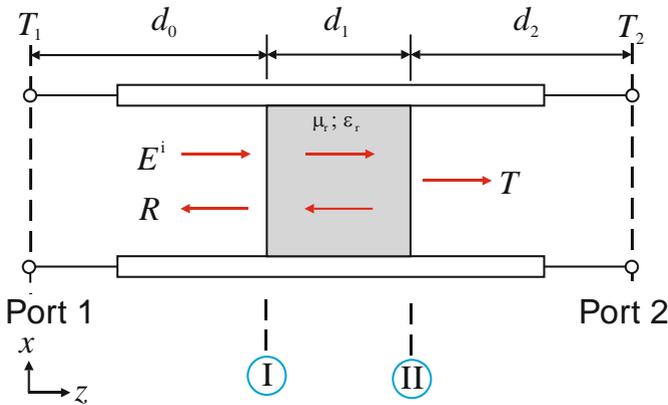


Abb. A.2: Die zu messende Materialprobe mit der Länge d_1 befindet sich in einem Probenhalter. d_0 und d_2 bezeichnen die Längen zwischen den Endflächen der Probe zu den Ports des NWAs.

Die Streuparameter sind gegeben durch

$$s_{11} = P_{RP,0} \frac{R_{01}(1 - e^{-2\gamma d_1})}{1 - R_{01}^2 e^{-2\gamma d_1}} = P_{RP,0} \frac{R_{01}(1 - q^2)}{1 - R_{01}^2 q^2} \quad (\text{A.9})$$

und

$$\begin{aligned}
s_{21} &= P_{\text{RP},0} P_{\text{RP},2} \frac{(1 - R_{01}^2 e^{-2\gamma d_1})}{1 - R_{01}^2 e^{-2\gamma d_1}} \\
&= P_{\text{RP},0} P_{\text{RP},2} \frac{(1 - R_{01}^2 q^2)}{1 - R_{01}^2 q^2},
\end{aligned} \tag{A.10}$$

wobei hier für q

$$q = e^{-\gamma d_1} \tag{A.11}$$

und für $P_{\text{RP},0}$ und $P_{\text{RP},2}$

$$P_{\text{RP},0/2} = e^{-\gamma_0 d_{0/2}} \tag{A.12}$$

gilt. $P_{\text{RP},0}$ und $P_{\text{RP},2}$ stellen die Reference-Plane-Rotationsfaktoren [Bak90] dar. Die Reflexions- und Transmissionsfaktoren der Materialprobe müssen auf die Referenzflächen I und II transformiert werden, da sonst die Bezugsebenen T_1 und T_2 nicht mit den Endflächen der Probe im Hohlleiter übereinstimmen.

Nicolson und Ross konnten in [Nic70] zeigen, dass sich der Fresnelsche Reflexionsfaktor durch Gleichung A.13 berechnen lässt:

$$R_{01} = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \tag{A.13}$$

wobei für die Variable X [Nic70]

$$X = \frac{s_{11}^2 - s_{21}^2 + 1}{2s_{11}} \tag{A.14}$$

gilt. Da es für den Fresnelschen Reflexionsfaktor zwei Lösungen gibt, ist diejenige Lösung auszuwählen, für die $|R_{01}| \leq 1$ wird. Weiterhin konnten

Nicolson und Ross zeigen, dass sich der Term $q = e^{-\gamma d_1}$ durch folgende Gleichung berechnen lässt [Nic70]:

$$q = \frac{s_{11} + s_{21} - R_{01}}{1 - (s_{11} + s_{21})R_{01}}. \quad (\text{A.15})$$

Nun kann auch die Ausbreitungskonstante γ mit Hilfe von q mit

$$\gamma = -\frac{1}{d_1} (\ln(q) + j2\pi h_v) \quad (\text{A.16})$$

berechnet werden. Aufgrund der Verwendung des natürlichen Logarithmus treten oberhalb der Cutoff-Frequenz immer Mehrdeutigkeiten auf. $h_v = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ bezeichnet hier entsprechend einen Vieldeutigkeitsparameter, der durch Probieren plausibler Werte oder separat durch Messen des Phase Delays [Bak90] [Bak901] [Bak93] bestimmt werden muss.

Die Mehrdeutigkeiten, die durch den natürlichen Logarithmus verursacht werden, lassen sich durch die Annahme von $\mu_r = 1$ beseitigen [Bak901] [Bak90], da die Berechnung der Permittivität in Gleichung A.8 so unabhängig von γ erfolgen kann. Setzt man $\mu_r = 1$ in A.7 ein und löst nach γ auf, ergibt sich

$$\gamma = \gamma_0 \frac{1 - R_{01}}{1 + R_{01}}. \quad (\text{A.17})$$

γ kann somit ohne die Dicke d_1 , h_v und q berechnet werden. Setzt man nun Gleichung A.17, A.3 und $\mu_r = 1$ in Gleichung A.8 ein, ergibt sich für die relative Permittivität

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \left(\frac{c_0}{\omega}\right)^2 \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda_c}\right)^2 - \gamma^2 \right) \\ &= \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 + \left(1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2\right) \left(\frac{1 - R_{01}}{1 + R_{01}}\right)^2. \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Durch die S-Parametermessung der Hohlleiterproben und der Berechnung von R_{01} mit den Gleichungen A.13 und A.14 kann somit die komplexe Permittivität der Baustoffe durch Gleichung A.18 berechnet werden.

Eine ausführliche Betrachtung der Herleitung der komplexen Permittivität und Permeabilität, besonders für den Fall $\mu_r \neq 1$, findet man in [Bak90] [Bak901] [Bak93] [Che04] [Bou97] [Vic11] und [Luu14].

Die Abbildungen A.3 und A.4 zeigen die berechneten Werte der Permittivität für den Porenbeton, den Ziegel- und den Kalksandstein für eine Probendicke von 5 cm und 10 cm. Bei den 5 cm dicken Proben ergibt sich als Mittelwert für den Realteil der Permittivitäten für den Porenbeton ein Wert von 1,65; für den Ziegelstein liegt der Wert bei 3,61 und für den Kalksandstein bei 3,86. Bei den 10 cm dicken Proben ergibt sich als Mittelwert für den Realteil der Permittivitäten für den Porenbeton ein Wert von 1,67; für den Ziegelstein liegt der Wert bei 3,6 und für den Kalksandstein bei 3,75.

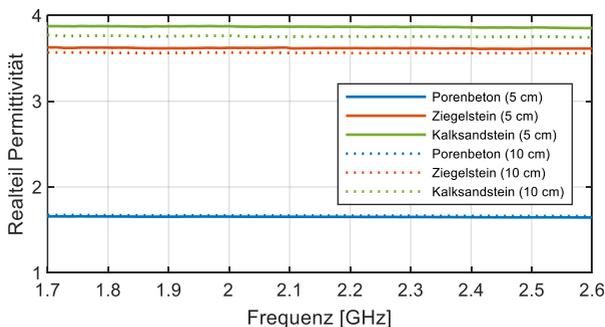


Abb. A.3: Verlauf des Realteils der relativen Permittivitäten des Porenbeton-, des Ziegel- und des Kalksandsteins für beide Hohlleiterprobendicken (5 cm und 10 cm).

Für den Imaginärteil der Permittivitäten für die 5 cm dicke Probe ergibt sich für den Porenbeton ein Wert von 0,05, für den Ziegelstein ein Wert von 0,045 und für den Kalksandstein ein Wert von 0,1245. Für den Imaginärteil der Permittivitäten der 10 cm dicken Probe ergibt sich für den

Porenbeton ein Wert von 0,05, für den Ziegelstein ein Wert von 0,04 und für den Kalksandstein ein Wert von 0,125.

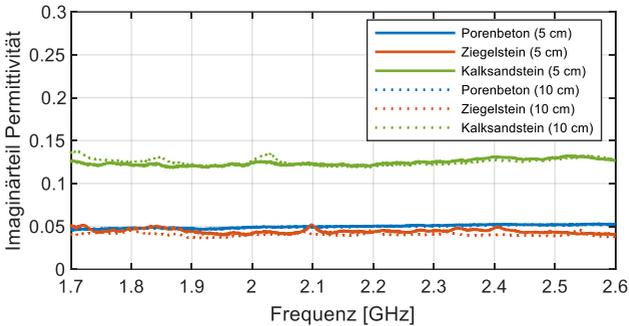


Abb. A.4: Verlauf des Imaginärteils der relativen Permittivitäten des Porenbeton-, des Ziegel- und des Kalksandsteins für beide Hohlleiterproben-dicken (5 cm und 10 cm).

Die Werte der Permittivitäten sind in Tabelle A.1 zusammengefasst.

Tab. A.1: Zusammenfassung der gerundeten Werte der Permittivitäten der vermessenen Steinproben mit Dicken von jeweils 5 cm und 10 cm.

Stein	Permittivität 5 cm-Proben	Permittivität 10 cm-Proben
Porenbeton	1,7-j0,05	1,7-j0,05
Ziegelstein	3,6-j0,05	3,6-j0,04
Kalksandstein	3,9-j0,13	3,8-j0,13

A.2 Fensterfunktionen

Die Reflexionsfaktoren im Frequenzraum können durch Multiplikation mit einer Fensterfunktion gewichtet werden. Eine Fensterfunktion ist eine mathematische Funktion, die außerhalb eines bestimmten Intervalls den

Wert null besitzt. In der Regel weisen Fensterfunktionen eine Symmetrie um die Mitte ihres Intervalls und einen Abfall der Werte zu den Intervallgrenzen auf. Fensterfunktionen werden im Allgemeinen auch als Gewichtungsfunktionen [But09], als „tapering functions“ oder als „window functions“ bezeichnet.

In der Radartechnik werden Fensterfunktionen zur Reduzierung der Nebenkeulen eines Punktziels eingesetzt. Man erkauft die größere Nebenkeulendämpfung dabei durch eine Verschlechterung der 3 dB-Breite der Hauptkeule des Punktziels. Warum es bei der Anwendung von Fensterfunktionen zu einer Verschlechterung der 3 dB-Breite der Hauptkeule und zur Nebenkeulenunterdrückung kommt, soll im Folgenden exemplarisch an den von-Hann- und Blackman-Fensterfunktionen gezeigt werden. Beide Fensterfunktionen basieren auf der „raised-cosine“-Fensterfunktion. Diese setzt sich aus einer Summe von Cosinus-Funktionen zusammen. Die allgemeine Form einer „raised-cosine“-Fensterfunktion im Frequenzbereich lautet [Hol21] [Pri91]:

$$S_{RC}(f) = \begin{cases} \sum_{w=0}^{L-1} a_w \cos\left(\frac{2\pi w(f-f_m)}{B}\right) & \text{für } f_m - \frac{B}{2} < f < f_m + \frac{B}{2} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

Hier beschreibt f_m die Mittenfrequenz, f die Frequenz, B die Bandbreite des Signals und die Vorfaktoren a_w sind Konstanten. $(L - 1)$ gibt die Anzahl der Cosinus-Terme in der Fensterfunktion an. Das Rechteckfenster ist so gesehen ein Sonderfall der „raised-cosine“-Funktion. Es besitzt eine Länge von $L = 1$ und somit nur eine Konstante a_0 . Die von-Hann-Fensterfunktion $S_{vH}(f)$ hingegen besitzt eine Länge von $L = 2$ und damit zwei Vorfaktoren mit $a_0 = a_1 = 0,5$. Das von-Hann-Fenster ist gegeben durch [Hag09]:

$$S_{vH}(f) = \begin{cases} 0,5 + 0,5 \cos\left(\frac{2\pi(f-f_m)}{B}\right) & \text{für } f_m - \frac{B}{2} < f < f_m + \frac{B}{2} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

Die Blackman-Fensterfunktion besitzt eine Länge von $L = 3$, was zu drei Vorfaktoren führt. Sie ist gegeben durch [Smi03]:

$$S_{\text{Bl}}(f) = \begin{cases} a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi(f-f_m)}{B}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi(f-f_m)}{B}\right) & \text{für } f_m - \frac{B}{2} < f < f_m + \frac{B}{2} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

Die Vorfaktoren des Blackman-Fensters sind $a_0 = 0,42$, $a_1 = 0,5$ und $a_2 = 0,08$. Abbildung A.5 zeigt das Rechteckfenster sowie das von-Hann- und das Blackman-Fenster für eine Bandbreite von 8 GHz bei einer Mittenfrequenz von 4 GHz.

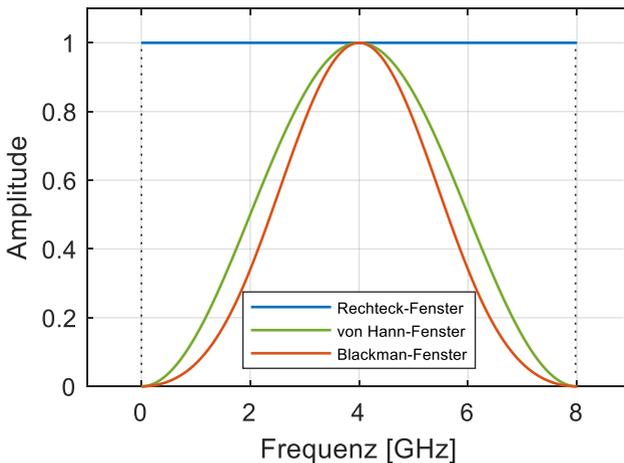


Abb. A.5: Verlauf der Rechteck-, von-Hann- und Blackman-Fensterfunktionen für eine Bandbreite von 8 GHz bei einer Mittenfrequenz von 4 GHz.

Das von-Hann-Fenster $S_{\text{vH}}(f)$ und das Blackman-Fenster $S_{\text{Bl}}(f)$ werden über eine inverse Fourier-Transformation in den Zeitbereich transformiert. Letztendlich ergibt sich für das von-Hann-Fenster im Zeitbereich

$$s_{\text{vH}}(t) = \frac{B}{4} e^{j2\pi f_m t} \left(2\text{sinc}(\pi B t) + \text{sinc}\left(\pi B \left(t + \frac{1}{B}\right)\right) + \text{sinc}\left(\pi B \left(t - \frac{1}{B}\right)\right) \right). \quad (\text{A.22})$$

Das Blackman-Fenster im Zeitbereich ist gegeben durch:

$$s_{\text{Bl}}(t) = B e^{j2\pi f_m t} \left(a_0 \text{sinc}(\pi B t) + \frac{a_1}{2} \left(\text{sinc}\left(\pi B \left(t + \frac{1}{B}\right)\right) + \text{sinc}\left(\pi B \left(t - \frac{1}{B}\right)\right) \right) + \frac{a_2}{2} \left(\text{sinc}\left(\pi B \left(t + \frac{2}{B}\right)\right) + \text{sinc}\left(\pi B \left(t - \frac{2}{B}\right)\right) \right) \right). \quad (\text{A.23})$$

Die Summe der Sinc-Terme im Zeitbereich führt in der von-Hann- und in der Blackman-Filterung zu einer Verbreiterung der Hauptkeulen der Gesamtfunktionen und zu einer Reduktion der Nebenkeulen. Abbildung A.6 zeigt exemplarisch die Zeitfunktionen der Rechteck-, der von-Hann- und der Blackman-Fensterfunktionen für eine Bandbreite von 8 GHz bei einer Mittenfrequenz von 4 GHz.

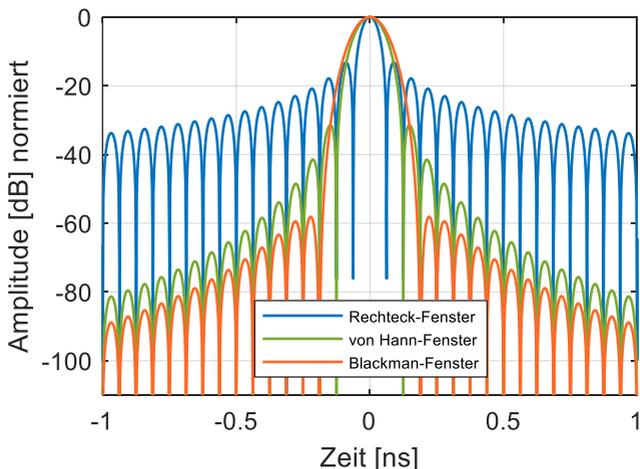


Abb. A.6: Verlauf der inversen Fourier-Transformationen der Rechteck-, der von Hann und der Blackman-Fensterfunktionen für eine Bandbreite von 8 GHz bei einer Mittenfrequenz von 4 GHz.

Deutlich sichtbar werden die Verbreiterung der Hauptkeulen sowie die Reduktion der Nebenkeulen der von-Hann- und der Blackman-Fensterfunktionen im Vergleich zur Rechteckfunktion. Die inverse Fourier-Transformation der Rechteckfunktion besitzt ihre charakteristischen ersten Nebenkeulen bei $-13,2\text{ dB}$, wohingegen die ersten Nebenkeulen der inversen Fourier-Transformation des von-Hann-Fensters bei $-31,5\text{ dB}$ liegen. Die Dämpfung der ersten Nebenkeulen der IFFT des Blackman-Fensters beträgt -58 dB .

Durch eine Multiplikation der Zeitachse in Abbildung A.6 gelangt man in den Entfernungsbereich. Dort kann man die Entfernungsauflösung bzw. die 3 dB -Breiten der einzelnen Funktionen ablesen. Für das Rechteckfenster ergibt sich eine 3 dB -Breite von $1,67\text{ cm}$, für das von-Hann-Fenster eine 3 dB -Breite von $2,2\text{ cm}$ und für das Blackman-Fenster eine 3 dB -Breite von $3,14\text{ cm}$. Diese Werte stimmen mit den analytisch berechenbaren Entfernungsauflösungen überein [Har78]. Die Entfernungsauflösung ist dabei gegeben durch

$$\Delta r_{\text{Entf}} = v_{3\text{dB}} \frac{c_0}{2B\Re\{\sqrt{\epsilon_r}\}} \quad (\text{A.24})$$

$v_{3\text{dB}}$ gibt hierbei den fensterfunktionsspezifischen Vorfaktor an, welcher in Tabelle A.2 für alle drei verwendeten Fensterfunktionen angegeben ist.

Tab. A.2: Zusammenfassung des höchsten Nebenkeulenniveaus und der 3 dB -Breiten der in dieser Arbeit benutzten Fensterfunktionen [Har78].

Fensterfunktion	Höchstes Nebenkeulenniveau [dB]	3 dB -Breite Vorfaktor $v_{3\text{dB}}$
Rechteck	$-13,3$	$0,89$
von-Hann	$-31,5$	$1,2$
Blackman	-58	$1,68$

Literaturverzeichnis

- [And14] Mark Andres: *Charakterisierung breitbandiger Ziele für breitbandige Automobile 77/79 GHz-Radarsensoren*, Dissertation, Uni Ulm, 2014.
- [Ang20] Simon Anger: *Mikrowellenmessverfahren zur erdgebundenen hochgenauen Abbildung von Weltraumobjekten auf erdnahen Umlaufbahnen*, Dissertation, DLR, Uni Ulm, 2020.
- [Ain14] A-Info: *A-Info – Technical Specification. Datasheet. LB-1080. 1-8 GHz Broadband Horn Antenna*.
- [Ain08] A-Info: *A-Info – Test Report. JXTXLB-SJ-20180. 2-18 GHz Dual Polarization Horn Antenna*.
- [Bak15] Barkhausen, Jörg et al.: *Digitale Tomosynthese der Brust*, Thieme, 2015.
- [Bak90] James Baker-Jarvis: *Improved Technique for Determining Complex Permittivity with the Transmission/Reflection Method*, IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol. 38, No. 8, August 1990.
- [Bak901] James Baker-Jarvis: *Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity*, NIST Technical Note 1341.
- [Bak93] James Baker-Jarvis: *Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability*, NIST Technical Note 1355-R.
- [Bar15] Jan Barowski et al.: *Characterizing Surface Profiles Utilizing mm-Wave FMCW SAR Imaging*, IEEE, European Microwave Conference (EuMC), September 2015, Paris, France.
- [Bar17] Jan Barowski et al.: *Characterizing Dielectric Materials using Monostatic Transmission- and Reflection-Ellipsometry*, Zeitschrift Frequenz, de Gruyter, Berlin 2017.

- [Bar172] Barowski Jan: *Radarbasierte Messverfahren für die präzise orts aufgelöste Materialcharakterisierung*, Dissertation, Ruhr Universität Bochum, Bochum 2017.
- [Bas18] BASF: *BASF-Bericht 2018 – Ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Leistung*, 26.02.2019, www.basf.com.
- [Bit72] Bitterlich, Wöbking: *Geoelektronik- Angewandte Elektronik in der Geophysik, Geologie, Prospektion, Montanistik und Ingenieurgeologie*, Springer-Verlag, 1972.
- [Bis06] Christopher M. Bishop: *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, 2006.
- [Bmz20] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: *Klimaschutz – die Überlebensfrage der Menschheit*, BMZ Papier, Juni 2016.
- [Bor06] A. Boryssenko et al.: *Inspection of Internal Structures of Walls by Subsurface Radar*, IEEE Aerospace and Electronic Systems magazine, November 2006.
- [Bos01] Bosch: *Bosch D-tect 150 – Originalbetriebsanleitung*, Juli 2011.
- [Bos02] Bosch: *Bosch D-tect 120 – Produktdatenblatt*, Juli 2011.
- [Bou97] Abdel-Hakim Boughriet: *Noniterative Stable Transmission/Reflection for Low-Loss Material Complex Permittivity Determination*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 45, No. 1, January 1997.
- [Bre60] L. Brekhovskikh: *Waves in layered media*, Academic Press, 1960.
- [But09] Tilman Butz: *Fouriertransformation für Fußgänger*, 6. Auflage, Vieweg + Teubner, 2009.
- [Bwe14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand – Ein Beitrag zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*, Dezember 2014.
- [Che04] L.F. Chen: *Microwave electronics: Measurement and Materials Characterization*, Chichester: Wiley, c2004, 537p.

- [Chy03] Simon R. Cherry: *Physics in Nuclear Medicine*, Elsevier Saunders, 2003.
- [Cir10] Dan Claudiu Cireșan et al.: *Deep, Big, Simple Neural nets for Handwritten Digit Recognition*, MIT Press, Neural Computation Vol. 22 Issue 12, December 2010.
- [Cul12] Ali Eren Culhaoglu: *Microwave Metamaterials: Superlensing and Design of Low Reflection Coatings*, DLR, TU München, Dissertation, 2012.
- [Cun89] Y. LeCun et al.: *Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition*, MIT Press, Neural Computation Vol. 1 Issue 4, December 1989.
- [Czi97] Erich Cziesielski: *Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 3. Auflage, 1997.
- [Dav07] Ben Davis et al.: *Complex Permittivity of Planar Building materials Measured with an Ultra-Wideband Free-Field Antenna Measurement System*, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 112, No. 1 January-February 2007.
- [Dan97] Herbert Daniel: *Physik II: Elektrodynamik – Relativistische Physik*, de Gruyter, 1997.
- [Dem18] Wolfgang Demtröder: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, Springer Spektrum, 7. Auflage, 2018.
- [Det12] Jürgen Detlefsen: *Grundlagen der Hochfrequenztechnik*, Oldenbourg Verlag München, 2012.
- [Doe00] Olaf Dössel: *Bildgebende Verfahren in der Medizin – Von der Technik zur medizinischen Anwendung*, Springer, 2000.
- [Dre17] Kilian Dremel: *Modellbildung des Messprozesses und Umsetzung eines modellbasierten iterativen Lösungsverfahrens der Schmittbild-Rekonstruktion für die Röntgen-Computertomographie*, Dissertation, JMU Würzburg, 2017.

- [Dvv16] GDV – Die Deutschen Versicherer: *Landwirtschaftliche Mehrgefahrenversicherung für Deutschland*, Stand November 2016.
- [Eed19] Umweltbundesamt: *Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2018*, Hintergrund März 2019.
- [Est05] Claudio Estaci, Matteo Pastorino: *An Inexact-Newton Method for Short-Range Microwave Imaging Within the Second-Order Born Approximation*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, No. 11, November 2005.
- [Ebe22] K.J. Ebeling: *Elektromagnetische Felder und Wellen*, Skriptum zur Vorlesung, Uni Ulm, 2022.
- [Fal14] Mojtaba Fallahpour et al.: *Piecewise and Wiener Filter-Based SAR Techniques for Monostatic Microwave Imaging of Layered Structures*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, No. 4, January 2014.
- [Fah07] Ludwig Fahrmeir: *Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen*, Springer, 2007.
- [Fer14] David Ferreira: *A review on the electromagnetic characterization of building materials at micro- and millimeter wave frequencies*, IEEE, EuCAP 2014, Hague, Netherlands.
- [Fer18] David Ferreira: *Assessing Transparency Control of Southern European Building Wall Structures Using Frequency-Selective Surfaces*, IEEE Antennas & Propagation Magazine, October 2018.
- [Fin15] Gerhard H. Findenegg: *Statistische Thermodynamik*, Springer Spektrum, 2.Auflage, 2015.
- [Fvf16] Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg: *Borkenkäfer – Erkennen, vorbeuge, managen – Hinweise für Waldbesitzende*, Februar 2016.

- [Gar11] D. H. Garces, W. T. Rhodes, und N. M. Peña: *Projection-slice theorem: a compact notation*, J. Opt. Soc. Am. A, Bd. 28, Nr. 5, S. 766, Mai 2011, doi: 10.1364/JOSAA.28.000766.
- [Goo16] Ian Goodfellow and Yoshua Bengio and Aaron Courville: *Deep Learning*, MIT Press, 2016, <http://www.deeplearningbook.org>.
- [Gor21] Gorzalka, Philip et. al.: *Material investigations to facilitate the applicability of microwave radar to energy-related wall structure analysis*, Materials and Structure, 2021.
- [Gue99] Günther, Marco: *Konzepte der rechnergestützten Modellierung und Simulation der elektromagnetischen Wellenausbreitung*, Diplomarbeit, TU Chemnitz, 1999.
- [Haa16] Alexander Haas et al.: *Design of Wide-Band Corrugated Feed Horn for Reflector Antenna in Radar Applications*, GeMic 2016, Bochum.
- [Hag09] John B. Hagen: *Radio Frequency Electronics Circuits and Applications*, Second Edition, Cambridge University Press, 2009.
- [Har78] Frederic J. Harris: *On the use of Windows for Harmonic Analysis with the discrete Fourier Transform*, Proceedings of the IEEE, Vol. 6, Issue 1, 1978.
- [Has08] U.C. Hasar: *Non-destructive testing of hardened cement specimens at microwave frequencies using a simple free-space method*, NDT&E International, December 2008.
- [Hei13] Andreas Heinzel: *Untersuchung über die Verwendung von UHF-SAR im Nahbereich zur Detektion verborgener Objekte*, Bachelorarbeit, TU München, 2013.
- [Hei16] A. Heinzel et. al.: *Focusing Methods for Ground Penetrating MIMO SAR Imaging within Half-Spaces of Different Permittivity*, VDE, EUSAR 2016, September 2016.
- [Hen11] Werner Eicke-Henning: *Kleine Geschichte der Wärmedämmung – Erster Teil*, WKS B – 65/2011.

- [Heu19] Holger Heuermann: *Mikrowellentechnik – Feldsimulation, nichtlineare Schaltungstechnik, Komponenten und Subsysteme, Plasmatechnik, Antennen und Ausbreitung*, Springer Vieweg, 2019.
- [Hhe01] Heino Henke: *Elektromagnetische Felder – Theorie und Anwendung*, Springer, 2001.
- [Hil01] HILTI: *HILTI PS 50 – Bedienungsanleitung*, 2014.
- [Hil02] HILTI: *HILTI PS 1000 – Bedienungsanleitung*, 2014.
- [Hol21] Thomas Holton: *Digital Signal Processing – Principles and Applications*, Cambridge University Press, 2021.
- [Hug96] W. Hughes et al.: *A comparison of the Range-Doppler and Chirp Scaling algorithms with reference to RADAR-SAT*, IGARSS '96, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996.
- [Ipc07] S. Solomon et al.: *IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [Ipc18] V. Masson-Delmotte et al.: *IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp., 2018.
- [Jae89] Bernd Jähne: *Digitale Bildverarbeitung*, Springer Verlag, 1989.
- [Jon15] Joachim Jonuscheit: *Lackinspektion mit Terahertz-Wellen – Zerstörungsfreie Mehrschichtanalyse, Messen & Prüfen – Journal für Oberflächentechnik*, 2015.

- [Kam09] K. Kammeyer, K. Kroschel: *Digitale Signalverarbeitung – Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen*, Vieweg + Teubner, 2009.
- [Kar14] Klaus W. Kark: *Antennen und Strahlungsfelder*, 5. Auflage, Springer Vieweg, 2014.
- [Kha07] Sergey Kharkovsky, Reza Zoughi: *Microwave and Millimeter Wave Nondestructive Testing and Evaluation – Overview and Recent Advances*, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, April 2007.
- [Kim18] Namgyu Kim et al.: *Deep learning-based underground object detection for urban road pavement*, International Journal of Pavement Engineering, 2018.
- [Kin99] Simon Kingsley, Shaun Quegan: *Understanding Radar Systems*, Scitech Publishing Inc., 1999.
- [Kla09] Swen Klauß et al.: *Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualterklasse und Ableitung typischer Bauteilaufbauten*, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Oktober 2009.
- [Kla00] Helmut Klausing und Wolfgang Holpp: *Radar mit realer und synthetischer Apertur – Konzeption und Realisierung*, Oldenburg Verlag München Wien, 2000.
- [Kli18] Harald Klingbeil: *Grundlagen der elektromagnetischen Feldtheorie*, 3. Auflage, Springer Spektrum, 2018.
- [Kno04] Eugene F. Knott et al.: *Radar Cross Section*, Scitech Publishing Inc., Raleigh, NC, 2004.
- [Kop07] Konrad Kopitzki, Peter Herzog: *Einführung in die Festkörperphysik*, Teubner, 6. Auflage, 2007.
- [Koy14] Christian Koyama et al.: *Polarimetric UWB SAR for Subsurface Imaging of Building Structures*, IEEE, Asia-Pacific Microwave Conference, 2014, Sendai, Japan.
- [Kro18] Christian Kroos: *Nonlinear Optics*, IPQ, KIT, 2018.
- [Kra02] Herbert J. Kramer: *Observation of the Earth and Its Environment – Survey of Missions and Sensors* 4th Edition, Springer 2002.

- [Lal04] David Lalush and Miles Wernick: *Emission Tomography – The Fundamentals of PET and SPECT*, Chapter 21, Iterative Image Reconstruction, Elsevier, 2004.
- [Lam17] Silvia Lameri et al.: *Landmine Detection from GPR Data Using Convolutional Neural Networks*, IEEE, 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017.
- [Liu16] Hai Liu et al.: *Post-Earthquake Damage Inspection of Wood-Frame Buildings by a Polarimetric GB-SAR System*, MDPI Remote Sensing, November 2016.
- [Lud08] Albrecht Ludloff: *Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung*, Vieweg+Teubner, 4. Auflage, 2008.
- [Lui11] Adriano Luis de Paula: *Modified Nicolson-Ross-Weir (NRW) method to retrieve the constitutive parameters of low-loss materials*. SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics (IMOC), 2011.
- [Luu14] Olli Luukkonen: *A Stepwise Nicolson-Ross-Weir-Based Material parameter Extraction Method*, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, December 2011.
- [Mar86] Nathan Marcuvitz: *Waveguide Handbook*, McGrawHill, 1986.
- [Men91] Mensa D.L.: *High Resolution Cross-Section Imaging*, Artech House, London, 1991.
- [Mes08] Dieter Meschede: *Optik, Licht und Laser*, Vieweg + Teubner, 2008.
- [Mor13] A. Moreira et. al.: *A tutorial on synthetic aperture radar*, IEEE Geosci. Remote Sens. Mag., Bd. 1, Nr. 1, S. 6-43, März 2013, doi: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
- [Mon19] Umweltbundesamt: *Monitoringbericht 2019 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel – Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung*.
- [Mue17] J.P. Mueller et. al: *Algorithms for dummies*, Wiley, 2017.

- [Nat11] Alexandre Natã et. al.: *The Step by Step Development of NRW Method*, SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics (IMOC), 2011.
- [Nic70] A.M. Nicolson, G.F. Ross: *Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-19:377-382, 1970.
- [Ngu16] Cam Nguyen, Joongsuk Park: *Stepped Frequency Radar Sensors – Theory Analysis and Design*, Springer, 2016.
- [Oez12] C. Özdemir: *Inverse Synthetic Aperture radar imaging with MATLAB algorithms*, Hoboken, NJ, Wiley, 2012.
- [Pat18] D.Patel: *Approach for external measurements of the heat transfer coefficient (U-value) of building envelope components using UAV based infrared thermography*, QIRT 2018.
- [Poc18] Pochi Yeh: *Optical Waves in Layered Media*, Wiley, 1988.
- [Poz12] David M. Pozar: *Microwave Engineering - Fourth Edition*, Wiley, 2012.
- [Pri91] Roland Priemer: *Introductory Signal Processing*, Vol. 6, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991.
- [Pue12] Puente León: *Halbleiterbauelemente*, Vorlesungsskript, WS 2011/2012, KIT.
- [Pue15] Puente León: *Messtechnik – Systemtheorie für Ingenieure und Informatiker*, 10.Auflage, Springer Vieweg, 2015.
- [Pra20] Reddy, Prasad: *Basics of Electromagnetics and Transmission Lines*, BS Publications, 2020.
- [Ras17] Tariq Rashid: *Neuronale Netze selbst programmieren – ein verständlicher Einstieg mit Python*, O'Reilly, 2017.
- [Rfs21] DRH18-EX Product Datasheet – RFSPIN, June 2021.
- [Ric15] Matthias Richter: *Inverse Probleme – Grundlagen, Theorie und Anwendungsbeispiele*, Springer Spektrum, 2015.

- [Rit20] Hannah Ritchie, Max Roser: *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*, 2022, www.ourworldindata.org
- [Roq11] G. Roqueta et al.: *Microwave Non-Destructive evaluation of corrosion in reinforced concrete Structures*, IEEE, EUCAP 2011, Rome, Italy.
- [Rot01] Edward J. Rothwell, Michael J. Cloud: *Electromagnetics*, CRC Press, 2001.
- [Sad20] Sajjad Sadeghi et al.: *A DORT-Uniform Diffraction Algorithm for Through-the-Wall Imaging*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 68, No. 4, April 2020.
- [Sal20] B. Saleh, M. Teich: *Optik und Photonik*, 3. Auflage, Wiley-VCH, 2020.
- [Sat14] Motoyuki Sato et al.: *Fundamental Study on NDT of Building Wall Structure by Radar*, La Cité, Nantes, France, July 2014.
- [Say09] M. Sayar: *Non-destructive microwave detection of layer thickness in degraded thermal barrier coatings using K- and W-Band frequency range*, NDT&E International, January 2009.
- [Sce11] Otmar Scherzer: *Handbook of Mathematical Methods in Imaging*, Springer, 2011.
- [Sch17] Estevam Schmiedt, J. et al.: *Remote sensing techniques for building models and energy performance studies of buildings*, EBC Annex 71, April 2017, Loughborough, UK.
- [Sko01] Merrill I. Skolnik: *Introduction to radar systems*, McGrawHill, New York, 2001.
- [Sma16] Jasmin Smajic: *How to Perform Electromagnetic Finite Element Analysis*, NAFEMS Ltd., 2016.
- [Smi03] Steven W. Smith: *Digital Signal Processing – A practical Guide for Engineers and Scientists*, Newnes, 2003.

- [Srb19] E. Schreiber et al.: *Advanced Buried Object Detection by Multichannel, UAV/Drone Carried Synthetic Aperture Radar*, EuCAP 2019, Krakau, Polen.
- [Sta95] H.C. Stankwitz: *Nonlinear Apodization Sidelobe Control in SAR Imagery*, IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems Vol. 31, January 1995.
- [Sti09] Leonhard Stiny: *Passive Elektronische Bauelemente, Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung*, Pringer Vieweg, 3. Auflage, 2009.
- [Sto16] Stockhausen, N: *Methoden der digitalen Signalverarbeitung*, John Wiley & Sons, Weinheim, 2016.
- [Sun21] Maximilian F. Sundermeier: *Compact Radar-Cross Section Measurement Setup and Performance Evaluation*, Kleinheubacher Berichte 2020, Volume 19, 2021.
- [Sum18] Gencer Sumbul et al.: *Fine-Grained Object Recognition and Zero-Shot Learning in Remote Sensing Imagery*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 56, No. 2, February 2018.
- [Teu07] S.A. Teukolsky und B.P. Flannery: *Numerical Recipes – The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 2007.
- [Thu98] Thumm: *Hochfrequenzmesstechnik*, Teubner Verlag, 2.Auflage, 1998.
- [Tif07] Ellen Ivers-Tiffée: *Werkstoffe der Elektrotechnik*, Teubner, 10.Auflage, 2007.
- [Trä12] Fran Träger: *Springer Handbook of Lasers and Optics*, 2nd Edition, Springer, 2012.
- [Tre20] Sergei Tretyakov und Constantin Simovski: *An Introduction to Metamaterials and Nanophotonics*, Cambridge University Press, 2020.
- [Ula81] Fawwaz T. Ulaby: *Microwave Remote Sensing – Active and Passive – Volume I*, Artech House Inc., 1981.

- [Ula14] Fawwaz T. Ulaby: *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*, The University of Michigan Press, 2014.
- [Ulb12] Michael Ulbrich und Stefan Ulbrich: *Nichtlineare Optimierung*, Birkhäuser, 2012.
- [Ull19] Ingrid Ullmann: *Millimeter Wave Radar Imaging for Non-Destructive Detection of Material Defects*, EURAD 2019, October 2019, Paris, France.
- [Ull21] Ingrid Ullmann: *A Computational Efficient Reconstruction Approach for Imaging Layered Dielectrics with Sparse MIMO Arrays*, IEEE Journal of Microwaves, 2021.
- [Uln14] L.M. Ulander: *Impulse Response Function for Ultra-wideband SAR*, Proceeding of EUSAR, Berlin, 2014.
- [Uwb20] Umweltbundesamt: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 und 2019*. Stand 09/2020.
- [Uwb19] Umweltbundesamt: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2018*, Stand 10/2019.
- [Uws20] Umweltbundesamt: *Auf Basis AG Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat)*, Stand 02/2020.
- [Vic11] Alexandre Natã Vicente: *The Step by Step Development of NRW Method*, IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2011.
- [Wei74] W.B. Weir: *Automatic Measurement of Complex Dielectric Constant and Permeability at Microwave frequencies*. Proceedings of IEEE, Vol. 62:33-36, 1974.
- [Wei49] Walter Weizel: *Lehrbuch der theoretischen Physik – Erster Band – Physik der Vorgänge, Bewegung, Elektrizität, Licht, Wärme*, Springer Verlag, 1949.
- [Wol06] J. Wolberg: *Data Analysis Using the Method of Least Squares*, Springer-Verlag, 2006.

- [Zac10] Franz Zach: *Leistungselektronik – Ein Handbuch – Band 1*, SpringerWienNewYork, 2010.
- [Zeg10] Gengsheng Lawrence Zeng: *Medical Image Reconstruction – A Conceptual Tutorial*, Springer, 2010.
- [Zen11] Statistische Ämter des Bundes und der Länder: *Zensus 2011 – Zensus Kompakt, Endgültige Ergebnisse*, Januar 2015.
- [Zha11] Wenji Zhang et al.: *Real Time Subsurface Imaging Algorithm for Intra-Wall Characterization*, SPIE Defense, Security and Sensing, 2011, Orlando, United States.
- [Zha18] Wenji Zhang et al.: *Two- and Three-Dimensional Fast Intrawall Imaging with Microwave Tomographic Algorithm*, Hindawi, International Journal of Antennas and propagation, Vol. 2018, 2018.
- [Zwi02] T. Zwick et al.: *A generic algorithm for the evaluation of material parameters of compound multilayered structures*, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 50, Issue 4, April 2002.
- [Zwi13] T. Zwick: *Grundlagen der Hochfrequenztechnik – Skriptum zur Vorlesung*, KIT, 2013.