



Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und Industriedesign (IWID)
Institut für Elektrotechnik

Masterarbeit

**zur Erlangung des Grades eines „Master of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik**

Thema: **Objektrekonstruktion in der Mikrowellen-Defektoskopie**

Eingereicht von: **Thomas Gagelmann**

Angefertigt für: ifak – Institut für Automation und Kommunikation e. V. Magdeburg

Matrikel: E 2012

Ausgabetermin: 11.10.2018

Abgabetermin: 28.02.2018

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr Dr. Maxim Nesterov

.....
1. Prüfer

.....
2. Prüfer

Abstract

Bei der Defektoskopie mit Mikrowellen existiert bei der Wahl der Messfrequenz ein Interessenskonflikt. Wählt man eine hohe Messfrequenz, wie z. B. 300 GHz, treten aufgrund der kleinen Wellenlänge kaum Störeffekte durch Beugungserscheinungen auf. Allerdings erreichen die hochfrequenten Mikrowellen wegen der hohen Dämpfung oft nur geringe Eindringtiefen von wenigen Millimetern. Bei niedrigen Messfrequenzen, wie die in dieser Arbeit genutzten 24 GHz, können größere Eindringtiefen erreicht werden. Allerdings treten auch vermehrt Beugungserscheinungen in den Messbildern auf. Diese Beugungseffekte können kleine Defekte, insbesondere in der Nähe der Randbereiche des Prüfbjektivs, überlagern und ihre Erkennung erschweren.

In dieser Arbeit wird die Eignung eines aus der Optik bekannten Bildverarbeitungsverfahrens für die Mikrowellen-Defektoskopie untersucht, bei dem das gemessene Defektbild im Frequenzbereich mit einer Punktspreizfunktion (PSF) entfaltet wird. Ziel dieser Entfaltung ist es, die Beugungserscheinungen nachträglich aus dem Defektbild zu entfernen und gleichzeitig die tatsächliche Größe des Defektes zu rekonstruieren. Dazu muss zunächst eine für ein bestimmtes Messszenario passende PSF ermittelt werden. In dieser Arbeit werden daher drei Methoden der messtechnischen Bestimmung einer passenden PSF getestet. Außerdem wird der Einfluss untersucht, den die Geometrie, das Material und die Tiefenlage eines Defekts auf das Beugungsmuster und damit auch auf die PSF haben. Es wird eine parametrierbare Funktion vorgestellt, mit der sich eine für bestimmte Messszenarien passende PSF künstlich nachbilden lässt. Die experimentellen Ergebnisse werden durch FEM-Simulationen unterstützt. Zusätzlich wird untersucht, ob die im Messsystem vorhandene offene Hohlleiterantenne mit einer Stielstrahlerantenne getauscht werden kann, um die Ortsauflösung und die Symmetrie des Antennen-Footprints zu verbessern.

There is a trade-off in the microwave defectoscopy regarding the measurement frequency. If a high frequency, such as 300 GHz, is chosen almost no disturbing effects caused by diffraction due to the small wavelength will occur. However, the high-frequency microwaves often reach only small penetration depths of a few millimeters due to the high attenuation. At lower frequencies, as for instance the 24 GHz used in this thesis, greater penetration depths can be achieved. At the same time stronger diffraction phenomena occur in the measurement images. These diffraction effects can mask small defects, in particular near the edges of the test sample and make their detection more difficult.

In this work the suitability of a sample image processing method, known from optics, is examined for the use in microwave defectoscopy. In this image restoration method the measured image is deconvoluted with a point spread function (PSF) in the frequency domain. The goal of the deconvolution is to remove the diffraction patterns from the measured image and reconstruct the actual size of the measured defect. For this purpose a suitable PSF, which fits a specific measurement scenario, must first be determined. In this thesis three methods for the determination of a suitable PSF are tested. It is examined how the geometry, material and location depth of the defect influences the resulting diffraction pattern and therefore the PSF. Additionally a parametric function is presented, which fits a PSF for respective measurement scenarios. The experimental results are supported by FEM simulations. It is also examined if the simple open waveguide antenna of the measurement system can be exchanged by a tapered antenna to improve spatial resolution and to increase the symmetry of the antenna footprint.

Aufgabenstellung für die Masterarbeit

für Herrn Thomas Gagelmann

„Objektrekonstruktion in der Mikrowellen-Defektoskopie“

Aufgabenstellung:

Die Mikrowellen-Defektoskopie ist eine Methode der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP). Mit ihr ist es möglich, Defekte unter der Oberfläche von Bauteilen aus elektrisch isolierenden Materialien zu erkennen. Dazu gehören schalldämpfende Kunststoffe wie PTFE und glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) sowie Schäume. Bauteile aus diesen Materialien können mit Mikrowellen zerstörungsfrei auf Porositäten, Luker, Risse, Fremdeinschlüsse, Delaminationen, fehlerhafte Klebung und Stoßschäden untersucht werden. Dabei werden primär Unterschiede in der Dielektrizitätszahl ϵ_r des Grundmaterials und der zu erkennenden Defekte erkannt. Unter Mikrowellen versteht man elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von 300 MHz bis 300 GHz. Aufgrund der frequenzabhängigen Permittivität des Materials ist dessen Transparenz und damit auch die Eindringtiefe stark von der verwendeten Prüffrequenz abhängig. Bei der Wahl der Prüffrequenz besteht ein Interessenskonflikt. Je niedriger die Prüffrequenz, desto tiefer können die Wellen in das Prüfstück eindringen. Allerdings ist die Ortsauflösung schlechter als bei hohen Frequenzen. Zusätzlich treten an Kanten und Rändern starke Beugungserscheinungen auf. Um eine gute Eindringtiefe zu gewährleisten, wird mit 24 GHz eine relativ niedrige Prüffrequenz gewählt.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die mit der niedrigen Prüffrequenz einhergehenden Beugungserscheinungen durch verbesserte Aufnahmetechniken und einer nachträglichen Messdatenverarbeitung zu eliminieren. Die Messdatenverarbeitung beruht darauf, dass gemessene Defektbild mit vorab durch Simulationen ermittelten Punktspreizfunktionen (PSF) zu entfalten und so die durch die Antenne und die Beugungserscheinungen an Ecken und Kanten verursachten Störeinflüsse im Defektbild zu reduzieren.

Die Schwerpunkte der Aufgabenstellung bilden dabei:

- die Definition der Randbedingungen und Messszenarien,
- die Optimierung einer Antenne für die Aufnahme von Defektbildern bei einer Prüffrequenz von 24 GHz am an der Hochschule vorhandenen Teststand,
- Optimierung der Qualität der am Teststand aufgenommenen Messdaten,
- die Untersuchung von Methoden für die Faltung und Entfaltung von Defektbildern mit einer geeigneten PSF, um Beugungserscheinungen an den Kanten der Defekte zu reduzieren und die tatsächliche Defektgröße genauer darzustellen,
- die experimentelle Aufnahme von Defektbildern und Anwendung des Entfaltungsalgorithmuses auf die Messergebnisse,
- Untersuchung der Einflussfaktoren Defektmaterial, Defektform und Tiefenlage auf die Form der PSF,
- die Diskussion von Störeinflüssen, der Vergleich der Messdaten mit den Simulationsergebnissen sowie die Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Die Masterarbeit wird am Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg geschrieben.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift des Verfassers

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	II
Aufgabenstellung für die Masterarbeit.....	III
Selbstständigkeitserklärung.....	IV
Symbolverzeichnis.....	VI
1. Einleitung.....	1
2. Aufbau der Arbeit.....	4
3. Technischer Hintergrund.....	5
3.1. Die Mikrowellen-Defektroskopie-eine Methode der ZfP.....	5
3.2. Beugungseffekte an Ecken und Kanten.....	7
4. Theoretische Grundlagen.....	10
4.1. Mikrowellen.....	10
4.2. Wellenausbreitung.....	11
4.3. Reflexion an Stellen unterschiedlicher Permittivität.....	17
4.4. Der Hohlleiter.....	19
4.5. Die Fourier-Transformation.....	24
4.6. Der Faltungsoperator.....	25
4.7. Die Punktspreizfunktion.....	26
4.8. Modellierung des Prozesses der Verschlechterung der Bildqualität.....	27
4.9. Vorstellung einiger geläufiger Entfaltungsalgorithmen.....	28
4.9.1. Der einfache inverse Filter.....	28
4.9.2. Der Wiener Filter.....	29
5. Vorbereitung der Experimente.....	31
5.1. Definition von Messszenarien und Randbedingungen.....	31
5.2. Strahleroptimierung.....	35
5.3. System- und Softwareentwicklung.....	44
5.3.1. Beschreibung der 24 GHz-Messanlage.....	44
5.3.2. Beschreibung der Messdatenverarbeitung.....	50
6. Bestimmung der Punktspreizfunktion.....	56
6.1. Methoden zur Bestimmung der Punktspreizfunktion.....	56
6.2. Experimentelle Bestimmung der Punktspreizfunktion.....	59
6.2.1. Vorbereitung und Vorverarbeitung der Messdaten.....	59
6.2.2. Ermittlung der PSF mittels kleinem Punktdefekt.....	65
6.2.3. Ermittlung der PSF mittels Ableitung der ESF.....	70
6.2.4. Ermittlung der PSF mittels bekanntem idealem Defektprofil.....	73
6.2.5. Einschätzung der Methoden zur Ermittlung der PSF.....	75
7. Einflüsse auf die Form der Punktspreizfunktion.....	78
7.1. Einfluss des Defektmaterials.....	79
7.1.1. Einfluss des Defektmaterials auf die Form des Defektprofils.....	79
7.1.2. Entfaltung bei Überlagerung verschiedener Beugungsmuster.....	84
7.2. Einfluss der Tiefenlage des Defektes.....	89
7.3. Einfluss der Defektgeometrie.....	94
8. Abbildung der PSF durch parametrierbare Funktionen.....	98
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	103
Literaturverzeichnis.....	107
A Anhang.....	109
A.1. Dielektrische Materialparameter der verwendeten Materialien.....	109

Symbolverzeichnis

Naturkonstanten

Formelzeichen	Bezeichnung	Wert und Dimension
c_0	Vakuumlichtgeschwindigkeit	$299.792.458 \frac{m}{s}$
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	$8,854187817 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$
μ_0	magnetische Feldkonstante	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$

Symbole

Formelzeichen	Bezeichnung	Dimension
v_p	Phasengeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
v_g	Gruppengeschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
v_T	Geschwindigkeit des Verfahrtes	$\frac{mm}{s}$
c	Lichtgeschwindigkeit im Medium	$\frac{m}{s}$
λ	Wellenlänge im Medium	m
λ_0	Freiraumwellenlänge	m
f	Frequenz	$Hz = \frac{1}{s}$
f_c	Grenzfrequenz im Hohlleiter (cutoff-Frequenz)	$Hz = \frac{1}{s}$
f_s	Abtastfrequenz	$Hz = \frac{1}{s}$
ω	Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)	$Hz = \frac{1}{s}$
ϵ	Permittivität (dielektrische Leitfähigkeit)	$\frac{F}{m} = \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$

$\underline{\varepsilon}$	komplexe Permittivität im Verlustfall	$\frac{F}{m} = \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$
ε_r	Permittivitätszahl (relative Permittivität)	-
$\underline{\mu}$	Permeabilität (magnetische Leitfähigkeit)	$\frac{H}{m} = \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$
μ_r	Permeabilitätszahl (relative Permeabilität)	-
\vec{H}	magnetische Feldstärke	$\frac{A}{m}$
\vec{B}	magnetische Flussdichte	$T = \frac{V \cdot s}{m^2}$
\vec{E}	elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
\vec{D}	elektrische Flussdichte	$\frac{A \cdot s}{m^2}$
\vec{J}	elektrische Stromdichte	$\frac{A}{m^2}$
ρ	elektrische Raumladungsdichte	$\frac{C}{m^3} = \frac{A \cdot s}{m^3}$
κ	elektrische Leitfähigkeit	$\frac{S}{m} = \frac{A}{V \cdot m}$
t	Zeit	s
γ	komplexe Ausbreitungskonstante	$\frac{1}{m}$
D_E	Querabmessung der Sendeantenne	m
k	Wellenzahl in Materie	$\frac{1}{m}$
α	Dämpfungskonstante	$\frac{1}{m}$
Z_F	Feldwellenimpedanz	$\Omega = \frac{V}{A}$
r	Reflexionsfaktor	-
d	Durchlassfaktor	-

S	gemessener, komplexer Reflexionsmesswert	V
\tilde{S}	Median aus n Reflexionsmesswerten	V
L_n	Leistungsspektrum des Rauschens	
L_f	Leistungsspektrum der ungestörten Objektfunktion	
N	Anzahl von Reflexionsmesswerten	-
n	Anzahl der Reflexionsmesswerte pro mm Weg	$\frac{1}{mm}$
w_x	auf der X-Achse zurückgelegter Weg	mm
w_y	auf der Y-Achse zurückgelegter Weg	mm
φ	Phasenwinkel	°
φ_K	Korrekturwinkel für die Subtraktion von $h_P(x,y)$ und $h_H(x,y)$	°
φ_S	Winkel, mit dem $h_P(x,y)$ und $h_H(x,y)$ in der komplexen Ebene gedreht werden	°
$h(x,y)$	Defektbild bestehend aus einem zweidimensionalen Array aus komplexen Messwerten im Zeitbereich	
$h'(x,y)$	Defektbild ohne Rauscheinflüsse im Zeitbereich	
$h_P(x,y)$	komplexes Defektbild aus Messung mit Probekörper	
$h_H(x,y)$	komplexe Defektbild aus Messung ohne Probekörper	
$H(u,v)$	Defektbild im Frequenzbereich	
$f(x,y)$	ideale Objektfunktion im Zeitbereich	
$f'(x,y)$	rekonstruierte Objektfunktion im Zeitbereich	
$F(u,v)$	ideale Objektfunktion im Frequenzbereich	
$F'(u,v)$	rekonstruierte Objektfunktion im Frequenzbereich	
$g(x,y)$	Punktspreizfunktion des Messsystems im Zeitbereich	
$G(u,v)$	Punktspreizfunktion im Frequenzbereich	
$n(x,y)$	additives Rauschen im Zeitbereich	

$N(u,v)$ additives Rauschen im Frequenzbereich

Subscripts

$h(x,y)_{\text{PK6_Wasser}}$ Das Subscript „PK...“ bezeichnet das Kürzel für den jeweiligen Probekörper. Nähere Informationen, die im Kontext des Experiments zusehen sind, werden nach einem Unterstrich angefügt.

sonstige Zeichen

\Re Realteil einer komplexen Zahl
 \Im Imaginärteil einer komplexen Zahl
 ∂ partielle Ableitung
 ∇ Nabla-Operator
 Δ Laplace-Operator
 \mathcal{F} Fouriertransformation
 \mathcal{F}^{-1} inverse Fouriertransformation

Abkürzungen

ZfP zerstörungsfreie Prüfung
 MW-ZfP mikrowellenbasierte zerstörungsfreie Prüfung
 SKZ Süddeutsches Kunststoff-Zentrum
 GFK glasfaserverstärkte Kunststoffe
 PE Polyethylen
 TM-Wellen transversale magnetische Wellen
 TE-Wellen transversale elektrische Wellen
 FFT schnelle Fourier-Transformation zur Zerlegung eines digitalen Signals in seine Frequenzanteile
 IFFT inverse schnelle Fourier-Transformation
 PSF Punktspreizfunktion
 MTF Modulationstransferfunktion
 MSE Mittlere quadratische Abweichung (mean squared error)
 PK Probekörper

1. Einleitung

Die Mikrowellen-Defektoskopie ist eine mikrowellenbasierte zerstörungsfreie Prüfmethode (MW-ZfP). Dabei werden elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von 300 MHz bis 300 GHz abgestrahlt und das reflektierte oder transmittierte Signal ausgewertet. Das Grundprinzip der MW-ZfP basiert darauf, dass Mikrowellen an den Grenzschichten von Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätszahlen ϵ_r abgelenkt werden. Die MW-ZfP wird für die Prüfung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) oder anderen elektrisch isolierenden Materialien und Bauteilen eingesetzt. Speziell bei GFK stoßen andere Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) an ihre Grenzen. Beispielsweise ist die Eindringtiefe bei thermografischen Prüfverfahren auf wenige Millimeter limitiert. Bei Ultraschallprüfungen kommt es aufgrund des hohen Faseranteils zu Streueffekten und starken Dämpfungserscheinungen. Die Computertomografie benötigt teure Gerätschaften, und es müssen Strahlenschutzvorkehrungen getroffen werden. Außerdem ist die Bauteilgröße häufig limitiert. Der Markt für GFK wächst in Deutschland laut dem Composite-Marktbericht der Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. überdurchschnittlich stark [1]. Die Transportindustrie verwendet vermehrt GFK, um durch Gewichtsoptimierung die hoch gesteckten Klimaziele zu erreichen. Auch der Bau von Windkraftanlagen ist ein weiterer Treiber dieser Entwicklung. Der Herstellungsprozesses von GFK-Bauteilen ist von einem hohen Grad an Handarbeit geprägt. Dabei treten immer wieder Fehler wie Delaminationen, Porositäten, Luker, Risse, Fremdeinschlüsse, fehlerhafte Klebung und Stoßschäden auf. Nur mit einem geeigneten zerstörungsfreien Prüfverfahren kann eine 100-%-Kontrolle und damit Sicherheit und Qualität der Bauteile gewährleistet werden. Deswegen nimmt die Bedeutung der MW-ZfP weiter zu.

Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem Ziel, dieses Prüfverfahren weiter zu verbessern, denn bei der Wahl der Prüffrequenz besteht ein Zielkonflikt. Bei hohen Prüffrequenzen, wie z.B. 300 GHz, werden hohe Ortsauflösungen erreicht, die die Erkennung von kleinen Fehlern ermöglichen. Hohe Frequenzen bedingen allerdings einen großen technischen Aufwand und damit auch hohe Kosten. Außerdem nimmt die maximale Eindringtiefe der Mikrowellen in das Material bei steigender Frequenz stark ab. Zur Prüfung von dickwandige Laminaten wie Rotorblättern von Windkraftanlagen oder Blattfedern in der Automobilindustrie sind allerdings große Eindringtiefen notwendig, die nur mit Prüffrequenzen ≤ 100 GHz erreicht werden können. Deswegen wird für diese Arbeit eine mit 24 GHz relativ niedrige Prüffrequenz gewählt.

Dadurch können die Mikrowellen tiefer in das zu prüfende Material eindringen. Andererseits verschlechtert sich die Ortsauflösung und es treten vermehrt Beugungserscheinungen an Ecken und Kanten auf, so dass diese nicht mehr scharf abgebildet werden können. Folglich können Defekte im Randbereich und in der Nähe von Geometriesprüngen leicht übersehen werden, da sie von den Beugungserscheinungen kaum zu unterscheiden sind. Das bedeutet für die Qualitätskontrolle eine deutlich verringerte Zuverlässigkeit der Detektion von randnahen gegenüber randfernen Fehlern.

Um die Zuverlässigkeit zu erhöhen, soll die Qualität der Defektbilder durch verbesserte Aufnahmetechniken, eine Antenne mit guter Ortsauflösung sowie einer Entfaltung des Defektbildes mit einer geeigneten Punktspreizfunktion (PSF) verbessert werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der im Forschungsantrag vorgeschlagenen Unterdrückung der Beugungsmuster durch die Bildentfaltung mit einer Punktspreizfunktion. Im optischen Bereich werden solche Entfaltungen bereits für die Verbesserung der Auflösung von Teleskopen und Mikroskopen eingesetzt [3, 2]. Im Rahmen dieser Arbeit soll geprüft werden, ob eine ähnliche Methode auch in der Mikrowellen-Defektoskopie zur Beseitigung der Beugungsmuster an Objektkanten eingesetzt werden kann. In der Optik stellen sich Beugungserscheinungen an Blenden und Kanten aufgrund der kleineren Wellenlängen und des größeren Frequenzbereichs die Kanten eines Objekts oft nur leicht unscharf dar. Bei einer Frequenz der Mikrowellen von 24 GHz können jedoch starke Beugungserscheinungen mit einem klar erkennbaren Wellenmuster an den Objektkanten auftreten. Deswegen ist hier eine spezielle, auf das Defektmaterial, die Defekttiefe sowie die Antenne angepasste Funktion zu verwenden. Diese Funktion muss das Beugungsmuster, das physikalisch aus einer Überlagerung von vielen verschiedenen Wellenfunktionen besteht, abbilden.

Der im Forschungsantrag vorgeschlagene Lösungsansatz geht davon aus, dass es mithilfe von FEM-Simulationen möglich ist, für jedes Messszenario, das sich aus der Art des Defekts, dem Trägermaterial und dem Antennentyp zusammensetzt, eine geeignete numerische Punktspreizfunktion zu ermitteln. Die durch die Simulationen ermittelten numerischen Punktspreizfunktionen sollen dann mithilfe von analytischen Funktionen nachgebildet, die analytischen Punktspreizfunktionen dann wiederum in einer Datenbank gespeichert werden. In der praktischen Anwendung soll ein Optimierungsalgorithmus helfen, die korrekte PSF für einen unbekanntem Defekt aus der Datenbank auszuwählen.

Da im Forschungsantrag nicht näher beschrieben ist, wie die Punktspreizfunktionen ermittelt werden sollen, wurden in dieser Arbeit zunächst drei Methoden zur Extraktion einer PSF aus experimentellen Messdaten getestet. Außerdem musste die Definition der verschiedenen Defektarten ermittelt werden. Dazu wurde der Einfluss von den Defekt klassifizierenden Merkmalen wie das Material, die Oberflächengeometrie und Tiefenlage des Defekts in einem Probekörper auf die Form der PSF untersucht. Erst mit diesem Wissen lässt sich erst abschätzen, wie viele unterschiedliche Defektarten später in der Datenbank gespeichert werden müssen. Die Arbeit beinhaltet außerdem eine Nachbildung einer experimentell ermittelten PSF durch eine analytische Funktion für ein definiertes Messszenario.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente wurden mit einer in der Hochschule Magdeburg-Stendal vorhandenen 24-GHz-Messanlage durchgeführt. Dabei wurde die Aufnahmequalität der vorhandenen Anlage durch Änderungen in der Messsoftware verbessert. Zudem wurde eine Stielstrahlerantenne entworfen, mit dem Ziel, die mit der Anlage erreichbare Ortsauflösung zu verbessern und eine möglichst symmetrische Feldverteilung zu erreichen. Die experimentellen Ergebnisse dieser Arbeit wurden durch FEM-Simulationen unterstützt, die von Dr. Maxim Nesterov und Frau Cuihua Li durchgeführt wurden.

2. Aufbau der Arbeit

Nachfolgend wird die logische Struktur der Arbeit erläutert. Im 3. Kapitel wird zunächst ein kurzer Überblick über die gängigen Messverfahren in der zerstörungsfreien Prüfung gegeben und das physikalische Prinzip der Mikrowellen-Defektoskopie erklärt. Außerdem wird erläutert, warum Beugungseffekte an Ecken und Kanten entstehen und wieso diese manchmal ein Problem für die Erkennung von Defekten darstellen.

Das 4. Kapitel befasst sich mit den theoretischen Grundlagen. In den Abschnitten 4.1. bis 4.4. wird die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen im Freiraum und im Hohlleiter beschrieben. Auch ein idealisiertes theoretisches Modell für die Reflexion von ebenen Wellen an einer ebenen Trennfläche wird vorgestellt. Die Abschnitte 4.5. bis 4.9. beschäftigen sich mit systemtheoretischen Fragen. Dabei wird der Begriff der PSF definiert, die Faltung und Entfaltung im Zeit- sowie Frequenzbereich betrachtet und die Verschlechterung der Bildqualität durch additives Rauschen modelliert. Dies führt zur Vorstellung des Wiener-Filters, der in dieser Arbeit für die Entfaltungen verwendet wird.

Im Kapitel 5.1. werden die Randbedingungen für die experimentellen Messungen sowie die angefertigten Probekörper beschrieben. Das Kapitel 5.2. befasst sich mit der Optimierung der Antenne bezüglich Ortsauflösung und Feldsymmetrie. Dazu wird die entworfene Stielstrahlerantenne präsentiert und die mit ihr erzielten Messergebnisse im Vergleich zu einer offenen Hohlleiterantenne diskutiert. Im Kapitel 5.3. wird das für die Experimente verwendete 24-GHz-Messsystem sowie die Bemühungen, dessen Aufnahmequalität zu verbessern, vorgestellt. Außerdem wird auf die Implementierung der Entfaltungsalgorithmik in einem separaten LabVIEW-Programm eingegangen.

In den Kapiteln 6 und 7 werden die Ergebnisse der Experimente präsentiert. Dazu werden im 6. Kapitel drei Methoden vorgestellt und getestet, mit denen die für die Bildrekonstruktion notwendige PSF aus Mess- bzw. Simulationsdaten ermittelt wurden. Das 7. Kapitel befasst sich mit der Klassifizierung der Defektarten. Dazu wurde untersucht, welchen Einfluss das Material, die Tiefenlage sowie die Oberflächengeometrie eines Defekts auf das resultierende Beugungsmuster und damit auf die PSF haben.

Im 8. Kapitel wird eine analytische Funktion vorgestellt, mit der es möglich ist, die Form des für bestimmte Messszenarien gemessenen Beugungsmusters künstlich nachzubilden. Im 9. Kapitel werden die erzielten Ergebnisse dann noch einmal zusammengefasst.

3. Technischer Hintergrund

3.1. Die Mikrowellen-Defektoskopie-eine Methode der ZfP

Die Messverfahren der zerstörungsfreien Prüfung arbeiten mit den verschiedensten physikalischen Wirkprinzipien. In Abbildung 1 ist eine Übersicht der gängigen Prüftechniken dargestellt [4]. Die Wahl geeigneter Prüfverfahren hängt im wesentlichen von den physikalischen Eigenschaften der zu untersuchenden Materialien ab.

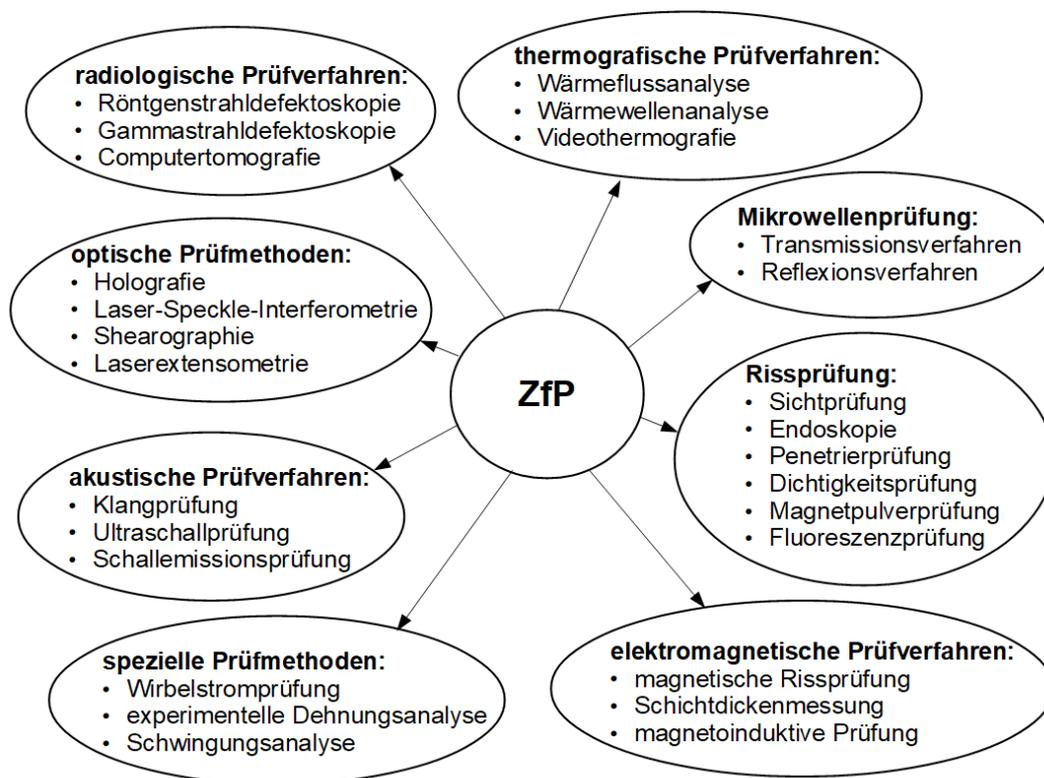


Abbildung 1: Übersicht über Methoden der zerstörungsfreien Prüfung.

Diese Arbeit behandelt die zerstörungsfreie Mikrowellenprüfung im Reflexionsverfahren, dessen generelles Messprinzip in Abbildung 2 skizziert ist. Die Mikrowellenprüfung wird bei elektrisch isolierenden Materialien angewendet. Diese dielektrischen Materialien besitzen eine Permeabilitätszahl von $\mu_r \approx 1$ und eine Permittivitätszahl ϵ_r zwischen 1 (Luft) und 10 (Al_2O_3 -Keramik) [5]. Beim Reflexionsverfahren werden von einem Sender elektromagnetische Wellen abgestrahlt, über einen Zirkulator geleitet und dann von einer Antenne auf das Prüfobjekt gerichtet. Das Prüfobjekt reflektiert diese Strahlung, wobei die Stärke und Phase der Reflexionen von der mittleren Permittivität des von der Antenne ausgeleuchteten Bereichs abhängig ist. Das von Prüfobjekt zurück

reflektierte Signal, wird von der Antenne wieder empfangen, im Zirkulator vom Sendesignal getrennt und dem Empfänger zugeführt. Im Empfänger wird das Signal dann nach Betrag und Phase ausgewertet und als komplexer Messwert ausgegeben. Dieses zurück reflektierte Signal wird in der Messtechnik in der Regel als Reflexionsfaktor S_{11} bezeichnet. Störstellen im Material weisen typischerweise eine abweichende Permittivität ϵ_r auf. So werden beim Abtasten des Prüfobjekts örtliche Permittivitätsschwankungen und damit Materialfehler sichtbar, und können nach einem flächigen Scan des Prüfobjekts zum Beispiel als zweidimensionales Bild dargestellt werden wie es in der Abbildung 3 auf der rechten Seite zu sehen ist.

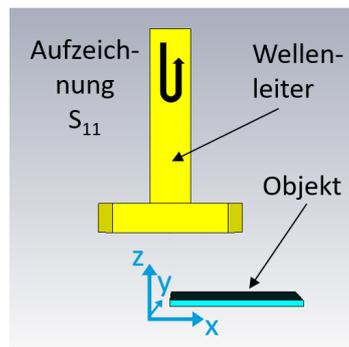


Abbildung 2: Darstellung des Messprinzips einer Reflexionsmessung.

In Abbildung 3 ist als Beispiel ein Scan einer Klebeverbindung zwischen einer Muffe und zwei Rohren aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) dargestellt.

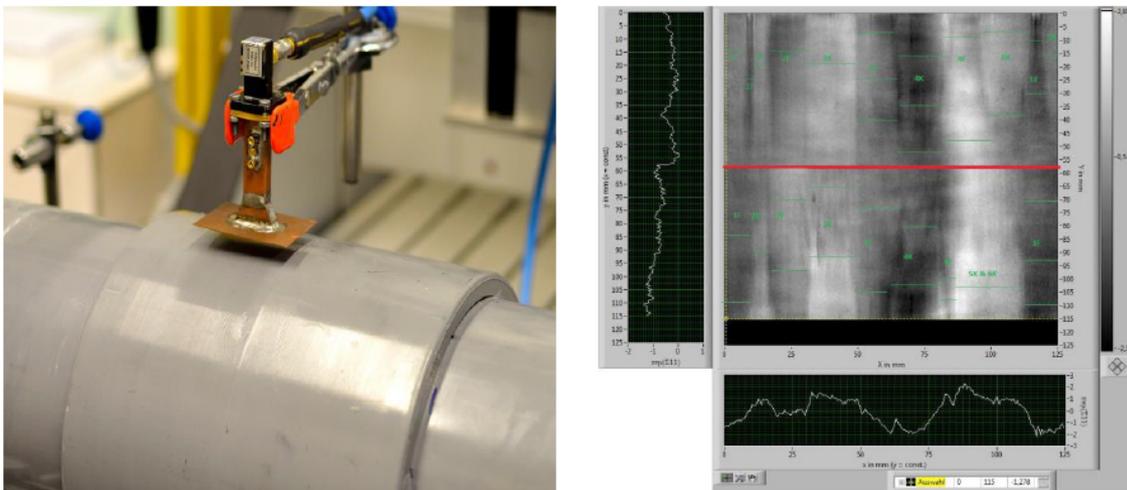


Abbildung 3: Mikrowellen-ZfP einer Rohverbindung (links), reflektiertes Signal als Flächenscan (rechts) [6].

Für solche Messaufgaben wird eine geeignete Antenne benötigt, die eine ausreichende Ortsauflösung aufweist sowie die Erkennung von Defekte in unterschiedlichen Tiefenlagen ermöglicht. Die erreichbare Ortsauflösung ist vor allem von der Wellenlänge des verwendeten Messsignals abhängig. Verwendet man zum Beispiel ein 10-GHz-Prüfsignal mit einer Freiraumwellenlänge von ca. 30 mm, wäre nur eine Ortsauflösung von

ca. 15 mm möglich [7]. Wenn feinere Auflösungen erreicht werden sollen, müsste eine höhere Prüffrequenz verwendet werden, was eine geringere Eindringtiefe und höhere Kosten bei den Mikrowellenkomponenten bedeuten würde. Dieser Zusammenhang zwischen Ortsauflösung und Wellenlänge gilt allerdings nur für das Fernfeld. Im Nahfeld ist die erreichbare Auflösung vor allem durch die Apertur der verwendeten Antenne bzw. Sonde bestimmt [7]. Deswegen wird in der Praxis oft eine Nahfeldmessung mit einer Antenne vorgenommen, die die Mikrowellenstrahlung auf einem Punkt im Nahfeld fokussiert oder deren abstrahlende Fläche sehr klein ist. Auf diese Weise kann im Nahfeld eine Ortsauflösung weit unterhalb der Wellenlänge der Prüffrequenz erreicht werden. Die Fokussierung kann zum Beispiel durch Platten mit definierten Schlitzen [8], offene Hohlleiter hinter dielektrischen Linsen [9] oder dielektrischen Einsätzen in Hornstrahlern [6] erreicht werden. Alternativ können auch Koaxialsonden genutzt werden, die nur eine sehr kleine abstrahlende Fläche aufweisen [7]. Allerdings können mit Koaxialsonden keine ausreichenden Eindringtiefen erreicht werden, da die Tiefenausdehnung des abgestrahlten Feldes nur in etwa dem Abstand zwischen Außen- und Innenleiter der Koaxialsonde entspricht. Ein Ziel dieser Arbeit ist es höhere Eindringtiefen für die Messungen zu erreichen. Aus diesem Grund wird sich hier eher auf Messungen im Fernfeld konzentriert. Um die schlechtere Ortsauflösung bei Fernfeldmessungen etwas auszugleichen, wurde ein dielektrischer Stielstrahler entworfen. Diese kompakte Antennenform wurde gewählt, da die für diese Arbeit genutzte Messanlage zwischen Verfahrtschicht und Messarm nur ca. 60 mm Platz bietet. Der Platzmangel verhinderte größere Antennenkonstruktionen, wie zum Beispiel den Einsatz von fokussierenden Linsen. Die Stielstrahlerantenne sollte das elektrische Feld etwas fokussieren und einen möglichst rotationssymmetrischen Ausleuchtungsbereich (engl. Footprint) aufweisen. Ist der Footprint bzw. die Feldverteilung der Antenne rotationssymmetrisch, vereinfacht das die nachfolgende Messdatenverarbeitung, da dann in der Regel auch die Punktspreizfunktion rotationssymmetrisch ist.

3.2. Beugungseffekte an Ecken und Kanten

Wie bereits im 1. Abschnitt erwähnt, treten bei niedrigen Prüffrequenzen wie 24 GHz vermehrt Beugungserscheinungen an Ecken und Kanten auf. Diese Beugungseffekte können die Entdeckung von Störstellen erschweren. Besonders im randnahen Bereich werden Defekte oft durch die Beugungserscheinungen überlagert. Um diese

Problematik zu verdeutlichen, ist in der Abbildung 4 ein Scan einer 10 mm starken PE-Platte mit verschiedenen Bohrungen dargestellt.

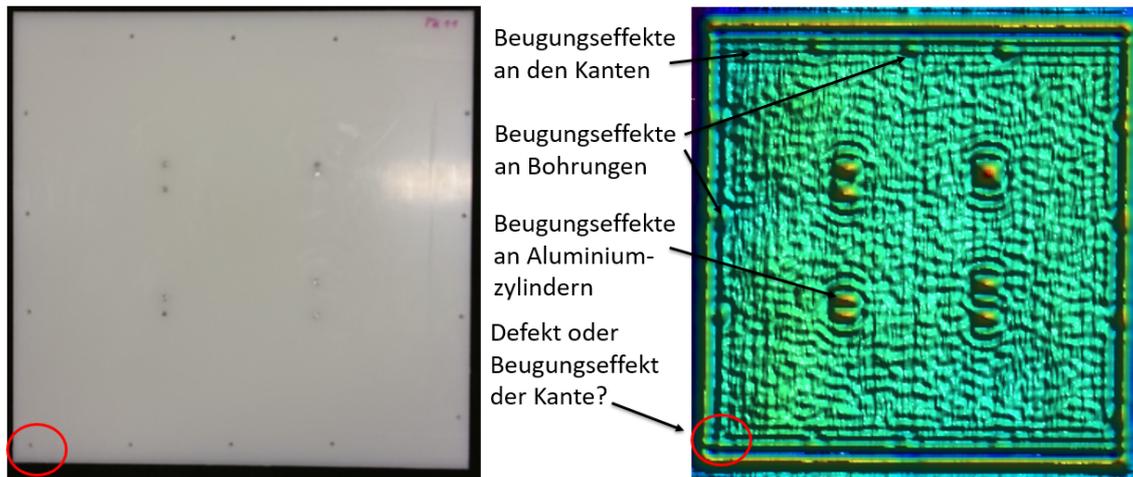


Abbildung 4: Falschfarbendarstellung des Scans einer 10 mm starken PE-Platte, die verschiedene Bohrungen sowie vier Aluminiumstifte mit 3 mm Durchmesser enthält.

Wenn wir die Beugung an Kanten betrachten, sprechen wir von einer aus der Optik bekannten Fresnel-Beugung an einem Spalt mit nur einer Kante. Aber auch Beugungsercheinungen an kleinen Störstellen, wie z.B. Bohrungen, können mit der Beugung an einem Spalt beschrieben werden. Laut der Beugungstheorie haben zwei komplementäre Strukturen das gleiche Beugungsbild [10]. Nach dem Huygensschen Prinzip ist jeder nicht abgeschirmte Punkt, einer Wellenfront zu einem bestimmten Zeitpunkt der Ausgangspunkt einer neuen kugel- bzw. kreisförmigen sekundären Elementarwelle. In Abbildung 5 ist dieses Prinzip beispielhaft für die Reflexion an einem Punkt der Kante dargestellt.

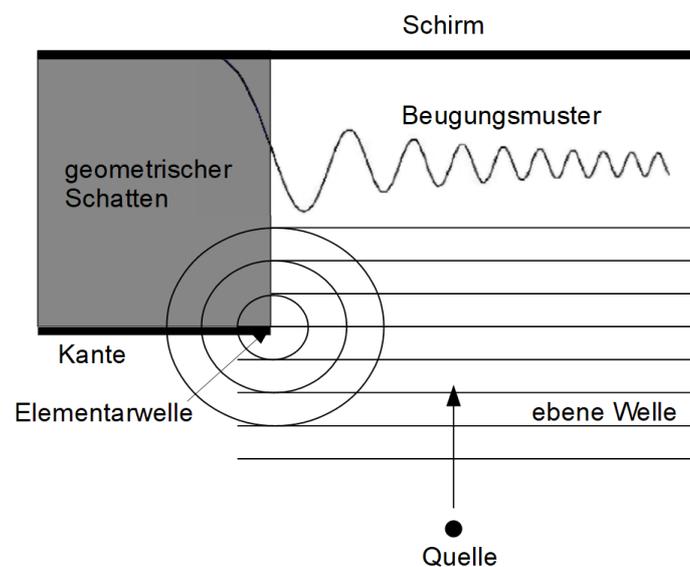


Abbildung 5: Beugung an einer Kante.

Die Elementarwellen breiten sich im selben Ausbreitungsmedium mit der gleichen Geschwindigkeit und Frequenz aus wie die Ausgangswelle. Aus der Überlagerung sämtlicher Elementarwellen unter Berücksichtigung der Amplituden und Phasen ergibt sich eine äußere Einhüllende, die die neue Wellenfront darstellt [10]. Da die Elementarwellen eine Kugel- bzw. Kreisform aufweisen, können sie auch in den geometrischen Schatten eines Hindernisses eindringen. Außerdem bildet sich neben der Welle, die sich in Ausbreitungsrichtung ausbreitet, auch eine zurücklaufende Welle. Deswegen ist ein entsprechendes Beugungsmuster auch in Richtung der Signalquelle detektierbar.

4. Theoretische Grundlagen

4.1. Mikrowellen

In der Mikrowellen-Defektoskopie wird, wie der Name schon sagt, mit Mikrowellen gearbeitet. Mikrowellen sind elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz (siehe Abbildung 6) [11].

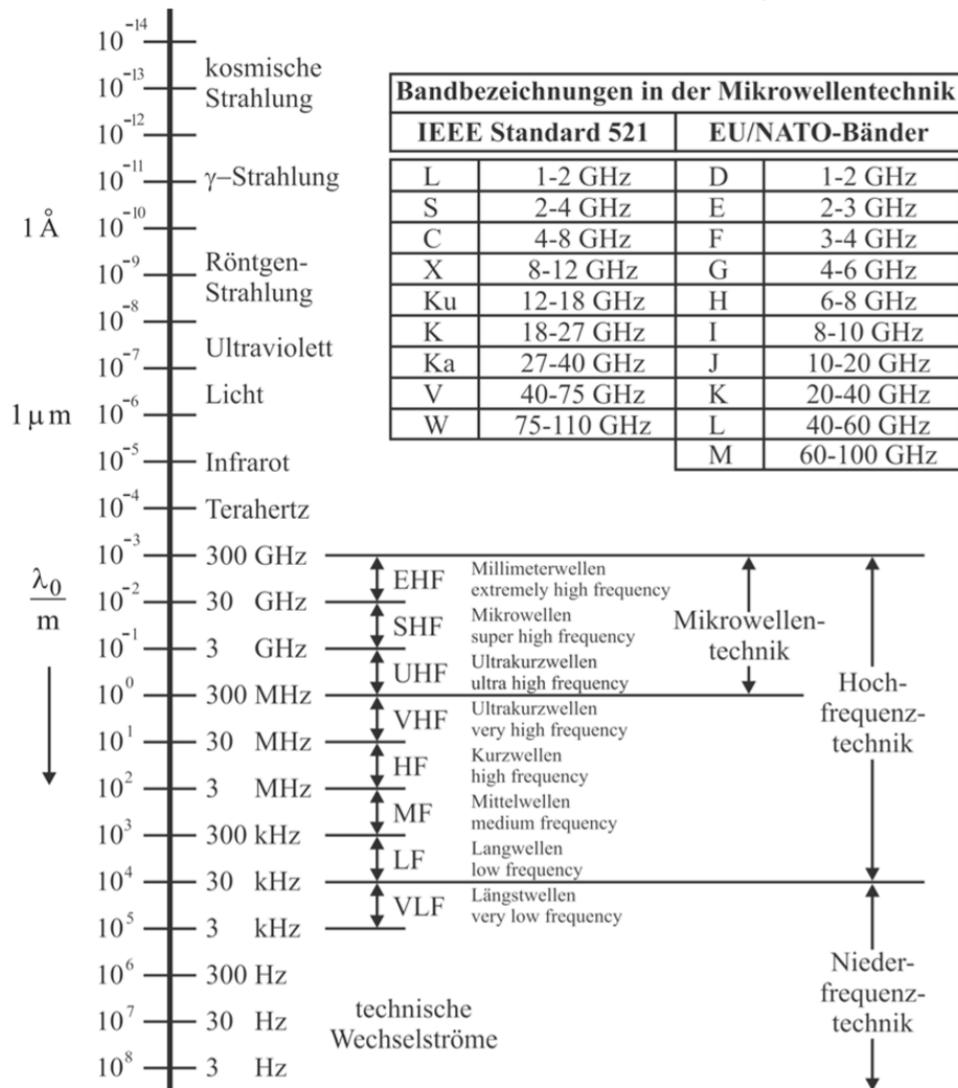


Abbildung 6: Spektrum elektromagnetischer Wellen und deren gebräuchliche Bezeichnungen [11].

Die für diese Arbeit gewählte Prüffrequenz von 24 GHz gehört zu den ISM-Frequenzen (Industrial, Scientific and Medical Band), welche lizenzfrei genutzt werden können. Sie befindet sich innerhalb des als K-Band bezeichneten Frequenzbandes.

4.2. Wellenausbreitung

Um die physikalischen Hintergründe für die Ausbreitung der Mikrowellen in den Hohlleiterantennen sowie die Reflexion der Mikrowellen an Grenzflächen unterschiedlicher Permittivität zu verstehen, werden zunächst ein paar Grundlagen der elektromagnetischen Feldtheorie dargestellt. Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen lässt sich mit Hilfe der Maxwellschen Gleichungen, genauer dem Induktions- und Durchflutungsgesetz, sowie der zwei Materialgleichungen beschreiben.

Dabei beschreibt das Durchflutungsgesetz

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad , \quad (\text{Gleichung 1})$$

dass elektrische Ströme zu einem magnetischen Wirbelfeld führen.

Das Induktionsgesetz

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Gleichung 2})$$

sagt aus, dass Änderungen des magnetischen Feldes zu einem elektrischen Wirbelfeld führen.

Die beiden Materialgleichungen für ruhende, lineare und isotrope Medien beschreiben die elektrische Flussdichte \vec{D}

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{Gleichung 3})$$

und magnetische Flussdichte \vec{B}

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad . \quad (\text{Gleichung 4})$$

Die aus diesen Gleichungen herleitbaren Wellengleichungen für die Ausbreitung in einem homogenen Medium mit $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ lauten

$$\Delta \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \kappa \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (\text{Gleichung 5})$$

für den elektrischen Feldstärkevektor und

$$\Delta \vec{B} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \mu \kappa \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad . \quad (\text{Gleichung 6})$$

für das B-Feld. Wobei κ die elektrische Leitfähigkeit repräsentiert. Diese zwei Gleichungen werden Telegrafengleichungen genannt, da sie in der Theorie der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen längs von Drähten eine Rolle spielen [11 S.45].

Bei der Ausbreitung der Wellen in einem nicht leitenden Stoff ($\kappa = 0$), wie zum Beispiel den später vorgestellten Probekörpern aus Polyethylen, können die Telegrafengleichungen zu den Wellengleichungen

$$\Delta \vec{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Gleichung 7})$$

$$\Delta \vec{B} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{Gleichung 8})$$

vereinfacht werden [11 S.46].

Bei linearen Vorgängen kann man alle Feldgrößen aufgrund des Superpositionsprinzips durch Fourier-Reihen oder Fourier-Integrale darstellen. Wenn alle Feldgrößen wie $\cos(\omega t)$ zeitabhängig sind, sind sie in komplexer Schreibweise proportional zu $e^{j\omega t}$ und es kann $\partial/\partial t \equiv j\omega$ gesetzt werden. Die Maxwell'schen Gleichungen lauten dann im Frequenzbereich

$$\text{rot } \vec{H} = j \omega \vec{D} + \vec{J} \quad (\text{Gleichung 9})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -j \omega \vec{B} \quad (\text{Gleichung 10})$$

und die Telegrafengleichungen lauteten

$$\Delta \vec{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \vec{E} - j \omega \mu \kappa \vec{E} = 0 \quad (\text{Gleichung 11})$$

$$\Delta \vec{B} + \omega^2 \mu \varepsilon \vec{B} - j \omega \mu \kappa \vec{B} = 0 \quad (\text{Gleichung 12})$$

[11 S.47].

Die elektromagnetischen Eigenschaften eines Materials werden durch die Materialkonstanten Permittivität ε , Permeabilität μ und die elektrische Leitfähigkeit κ vollständig abgebildet. Dabei beschreibt die Permittivität die Durchlässigkeit des Materials für elektrische und die Permeabilität für magnetische Felder. Diese Materialkonstanten ε und μ setzen sich aus der jeweiligen Feldkonstante für den freien Raum μ_0 bzw. ε_0 und einem materialabhängigen, relativen Faktor μ_r bzw. ε_r zusammen.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (\text{Gleichung 13})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (\text{Gleichung 14})$$

Die Mikrowellen-Defektoskopie nutzt den Umstand, dass Defekte in einem homogenen Material meist eine abweichende relative Permittivität aufweisen und stellt diese örtlichen Unterschiede bildlich dar.

In realen Medien treten Verluste auf, welche ein Maß für die Dämpfung der Welle innerhalb eines Mediums sind. Sie werden hauptsächlich durch die elektrische Leitfähigkeit des Mediums und durch Polarisationsmechanismen innerhalb des Mediums verursacht. Um die Verluste abzubilden werden daher die komplexe Permittivität $\underline{\epsilon}$ und der dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$

$$\underline{\epsilon} = \epsilon \left(1 + \frac{\kappa}{j \omega \epsilon} \right) = \epsilon (1 - \tan \delta) \quad (\text{Gleichung 15})$$

eingeführt, die die im Medium auftretenden Verluste zusammenfassen [11 S.47]. Das in dieser Arbeit genutzte Material Polyethylen (PE) ist ein nicht magnetisches, dielektrisches Material mit einer Permittivität von ca. 2,35 und einem Verlustfaktor von ca. $9,4 \cdot 10^{-3}$ (Siehe Anhang A.1.). Diese Werte können nicht exakt angegeben werden, da sie sowohl vom Herstellungsprozess des Materials als auch von der Temperatur und der Signalfrequenz abhängig sind. Die Permeabilität von PE ist $\mu_r \approx 1$ und daher nicht weiter relevant.

Der einfachste Fall der Wellenausbreitung ist der Fall einer sich gradlinig in Z-Richtung ausbreitenden transversalen ebenen Welle in einem unbegrenzten, quellenfreien und ruhenden Medium. Diese Wellenform weist quer zu Ihrer Ausbreitungsrichtung keine Feldabhängigkeit auf.

Die Lösung der Wellengleichung lautet in diesem Fall

$$E_x(z) = E_{x,h} e^{-\gamma z} + E_{x,r} e^{\gamma z} \quad (\text{Gleichung 16})$$

und

$$H_y(z) = H_{y,h} e^{-\gamma z} + H_{y,r} e^{\gamma z} \quad (\text{Gleichung 17})$$

[11 S.66].

Die Welle breitet sich dabei mit der komplexen Ausbreitungskonstante

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{-\omega^2 \mu \epsilon' + j \omega \mu \kappa} \quad (\text{Gleichung 18})$$

aus [11 S.66]. Dabei gibt Dämpfungskonstante α , die Amplitudenabnahme der Welle und die Phasenkonstante β , die Phasenänderung der Welle in Ausbreitungsrichtung an.

Die Ausbreitungskonstante lässt sich in ihren Real- und Imaginärteil zerlegen. Man erhält für die Phasenkonstante β mit der Wellenzahl $k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$ im verlustbehaftetem Fall

$$\beta = \frac{k}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\kappa^2}{\omega^2 \varepsilon^2}}} \quad , \quad (\text{Gleichung 19})$$

die im verlustfreiem Fall gleich der Wellenzahl

$$\beta = k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{Gleichung 20})$$

wird.

Die Dämpfungskonstante α berechnet sich für den verlustbehafteten Fall nach

$$\alpha = \frac{k}{\sqrt{2}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{\kappa^2}{\omega^2 \varepsilon^2}}} \quad (\text{Gleichung 21})$$

und wird im verlustfreien Fall zu $\alpha = 0$ [11 S.67+]. In der Wellenzahl k steckt die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung, welche erklärt, dass die Wellen bei höheren Frequenzen eine stärkere Dämpfung erfahren und so eine geringere Eindringtiefe erreichen. Aus dem Verhältnis der komplexen Amplituden der elektrischen und magnetischen Querfeldstärken der hin- und rücklaufenden Wellen folgt die Feldwellenimpedanz für den verlustbehafteten Fall

$$Z_F = \frac{E_{x,h}}{H_{y,h}} = -\frac{E_{x,r}}{H_{y,r}} = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}}{\sqrt{1 - j\frac{\kappa}{\omega\varepsilon}}} \quad , \quad (\text{Gleichung 22})$$

die sich für den verlustfreien Fall zu

$$Z_F = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{Gleichung 23})$$

vereinfacht [11 S.66]. Die in der Mikrowellen-Defektoskopie ausgenutzten Reflexionen der Mikrowellen treten an Grenzflächen unterschiedlicher Feldwellenimpedanzen auf.

Für den freien Raum ergibt sich aus Gleichung 23 eine Freiraumimpedanz, von

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377 \, \Omega \quad . \quad (\text{Gleichung 24})$$

In der Abbildung 7 ist ein Prinzipbild einer transversale elektromagnetische Welle (kurz TEM-Welle) abgebildet.

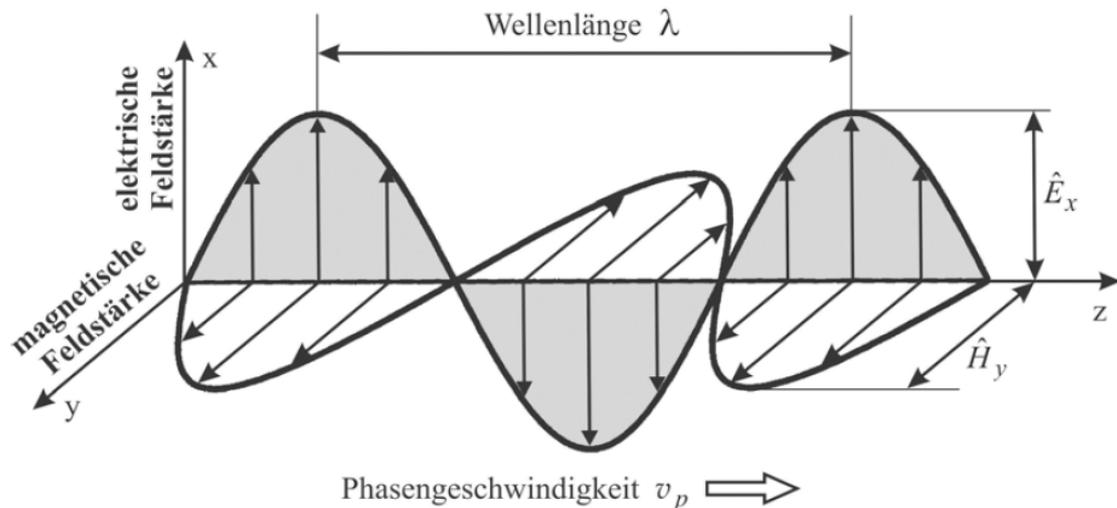


Abbildung 7: Ortsdarstellung der Felder einer TEM-Welle zu einem festen Zeitpunkt [11]

Sie besteht aus sich zeitlich ändernden, elektrischen und magnetischen Feldern, deren Feldvektoren \vec{E} und \vec{H} im Fernfeld senkrecht zueinander stehen.

Die Welle breitet sich ihrerseits senkrecht zu den Feldvektoren in Z-Richtung aus.

$$\vec{Z} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{Gleichung 25})$$

Anders als zum Beispiel Schallwellen, benötigen elektromagnetische Wellen kein Medium um sich auszubreiten. Diese feste Relation der Felder zueinander gilt nur im Fernfeld, wo die Abstände gegenüber der Wellenlänge und der Querabmessung der Sendean-
tenne D_E groß sind. In der Abbildung 8 sind die einzelnen Feldbereiche dargestellt.

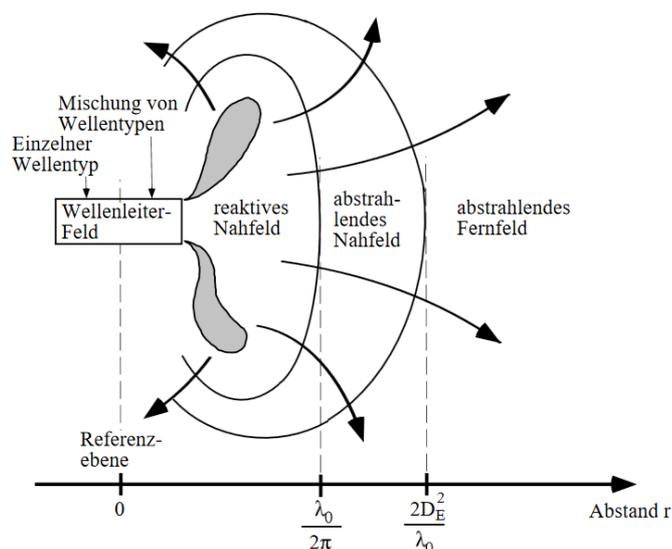


Abbildung 8: Feldregionen einer Antenne [12].

Im Fernfeld sind die elektrische und magnetische Feldkomponente in Phase und über den Feldwellenwiderstand des freien Raums $Z_0 \approx 377 \Omega$ miteinander verknüpft. So kann aus einem gemessenen elektrischen Feld rechnerisch auf das magnetische Feld geschlossen werden und umgekehrt. Für das Fernfeld reicht die Betrachtung der phasenrichtigen Summe der einzelnen Strahlen. Dadurch vereinfachen sich Berechnungen für das Fernfeld stark. In der Literatur werden theoretische Betrachtungen außerdem oft dahingehend vereinfacht, dass von ebenen Wellen im weit entfernten Fernfeld ausgegangen wird. Die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen wurden mit nur 4 mm Abstand zwischen der Antenne und der Oberfläche des Probekörpers durchgeführt. Darum können Vereinfachungen dieser Art hier nicht verwendet werden. Rein theoretische Betrachtungen der physikalischen Effekte sind daher sehr aufwändig und nicht zielführend. Stattdessen wurden Simulationen mit Finite-Elemente-Methode in COMSOL durchgeführt, um einige der Messergebnisse zu überprüfen.

Im Abschnitt 5.3.2. wird ein Phasenversatz zwischen der Defektbildmessung und der Hintergrundmessung beschrieben. Einer der Gründe für diesen Phasenversatz ist, dass sich die Wellen in unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen Wellenlängen ausbreiten. Um diesen physikalischen Zusammenhang zu erklären, betrachten wir zunächst die Phasengeschwindigkeit v_p einer Welle, die die Geschwindigkeit beschreibt, mit der sich ein Zustand konstanter Phase im Raum ausbreitet. Sie wird nach Gleichung 26 berechnet [11 S.69].

$$v_p = \pm \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad (\text{Gleichung 26})$$

Da die relative Permeabilität μ_r und Permittivität ϵ_r frequenzabhängig sind, breiten sich Wellen unterschiedlicher Frequenz in dispersiven Materialien mit unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten aus. In nicht-dispersiven Medien, wie dem Vakuum, ist die Phasengeschwindigkeit hingegen frequenzunabhängig.

Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder Wellentälern wird als Wellenlänge λ bezeichnet. Sie ist von der Phasengeschwindigkeit und der Frequenz abhängig.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v_p}{f} \quad (\text{Gleichung 27})$$

Im freien Raum ist die Phasengeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 299.792.458 \frac{m}{s} \quad (\text{Gleichung 28})$$

Unter Anwendung der Gleichung 29

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f}, \quad (\text{Gleichung 29})$$

ergibt sich bei einer Frequenz von $f = 24$ GHz eine Freiraumwellenlänge von $\lambda_0 \approx 12,5$ mm. Bei der Ausbreitung der elektromagnetischen Welle in einem Medium ändert sich die Phasengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Permeabilität μ und der Permittivität ε des Materials nach Gleichung 30 [13 S.29].

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}} \quad (\text{Gleichung 30})$$

Luft hat eine ähnliche magnetische und elektrische Leitfähigkeit wie das Vakuum. Darum sind sowohl μ_r als auch ε_r von Luft nahezu eins und die Wellenlänge für die Ausbreitung in Luft kann der Freiraumwellenlänge λ_0 gleichgesetzt werden. Für die Ausbreitung im Kunststoff Polyethylen (PE) mit einem $\mu_r \approx 1$ und $\varepsilon_r \approx 2,35$ ergibt sich bei $f = 24$ GHz mit $\lambda \approx 8,15$ mm eine kürzere Wellenlänge.

4.3. Reflexion an Stellen unterschiedlicher Permittivität

In dieser Arbeit nutzen wir das Reflexionsverfahren. Im einfachsten Fall trifft dabei eine ebene elektromagnetische Welle senkrecht auf eine Trennfläche und spaltet sich in einen reflektierten und in einen transmittierten Anteil auf (Abbildung 9).

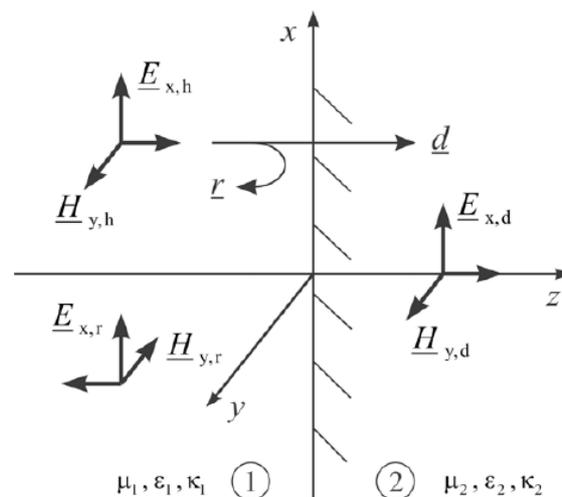


Abbildung 9: Senkrechter Einfall einer vertikal polarisierten TEM-Welle auf eine ebene Trennfläche [11].

Der jeweilige Anteil ist von der Feldwellenimpedanz Z des jeweiligen Mediums abhängig, der sich wiederum aus den Materialkonstanten Permeabilität und Permittivität berechnet. Für verlustfreie Medien gilt die Gleichung 31.

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{Gleichung 31})$$

Um den reflektierten und den transmittierten Anteil zu berechnen, führt man einen Reflexionsfaktor r und einen Durchlassfaktor d ein, welche sich aus dem Verhältnis der Feldwellenimpedanzen beider Medien ergeben.

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (\text{Gleichung 32})$$

$$d = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (\text{Gleichung 33})$$

Der Feldansatz für die hin- und rücklaufenden Wellen in Abbildung 9 ist in den Gleichungen 34 bis 37 angegeben [11 S.109].

$$E_1 = e_x E_0 (e^{-\gamma_1 z} + r e^{\gamma_1 z}) \quad (\text{Gleichung 34})$$

$$E_2 = e_x E_0 d e^{-\gamma_2 z} \quad (\text{Gleichung 35})$$

$$H_1 = e_y \frac{E_0}{Z_1} (e^{-\gamma_1 z} - r e^{\gamma_1 z}) \quad (\text{Gleichung 36})$$

$$H_2 = e_y \frac{E_0}{Z_1} d e^{-\gamma_2 z} \quad (\text{Gleichung 37})$$

In den praktischen Messungen treffen die Wellen natürlich nicht nur senkrecht auf die Trennflächen auf. Die Wellen sind im Nahfeld auch nicht eben. Für den praktischen Fall wäre die theoretische Betrachtung viel komplizierter. Daher wird an dieser Stelle auf eine genauere theoretische Betrachtung verzichtet. Dieser Abschnitt stellt lediglich eine grundlegende Beschreibung des den Reflexionen zugrunde liegenden physikalischen Prinzips dar.

4.4. Der Hohlleiter

Die im Kapitel 5.2. beschriebenen Antennen sind Hohlleiterantennen. Daher folgt in diesem Kapitel eine Beschreibung der Wellenausbreitung innerhalb eines Hohlleiters sowie eine Erklärung zur Wahl der Größenverhältnisse der für die Experimente genutzten Hohlleiter.

Hohlleiter sind Wellenleiter für elektromagnetische Wellen. Sie stellen Einleitersysteme, dar, die aus einem Metallrohr mit gleichbleibendem Querschnitt bestehen. Sie werden hauptsächlich für Frequenzen von 1 GHz bis 200 GHz eingesetzt. Wie in Abbildung 10 dargestellt, sind unterschiedliche Querschnittsformen im Gebrauch.

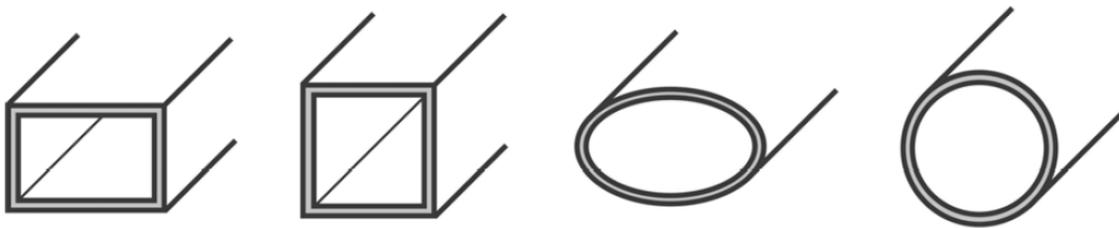


Abbildung 10: Hohlleiterformen [11].

In Hohlleitern sind nur Wellen oberhalb einer unteren Frequenzgrenze, die auch als cutoff-Frequenz f_c bezeichnet wird, ausbreitungsfähig. Ein Hohlleiter hat also die Übertragungseigenschaften eines Hochpasses. Die untere Grenzfrequenz hängt von den Querschnittsabmessungen des Hohlleiters und von der Permittivität ε eines eventuell im Hohlleiter vorhandenen Dielektrikums ab. In der Praxis werden häufig Rechteckhohlleiter eingesetzt bei denen $a \geq 2b$ ist, wie in Abbildung 11 dargestellt. Diese Art der Hohlleiter wurde daher auch in den Experimenten dieser Arbeit verwendet.

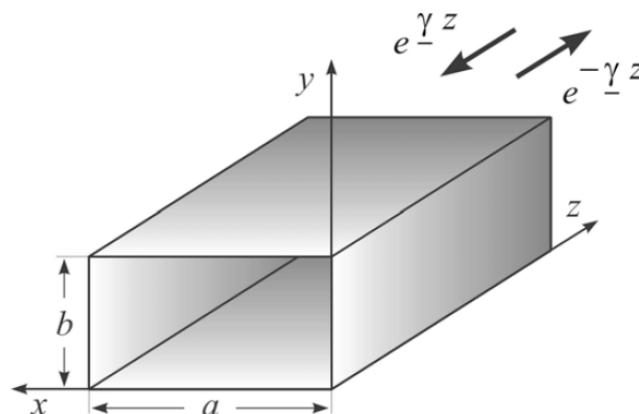


Abbildung 11: Homogener, verlustloser Rechteckhohlleiter mit kartesischem Koordinatensystem [11].

In einem Hohlleiter können zwei verschiedene Wellentypen angeregt werden. Diese werden in E- und H-Wellen unterteilt.

Bei E-Wellen, die auch als transversale magnetische Wellen (TM-Wellen) bezeichnet werden, zeigt die elektrische Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung. Die magnetischen Feldlinien liegen immer nur quer zur Ausbreitungsrichtung ($H_z = 0$).

H-Wellen sind durch magnetische Feldstärkekomponenten in Ausbreitungsrichtung gekennzeichnet. Die elektrischen Feldlinien liegen immer quer zur Ausbreitungsrichtung ($E_z = 0$). H-Wellen werden auch als transversale elektrische Wellen (TE-Wellen) bezeichnet. In Abbildung 12 ist die $H_{(1,0)}$ -Welle dargestellt. Das Beugungsmuster zeichnet sich am deutlichsten ab, wenn das E-Feld orthogonal zur Kante des Permittivitäts-sprungs ausgerichtet ist. Daher ist es für diese Arbeit wichtig zu wissen, dass die E-Feld-Linien der Grundwelle im Hohlleiter parallel zur schmalen Hohlleiterseite ausgerichtet sind, wie die Abbildung zeigt.

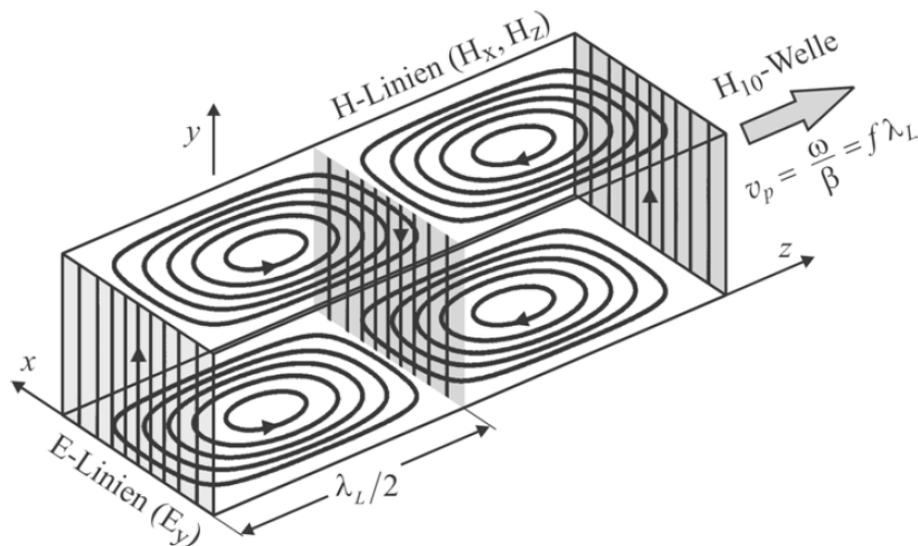


Abbildung 12: Elektrische und magnetische Feldlinien der $H_{(1,0)}$ -Welle des Rechteckhohlleiters [11].

Außer der Unterscheidung in E- und H-Wellentypen sind wegen der Vielzahl der höheren Wellentypen weitere „Sortier-Kennzeichnungen“ erforderlich. Dazu werden die Indizes m und n verwendet. Die Modenindizes beschreiben die elektrischen bzw. magnetischen Feldbilder in der Querschnittsebene des Hohlleiters. Sie beziehen sich auf die Anzahl der Maxima bzw. auf die Anzahl der Nullstellen im Hohlleiterquerschnitt. Dabei wird sich bei $E_{(m,n)}$ -Wellen auf das elektrische Feld und $H_{(m,n)}$ -Wellen auf das magnetische Feld bezogen [11 S.178]. Die Abbildung 13 zeigt exemplarisch die transversalen Feldbilder verschiedener $H_{(m,n)}$ -Wellen und die Abbildung 14 verschiedener $E_{(m,n)}$ -Wellen

des Rechteckhohlleiters. Die $H_{(1,0)}$ -Welle ist die Wellenmode mit der niedrigsten cut-off-Frequenz. Sie wird daher auch als Grundwelle bezeichnet.

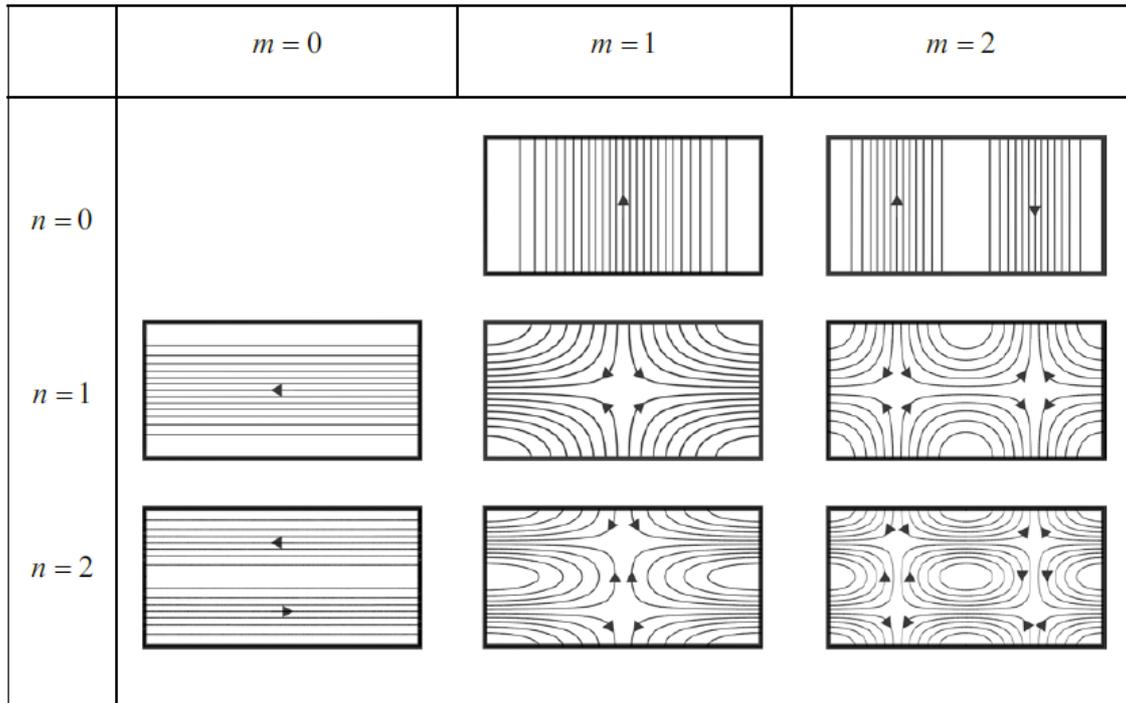


Abbildung 13: Darstellung des elektrischen Transversalfeldes von $H_{(m,n)}$ -Wellen im Rechteckhohlleiter [11].

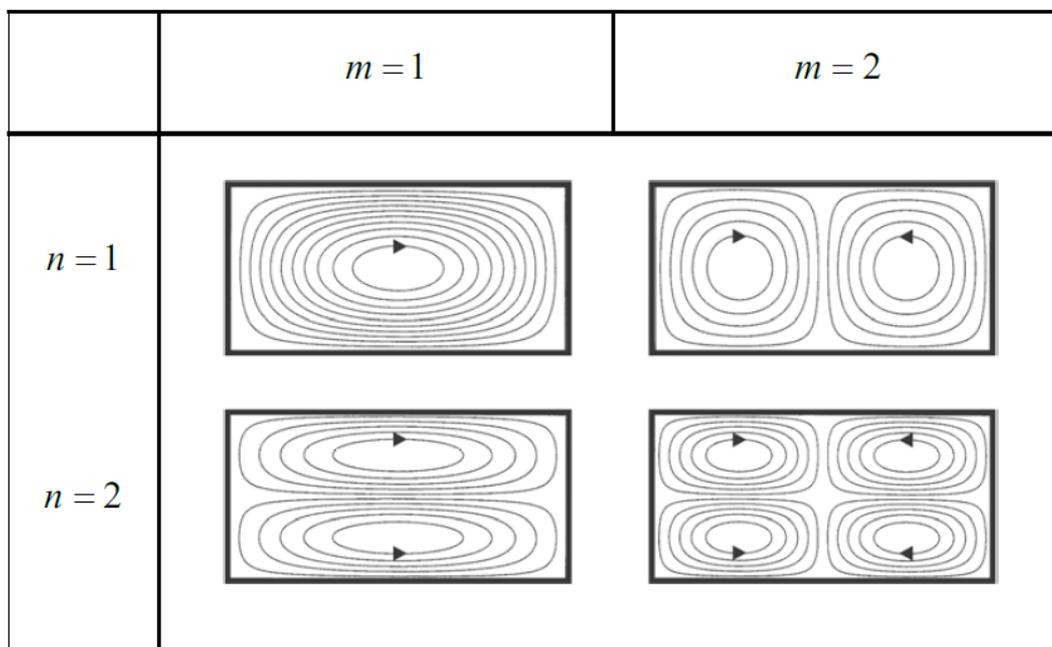


Abbildung 14: Darstellung des magnetischen Transversalfeldes von $E_{(m,n)}$ -Wellen im Rechteckhohlleiter [11].

Die $H_{(1,0)}$ -Welle breitet sich mit der Ausbreitungskonstante

$$\gamma = j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(1,0)}}{f}\right)^2} \quad (\text{Gleichung 38})$$

in Richtung der Z-Achse aus.

Die cutoff-Frequenz der Grundmode eines solchen mit Luft gefüllten Hohlleiters berechnet sich nach Gleichung 39.

$$f_{c(1,0)} = \frac{c}{2 \cdot a} \quad (\text{Gleichung 39})$$

Liegt die Betriebsfrequenz des Hohlleiters oberhalb der cutoff-Frequenz der $H_{(1,0)}$ -Welle aber unterhalb der Grenzfrequenz aller möglichen höheren Wellentypen, breitet sich nur die Grundmode aus und man spricht vom Betrieb im eindeutigen Bereich. In der Praxis wird für den eindeutigen Betrieb ein Sicherheitsabstand von $f_{\min} = 1,25 \cdot f_{c(1,0)} < f < 1,9 \cdot f_{c(1,0)} = f_{\max}$ eingehalten [11 S.188].

Die Übertragungsfrequenzen werden in unterschiedliche Frequenzbänder eingeteilt. Aus Abbildung 6 ist zu entnehmen, dass für die in dieser Arbeit verwendete Prüffrequenz von 24 GHz ein K-Band Hohlleiter vom Typ WR-42 notwendig ist. Die Maße eines WR-42-Hohlleiters sind mit $a = 10,668$ mm und $b = 4,318$ mm genormt. Der in dieser Arbeit eingesetzte Hohlleiter hatte mit $a = 10,54$ mm und $b = 4,12$ mm allerdings leicht abweichende Innenmaße. Seine cutoff-Frequenz liegt demnach bei $f_{c(1,0)} \approx 14,23$ GHz.

Die Frequenz, ab der eine bestimmte höhere Mode im Rechteckhohlleiter ausbreitungsfähig ist, kann mit der Gleichung 40 berechnet werden [11 S.188].

$$f_{c(m,n)} = \frac{c}{\lambda_{c(m,n)}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{2 \cdot a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2 \cdot b}\right)^2} \quad (\text{Gleichung 40})$$

Für Frequenzen oberhalb der cutoff-Frequenz breitet sich die jeweilige Welle ungedämpft aus. Sie hat eine Hohlleiterwellenlänge von

$$\lambda_L = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(1,0)}}{f}\right)^2}} \quad (\text{Gleichung 41})$$

, eine Phasengeschwindigkeit von

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(1,0)}}{f}\right)^2}} > c \quad (\text{Gleichung 42})$$

und eine Gruppengeschwindigkeit von

$$v_g = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(1,0)}}{f}\right)^2} < c \quad (\text{Gleichung 43})$$

Für Frequenzen unterhalb der cutoff-Frequenz klingt die Welle exponentiell mit

$$\gamma = \alpha = \frac{2\pi f_{c(1,0)}}{c} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{c(1,0)}}\right)^2} \quad (\text{Gleichung 44})$$

in Ausbreitungsrichtung ab.

Die Spannungs- und Stromamplituden der hin- und rücklaufenden H-Wellen sind über den Feldwellenwiderstand

$$Z_F^H = \begin{cases} \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_{c(1,0)}}{f}\right)^2}} & \text{für } f > f_{c(1,0)} \\ j \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c(1,0)}}{f}\right)^2 - 1}} & \text{für } f < f_{c(1,0)} \end{cases} \quad (\text{Gleichung 45})$$

verknüpft [11 S.187].

Oberhalb der cutoff-Frequenz ist der Feldwellenwiderstand rein reell, unterhalb der cutoff-Frequenz ist er rein induktiv. Die exponentiell abklingenden Felder enthalten reine Blindleistung.

Wendet man die Gleichung 40 auf den in dieser Arbeit verwendeten W-42-Hohlleiter mit $a = 10,54$ mm und $b = 4,12$ mm an, ergeben sich für die Modenausbreitung in Luft die cutoff-Frequenzen $f_{c(1,0)} \approx 14,2$ GHz, $f_{c(2,0)} \approx 28,4$ GHz, $f_{c(0,1)} \approx 36,4$ GHz und $f_{c(1,1)} \approx 39,0$ GHz.

Für die Ausbreitung im Tapermaterial des Stielstrahlers PE mit ($\mu_r \approx 1$, $\epsilon_r \approx 2,35$) erhält man $f_{c(1,0)} \approx 9,3$ GHz, $f_{c(2,0)} \approx 18,6$ GHz, $f_{c(0,1)} \approx 23,7$ GHz und $f_{c(1,1)} \approx 25,6$ GHz.

Daraus lässt sich ableiten, dass sich der WR-42-Hohlleiter für eine Prüffrequenz von 24 GHz im eindeutigen Bereich betreiben lässt, sofern kein Dielektrikum in ihm vorhanden ist. Im Bereich des Tapereinsatzes aus PE für den Stielstrahler können sich theoretisch neben der Grundwelle noch die $H_{(2,0)}$ -Welle und eventuell auch noch die $H_{(0,1)}$ -Welle ausbreiten. Diese höheren Moden erfahren im Bereich des Koaxial-Hohlleiterübergangs, in dem kein Tapermaterial eingebracht ist, eine exponentielle Dämpfung in Ausbreitungsrichtung mit $e^{-\alpha z}$, wobei sich die Dämpfungskonstante α nach Gleichung 44 berechnet.

4.5. Die Fourier-Transformation

Ein wichtiges, in dieser Arbeit genutztes Werkzeug der digitalen Bildverarbeitung ist die Fourier-Transformation. Mathematisch ist die n-dimensionale Fourier-Transformierte $F(u)$ der Funktion $f(x)$ durch

$$F(u) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) e^{-iu \cdot x} dx \quad (\text{Gleichung 46})$$

definiert. Die sogenannte Umkehrformel zur inversen Fourier-Transformation lautet

$$f(x) = \frac{1}{2\pi^n} \int_{\mathbb{R}^n} F(u) e^{-iu \cdot x} du \quad (\text{Gleichung 47})$$

Bezogen auf die Bildverarbeitung ist ein $f(x,y)$ ein Bild, das sich aus Grauwerten in jedem einzelnen Bildpunkt, den sogenannten Pixeln, zusammensetzt. Durch die Anwendung der Fourier-Transformierten wird das Bild nicht mehr durch einzelne Grauwerte, sondern durch die Überlagerung periodischer Grauwertschwankungen beschrieben [14]. Die Abbildung 15 zeigt zur Veranschaulichung auf der linken Seite ein Grauwertbild mit einem Rechteck. Das Bild in der Mitte ist die mit dem Logarithmus zur Basis zehn skalierte Magnitude der Fourier-Transformierten $F(u,v)$. Das Bild auf der rechten Seite beinhaltet die Phaseninformationen von $F(u,v)$. Man sieht, dass das Frequenzmuster unabhängig von der Position des Rechtecks im Zeitbereich in der Mitte des Magnitudenbildes liegt. Das liegt daran, dass Informationen zur Position des Rechtecks im Phasenbild enthalten sind. Dieser Umstand wird in der Bildverarbeitung oft ausgenutzt, denn man kann über eine gezielte Manipulation der Magnitude das Bild an jedem Punkt unabhängig von deren Position beeinflussen. Eine anschauliche Erklärung der verschiedenen Manipulationsmöglichkeiten findet sich auf der ImageMagick-Webseite [15].

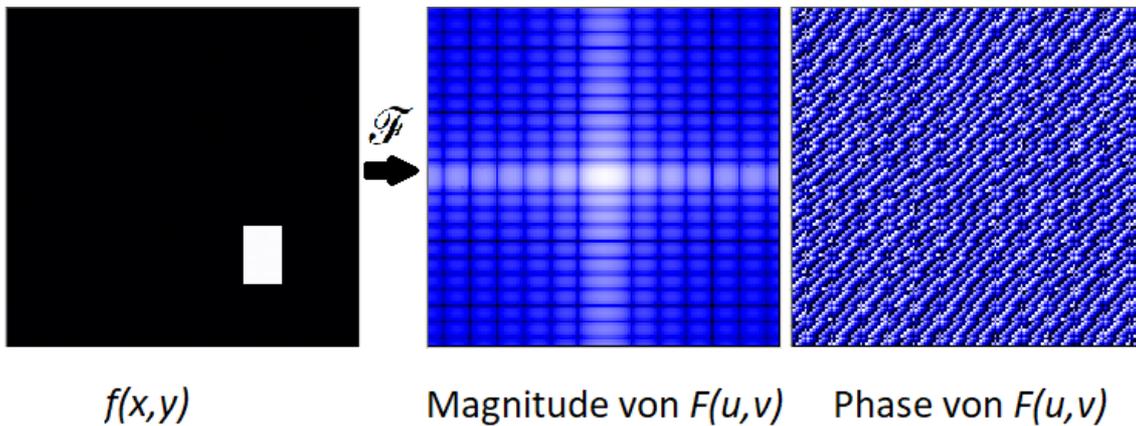


Abbildung 15: links: Bild $f(x,y)$ im Zeitbereich, Mitte: mit \log_{10} skalierte Magnitude von $F(u,v)$, rechts: Phasenwinkel von $F(u,v)$.

Die Fourier-Transformierten $F(u,v)$ sind komplexe Zahlen der Form $z = a + jb$. Die Magnituden-Werte sind die jeweiligen Absolutwerte $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ und die Phasenwinkel werden mit $\varphi = \arctan2(b/a)$ berechnet.

Für die effektive Berechnung der Fourier-Transformierten für diskrete Funktionen hat sich ein Algorithmus durchgesetzt, der sich schnelle Fourier-Transformation (engl. Fast Fourier transform) nennt und mit FFT abgekürzt wird. Die Umkehrfunktion zur FFT ist die inverse schnelle Fourier-Transformation, die mit IFFT abgekürzt wird. Diese Funktionen werden auch in dieser Arbeit genutzt, um die Defektbilder vom Zeit- in den Frequenzbereich und zurück zu überführen.

4.6. Der Faltungsoperator

Die Verschlechterung der Bildqualität einer praktischen Messung entspricht mathematisch einer Faltung des störungsfreien Bildes mit einer Punktspreizfunktion. Der Begriff Faltung (engl. Convolution) stammt vom lateinischen Begriff „convolare“ ab, welcher soviel wie „sich winden, zusammenrollen“ bedeutet. In der Mathematik ist das Faltungsprodukt $f(x)*g(x)$ zweier Funktionen $f(x), g(x):\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{C}$ als

$$h(x) = (f * g)(x) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x-x')g(x')dx' \quad (\text{Gleichung 48})$$

definiert [14]. Anschaulich ausgedrückt ist $h(x)$ der gewichtete Mittelwert von $f(x)$, wobei die Gewichtung durch $g(x)$ gegeben ist.

Der Faltungssatz besagt, dass die Faltung im Zeitbereich einer Multiplikation im Frequenzbereich entspricht [14].

So kann die Faltung zweier Funktionen $f(x,y)$ und $g(x,y)$ im Zeitbereich $h(x,y)=(f*g)(x,y)$, (Gleichung 49)

im Frequenzbereich durch ein Produkt ihrer Fourier-Transformierten ersetzt werden,

$$H(u,v)=G(u,v)\cdot F(u,v) \text{ ,} \quad (\text{Gleichung 50})$$

welches einfacher zu berechnen ist. Die Fourier-Transformierten $\mathcal{F}[f]$ der Funktionen werden nachfolgend als $\mathcal{F}[f(x,y)] = F(u,v)$, $\mathcal{F}[h(x,y)] = H(u,v)$ und $\mathcal{F}[g(x,y)] = G(u,v)$ definiert.

4.7. Die Punktspreizfunktion

Die Punktspreizfunktion (PSF) beschreibt, wie ein Messsystem ein idealisiertes punktförmiges Objekt abbilden würde. In der PSF sind die Einflüsse der Antennenapertur sowie Abbildungsfehler und Beugungserscheinungen enthalten. Ist die PSF für ein Messzenario bekannt, können diese Einflüsse durch eine Entfaltung (engl. Deconvolution) von gestörtem Defektbild mit der PSF nachträglich aus der Messung entfernt werden. Auf diese Weise lässt sich theoretisch das tatsächlich gemessene Objekt rekonstruieren.

In der Abbildung 16 ist zur Veranschaulichung ein künstlich erzeugter Datensatz gezeigt. Auf der rechten Seite ist ein künstlich erzeugtes ideales Objektbild, das fortan mit $f(x,y)$ bezeichnet wird, zu sehen. Das Bild in der Mitte ist eine mithilfe einer exponentiell gedämpften Besselfunktion erster Art und ersten Grades erzeugte Punktspreizfunktion. Die Punktspreizfunktion wird künftig mit $g(x,y)$ bezeichnet. Das gestörte Objektbild auf der linken Seite, das künftig mit $h(x,y)$ bezeichnet wird, wurde durch die Faltung von $f(x,y)$ und $g(x,y)$ im Frequenzbereich nach Gleichung 50 erzeugt.

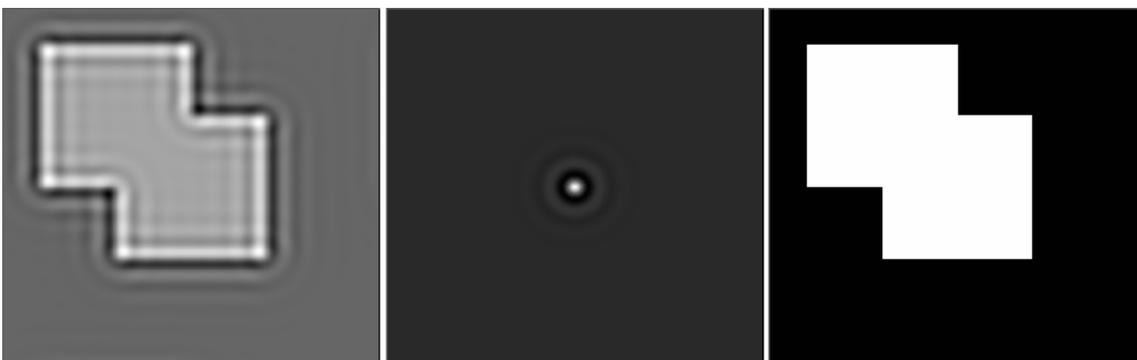


Abbildung 16: links: Defektbild $h(x,y)$, Mitte : PSF $g(x,y)$, rechts : ideales Objekt $f(x,y)$.

4.8. Modellierung des Prozesses der Verschlechterung der Bildqualität

In Abbildung 17 ist eine schematische Darstellung des Qualitätsverlustes beim Messvorgang sowie der Bildrestaurierung mit Hilfe einer nachträglichen Datenverarbeitung gezeigt. Die Verschlechterung der Qualität eines gemessenen Defektbildes $h(x,y)$ durch Beugungserscheinungen, Abbildungsfehler und der Apertureigenschaften der Antenne ist mathematisch gesehen eine Faltung der Funktion $f(x,y)$, die das Objekt ohne diese Störeinflüsse beschreibt, und einer Punktspreizfunktion des Messsystems $g(x,y)$, die die Systemantwort auf eine idealisierte Punktquelle repräsentiert.

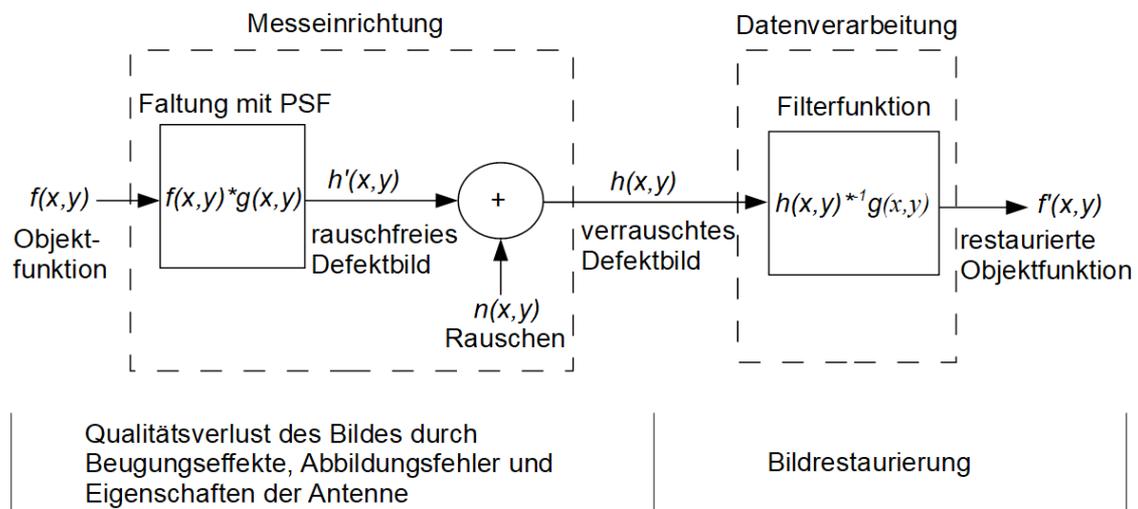


Abbildung 17: Modellierung des Prozesses der Verschlechterung der Bildqualität sowie der Bildrestaurierung.

Zusätzlich wird bei einer Messung noch ein Bildrauschen auftreten. Deswegen wird jedem Bildpunkt noch ein Rauschwert $n(x,y)$ hinzugefügt. Das vom Messsystem aufgezeichnete gestörte und verrauschte Bild wird somit im Zeitbereich als

$$h(x, y) = g(x, y) * f(x, y) + n(x, y) \quad (\text{Gleichung 51})$$

und im Frequenzbereich als

$$H(u, v) = G(u, v) \cdot F(u, v) + N(u, v) \quad (\text{Gleichung 52})$$

definiert. Wobei $\mathcal{F}[n(x, y)] = N(u, v)$ ist. Beim Rauschen $n(x,y)$ kann von einem additivem elektronischen Rauschen ausgegangen werden, welches sich durch eine Gaußverteilung beschreiben lässt [14 S.22]. Das Ziel der Filterfunktion in der Bildrestaurierung ist es, die originale Objektfunktion $f(x,y)$, die mit einer bekannten Punktspreizfunktion $g(x,y)$ gefaltet wurde, bestmöglich wiederherzustellen. Der Filter entfaltet das Defektbild $h(x,y)$ mit einer für das Messzenario passenden Punktspreizfunktion $g(x, y)$.

Dafür wird ein geeigneter Entfaltungsalgorithmus (engl. Deconvolution) verwendet, auf den in Abschnitt 4.9. näher eingegangen wird.

4.9. Vorstellung einiger geläufiger Entfaltungsalgorithmen

Bei der Entfaltung (eng. Deconvolution) handelt es sich um eine mathematische Transformation. Sie ist die Umkehrfunktion zur in Abschnitt 4.6. behandelten Faltung. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 18 dargestellt. Der Entfaltungsoperator wird in dieser Arbeit mit dem Zeichen $*^{-1}$ dargestellt. Eine Faltung zweier Funktionen ist immer möglich. Da bei der Faltung zweier Funktionen Informationen unwiederbringlich verloren gehen, ist die Entfaltung hingegen nicht immer möglich. Außerdem ist die Entfaltung ein schlecht konditioniertes Problem.

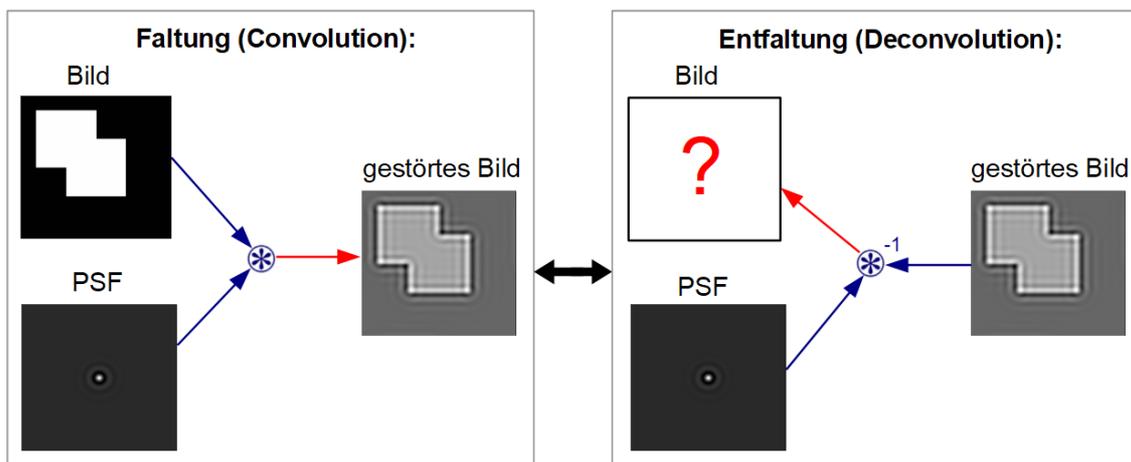


Abbildung 18: Zusammenhang zwischen Faltung und Entfaltung.

Das heißt, dass schon kleine Signaländerungen des Eingangssignals, zum Beispiel durch additives Rauschen, große Änderungen des Ausgangssignals bewirken. Um trotzdem eine möglichst gute inverse Faltung berechnen zu können, wurden im Bereich der Bildverarbeitung verschiedenste Algorithmen entwickelt. Dabei kann man grob zwischen direkten Verfahren, wie den Wiener-Filter und iterativen Verfahren, wie zum Beispiel der Van-Cittert-Entfaltung oder dem Richardson-Lucy Algorithmus, unterscheiden.

4.9.1. Der einfache inverse Filter

Wie im Abschnitt 4.6. bereits ausgeführt, lässt sich eine Faltung zweier Funktionen $g(x,y)$ und $f(x,y)$ im Frequenzbereich als einfache Multiplikation Ihrer Fourier-Transformierten nach Gleichung 50 darstellen. Somit lässt sich $F(u,v)$ prinzipiell mit

$$F(u, v) = \frac{H(u, v)}{G(u, v)} \quad (\text{Gleichung 53})$$

bestimmen. Dieser einfache Ansatz ist allerdings in der Regel nicht anwendbar, da die Funktion $f(x, y)$ nicht eindeutig sein muss. Außerdem kann $G(u, v)$ Nullstellen enthalten, was zu einer Division durch Null führen würde. Zusätzlich sind reale Daten, wie in Abschnitt 4.8. behandelt, meist mit einem additiven Rauschen $n(x, y)$ belegt, was das Problem zu

$$H(u, v) = G(u, v) \cdot F(u, v) + N(u, v) \quad \text{und damit zu}$$

$$F(u, v) = \frac{H(u, v)}{G(u, v)} - \frac{N(u, v)}{G(u, v)} \quad (\text{Gleichung 54})$$

verkompliziert. Bei der Entfaltung mit dieser Methode wird das Rauschen überproportional verstärkt, da $G(u, v)$ im Bereich der hohen Frequenzen üblicherweise gegen Null abfällt, während das Rauschen gerade auch dort Frequenzanteile enthält, die dann mit $1/G(u, v)$ verstärkt werden. Daher ist dieser Filter für die praktischen Messungen in dieser Arbeit nicht anwendbar. Ein Filter, der das Rauschproblem berücksichtigt, ist der Wiener-Filter, der in dieser Arbeit zur Anwendung kam.

4.9.2. Der Wiener Filter

Der Wiener-Filter versucht den Einfluss des Rauschens im Eingangssignal weitestgehend zu unterdrücken. Um das zu erreichen wird versucht, die mittlere quadratische Abweichung zwischen dem Originalbild und den restaurierten Bild zu minimieren.

$$e^2 = E[(f - f')^2] = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (f(x, y) - f'(x, y))^2 \quad (\text{Gleichung 55})$$

Der Ausdruck „ $E[\]$ “ repräsentiert dabei den „erwarteten Wert“.

Die Lösung für das Minimierungsproblem lautet

$$F'(u, v) = \left[\frac{G^*(u, v)}{|G(u, v)|^2 + L_n(u, v) / L_f(u, v)} \right] H(u, v) \quad (\text{Gleichung 56})$$

Dabei ist $G(u, v)$ wie bisher die Fourier-Transformierte der Punktpreisfunktion, $H(u, v)$ das gestörte und verrauschte Objektbild,

$$G^*(u, v) = \frac{|G(u, v)|^2}{G(u, v)} \quad (\text{Gleichung 57})$$

ist das konjugiert komplexe von $G(u, v)$, $L_n(u, v) = |N(u, v)|^2$ das Leistungsspektrum des Rauschens und $L_f(u, v) = |F(u, v)|^2$ als Leistungsspektrum der ungestörten Objektfunktion. Da das Leistungsspektrum der ungestörten Objektfunktion $F(u, v)$ unbekannt ist, wird der Ausdruck $L_n(u, v)/L_f(u, v)$ durch eine Konstante K ersetzt, die das geschätzte Verhältnis von der Rausch- zur Signalstärke repräsentiert. Damit erhalten wir in den eckigen Klammern der Gleichung 58 den Standardausdruck für den Wiener-Filter [14 S.26]

$$F'(u, v) = \left[\frac{G(u, v)^*}{|G(u, v)|^2 + K} \right] H(u, v) \quad . \quad (\text{Gleichung 58})$$

Der Wiener-Filter vermeidet eine Verstärkung des Rauschens in den hochfrequenten Bereichen, in denen das Rauschen im Vergleich zum Messsignal $H(u, v)$ sehr groß ist ($L_n(u, v) \gg L_f(u, v)$), indem sich das Ergebnis für diese Frequenzbereiche auf $F'(u, v) \approx 0$ reduziert.

Für Frequenzen bei denen das Rauschen im Vergleich zum Signal klein ist ($L_n(u, v) \ll L_f(u, v)$), reduziert sich der Wiener Filter hingegen zu dem in der Gleichung 53 angegebenen einfachen inversen Filter

$$F'(u, v) = \frac{H(u, v)}{G(u, v)} \quad .$$

Die Wahl der Konstante K hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Entfaltung. Je kleiner K gewählt wird, desto mehr hochfrequente Signalanteile werden bei der Entfaltung berücksichtigt und desto stärker werden die durch das Rauschen erzeugten Artefakte im entfalteten Signal. Wählt man K allerdings zu groß, werden zu viele Frequenzanteile der PSF herausgefiltert und das Ergebnis der Entfaltung nähert sich immer mehr dem Eingangssignal $H(u, v)$ an.

5. Vorbereitung der Experimente

5.1. Definition von Messszenarien und Randbedingungen

In der Praxis gibt es eine Fülle von verschiedenen Messszenarien und eine praktisch unendliche Anzahl an möglichen Defektgeometrien. In dieser Arbeit werden die zu untersuchenden Defektgeometrien zunächst auf einfache zylindrische oder quaderförmige Defekte und ggf. Kombinationen von diesen Geometrien innerhalb von Platten aus Polyethylen eingeschränkt. Selbst mit dieser Einschränkung gibt es noch genügend Freiheitsgrade wie Durchmesser, Orientierung, Tiefenlage und Material der Defekte, wie Abbildung 19 verdeutlicht.

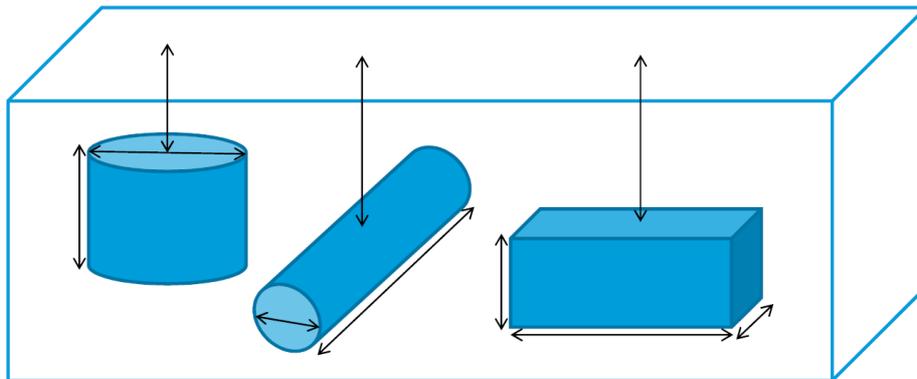


Abbildung 19: Skizze der verwendeten Zylinder- oder Quadergeometrien für die Defekte.

Eine weitere für die Messungen wichtige Größe ist der Abstand zwischen der Antenne und der Oberfläche des jeweiligen Probekörpers, nachfolgend Messabstand genannt. Für diese Arbeit wurde ein Messabstand von 4 mm gewählt. Auf diese Weise konnte ein gewisser Sicherheitsabstand für die Z-Achse der Messmaschine eingehalten werden. Gleichzeitig wird aber noch so nahe an der Antenne gemessen, dass der Strahlengang der Antenne noch nicht zu sehr aufgeweitet ist. Als Antennen werden ein offener K-Band Hohlleiter (WR-42) oder ein Stielstrahler verwendet, die im Abschnitt 5.2. näher beschrieben sind. Wobei für den Großteil der Messungen der offene K-Band Hohlleiter verwendet wurde. Die Messungen erfolgten an einem Drei-Achsen-Verfahrtisch in der Hochschule Magdeburg-Stendal, bei dem die Antenne mit konstantem Messabstand in einer gleichmäßigen Geschwindigkeit über einen der in den Abbildungen 20 bis 25 dargestellten Probekörper geführt wurde. Bei den für diese Arbeit genutzten Probekörpern handelt es sich zumeist um Platten aus Polyethylen mit einfachen Durchbohrungen

verschiedener Durchmesser, in die ein herausnehmbarer Einsatz aus Aluminium eingesetzt ist. Die Messfrequenz betrug 24 GHz.

PK6: 200x200x10 mm Platte mit einzelner 10 mm Lochbohrung
Plattenmaterial: Polyethylen

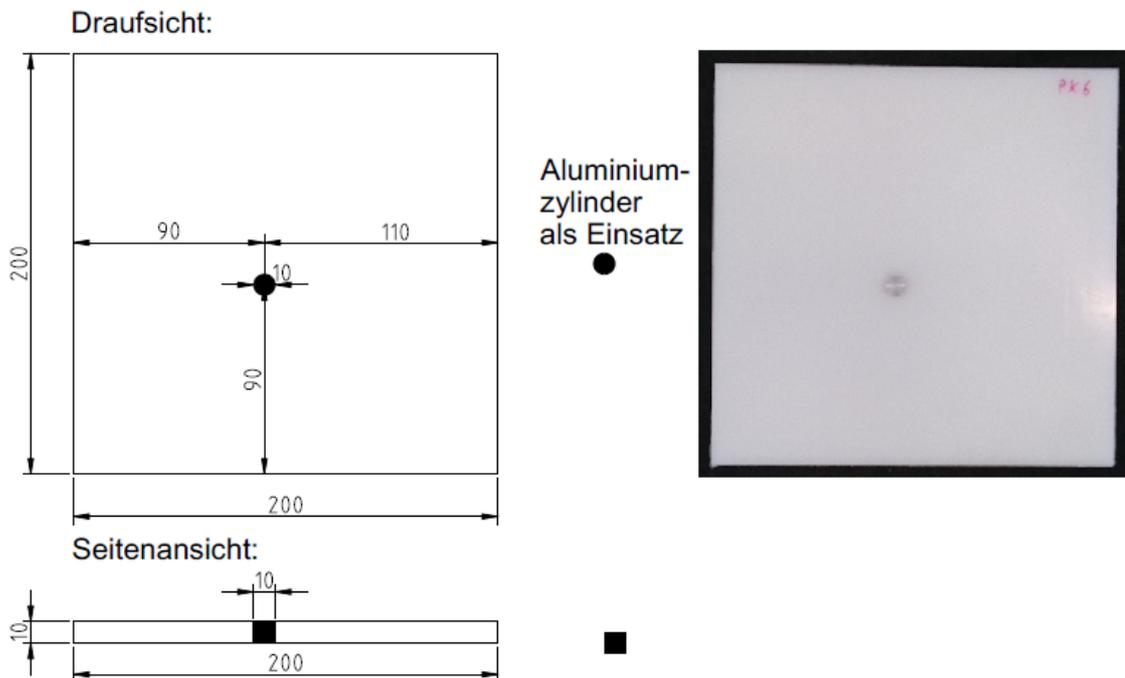


Abbildung 20: Probekörper 6 (PK6) 200x200x10 mm Polyethylen-Platte mit leicht versetzter Bohrung mit 10 mm Durchmesser und herausnehmbarem Aluminiumeinsatz.

PK8: 200x200x10 mm Platte mit einzelner 3 mm Lochbohrung
Plattenmaterial: Polyethylen

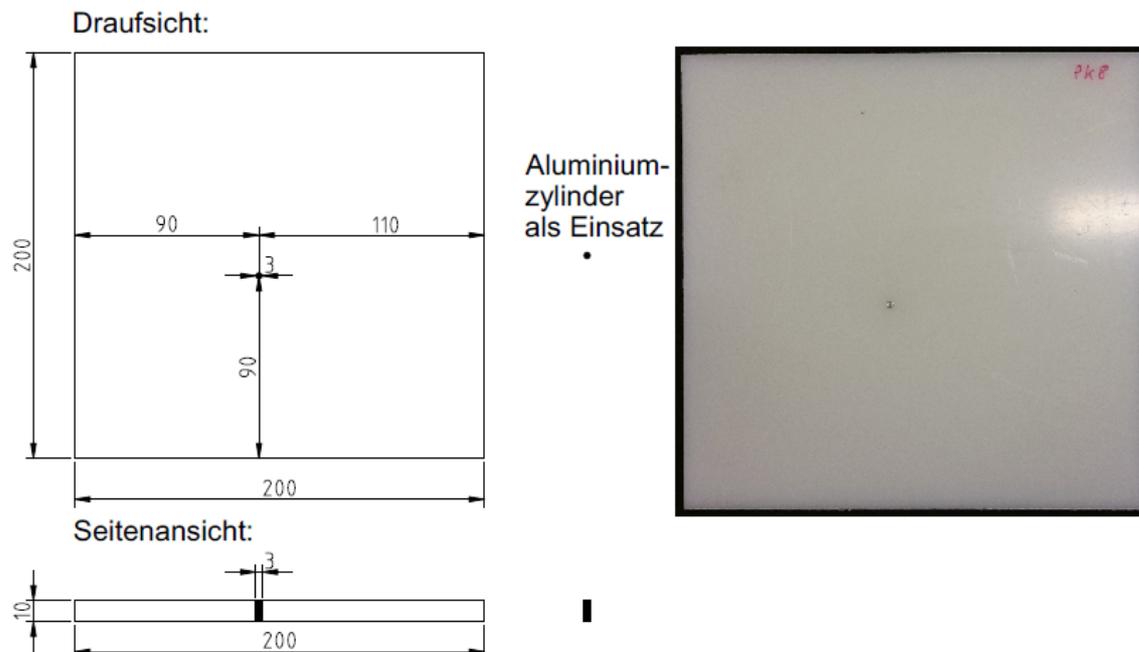


Abbildung 21: Probekörper 8 (PK8) 200x200x10 mm Polyethylen-Platte mit leicht versetzter Bohrung mit 3 mm Durchmesser und herausnehmbarem Aluminiumeinsatz.

PK7: 270x270x10 mm Platte mit einzelner 5 mm Lochbohrung
 Plattenmaterial: Polyethylen

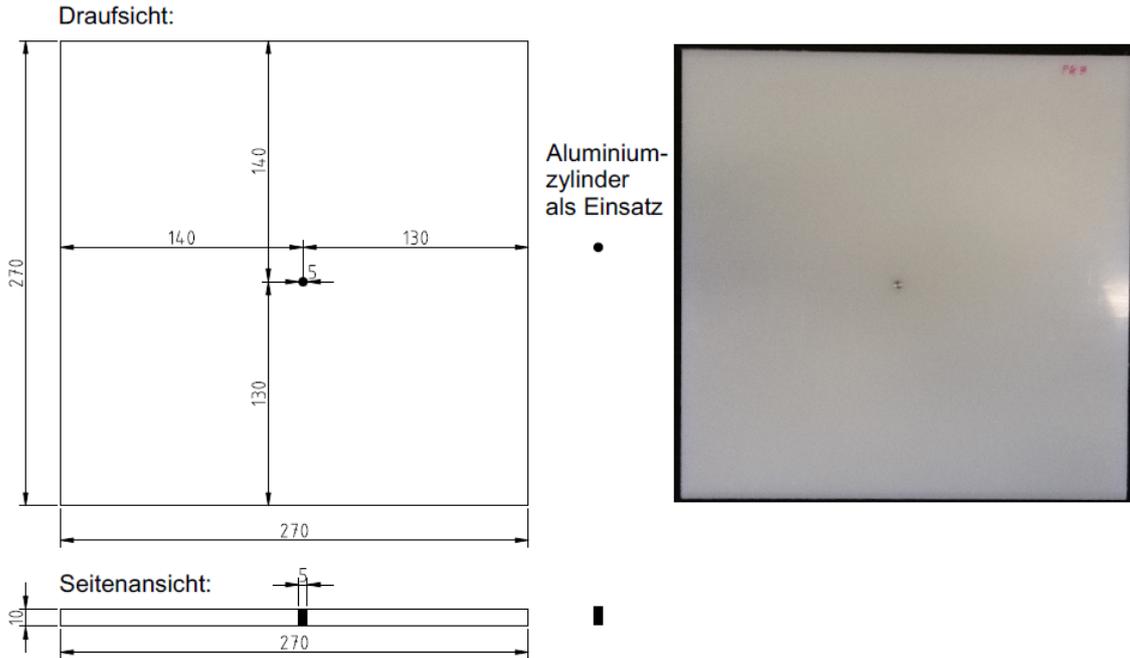


Abbildung 22: Probekörper 7 (PK7) 270x270x10 mm Polyethylen-Platte mit leicht versetzter Bohrung mit 5 mm Durchmesser und herausnehmbarem Aluminiumeinsatz

PK11: 270x270x10 mm PE-Platte mit 22 Bohrungen mit 3 mm Durchmesser
 Plattenmaterial: Polyethylen

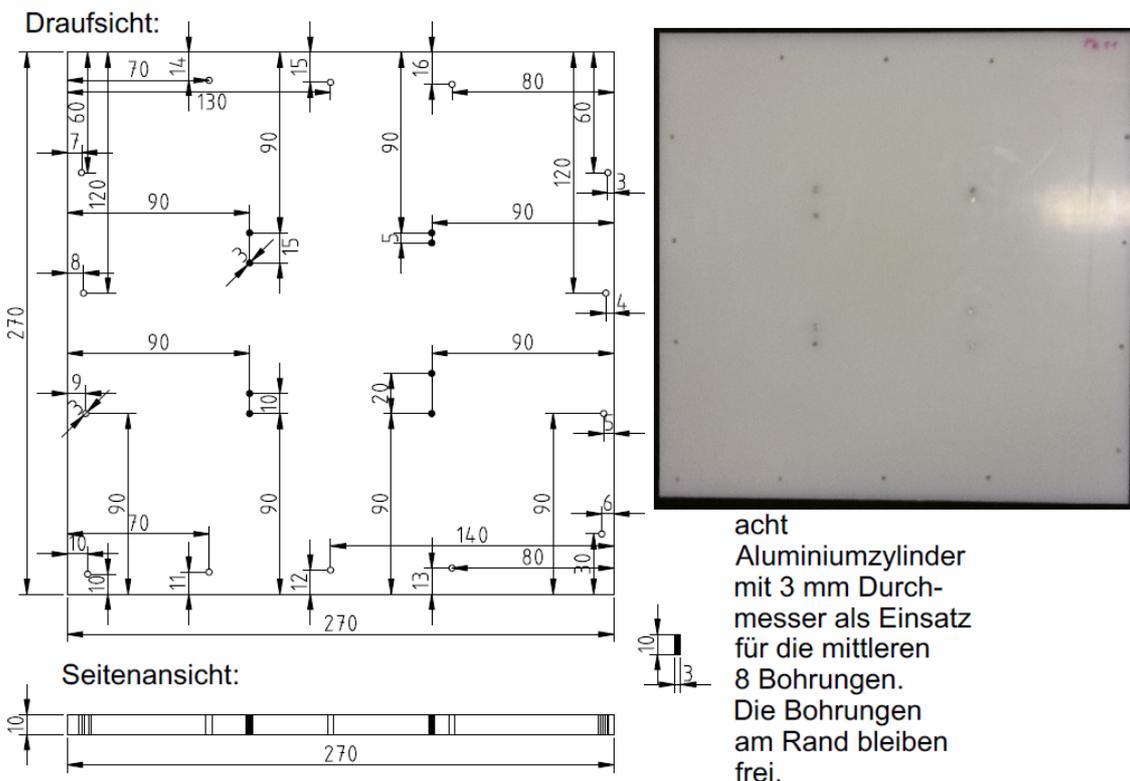


Abbildung 23: Probekörper 11 (PK11) 270x270x10 mm PE-Platte mit Bohrungen von 3 mm Durchmesser. In den acht zentralen Bohrungen ist ein herausnehmbarer Zylinder aus Aluminium eingesetzt. Die Bohrungen am Rand sind mit Luft gefüllt.

PK10: 270x270x10 mm Platte mit L-förmigem Defekt
 Plattenmaterial: Polyethylen

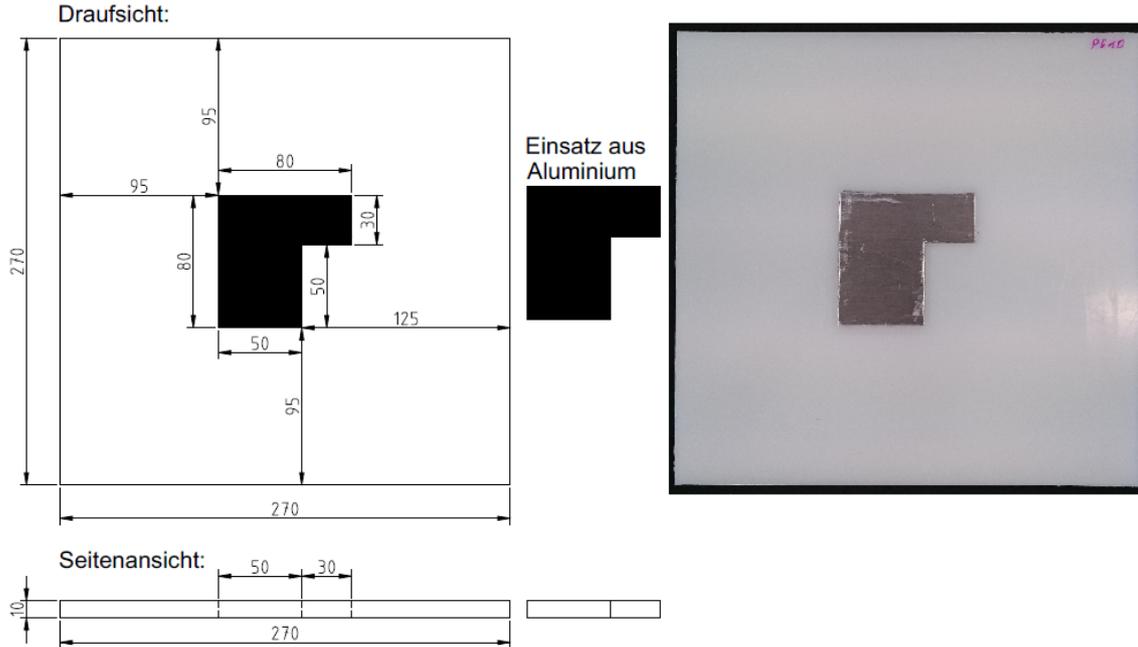
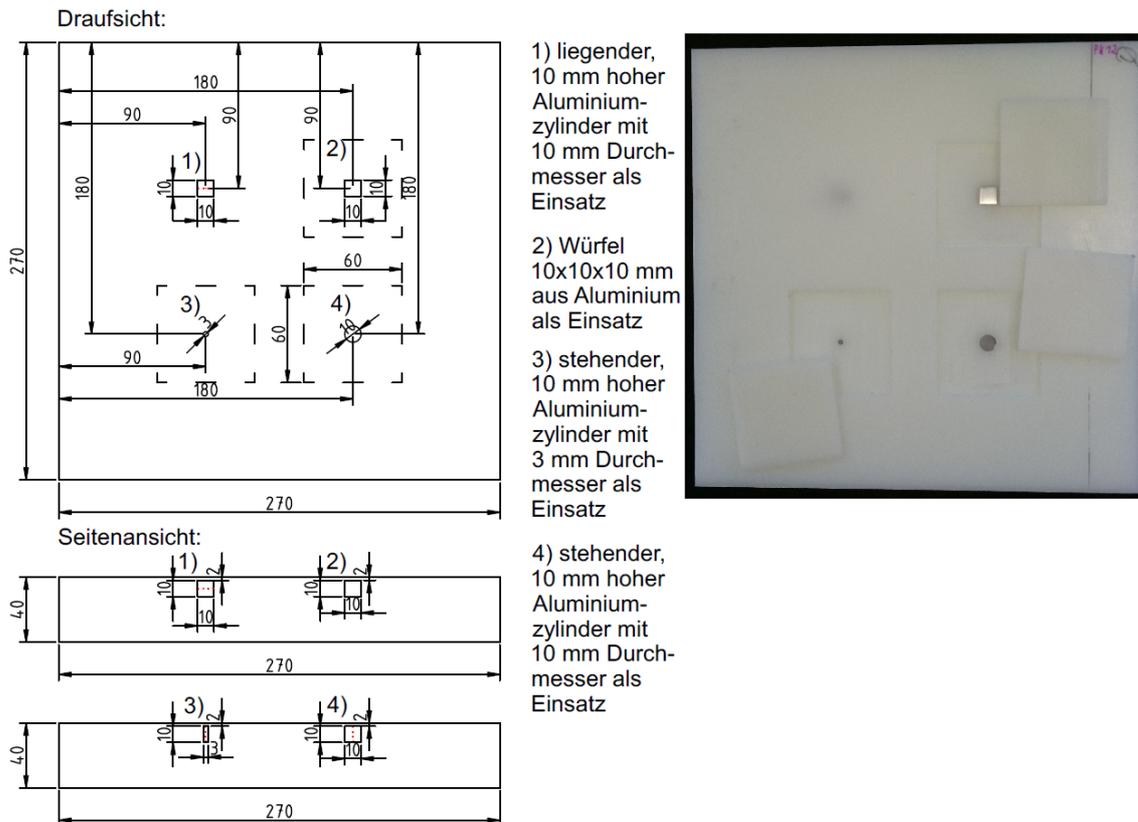


Abbildung 24: Probekörper 10 (PK10) 270x270x10 mm Polyethylen-Platte mit L-förmiger Defektstelle als Aluminiumeinsatz.

PK12: 270x270x40 mm Platte mit vier unterschiedlichen Defektgeometrien mit 10 bzw. 3 mm Durchmesser
 Plattenmaterial: Polyethylen



(Maßangaben in mm. Die roten, gepunkteten Linien deuten die Mittelachse des Zylinders an.)

Abbildung 25: Probekörper 12 (PK12) 270x270x40 mm Polyethylen-Platte mit vier Einsätzen unterschiedlicher Geometrie aus Aluminium mit 10 mm Durchmesser.

5.2. Strahloptimierung

Der Großteil der Messungen wurde mit der in den Abbildungen 26 und 27 dargestellten offenen Hohlleiterantenne durchgeführt. Diese Hohlleiterantenne besteht aus einem K-Band-Koaxial-Hohlleiterübergang vom Typ PRO-24-008 des Herstellers Procom und einer selbst gefertigten Hohlleiterverlängerung mit 30 mm Länge.

offene Hohlleiterantenne bestehend aus
Hohlleiter-Koaxial-Übergang (1) und Verlängerung (2)

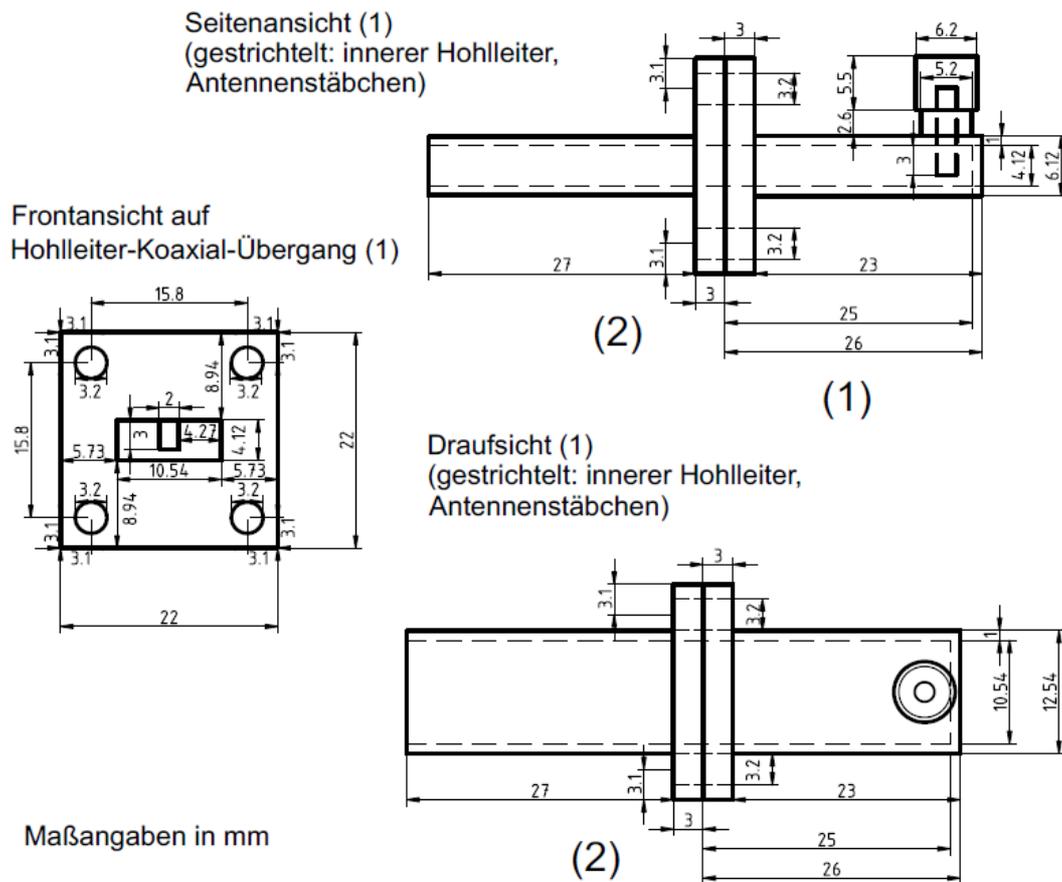


Abbildung 26: Maßzeichnung der offenen Hohlleiterantenne.



Abbildung 27: Fotografie der offenen Hohlleiterantenne.

Die offene Hohlleiterantenne zeichnete sich in den Messungen durch eine gute Ortsauflösung aus. Nachteilig war allerdings der nicht punktsymmetrische Antennenfootprint, der durch das rechteckige Hohlleiterprofil und das vertikal ausgerichtete E-Feld erzeugt wird. Dadurch sind auch die detektierten Beugungsmuster nicht punktsymmetrisch, was dazu führt, dass die Punktspreizfunktion mit dieser Antennenkonfiguration winkelabhängig ist. In Abbildung 28 ist der um 245 Grad in der komplexen Ebene gedrehte Realteil eines mit der offenen Hohlleiterantenne gemessenen Defektbildes zu sehen. Der Defekt war eine Lochbohrung mit 5 mm Durchmesser mit darin eingesetztem Aluminiumzylinder in einer 1 cm dicken PE-Platte in 4 mm Messabstand. Ein Abtastpunkt im Bild entspricht 1 mm. Im Zentrum des Bildes ist in grau der Defekt skizziert. Mit den gestrichelten Linien sind die Maxima der punktsymmetrischen Beugungsmuster und mit der gepunkteten Linie die Maße und Orientierung des Hohlleiters angedeutet.

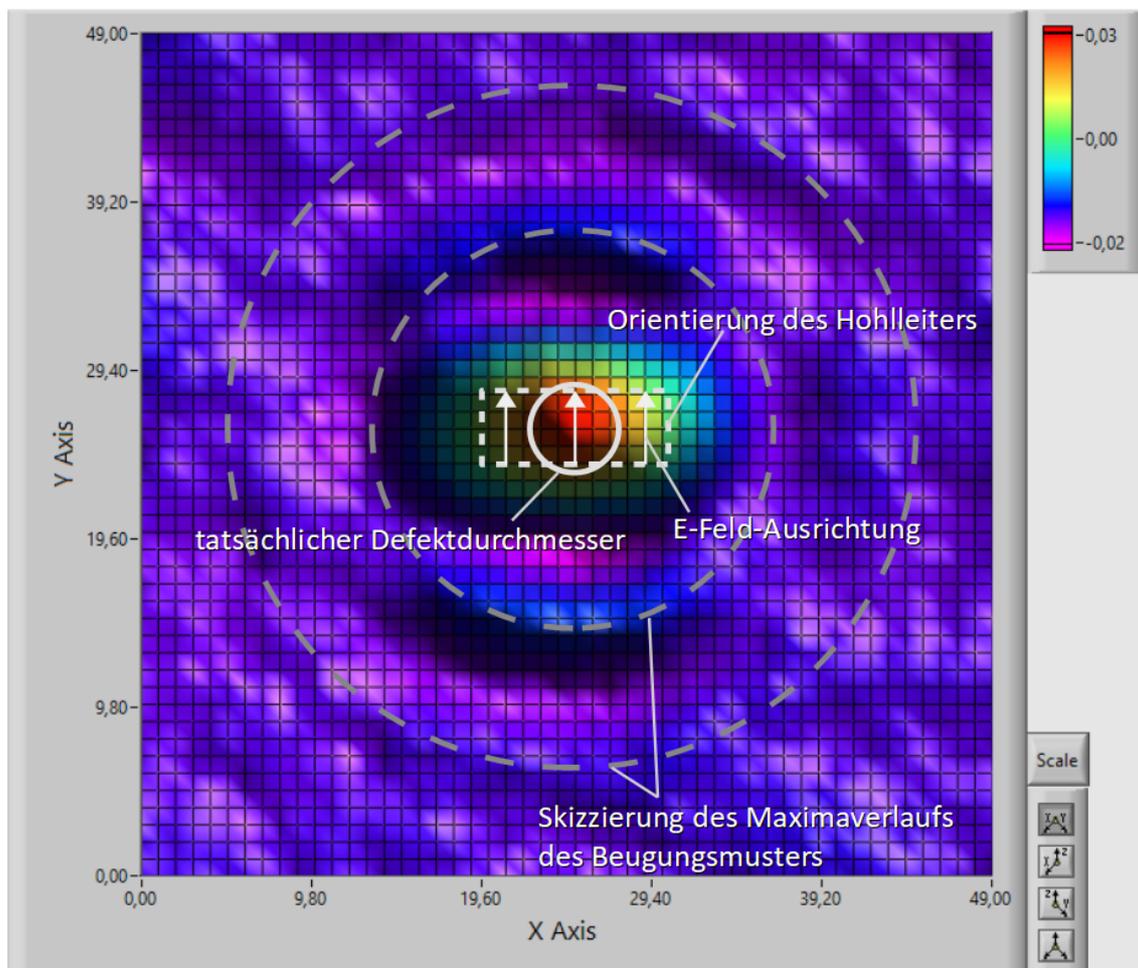


Abbildung 28: Um 245 Grad in der komplexen Ebene gedrehter Realteil eines mit der offenen Hohlleiterantenne gemessenen Defektbildes einer Lochbohrung mit 5 mm Durchmesser mit Aluminiumeinsatz in einer 1 cm dicken PE-Platte, aufgezeichnet mit 4 mm Messabstand.

Man sieht deutlich, dass die Beugungsmuster verstärkt in der vertikalen Ebene, in der auch das E-Feld orientiert ist, auftreten. Die fehlende Punktsymmetrie erschwert die Berechnung der Punktspreizfunktionen. Bei punktsymmetrischen Beugungsmustern reicht es aus, die entsprechende Punktspreizfunktion in einer zweidimensionalen Schnittebene zu berechnen. Die Punktspreizfunktion kann dann durch Rotation der berechneten Funktion in der Ebene einfach auf dreidimensionale Daten angewendet werden. Bei Funktionen, die in der dreidimensionalen Ebene nicht punktsymmetrisch sind, ist das wegen der Winkelabhängigkeit der Funktion nur möglich, wenn für jeden Winkel von 0 bis 90° separate Funktionen berechnet werden, was einen stark erhöhten Rechenaufwand bedeutet. Aus diesen Grund wird in dieser Arbeit meist nur mit einem Schnittprofil mittig durch den Defekt und parallel zur Y-Achse gearbeitet.

Die Zielsetzung bei der Optimierung des Strahlers war, neben einer verbesserten Ortsauflösung auch eine möglichst punktsymmetrische Feldverteilung und damit auch ein möglichst punktsymmetrisches Beugungsmuster zu erreichen. Dazu wurden in einer Vorarbeit von Herrn Zacharias an der Hochschule Magdeburg-Stendal die in der Abbildung 29 dargestellten Simulationen von Stielstrahlern verschiedener Größe und Form mit der Simulationssoftware EMPro durchgeführt [16].

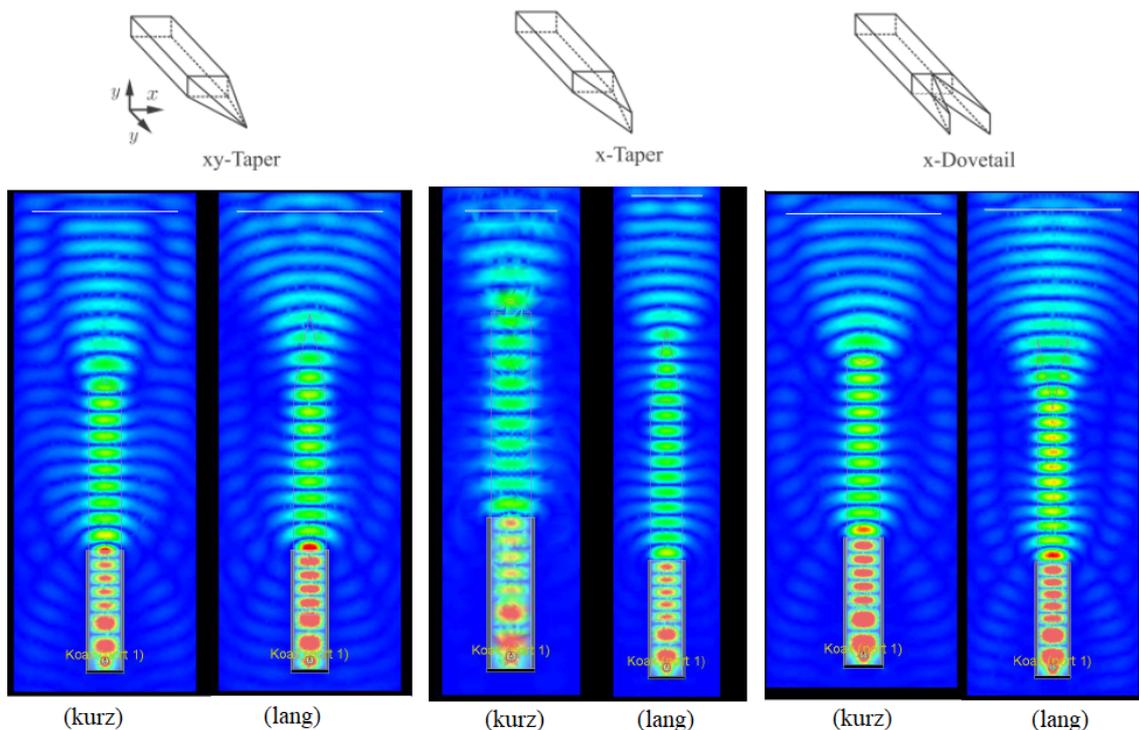


Abbildung 29: Feldsimulation von Stielstrahlern mit verschiedenen Taperspitzen (bei 0° Phase) [16].

Auf Grundlage dieser Simulationen wurde der XY-Taper des in den Abbildungen 30 und 31 gezeigten Stielstrahlers gefertigt.

Hohlleiter-Koaxial-Übergang (1) sowie Verlängerung (2) und xy-Taper-Einsatz (3)

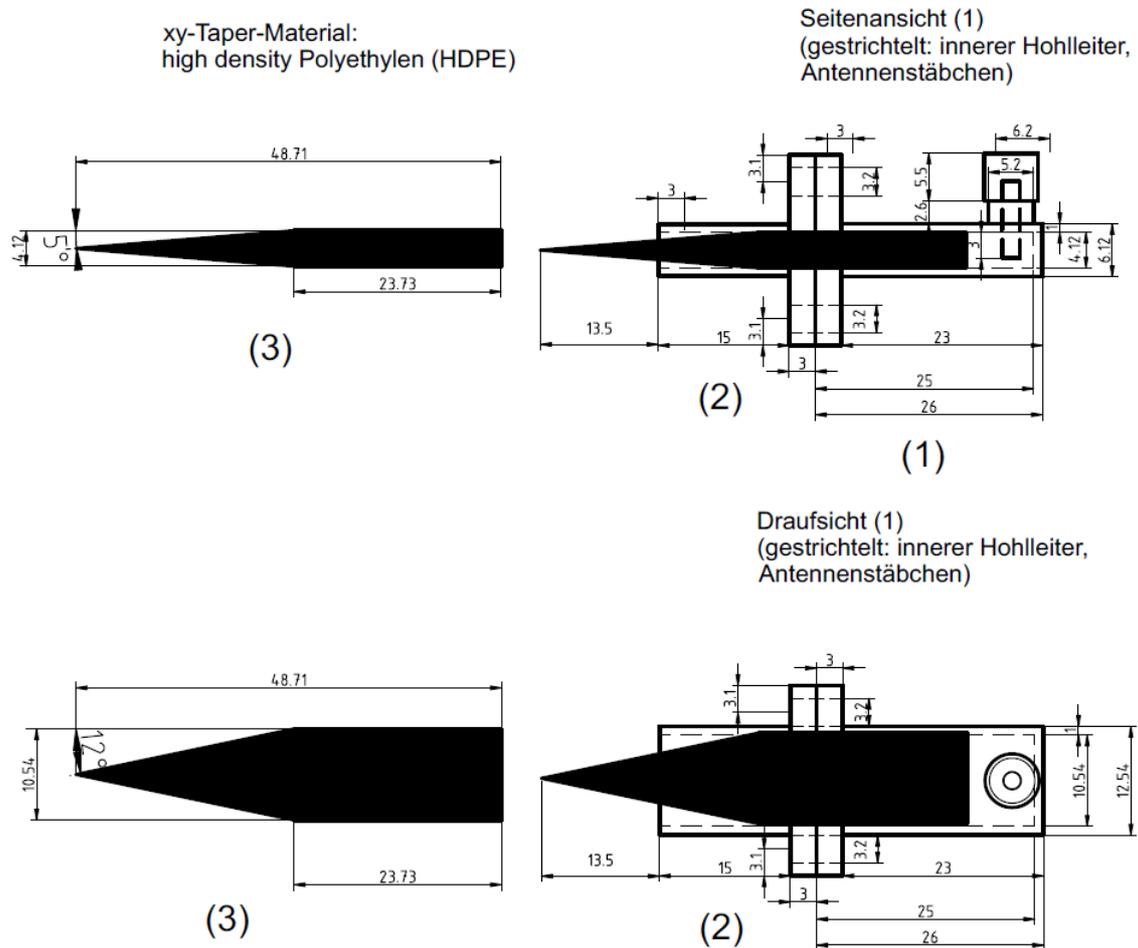


Abbildung 30: Maßzeichnung des Stielstrahlers mit XY-Taper.

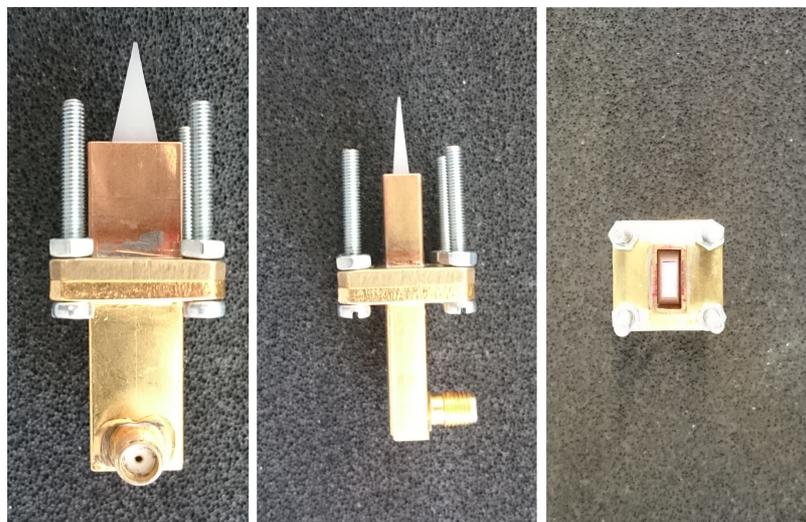


Abbildung 31: Fotografie des Stielstrahlers mit XY-Taper.

Die Abbildung 32 zeigt zum Vergleich das Defektbild des gleichen Probekörpers wie in Abbildung 28, welches mit Hilfe des Stielstrahlers gemessen wurde. In grau sind wie gehabt der Defekt (durchgezogene Linie), die Maxima des Beugungsmusters bei Punktsymmetrie (gestrichelte Linie) und die Orientierung des Hohlleiters (gepunktete Linie) eingezeichnet. Es ist erkennbar, dass die Beugungsmuster in Abbildung 32 vergleichsweise deutlicher zu erkennen sind. Die Abbildung des Defekts sieht auch etwas symmetrischer aus, da auch in horizontaler Ausrichtung zumindest leichte Ansätze des Beugungsmusters erkennbar sind. Allerdings bildet sich das Beugungsmuster in vertikaler Ausrichtung noch immer deutlicher ab. Eine punktsymmetrische Abbildung wurde also auch mit dem Stielstrahler nicht erzielt. Außerdem wird der Defekt auch deutlich größer abgebildet als er tatsächlich ist.

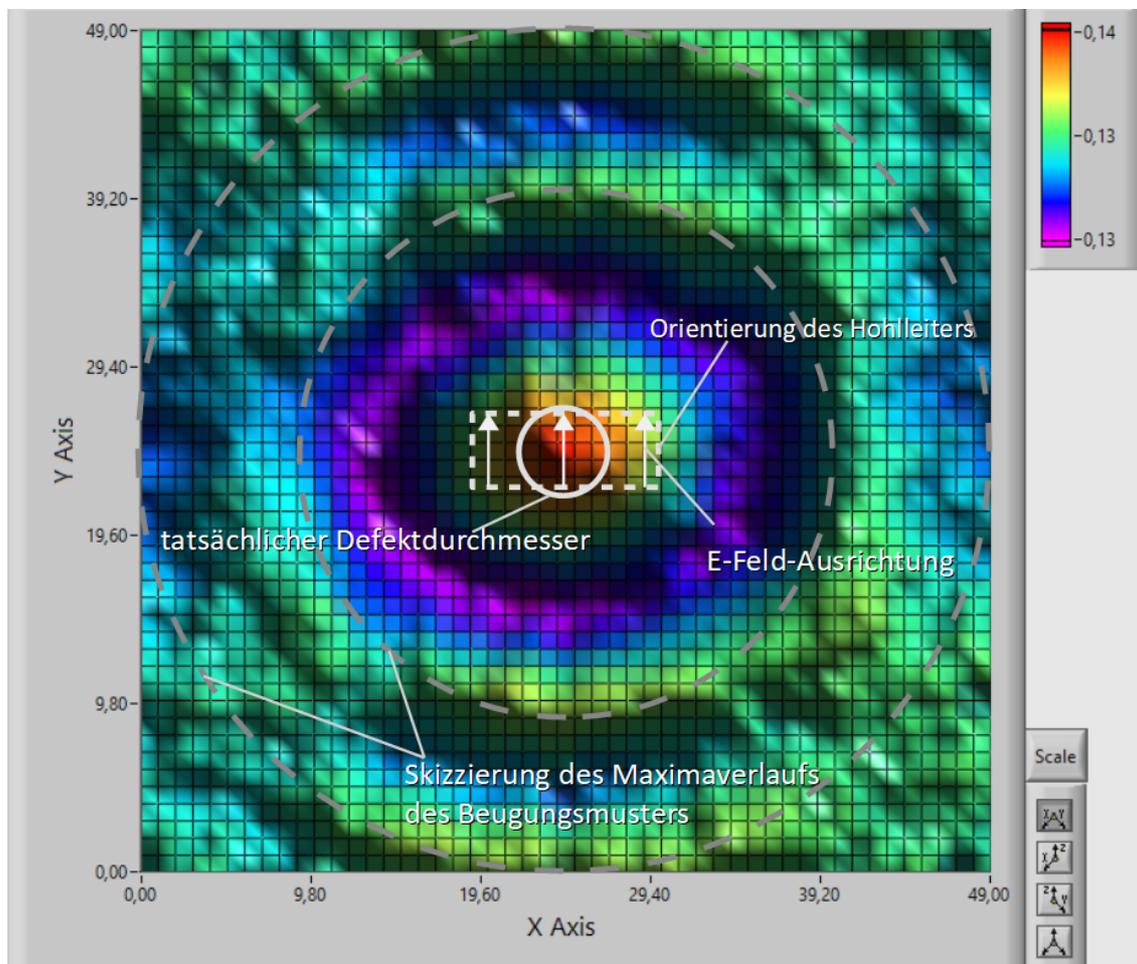


Abbildung 32: Um 80 Grad in der komplexen Ebene gedrehter Realanteil eines mit dem Stielstrahler mit XY-Taper gemessenen Defektbildes einer Lochbohrung mit 5 mm Durchmesser mit Aluminiumeinsatz in einer 1 cm dicken PE-Platte. Aufgezeichnet mit 4 mm Messabstand.

Der in Abbildung 30 gezeigte XY-Taper sitzt 35,21 mm tief in der Hohlleiterverlängerung. Er sitzt sogar so tief, dass sich 11,48 mm der Taper-Spitze innerhalb des

Hohlleiters befinden. Auf diese Weise wirkt der Taper eher wie ein inverser Hornstrahler, der den Strahlengang nicht fokussiert, sondern aufweitet. Ursprünglich war die Antenne auf Grundlage der in der Hochschule durchgeführten Simulationen so geplant, dass der Taper nur ca. 7 mm in der Hohlleiterverlängerung steckte. Dadurch sollte auch eine gute Anpassung und ein geringer Reflexionsfaktor am glatten Taper-Ende innerhalb des Hohlleiters sowie eine fokussierende Wirkung der Taper-Spitze gewährleistet werden. Allerdings haben praktische Messungen gezeigt, dass die Qualität der aufgezeichneten Defektbilder im Hinblick auf die Kantenschärfe und die Darstellung der Beugungsmuster umso schlechter ist, je weiter die Taper-Spitze aus der Hohlleiterverlängerung herausragt. Das äußert sich darin, dass der Defekt insgesamt etwas größer dargestellt wird und die Beugungsmuster um den Defekt nur unscharf dargestellt werden, wie der exemplarische Vergleich von zwei Taper-Stecktiefen in Abbildung 33 zeigt.

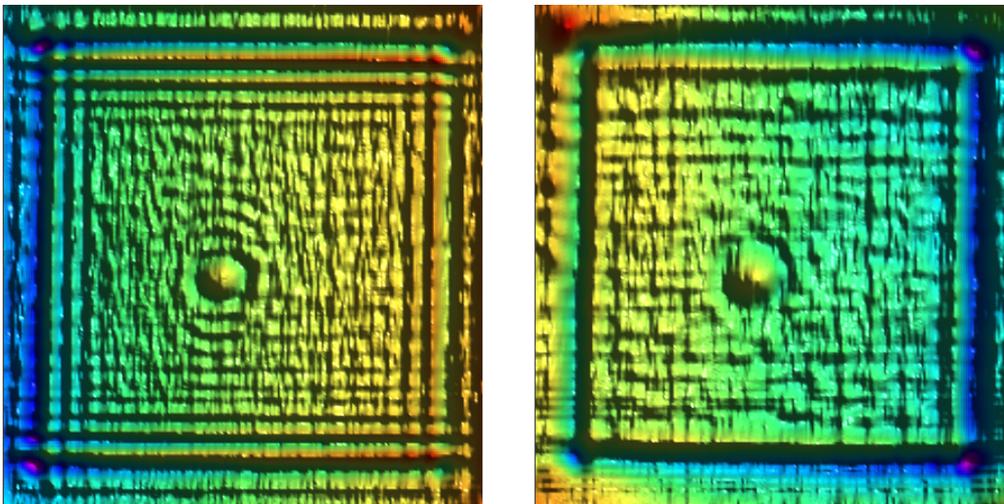


Abbildung 33: Vergleich der Realteile des Defektbildes des Probekörper 8, gemessen mit einer Stielstrahlerantenne, dessen XY-Taper im linken Bild 13,5 mm und im rechten Bild 36,7 mm aus der Hohlleiterverlängerung heraus schaute.

Die in Abbildung 34 dargestellten Feldsimulationen für verschiedene Taper-Stecktiefen, die von Dr. Nesterov durchgeführt wurden, lassen vermuten, dass in dieser kurzen Entfernung die durch die Fokussierung mit dem XY-Taper entstehenden Nebenkeulen das Messergebnis negativ beeinflussen. Da die genutzte Messanlage bei eingefahrener Z-Achse zwischen dem T-Stück, an dem die Antenne angebracht ist, und dem Verfahrtsch nur ca. 60 mm Platz bietet (Abbildung 35), konnte die Stielstrahlerantenne nicht für größere Messabstände getestet werden. Ein weiterer Grund für die „unscharfen“ Defektbilder kann die im Vergleich zum offenen Hohlleiter größere Oberfläche für die Aufnahme der reflektierten Mikrowellen sein. Da die reflektierten Wellen über die Taper-Spitze gesehen leicht unterschiedliche Laufwege haben, könnte das zu unerwünschten Interferenzen führen.

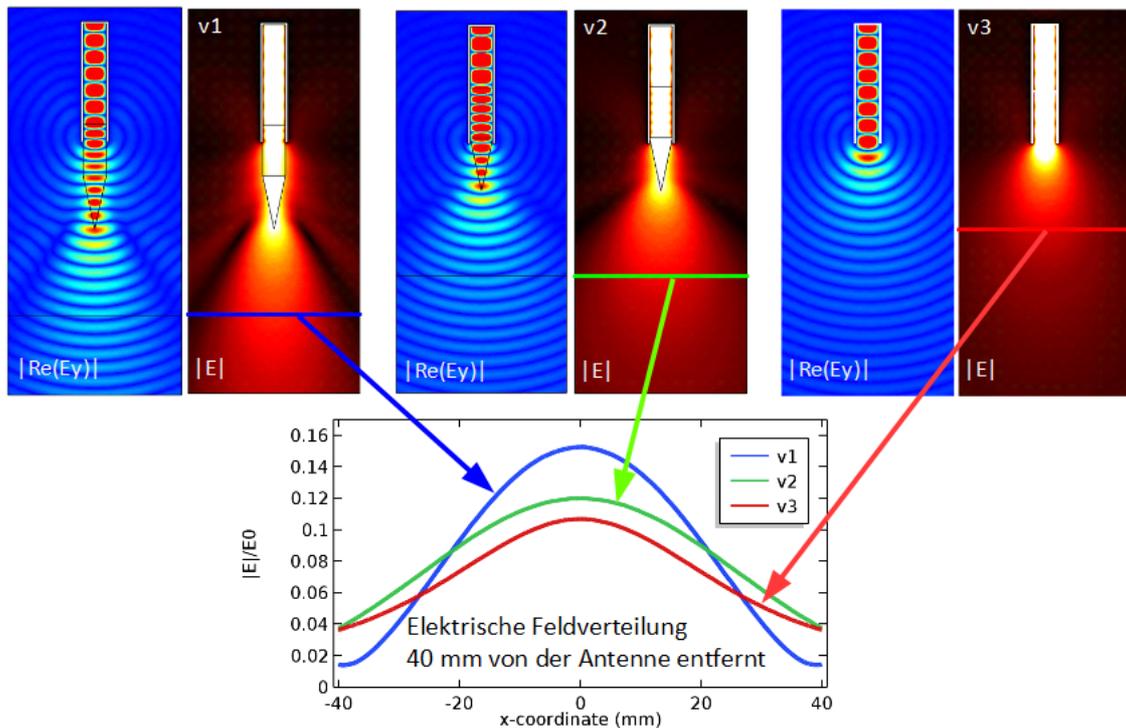


Abbildung 34: Ergebnisse einiger Feldsimulation für unterschiedliche Antennenkonfigurationen. Die Simulationen wurden mit dem Programm COMSOL Multiphysics im 3D-Raum durchgeführt.

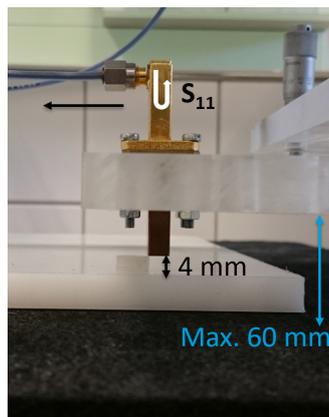


Abbildung 35: Foto vom T-Stück des Arms der Messanlage mit offener Hohlleiterantenne und Ausschnitt vom Verfahrtsch.

Da die Stielstrahlerantenne in der ursprünglich angedachten Konfiguration keine zufriedenstellenden Messergebnisse lieferte, wurde durch praktische Versuche die in Abbildung 30 dargestellte, alternative Taper-Stecktiefe ermittelt. Diese Taper-Konfiguration gewährleistet zwar eine klare Darstellung der Beugungsmuster, besitzt jedoch eine schlechtere Ortsauflösung, als die offene Hohlleiterantenne. Die vom Messsystem erreichbare Ortsauflösung ist gegeben durch die Beugungsgrenze, bei der zwei nah beieinander liegende Punkte noch mit hinreichendem Kontrast aufgelöst werden können. Wie die Abbildung 36 verdeutlicht, können mit der offenen Hohlleiterantenne stark reflektierende Objekte, die 10 mm voneinander entfernt sind, noch gut aufgelöst werden. Die

Voraussetzung hierfür ist, dass die E-Feld-Vektoren entlang der Achsenposition der Defektstellen orientiert sind.

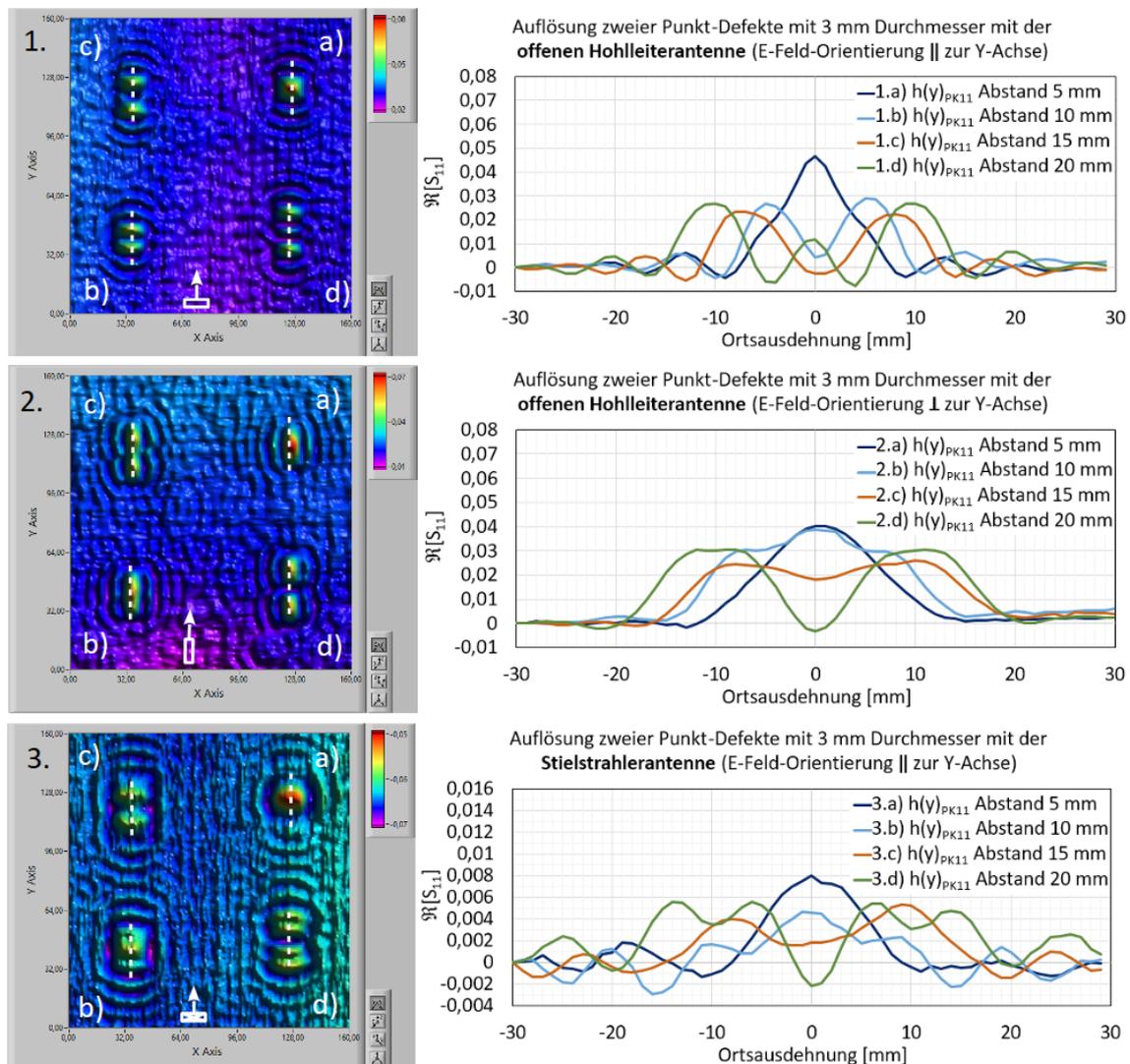


Abbildung 36: Dargestellt ist der Realteil der Messungen von Aluminium gefüllten Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, die jeweils in Abständen von von 5 (a), 10 (b), 15 (c) und 20 mm (d) zueinander angeordnet sind (PK11). Das obere Bild (1.) wurde mit der offenen Hohlleiterantenne aufgenommen, wobei der Hohlleiter so ausgerichtet war, dass die E-Feld-Vektoren parallel zur Verfahrrichtung orientiert waren. Das mittlere Bild (2.) wurde ebenfalls mit der offenen Hohlleiterantenne aufgenommen. Diesmal war der Hohlleiter so ausgerichtet, dass die E-Feld-Vektoren orthogonal zur Verfahrrichtung lagen. Das untere Bild (3.) wurde mit der Stielstrahlerantenne mit XY-Taper aufgezeichnet. Auf der linken Seite ist der jeweilige Scan zu sehen, in dem die Orientierung und die Verfahrrichtung der Messmaschine in weiß skizziert sind. In weiß ist die Schnittrichtung für die jeweiligen Defektprofile angedeutet, die auf der rechten Seite zu sehen sind.

Die erzielte Ortsauflösung mit der Stielstrahlerantenne und dem tiefer eingeführten XY-Taper ist deutlich schlechter. Die 10 mm voneinander entfernten Defektstellen können mit der Stielstrahlerantenne nicht mehr einzeln aufgelöst werden. Unten im Bild erkennt man deutlich die Aufweitung der Reflexionssignale durch den größeren

Ausleuchtungsbereich der Stielstrahlerantenne. Da die Sendeenergie so auf eine größere Fläche verteilt wird, gelangt weniger Energie zurück zum Empfänger. Außerdem erfährt das Reflexionssignal innerhalb des Tapers noch eine Dämpfung, was die kleineren Amplitudenwerte der Reflexionssignal erklärt. Die offene Hohlleiterantenne ist daher besser geeignet, um kleinere Defekte aufzulösen. Außerdem erzeugt sie ein weniger stark ausgeprägtes Beugungsmuster um die Kanten des Defekts.

Aufgrund der schlechteren Ortsauflösung und dem Umstand, dass die Beugungsmuster auch bei Verwendung des XY-Tapers nicht wirklich punktsymmetrisch waren, wurde bei späteren Messungen eher die offene Hohlleiterantenne anstelle der Stielstrahlerantenne verwendet.

5.3. System- und Softwareentwicklung

5.3.1. Beschreibung der 24 GHz-Messanlage

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde eine von der Hochschule Magdeburg-Stendal bereitgestellte Messanlage mit einem 3-Achsen-Verfahrtisch genutzt, welche in den Abbildungen 37 und 38 dargestellt ist.



Abbildung 37: Gesamtansicht der im Projekt verwendeten Messanlage. Im Bild markierte Bestandteile: 1) PC mit einer Multi-I/O-Karte von National Instruments zur Steuerung der Anlage und Aufzeichnung der Messdaten, 2) Spannungsversorgung für die 24-GHz-Radar-Module, 3) Steuerungen für die Servomotoren, 4) Anlagenhauptschalter.

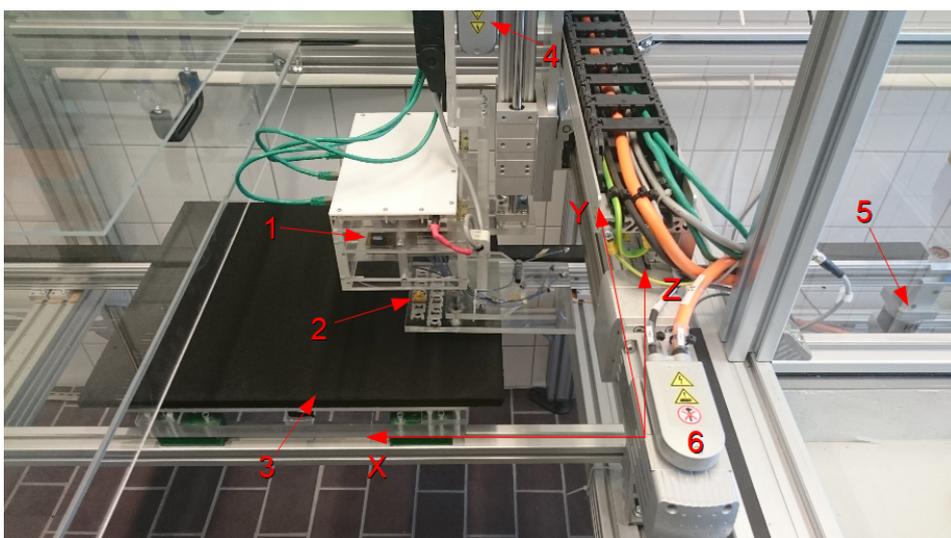


Abbildung 38: Achsensystem der im Projekt verwendeten Messanlage. Im Bild markierte Bestandteile: 1) 24-GHz-Radar-Modul, 2) Hohlleiter- bzw. Stielstrahlerantenne, 3) Verfahrtisch für die X-Achse mit Absorberschaummatten, 4) Servomotor für die Z-Achse, 5) Servomotor für die X-Achse, 6) Servomotor für die Y-Achse.

Die Achsen der Messanlage werden jeweils von einem Servomotor des Herstellers FESTO vom Typ EMMS-AS angetrieben. Die Datenkommunikation mit den Servomotorsteuerungen der X- Y- und Z-Achse vom Typ FSTO CMMS-AS-C4-3A-G2 erfolgt über die serielle Schnittstelle des Computers. Die Abbildung 39 zeigt ein Blockschema der Komponenten der Messanlage mit ihren jeweiligen Typenbezeichnungen.

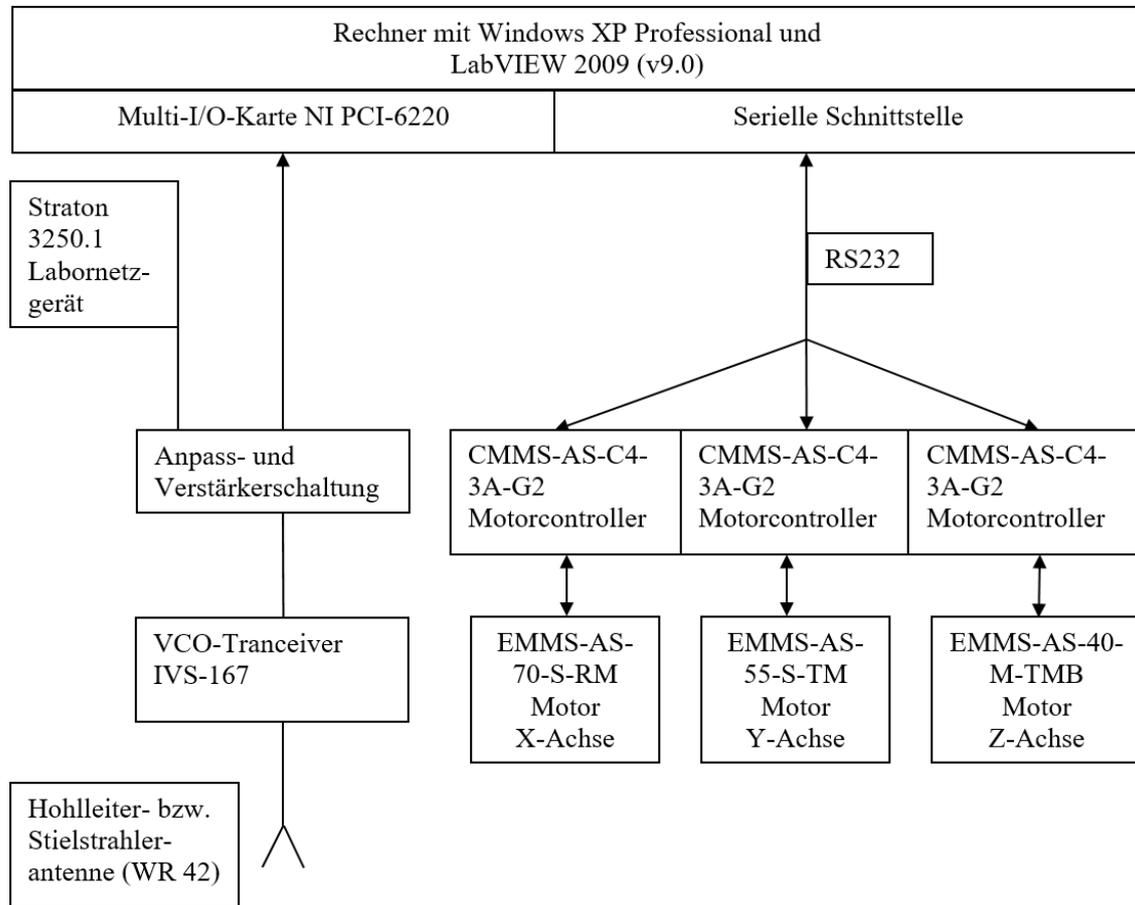


Abbildung 39: Blockschaltbild der Komponenten der Messanlage.

Die Ausgabe der Steuerbefehle, die Parametrierung einer Messfahrt sowie die Anzeige und Speicherung der Messdaten erfolgt mit Hilfe des in der grafischen Programmiersprache LabVIEW (von National Instruments) geschriebenen Programms „Verfahrtisch.vi“, das im Zuge dieser Arbeit stark überarbeitet wurde. Ein Screenshot von der Oberfläche des Messprogramms während einer Messung ist in Abbildung 40 zu sehen.

Für die Speisung der Antenne wird ein 24-GHz-Radar-Modul vom Typ IVS-167 der Firma InnoSenT verwendet. Statt der dem Modul beiliegenden planaren Antenne ist an das Modul ein Koaxialkabel angeschlossen, durch das die Hohlleiter- bzw. Stielstrahlerantenne gespeist wird.

Auf dem Verfahrtisch sind zwei 0,9 mm dicke Absorberschaummatten vom Typ ECOSORB LS-30 aufgelegt, die die Reflexionen von den konstruktiven Elementen des Verfahrtisches minimieren sollen. Um Phasenunterschiede entlang des Prüfkörpers zu vermeiden, ist der Verfahrtisch möglichst waagrecht auszurichten, sodass der Messabstand an jedem Punkt des Prüfkörpers identisch ist.

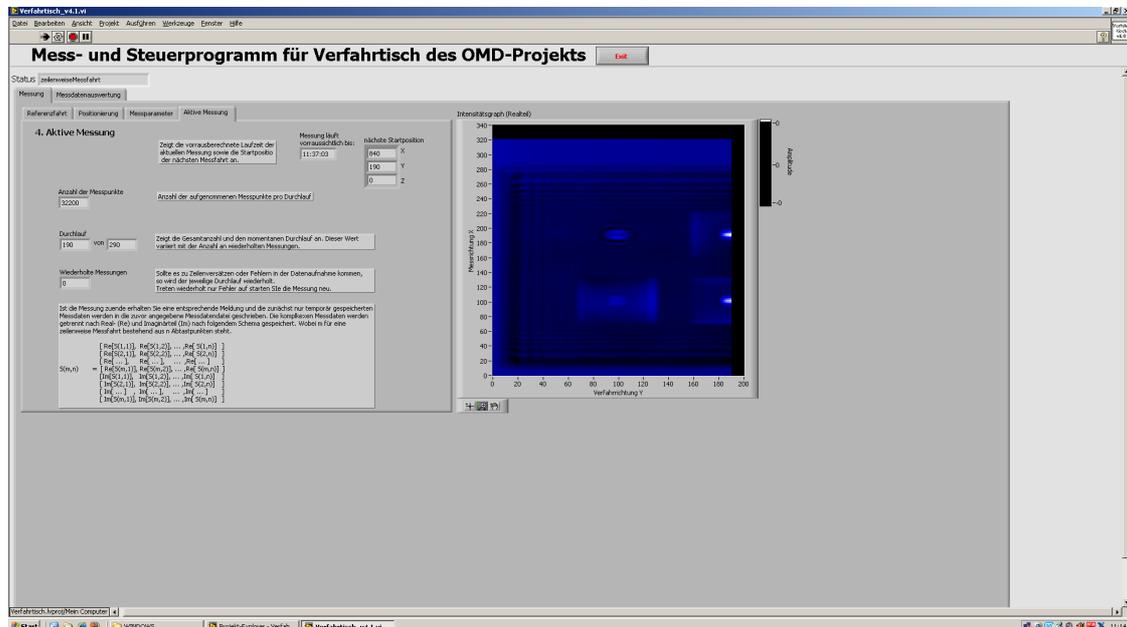


Abbildung 40: Screenshot der Benutzeroberfläche des LabVIEW-Programms "Verfahrtisch.vi", welches die Messmaschine steuert und die Messdaten aufzeichnet.

Eine einzelne, zeilenweise Messung entlang der X-Achse wird nachfolgend als „Messfahrt“ bezeichnet. Dazu wird ein Prüfkörper auf dem Verfahrtisch platziert und mit Hilfe des Steuerprogramms ein Startpunkt im Koordinatensystem der Messmaschine angefahren. Dabei entspricht ein Punkt im Koordinatensystem einem Millimeter. Sobald die Startposition der Messung übernommen wurde, wird ein Fahrweg für die X-Achse w_x [mm] und für die Y-Achse w_y [mm] sowie die gewünschte Verfahrgeschwindigkeit des Messtisches v_T festgelegt. Die Geschwindigkeit des Verfahrtisches ist zwischen 10 und 100 mm pro Sekunde einstellbar. Für die im Projekt durchgeführten Messungen wurde eine Verfahrgeschwindigkeit von 50 mm pro Sekunde gewählt. Sobald die Messung gestartet wird, bewegt sich der Verfahrtisch unterhalb der Antenne in positive Richtung entlang der X-Achse. Währenddessen der Verfahrtisch den Probekörper den Weg w_x in positive Richtung entlang der X-Achse bewegt, speist das InnoSenT-24-GHz-Radar-Modul die Antenne über ein Koaxialkabel mit einem 24 GHz Sinussignal. Das vom Prüfkörper reflektierte Signal S wird von der Antenne wieder empfangen und im Radar modul vom Sendesignal entkoppelt. Dieses Reflexionssignal wird in der Messtechnik auch oft als Reflexionsparameter S_{11} bezeichnet.

Das Radarmodul überträgt den komplexen Messwert als I/Q-Signal an die Multi-I/O-Karte, wo er mit der Abtastfrequenz $f_s = v_T \cdot n$ vom auf dem Rechner laufendem LabVIEW-Programm abgefragt und in einem zweidimensionalen Array gespeichert wird. Der Faktor n ist im Programm frei wählbar und steht für die Anzahl von Messpunkten, die pro Millimeter Weg aufgenommen werden. Standardmäßig wurden bei den Messungen $n = 100$ Messpunkte pro Millimeter Weg aufgenommen. Insgesamt werden bei einer Messfahrt also $N = w_x \cdot n$ Messwerte aufgezeichnet. Am Ende einer Messfahrt wird dann pro Millimeter Weg aus jeweils n Messwerten der Median \tilde{S} gebildet und die Anzahl der Messwerte pro Zeile so wieder auf

$$N = w_x \cdot \frac{1}{mm} \text{ reduziert.}$$

Dadurch wird sichergestellt, dass nicht einzelne Störpeaks das Messergebnis verfälschen. Um den Median der n Messwerte an der Position (x,y) zu bilden, werden diese Messwerte der Größe nach aufsteigend sortiert und anschließend der Messwert gewählt, der genau in der Mitte der sortierten Reihe steht. Ist n gerade, wird stattdessen der Mittelwert aus den beiden mittleren Messwerten gebildet. Die Auswahlvorschrift des Medians für die n sortierten Messwerte S , die über über der Koordinatenposition (x,y) aufgezeichnet wurden, lautet also

$$\tilde{S}(x, y) = \begin{cases} S(x, y)_i & \text{wenn } n \text{ ungerade} \\ 0,5(S(x, y)_{k-1} + S(x, y)_k) & \text{wenn } n \text{ gerade} \end{cases}$$

mit den Indexwerten des sortierten Messwert-Arrays $i = \frac{n-1}{2}$ und $k = \frac{n}{2}$.

Der Vorteil des Medians gegenüber einer einfachen Mittelwertbildung ist, dass einzelne große Störpeaks sich gar nicht mehr auf das Messergebnis auswirken, solange die Anzahl an Störsignalen kleiner als i ist. Auf diese Weise können Störeffekte durch Rauschen, die sich besonders in Abbildung 41 (unten) rot umrandeten Bereich des Grundsignals bemerkbar machen, gut minimiert werden.

Wenn eine Softwareschleife für die Erzeugung der Samplingrate genutzt wird, tritt wegen Leistungsschwankungen des Betriebssystems manchmal ein Zeilenversatz zwischen den einzelnen Messfahrten auf. Durch die Verwendung der stabileren onboard clock der Multi/I/O-Karte kann dieser Zeilenversatz vermieden werden. Wie der Vergleich in Abbildung 41 (oben) zeigt.

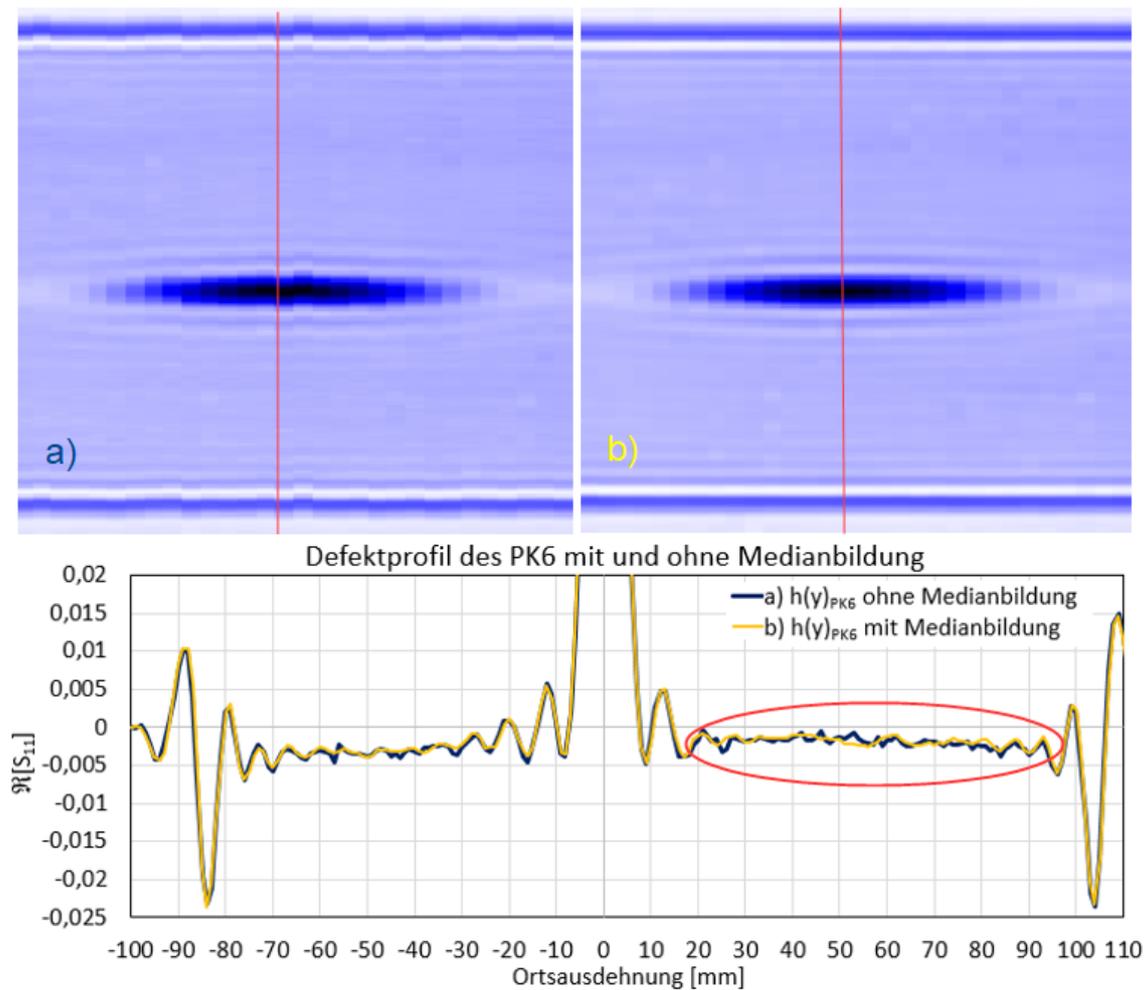


Abbildung 41: Vergleich der Qualität der Messdaten eines Querschnitts durch den Defekt des Probekörper 6 mit a) der ursprünglichen Version des Aufnahmeprogramms mit Erzeugung der Samplingrate aus einer Softwareschleife und ohne Bildung des Medians und der überarbeiteten Version b) mit der Erzeugung der Samplingrate durch die onboard clock der Multi-IO-Karte und Bildung des Medians aus $n=100$ Messwerten pro Millimeter Weg.

Erreicht der Verfahrtisch seinen Endpunkt, wird die Messung gestoppt und die Y-Achse fährt 1 mm in positive Richtung. Anschließend fährt der Verfahrtisch zurück, ohne dass gemessen wird. Die Messung wird wieder gestartet, sobald sich der Verfahrtisch wieder in positive Richtung entlang der X-Achse bewegt. Dieser zeilenweise Messvorgang wird so lange wiederholt, bis die Antenne auch auf der die Y-Achse den Weg w_Y zurückgelegt und damit ihre Endposition erreicht hat. Am Ende einer Messung liegt dann ein dreidimensionales Array der Form

$$h(x, y) = \begin{bmatrix} \tilde{S}(0,0) & \tilde{S}(1,0) & \cdots & \tilde{S}(w_{x-1}, 0) \\ \tilde{S}(0,1) & \tilde{S}(1,1) & \cdots & \tilde{S}(w_{x-1}, 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{S}(0, w_{y-1}) & \tilde{S}(1, w_{y-1}) & \cdots & \tilde{S}(w_{x-1}, w_{y-1}) \end{bmatrix}$$

mit $N = x \cdot y$ Messpunkten vor, das für jeden angefahrenen Koordinatenpunkt (x,y) ein komplexes Reflexionssignal $S = I + iQ$ mit Real- und Imaginärteil beinhaltet. Die alternative Notation $S = |S| \cdot e^{i\varphi}$ beschreibt den komplexen Messwert mit Hilfe seiner Amplitude in Verbindung mit seinem Phasenwinkel φ . Einer dieser Messwerte ist in Abbildung 42 in der komplexen Ebene dargestellt. Diese komplexen Messwerte werden am Ende der Messung getrennt nach Real- und Imaginärteil in einer Messwertdatei gespeichert.

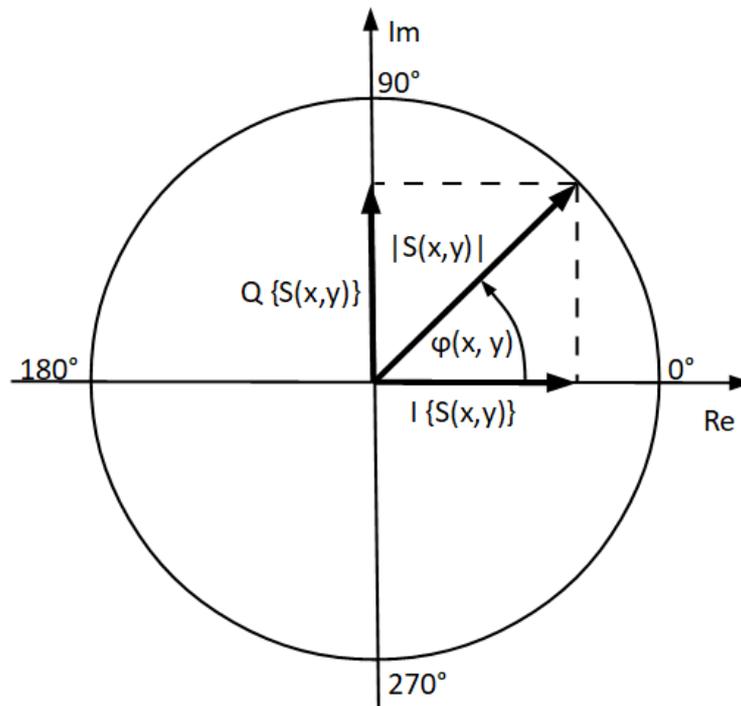


Abbildung 42: Exemplarische Darstellung eines Reflexionsmesswertes $S(x,y)$ als I/Q-Daten in der komplexen Ebene.

Ein Problem der verwendeten Messanlage stellte der mit ca. 6 cm nur sehr geringe Platz zwischen dem Verfahrtsch der Z-Achsen-Platte zur Befestigung der Antenne dar. Deswegen war die Verwendung von fokussierenden Linsen nicht ohne weiteres möglich. Außerdem war die Vorrichtung zur Ausrichtung der Antenne am Roboterarm defekt, so dass die Antenne teilweise in einem leichten Winkel zum Probekörper stand. Das wiederum führt bei manchen Messungen zu einer Schiefelage der Messebene. Um die Probleme mit dem sehr geringen Platz zwischen Antenne und Prüfkörper sowie die unpräzise Winkelausrichtung zu beseitigen, müsste der Roboterarm mit der Antennenbefestigung überarbeitet und neu gefertigt werden. Damit ließe sich die Qualität der Messdaten voraussichtlich weiter verbessern.

5.3.2. Beschreibung der Messdatenverarbeitung

Mit dem im Abschnitt 5.3.1. beschriebenen Messverfahren wird ein Probekörper vermessen. Das resultierende Defektbild aus einem Array von komplexen Reflexionswerten wird in dieser Arbeit mit $h_P(x,y)$ bezeichnet. Zusätzlich wird zu jedem Messszenario noch eine Messung des Hintergrundes durchgeführt, die nachfolgend mit $h_H(x,y)$ gekennzeichnet wird. Messung des Hintergrundes meint dabei, dass eine Messung ohne Probekörper vorgenommen wird, die so nur die Reflexionen des Verfahrtes und des Absorberschaums und damit alle vom Hintergrund erzeugten Störeinflüsse beinhaltet.

Der erste Schritt der Messdatenverarbeitung besteht darin, die Hintergrundmessung $h_H(x,y)$ vom Defektbild $h_P(x,y)$ zu subtrahieren. Auf diese Weise können alle vom Hintergrund des Messsystems verursachten Störeinflüsse entfernt werden. Werden die beiden Messungen einfach so, wie sie aufgenommen wurden subtrahiert, bleiben jedoch meist noch Artefakte der Störeinflüsse im Hintergrund bestehen. Der Grund dafür ist, dass die Phasen der gemessenen Reflexionssignale $h_P(x,y)$ und $h_H(x,y)$ in jedem Koordinatenpunkt relativ zueinander um einen festen Winkel φ_K verschoben sind. Diese Phasenverschiebung zwischen den Messungen kann mehrere Ursachen haben. Zum einen kann es vorkommen, dass die Servomotoren der Z-Achse bei beiden Messungen nicht exakt an der gleichen Stelle zum Stehen kommen und damit der Abstand von der Antenne zum Prüfkörper leicht variiert. Ein weiterer Grund ist die eventuell abweichende Ausgangsphasenlage des von der Antenne abgestrahlten Sendesignals in Bezug auf die jeweiligen Punkte im Koordinatensystem der Messanlage. Die dritte Ursache ist die kleinere Wellenlänge des Signals innerhalb des Probekörpers, sowie der eventuelle Phasensprung bei der Reflexion an der Oberfläche des Probekörpers. Diese Einflüsse des Probekörpers auf die Phasenlage fehlen in der Hintergrundmessung. Wenn man diese Einflüsse in die Hintergrundmessung integrieren möchte, muss man in der Hintergrundmessung einen identischen Probekörper ohne Defekt messen. Dann werden die Beugungsmuster an den Kanten des Probekörpers ebenfalls aus dem Defektbild entfernt und als Resultat der Subtraktion bleibt nur noch der Defekt mit seinem Beugungsmuster übrig. Die beiden Defektbilder, so wie sie sind, einfach zu subtrahieren, würde also zu einem Phasenfehler führen. Eine artefaktfreie Entfernung der vom Hintergrund erzeugten Störsignale wäre so nicht möglich, wie Abbildung 43c zeigt.

Um den Phasenversatz auszugleichen, können die komplexen Messdaten des Hintergrundbilds in jedem Koordinatenpunkt um den Winkel φ_K in der komplexen Ebene gedreht werden, indem man jeden komplexen Reflexionsmesswert von $h_H(x,y)$ vor der Subtraktion mit dem Faktor $e^{-j\varphi_K}$ multipliziert, wie in Gleichung 59 gezeigt.

$$h(x, y) = h_p(x, y) - h_H(x, y) \cdot e^{-j\varphi_K} \quad (\text{Gleichung 59})$$

Den Korrekturwinkel φ_K kann man im Messprogramm durch Probieren einstellen. Hat man den Korrekturwinkel korrekt gewählt, erhält man nach der Subtraktion ein von den Hintergrundeinflüssen befreites Defektbild ohne Artefakte, wie Abbildung 43d zeigt.

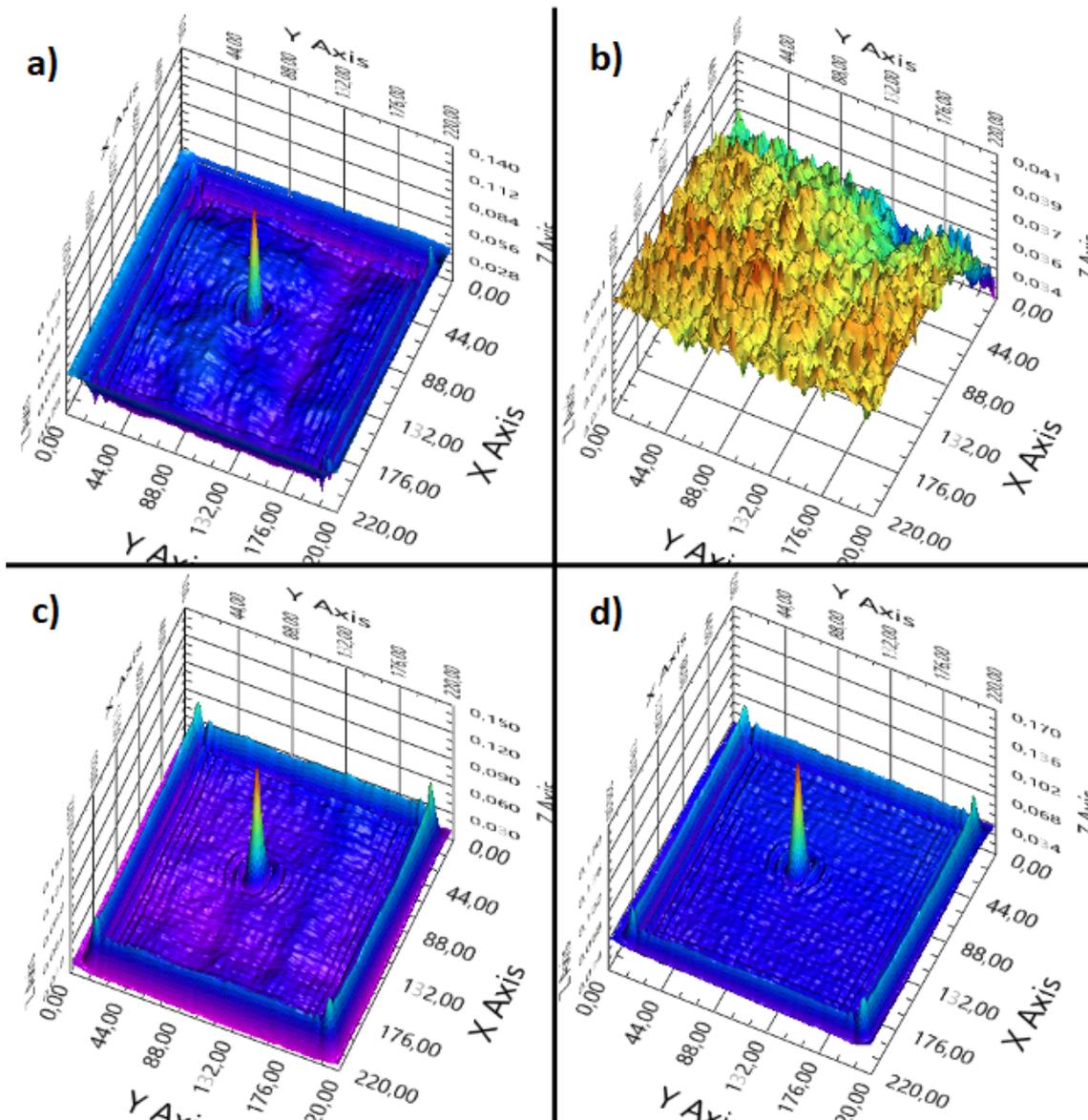


Abbildung 43: Effekt des Hintergrundabzugs auf das Defektbild. Plot a) zeigt die Defektmessung ohne Hintergrundabzug. Plot b) ist die Hintergrundmessung. Plot c) zeigt die Subtraktion von Defekt- und Hintergrundbild ohne Phasenkorrektur und mit im Bild verbleibenden Artefakten des Hintergrunds. Plot d) ist die Subtraktion von Defekt- und Hintergrundbild mit einer Phasenkorrektur um -35° zur Beseitigung der Artefakte.

Auf diese Weise konnten die Messergebnisse gegenüber der ursprünglichen Version des Messprogramms stark verbessert werden.

Manchmal sind Defekte in einer bestimmten Phasenlage schwer von den im Bild verbleibenden Störeinflüssen zu unterscheiden. Deswegen besteht im Messprogramm noch die Möglichkeit, alle Messdaten um den Winkel φ_s zu drehen. Die Multiplikation dieses Drehwinkels erfolgt nach Gleichung 60.

$$h(x, y) = h_p(x, y) e^{j\varphi_s} - h_H(x, y) \cdot e^{j(\varphi_s - \varphi_k)} \quad (\text{Gleichung 60})$$

Da dabei auch die Phase des Defektbildes gedreht wird, lässt sich die Änderung der Phase am Defekt beobachten und der Defekt damit leichter identifizieren wie Abbildung 44 zeigt. Außerdem kann so die Phasenlage vom aufgenommenen Defektbild an die Phasenlage der für die Entfaltung verwendeten Punktspreizfunktion angeglichen werden. Das ist dann wichtig, wenn man beim Entfaltungsergebnis nur den Realteil anstatt des Absolutwertes betrachtet. Die Phasendrehung um den Winkel φ_s hat keinen Einfluss auf den Absolutwert. Damit man die sich ändernde Phasenlage sehen kann, muss man sich daher nur den Real- bzw. Imaginärteil der Daten anzeigen lassen.

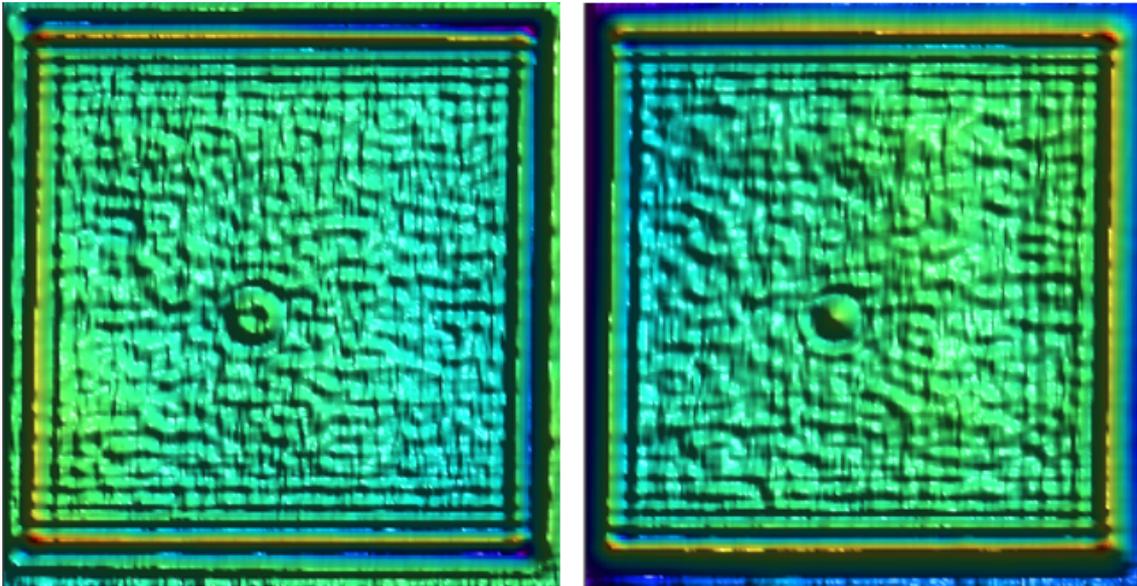


Abbildung 44: Auf der linken Seite ist der Realteil des Defektbilds zu sehen so wie es gemessen wurde. Auf der rechten Seite wurde die Phase der Messdaten um 200° gedreht.

Eine Vektordarstellung des Subtraktionsverfahrens in der komplexen Ebene ist in Abbildung 45 zu sehen. Als Ergebnis wird das in grün dargestellte Signal als Absolutwert oder nur dessen Real- bzw. Imaginärteil als Grauwertbild dargestellt.

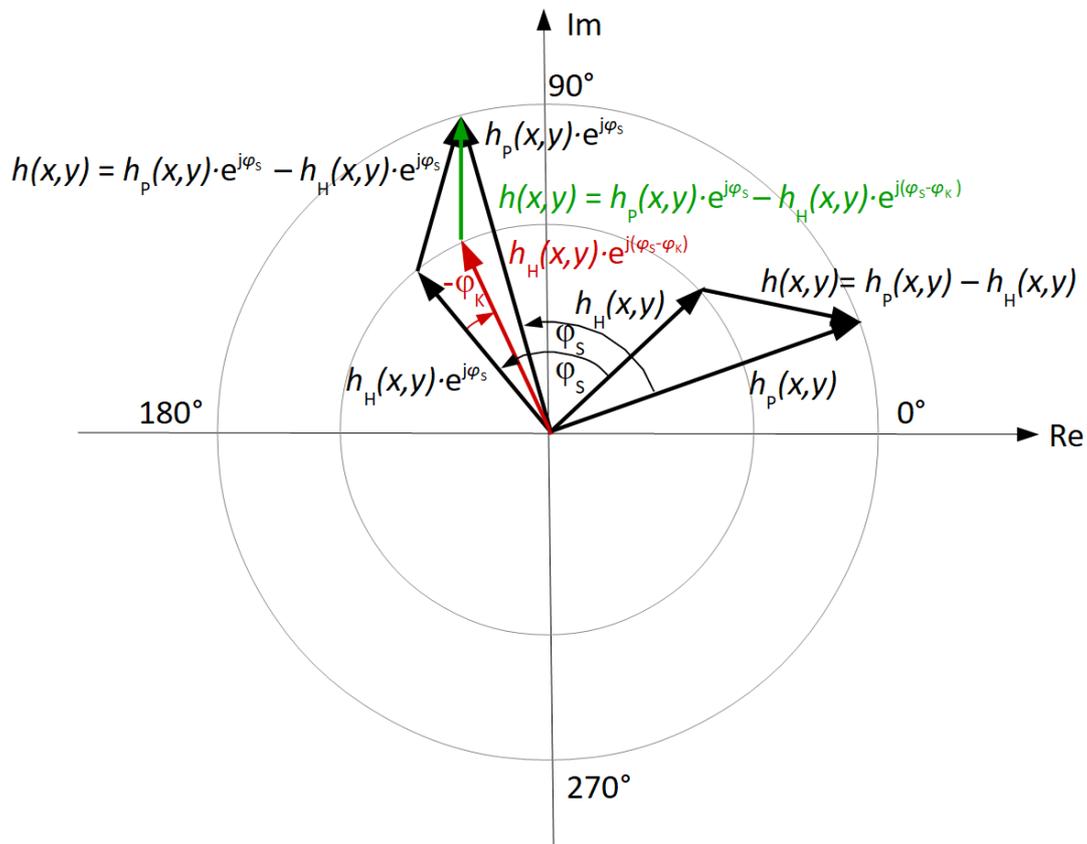


Abbildung 45: Subtraktion der um den Phasenwinkel φ_s gedrehten Messwerte vom Defekt- und Hintergrundbild mit Korrektur der Phasenlage des Hintergrundbilds um den Korrekturwinkel φ_k in einem einzelnen Koordinatenpunkt.

Die weitere Messdatenverarbeitung, wie das Ausschneiden der dreidimensionalen Messdaten in zweidimensionale Defektprofile sowie die für die Defektrekonstruktion notwendige Entfaltung mit einer passenden PSF, werden in einem separaten LabVIEW-Programm durchgeführt, das im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde. Ein kleiner Teil der Programmoberfläche ist in Abbildung 46 zu sehen. Auf die einzelnen Programmfunktionen wird wegen des zu großen Umfangs hier nicht weiter eingegangen. Es soll hier nur erwähnt werden, dass vor der Entfaltungsoperation mit dem im Abschnitt 4.9.2. beschriebenen Wiener-Filter der Gleichanteil des Signals entfernt wird, indem der Grundpegel des Realteils mit Hilfe eines additiven Offsets auf Null gesetzt wird. Lässt man diesen Schritt aus, erhält man im Frequenzbereich unter Umständen einen starken Peak bei der Frequenz Null, der das Ergebnis der Entfaltung verfälscht.

Für die Übergabe der Bilddaten an die LabVIEW eigenen FFT- bzw. IFFT-Funktionen ist zu erwähnen, dass die Daten $h(x)$ und $g(x)$ vor dem Eingang sowie nach dem Ausgang der Funktionen um $n/2$ Abtastpunkte rotiert werden. Dabei ist n die Anzahl der Abtastpunkte des jeweiligen Datensatzes. In Abbildung 47 ist exemplarisch die Rotation einer PSF im Zeitbereich vor der Übergabe an die FFT-Funktion gezeigt. Durch die

Datenrotationen wird erreicht, dass eine mittig lokalisierte PSF mit den LabVIEW eigenen FFT- und IFFT-Funktionen verwendet werden kann. In Abbildung 48 ist die für die Experimente vorgenommene Messdatenverarbeitung als Blockschema zusammengefasst.

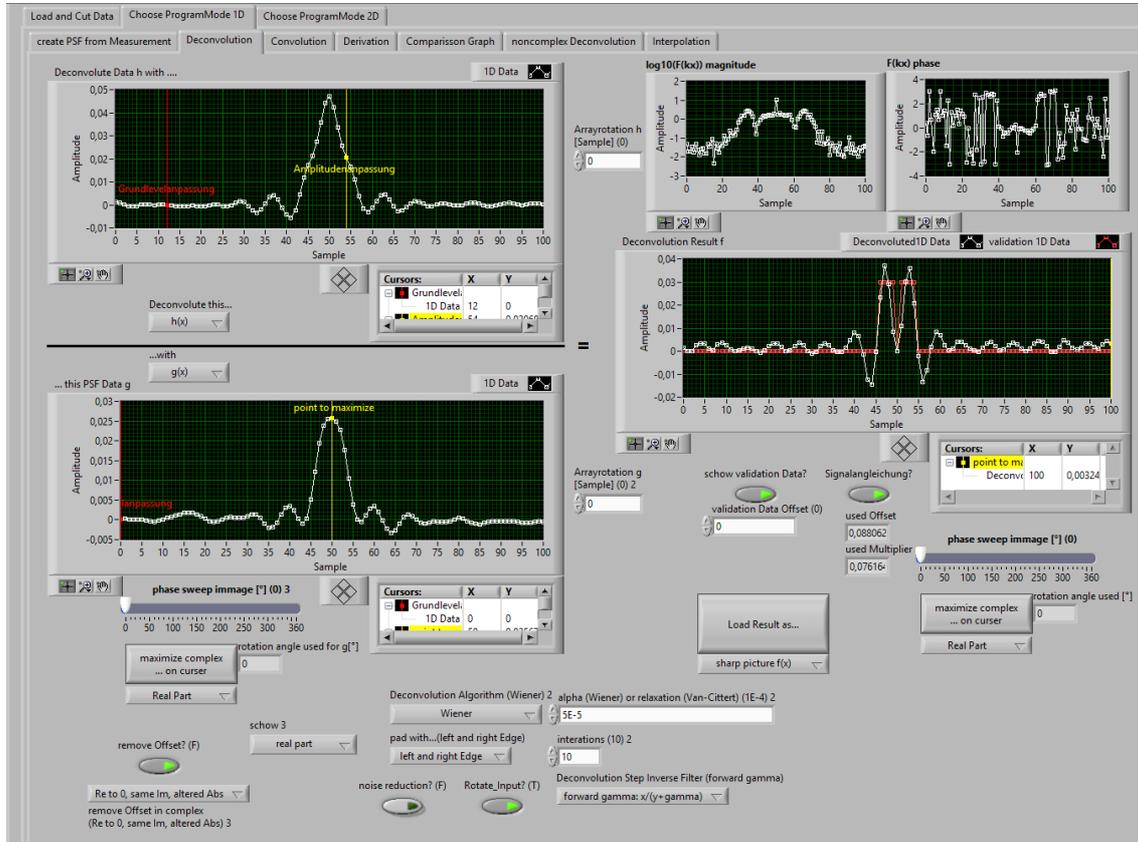


Abbildung 46: Zu sehen ist ein Ausschnitt der LabVIEW-Programmoberfläche, mit der die Defektrekonstruktionen durchgeführt wurden.

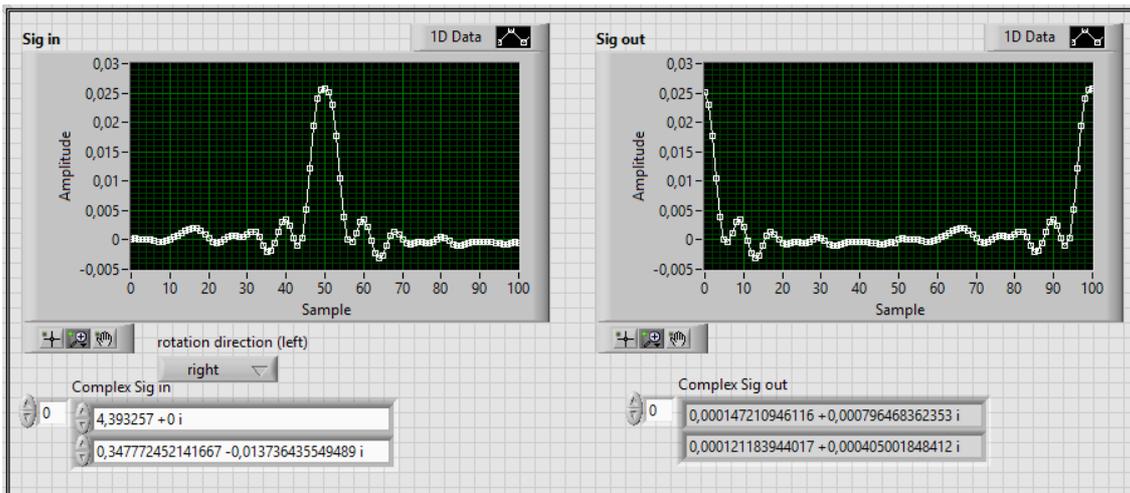


Abbildung 47: Dargestellt ist die Rotation einer PSF im Zeitbereich um $n/2$ Abtastpunkte. Im Graph auf der linken Seite sind die Eingangsdaten und im Graph auf der rechten Seite die rotierten Ausgangsdaten zu sehen.

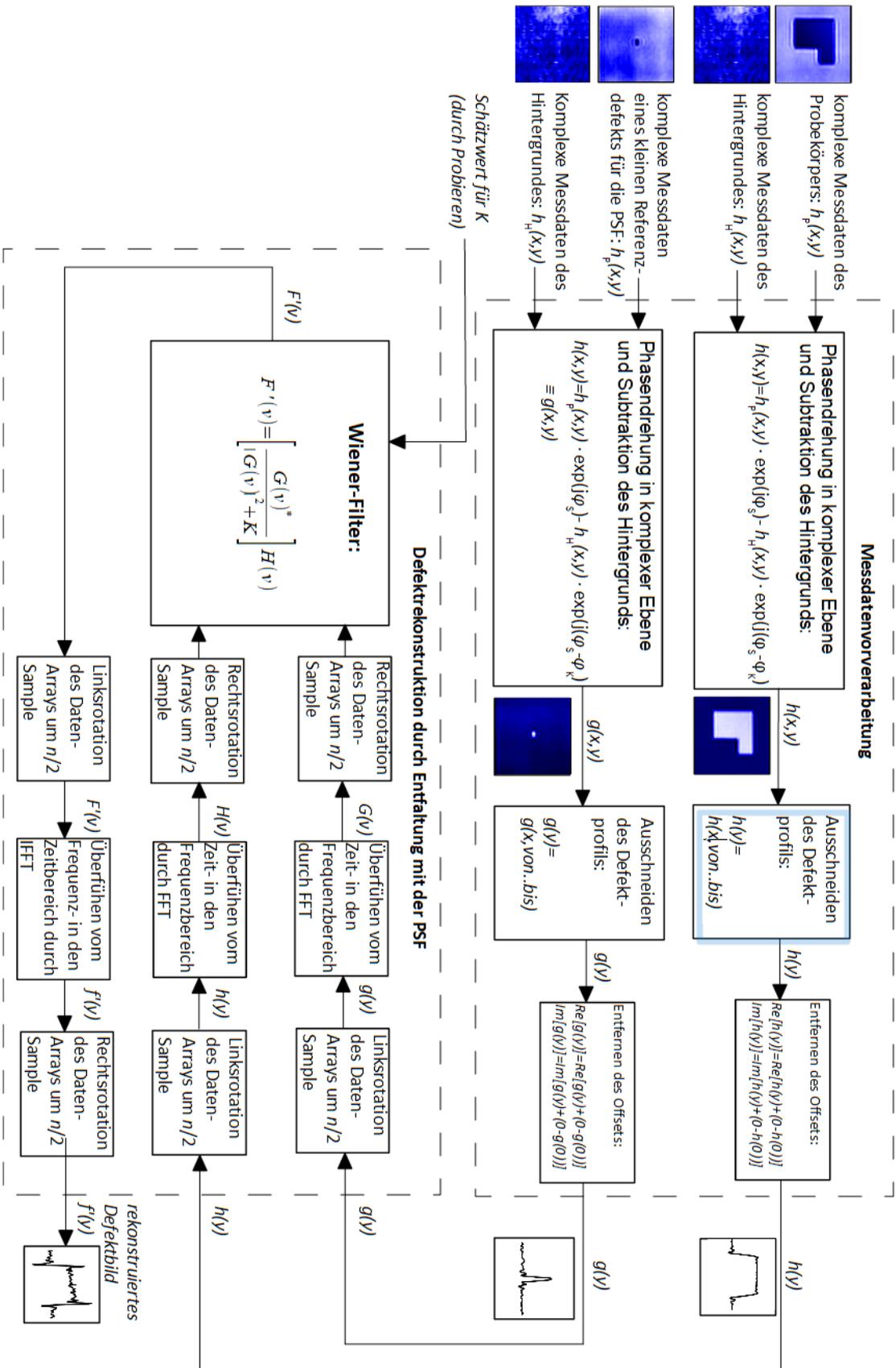


Abbildung 48: Blockscheema der Messdatenverarbeitung

6. Bestimmung der Punktspreizfunktion

6.1. Methoden zur Bestimmung der Punktspreizfunktion

Die Bestimmung der Punktspreizfunktion des Messsystems stellt ein Problem dar. Wie in Kapitel 4.7. erwähnt, ist die PSF die Antwort des Messsystems auf eine zweidimensionale Deltafunktion als Punktquelle.

$$h(x, y) = g(x, y) \equiv PSF(x, y), \text{ für } f(x, y) = \delta(x, y) \quad (\text{Gleichung 61})$$

Der Absolutwert der Fourier-transformierten komplexen PSF ist die Modulationstransferfunktion MTF.

$$|\mathcal{F}[PSF(x, y)]| = MTF(u, v) \quad (\text{Gleichung 62})$$

Theoretisch ist der Durchmesser dieser Punktquelle unendlich klein. Unendlich kleine Störstellen können jedoch weder hergestellt, noch vom Messsystem erfasst werden. In [17] werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die PSF eines abbildenden Systems trotzdem bestimmt werden kann. Das Buch bezieht sich zwar auf den optischen Bereich, die Techniken zur Bestimmung der PSF sollten theoretisch aber auch im Bereich der Mikrowellen einsetzbar sein. Der einfachste Ansatz, der oft in der Astronomie eingesetzt wird besteht darin, einen einzelnen Himmelskörper als Punkt abzubilden. Durch den großen Abstand des Himmelskörpers zum Beobachter ist die Winkelausdehnung in guter Näherung null, sodass das beobachtete Objekt nahezu einen δ -förmigen Impuls darstellt [18]. Daher entspricht das Bild des einzelnen Himmelskörpers der Apertur des optischen Systems und damit der PSF des Systems. Dieser Ansatz ist für die im Projekt verwendete Messanordnung aufgrund des geringen Messabstands und der geringen Stärke des Reflexionssignals bei kleinen Defekten jedoch nur bedingt geeignet. Trotzdem wurde auch diese Methode getestet. Dazu wurde das Defektbild des Prüfkörper 8, der den kleinsten mit der Hohlleiterantenne detektierbaren Defekt darstellte, als Punktspreizfunktion für andere Defekte verwendet. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 6.2.2. zu sehen.

Eine andere Methode die PSF messtechnisch zu ermitteln besteht darin, die Antwort des Messsystems auf einen Liniendefekt zu bestimmen. Eine Linie entlang der X-Achse eines Koordinatensystems kann wie in Gleichung 63 mathematisch als δ -Funktion in x-Richtung und als Konstante in y-Richtung dargestellt werden.

$$h(x, y) \equiv LSF(x, y) = f(x, y) * g(x, y) = [\delta(x)1(y)] * PSF(x, y) \quad (\text{Gleichung 63})$$

Das Ergebnis der Faltung der Linienfunktion mit einer PSF ist in Abbildung 49 dargestellt.

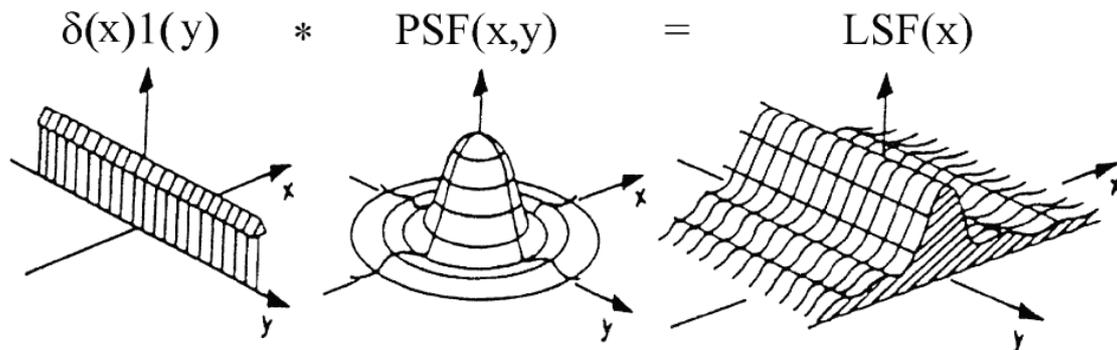


Abbildung 49: LSF als zweidimensionale Faltung einer Linienquelle mit einer PSF [17 S.72].

Diese LSF stellt einen Schnitt durch die PSF entlang der Y-Achse dar. Andere Schnittrichtungen können durch eine entsprechende Drehung der Linienfunktion im Koordinatenraum ermittelt werden.

$$LSF(x) = PSF(u, 0) \quad (\text{Gleichung 64})$$

Aber auch ein theoretisch unendlich schmaler Liniendefekt ist in der Praxis schwierig zu fertigen. Ein praktisch umsetzbarer Ansatz für die Bestimmung der Punktspreizfunktion einer Messanlage führt über die Messung der in Abbildung 50 dargestellten Kantenpreizfunktion ESF (engl. Edge Spread Function). Dazu wird eine scharfe Kante vermessen, welche mathematisch eine Sprungfunktion darstellt.

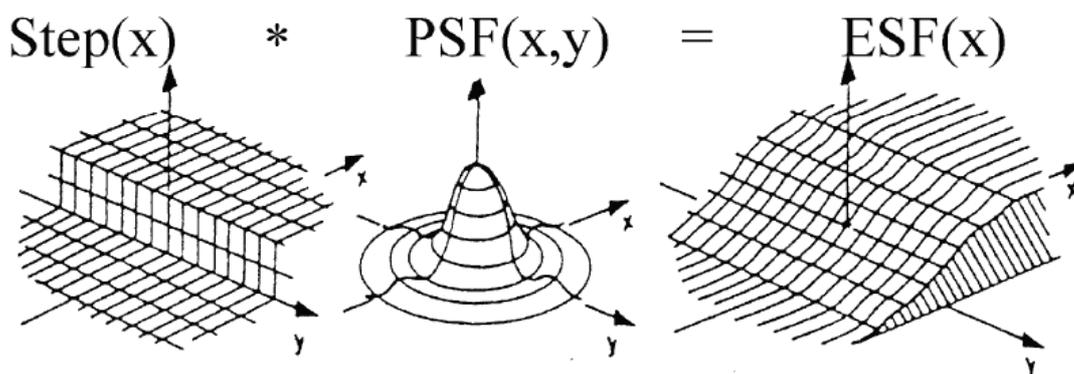


Abbildung 50: ESF als zweidimensionale Faltung einer Stufenquelle mit einer PSF [17 S.74].

$$h(x, y) \equiv ESF(x, y) = [f_{step}(x)1(y)] * PSF(x, y) = \int_{-\infty}^x LSF(x') dx' \quad (\text{Gleichung 65})$$

$$f_{step} = \begin{cases} 1 & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases}$$

Durch die Ableitung der ESF orthogonal zur Kante

$$LSF(x) = \frac{d}{dx} ESP(x) \quad (\text{Gleichung 66})$$

kann die LSF bestimmt werden, wie Abbildung 51 zeigt [17 S.75].

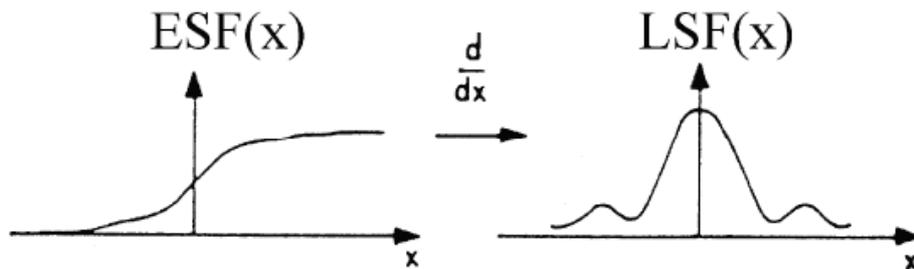


Abbildung 51: Die erste Ableitung der ESF ergibt die LSF [17 S.75].

Die LSF stellt nach Gleichung 64 wiederum einen eindimensionalen Schnitt durch die PSF dar, der orthogonal zur Kante ausgerichtet ist. Die Ergebnisse, die mit dieser Methode erzielt wurden, sind in Abschnitt 6.2.3. dargestellt.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, die Messung eines Defektbildes mit einer bekannten Objektfunktion $f(x,y)$ zu entfalten, um auf diese Weise die Punktspizfunktion zu berechnen. Aus Gleichung 50 folgt, dass sich die PSF bei bekanntem $f(x,y)$ mit

$$G(x, y) = \frac{H(x, y)}{F(x, y)} \quad (\text{Gleichung 67})$$

ermitteln lässt. Das Prinzip dieses Verfahrens ist in Abbildung 52 dargestellt.

Für die Entfaltung wird der im Abschnitt 4.9.2. vorgestellte Wiener-Filter verwendet. Die Schwierigkeit dieses Verfahrens liegt darin, die Ortsfunktion des Defekts $f(x,y)$ künstlich zu erzeugen und möglichst genau auf das Messergebnis $h(x,y)$ auszurichten. Außerdem wirken sich zufällige Messstörungen wie Rauschen oder Schief lagen in der Messebene auf das Ergebnis und damit auf die mit dieser Methode ermittelte PSF aus. Die Ergebnisse der Bildrestaurierung mit dieser Methode werden in Abschnitt 6.2.4. vorgestellt.

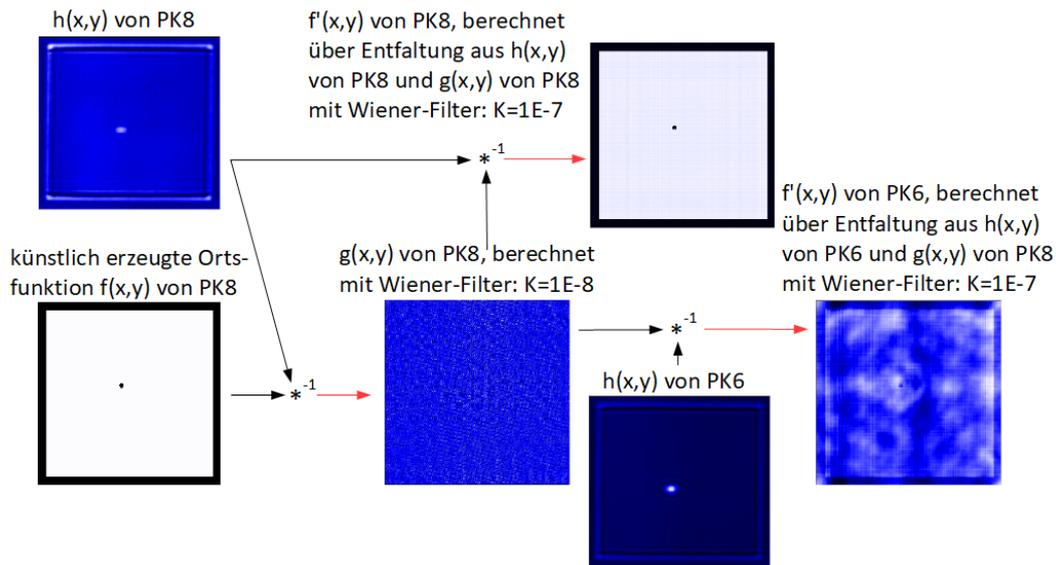


Abbildung 52: Prinzip der Generierung einer PSF aus Messdaten und einem abgeschätzten idealen Defektbild sowie die Anwendung dieser PSF auf einen Defekt abweichendem Durchmessers.

6.2. Experimentelle Bestimmung der Punktstreifungsfunktion

6.2.1. Vorbereitung und Vorverarbeitung der Messdaten

Im Abschnitt 6.1. wurden einige Methoden für die Erzeugung der für die Bildrekonstruktion notwendigen Punktstreifungsfunktionen vorgestellt. Diese werden nun mit Mess- und Simulationsdaten überprüft. Dafür war zuerst eine geeignete Datenbasis zu schaffen. Deshalb wurden die Probekörper 8 mit der Bohrung mit 3 mm Durchmesser, der Probekörper 6 mit der Bohrung mit 10 mm Durchmesser, der Probekörper 10 mit dem L-förmigen Defekt sowie der Messhintergrund ohne Probekörper mit der im Abschnitt 5.3. vorgestellten Messanlage vermessen. Als Antenne wurde die in Abbildung 26 gezeigte offene Hohlleiterantenne verwendet. In der nachfolgenden Messdatenverarbeitung wurde auf die in Abschnitt 5.3.2. vorgestellte Weise von der jeweiligen Messung mit Probekörper, der mit einem Korrekturwinkel von $\varphi_K = -30^\circ$ in der komplexen Ebene gedrehte Hintergrund subtrahiert. Die Messdaten der Probekörpermessungen wurden zusätzlich mit dem Winkel φ_S so angepasst, dass der Realteil im zentralen Haupt-Peak seinen Maximalwert annimmt.

$$h(x,y)_{PK6} \equiv h_{P_PK6} e^{j216^\circ} - h_H e^{j(-30^\circ)}$$

$$h(x,y)_{PK8} \equiv h_{P_PK8} e^{j196^\circ} - h_H e^{j(-30^\circ)}$$

$$h(x,y)_{PK10} \equiv h_{P_PK10} e^{j125^\circ} - h_H e^{j(-30)^\circ}$$

Diese Angleichung der Phasenlage der Messdaten über den Winkel φ_s hat den Vorteil, dass die Real- und Imaginärteile von Messdaten mit gleicher Phasenlage besser miteinander verglichen werden können. Wenn die Phase von $h(x,y)$ und $g(x,y)$ so gedreht wurde, dass beide Defekte im Realteil ein in positive Richtung zeigendes Profil aufweisen, wird auch der durch die Entfaltung rekonstruierte Defekt in seinem Realteil positiv dargestellt, wie Abbildung 53 verdeutlicht. Dann muss auch keine weitere Phasenkorrektur vorgenommen werden, um die Phase des rekonstruierten Defekts an die der Eingangsdaten anzugleichen.

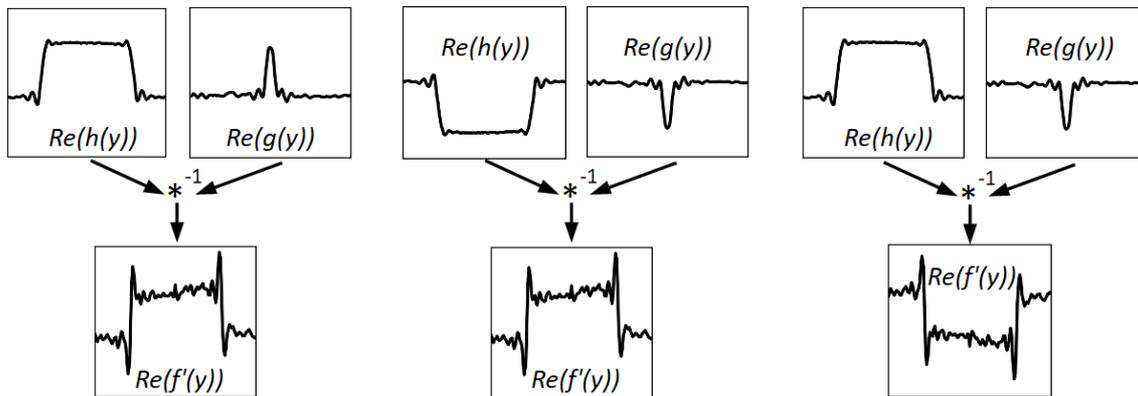


Abbildung 53: Darstellung der resultierenden Phase des Realteils einer Entfaltung (unten) bei unterschiedlichen Phasen der Eingangsdaten (oben).

In dieser Arbeit wird vorzugsweise nur der Realteil der jeweiligen Messungen betrachtet, da sich bei den Entfaltungen gezeigt hat, dass die Darstellung des Realteils anstatt des Absolutwertes für die restaurierten Defektprofile vorteilhaft ist. Bei der Anzeige des Absolutwertes werden die Vorzeichen aller negativen Signalanteile geändert. So werden die Flanken des restaurierten Defektprofils teilweise verfälscht und es gibt oft keinen klaren Nulldurchgang an den Seiten des Defektprofils mehr. In Abbildung 54 ist zum Vergleich sowohl der Realteil als auch der Absolutwert einer Entfaltung des L-förmigen Defektprofils aus dem Probekörper 10 mit dem 3-mm-Defekt aus dem Probekörper 8 dargestellt. Man erkennt, dass das tatsächliche Defektprofil in den Randbereichen mit dem Realteil besser dargestellt werden kann.

Für diese Arbeit wurde die Angleichung der Phasenlage von $h(x,y)$ und $g(x,y)$ händisch vorgenommen. Dafür wurde mittels eines Cursors ein Bildpunkt Defektbild markiert, der ungefähr in der Mitte des Defekts lag. Anschließend wurden die komplexen Messdaten mit dem im Abschnitt 5.3.2. beschriebenen Phasenwinkel φ_s in einer LabVIEW-Funktion in 1° Schritten so lange in der komplexen Ebene gedreht, bis der Realteil der Messdaten an diesem Bildpunkt einen Maximalwert erreicht hatte.

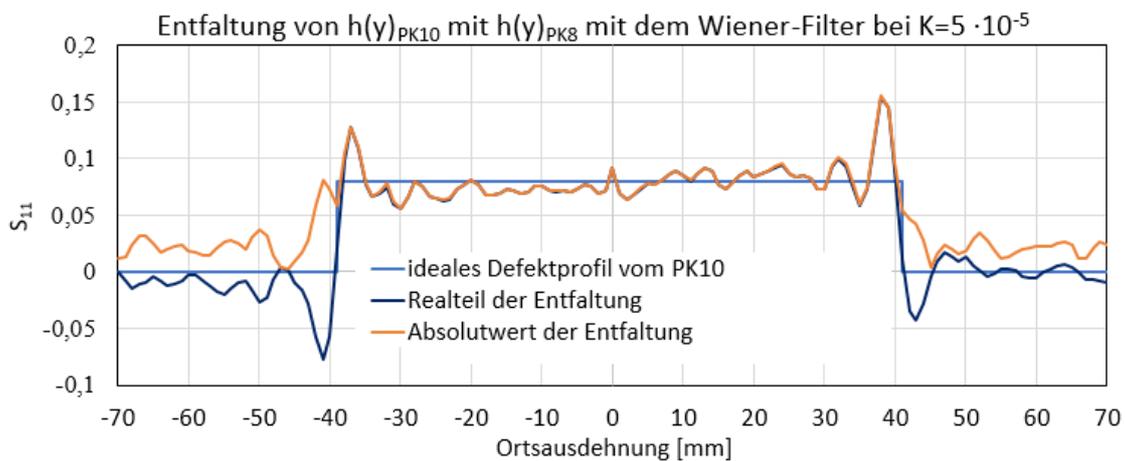


Abbildung 54: Darstellung des Realteils und des Absolutwertes einer Entfaltung.

Anschließend wurde kontrolliert, ob der jeweilige Defekt nach der Phasendrehung im Realteil ein positives Defektprofil aufwies und wenn nötig, noch ein wenig nachjustiert. Diesen Prozess vollautomatisch umzusetzen, ist schwierig. Ein entsprechendes Programm müsste dazu Defekte immer klar von zum Beispiel Randerscheinungen, die teilweise größere Amplituden als die Defekte in den Messwerten annehmen, unterscheiden können. Das ist manchmal selbst für das menschliche Auge schwierig. Wenn in der Praxis vollautomatische Bildrekonstruktionen für unbekannte Defekte vorgenommen werden sollen, kann alternativ aber immer noch der Absolutwert der Messdaten und der Entfaltung betrachtet werden, denn dieser wird durch die Phasenlage der Messdaten nicht beeinflusst. Dann muss man allerdings in Kauf nehmen, dass die Flanken der Defekte eventuell nicht mehr so gut erkennbar sind, wie in Abbildung 54 gezeigt wurde.

Der Realteil der jeweiligen Probekörpermessung ist in Abbildungen 55 bis 57 zu sehen. Die Defektrekonstruktionen werden in dieser Arbeit nicht für das komplette zweidimensionale Defektbild vorgenommen, sondern für eindimensionale Schnitte durch die Defekte. Diese in der Arbeit „Defektprofil“ genannten Schnitte lassen sich einfacher verarbeiten, denn wegen der nicht rotationssymmetrischen Feldverteilung der Antenne wäre die zweidimensionale PSF ebenfalls nicht rotationssymmetrisch. Außerdem benötigen Feldsimulationen im 3D-Raum eine extrem lange Zeit, wenn in der Simulation das komplette Objekt abgefahren werden soll. Arbeitet man aber mit den Defektprofilen, muss man nur eine Fahrt entlang der Schnittebene simulieren und kann so die Zeit, die die Simulation benötigen, drastisch verkürzen. In den hier gezeigten Messdaten wurde zu diesem Zweck jeweils ein Schnittprofil von 141 mm Länge parallel zur Y- und X-Achse mittig durch die Defekte gelegt. Die Schnitte wurden so angesetzt, dass sich das Zentrum des Defekts möglichst in der Mitte des jeweiligen Schnitts befindet.

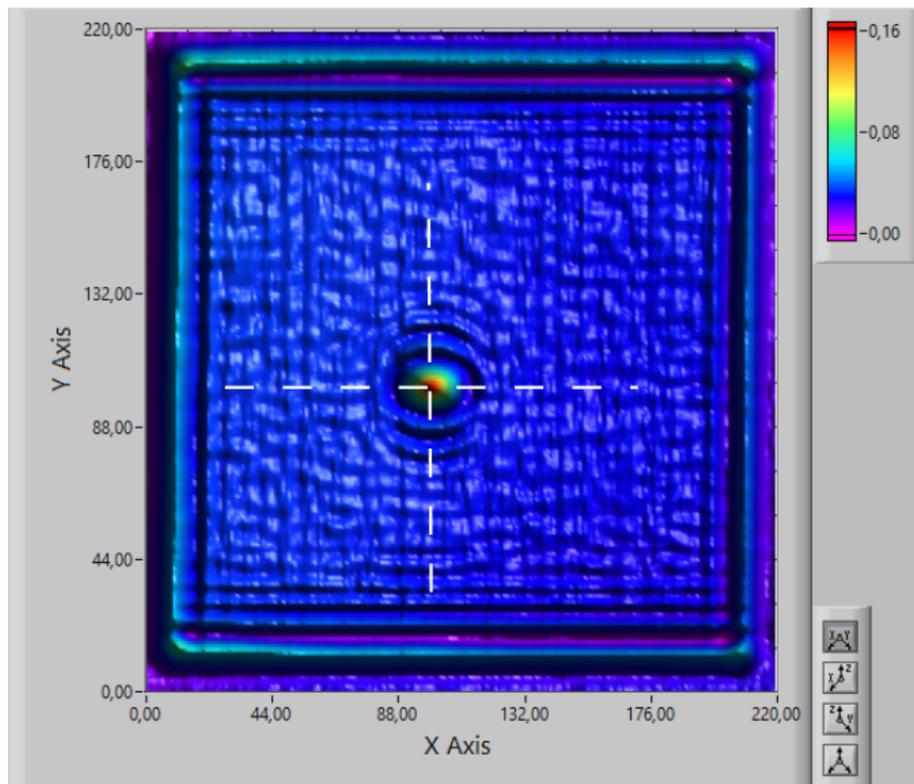


Abbildung 55: Um 216° gedrehter Realteil der Vermessung vom Probekörper 6 mit subtrahiertem, um -30° gedrehter Hintergrundmessung.

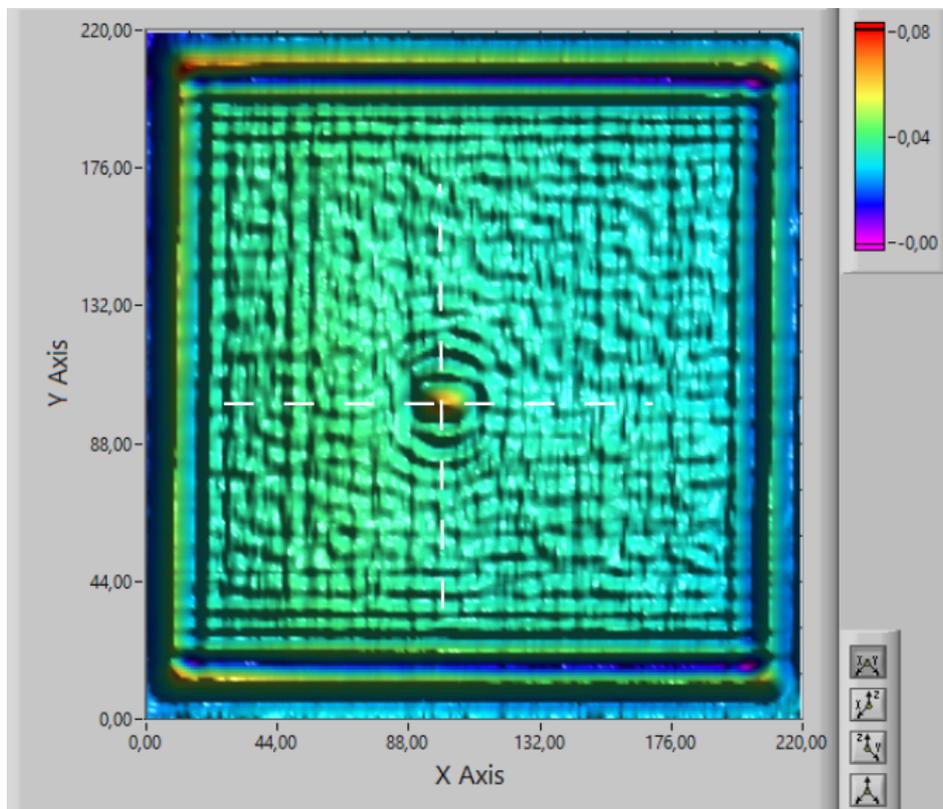


Abbildung 56: Um 196° gedrehter Realteil der Vermessung vom Probekörper 8 mit subtrahiertem, um -30° gedrehter Hintergrundmessung.

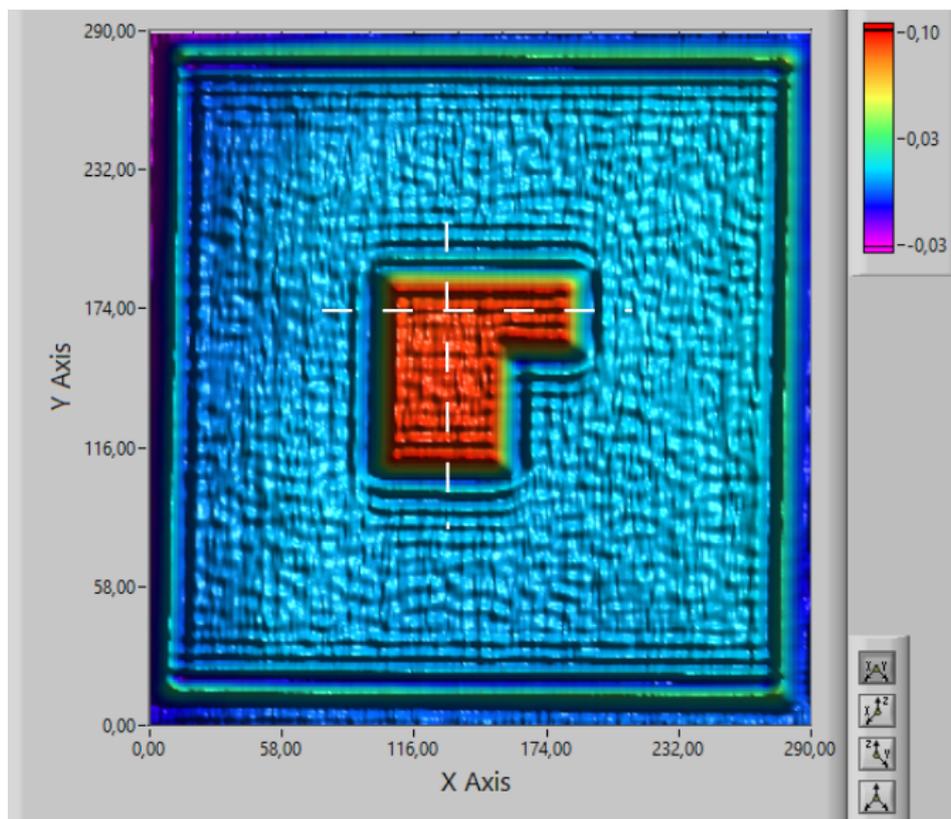


Abbildung 57: Um 125° gedrehter Realteil der Vermessung vom Probekörper 10 mit subtrahiertem, um -30° gedrehter Hintergrundmessung.

In den Abbildungen 55 bis 57 wurden die folgenden Schnittkoordinaten mit gestrichelten, weißen Linien skizziert.

$$h(x)_{\text{PK6}} \equiv h(29..169, 101)_{\text{PK6}}$$

$$h(y)_{\text{PK6}} \equiv h(99, 31..171)_{\text{PK6}}$$

$$h(x)_{\text{PK8}} \equiv h(30..170, 101)_{\text{PK8}}$$

$$h(y)_{\text{PK8}} \equiv h(99, 31..171)_{\text{PK8}}$$

$$h(x)_{\text{PK10}} \equiv h(74..214, 173)_{\text{PK10}}$$

$$h(y)_{\text{PK10}} \equiv h(131, 76..216)_{\text{PK10}}$$

Die Schnittprofile der Defekte mit 3 mm (PK8), 10 mm (PK6) und 80 mm (PK10) Durchmesser sind in der Abbildung 58 zu sehen. Vergleicht man die Defektprofile entlang der Y- und X-Achse eines Probekörpers, lässt sich die unterschiedliche axiale Ortsauflösung der offenen Hohlleiterantenne gut erkennen. Das Profil entlang der Y-Achse war parallel zur schmalen Seite des Hohlleiters und damit auch parallel zum E-Feld ausgerichtet. Das Profil entlang der X-Achse war hingegen parallel zur breiten Seite des Hohlleiters und damit orthogonal zum E-Feld orientiert. Man erkennt, dass die offene Hohlleiterantenne entlang der Y-Achse eine bessere Ortsauflösung aufweist, da die Defektprofile dort etwas schmaler dargestellt werden. Gleichzeitig sind aber auch die Beugungserscheinungen entlang der Y-Achse ausgeprägter als entlang der X-Achse.

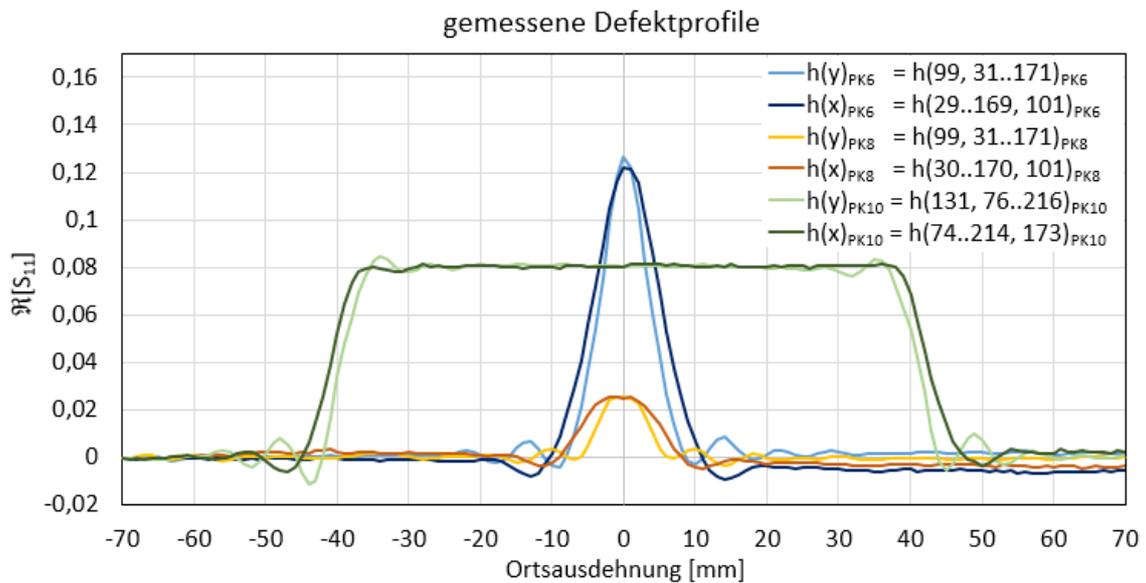


Abbildung 58: Dargestellt ist der Realteil der 141 mm breiten Ausschnitte aus den Querschnitten mittig durch die in den Abbildungen 55 bis 57 abgebildeten Defekte jeweils in den Orientierungen entlang der X- und Y-Achse.

Zusätzlich zu den Messungen wurden die Reflexionsprofile der Defekte in den Probekörpern 6, 8 und 10 mit der Simulationssoftware COMSOL rechnerisch ermittelt. Die Simulationen wurden mit der offenen Hohlleiterantenne in einem 3D-Raum durchgeführt. Aufgrund der langen Simulationszeiten wurde nur eine Messfahrt entlang der Y-Achse simuliert. In Abbildung 59 sind die Ergebnisse der Simulationen im Vergleich zu den Messdaten dargestellt.

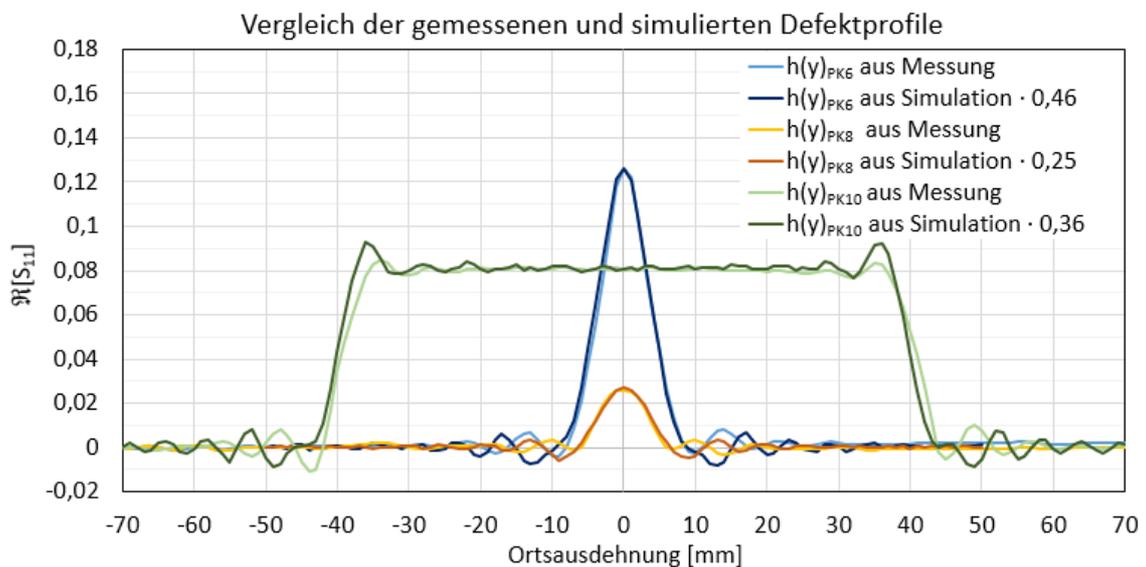


Abbildung 59: Vergleich der simulierten Defektprofile mit den an den Probekörpern 6, 8 und 10 entlang der Y-Achse gemessenen Daten. Dargestellt sind die Realteile der jeweiligen Messung.

Die Simulationsdaten wurden mit einem Faktor auf den Maximalwert der Messdaten normiert, um einen Vergleich zu ermöglichen. Beim Vergleich der simulierten

Defektprofile mit den gemessenen Defektprofilen fällt auf, dass sich die Phasenlage der Beugungsmuster am Defektrand unterscheidet. Die Phasenlage des Haupt-Peaks scheint allerdings übereinzustimmen. Die Phasenlage des Beugungsmusters kann nur durch eine Variation des Drehwinkels φ_s angepasst werden. Wird dieser Drehwinkel geändert, ändert sich allerdings auch die Phasenlage des Haupt-Peaks, wie Abbildung 60 zeigt.

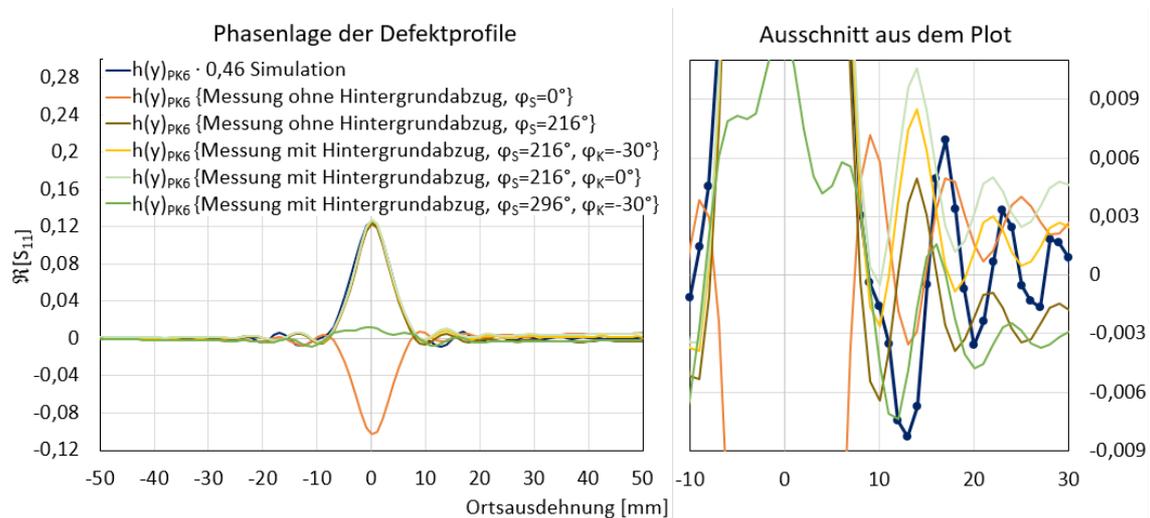


Abbildung 60: Vergleich der Phasenlage des gemessenen Defektprofils des Defekts mit 10 mm Durchmesser im Vergleich zur Phasenlage in der Simulation.

Da der Haupt-Peak in Mess- und Simulationsdaten phasengleich ist, liegt keine Verfälschung der Phasenlage durch die Drehung der Messdaten in der komplexen Ebene vor. Die Ursache dieser Abweichungen muss demzufolge entweder in einer leicht abweichenden Sendefrequenz des Radar-Moduls, einem leicht abweichenden Messabstand oder im genutzten Simulationsmodell verortet sein. Die in der Abbildung 58 dargestellten Defektprofile der Messdaten werden als Datengrundlage für die Entfaltungen in den nachfolgenden Abschnitten genutzt.

6.2.2. Ermittlung der PSF mittels kleinem Punktdefekt

Der Aluminiumzylinder mit 3 mm Durchmesser des Probekörper 8 ist der kleinste, mit der Messanlage messbare Defekt. Darum wurde dessen Defektprofil in diesem Abschnitt als Punktspreizfunktion für die Rekonstruktion der Defekte aus den Probekörpern 6 und 10 verwendet. Der Defekt mit 3 mm Durchmesser im PK8 stellt allerdings keine ideale Punktquelle dar. Deswegen ist mit vermehrt auftretenden Artefakten nach der Bildrekonstruktion zu rechnen. Die in Abbildung 58 gezeigten Daten wurden mit dem Wiener-Filter nach Gleichung 58 entfaltet.

In Gleichung 68 ist exemplarisch die Entfaltung für den Probekörper 6 entlang der Y-Achse angegeben.

$$f'(y)_{PK6} = \mathcal{F}^{-1} \left[\left[\frac{H(y)_{PK8}^*}{|H(y)_{PK8}|^2 + 5 \cdot 10^{-5}} \right] H(y)_{PK6} \right] \quad (\text{Gleichung 68})$$

Die das geschätzte Verhältnis von Rausch zur Signalleistung repräsentierende Konstante K wurde so gewählt, dass das Ergebnis der Entfaltung am ehesten dem erwarteten, idealen Defektprofil vom Probekörper 6 entsprach. Ein guter Kompromiss zwischen möglichst steilen Flanken und gleichzeitig kleinen Artefakten stellte sich im Bereich zwischen $1 \cdot 10^{-4} < K < 1 \cdot 10^{-5}$ ein. Die Amplitude des idealen Defektprofils für den Probekörper 6 wurde willkürlich gewählt, da beim Defektprofil lediglich die räumliche Ausdehnung des zu detektierenden Defekts ausschlaggebend ist. Damit man das restaurierte Defektprofil besser mit dem ursprünglichen Defektprofil vergleichen kann, wurde das Ergebnis der Entfaltung nachträglich noch mit einem Skalierungsfaktor multipliziert, um die Amplituden der Daten aneinander anzugleichen. Außerdem wurde das Grundlevel der Daten durch die Addition eines entsprechenden Offsets in den Nullpunkt verschoben.

Das restaurierte Defektprofil vom Prüfkörper 6 entlang der Y-Achse ist in Abbildung 61 und entlang der X-Achse in Abbildung 62 dargestellt.

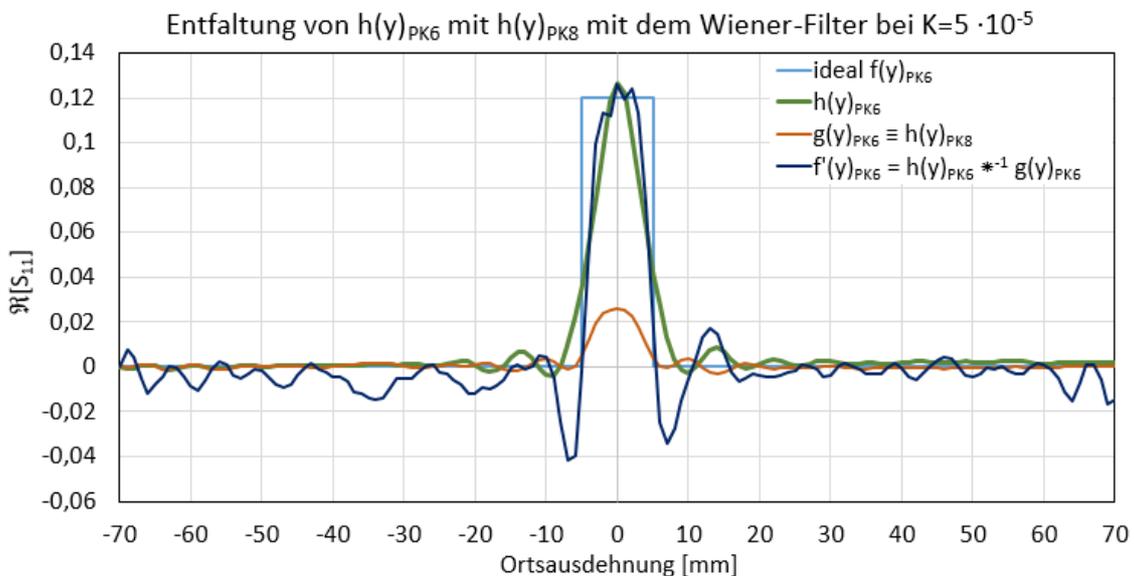


Abbildung 61: Realteil der Entfaltung von $h(y)_{PK6}$ und $h(y)_{PK8}$ für das Schnittprofil entlang der Y-Achse.

In Abbildung 61 ist zu sehen, dass die Entfaltung für den Schnitt entlang der Y-Achse bezüglich ihrer räumlichen Ausdehnung eine gute Übereinstimmung mit dem idealen Defektprofil liefert. Die Abweichung der Ortsausdehnung des gemessenen Defektprofils

vom idealen Defektprofil betrug bei vor der Entfaltung ca. 8 mm. Durch die Entfaltung konnte diese Abweichung auf nahezu Null reduziert werden. Die räumliche Ausdehnung kann nach der Defektrekonstruktion genauer bestimmt werden, da der Defekt im rekonstruierten Bild steilere Flanken aufweist. Die Entfaltung führt allerdings auch Artefakte ein, die an den Kanten des Defektprofils besonders stark sind. Diese Artefakte wirken dem Ziel, ein möglichst scharfkantiges Defektprofil abzubilden, entgegen. Die Artefakte sind umso stärker ausgeprägt, je kleiner die Konstante K im Wiener-Filter gewählt wird. Der Grund hierfür ist, dass der Wiener-Filter bei einer sehr kleinen Konstante K hohe Frequenzanteile nicht so stark filtert. Für hohe Frequenzen wird allerdings das Rauschen überproportional verstärkt und wirkt sich so negativ auf das Ergebnis aus. Zu groß sollte K jedoch auch nicht gewählt werden, da sonst zu viele Informationen verloren gehen und sich das Entfaltungsergebnis so immer mehr dem Ausgangsbild annähert. Die starken Artefakte zeigen außerdem, dass die verwendete PSF nur eine Näherung der idealen PSF des Mess szenarios ist.

Das Ergebnis für die Entfaltung entlang der X-Achse in Abbildung 62 weist noch eine Abweichung von ca. 6 mm vom idealen Defektprofil auf. Trotzdem wird die Ortsausdehnung nach der Rekonstruktion um fast 6 mm genauer angezeigt.

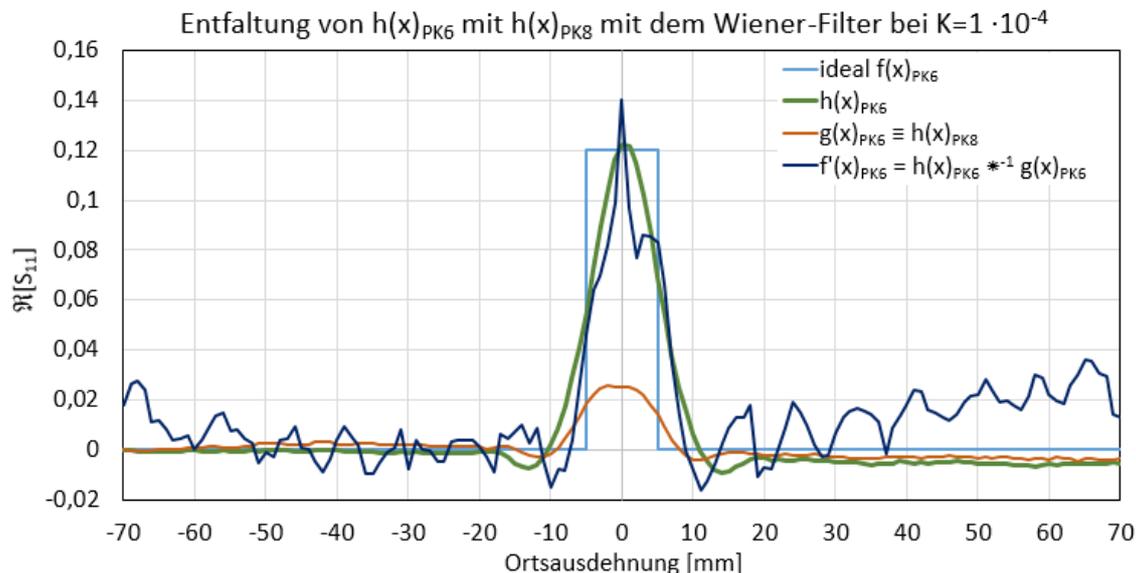


Abbildung 62: Realteil der Entfaltung von $h(x)_{PK6}$ und $h(x)_{PK8}$ für das Schnittprofil entlang der X-Achse.

Der Defekt wird aufgrund der schlechteren Ortsauflösung der offenen Hohlleiterantenne entlang der X-Achse in der unverarbeiteten Messung stark ausgedehnt und weicht mit ca. 12 mm stark von der tatsächlichen Ortsausdehnung ab. In der Messung war außerdem die Messebene entlang der X-Achse leicht schief aufgenommen. Diese Schiefelage kann man am leichten Abfall des Grundsignals auf der rechten Seite der Messungen

sehen. Wegen der schlechteren Qualität der Messung für diese Achse treten im Vergleich zur Entfaltung entlang der Y-Achse stärkere Artefakte auf.

Die Defekte in den Probekörpern 6 und 8 weisen eine ähnliche Geometrie auf. Um zu überprüfen, ob sich eine punktförmige PSF auch auf größere Defekte anwenden lässt, wurde der 8 cm große L-förmige Defekt des Probekörper 10 verwendet. Die Ergebnisse der Defektrekonstruktion sind in den Abbildungen 63 und 64 dargestellt.

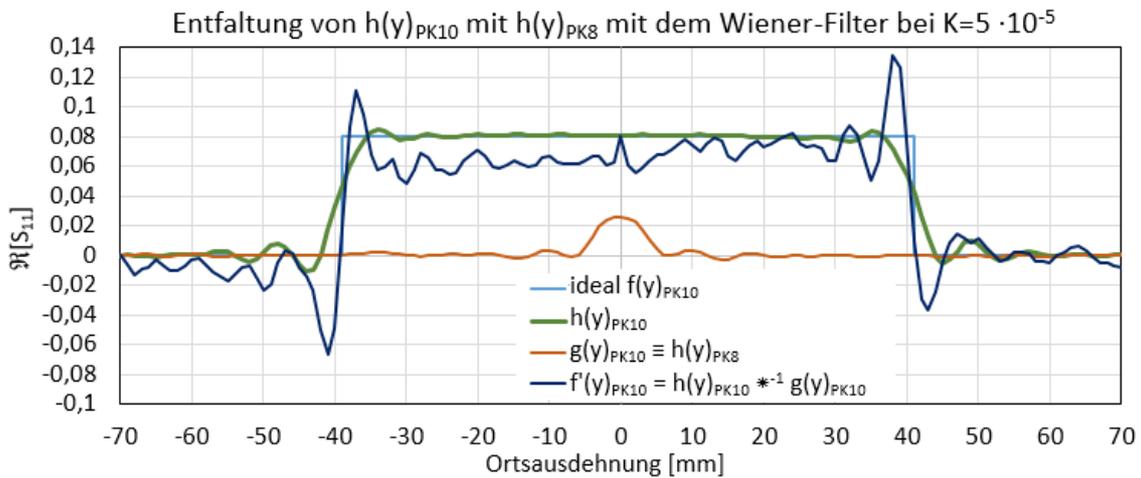


Abbildung 63: Realteil der Entfaltung von $h(y)_{PK10}$ und $h(y)_{PK8}$ für das Schnittprofil entlang der Y-Achse.

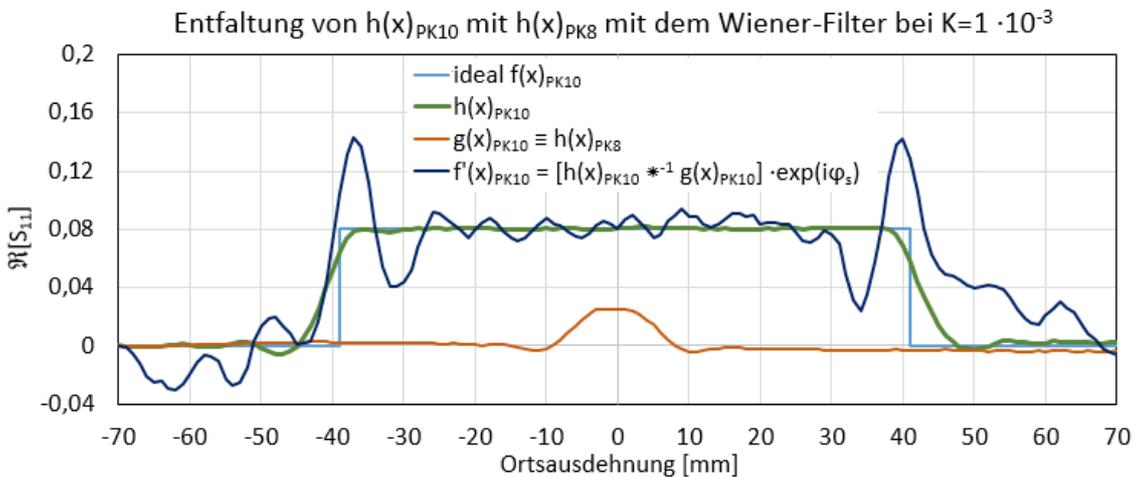


Abbildung 64: Realteil Entfaltung von $h(x)_{PK10}$ und $h(x)_{PK8}$ für das Schnittprofil entlang der X-Achse mit einer anschließenden Phasendrehung um $\varphi_S=70^\circ$.

Auch bei dem im Verhältnis zur genutzten PSF viel größeren Defekt werden die Flanken des Defektprofils nach der Entfaltung steiler dargestellt. Das führt zu einer Verbesserung der örtlichen Abweichung von ca. 7 mm auf ca. 1 mm. Die schiefe Grundebene der Messung $h(x)_{PK8}$ verursacht eine starke Schiefelage des restaurierten Defektprofils $f'(x)_{PK10}$. In der Abbildung 64 wurde diese Schiefelage durch eine erneute Phasendrehung von $f'(x)_{PK10}$ um $\varphi_S = 70^\circ$ ausgeglichen. Diese Korrektur ist allerdings nur möglich, wenn

man sich als Ergebnis nur den Realteil von $f'(x)_{PK10}$ anzeigen lässt. Auf den Absolutwert hat die Phasendrehung keinen Einfluss wie in Abbildung 65 zu sehen ist.

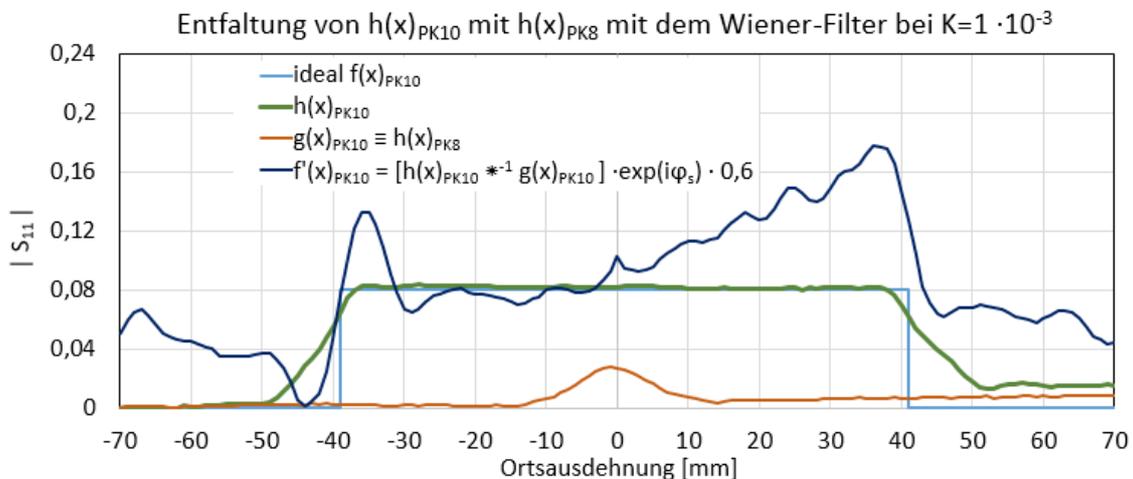


Abbildung 65: Absolutwert Entfaltung von $h(x)_{PK10}$ und $h(x)_{PK10}$ für das Schnittprofil entlang der X-Achse mit einer anschließenden Phasendrehung um 70° .

Der Versuch zeigt, dass das Rekonstruktionsverfahren mittels Entfaltung mit einer passenden PSF die Ortsausdehnung des Defektes genauer darstellen kann. Auf die an den Defektkanten auftretenden Beugungseffekte hat die Entfaltung allerdings eher einen nachteiligen Einfluss, da die erzeugten Artefakte in der Regel noch größere Amplituden als die ursprünglichen Beugungsmuster aufweisen. Außerdem ist der Erfolg der Rekonstruktion sehr stark von der Qualität der Messdaten abhängig. Schon kleine Schief lagen der Messebene oder ein verstärktes Rauschen kann das Ergebnis der Entfaltung stark beeinflussen. Die Bildrekonstruktion mit einer nicht perfekt auf die jeweilige Messung abgestimmten PSF führt zu starken Artefakten im restaurierten Bild, was der angestrebten scharfen Kantendarstellung der Defekte entgegenwirkt. Die Wahl der Konstante K im Wiener-Filter hat einen starken Einfluss auf die Form des restaurierten Defektprofils und stellt damit einen weiteren zu optimierenden Parameter für die Bildrekonstruktion dar.

Zur Überprüfung der experimentellen Ergebnisse wurden die Entfaltungen mit den aus den 3D-Feldsimulationen ermittelten Defektprofilen wiederholt. In Abbildung 66 ist exemplarisch die Rekonstruktion des L-förmigen Defekts mit 80 mm Durchmesser dargestellt. Generell zeigen die Entfaltungen von gemessenen und simulierten Daten ähnliche Ergebnisse. Auch bei der Entfaltung der Simulationsdaten, bei der störende äußere Einflüsse des Messsystems ausgeschlossen werden können, verbleiben nach der Entfaltung Artefakte im Bild.

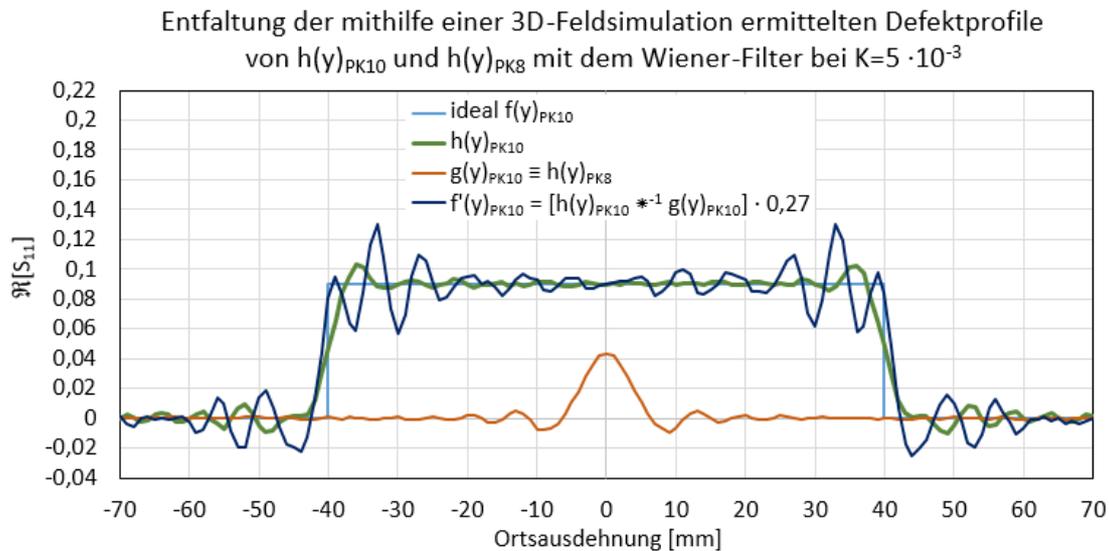


Abbildung 66: Realteil der Entfaltung der aus 3D-Feldsimulationen gewonnenen Defektprofile $h(y)_{PK10}$ und $h(y)_{PK8}$.

6.2.3. Ermittlung der PSF mittels Ableitung der ESF

Wie im Abschnitt 6.1. ausgeführt, sollte sich eine PSF aus der Ableitung des Querschnitts einer Kantenmessung berechnen lassen. Nachfolgend wird daher aus der in Abbildung 57 dargestellten Messung die Kante des Defekts so ausgeschnitten, dass sie möglichst in der Mitte des Querschnitts liegt. Dieser $h(y)_{PK10_Kante}$ genannte Ausschnitt ist die in diesem Versuch verwendete ESF. Die Ableitung der ESF entlang der X- bzw. Y-Achse wird als PSF für die Rekonstruktion der Defekte genutzt. Die Koordinaten der restlichen Schnitte werden unverändert aus Abschnitt 6.2.1. übernommen.

$$h(x)_{PK6} \equiv h(29..169, 101)_{PK6}$$

$$h(y)_{PK6} \equiv h(99, 31..171)_{PK6}$$

$$h(x)_{PK10_Kante} \equiv h(34..174, 167)_{PK10}$$

$$h(y)_{PK10_Kante} \equiv h(128, 37..177)_{PK10}$$

$$h(y)_{PK10} \equiv h(74..214, 173)_{PK10}$$

$$h(y)_{PK10} \equiv h(131, 76..216)_{PK10}$$

Bei der Betrachtung der ESF, die in den Abbildungen 67 bis 70 rot dargestellt ist, fällt auf, dass die Beugungsmuster innerhalb des Defekts aus Aluminium eine kleinere Amplitude als im Polyethylen aufweisen. Generell ist bei den Messungen aufgefallen, dass sich die Beugungsmuster je nach Material, in dem sie sich ausbreiten, sowohl in Ihrer Amplitude als auch in der Position der Nebenmaxima leicht unterscheiden. Daher ist auch die erste Ableitung der ESF entlang der Y-Achse nicht spiegelsymmetrisch. Eine PSF sollte theoretisch jedoch spiegelsymmetrisch sein, da nur so sichergestellt ist, dass die PSF in jeder beliebigen Ausrichtung einer Defektkante angewendet werden kann.

In den Abbildungen 67 und 68 ist die Rekonstruktion des Defekts mit 10 mm Durchmesser aus dem Probekörper 6 mithilfe der 1. Ableitung der ESF vom Probekörper 10 mit dem 80 mm breiten Defekt dargestellt. Die Abbildung 67 zeigt das Ergebnis der Entfaltung für das entlang der Y-Achse gemessene Defektprofil vom Probekörper 6.

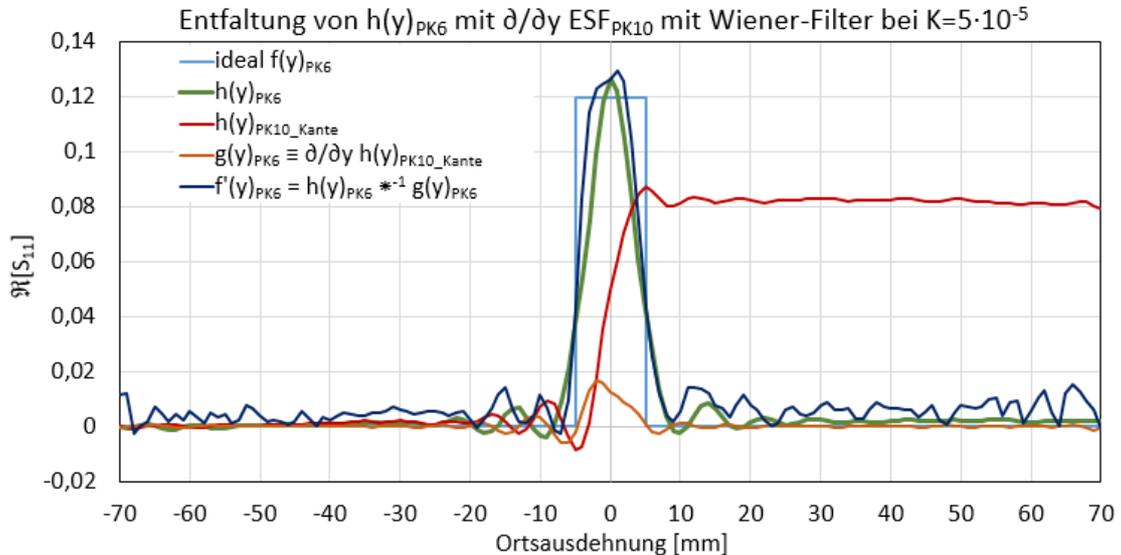


Abbildung 67: Realteil der Entfaltung von $h(y)_{PK6}$ und $\partial/\partial y[h(y)_{PK10_Kante}]$ für das Schnittprofil entlang der Y-Achse.

Es ist zu sehen, dass sich die Abweichung der Ortsausdehnung vom idealen Defektprofil nur leicht von 7 auf 6 mm verbessern ließ. Für das in Abbildung 68 dargestellte Defektprofil entlang der X-Achse ließ sich die Abweichung der Ortsausdehnung vom idealen Defektprofil von 11 mm auf ca. 8 mm verbessern.

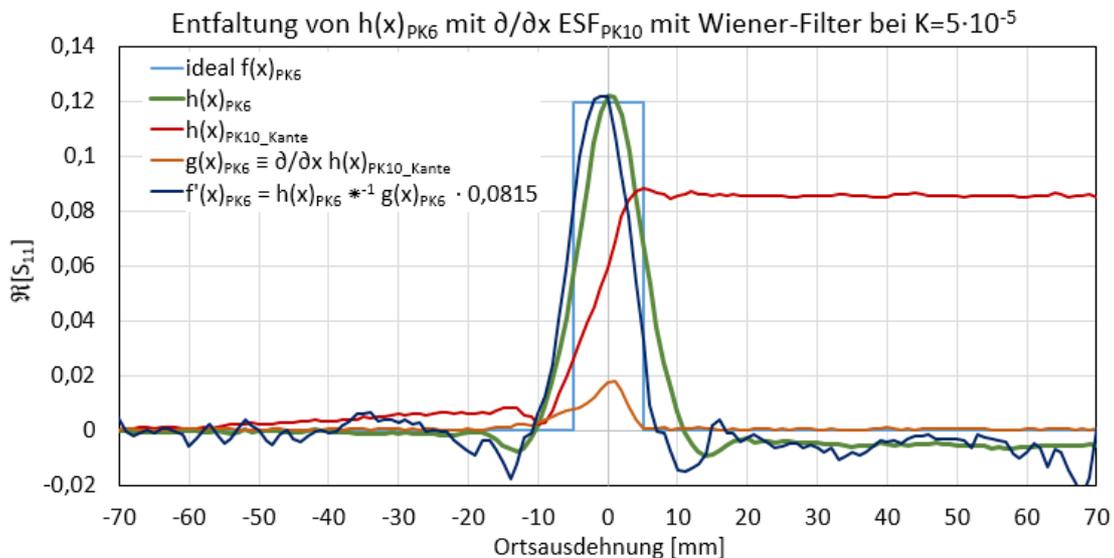


Abbildung 68: Realteil der Entfaltung von $h(x)_{PK6}$ und $\partial/\partial x[h(x)_{PK10_Kante}]$ für das Schnittprofil entlang der X-Achse.

Die Abbildungen 69 und 70 zeigen die Entfaltungen des 80 mm breiten L-förmigen Defekts aus dem Probekörper 10 mithilfe der 1. Ableitung der ESF vom Probekörper 10.

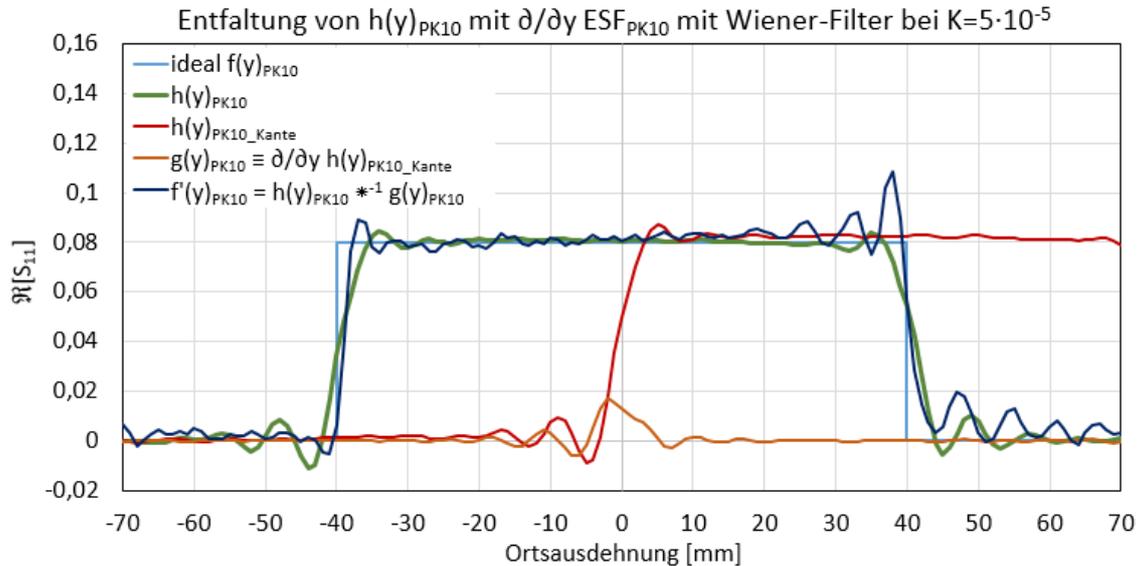


Abbildung 69: Realteil der Entfaltung von $h(y)_{PK10}$ und $\partial/\partial y[h(y)_{PK10_Kante}]$ für das Schnittprofil entlang der Y-Achse.

Für das Defektprofil in Abbildung 69 konnte die Abweichung vom idealen Defektprofil von 6 mm auf ca. 3 mm verbessert werden. Wobei das restaurierte Profil auf der rechten Seite aufgrund von Artefakten keinen Nulldurchgang aufweist und daher lediglich eine Schätzung zulässt.

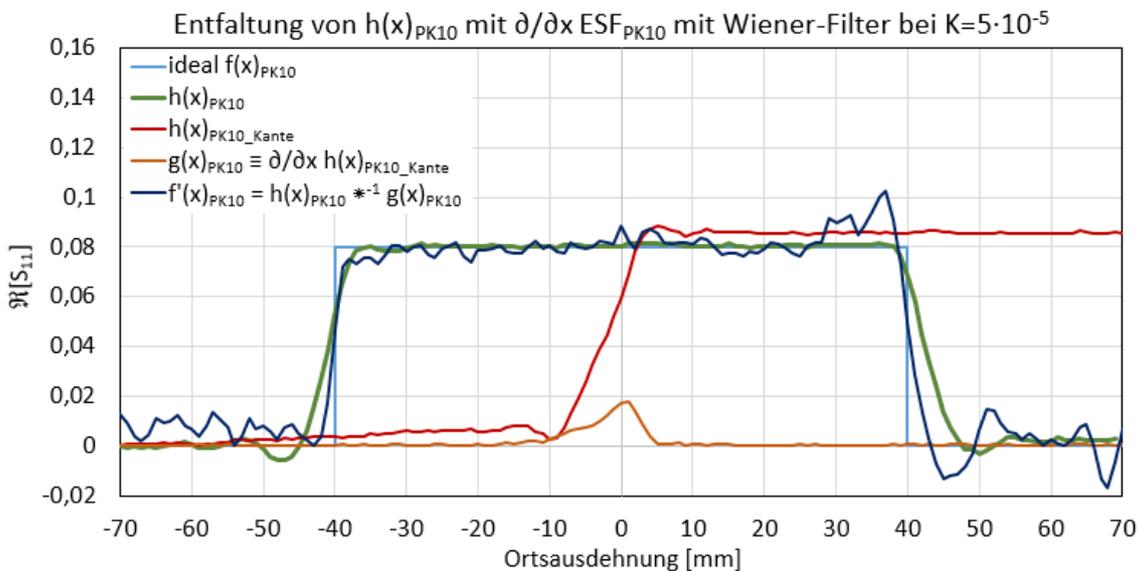


Abbildung 70: Realteil der Entfaltung von $h(x)_{PK10}$ und $\partial/\partial x[h(x)_{PK10_Kante}]$ für das Schnittprofil entlang der X-Achse.

Das Defektprofil entlang der X-Achse weist wesentlich steilere Flanken aus, als das Originalbild. Die Abweichung vom idealen Defektprofil konnte so von 12 mm auf 5 mm verbessert werden.

6.2.4. Ermittlung der PSF mittels bekanntem idealem Defektprofil

In diesem Abschnitt wird versucht, die passende Punktspreizfunktion für eine bestimmte Kombination aus Probekörper und Messsystem durch Entfaltung des Defektbildes mit einer bekannten Ortsfunktion des Defekts nach Gleichung 67 zu ermitteln. Mit dieser Methode sollte laut dem theoretischen Modell eine Ideale PSF ermittelt werden können. In der Praxis ist die Ortsfunktion des zu detektierenden Defekts in der Regel nicht bekannt. Deswegen soll in diesem Versuch geprüft werden ob es möglich ist, mithilfe dieser Methode eine ideale PSF für ein bestimmtes Messszenario mit einem bekannten Defekt zu ermitteln und diese dann auch auf andere Messszenarien anzuwenden.

In den Abbildungen 71 bis 73 sind grün jeweils die gemessenen Defektprofile $h(y)$ der Probekörper 6, 8 und 10 zu sehen. Die künstlich erzeugten idealen Defektprofile $f(y)$ sind hellblau dargestellt. Die aus der Entfaltung von $h(y)$ und $f(y)$ berechneten PSF $g(y)$ sind in orange gezeichnet. Entfaltet man das gemessene Defektprofil $h(y)$ anschließend mit dem zuvor berechneten $g(y)$, erhält man die dunkelblaue Rekonstruktion des idealen Defektprofils $f'(y)$. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, da dies die triviale Umkehroperation der ersten Entfaltung ist. Je kleiner der Defekt ist, desto mehr ähnelt das gemessene Defektbild der Antwort des Messsystems auf eine ideale Punktquelle und damit der PSF des Messszenarios. Das in Abbildung 71 dargestellt Defektprofil ähnelt schon sehr einem Punktdefekt. Deswegen ist auch die berechnete Funktion dem gemessenen Defektprofil sehr ähnlich.

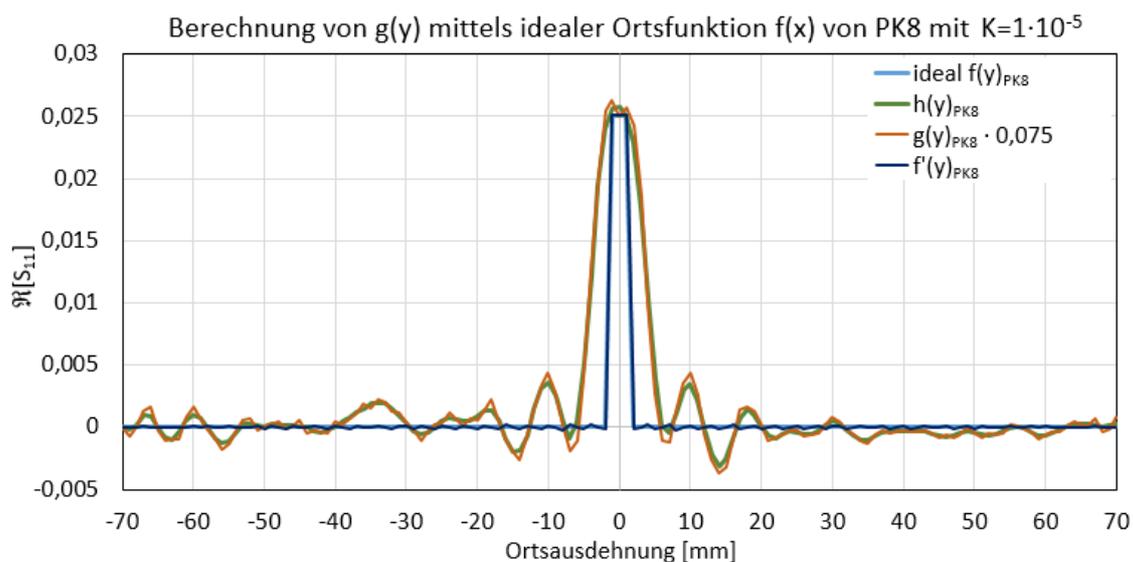


Abbildung 71: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des gemessenen Defektprofils des PK8 $h(y)_{PK8}$ mit seinem künstlich erzeugten idealem Defektprofil $f(y)_{PK8}$.

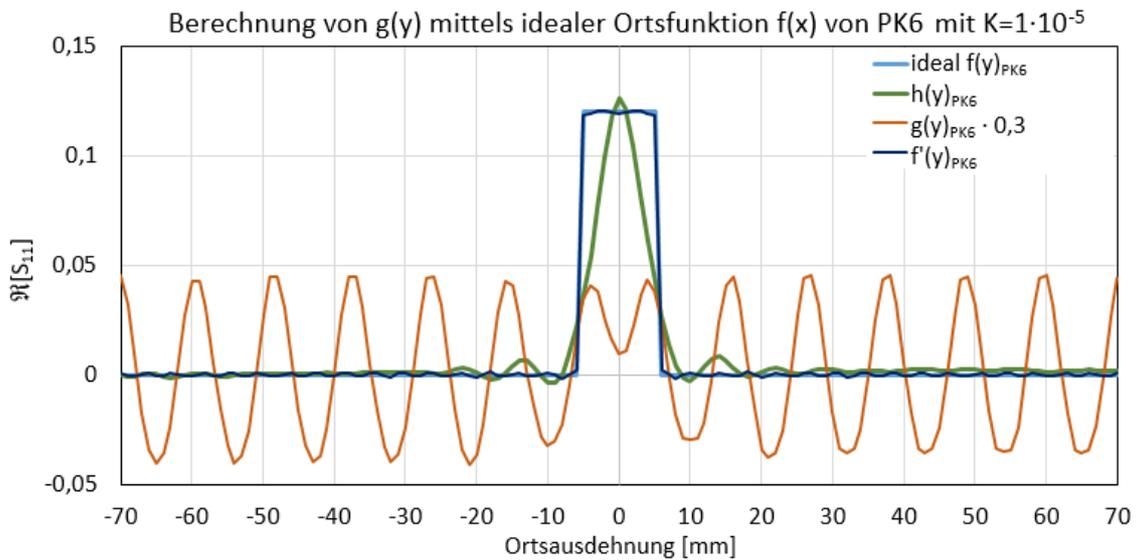


Abbildung 72: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des gemessenen Defektprofils des PK8 $h(y)_{PK6}$ mit seinem künstlich erzeugten idealen Defektprofil $f(y)_{PK6}$.

Die für das Defektprofil mit 10 mm Durchmesser berechnete Funktion ähnelt hingegen in ihrer Form nicht mehr dem gemessenen Defektprofil. Einer PSF im theoretischen Sinne sieht die berechnete Funktion auch nicht ähnlich. Sie sieht eher aus wie eine vom Nullpunkt ausgehende, phasenverschobene Sinusfunktion mit zu den Randbereichen hin leicht abnehmender Periodendauer.

Die aus dem Defekt mit 80 mm Durchmesser ermittelte PSF in Abbildung 73 folgt keinem erkennbaren Funktionsverlauf mehr.

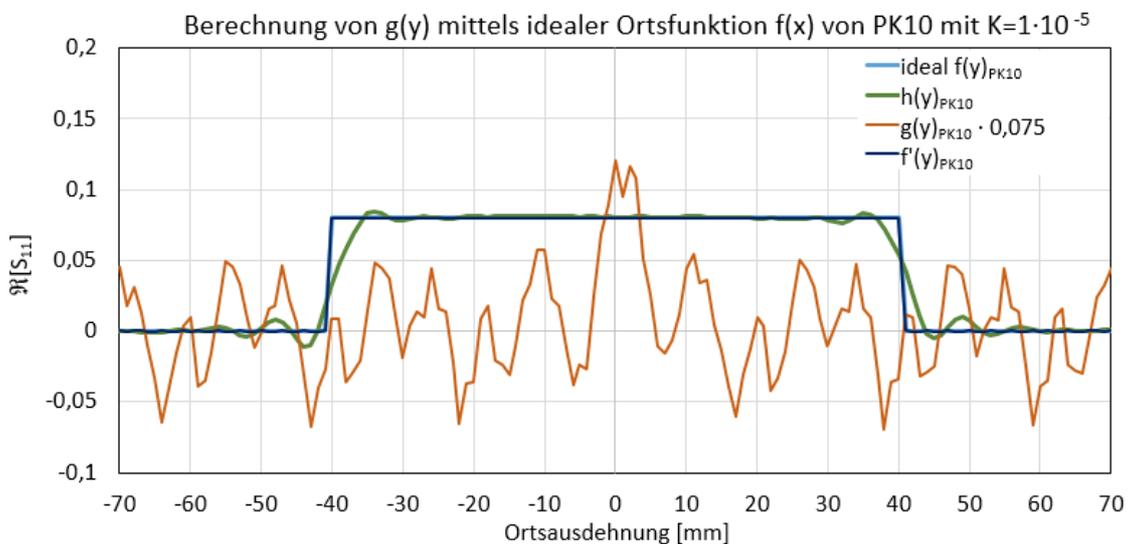


Abbildung 73: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des gemessenen Defektprofils des PK8 $h(y)_{PK10}$ mit seinem künstlich erzeugten idealen Defektprofil $f(y)_{PK10}$.

Die drei berechneten Funktionen, mit denen ihr jeweiliger Defekt optimal rekonstruiert werden kann, weichen stark voneinander ab. Für die Defekte mit größerem Durchmesser ist die Funktion außerdem nicht als Peak im Nullpunkt lokalisiert, wie man das von

einer physikalischen PSF erwarten würde. Dieser Umstand stellt die Anwendbarkeit des im Forschungsantrag vorgeschlagenen Modells der Bildrekonstruktion durch Entfaltung in Frage. Laut diesem Modell sollte es eine lokalisierte PSF geben, die für jede Defektform anwendbar ist.

Nun soll geprüft werden, ob die für eine bestimmte Defektgröße ermittelte Funktion auch für abweichende Defektgrößen verwendet werden kann. Da die Entfaltung mit $g(y)_{PK8}$ aus Abbildung 71 ähnliche Ergebnisse wie die Entfaltungen im Abschnitt 6.2.2. erzeugen würde, wird in der Abbildung 74 stattdessen $g(y)_{PK6}$ aus Abbildung 72 auf das gemessene Defektprofil $h(y)_{PK10}$ aus Abbildung 73 angewendet. Da die Form von $g(y)_{PK10}$ und $g(y)_{PK6}$ so stark voneinander abweicht ist es nicht verwunderlich, dass in der Rekonstruktion des Defektprofils vom PK6 in Abbildung 74 starke Artefakte auftreten und auch die Defektflanken kaum erkennbar sind. Diese Methode die Transferfunktion eines Messszenarios zu ermitteln scheint also nur für dieses spezielle Messszenario gut zu funktionieren, nicht aber für abweichende Defektgrößen.

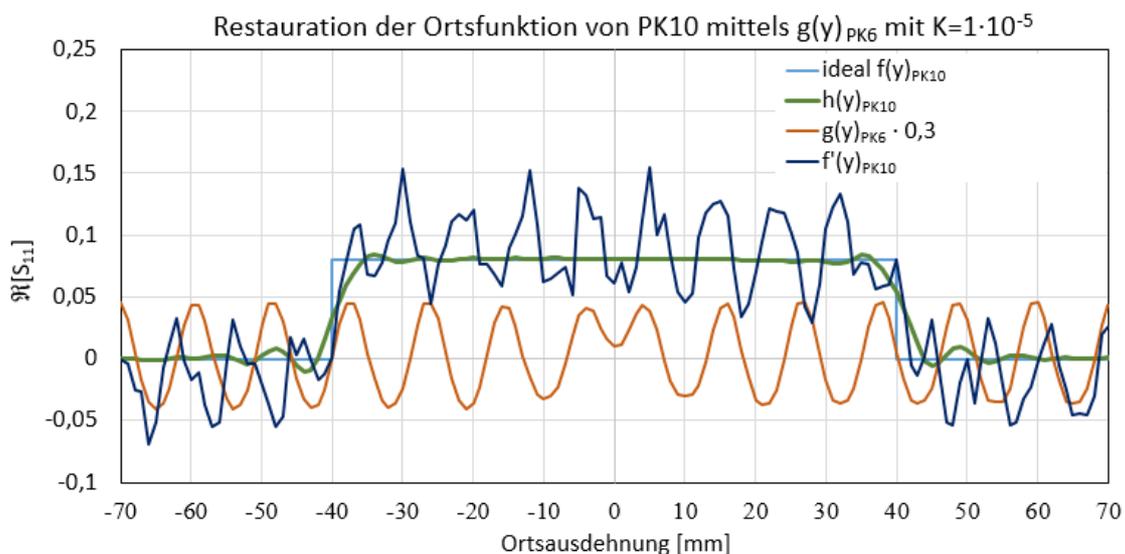


Abbildung 74: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils vom Probekörper 10 mit der durch die Entfaltung vom gemessenen Defektprofil des Probekörper 6 und dessen idealem Defektprofil berechnete PSF.

6.2.5. Einschätzung der Methoden zur Ermittlung der PSF

Eine objektive Bewertung, wie gut die ermittelten PSF zu den gemessenen Defektprofilen passten, ist schwierig, da sich Abweichungen lediglich in vermehrt auftretenden Artefakten nach der Entfaltung zeigen. In der Abbildung 75 ist zum Vergleich die Entfaltung des Defektprofils im Probekörper 10 mit einer PSF zu sehen, die mittels der drei vorgestellten Methoden generiert wurde.

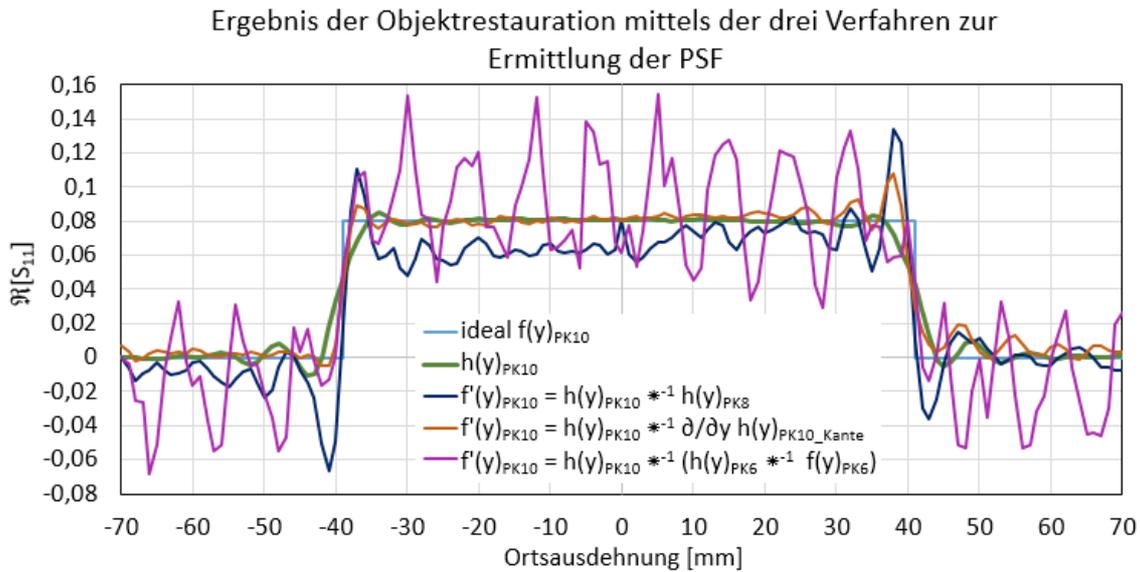


Abbildung 75: Zum Vergleich ist der Realteil der Rekonstruktion des Objektprofils vom Probekörper 10 mittels einer PSF dargestellt, die mit den drei im Abschnitt 6.1. vorgestellten Methoden generiert wurde.

Um die Ergebnisse der Entfaltungen bewerten zu können, wird an dieser Stelle der Begriff „Güte der Entfaltung“ eingeführt. Die Güte beschreibt, wie gut das rekonstruierte Defektprofil dem idealen Defektprofil folgt. Dabei ist vor allem die Steilheit an den Flanken des Defektes und die Größe der Artefakte, aber auch der allgemeine Verlauf des Defektprofils gemeint.

Die Steilheit der Objektflanken konnte bei allen Entfaltungen deutlich verbessert werden. Die Entfaltungen mit den Punktspizfunktionen, die mithilfe der in den Abschnitten 6.2.2. und 6.2.3. abgehandelten Methoden ermittelt wurden, weisen eine ähnliche Güte auf. Dabei sind Flanken der dunkelblau dargestellten Entfaltung, bei der das Defektprofil des kleinen Defekts mit 3 mm Durchmesser als PSF genutzt wurde, am steilsten. Sie bildet das ideale Profil des Defekts an dessen Seiten am besten ab. Allerdings weicht das dunkelblaue Profil an der Oberseite des Defekts ein wenig vom idealen Profil ab. Diese Abweichung kann jedoch mit den nicht ganz optimalen Messdaten wegen der leichten Schrägstellung der Antenne erklärt werden. Bei allen Methoden traten nach der Entfaltung teils starke Artefakte auf, die den eigentlichen Verlauf des Defektprofils verfälschen. Die Artefakte sind in der orangefarbenen Entfaltung, bei der die erste Ableitung einer Kantenfunktion zur Ermittlung der PSF genutzt wurde, weniger stark ausgeprägt. Das kann allerdings auch damit zusammenhängen, dass die Messung der Kante im Probekörper 10 aufgrund der größeren Reflexionsfläche ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis aufweist als die Messung des kleinen Defekts im Probekörper 8. Die in Abschnitt 6.2.4. behandelte Methode der Ermittlung der PSF über die Entfaltung mit der

idealen Objektfunktion ist in der Abbildung lila dargestellt. Das mit dieser Methode rekonstruierte Defektprofil weist wegen der großen Artefakte die schlechteste Güte auf. Diese Methode scheint also nicht zur Ermittlung einer, auch für abweichende Defektgrößen nutzbaren, PSF geeignet zu sein. Die im Abschnitt 6.2.3. vorgestellte Methode der Ableitung der ESF hat in der Rekonstruktion zwar eine gute Güte, allerdings ist die über diese Methode ermittelte PSF unsymmetrisch, was unter physikalischen Gesichtspunkten fragwürdig ist. Unter Berücksichtigung der erzielten Ergebnisse wird daher für alle nachfolgenden Untersuchungen die im Abschnitt 6.2.2. genutzte Methode der Messung eines kleinen Punktdefekts zur Ermittlung der PSF für ein Messszenario gewählt. Das heißt, für alle nachfolgenden Bildrekonstruktionen wird immer die Messung des kleinstmöglichen Defektprofils als PSF herangezogen.

7. Einflüsse auf die Form der Punktspreizfunktion

Eine für ein bestimmtes Messszenario aus Probekörper mit Defekt, Antenne und Messsystem gefundene Punktspreizfunktion ist nicht allgemeingültig für andere Messszenarien anwendbar. Die Abbildungseigenschaften des Messsystems und damit auch die zu verwendende PSF hängt von vielen Faktoren ab.

Ein wichtiger Einflussfaktor ist das Material, aus dem der Defekt besteht sowie das Material, das den Defekt umschließt. Der Reflexionsfaktor und damit auch das Beugungsmuster um den Defekt ist stark von dem Verhältnis der relativen Permittivitäten dieser beiden Materialien abhängig. Je größer der Unterschied der Permittivitäten ist, desto stärker wird das Messsignal reflektiert und desto größer sind auch die Amplituden der einzelnen Elementarwellen, die miteinander interferieren und in Summe das resultierende Beugungsmuster bilden. Daher ist es für die Wahl der richtigen PSF wichtig, die Materialien und deren Orientierung zueinander zu kennen.

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Abstand der Antenne zur reflektierenden Defektoberfläche. Antennen strahlen in der Regel nicht in einer geraden Achse, sondern mit einem gewissen Öffnungswinkel ab. Das hat zur Folge, dass der Footprint einer Antenne mit größer werdendem Abstand ebenfalls größer wird. Daher werden Defekte umso größer abgebildet, desto größer der Messabstand ist. Eine einzelne PSF bildet nur die in einem ganz bestimmten Messabstand auftretenden Beugungsmuster ab.

Auch die Größe, Form und Orientierung des Defekts hat einen Einfluss auf die PSF. Kleine Defekte reflektieren aufgrund der kleineren Reflexionsfläche weniger Leistung zurück zur Antenne. Deswegen sind auch die Amplituden der Beugungsmuster entsprechend kleiner und neigen dazu, eher vom Hintergrundrauschen überdeckt zu werden. Die Orientierung eines Defekts beeinflusst maßgeblich die Größe und den Winkel der reflektierenden Defektfläche, die der Antenne zugewandt ist. Bei abgerundeten Defektoberflächen treffen die Mikrowellen in unterschiedlichen Winkeln auf die Oberfläche auf und werden daher auch in unterschiedlichen Winkeln zurück reflektiert. Aufgrund der Krümmung sollte mehr Energie in von der Antenne weg zeigende Richtungen reflektiert werden, als das bei der Reflexion an einer ebenen Oberfläche der Fall ist. Die Amplituden der Reflexionssignale an abgerundeten Defektoberflächen sollten daher entsprechend kleiner ausfallen. In den nachfolgenden Kapiteln sollen diese Einflüsse auf die Form der Punktspreizfunktion experimentell untersucht werden.

7.1. Einfluss des Defektmaterials

7.1.1. Einfluss des Defektmaterials auf die Form des Defektprofils

Für die Untersuchung des Einflusses der Materialeigenschaften auf die Abbildung des Defektes wurde der Probekörper 10 mit dem L-förmigen Defekt mit 80 mm Durchmesser sowie der Probekörper 8 mit der Bohrung mit dem zylindrischen Defekt mit 3 mm Durchmesser gewählt. Diese Defekte wurden mit Materialien unterschiedlicher Permittivität gefüllt. Das den Defekt umgebende Material des Prüfkörpers besteht aus Polyethylen, welches eine relative Permittivität von ca. 2,35 aufweist. Für die Messungen wurde die offene Hohlleiterantenne genutzt.

Bei der ersten Messung a) wurde eine L-förmige Aluminiumplatte in die Ausfräsung eingesetzt. Da Aluminium leitfähig ist, kann bei einer Frequenz von 24 GHz davon ausgegangen werden, dass das Signal an dessen Oberfläche nahezu vollständig reflektiert wird. Deswegen sollte bei dieser Messung ein deutliches Beugungsmuster erkennbar sein.

In der Messung b) wurde das Aluminium durch Leitungswasser ersetzt, welches bei 24 GHz und einer Temperatur von 25 °C eine relative Permittivität von ca. 35 besitzt. Die Beugungsmuster sollten bei dieser Messung im Vergleich zur Messung a) also weniger ausgeprägt sein.

Für die Messung c) wurde das Wasser wieder entfernt und die Ausfräsung leer gelassen. Die in der Ausfräsung enthaltene Luft besitzt eine relative Permittivität von ca. 1,0. Die Amplitude des Beugungsmusters sollte für diese Messung am kleinsten sein.

Bei der Messung d) wurde lediglich der in der Messung a) verwendete Aluminiumein-
satz auf dem Absorberschaum gemessen. Das den Defekt umgebende Medium war also Luft. Das Beugungsmuster sollte daher geringfügig stärker ausgeprägt sein, als in der Messung a).

Der Probekörper 8 wurde nach dem gleichen Prinzip vermessen. In Messung e) war ein Aluminiumzylinder in die Bohrung eingesetzt. Für Messung f) wurde dieser Zylinder entfernt und die Bohrung mit Leitungswasser aufgefüllt. Bei der Messung g) wurde das Wasser wieder entfernt und die offene, luftgefüllte Bohrung vermessen. Die Messdaten wurden, wie auch in den bisherigen Experimenten nachbearbeitet, indem sie in der komplexen Ebene um den Winkel φ_s gedreht wurden, sodass der Mittelpunkt des Defekts ein

Maxima im Realteil der Messdaten darstellt. Die Messdaten des Hintergrunds (Absorberschaum) wurden um den Winkel φ_K so gedreht und von den Messdaten subtrahiert, dass die Störungen durch den Hintergrund möglichst klein und die Grundebene möglichst waagrecht war.

Die Abbildung 76 zeigt den Realteil der verarbeiteten Messdaten vom Probekörper 10. Die Korrekturwinkel für die Messdatenvorverarbeitung wurden wie folgt gewählt.

$$\text{a) } h(x,y)_{\text{PK10_Alu_PE}} \equiv h_{\text{PK10_Alu_PE}} e^{j125^\circ} - h_H \cdot e^{j(-30^\circ)}$$

$$\text{b) } h(x,y)_{\text{PK10_Wasser_PE}} \equiv h_{\text{PK10_Wasser_PE}} e^{j92^\circ} - h_H \cdot e^{j(-30^\circ)}$$

$$\text{c) } h(x,y)_{\text{PK10_Luft_PE}} \equiv h_{\text{PK10_Luft_PE}} e^{j25^\circ} - h_H \cdot e^{j(-30^\circ)}$$

$$\text{d) } h(x,y)_{\text{PK10_Alu_Luft}} \equiv h_{\text{PK10_Alu_Luft}} e^{j171^\circ} - h_H \cdot e^{j0^\circ}$$

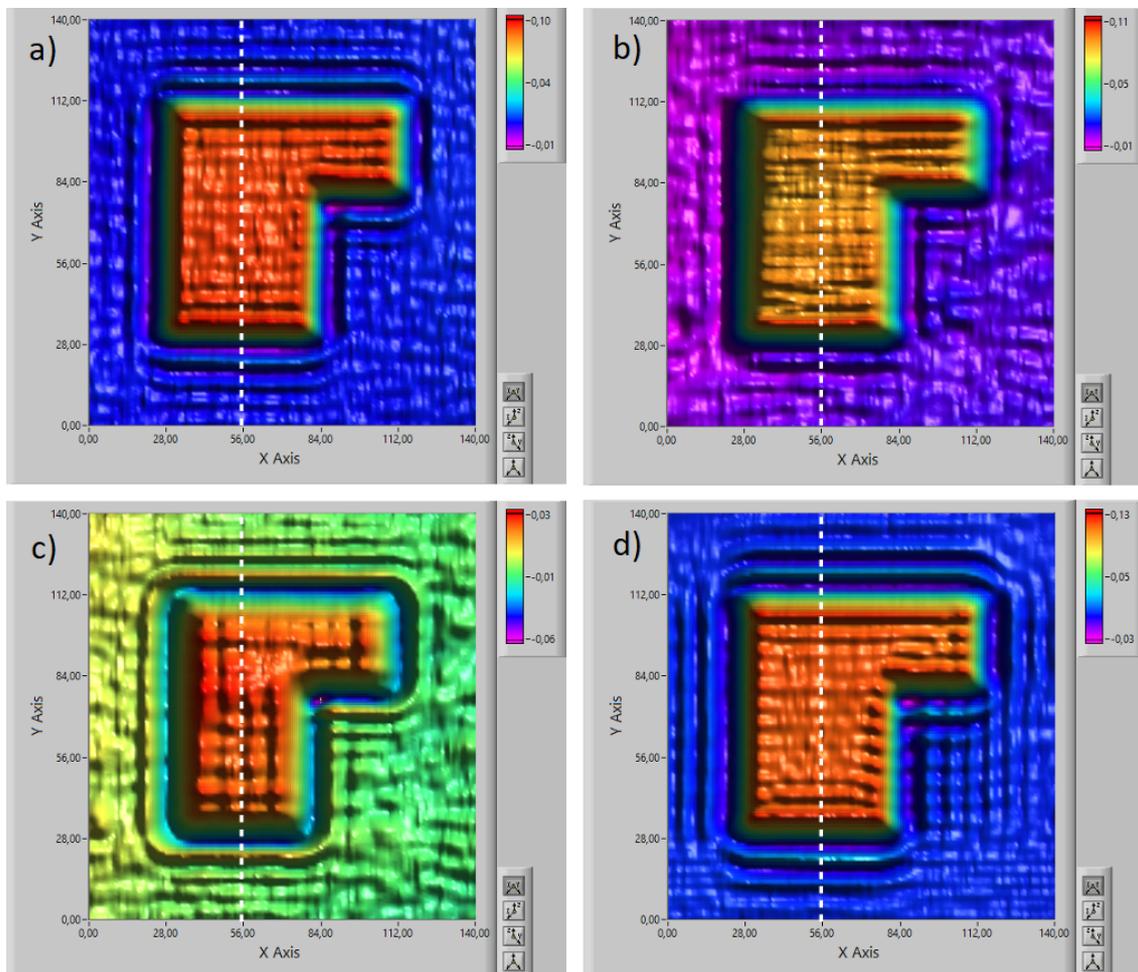


Abbildung 76: Abgebildet sind 141x141 mm große Ausschnitte aus den Messungen am Probekörper 10 mit dem L-förmigen Defekt mit 80 mm Durchmesser, gefüllt mit a) Aluminium, b) Wasser und c) Luft. Für das Bild d) wurde lediglich der Aluminium-einsatz ohne den Probekörper aus Polyethylen aufgenommen. Zu sehen ist der Realteil der jeweiligen Messungen. Die Schnittebene ist mit einem weißen Cursor dargestellt.

Die Abbildung 77 zeigt Schnitte durch die Mitte der in Abbildung 76 dargestellten Defekte im PK10 parallel zur Y-Achse.

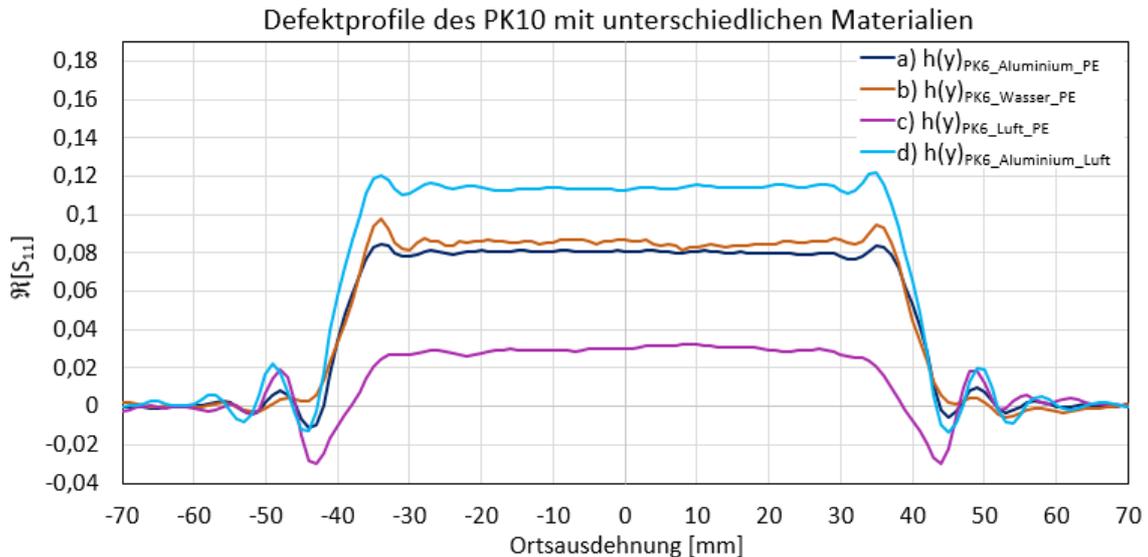


Abbildung 77: Realteil der Messungen am Probekörper 10 mit dem L-förmigen Defekt mit 80 mm Durchmesser aus verschiedenen Materialien.

In den Abbildungen 76 und 77 ist zu sehen, dass die im Abschnitt 7.1. aufgestellten Hypothesen bezüglich der Amplituden der Beugungsmuster zutreffen. Die Messung d) weist die größten Amplituden auf. Bemerkenswert ist, dass das Beugungsmuster der mit Wasser gefüllten Ausfräsung in Messung b) eine leicht höhere Amplitude aufweist, wie die das mit Aluminium gefüllte Defektprofil in Messung a), obwohl der Reflexionsfaktor theoretisch kleiner sein sollte. Auffällig ist auch, dass die Nebenmaxima im Beugungsmuster in der Messung b) die kleinsten Amplituden aufweisen.

Die Beugungsmuster setzen sich aus einer Überlagerung von vielen einzelnen reflektierten Wellen zusammen. Bei nicht leitenden Defektmaterialien können die elektromagnetischen Wellen auch teilweise durch den Defekt hindurch transmittieren, auf der gegenüberliegenden Seite des Defektes mit einem Phasenversatz wieder austreten und ebenso zur Bildung des Beugungsmusters beitragen. Außerdem ändert sich die Wellenlänge der durch den Defekt transmittierenden Wellen nach Gleichung 30. Die entstehenden Beugungsmuster sind daher für jedes Messszenario individuell und eine umfassende analytische Beschreibung der einzelnen Effekte, die diese Muster bilden, ist extrem aufwändig.

Die Abbildungen 78 und 79 zeigen die am Probekörper 8 aufgezeichneten Messdaten, die wie folgt vorverarbeitet wurden.

$$e) h(x,y)_{PK8_Alu_PE} \equiv h_{PK8_Alu_PE} \cdot e^{j196^\circ} - h_H \cdot e^{j(-30^\circ)}$$

$$f) h(x,y)_{\text{PK8_Wasser_PE}} \equiv h_{\text{PK8_Wasser_PE}} e^{j169^\circ} - h_H \cdot e^{j(-80^\circ)}$$

$$g) h(x,y)_{\text{PK8_Luft_PE}} \equiv h_{\text{PK8_Luft_PE}} e^{j170^\circ} - h_H \cdot e^{j(-80^\circ)}$$

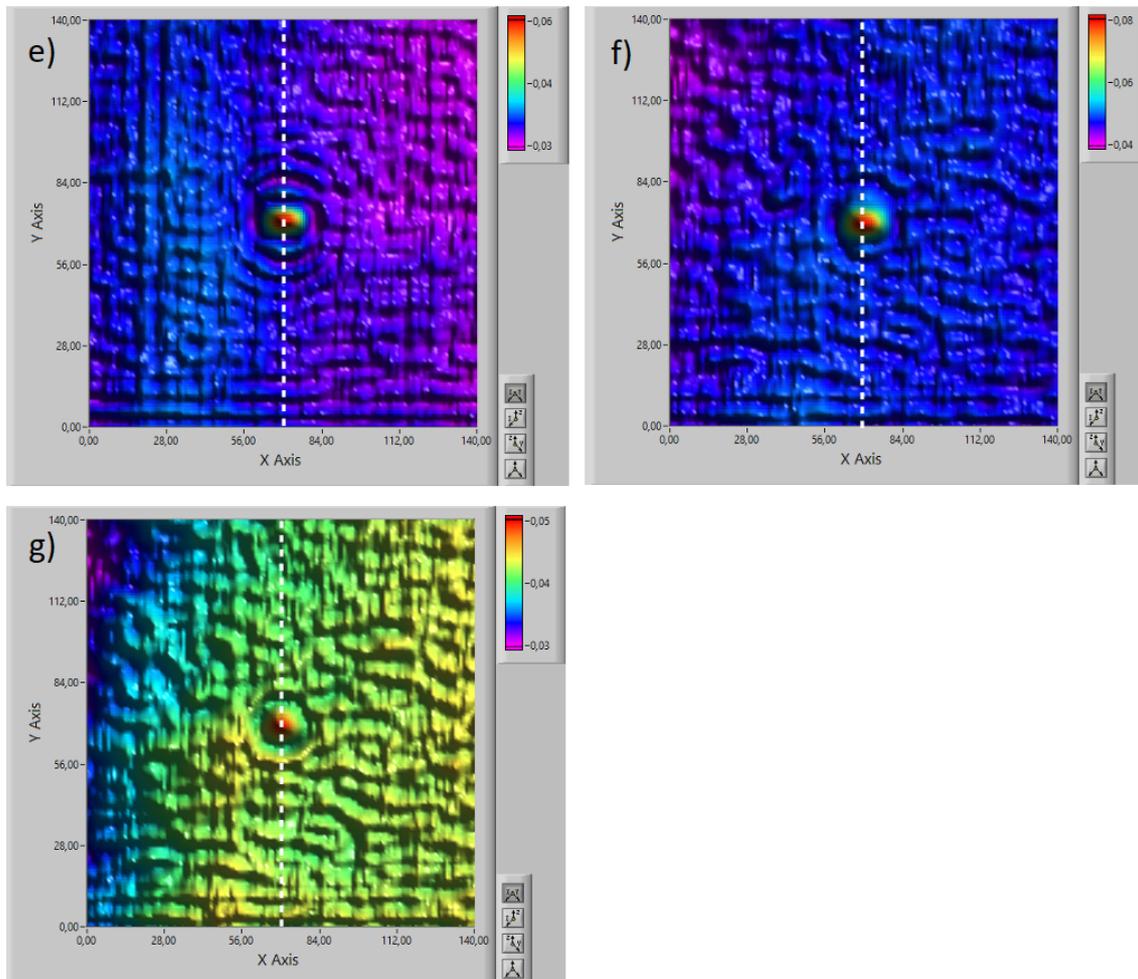


Abbildung 78: Abgebildet sind 141x141 mm große Ausschnitte aus den Messungen am Probekörper 8 mit der Bohrung mit 3 mm Durchmesser, gefüllt mit e) Aluminium, f) Wasser und g) Luft. Zu sehen ist der Realteil der jeweiligen Messungen.

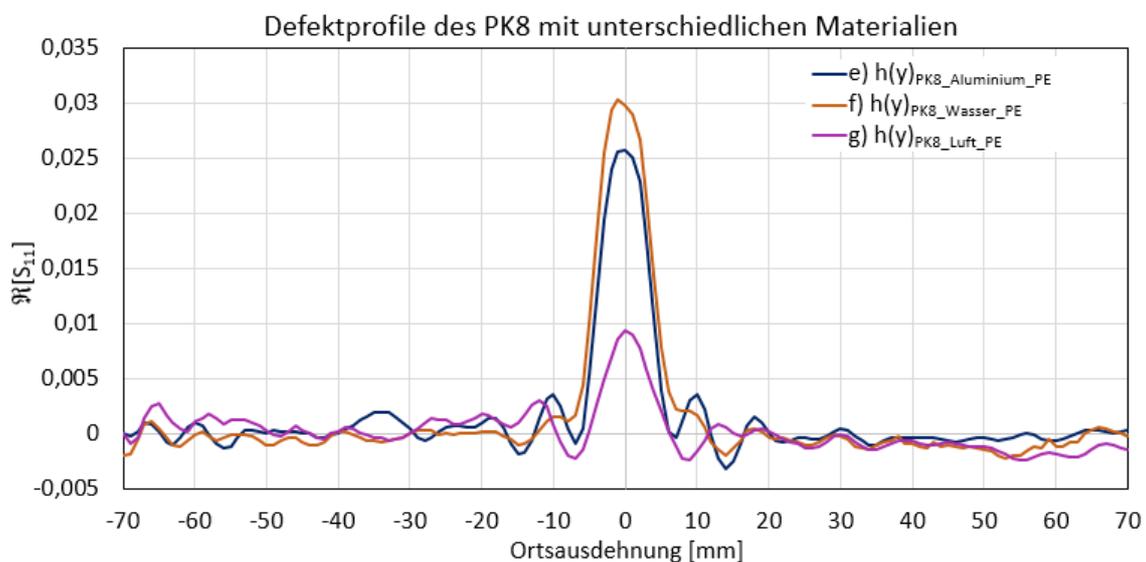


Abbildung 79: Realteil der Messungen am Probekörper 8 mit dem zylindrischen Defekt mit 3 mm Durchmesser aus verschiedenen Materialien.

Nun soll getestet werden, wie sehr sich das Entfaltungsergebnis nach der im Abschnitt 6.2.2. beschriebenen Bildrekonstruktionsmethode verschlechtert, wenn eine PSF gewählt wird, bei der das Defektmaterial nicht mit dem zu restaurierenden Objekt übereinstimmt.

Dafür wird als zu restaurierendes Objekt das Defektprofil aus Messung a) und als PSF die Defektprofile der Messungen e), f) und g) verwendet. Die Ergebnisse der Entfaltungen sind in der Abbildung 80 zu sehen.

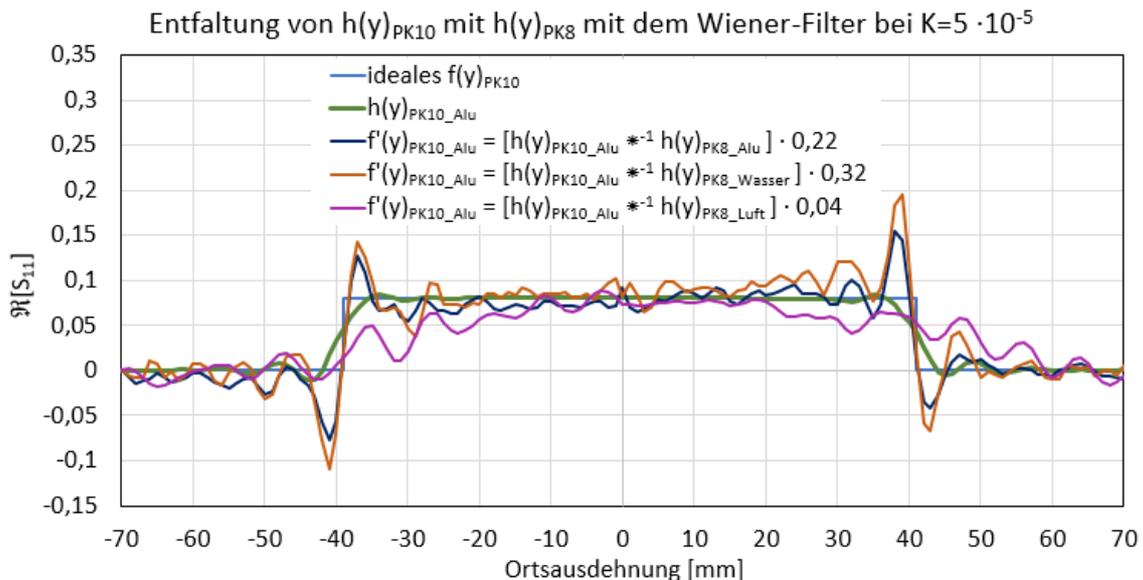


Abbildung 80: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltungen aus $h(y)_{PK10_Alu}$ mit dem Defekt aus Aluminium und einem Defektprofil aus den Messungen am Probekörper 8 bei unterschiedlichen Defektmaterialien. Die Entfaltungen wurden jeweils mit einem Faktor auf die Amplitudenwerte der Originalmessung $h(y)_{PK10_Alu}$ skaliert.

Es ist zu erkennen, dass die Flankensteilheit bei der Entfaltung von $h(y)_{PK10_Alu}$ mit $h(y)_{PK8_Alu}$ und $h(y)_{PK8_Wasser}$ deutlich verbessert werden konnte. Bei der Entfaltung mit $h(y)_{PK8_Wasser}$ besitzen die Artefakte an den Flanken des Defektes geringfügig größere Amplituden. Die Entfaltung mit $h(y)_{PK8_Luft}$ brachte kein brauchbares Ergebnis. Das ist auch nicht weiter verwunderlich, da sich die gemessenen Defektprofile in Abbildung 79 für Aluminium und Wasser ähneln. Das Defektprofil für die mit Luft gefüllte Bohrung weicht hingegen in seiner Amplitude und der Positionen der Beugungsmaxima deutlich von den beiden anderen Profilen ab. Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen, dass das Material des Defektes und der mit dem Material verbundene Reflexionsfaktor an der Defektoberfläche einen Einfluss auf das gemessene Defektprofil und damit auch auf die für die Entfaltung zu verwendende PSF hat. Es ist deshalb wichtig, das Material des Defektes sowie das ihn umgebene Material zu kennen, um die korrekte PSF für die Entfaltung wählen zu können. Ist das Defektmaterial unbekannt, kann im Umkehrschluss über

die Güte einer versuchten Entfaltung unter Umständen aber auch auf das Defektmaterial geschlossen werden. Das gelingt umso besser, je mehr die Permittivitäten der in Frage kommenden Defektmaterialien voneinander abweichen und je weniger andere Unbekannte wie Defektgröße und Defektlage im Messszenario vorhanden sind.

7.1.2. Entfaltung bei Überlagerung verschiedener Beugungsmuster

Im vorherigen Abschnitt wurde festgestellt, dass die Form der gemessenen Defektprofile vom Material des Defektes und des ihn umgebenden Mediums abhängig sind. Um zu klären, ob auch eine Entfaltung von sich überlagernden Beugungsmustern, die durch Defekte unterschiedlicher Materialien verursacht wurden, möglich ist, wurde ein weiteres Experiment durchgeführt. Dieses Szenario kann zum Beispiel an den Kanten eines Werkstücks auftreten. Die an den Kanten eines Werkstücks auftretenden Beugungsmuster werden in der Regel durch die Reflexion der Mikrowellen am Übergang des Werkstückmaterials an die Luft erzeugt. Defekte in Randnähe des Werkstücks müssen jedoch nicht zwingend aus Luftlöchern bestehen. Somit würde es in der Nähe des Werkstückrandes zu Überlagerungen von Beugungsmustern kommen, die durch Reflexion der Mikrowellen an unterschiedlichen Materialien verursacht werden.

Für das Experiment wurden die zwei Defektstellen des Probekörpers 11 genutzt, bei denen die Bohrungen mit 3 mm Durchmesser 5 bzw. 10 mm voneinander entfernt waren. Dazu wurde eine Messung durchgeführt, bei denen in beide Bohrungen ein Aluminiumzylinder eingesetzt war. Außerdem wurde eine Messung vorgenommen, bei der der Aluminiumzylinder aus der unten gelegenen Bohrung entfernt und so durch ein mit Luft gefülltes Loch ersetzt wurde. In Abbildung 81 ist der Realteil dieser beiden Messungen zum Vergleich dargestellt. Die weißen Strichlinien deuten die Schnitte für die nachfolgenden Defektprofile der 5 mm (rechts oben) bzw. 10 mm (links unten) voneinander entfernten Defektstellen an.

Die Messdaten wurden wieder in der komplexen Ebene gedreht und der Hintergrund abgezogen um die Störeinflüsse zu minimieren. Aus diesen vorverarbeiteten Messdaten wurden dann nachfolgend angegebenen Schnittprofile der Defektstellen erstellt.

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad h(x,y)_{\text{PK11}_{(\text{Alu}_{\text{Alu}})_{\text{PE}}}} &\equiv h_{\text{PK11}_{(\text{Alu}_{\text{Alu}})_{\text{PE}}}} \cdot e^{j146^\circ} - h_{\text{H}} \cdot e^{j(-61^\circ)} \\
 h(y)_{\text{PK11}_{(\text{Alu}_{5\text{mm}}_{\text{Alu}})_{\text{PE}}}} &= h(148, 89..189)_{\text{PK11}_{(\text{Alu}_{5\text{mm}}_{\text{Alu}})_{\text{PE}}}} \\
 h(y)_{\text{PK11}_{(\text{Alu}_{10\text{mm}}_{\text{Alu}})_{\text{PE}}}} &= h(56, 7..107)_{\text{PK11}_{(\text{Alu}_{5\text{mm}}_{\text{Alu}})_{\text{PE}}}}
 \end{aligned}$$

b) $h(x,y)_{PK11_Luft_Alu_PE} \equiv h_{PK11_Luft_Alu_PE} e^{j194^\circ} - h_H \cdot e^{j(-70^\circ)}$

$h(y)_{PK11_Luft_5mm_Alu_PE} = h(146, 90..190)_{PK11_Luft_5mm_Alu_PE}$

$h(y)_{PK11_Luft_10mm_Alu_PE} = h(56, 7..107)_{PK11_Luft_10mm_Alu_PE}$

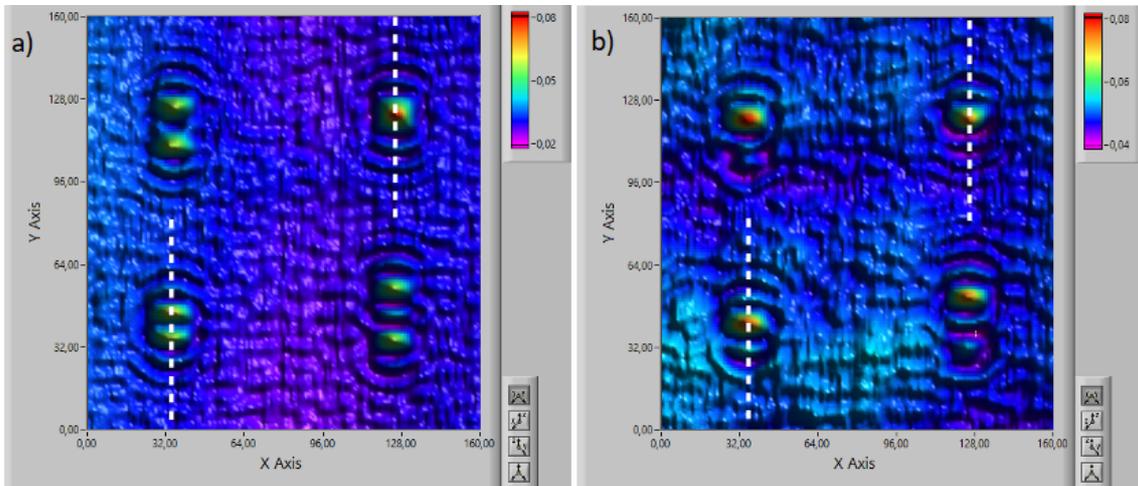


Abbildung 81: Realteil der Messungen am Probekörper 11 bei dem bei a) jeweils beide Bohren mit 3 mm Durchmesser mit einem zylindrischen Einsatz aus Aluminium versehen waren und bei b) jeweils nur die obere Bohrung mit dem Aluminiumeinsatz versehen und die untere Bohrung mit Luft gefüllt war.

Diese Defektprofile wurden dann mit den in Abbildung 79 dargestellten Defektprofilen des Probekörpers 8 in den Varianten e) Aluminium in PE und g) Luft in PE als PSF entfaltet. Die Ergebnisse der Entfaltungen für die 5 mm voneinander entfernten Defekte sind in den Abbildungen 82 bis 84 dargestellt.

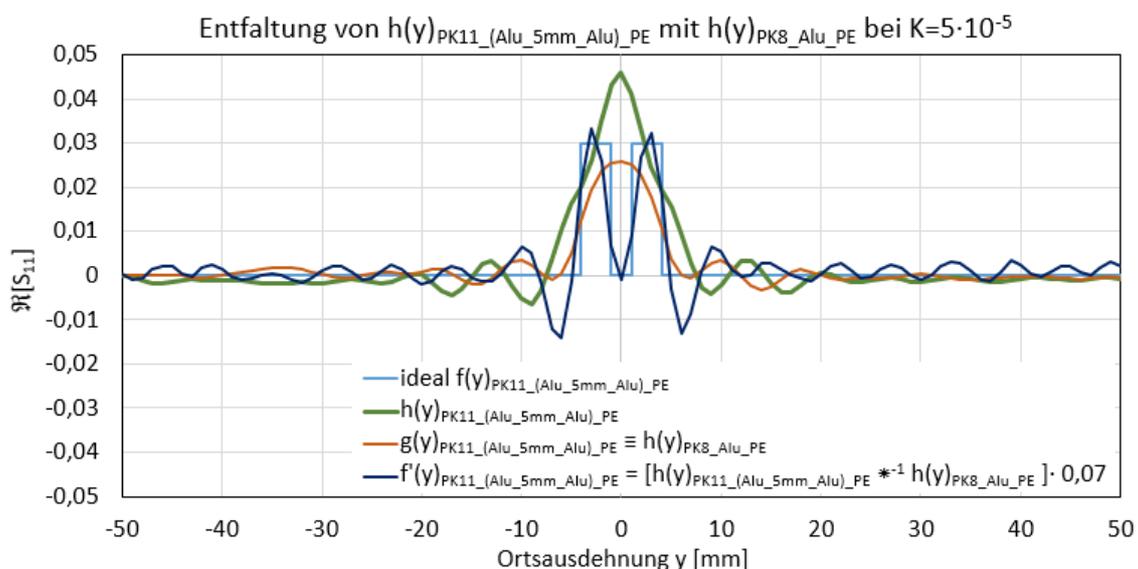


Abbildung 82: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils aus zwei mit Aluminium gefüllten Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, die 5 mm voneinander entfernt sind, mit dem gemessenen Defektprofil einer einzelnen mit Aluminium gefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser als PSF.

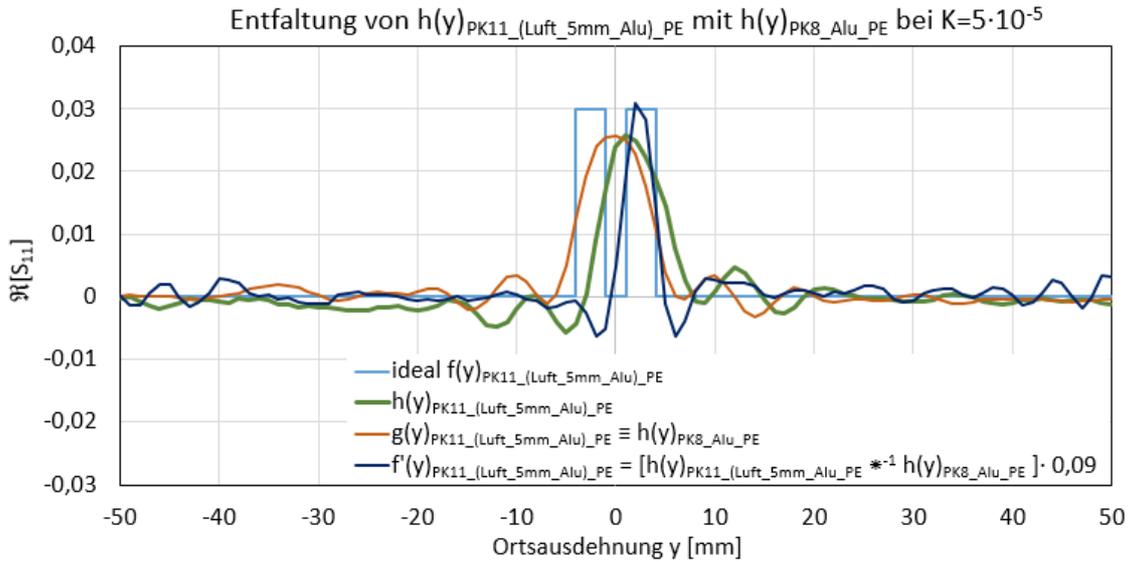


Abbildung 83: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils aus zwei Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, bei der die Bohrung auf der rechten Seite mit Aluminium und die auf der linken Seite mit Luft gefüllt ist. Die Bohrungen sind 5 mm voneinander entfernt. Als PSF wurde das Defektprofil der Messung an einer einzelnen mit Aluminium gefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser verwendet.

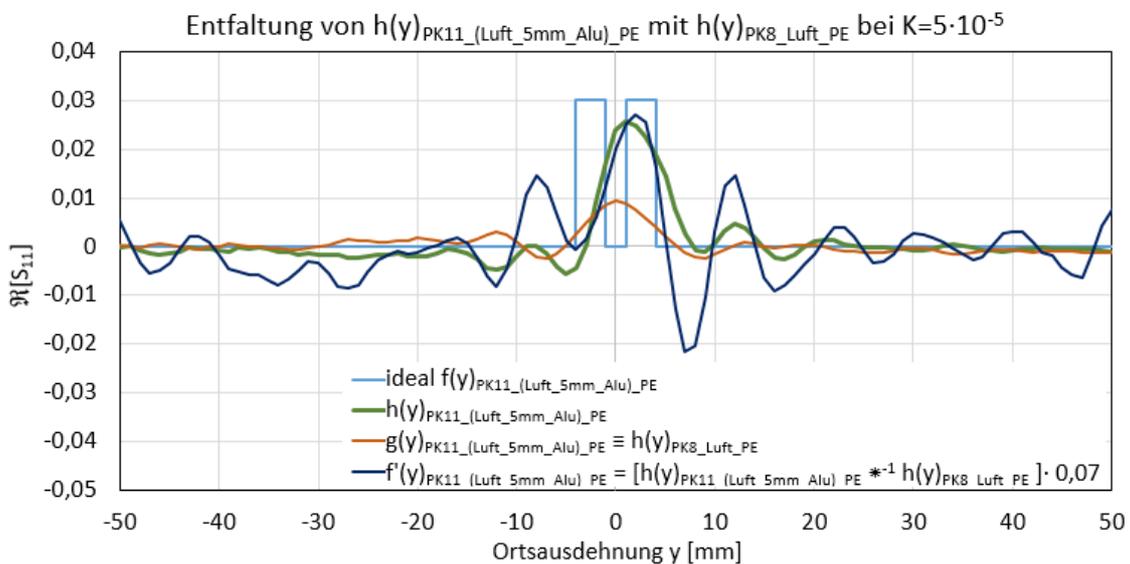


Abbildung 84: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils aus zwei Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, bei der die Bohrung auf der rechten Seite mit Aluminium und die auf der linken Seite mit Luft gefüllt ist. Die Bohrungen sind 5 mm voneinander entfernt. Als PSF wurde das Defektprofil der Messung an einer einzelnen mit Luft gefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser verwendet.

Die Ergebnisse der Entfaltungen für die 10 mm voneinander entfernten Defekte sind in den Abbildungen 85 bis 87 zu sehen.

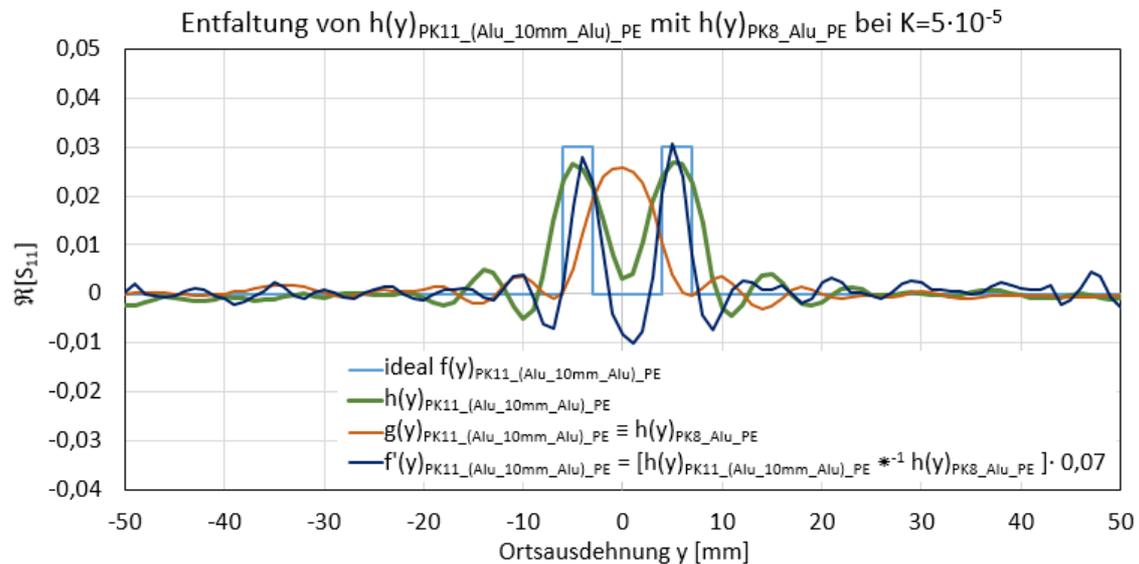


Abbildung 85: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils aus zwei mit Aluminium gefüllten Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, die 10 mm voneinander entfernt sind, mit dem gemessenen Defektprofil einer einzelnen mit Aluminium gefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser als PSF.

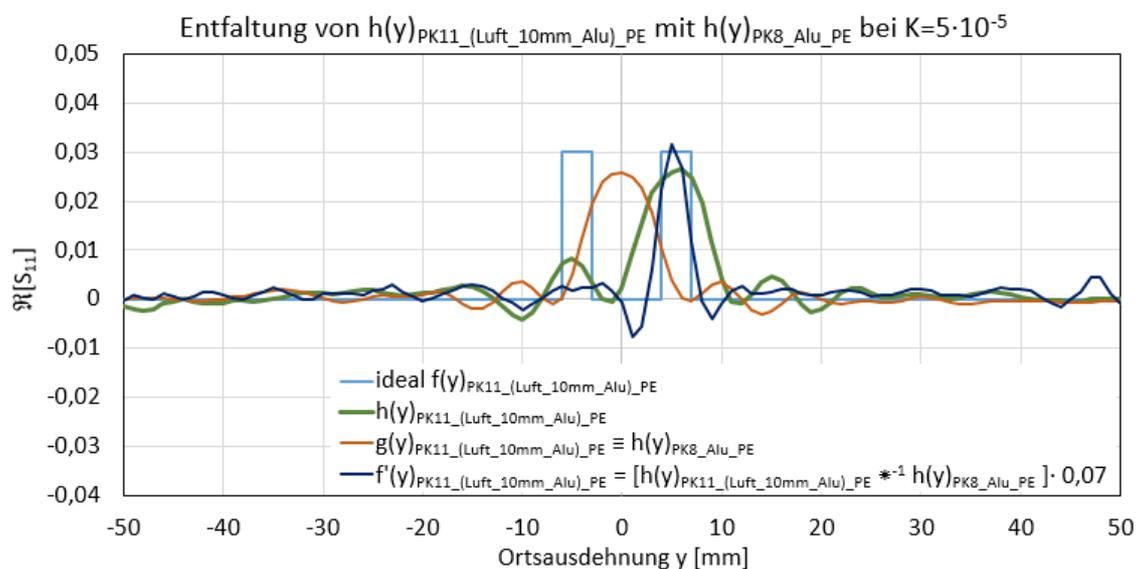


Abbildung 86: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils aus zwei Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, bei der die Bohrung auf der rechten Seite mit Aluminium und die auf der linken Seite mit Luft gefüllt ist. Die Bohrungen sind 10 mm voneinander entfernt. Als PSF wurde das Defektprofil der Messung an einer einzelnen mit Aluminium gefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser verwendet.

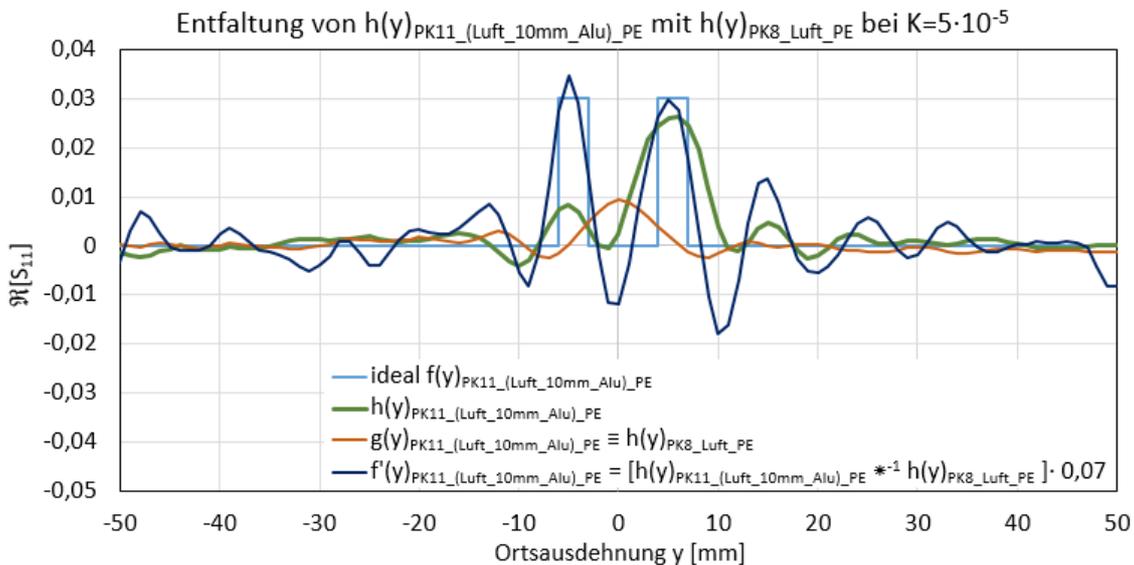


Abbildung 87: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung des Defektprofils aus zwei Bohrungen mit 3 mm Durchmesser, bei der die Bohrung auf der rechten Seite mit Aluminium und die auf der linken Seite mit Luft gefüllt ist. Die Bohrungen sind 10 mm voneinander entfernt. Als PSF wurde das Defektprofil der Messung an einer einzelnen mit Luft gefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser verwendet.

In den Abbildungen 82 und 85 ist zu erkennen, dass die Defektrekonstruktion für die beiden sich überlagernden Defekte aus Aluminium funktioniert. Nach der Rekonstruktion waren trotz der Überlagerung der Beugungsmuster beide Defekte erkennbar. Wenn sich allerdings Beugungsmuster von Defekten verschiedener Defektmaterialien überlagern, kann nur der Defekt restauriert werden, für den das Defektmaterial mit der PSF überein stimmt (Abbildungen 83 und 86). Bei der Reflexion der Mikrowellen am Übergang vom PE an Aluminium tritt aufgrund des größeren Reflexionsfaktors ein stärkeres Beugungsmuster auf, als bei der Reflexion am Übergang vom PE zu Luft. Das vom Aluminiumdefekt erzeugte Beugungsmuster so dominant, dass es das Beugungsmuster des mit Luft gefüllten Defekts stark überlagert. Das ist vermutlich auch der Grund, warum bei der Verwendung des Defektprofils einer luftgefüllten Bohrung mit 3 mm Durchmesser als PSF die linke Seite des Defektprofils der luftgefüllten Bohrung nicht gut rekonstruiert werden konnte (Abbildungen 84 und 87).

Ein angestrebtes Ziel des Rekonstruktionsverfahrens ist es, Defekte, die von den Beugungsmustern der Kanten eines Prüfobjekts überlagert werden, sichtbar zu machen. Die Erkenntnis, dass die Rekonstruktion von Defekten unterschiedlicher Materialien und mit unterschiedlichen Beugungsmustern nur für den Defekt mit dem dominanten Beugungsmuster funktioniert macht es unwahrscheinlich, dass dieses Ziel erreicht werden kann. Das Beugungsmuster der Objektkante ist wegen der meist größeren Reflexionsfläche gegenüber dem Beugungsmuster eines kleinen Defekts in der Regel dominant.

Außerdem muss das Material des Defekts mit der Luft, die das Prüfobjekt im Normalfall umgibt, nicht übereinstimmen.

7.2. Einfluss der Tiefenlage des Defektes

Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Tiefenlage des Defekts im Probekörper, denn sie beeinflusst den Messabstand zwischen der reflektierenden Defektoberfläche und der Antenne. Da der Strahlengang der Antenne sich mit einem gewissen Winkel aufweitet, wird der Defekt mit größer werdendem Messabstand durch das Messsystem in der Bildebene größer abgebildet. Gleichzeitig leuchtet die Antenne mit zunehmendem Abstand eine größere Fläche aus. Deswegen sollte auch der Anteil an der Sendeenergie, der vom Defekt zur Antenne zurückreflektiert wird, entsprechend geringer sein.

Für dieses Experiment wurden drei weitere 10 mm dicke und 270x270 mm große Platten aus Polyethylen gefertigt. Diese Platten wurden unterhalb bzw. oberhalb der Probekörper 10 und 7 angeordnet, sodass als Resultat ein 40 mm hoher Probekörper entstand, bei dem die den Defekt tragende Platte entweder a) an der Oberfläche, b) in 10 mm, c) in 20 mm oder d) in 30 mm Tiefe angeordnet werden konnte. Der Abstand zur Oberfläche dieser Plattenschichtung betrug 4 mm. In Abbildung 88 ist eine Skizze des Messszenarios b) mit einem Messabstand von 24 mm zwischen der offenen Hohlleiterantenne und der Oberfläche des Defekts dargestellt. Der sich aufweitende Strahlengang der Antenne ist mit Strichlinien angedeutet.

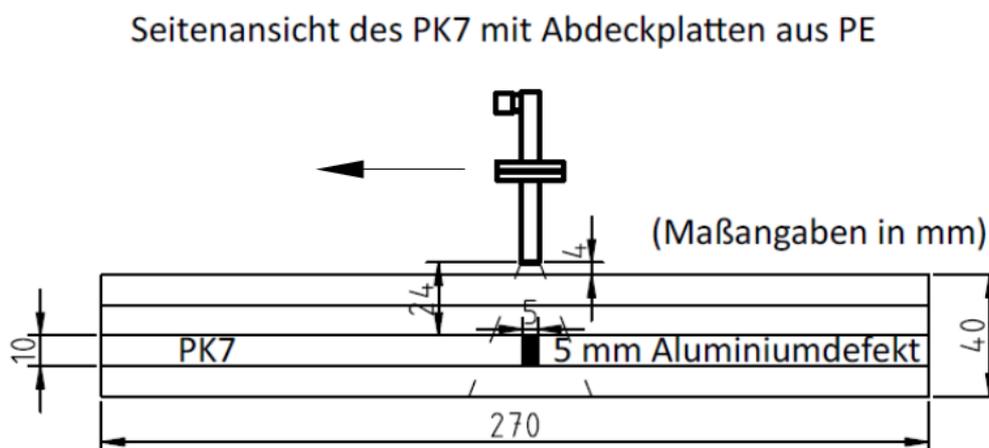


Abbildung 88: Skizze des Messszenarios b) mit 24 mm Messabstand der offenen Hohlleiterantenne zur Oberfläche des Aluminiumdefekts des Probekörper 7.

Die Defektbilder der Messungen sind in den Abbildungen 89 und 90 zu sehen. Dabei wurden die Messwerte, wie schon bei den anderen Experimenten, wieder in der

komplexen Ebene gedreht und der Hintergrund abgezogen, um die Qualität der Bilder zu verbessern.

$$a) h(x,y)_{PK10} \equiv h_{PK10} \cdot e^{j184^\circ} - h_H e^{j140^\circ}$$

$$b) h(x,y)_{PK10} \equiv h_{PK10} e^{j310^\circ} - h_H e^{j140^\circ}$$

$$c) h(x,y)_{PK10} \equiv h_{PK10} e^{j96^\circ} - h_H e^{j140^\circ}$$

$$d) h(x,y)_{PK10} \equiv h_{PK10} e^{j250^\circ} - h_H e^{j140^\circ}$$

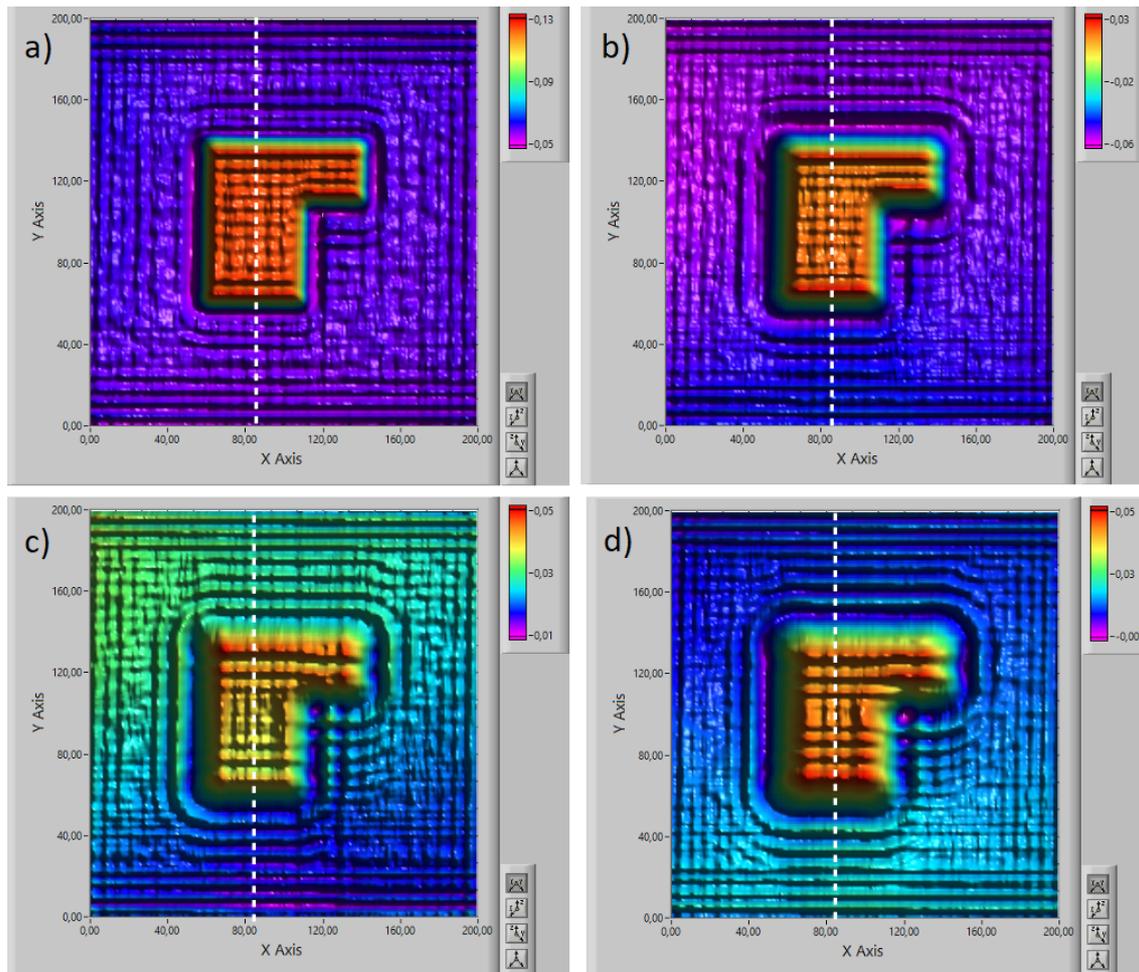


Abbildung 89: Dargestellt ist der Realteil der Messungen des Probekörpers 10 mit dem 80 mm breiten L-förmigen Defekt aus Aluminium in den Messabständen a) 4 mm, b) 14 mm, c) 24 mm und d) 34 mm.

Anzumerken bleibt aber, dass bei den Aufnahmen bedingt durch den leicht schiefen Roboterarm eine leichte Schiefelage der Grundebene des Signals bestand, die auch mit der Drehung in der komplexen Ebene nicht komplett beseitigt werden konnte. Je größer der Messabstand ist, desto deutlicher schlägt sich diese Schiefelage in den Defektbildern nieder. Außerdem ist zu erkennen, dass die Kanten der Defekte mit größer werdendem Messabstand „unschärfer“ abgebildet werden.

$$\text{a) } h(x,y)_{\text{PK7}} \equiv h_{\text{PK7}} e^{j182^\circ} - h_{\text{H}} e^{j140^\circ}$$

$$\text{b) } h(x,y)_{\text{PK7}} \equiv h_{\text{PK7}} e^{j240^\circ} - h_{\text{H}} e^{j140^\circ}$$

$$\text{c) } h(x,y)_{\text{PK7}} \equiv h_{\text{PK7}} e^{j75^\circ} - h_{\text{H}} e^{j140^\circ}$$

$$\text{d) } h(x,y)_{\text{PK7}} \equiv h_{\text{PK7}} e^{j210^\circ} - h_{\text{H}} e^{j140^\circ}$$

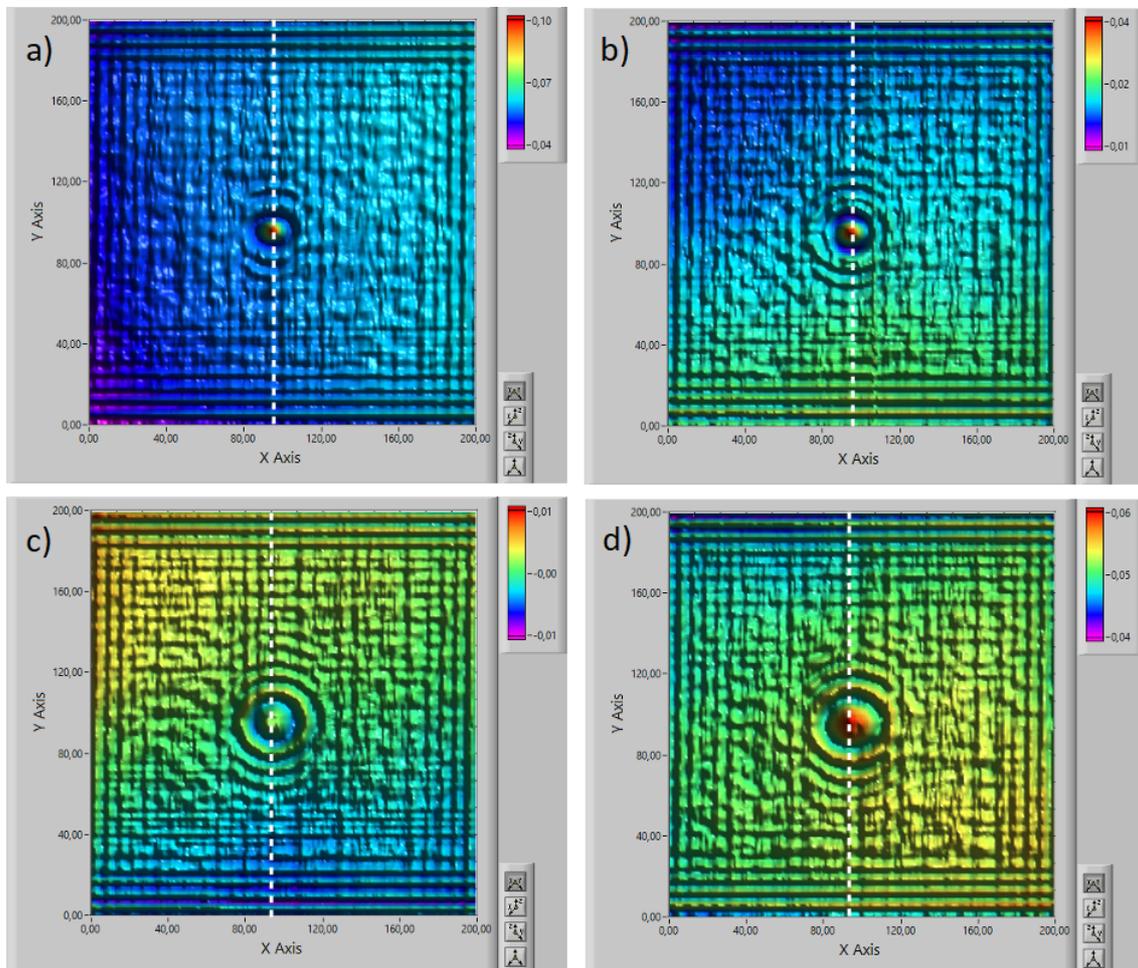


Abbildung 90: Dargestellt ist der Realteil der Messungen des Probekörpers 7 mit dem 5 mm breiten zylindrischen Defekt aus Aluminium in den Messabständen a) 4 mm, b) 14 mm, c) 24 mm und d) 34 mm.

Aus den dreidimensionalen Defektbildern wurden wieder Defektprofile herausgeschnitten, welche in den Abbildungen 91 und 92 dargestellt werden. Die jeweilige Schnittebene ist in den Abbildungen 89 und 90 wieder durch eine weiße Strichlinie angezeigt.

In den Defektprofilen kann man gut die mit der Tiefenlage des Defekts tendenziell kleiner werdende Amplitude in Bezug auf die Grundebene des reflektierten Signals erkennen. Eine Anomalie bilden dabei allerdings die Messungen c), deren Amplituden kleiner sind als denen der Messungen d) mit dem größeren Messabstand. Außerdem ist zu sehen, dass sich die Steilheit der Flanken und damit die Kantenschärfe des Defektabbilds mit zunehmendem Messabstand verschlechtert.

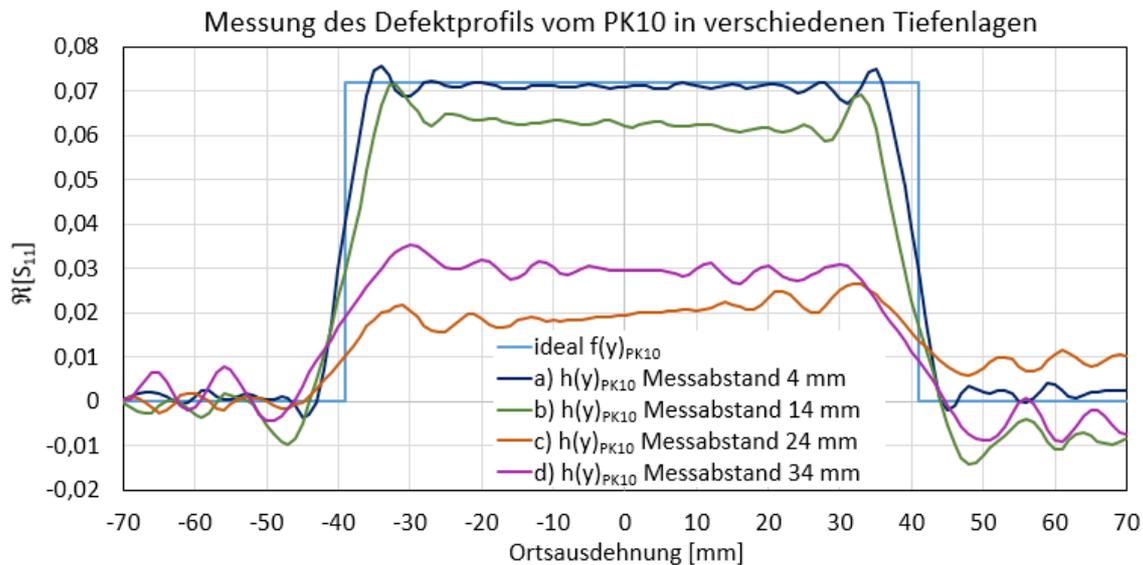


Abbildung 91: Dargestellt ist der Realteil der Messungen des Defektprofils vom Probekörper 10 mit dem L-förmigen Aluminiumdefekt mit 80 mm Durchmesser in unterschiedlichen Tiefenlagen im Polyethylen.

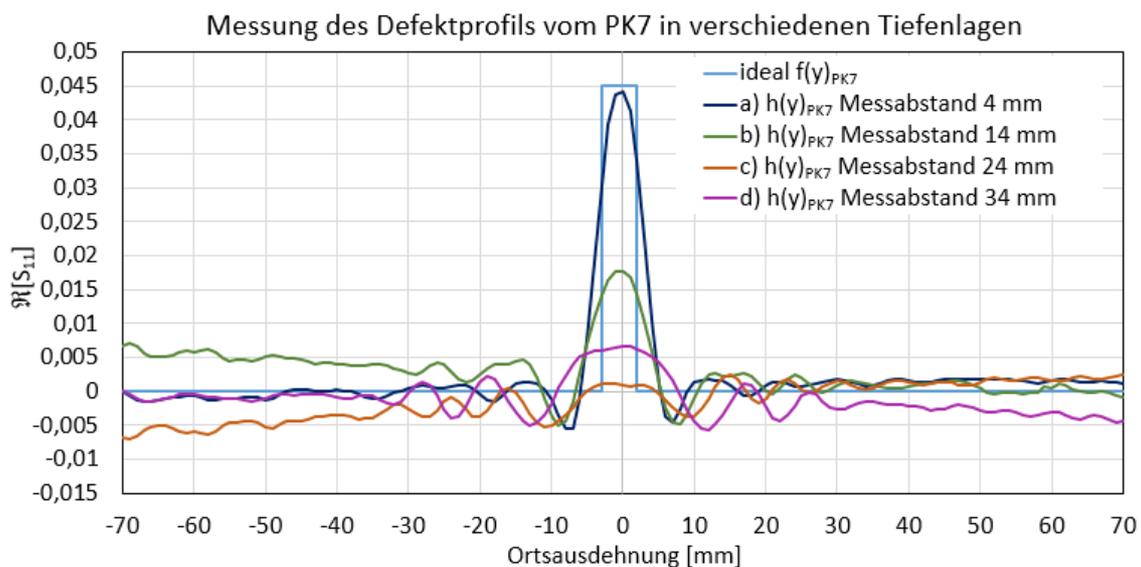


Abbildung 92: Dargestellt ist der Realteil der Messungen des Defektprofils vom Probekörper 7 mit dem zylindrischen Aluminiumdefekt mit 5 mm Durchmesser in unterschiedlichen Tiefenlagen im Polyethylen.

Nachfolgend wird das am Probekörper 10 in einem Abstand von 4 mm gemessene Defektprofil mit den Defektprofilen, die am Probekörper 7 in den unterschiedlichen Messabständen ermittelt wurden, entfaltet. So soll überprüft werden, ob über die Güte der Entfaltung eventuell Rückschlüsse auf die Tiefenlage eines Defekts geschlossen werden können.

Die Ergebnisse dieser Defektrekonstruktionen sind in der Abbildung 93 dargestellt.

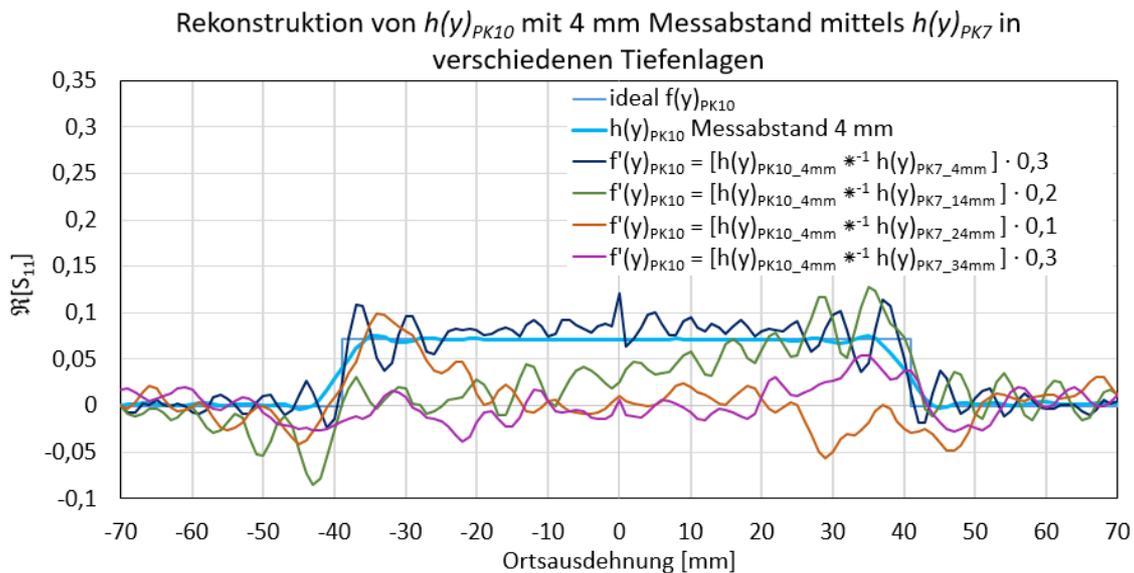


Abbildung 93: Dargestellt ist der mit einem Faktor skalierte Realteil der Entfaltungen des Defektprofils des Probekörpers 10, welches mit einem Messabstand von 4 mm aufgenommen wurde, mit den Defektprofilen des Probekörpers 7 aufgenommen in den Messabständen 4 mm, 14 mm, 24 mm und 34 mm. Für K wurde $5 \cdot 10^{-5}$ gewählt.

In der Abbildung ist ersichtlich, dass das im Messabstand von 4 mm aufgenommene Defektprofil des Prüfkörpers 10 nur mit dem im gleichem Messabstand aufgezeichneten Defektprofil des Prüfkörpers 7 rekonstruiert werden konnte. Mit den in den anderen Messabständen aufgenommenen Defektprofilen des Probekörpers 7 konnte keine brauchbare Defektrekonstruktion erreicht werden, was allerdings auch an der schiefen Grundsignalebene der Messdaten liegt. Tendenziell ist aber auch in den nicht ganz optimalen Messdaten eine Abnahme der Flankensteilheit des Signals an den Kanten des Defektes erkennbar. Daher ist es sicherlich auch möglich, über die Güte der Defektrekonstruktion bei der Verwendung von PSF, die für verschiedene Defekttiefen ermittelt wurden, auf die ungefähre Tiefenlage eines Defektes zu schließen. Das setzt allerdings voraus, dass alle anderen Parameter des Messszenarios, wie zum Beispiel das Defektmaterial, bekannt sind. In der Praxis sind in der Regel allerdings weder die Lage und Größe eines Defektes noch das Defektmaterial bekannt, sodass es mit dieser Methode nicht so einfach möglich ist Rückschlüsse auf einzelne Parameter eines Messszenarios zu ziehen.

7.3. Einfluss der Defektgeometrie

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Defektgeometrie auf die sich herausbildenden Beugungsmuster untersucht. Dafür wurde der in Abbildung 25 abgebildete Probekörper 12 entworfen, der vier Defekte mit unterschiedlichen Geometrien beinhaltet.

Der erste Defekt ist ein Aluminiumzylinder mit 10 mm Durchmesser und 10 mm Höhe, der liegend eingesetzt wurde, sodass sich die gewölbte Zylinderseite der Antenne zuwendet. Der zweite Defekt ist ein Würfel aus Aluminium mit 10x10 mm Breite und 10 mm Höhe. Der dritte Defekt ist ein stehender Zylinder aus Aluminium mit 10 mm Durchmesser und 10 mm Höhe, der so eingesetzt wurde, dass sich dessen glatte, kreisförmige Oberfläche der Antenne zuwendet. Der vierte Defekt ist ein 10 mm hoher Aluminiumzylinder mit 3 mm Durchmesser, der ebenfalls stehend eingesetzt wurde. Das Profil dieses Defekts wird als PSF für die Entfaltungen genutzt. Die Defekte wurden alle so eingepasst, dass deren der Antenne zugewandte Oberfläche sich 2 mm unterhalb der Oberfläche des Probekörpers aus Polyethylen befindet. So ist sichergestellt, dass sie alle denselben Abstand zur Antenne aufweisen. Um die Defekte drei bis vier in der gewünschten Tiefenlage einzusetzen, wurde jeweils eine 2 mm tiefe und 60x60 mm breite Vertiefung in den Probekörper gefräst, die mit einer 2 mm dicken Platte aus PE wieder ausgefüllt wurde. Da die Platten nicht ganz exakt gerade waren, sind im Bild teilweise noch Artefakte zu sehen, die von den Reflexionen an den Rändern der Einsätze herrühren.

Die der Antenne zugewandte Grundfläche des Würfels entspricht der vom liegenden Zylinder, nur dass die Oberflächengeometrie des Zylinders gekrümmt und die vom Würfel glatt ist. Der Vergleich dieser beiden Defekte ist daher von besonderem Interesse. Theoretisch sollten sich die Beugungsmuster dieser beiden Defekte voneinander unterscheiden, da die Mikrowellen durch die gekrümmte Zylinderoberfläche in einem anderen Winkel auf die Defektoberfläche auftreffen, als bei der glatten Oberfläche des Würfels. In der Abbildung 94 ist ein Scan vom Probekörper 12 zu sehen. Die Messdaten wurden bereits nach dem im Kapitel 5.3.2. beschriebenen Verfahren vorverarbeitet. Dabei wurden die folgenden Korrekturwinkel gewählt.

$$h(x,y)_{PK12} \equiv h_{PK12} e^{j310^\circ} - h_H e^{j(-30^\circ)}$$

Anschließend wurde je ein Defektprofil durch die Mitte der vier Defekte aus den Messdaten ausgeschnitten. Die Richtung der Schnitte ist in der Abbildung 94 wieder mit

weißen Strichlinien angedeutet. Damit die Defektprofile unterschieden werden können, wird die Nummer des Defekts (gemäß Abbildung 25) nachfolgend im Subscript mit „PK12_D...“ angegeben. Für die einzelnen Defektprofile wurden die nachfolgenden Schnittkoordinaten verwendet.

$$h(x)_{\text{PK12_D1}} \equiv h(99, 161..221)_{\text{PK12}}$$

$$h(x)_{\text{PK12_D2}} \equiv h(189, 162..222)_{\text{PK12}}$$

$$h(x)_{\text{PK12_D3}} \equiv h(99, 72..132)_{\text{PK12}}$$

$$h(x)_{\text{PK12_D4}} \equiv h(189, 72..132)_{\text{PK12}}$$

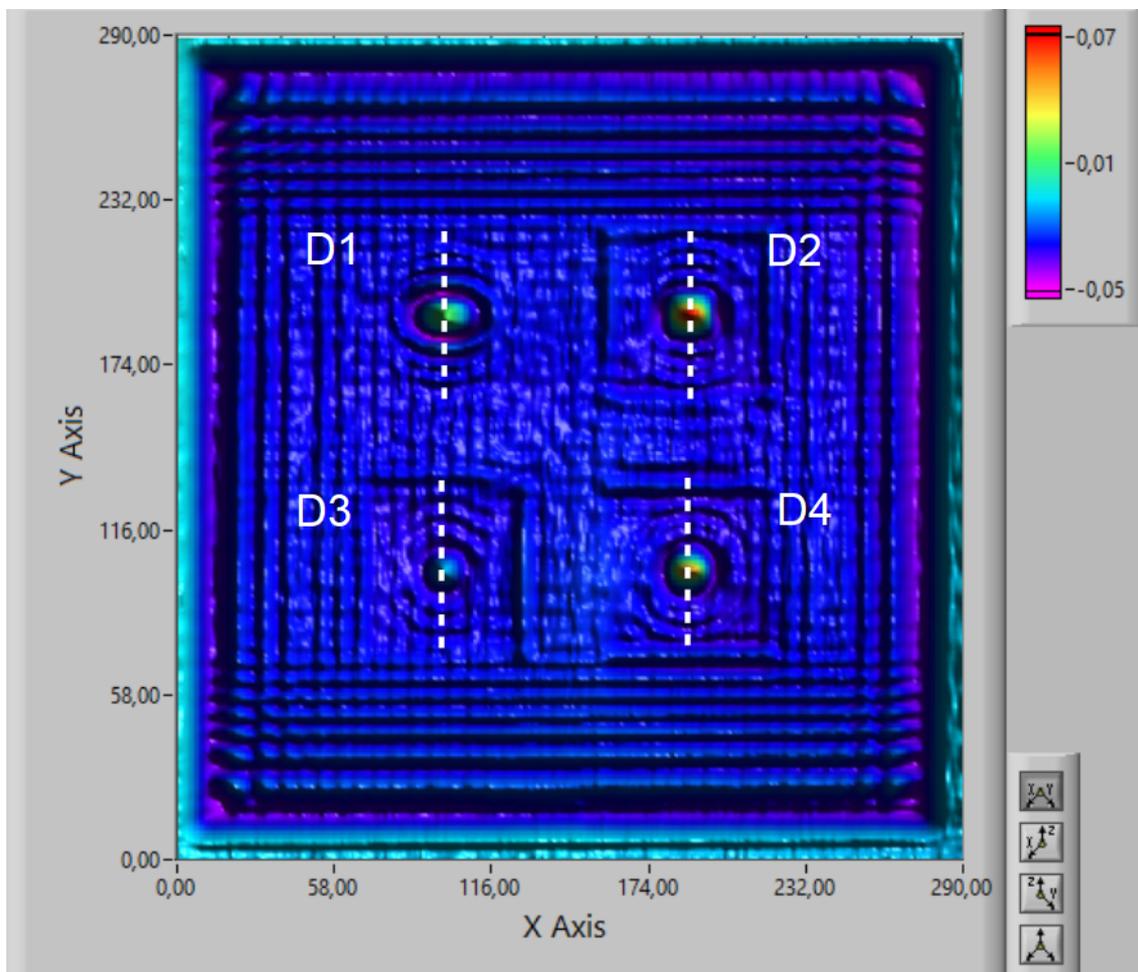


Abbildung 94: Dargestellt ist der Realteil des Scans über den Probekörper 12 mit vier Defekten unterschiedlicher Geometrien. Defekt D1 ist der liegende Aluminium-zylinder mit 10 mm Durchmesser und Höhe. Defekt D2 ist der 10x10x10 mm Aluminiumwürfel. Defekt D3 ist der stehende Aluminiumzylinder mit 3 mm Durchmesser und 10 mm Höhe. Defekt D4 ist der stehende Aluminiumzylinder mit 10 mm Durchmesser und Höhe. Mit den roten Linien sind die Profilschnitte angedeutet.

Die Abbildung 95 zeigt die aus den Messdaten ausgeschnittenen Defektprofile.

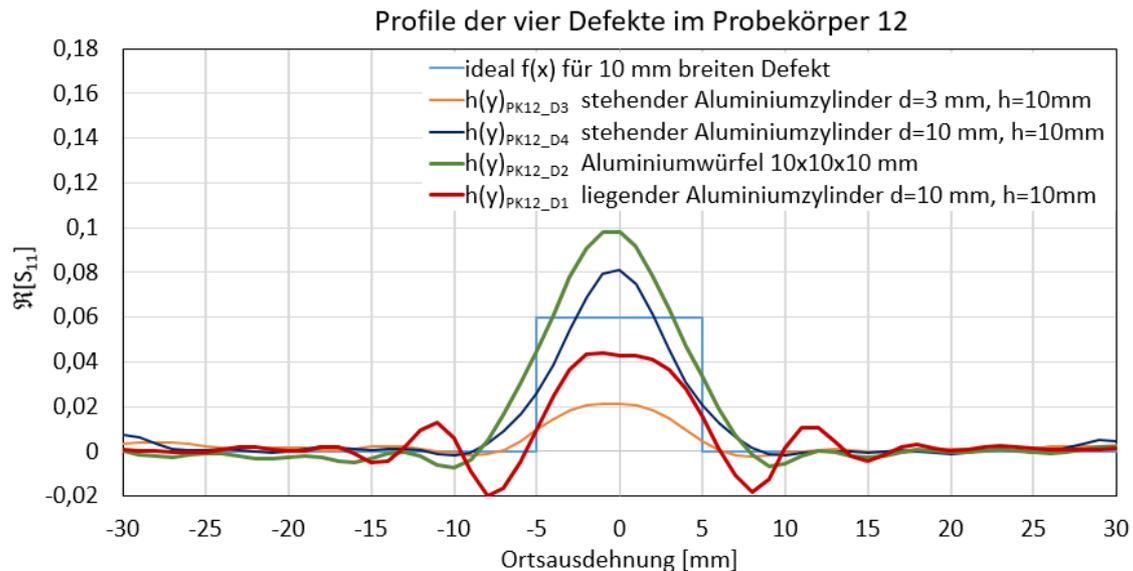


Abbildung 95: Dargestellt ist der Realteil der Defektprofile, die aus dem in Abbildung 94 dargestellten Scan des Probekörpers 12 ausgeschnittenen wurden.

Die Messergebnisse bestätigen die Vermutung, dass sich das Defektprofil des liegenden Zylinders (rot) von dem Defektprofil des Würfels (grün) unterscheidet. Die der Antenne zugewandte Grundfläche beider Defekte war mit 10x10 mm gleich groß. Anders als bei der glatten Oberfläche des Würfels ändert sich beim liegenden Zylinder jedoch wegen der gekrümmten Oberfläche des liegenden Zylinders der Messabstand zur Antenne. Außerdem treffen die Mikrowellen bei der gekrümmten Oberfläche in einem anderen Winkel auf, als bei der glatten Oberfläche. Besonders an den Randbereichen der Krümmung ist der Winkel viel flacher. Das resultierende Beugungsmuster, setzt sich aus der Interferenz vieler einzeln reflektierter Elementarwellen zusammen. So entsteht um den liegenden Zylinder ein Beugungsmuster das im Haupt-Peak eine kleine Amplitude aber dafür größere Nebenmaxima als das Reflexionsprofil des Würfels aufweist.

Aber auch das Defektprofil des stehenden Aluminiumzylinders mit 10 mm Durchmesser unterscheidet sich leicht von dem des Würfels, obwohl beide glatte Defektoberflächen aufweisen. Allerdings besitzt der Würfel eine leicht größere der Antenne zugewandte Grundfläche. Dass die zur Antenne zurück reflektierte Energie von der Größe der Reflexionsfläche abhängig ist, sieht man an der leicht größeren Amplitude des Reflexionsprofils vom Würfel. Außerdem weist das quadratische Reflexionsprofil vom Würfel stärker ausgeprägte Nebenmaxima auf, als das runde Reflexionsprofil des Zylinders.

Da sich die Reflexionsprofile der unterschiedlichen Defekte so stark unterscheiden ist davon auszugehen, dass für eine erfolgreiche Defektrekonstruktion eine auf die

Geometrie des jeweiligen Defekts abgestimmte PSF notwendig ist. Um diese These zu prüfen, wurden die Defektprofile der Defekte 1, 2 und 4 mit dem Defektprofil des Aluminiumzylinders mit 3 mm Durchmesser (D3) entfaltet. Die Ergebnisse der Rekonstruktionsversuche sind in Abbildung 96 zu sehen.

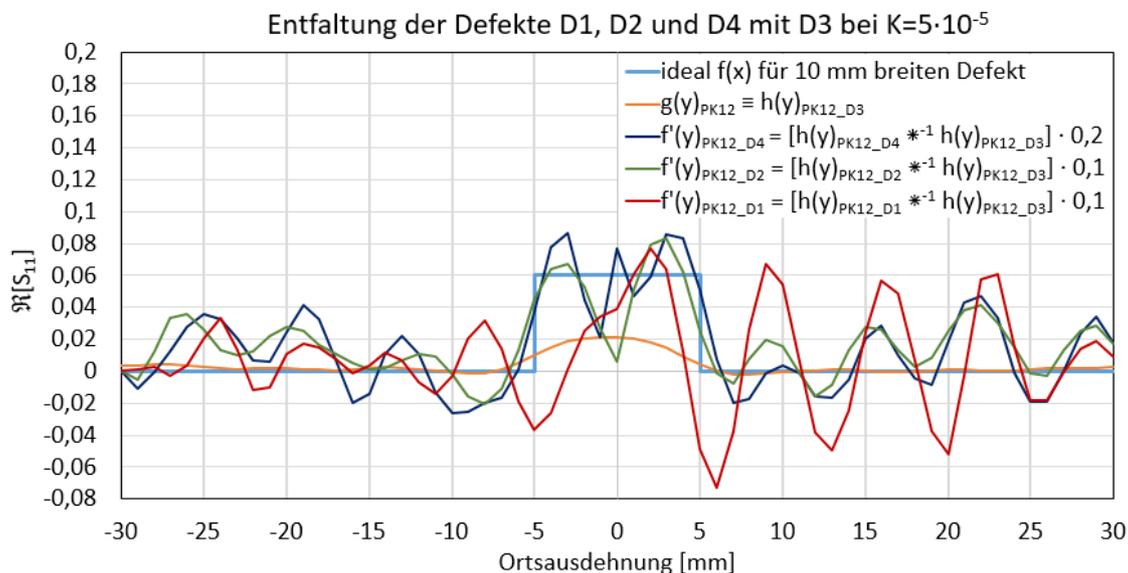


Abbildung 96: Dargestellt ist der Realteil der Entfaltung der Defekte 1, 2 und 4 mit dem Defekt 3, welcher als PSF verwendet wurde.

Das qualitativ beste Resaturationsergebnis wurde bei der Entfaltung des Defektprofils des stehenden Aluminiumzylinders mit 10 mm Durchmesser (D4) erreicht. Das macht auch Sinn, da dieser Defekt dem Defektprofil des stehenden Aluminiumzylinders mit 3 mm Durchmesser (D3) am ähnlichsten war. Aber auch die Rekonstruktion des Würfel-Defekts (D2) weist steilere Flanken als das gemessene Defektprofil auf. Allerdings weist es auch ein starkes Artefakt in Form eines negativen Peaks in der Mitte des Hauptpeaks auf. Dieses Artefakt kann schnell den falschen Eindruck vermitteln, dass es sich um zwei nahe beieinander liegende Defekte handelt (vergleiche Abbildung 85). Der Versuch, das Defektprofil des liegenden Aluminiumzylinders (D1) mit dem Profil des Defekts D3 zu entfalten, lieferte hingegen keine sinnvollen Ergebnisse. Das bestätigt die These, dass die PSF abhängig von der Geometrie gewählt werden muss. In der Praxis können prinzipiell unendliche viele verschiedene Defektgeometrien auftreten. Man denke nur einmal an die möglichen Oberflächengeometrien von Agglomeraten aus Partikeln vielleicht sogar unterschiedlicher Materialien. Dieser Umstand macht die Erstellung einer umfassenden Datenbank von Punktspreizfunktionen, die jede mögliche Kombination beinhaltet, unwahrscheinlich. Ein möglicher Lösungsansatz für dieses Problem wäre, sich statt einer PSF-Datenbank auf einen Algorithmus der blinden Entfaltung zu konzentrieren, bei dem die konkrete PSF vorab nicht bekannt sein muss [19].

8. Abbildung der PSF durch parametrierbare Funktionen

Die gemessenen Beugungsmuster an den Defekten entstehen durch eine Überlagerung von potentiell unendlich vielen Elementarwellen, die an den Kanten des Defekts reflektiert werden. Je nach Abstand und Winkel zur Antenne besitzen diese Elementarwellen unterschiedliche Reflexionsfaktoren und damit auch Amplitudenwerte sowie Phasenversätze zueinander. Außerdem treten innerhalb des Probekörpers Mehrfachreflexionen und Interferenzen der einzelnen Elementarwellen auf. Die exakten physikalischen Vorgänge, die zur Entstehung der Beugungsmuster führen, sind analytisch nicht abbildbar. Daher ist es eine besondere Herausforderung, eine parametrierbare Funktion zu finden, die einem gemessenen oder simulierten Defektprofil möglichst genau folgt. Im Abschnitt 6.2.2. wurde gezeigt, dass das Reflexionsprofil eines möglichst kleinen Punktdefekts als PSF verwendet werden kann. Darum wird nachfolgend versucht, diese Reflexionsprofile möglichst genau durch eine parametrierbare Funktion nachzubilden.

Für optische Anwendungen gibt es mit der Formel für die Airy-Scheibchen

$$I(r) = I_0 \cdot \left(\frac{2J_1(\pi r)}{\pi r} \right)^2 \quad (\text{Gleichung 69})$$

zumindest eine analytische Lösung für die Beugung von Licht hinter einer Kreisblende. Dabei steht J_1 für eine Besselfunktion erster Art und ersten Grades. Die Größe I_0 ist die maximale Lichtintensität und r ist der Abstand vom Punkt der maximalen Lichtintensität. Leider weist diese Funktion zu kleine Amplituden für die Maxima der Beugungsmuster auf, sodass wir sie so nicht nutzen können, wie Abbildung 97 zeigt.

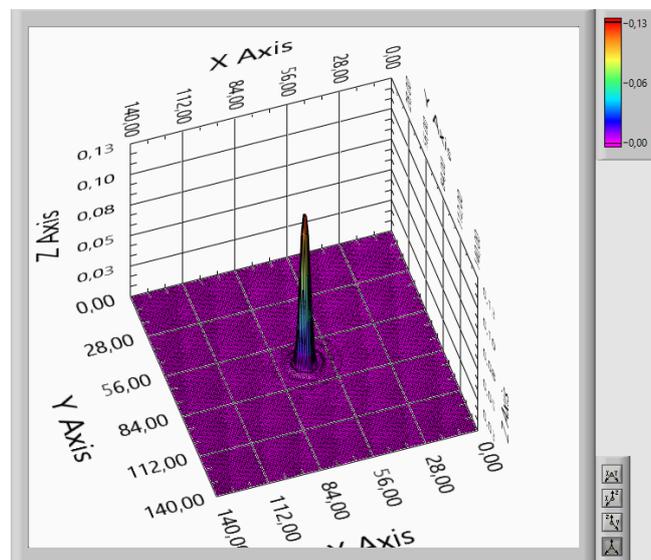


Abbildung 97: 3D-Darstellung einer klassischen Airy-Funktion.

Da die Positionen der Maxima des Beugungsmusters bei der Airy-Funktion aber schon recht gut passten, wurde die Funktion dahingehend modifiziert, dass die Potenz gestrichen wurde. Das führt zu einer größeren Amplitude der Beugungsmuster in Bezug zum Maximalwert. Außerdem reichen die Beugungsmuster so auch in den negativen Bereich, was für die Anpassung der Funktion an den Realteil der Messung des Defekts mit 10 mm Durchmesser im Probekörper 6 von Vorteil ist. Außerdem wurde der Funktion

noch der Faktor $e^{-\frac{(by)^2}{w} \cdot s + (1-s)}$ hinzugefügt, welcher einer Dämpfungsfunktion entspricht, die einer Gaußkurve ähnelt. Mit diesem Faktor können die Amplituden der Beugungsmuster vom Funktionsmittelpunkt weg zusätzlich abgeschwächt oder die Breite des mittleren Maximums angepasst werden. Der Abschwächungseffekt ist umso größer, je kleiner die Variable w und der Offset der Dämpfungsfunktion s gewählt wird.

Die Formel für die in Abbildung 98 dargestellte Fitting-Funktion lautet

$$\text{Fitt}[h(y)] = a \cdot \frac{2J_1[\pi \cdot (by)^v]}{\pi \cdot (by)^v} \cdot \left(e^{-\frac{(by)^2}{w} \cdot s + (1-s)} \right) + q$$

Mit Hilfe der Variable b lässt sich die Breite der Funktion variieren. Mit der Potenz v kann die Funktion von der Funktionsmitte aus gestaucht oder gestreckt werden. Die Variable a bestimmt das Maximum der Funktion und q deren Offset.

Die grün gepunktete Linie in Abbildung 98 zeigt die Abweichung der Fitting-Funktion vom gemessenen Defektprofil.

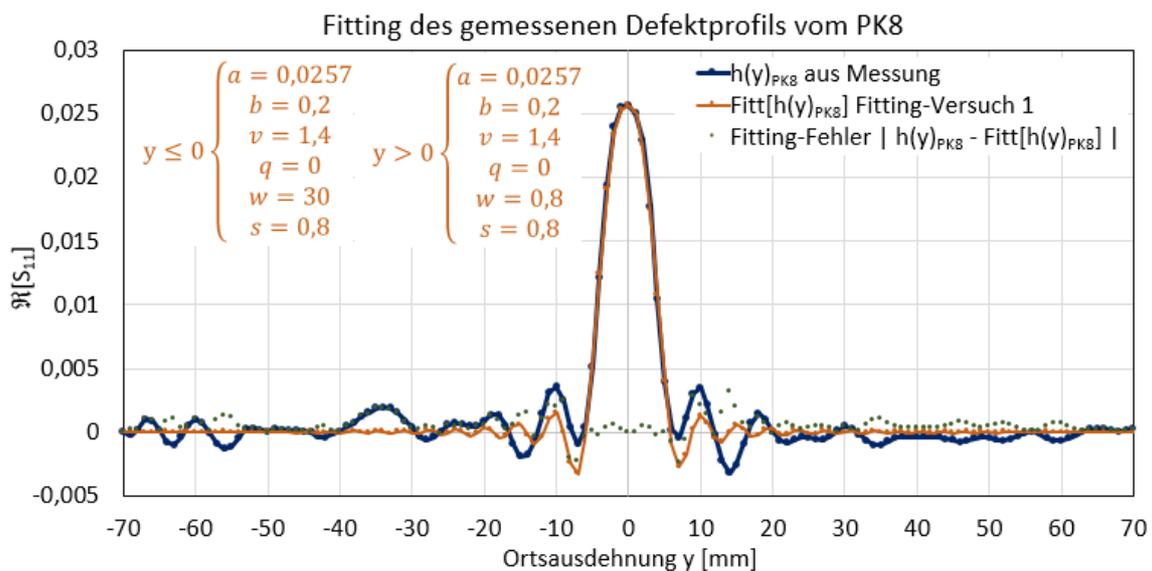


Abbildung 98: Erster Fitting-Versuch für die Messung am Probekörper 8 mit dem zylindrischen Defekt mit 3 mm Durchmesser mit Aluminiumeinsetzung mit Hilfe einer angepassten „Airy-Funktion“.

Diese Fitting-Funktion funktioniert nur für positive Laufvariablen $y > 0$. Aufgrund der Symmetrieeigenschaft der Funktion kann der Funktionsteil für $y < 0$ aber trotzdem berechnet werden, indem man die Funktion für eine positive Laufvariable berechnet, die Reihenfolge der berechneten Amplitudenwerte umkehrt und den negativen und positiven Teil anschließend zusammensetzt. In der Position $y = 0$ wird die Amplitude der Funktion einfach auf den Wert $h(0) = a \cdot 1 + q$ gesetzt.

Es ist zu sehen, dass die Fitting-Funktion den Haupt-Peak gut nachbildet. Die ersten Maxima des Beugungsmusters konnten bezüglich ihrer Position gut nachgebildet werden. Allerdings besitzt das Beugungsmuster in den Messdaten einen Offset von 0,002 welcher durch die Fitting-Funktion nicht nachgebildet werden konnte, und ab dem zweiten Maxima des Beugungsmusters stimmt das Vorzeichen nicht mehr. Die nicht ganz optimale Form des Defektprofils lässt sich mit der sehr geringen Leistung des Reflexionssignals aufgrund der sehr kleinen Reflexionsfläche erklären. So haben die vom Hintergrund verursachten Störeinflüsse einen stärkeren Einfluss auf die Signalform. Das Defektprofil des Probekörpers 6 mit 10 mm Durchmesser lässt sich aufgrund des besseren Signal-Rausch-Verhältnisses besser nachbilden, wie Abbildung 99 zeigt.

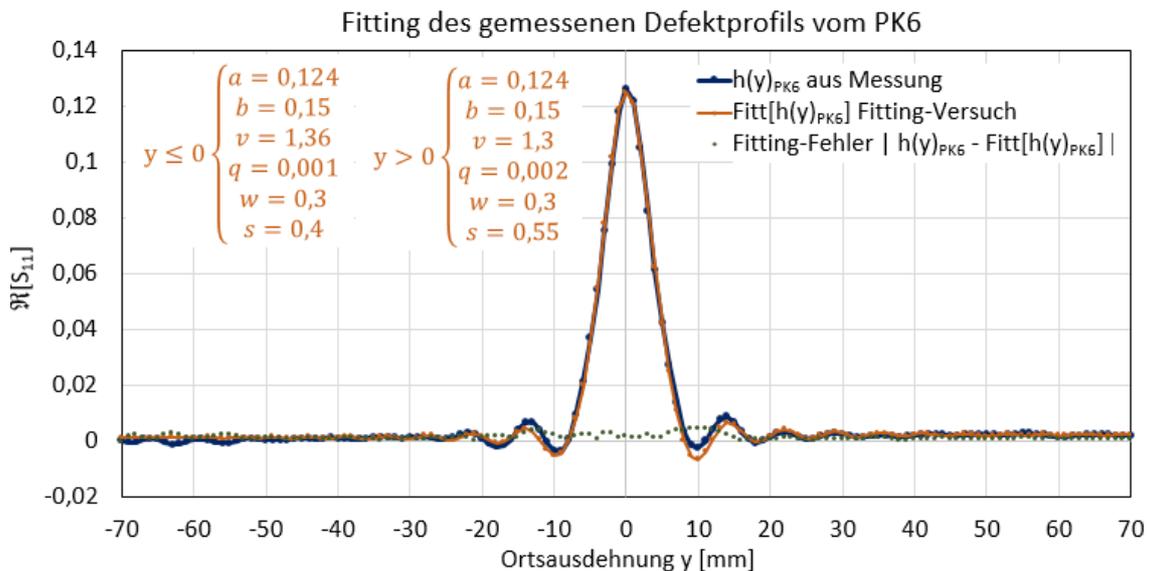


Abbildung 99: Fitting-Versuch für die Messung am Probekörper 6 mit dem zylindrischen Defekt mit 10 mm Durchmesser mit Aluminiemeinsatz.

Der relative Fehler der Fitting-Funktion in Bezug auf die Messdaten ist als grün gepunktete Linie dargestellt. Bei der Funktionsanpassung wurde vor allem darauf geachtet, dass der Haupt-Peak möglichst genau nachgebildet wird, da er bei der Entfaltung den größten Einfluss auf das Ergebnis hat. Um diese These zu untermauern, wurde noch ein zweiter Fitting-Versuch vorgenommen, bei dem nur der Haupt-Peak des gemessenen Defektprofils des Probekörpers 8 mit einer bezüglich der Peak-Breite angepassten

Gauß-Funktion nachgebildet wird. Die Nebenmaxima um den Haupt-Peak herum wurde dabei bewusst ignoriert. Dieser Fitting-Versuch ist in Abbildung 100 zu sehen.

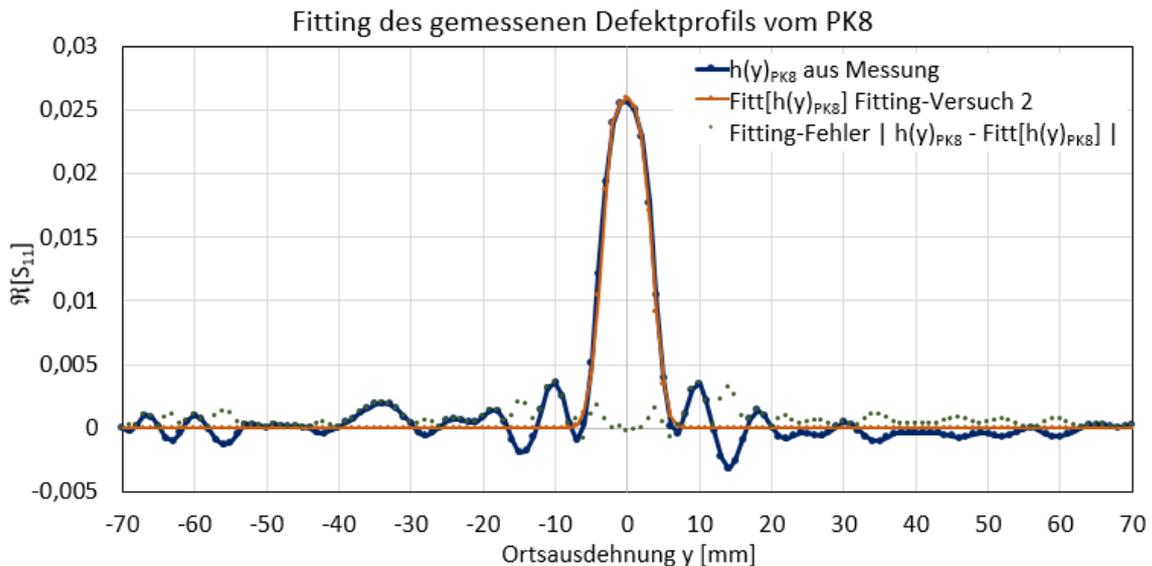


Abbildung 100: Zweiter Fitting-Versuch für die Messung am Probekörper 8 mit dem zylindrischen Defekt mit 3 mm Durchmesser mit Aluminiumeinsatz mit Hilfe einer angepassten „Gauß-Funktion“.

Im nächsten Schritt soll die Güte der Entfaltung des Defektprofils vom Probekörper 10 mit a) dem gemessenen Defektprofil vom Probekörper 8 und b) mit der in Abbildung 98 dargestellten Fitting-Funktion und c) mit der in Abbildung 100 dargestellten Fitting-Funktion verglichen werden.

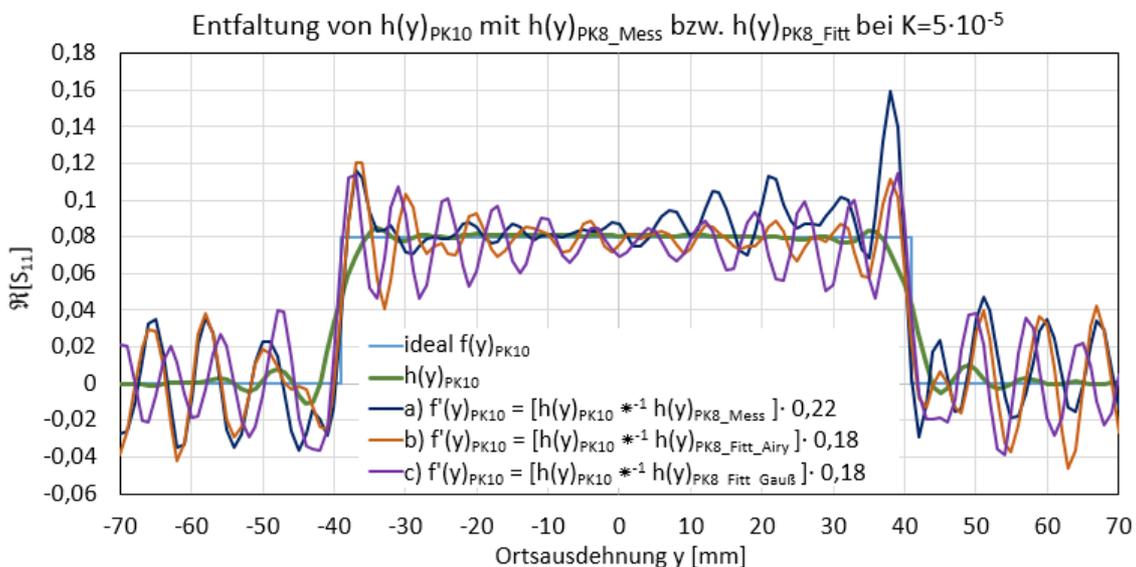


Abbildung 101: Dargestellt sind die skalierten Realteile der Entfaltung vom gemessenen Defektprofil des Probekörpers 10 mit a) dem gemessenen Defektprofil des Probekörpers 8, b) der auf diese Messung angepassten „Airy-Fitting-Funktion“ aus Abbildung 98 und c) der auf die Messung angepassten „Gauß-Fitting-Funktion“ aus Abbildung 100.

Ein Vergleich der Güte der beiden Defektrekonstruktionen in Abbildung 101 zeigt, dass das Ergebnis der Entfaltung des gemessenen Defektprofils mit der in Abbildung 99 dargestellten Fitting-Funktionen sogar ein wenig besser ist, da die leichte Schiefelage des Grundsignals in den Messdaten etwas ausgeglichen wird. Die PSF ist für ausgewählte Fälle also durchaus durch eine parametrierbare Funktion erzeugbar. Das Verhältnis der Amplituden vom Hauptmaxima und den Nebenmaxima kann mit der vorgestellten „Airy-Fitting-Funktion“ allerdings nur geringfügig verändert werden. Diese Funktion kann daher nur Defektprofile nachbilden, bei denen die Amplitude des mittleren Hauptmaxima um ein Vielfaches größer ist, als die Amplituden der Nebenmaxima. Das ist der Fall, wenn der Abstand des Defekts zur Antenne klein ist und der Unterschied der Permittivität vom Defektmaterial und dem den Defekt umgebenden Material möglichst groß ist, wie in den Abbildungen 92 und 79 gezeigt. Um Defektprofile nachzubilden, bei denen sich die Amplitudenwerte der Haupt- und Nebenmaxima angleichen, muss die Funktion um weitere die Form der Funktion verändernde Faktoren erweitert werden. Das würde die Anzahl der Funktionsparameter allerdings weiter erhöhen und den Optimierungsprozess zum Finden einer passenden Funktion weiter erschweren.

Wie Abbildung 101 gezeigt hat, ist die genaue Nachbildung der Nebenmaxima aber gar nicht unbedingt notwendig, sofern nur die grobe Form des Defektprofils rekonstruiert werden soll. Bei der Entfaltung traten bei allen getesteten Varianten ähnlich starke Artefakte auf. Das lässt darauf schließen, dass die verwendeten PSF für dieses Messszenario nicht ideal waren. Diese Artefakte stellen für den im Forschungsantrag angedachten Optimierungsprozess zum Finden einer passenden PSF über eine einzige parametrierbare Fitting-Funktion ein Problem dar. Mit diesen Artefakten ist es schwierig, eine geeignete Kostenfunktion für den Optimierungsalgorithmus zu finden da sich gezeigt hat, dass sich die Qualität bzw. das Rauschen im Bild durch die bei der Entfaltung entstehenden Artefakte eher verschlechtert anstatt verbessert. Ansätze, die versuchen, das Signal-Rausch-Verhältnis oder die Anzahl der Kanten im Bild auszuwerten, scheiden damit bereits aus. Ein weiteres Problem ist, dass in der Praxis das Defektmaterial, die Defektform und die Lage des Defekts im Prüfstück in der Regel unbekannt sind. Außerdem können mehrere Defekte auftreten, die nahe beieinander liegen und deren Beugungsmuster sich daher überlagern, wie in Abbildung 36 gezeigt, was die Nachbildung eines entsprechenden Defektprofils zusätzlich erschwert.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird das Konzept einer Entfaltungstechnik erläutert, mit dem die Qualität von Scans in der zerstörungsfreien Mikrowellendefektoskopie unter Verwendung von relativ niedrigen Prüffrequenzen (24 GHz) verbessert werden soll. Dabei wird ein gemessenes Defektbild im Frequenzbereich mit einer Punktspreizfunktion (PSF) entfaltet, die Antwort des Messsystems auf eine idealisierte Punktquelle darstellt. Durch diese Entfaltung sollen insbesondere die bei diesen Frequenzen im Defektbild auftretenden Beugungserscheinungen reduziert werden, welche vor allem in den Randbereichen eines Probekörpers die eigentlichen Defekte überlagern können.

Dazu wurde zunächst eine an der Hochschule Magdeburg-Stendal vorhandene Mikrowellen-Messanlage für die durchzuführenden Experimente umgerüstet und vorbereitet. Die LabVIEW-Messsoftware der Messanlage wurde angepasst und um verschiedene Funktionen, wie die Bildung des Medians mehrerer Messwerte, oder den Hintergrundabzug mit Phasenanpassung erweitert. Dadurch konnte die Qualität der Messdaten deutlich verbessert werden. Außerdem wurde ein separates LabVIEW-Programm erstellt, mit dem die Defektrekonstruktionen durchgeführt wurden. Zusätzlich wurde versucht, eine Stielstrahlerantenne zu entwerfen, die einen möglichst punktsymmetrischen Antennen-Footprint aufweisen und die Mikrowellenstrahlung im Nahfeld fokussieren sollte. Dazu wurden Feldsimulationen für verschiedene Taper-Formen und Stecktiefen durchgeführt und die Antenne in praktischen Messungen getestet. Bei den Messungen stellte sich allerdings heraus, dass diese Stielstrahlerantenne gegenüber einem offenem Hohlleiter keine nennenswerten Vorteile bot.

Um die praktische Umsetzbarkeit des Entfaltungsansatzes zu prüfen, wurden mehrere Experimente mit der Mikrowellen-Messanlage durchgeführt. Diese Experimente wurden von Dr. Maxim Nesterov und Frau Cuihua Li mit zum Teil mit 3D-Feldsimulationen nachgestellt, um die Ergebnisse zu validieren. Generell zeigen die Simulation ähnliche Ergebnisse, wie die Experimente.

In den im 6. Kapitel präsentierten Experimenten wurde zunächst untersucht, wie eine auf ein bestimmtes Messszenario abgestimmte Punktspreizfunktion messtechnisch ermittelt werden kann. Dazu wurden drei Methoden vorgestellt und getestet. Die erste Methode war die Messung des Beugungsmusters eines möglichst kleinen, nahezu punktförmigen Defekts. Das Beugungsprofil dieses Defekts wurde dann als PSF für die

Entfaltungen genutzt. Bei der zweiten Methode wurde die 1. Ableitung des Beugungsprofils einer Defektkante als PSF genutzt. Die dritte Methode beruhte darauf, einen bekannten Defekt zu vermessen und dessen Defektbild mit der bekannten Objektfunktion zu entfalten, um so die PSF zu erhalten. Nach der Bewertung der mit diesen Methoden erzielten Rekonstruktionsergebnisse wurde für alle weiteren Versuche die erste Methode gewählt, bei der als PSF das Profil eines kleinen Defekts mit 3 mm Durchmesser herangezogen wird. Denn nur mit dieser Methode wies die PSF ein unter physikalischen Gesichtspunkten sinnvolles, nahezu spiegelsymmetrisches Profil auf. Außerdem war die Methode technisch am einfachsten umzusetzen.

In den Experimenten im 7. Kapitel wurde untersucht, wie sich das Material sowie die Oberflächengeometrie und die Tiefenlage eines Defektes auf die Form der für die Entfaltung zu verwendenden PSF auswirken. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl die Oberflächengeometrie, die Materialien des Defekts und des ihn umgebenden Mediums als auch die Tiefenlage des Defekts teilweise einen erheblichen Einfluss auf das sich um den Defekt herausbildende Beugungsmuster und damit auch auf die zu verwendende PSF haben.

Die Ergebnisse der Entfaltungen aus bekannten Defekten mit den zuvor erzeugten PSF zeigen, dass nach der Entfaltung starke Artefakte im Defektbild auftreten, die die Güte der Defektbilder insgesamt eher verschlechtern als verbessern. Auch die Verwendung der Daten aus den Simulationen, bei denen äußere Störeinflüsse durch die Messanlage ausgeschlossen werden können, verbessert die Güte der rekonstruierten Defektbilder insgesamt nur unwesentlich. Die Entfaltung könnte allerdings trotzdem helfen, die Defekte im Probekörper genauer zu klassifizieren da sich gezeigt hat, dass sich bei Verwendung einer passenden PSF zumindest die Kantenschärfe der Defekte verbessert und die tatsächliche Defektgröße maßgetreuer abgebildet wird. Außerdem konnte gezeigt werden, dass zwei nahe beieinanderliegende Defekte, die vor der Bildrekonstruktion nur als einzelner Punkt im Defektbild erkennbar waren, sich nach der Entfaltung klar unterscheiden ließen. Das zeigt, dass die Ortsauflösung für nahe beieinanderliegende Defekte gleichen Materials durch die Entfaltung mit einer passenden PSF verbessert werden kann. Wird allerdings eine für das Messszenario unpassende PSF für die Entfaltung gewählt, wird das Bild so stark verändert, dass es dadurch ebenfalls zu Fehlinterpretationen kommen kann. Das Entfaltungsverfahren kann aber trotzdem für bestimmte Fälle eine Hilfestellung für die Deutung eines uneindeutigen Defektbildes sein.

Ein weiterer Teil der Arbeit beschäftigt sich damit, eine parametrierbare Funktion zu finden, die die Form der PSF einiger ausgewählter Messszenarien möglichst genau abbildet. Diese parametrierbaren PSF-Funktionen sind eine wichtige Voraussetzung, um später eine Datenbank zu speisen, aus der mittels eines Optimierungsverfahrens eine auf das jeweilige Messszenario passende PSF gewählt werden soll. Diesbezüglich wurde gezeigt, dass eine modifizierte Version einer Airy-Funktion die PSF von kleinen, sehr nahe an der Antenne gemessenen Defekten gut nachbilden kann. Außerdem wurde festgestellt, dass das zentrale Maxima einer PSF für kleine, sich nahe an der Antenne befindende Defekte, maßgeblich für die Form des Defekts nach der Entfaltung mit der PSF verantwortlich ist. Werden die Nebenmaxima der PSF nicht exakt nachgebildet, führt das lediglich zu leicht stärkeren Artefakten im entfalteten Bild. Da aber auch bei einer genaueren Nachbildung der PSF mit Nebenmaxima Artefakte im entfalteten Bild auftreten, ist der ungleich höhere Aufwand für die Nachbildung der Nebenmaxima eventuell nicht gerechtfertigt.

Bewertet man alle erzielten Ergebnisse in Ihrer Gesamtheit, muss man die Umsetzbarkeit es „Entfaltungsverfahrens“ für praktische Anwendungen infrage stellen. Es hat sich gezeigt, dass sich die nachzubildenden PSF für die unterschiedlichen Messszenarien teils stark unterscheiden und nicht von einer einzelnen parametrierbaren analytischen Funktion nachgebildet werden können. Außerdem korrelieren die Parameter, die die analytische Funktion formen, nicht unbedingt mit den physikalischen Parametern, die ein Messszenario beschreiben.

Ein erhoffter Effekt des Rekonstruktionsverfahrens war es, Defekte sichtbar zu machen, die sich nahe von Objektkanten befinden und von deren Beugungsmustern überlagert werden. Nach dem jetzigen Erkenntnisstand ist es fraglich, ob sich das in der Praxis so umsetzen lässt. Die im Abschnitt 7.1.2. vorgestellten Messergebnisse deuten an, dass eine Separierung von Defekten, deren Beugungsmuster sich überlagern, nicht möglich ist, wenn für die Entfaltung der einzeln betrachteten Defekte unterschiedliche PSF nötig wären. Das ist zum Beispiel bei Defekten unterschiedlicher Materialien der Fall, da sich aufgrund der unterschiedlichen Reflexionsfaktoren unterschiedlich starke Beugungsmuster um die Defekte herum ausbilden. Auch die Größe der Reflexionsfläche eines Objekts hat einen Einfluss auf die Stärke seines Beugungsmusters. Daher sind die Beugungsmuster an Objektkanten in der Regel ausgeprägter als die Beugungseffekte, die sich um kleine Defekte bilden. Außerdem kann das Material des Defekts ein anderes sein, als die die Objektkante in der Regel umgebende Luft. Damit wären für die einzelne

Entfaltung der Kante und des Defekts zwei unterschiedliche PSF notwendig, und die Entfaltung sollte nach dem jetzigen Kenntnisstand nur die Rekonstruktion der Objektkante ermöglichen, da deren Beugungsmuster in der Regel das dominantere ist.

Für die Rekonstruktion von zwei nahe beieinander liegenden Objekten, die verschiedene Beugungsmuster ausbilden, müsste vermutlich eine ortsabhängige Überlagerung von mehreren PSF genutzt werden. In [18] wurde ein Entfaltungsverfahren vorgestellt, das die räumliche Variation der PSF für optische Systeme berücksichtigt. Dieses Verfahren ist allerdings aufwendig und nicht unbedingt für ein überlagertes Optimierungsverfahren zur Suche einer passenden PSF geeignet. Außerdem besteht aufgrund der starken Artefakte im restaurierten Defektbild die Schwierigkeit, eine geeignete Kostenfunktion für das Optimierungsverfahren zu finden, die die Qualität der restaurierten Bilder bewerten kann. Zum Beispiel funktionieren Ansätze, die das Rauschen im Bild über die Anzahl der vorhandenen Kanten detektieren nur für künstlich erzeugte Daten, bei denen für einen bestimmten Parametersatz der PSF eine „perfekte“ Rekonstruktion ohne nennenswerte Artefakte gelingt. Da für die realen Messdaten die perfekt passende PSF nicht bekannt ist und es daher zu der starken Artefaktbildung kommt, funktionieren diese Ansätze nicht. So findet ein im Rahmen des Forschungsprojekts getesteter Optimierungsalgorithmus, eine Turnierselektion mit zufälligen Mutationen für künstlich erzeugte Daten fast immer die richtigen Parameter der künstlich erzeugten PSF. Bei den realen Messdaten läuft die Optimierung hingegen fast immer auf eine extrem schmale PSF hinaus, wobei als Ergebnis der Entfaltung ein fast unverändertes Defektbild ausgegeben wird, da diese schmale PSF nahezu einer Entfaltung mit einer δ -Funktion entspricht.

Aufgrund der praktisch unendlichen Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten von Geometrie, Lage und Materialien der Defekte ist auch die Erstellung einer Datenbank, die PSF für alle möglichen Variationen beinhaltet, nicht praktikabel. Ein möglicher alternativer Lösungsansatz könnte die Verwendung eines Algorithmus zur „blinden Entfaltung“ (engl. Blind Deconvolution) sein, wie er zum Beispiel in [19] beschrieben ist. Diese Algorithmen versuchen, die Bildqualität ohne Kenntnis der PSF zu verbessern, indem sie von Schätzwerten ausgehend und mit klar definierten Randbedingungen die Ein- und Ausgangsdaten mithilfe eines Optimierungsverfahrens analysieren. Die Umsetzung solcher Algorithmen ist allerdings meist recht komplex und war nicht Bestandteil des Forschungsprojekts. Sie könnte aber Gegenstand von späteren Arbeiten sein.

Literaturverzeichnis

- [1] INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE AVK E. V., 2017. *Der GfK-Markt Europa 2017* [Pressemitteilung]. Frankfurt: AVK e. V [Zugriff am 30.04.2018]. Verfügbar unter: <https://www.avktv.de/avkpressrelease.php?id=2192>
- [2] WEGERHOFF, Rainer; WEIDLICH, Olaf; KÄSSENS, Manfred, 2011. *Basics of Light Microscopy & Imaging* [online, Zeitschrift]. GIT Verlag: Imaging & Mikroskopy [Zugriff am: 19.11.2018]. Verfügbar unter: <https://www.imaging-git.com/magazine/basics-light-microscopy-imaging-2nd-edition>
- [3] MAKER, David, 1979. *A Superresolution Telescope that Uses Aberration Effects Suppression, Deconvolution By Dimensional Reduction and Optimal Convexity, and Convexity Normalization for Image Size and Dark Noise* [Dissertation, online]. Oregon: Health & Science University [Zugriff am: 19.11.2018]. Verfügbar unter: <https://digitalcommons.ohsu.edu/etd/2657/>
- [4] POLYMER SERVICE GMBH MERSEBURG, 2017. *Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP)* [online]. Merseburg: Polymer Service GmbH Merseburg [Zugriff am 01.05.2018]. Verfügbar unter: [https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Zerstörungsfreie_Prüfung_\(ZfP\)](https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Zerstörungsfreie_Prüfung_(ZfP))
- [5] HINKEN, Johann H., 2007. *Mikrowellenbasierte Zerstörungsfreie Prüfung* [online]. 2007 ZfP-Zeitung 104 [Zugriff am: 01.05.2018]. Verfügbar unter: <http://www.dgzfp.de/Dokumente?EntryId=267>
- [6] ZIEHM, Christian, 2016. *Nahfeldfokussierung für die zerstörungsfreie Mikrowellenprüfung bei 24 GHz* [Masterarbeit]. Magdeburg: Hochschule Magdeburg-Stendal
- [7] BELLER, Thomas, Jahann HINKEN, Matthias VOIGT, 2007. *Hochauflösende Mikrowellen-Defektoskopie* [online]. DGZfP-Jahrestagung 2007, Vortrag 53 [Zugriff am: 01.05.2018]. Verfügbar unter: <http://fitm.de/index.php/anwendungen/>
- [8] WONG, A.M.H., C.D. SARRIS und G.V. ELEFThERIADES, 2007. *Metallic transmission screen for sub-wavelength focusing* [online]. In: Electronic Letters Volume 43. Issue 25 [Zugriff am: 01.05.2018]. IET Digital Library. ISSN 1350-911X. Verfügbar unter: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/el/43/25>
- [9] MORESCO, M., E. ZILLI, 1982. *Focused aperture microwave antennas operating in the near field zone* [online]. In: International Journal of Infrared Milli Waves Volume 3 Issue 2, S. 279-293 [Zugriff am: 01.05.2018]. SpringerLink Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/BF01007102>
- [10] GROSS, Rudolf, 2003. *Kapitel 5 Beugung und Interferenz* [online]. Lecture Notes of Prof. Gross „Physics 3“ München. Technische Universität München. [Zugriff am: 01.05.2018]. Verfügbar unter: www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_5.pdf
- [11] KARK, Klaus W., 2017. *Antennen und Strahlungsfelder*. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-13964-3
- [12] WIESBECK, W., 2005. *Skriptum zur Vorlesung Antennen und Antennensysteme* [online]. Universität Karlsruhe (TH) 2005 [Zugriff am: 01.05.2018]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/70053960-Antennen-und-antennensysteme.html>

- [13] POZAR, David M., 2012. *Microwave Engineering*. 4. Auflage. Hoboken (U.S.A.): John Wiley & Sons Inc.. ISBN 978-0-470-63155-3
- [14] BRINKMANN, Eva-Maria, 2012. *Dekonvolution in der Mikroskopie* [Bachelorarbeit]. Münster: Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- [15] WEINHAUS, Fred, 2011. *ImageMagick v6 Examples -- Fourier Transforms*[online]. www.imagemagick.org [Zugriff am: 01.05.2018]. Verfügbar unter: http://www.imagemagick.org/Usage/fourier/#fft_partial
- [16] ZACHARIAS, Sven, 2016. *Dokumentation zur Simulation der dielektrischen Stielstrahler und dielektrischen Sammellinsen bei 24 GHz in EMPro* [Internes Dokument]. Magdeburg: Hochschule-Magdeburg-Stendal.
- [18] DOS SANTOS ROLO, Tomy, 2008. *Bildrestauration durch Entfaltung mit der ortsabhängigen PSF des optischen Systems* [Diplomarbeit]. Darmstadt: Hochschule Darmstadt, Fachbereich MN
- [17] BOREMAN, Glenn D., 2001. *Modulation Transfer Function in Optical and Electro-Optical Systems*. Bellingham, Washington: SPIE-The International Society for Potical Engineering, ISBN 0-8194-4143-0
- [19] MOHAMMAD-DJAFARI, Ali; QUADDOMI, Nasser; ZOUGHI, Reza, 1999. *A Blind deconvolution approach for resolution enhancement of near-field microwave images* [online]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 3816, doi: 10.1117/12.351322 [Zugriff am: 01.05.2018]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/2539515_A_Blind_Deconvolution_Approach_For_Resolution_Enhancement_Of_Near-Field_Microwave_Images

A Anhang

A.1. Dielektrische Materialparameter der verwendeten Materialien

Material	Temperatur [°C]	Frequenz [Hz]	Dielektrischer Verlustfaktor $\tan \delta$	relative Permittivität ϵ_r	Quelle(n)
Polyetylen (PE)	24	$24 \cdot 10^9$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	2,35	[1]
Wasser	25	$24 \cdot 10^9$	32	35	[2, 3]
Luft	20	$24 \cdot 10^9$		1,0006	[2]
Aluminium	wird in den Simulationen als perfekter elektrischer Leiter behandelt				

Tabelle 1: dielektrische Eigenschaftswerte der genutzten Materialien

Quellen für die Materialparameter:

- [1] KRUPKA, Jerzy, 2016 *Measurements of the Complex Permittivity of Low Loss Polymers at Frequency Range From 5 GHz to 50 GHz*. [online] IEEE Microwave and Wireless Components Letters, DOI: 10.1109/LMWC.2016.2562640 [Zugriff am 08.10.2018] Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7473928>
- [2] LIDE, David R., 2005 *CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version 2005*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [3] CHAPLIN, Martin, 2018. *Water Structure and Science* [online]. London. [Zugriff am 08.10.2018]. Verfügbar unter: http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html#equ

