

Technische Universität Ilmenau  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik



# Bachelorarbeit

Identifizierung von Fehlereinflüssen auf die  
SAFT-Rekonstruktion händisch aufgenommener  
Ultraschallmessdaten

<b>Eingereicht von</b>	Sayako Kodaera
<b>Eingereicht am</b>	16.01.19
<b>Studiengang</b>	Elektrotechnik und Informationstechnik
<b>Spezialisierungsrichtung</b>	Informations- und Kommunikationstechnik
<b>Matrikelnummer</b>	53168
<b>Betreuer</b>	M. Sc. Fabian Krieg M. Sc. Jan Kirchhof
<b>Verantwortlicher Professor</b>	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Giovanni Del Galdo
<b>2. Gutachter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Ahmad Osman, Fraunhofer IZFP
<b>Fachgebiet</b>	Elektronische Messtechnik und Signalverarbeitung EMS

# Abstract

Material inspection is the core tool to ensure the absence of critical flaws in fabrication and enable maintenance of large infrastructure. One of its methods is ultrasonic testing (UT). As the image quality of raw UT data is generally insufficient to visualize the inner structure of objects, its image quality can be improved by post-processing. Techniques used for post-processing are developed to process automatically acquired data, although UT measurements are mostly performed manually. Due to the lack of positional information, post-processing of manual data has been challenging. However, by using the measurement system capable of recording scan positions, post-processing of manual data can be performed, enabling to enhance the visual feedback to the operator in assistance systems.

One of the prevalent post-processing methods is the Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT). So far, its application potentials to manually acquired data are little studied. Since manual measurements differ from its automatic counterpart, such as irregular sampling or inaccurate position recognition, its SAFT reconstruction is significantly degraded, when such differences are not considered.

In order to determine the effect of the error sources on the SAFT image quality, this thesis compares automatic and manual measurement setups and derives five factors: coarser sampling density, unequal distribution of the scan positions, lower coverage of the inspection area, positional inaccuracy and varying contact pressure. As to the former two factors, there are already relevant studies from which we can assess their impact. Moreover, the former three are related to scan path decisions of the operator, which we cannot influence. Hence, this thesis focuses on the latter three factors by conducting two simulation studies.

The first investigates the impact of the positional inaccuracy and the spatial coverage, while the second examines the effect of varying contact pressure. For the evaluation, we compare the obtained results with a SAFT reconstruction of a simulated automatically acquired data set serving as reference. By showing that the effect of those factors are tolerable or even negligible under suitable conditions, both studies demonstrate the feasibility of applying SAFT to manual measurement data.

In the future, the obtained results can be used as indicators for developing measurement assistance systems.

---

# Zusammenfassung

Die Materialprüfung sichert in der Fertigung den Ausschuss von mit kritischen Fehlern behafteten Bauteilen und ermöglicht die Überwachung der Infrastruktur. Die Ultraschallprüfung (UP) ist eine ihrer Hauptmethoden. Da die Bildqualität von Ultraschallrohdaten nicht ausreicht um die innere Struktur eines Objektes zu visualisieren, werden die Rohdaten oft nachverarbeitet. Post-processing Techniken existieren zur Verarbeitung von maschinell aufgenommenen UP-Messdaten. Der Großteil der UP erfolgt jedoch händisch. Die Nachverarbeitung solcher Messdaten ist aufgrund der fehlenden Positionsinformation schwierig. Wenn jedoch das Messsystem befähigt wird, die Positionsinformation mit zu erfassen, wird eine Nachverarbeitung möglich. Damit kann das visuelle Feedback an den Prüflingenieur, z.B. durch Assistenzsysteme, verbessert werden.

Eine der verbreitetsten Nachverarbeitungsmethoden ist die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT). Zur Anwendung von SAFT auf handaufgenommene Prüfdaten existieren kaum Vorarbeiten. Im Vergleich zu maschinell aufgenommenen Daten sind bei handaufgenommenen Daten die Abtastung ungleichmäßig und die Messpositionen nicht exakt bekannt.

Um den Einfluss dieser Fehlergrößen zu ermitteln vergleicht die vorliegende Arbeit den maschinellen Messaufbau mit der Handprüfung und leitet fünf Größen her: eine gröbere Abtastung, ungleichmäßige Verteilung der Messpositionen, eine niedrigere Abdeckung der Prüflingregion, Positionsungenauigkeiten und variierender Anpressdruck. Zu den ersten zwei Größen existieren bereits Vorarbeiten, aus denen ihr Einfluss ermittelt werden kann. Des Weiteren unterliegen die ersten drei Größen den Messentscheidungen des Prüflingenieurs und können nicht beeinflusst werden. Infolgedessen liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf der Untersuchung der letzten drei Größen durch zwei Simulationsstudien. Die erste untersucht den Einfluss der ungenauen Positionsschätzung sowie variierender Abdeckung, die zweite den Einfluss des Anpressdrucks. Zur Auswertung werden die Rekonstruktionsergebnisse mit der SAFT-Rekonstruktion von simulierten maschinellen Messdaten verglichen. Es wird gezeigt, dass der Einfluss der genannten Faktoren unter geeigneten Bedingungen tolerierbar ist und damit eine SAFT-Rekonstruktion handaufgenommener Daten möglich ist.

Die Ergebnisse können als Grundlage für die Entwicklung von Assistenzsystemen genutzt werden.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen der Ultraschallprüfung . . . . .	4
2.1.1	Ultraschallprüfung . . . . .	4
2.1.2	Das Puls-Echo-Verfahren . . . . .	4
2.1.3	Datendarstellung in der Ultraschallprüfung (UP) . . . . .	5
2.2	Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) . . . . .	6
2.2.1	Zugrundliegende Annahmen für SAFT . . . . .	6
2.2.2	Mathematische Formulierung . . . . .	9
2.3	Auswertungsmethode Modifizierter Root Mean Square Error (RMSE <sup>†</sup> ) . .	11
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Einflussfaktoren auf die Rekonstruktion handaufgenommener Daten</b>	<b>15</b>
4.1	Herausforderungen bei der Rekonstruktion handaufgenommener Daten . .	15
4.2	Mögliche Fehlerquellen . . . . .	17
4.3	Hauptaugenmerk der Arbeit . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Simulationsszenario</b>	<b>21</b>
5.1	Messaufbau . . . . .	21
5.2	Simulationsszenario . . . . .	22
5.3	Referenzdaten . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Positionungenauigkeit</b>	<b>26</b>
6.1	Simulationsprinzip und -aufbau . . . . .	26
6.1.1	Simulationsaufbau . . . . .	26
6.1.2	Manipulation der Positionen . . . . .	27
6.1.3	Quantisierung der Prüfpositionen auf dem Abtastraster . . . . .	28
6.2	Abdeckung des Ortsbereiches . . . . .	30
6.3	Exemplarische Rekonstruktionsergebnisse . . . . .	33
6.4	Auswertung . . . . .	35
<b>7</b>	<b>Laufzeitänderung</b>	<b>37</b>
7.1	Simulationsprinzip und -aufbau . . . . .	37
7.2	Exemplarische Rekonstruktionsergebnisse . . . . .	39

---

7.3	Auswertung . . . . .	41
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>44</b>
8.1	Fazit der Arbeit . . . . .	44
8.2	Ausblick . . . . .	45
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>47</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>50</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>51</b>
	<b>Glossar</b>	<b>53</b>
	<b>Akronyme</b>	<b>53</b>
	<b>Anhang</b>	<b>54</b>

---

# Mathematische Notationen

## Variablen Typen, Funktionen und Matrizen

$\boldsymbol{v}$	Vektor
$\boldsymbol{v}_i$	Zugriff auf das $i$ -te Skalarelement von $\boldsymbol{v}$
$\boldsymbol{U}$	2D Matrix
$\boldsymbol{U}_{ij}$	Zugriff auf das Skalarelement in $\boldsymbol{U}$ , wobei $i$ der Reihe und $j$ der Spalte entsprechen
$[\boldsymbol{U}]_i$	Zugriff auf das $i$ -te Spalte einer 2D Matrix
$\text{vec}(\boldsymbol{U})$	Operation, wobei die Matrize $\boldsymbol{U}$ vektorisiert wird
$\boldsymbol{\mathcal{M}}$	Tensor
$\boldsymbol{\mathcal{M}}(i, j, k)$	Zugriff auf das Skalarelement in $\boldsymbol{\mathcal{M}}$ , wobei $i$ der Reihe, $j$ der Spalte und $k$ der dritten Dimension entsprechen

## Oft verwendete Bezeichnungen und Symbolen

$c_0$	Schallgeschwindigkeit
$f_S$	Abtastfrequenz
$\lambda$	Wellenlänge
$\text{dx}$	Abstand zwischen zwei benachbarten Rasterpunkten auf dem Messraster entlang der $x$ -Achse
$\text{dy}$	Abstand zwischen zwei benachbarten Rasterpunkten auf dem Messraster entlang der $y$ -Achse
$\text{dz}$	Örtliches Abtastintervall der Rekonstruktion entlang der $z$ -Achse
$\text{dt}$	Zeitliches Abtastintervall der Messung
$N_x$	Anzahl der Rasterpunkten auf dem äquidistanten Raster entlang der $x$ -Achse
$N_y$	Anzahl der Rasterpunkten auf dem äquidistanten Raster entlang der $y$ -Achse
$N_z$	Anzahl der örtlichen Abtastung der Rekonstruktion entlang der $z$ -Achse
$N_t$	Anzahl der zeitliche Abtastung der Messdaten
$N_{\text{point}}$	Anzahl der Prüfstellen
$\boldsymbol{a}$	einzelner Datenvektor, A-Scan
$\boldsymbol{C}$	2D Referenzdaten
$\hat{\boldsymbol{C}}$	2D fehlerhafte Daten

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Um Unfälle mit einer Gefährdung von Menschenleben und sowie schwere Sach- und Umweltschäden zu vermeiden, wird immer mehr Wert auf die alltägliche Sicherheit, beispielsweise in Flugzeugen, Zügen, Brücken, Kraftwerken, Wasserleitungen, Öl-Pipelines oder Gebäuden, gelegt. Dementsprechend werden die Sicherheitsanforderungen ständig erhöht und die Qualitätskontrollen, bzw. Structural Health Monitoring (SHM), sind nachgefragt. Dafür müssen Bauteile oder Materialien vor und während ihres Betriebs auf verborgene Fehler überprüft und der genereller Zustand kontrolliert werden[6].

Dabei spielen Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) eine wesentliche Rolle. ZfP ist eine Methode, mit der die Objekte ohne Schaden überprüft werden können. Das heißt, die Funktionalität der geprüften Objekte wird nicht beeinträchtigt. Der Markt der ZfP wächst ständig auf Grund der sich erhöhenden Sicherheitsanforderungen der Regierungen und es wird erwartet, dass der Markt in den USA zwischen 2018 und 2023 mit der kumulierten jährlichen Wachstumsrate von 6.71% wächst und bis zum Jahr 2023 einen Wert von ca 20.37 Milliarde USD erreicht haben wird [13].

Eine Prüfmethode der ZfP ist die Ultraschallprüfung (UP) und diese Methode ist für nahezu alle technischen Werkstoffe einsetzbar [8]. Die UP kann nicht nur zur Fehlerprüfung sondern auch zur Wanddickemessung verwendet werden [24]. Beispiele für die UP Anwendung sind die Schweißnahtprüfung, die Blechprüfung, die Gussteilprüfung oder die Prüfung von Schmiedestücken oder Maschinenteilen [24].

Derartige Prüfaufgaben werden üblicherweise mit Hilfe von automatisierten Systemen und Prüfrobotern durchgeführt. Mit dem automatisierten Prüfsystem können die Prüfpositionen sehr präzise eingestellt werden und es lässt sich auch eine vollständige Abdeckung des Ortsbereiches erreichen. Allerdings kann die automatische Prozedur nicht angewendet werden, wenn das Prüfobjekt schlecht zugänglich ist oder eine komplexe Geometrie besitzt. Für einen Nischenanwendungsfall wäre es auch unwirtschaftlich, eine passende Maschine zu entwickeln. [18].

Bei solchen Fällen wird die UP Messung mit einem Handprüfgerät durchgeführt. Der Nachteile dabei ist, dass die Qualität des Messergebnisses stark von der Expertise des Prüfers und des von ihm durchgeführten Prüfpfades abhängt. Außerdem sind die Ortsinformationen der Prüfstellen meist nicht verfügbar, was zu mehrmaligen Messaufnahmen an einer gleichen Stelle führen kann. Das ist auch der Grund warum die händisch aufgenommenen Messungen nicht reproduzierbar sind und deren Messdaten sich nicht für die Nachverarbeitung eignen, obwohl die Abbildungsqualität der Rohdaten generell durch die passenden Verarbeitungen wesentlich verbessert werden kann.

Um den Prüfer bei der Entscheidung über den Prüfpfad zu unterstützen, muss das auf den bisherigen Daten basierende Messergebnis dem Prüfer simultan zur Prüfung angezeigt werden [18]. Darüber hinaus müssen die Ortsinformationen auch bei der Prüfung für den Prüfer verfügbar gemacht werden, um die Abdeckung des Ortsbereiches anzuzeigen und dadurch mehrmalige Aufnahmen von einer gleichen Stelle zu vermeiden [18].

Solch ein Unterstützungssystem kann realisiert werden, wenn das Messsystem während der Prüfung nicht nur die Messdaten sondern auch die Prüfpositionen aufnimmt, speichert, aktualisiert und simultan zur Prüfung darstellt. Das bedeutet, die Prüfpositionen müssen beispielsweise über eine Kamera ermittelt werden und deren Ortsinformationen müssen im System gespeichert werden. Andererseits muss das Messergebnis bei jeder Aufnahme mit den neu aufgenommenen und bisherigen Messdaten aktualisiert und dem Prüfer angezeigt werden. Bei der Datendarstellung ist es auch erforderlich, die bisherigen Prüfstellen anzuzeigen, so dass die Abdeckung des Ortsbereiches verbessert werden kann [18].

Dies ermöglicht nicht nur das Reproduzieren der Messung sondern auch die Rekonstruktion der Messdaten. Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) ist ein etablierter Rekonstruktionsalgorithmus und wird seit Jahren zur Verbesserung der Abbildungsqualität der rohen UP Messdaten verwendet. Mit den vorhandenen Ortsinformationen der Prüfpositionen kann SAFT theoretisch auch für handaufgenommene Messdaten angewendet werden. Wenn eine Echtzeitrekonstruktion während der händischen Messung durchgeführt werden würde und das durch Rekonstruktion verbesserte Bild als Messergebnis dem Prüfer simultan zur Prüfung angezeigt werden könnte, würde das die händische Messung signifikant erleichtern.

Nun ist die Frage, ob durch die Anwendung von SAFT auf die handaufgenommenen Messdaten die Abbildungsqualität ihrer Rekonstruktion, wie bei den gewöhnlichen maschinellen Daten, verbessert werden kann oder nicht. Das bedeutet, dass die Herausforderungen bei der Rekonstruktion handaufgenommener Messdaten festgestellt und deren Einflüsse untersucht werden müssen. Wenn die negativen Auswirkungen solcher Fehler unter bestimmten Bedingungen unterdrückt werden können, können daraus resultierend Maßnahmen abgeleitet werden, was die Realisierung eines Messunterstützungssystems mit einer Echtzeitrekonstruktion vereinfachen kann.

## 1.2 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit wurde ein handaugenommenes Messsystem wie in Abbildung 1.1 betrachtet. Ein Normal-Prüfkopf wird direkt auf ein Metallobjekt gelegt und händisch im Ortsbereich bewegt, wobei die Prüfung mit dem Puls-Echo-Verfahren durchgeführt wird. Bei der Messung sucht sich der Prüfer den Prüfpfad selbst aus und die Ortsinformationen werden durch eine Kamera, die während der Messung Prüfpositionen aufnimmt, ermittelt. Mit den Ortsinformationen werden die Messdaten progressiv mit Hilfe des SAFT Algorithmus rekonstruiert.

Allerdings ist eine solche Art der Messaufnahme nicht ganz genau und das kann zur



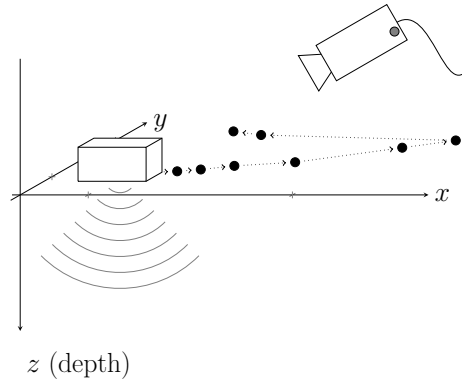


Abbildung 1.1: Messaufbau

Verschlechterung der Abbildungsqualität der Rekonstruktion führen. Solche Fehler können einerseits von den Charakteristiken der händischen Messung hervorgerufen werden und andererseits durch die Ungenauigkeiten des Messsystems verursacht werden. Da wir keinen Einfluss darauf haben, wie die Prüfung vom Prüfer durchgeführt wird, sollte die Systemungenauigkeit möglichst verringert werden, um die Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion zu verbessern.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die möglichen Fehlerquellen bei der SAFT Rekonstruktion der handaufgenommenen Messdaten festgestellt und deren Einflüsse untersucht werden. Dafür werden Simulationen durchgeführt, um den Effekt der mit der Systemungenauigkeit verbundenen zwei Faktoren zu evaluieren: (a) die durch die Positionsbestimmung oder der Quantisierung verursachten Positionsungenauigkeit des Prüfkopfes und (b) die durch beispielsweise Veränderung des Anpressdrucks in der händischen Ankopplung hervorgerufenen Laufzeitänderungen. Die Evaluierung erfolgt durch den Vergleich mit den Referenzdaten. Als Referenzdaten wurde die Rekonstruktionsqualität von SAFT genommen, die man mit maschinell aufgenommenen Daten erreichen würde.

Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut. In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen der UP und des in dieser Arbeit verwendeten SAFT Algorithmus erläutert. In Kapitel 3 wird der Stand der Technik bezüglich der SAFT Anwendung an handaufgenommene Messdaten vorgestellt. Im folgenden Kapitel 4 werden die möglichen Fehlerquellen in Bezug auf die Merkmale der händischen Messung und die Ungenauigkeit des Messszenarios diskutiert. Dann werden die Simulationsszenarien, sowie die Referenzdaten dieser Arbeit in Kapitel 5 dargestellt. Die Kapitel 6 und 7 widmen sich jeweils der Simulation der einzelnen Fehlerquellen: die Positionsungenauigkeit und die Laufzeitänderung. In beiden Kapiteln werden das Simulationsprinzip, die exemplarischen Ergebnisse und die Auswertungsergebnisse präsentiert. Schließlich wird in Kapitel 8 das Fazit dieser Arbeit gegeben.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird zunächst die Theorie der Ultraschallprüfung (UP) kurz erläutert. Der nächste Teil 2.2 beginnt mit der Grundidee und dem Grundprinzip von SAFT woraufhin die zugrundeliegenden Annahmen der allgemeinen SAFT Rekonstruktion beschrieben wird. Diese Annahmen werden gewöhnlicherweise bei der SAFT Rekonstruktion verwendet, die allerdings für unseren Anwendungsfall, das heißt die Verarbeitung händisch aufgenommener Messdaten, nicht unbedingt gültig sind. Danach wird im Teil 2.2.2 die mathematische Formulierung des verwendeten SAFT Algorithmus dargestellt. Mit diesem Algorithmus wird eine Echtzeitrekonstruktion, die für unser Simulationsmodell erforderlich ist, ermöglicht. Schließlich wird im Teil 2.3 die in dieser Arbeit verwendete Auswertungsmethode, Mean Square Error (MSE) bzw. Modifizierter Root Mean Square Error (RMSE<sup>†</sup>), und deren Modifizierung gezeigt.

### 2.1 Grundlagen der Ultraschallprüfung

#### 2.1.1 Ultraschallprüfung

Bei der UP wird der im Prüfkopf mit Hilfe des elektroakustischen Wandlers unter Ausnutzung des piezoelektrischen oder magnetostriktiven Effektes erzeugte Ultraschall in den Prüfkörper eingestrahlt [24]. Der eingestrahlte Ultraschall wird an der Stelle, wo die Schallimpedanzen sich verändern, beispielsweise an der Rückwand oder bei Materialfehlern wie Lunker oder Gasblasen, reflektiert und die reflektierte Echowelle wird dann aufgenommen.

#### 2.1.2 Das Puls-Echo-Verfahren

Das Puls-Echo-Modell ist ein Prüfverfahren der UP, wobei die Hin- und Rückausbreitung der akustischen Welle berücksichtigt werden. Mit dem Verfahren wird die akustische Welle von einem Prüfkopf in den Testkörper eingestrahlt und die Welle wird dann bis zum Streuer oder der Rückwand ausgebreitet. Wegen der Änderung der akustischen Impedanz wird der Ultraschall beim Streuer zur Quelle, dem Prüfkopf, reflektiert. Die reflektierte Welle wird mit dem gleichen Prüfkopf anschließend aufgezeichnet (Abbildung 2.1).

Wegen seiner einfachen Durchführbarkeit und der hohen Aussagefähigkeit der Prüfergebnisse ist das Puls-Echo-Verfahren das am häufigsten zur Materialprüfung angewendete Ultraschallprüfverfahren [24].

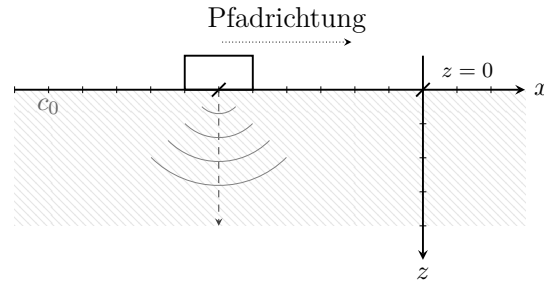


Abbildung 2.1: Puls-Echo-Verfahren

### 2.1.3 Datendarstellung in der Ultraschallprüfung (UP)

Die aufgenommenen Messdaten können in unterschiedlichen Formaten dargestellt werden. Eine Datendarstellung ist der A-Scan, welcher mit der Messdaten aus einer einzelnen Datenaufnahme dargestellt werden kann. Eine A-Scan-Darstellung präsentiert die Amplitudenänderung des empfangenen Ultraschalls über die Zeit auf dem Bildschirm (Abbildung 2.2a) [2].

Wenn mehrere Messdaten an der äquidistanten Stellen entlang einer Linie aufgenommen werden, können mehrere A-Scans hintereinander gesetzt werden und die Abhängigkeit des Echowellenverhaltens von der Messstellen wird dargestellt (Abbildung 2.2b). Das ist eine B-Scan-Darstellung. Man kann aus dem B-Scan auch die Stelle der Streuer bestimmen [2]. Allerdings ist die Abbildungsqualität des B-Scans oft nicht ausreichend um detaillierte Informationen über die inneren Strukturen zu gewinnen. Aus diesem Grund werden die Rohdaten, hier die gewonnenen B-Scans, oft nachverarbeitet um die Bildqualität zu verbessern.

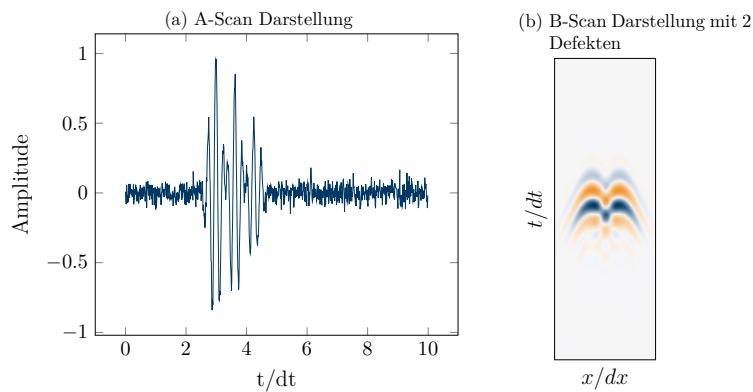


Abbildung 2.2: Beispiele für die A-Scan und B-Scan Darstellungen

## 2.2 Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)

Nach der Datenaufnahme können die Rohdaten mit Hilfe der Rekonstruktionsalgorithmen nachverarbeitet werden, um die Abbildungsqualität zu verbessern. Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) ist ein etablierter Rekonstruktionsalgorithmus und dient zur Verbesserung der lateralen Auflösung der UP Daten.

Die SAFT basiert auf Synthetic Aperture Radar (SAR), welches aus der Radertechnik stammt. Die Grundidee von SAFT ist, mehrere Rohdaten, die an den sequentiellen Prüfpositionen mit der echten Apertur aufgenommen werden, mit Hilfe der passenden Berechnung zu kombinieren. Damit kann das daraus resultierende Bild als Bild einer großen Apertur betrachtet werden (Abbildung 2.3) [15].

Für eine SAFT Rekonstruktion existieren bereits verschiedene Algorithmen sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich. Historisch wurde der erste SAFT Algorithmus im Zeitbereich implementiert. Dieser kann als die heuristische Beschreibung der Rückausbreitung der mit der Green'schen Funktion approximierten ebenen Wellen betrachtet werden [14]. Der Algorithmus ist als ein konventionelles SAFT Verfahren bekannt und wird oft delay and sum (DAS) SAFT genannt.

Das Grundprinzip der DAS basiert auf der Idee, dass die bei der Messung gewonnene Hyperbel dem Abstand bzw. der Verzögerung der Ausbreitung zwischen dem Prüfkopf und dem Streuer entspricht. Das bedeutet, es wird das Echo der Messdaten in der Rekonstruktion nachgeahmt [15]. Durch die kohärente Summation dieser Hyperbel wird eine synthetische Fokussierung der Abbildung ermöglicht und es lässt sich eine wesentliche Verbesserung der lateralen Auflösung erreichen [15] [22] [16].

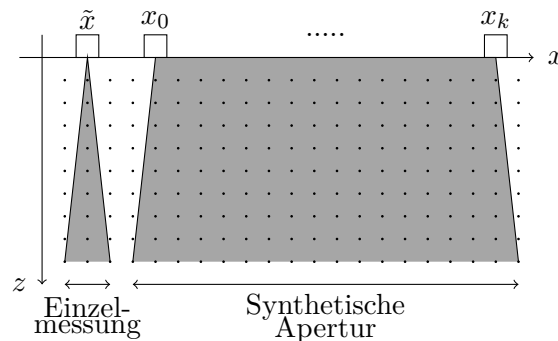


Abbildung 2.3: Synthetische Apertur

### 2.2.1 Zugrundliegende Annahmen für SAFT

Da der SAFT Algorithmus auf der Methode für Radar und Sonar (Synthetic Aperture Radar (SAR)) basiert, funktioniert SAFT sehr gut, wenn die theoretischen Annahmen, die meist für Radar und Sonar gelten, erfüllt sind [15] [16]. Diese Annahmen sind folgende:

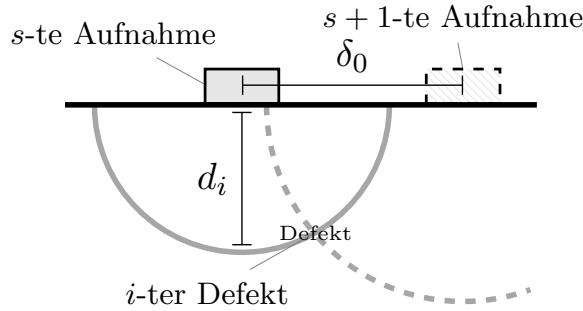


Abbildung 2.4: SAFT als Superpositionen mehrerer Messungen

- (a) ROI liegt im Fernfeld
- (b) Prüfkopf ist möglichst klein
- (c) Ortsbereich ist vollständig abgetastet

#### (a) Fernfeldnäherung

Bei dem SAFT Algorithmus wird oft angenommen, dass die ROI im Fernfeld liegt, in dem der Effekt der spezifischen Diffraction des Prüfkopfes vernachlässigt werden kann [16]. Darüber hinaus kann im Fernfeld die eingestrahlte Welle als Kugelwelle betrachtet werden und dafür gilt die Fraunhofer-Diffraction. So ergibt sich, dass die Richtcharakteristik im Fernfeld (bzw. Fraunhofer Feld) direkt durch Fouriertransformation von der Aperturverteilung bestimmt werden kann [10] [11]. Unter dieser Annahme eignet sich die SAFT sehr gut für die Rekonstruktion der UP Messdaten.

Allerdings liegt die ROI der UP meistens im Nahfeld (bzw. Fresnel Feld), wo der Effekt der Diffraction des Testkopfes nicht mehr vernachlässigt werden kann. Dementsprechend wird die Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion wesentlich verschlechtert [16]. Um die Fernfeldnäherung auf die UP anzuwenden, muss die Breite bzw. der Durchmesser des für die Messung verwendeten Prüfkopfes,  $D$ , so ausgewählt werden, dass sie relativ zum Abstand zur ROI,  $z$ , viel kleiner ist [16].

In dieser Arbeit wird angenommen, dass die ROI im Fernfeld liegt.

#### (b) Kleiner Prüfkopf

Wie im Kapitel 2.2 diskutiert, basiert der SAFT Algorithmus auf der Superposition der vorhandenen Daten. Daraus folgt, dass die Rekonstruktionsqualität der SAFT Operation wesentlich von der Größe des resultierenden Bereiches der Superpositionen abhängt. Wenn der Bereich groß ist, sind mehr Daten für die Superposition vorhanden und deshalb ist die SAFT Operation präziser. Da die ROI bei unserem Modell im Fernfeld liegt und deshalb die eingestrahlte Welle als Kugelwelle betrachtet werden kann, ist der Bereich

der Superposition am größten, wenn der Öffnungswinkel des Prüfkopfes für die SAFT Operation möglichst groß ausgewählt wird.

Der Öffnungswinkel eines Prüfkopfes ist proportional zur Schallgeschwindigkeit und antiproportional zur Frequenz und zur Größe des verwendeten Prüfkopfes [1]. Für kreisförmige Prüfköpfe kann der Öffnungswinkel durch

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1.22 c_0}{Df}\right) \quad (2.1)$$

bestimmt werden, wobei die  $c_0$  der Schallgeschwindigkeit,  $D$  dem Durchmesser des Prüfkopfes und  $f$  der Trägerfrequenz entspricht [25].

Allerdings wird die Schallgeschwindigkeit lediglich durch das Material des Testkörpers bestimmt und die Trägerfrequenz ist auch durch verschiedene Faktoren, wie z.B. Auflösung oder Frequenzabhängige Dämpfung, eingeschränkt. Aus diesem Grund spielt die Wahl der Größe des Prüfkopfes eine große Rolle auf die Qualität der SAFT Rekonstruktion. Daraus folgend ergibt die Gleichung 2.1, dass die Verwendung von einem kleineren Prüfkopf die Rekonstruktionsqualität verbessert [15].

### (c) Vollständige Abtastung im Ortsbereich

Wie in Teil 2.2 bereits diskutiert, wird bei der SAFT der synthetisch vergrößerte Bereich als ein Apertur berücksichtigt, anstatt einzelne Apertur bei jeder Prüfposition zu betrachten (Abbildung 2.3).

In dieser Hinsicht können einzelne A-Scans als ein örtlich abgetastetes Signal der synthetischen Apertur betrachtet werden. Da die ROI in dieser Arbeit im Fernfeld angenommen wird, ist die Richtcharakteristik die Fourier-transformierte von der Aperturverteilung. Bei der SAFT wird die Apertur örtlich abgetastet und deshalb gilt hier das Nyquist Theorem. Dies bedeutet, dass das Aliasing nicht vermeidbar ist, wenn die Apertur unterabgetastet ist, bzw. das Intervall für die örtliche Abtastung  $d$  größer ist als  $0.5\lambda$  [15].

Wenn  $d$  größer ist als  $0.5\lambda$ , also die synthetische Apertur unterabgetastet ist, kann die bestimmte Nebenkeule durch die periodische Charakteristik von der eingestrahlten Welle verstärkt und die sogenannten Grating Lobes, bzw. Artefakte, können beobachtet werden. Artefakte werden beispielsweise durch eine falsche Parametrisierung oder durch das Rekonstruktionssystem verursacht. Wenn Artefakte im Vergleich zu den richtigen Signalen zu groß sind, verschlechtert sich die Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion maßgeblich.

Aus diesem Grund ist die Regel, dass die Messdaten, auf die die SAFT berechnet werden, mit Hilfe von automatisierten Systemen und Prüfrobotern aufgenommen werden, um eine örtliche Unterabtastung und die daraus resultierenden Artefakte zu vermeiden. In dieser Arbeit wird eine solche Art der Messdaten als vollständig abgetastete Messdaten benannt.

### 2.2.2 Mathematische Formulierung

Für SAFT Verfahren existieren bereits verschiedene Methoden. Allerdings gibt es bisher wenige Algorithmen, die nicht nur echtzeitfähig sind, sondern auch für die handaufgenommene Messdaten verwendet werden können. In diesem Teil wird die mathematische Formulierung des verwendeten SAFT Algorithmus gezeigt.

Sei  $c_0$  die Schallgeschwindigkeit des untersuchten Testkörpers. Die Größe des Ortsbereiches wird mit  $N_x \times N_y$  beschrieben und die Tiefe sei  $N_z$ . Es wird angenommen, dass Messdaten, A-Scan  $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^{N_t}$ , auf dem äquidistanten Messraster mit Abstand  $dx, dy$  zwischen den benachbarten Rasterpunkten mit der Abtastfrequenz  $f_s$  aufgenommen werden. Damit kann man den Abstand zwischen den entlang der  $z$ -Achse aufeinanderliegenden Rasterebenen,  $dz$ , durch  $dz = \frac{c_0}{2f_s}$  bestimmen.

Für die Rekonstruktion wird dasselbe Gitter angenommen. Nun kann der 3D Datentensor  $\mathcal{D}$  und der 3D Rekonstruktionstensor  $\mathcal{R}$  als  $\mathcal{D} \in \mathbb{R}^{N_t \times N_x \times N_y}$  und  $\mathcal{R} \in \mathbb{R}^{N_z \times N_x \times N_y}$  betrachtet werden, wobei  $N_t = N_z$  ist. Der Datentensor  $\mathcal{D}$  enthält alle aufgenommenen A-Scans  $\mathbf{a}$  des Ortsbereiches. Es wird angenommen, dass die Daten an den  $N_{\text{scan}} \in \mathbb{N} \cap [1, N_x N_y]$  Stellen aufgenommen werden.

Seien die Positionen der  $i$ -ten Prüfstelle im Ortsbereich  $P_{\text{Prüfkopf } i} = (x_{pi} dx, y_{pi} dy, 0)$  und ein Streuer im Testkörper  $P_0 = (x_0 dx, y_0 dy, z_0 dz)$ , wobei  $i \in \mathbb{N} \cap [0, N_{\text{scan}})$ ,  $x_{pi} \in \mathbb{N} \cap [0, N_x)$ ,  $y_{pi} \in \mathbb{N} \cap [0, N_y)$ ,  $x_0 \in \mathbb{N} \cap [0, N_x)$ ,  $y_0 \in \mathbb{N} \cap [0, N_y)$  und  $z_0 \in \mathbb{N} \cap [0, N_z)$  sind. Damit kann die Laufzeit bzw. Time-of-Flight (ToF) zwischen  $P_{\text{Prüfkopf } i}$  und  $P_0$  mit

$$t_{i0} = \frac{2\sqrt{(x_{pi} - x_0)^2 \cdot dx^2 + (y_{pi} - y_0)^2 \cdot dy^2 + (z_0 \cdot dz)^2}}{c_0} \quad (2.2)$$

bestimmt werden.

Bei der SAFT Rekonstruktion wird die Superposition der aufgenommenen A-Scans bezüglich der ToF Verzögerung durchgeführt und das ergibt die Annäherung der aufgenommenen Echos [4]. Wir nehmen an, dass die Rekonstruktion an einer Stelle  $P_{\text{Reco}} = (x_r dx, y_r dy, z_r dz)$  durchgeführt wird, wobei  $x_r \in \mathbb{N} \cap [0, N_x)$ ,  $y_r \in \mathbb{N} \cap [0, N_y)$  und  $z_r \in \mathbb{N} \cap [0, N_z)$  sind. In diesem Fall kann das Superpositionsverfahren wie folgt beschrieben werden [4]:

$$\mathcal{R}(x_r, y_r, z_r) = \sum_{i=0}^{N_{\text{scan}}-1} w(\phi) \cdot \mathcal{D}(x_{pi}, y_{pi}, \lfloor t_{ir} \cdot f_s \rfloor), \quad (2.3)$$

wobei  $w(\phi)$  der von dem Öffnungswinkel abhängigen Apodizationfunktion, die in [4, Gl. 2 und 3] genutzt wird, entspricht und  $\lfloor \cdot \rfloor$  die Abrundungsfunktion ist. Die Gleichung 2.3 zeigt, dass die SAFT Operation eine lineare Abbildung  $\mathcal{D} \mapsto \mathcal{R}$  ist [4]. Das bedeutet die Gleichung 2.3 kann als  $\mathcal{R} = \mathcal{M} \cdot \mathcal{D}$  ausgedrückt werden, wobei  $\mathcal{M} \in \mathbb{R}^{N_z \times N_x \times N_y \times N_t \times N_x \times N_y}$  dem 3D SAFT-Tensor entspricht. Dieses Mappingdictionary kann aus der Gleichung 2.3 gewonnen werden.

In [4] wird eine Matrix-Vektor-Formulierung dieser linearen Abbildung präsentiert. Durch das Unfolding von  $\mathcal{M}$  können die Rekonstruktions- und Datenvektoren jeweils

aus  $\mathcal{R}$  und  $\mathcal{D}$  als das Matrix-Vektor-Produkt ausgedrückt werden [4]:

$$\mathbf{r} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{d}. \quad (2.4)$$

Hier repräsentieren  $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^{N_z N_x N_y}$  und  $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{N_t N_x N_y}$  jeweils den unfolded Vektor vom Rekonstruktionstensor  $\mathcal{R}$  und Datentensor  $\mathcal{D}$ .  $\mathbf{M}$  ist die 2D Mappingmatrix  $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N_z N_x N_y \times N_t N_x N_y}$  und wird durch Unfolding vom 6D Mappingtensor  $\mathcal{M}$  gewonnen [4]. Der Datenvektor  $\mathbf{d}$  entspricht den allen im Ortsbereich aufgenommene A-Scans  $\mathbf{a}$ .

Um diese Operation parallel zur Messung durchzuführen, wird die Struktur der Mappingmatrix  $\mathbf{M}$  ausgenutzt [4]. Die Gleichungen 2.2 und 2.3 zeigen, dass diese lineare Abbildung von  $\Delta x = (x_{pi} - x_0)$  und  $\Delta y = (y_{pi} - y_0)$  abhängig ist, und das ergibt die Bildung einer 2-Level Block-Toeplitz Struktur in  $\mathbf{M}$  wie dargestellt in Abbildung 2.5 [4]. Mit einer solchen symmetrischen Struktur kann die Gleichung 2.4 als spaltenweise Multiplikation der Blockspalte der Mappingmatrix  $\mathbf{M}$  und eines A-Scans  $\mathbf{a}$  ausgedrückt werden [4].

Seien  $k \in \mathbb{N} \cap [0, N_{\text{scan}})$  und  $\mathbf{a}_k \in \mathbb{R}^{N_t}$  der  $k$ -te A-Scan. Das ergibt, dass das  $k$ -te Rekonstruktionsverfahren wie folgt beschrieben wird:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_{k-1} + [\mathbf{M}]_k \cdot \mathbf{a}_k, \quad (2.5)$$

wobei  $[\mathbf{M}]_k \in \mathbb{R}^{N_z N_x N_y \times N_t}$  und  $\mathbf{r}_k \in \mathbb{R}^{N_z N_x N_y}$  jeweils die  $k$ -te Blockspalte der  $\mathbf{M}$  und die  $k$ -te gewonnene Rekonstruktion sind. Das vereinfacht die Update Prozedur der Gleichung 2.4 und ermöglicht eine Echtzeitrekonstruktion parallel zur Messung [4].

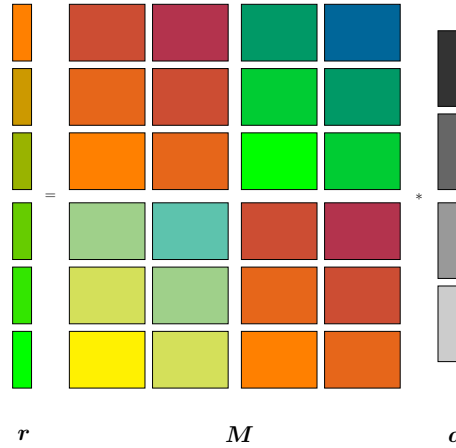


Abbildung 2.5: SAFT als Matrix-Vektor Produkt  $\mathbf{r} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{d}$  [4]

Da mit dieser Herangehensweise die Werte im 3D-SAFT Tensor nur einmal errechnet werden müssen und danach in einer Look-up Tabelle nur nachgeschaut werden müssen, kann die Rechenzeit wesentlich reduziert werden [4]. Darüber hinaus wird durch die Struktur der Mappingmatrix  $\mathbf{M}$  nicht nur die Update-Prozedur vereinfacht, sondern auch die Codewahrtbarkeit des Rekonstruktionsprogramms verbessert [4].



## 2.3 Auswertungsmethode Modifizierter Root Mean Square Error (RMSE<sup>†</sup>)

Eine Auswertungsmethode dieser Arbeit ist der Mean Square Error (MSE) bzw. Root Mean Square Error (RMSE), die bei der Signalverarbeitung oft für die Evaluierung eines Schätzers verwendet werden. Der MSE vergleicht zwei Daten und liefert den Mittelwert der quadratischen Abweichung. RMSE ist die Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung. Bei der Signalverarbeitung entspricht der MSE der erwarteten Signalleistung des Fehlers, während der RMSE den erwarteten Betrag vom Fehler repräsentiert. Wenn Signaldaten mit MSE oder RMSE evaluiert werden, wird ein Datenset von Referenzdaten zum Vergleich benötigt. Dementsprechend variieren die Werte von MSE oder RMSE abhängig von den Referenzdaten.

### MSE und RMSE

Seien  $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{M \times K}$  die 2D Referenzdaten und  $\hat{\mathbf{C}} \in \mathbb{R}^{M \times K}$  die verglichenen (gegebenenfalls fehlerhaften) 2D Daten. Bei unserem Modell entspricht jeweils  $\mathbf{C}$  der SAFT Rekonstruktionsqualität, die man mit maschinell aufgenommenen Daten erreichen würde, und  $\hat{\mathbf{C}}$  der durch Simulationen gewonnenen Rekonstruktionsqualität. Dann wird der MSE mit

$$\begin{aligned} \text{MSE} &= \mathbb{E} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (\mathbf{C}_{ij} - \hat{\mathbf{C}}_{ij})^2 \right\} \\ &= \frac{1}{M \cdot K} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (\mathbf{C}_{ij} - \hat{\mathbf{C}}_{ij})^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

bestimmt. Die Gleichung 2.6 ergibt, dass der  $\text{MSE} = 0$  auf eine perfekte Schätzung, also  $\mathbf{C} = \hat{\mathbf{C}}$ , hindeutet. Dementsprechend stellt sich auch dar, dass je größer der MSE Wert ist, desto größer ist dessen Abweichung.

Den RMSE dagegen bekommt man mit

$$\begin{aligned} \text{RMSE} &= \sqrt{\mathbb{E} \left\{ \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (\mathbf{C}_{ij} - \hat{\mathbf{C}}_{ij})^2 \right\}} \\ &= \sqrt{\frac{1}{M \cdot K} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (\mathbf{C}_{ij} - \hat{\mathbf{C}}_{ij})^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Da der  $\text{RMSE} \geq 0$  ist und daraus folgend der RMSE zur MSE proportional ist, ist der RMSE auch ein gültiges Maß für die Evaluierung der Abweichung der Signale.

## $\ell_2$ -Norm und RMSE

Die Vektornorm ist auch ein Maß, das für die Beschreibung der Signalgröße oft verwendet wird. Die Vektornorm liefert die Größe eines Vektors und diese kann man durch

$$\|\mathbf{u}\|_p = \left( \sum_{i=1}^M (|\mathbf{u}_i|^p) \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.8)$$

gewinnen, wobei jeweils  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^M$  und  $p \in \mathbb{N} \cap [1, \infty)$  sind. Für die Auswertung der Signalgröße wird die  $\ell_2$  Norm oft benutzt, da diese dem Euklidischen Abstand entspricht. Mit  $p = 2$  in der Gleichung 2.8 bekommt man die  $\ell_2$  Norm durch

$$\|\mathbf{u}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^M (\mathbf{u}_i^2)}. \quad (2.9)$$

Diese kann mit der Frobeniusnorm auch für eine Matrix  $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{M \times K}$  erweitert werden:

$$\|\mathbf{U}\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K (\mathbf{U}_{ij}^2)}. \quad (2.10)$$

Durch den Vergleich von der Gleichung 2.10 und 2.6 wird gezeigt, dass die quadratische  $\ell_2$ -Norm  $\|\mathbf{U}\|_F^2$  die Signalleistung der  $\mathbf{U}$  repräsentiert. Wenn man die Gleichung 2.10 in die Gleichung 2.7 einfügt, kann der RMSE auch wie

$$\text{RMSE} = \frac{1}{\sqrt{M \cdot K}} \|\mathbf{C} - \hat{\mathbf{C}}\|_F \quad (2.11)$$

beschrieben werden. Mit diesem Ausdruck kann man intuitiv wissen, welchen Abstand es zwischen den fehlerhaften Daten  $\hat{\mathbf{C}}$  und den Referenzdaten  $\mathbf{C}$  gibt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der RMSE als das Maß für die Evaluierung der Simulationsergebnisse verwendet.

## Modifizierter Root Mean Square Error (RMSE<sup>†</sup>)

Allerdings ist der RMSE oder MSE kein absolutes Maß, da dieser einerseits von den Messdaten abhängig ist und andererseits nicht genau andeutet, wie gut oder schlecht eine Schätzung ist. Das bedeutet man kann dadurch wissen, dass die Schätzung mit einem größeren RMSE schlechter als die mit einem kleineren ist. Man kann aber nicht aus dem RMSE genau herleiten, wie viel schlechter eine Schätzung gegenüber der anderen ist.

Aus diesem Grund wird der RMSE in dieser Arbeit gewichtet und mit den Referenzdaten normiert, so dass der gewonnene Wert zwischen 0 und 1 liegt und der Vergleich zwischen unterschiedlichen Werten einfacher wird. Der gewichtete und normierte RMSE wird als RMSE<sup>†</sup> beschrieben. Hier wird die Hauptcharakteristik von RMSE nicht verändert und es gilt auch, dass je größer der RMSE<sup>†</sup> ist, desto fehlerhafter ist eine Schätzung.

Der  $\text{RMSE}^\dagger$  kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\text{RMSE}^\dagger = \frac{\|\alpha \cdot \hat{\mathbf{C}} - \mathbf{C}\|_F}{\|\mathbf{C}\|_F} \quad (2.12)$$

wobei  $\alpha$  zur Normierung der  $\hat{\mathbf{C}}$  dient und durch die folgende Gleichung bestimmt werden kann:

$$\alpha = \frac{\text{vec}(\mathbf{C})^T \cdot \text{vec}(\hat{\mathbf{C}})}{\text{vec}(\hat{\mathbf{C}})^T \cdot \text{vec}(\hat{\mathbf{C}})}. \quad (2.13)$$

Der  $\text{vec}(\cdot)$  Operator bedeutet, dass die Matrix vektorisiert werden muss.

In dieser Arbeit werden die durch die Simulationen gewonnenen Daten mit dem modifizierten  $\text{RMSE}^\dagger$  ( $\text{RMSE}^\dagger$ ) evaluiert.

### 3 Stand der Technik

In dieser Arbeit wird die Anwendungsmöglichkeit der SAFT für die händisch aufgenommene Messdaten, besonders die von Metallkörpern, evaluiert. Wie im Teil 2.2.1 diskutiert wurde, wird SAFT konventionell für die maschinell aufgenommene Daten verwendet. Bei der maschinellen Prüfung wird der Prüfkopf auf ein äquidistantes feines Raster gelegt, so dass der Ortsbereich vollständig abgetastet wird und dadurch die örtliche Unterabtastung vermieden werden kann. Währenddessen ist es bei einer händischen Messung sehr schwierig, den Abstand aufeinanderfolgenden Aufnahmen konstant zu halten oder den Ortsbereich vollständig abzutasten. Darüber hinaus existieren für die Anwendung, die in dieser Arbeit als Messmodell betrachtet wird, zusätzliche systematische Abweichungen, wie zum Beispiel die Positionsungenauigkeit durch das Tracking-System. Dementsprechend ist bei diesem Anwendungsmodell eine Verschlechterung der Abbildungsqualität zu erwarten.

Allerdings wurde die Anwendung der SAFT für die handaufgenommene Messdaten bisher nur wenig erforscht (Anhang .1). Mit den synthetisch generierten Daten vom Betonmaterial wurde eine gute Möglichkeit der SAFT Anwendung für die handaufgenommenen Daten im Zwischenbericht eines Forschungsprojektes gezeigt [20].

Das Ziel des Forschungsprojektes von [20] war die Echtzeitdarstellung der 3D SAFT Rekonstruktion parallel zur Messung. In diesem Bericht wird ein möglicher Projektverlauf für die echtzeitige 3D-SAFT Rekonstruktion der handaufgenommenen Messdaten vorgestellt. Dafür werden zuerst einzelne A-Scans für die Unterscheidung der unterschiedlichen Reflektionen entfaltet und dann wird die Information der aktuellen Prüfposition ermittelt bevor die 3D-SAFT Rekonstruktion neu errechnet wird.

Dennoch wurde in [20] auch diskutiert, dass die Evaluierung der handaufgenommener Messdaten von Stahlkörpern allgemein sehr schwierig ist. Die Anwendungsmöglichkeit des in diesem Bericht vorgeschlagene Algorithmus auf Metallkörper wird in [20] auch nicht erwähnt. Es ist von daher bisher noch nicht bekannt, ob SAFT für die Rekonstruktion handaufgenommener Metallkörpermessdaten geeignet ist.

## 4 Einflussfaktoren auf die Rekonstruktion handaufgenommener Daten

In diesem Kapitel werden mögliche Fehlerquellen bei der SAFT Rekonstruktion händisch aufgenommener Daten diskutiert. Im Teil 4.1 werden die bei der Rekonstruktion der handaufgenommenen Messdaten erwarteten Herausforderungen dargestellt. Diese Herausforderungen werden in zwei Kategorien unterteilt: eine bezüglich der Prüfpositionen und die andere bezüglich der Messungenauigkeiten unseres Messaufbaus. Diese Herausforderungen werden als die Fehlerquellen betrachtet und im nachfolgenden Teil 4.2 auch in Bezug auf die Vorarbeiten genauer diskutiert. Am Ende dieses Kapitels, Teil 4.3, werden die Fehlerquellen, die in dieser Arbeit untersucht wurden, kurz erläutert.

### 4.1 Herausforderungen bei der Rekonstruktion handaufgenommener Daten

Wie bereits in Kapitel 3 diskutiert, ist bisher unbekannt, ob SAFT für die Rekonstruktion handaufgenommener Daten eines Metallobjektes tauglich ist. Um uns diesem Problem anzunähern, haben wir mögliche Fehlerquellen in folgende Kategorien, die sich auf den Vergleich von maschinellen und händischen Messungen beziehen, unterteilt. Die erste Kategorie beinhaltet die Herausforderungen bezüglich der Prüfpositionen, die zweite Kategorie enthält die Herausforderungen bezüglich der Messungenauigkeiten.

Die Abbildung 4.1a und 4.1b zeigen die Prüfungspositionen der maschinellen und der händischen Messung, auf die im folgenden Bezug genommen wird.

#### Herausforderungen bezüglich der Prüfpositionen

Bei der maschinellen Messung befinden sich die Prüfpositionen auf dem äquidistanten Raster, wie in Abbildung 4.1a dargestellt. Unter der Äquidistanz versteht man, dass zwei benachbarte Punkte einen gleichen Abstand  $d$  haben ( $d = dx = dy$ ). Andererseits ist es bei der händischen Messung kaum möglich immer einen gleichen Abstand zwischen zwei Prüfpositionen beizubehalten. Dies kann zu einem größeren Abstand zwischen zwei benachbarten Prüfstellen führen, wie dargestellt in der Abbildung 4.1c.

Wenn alle zwei benachbarten Prüfpositionen immer mit einem gleichen Abstand gelegt sind, werden die Positionen über den Ortsbereich gleichmäßig verteilt. Bei der händischen Messung hingegen wird der Bereich unter dem die Streuer liegen oft umfassender geprüft als die anderen Bereiche. Dargestellt wird dies in Abbildung 4.1d. Das hat zur Folge, dass die Prüfpositionen nicht mehr gleichmäßig verteilt sind.

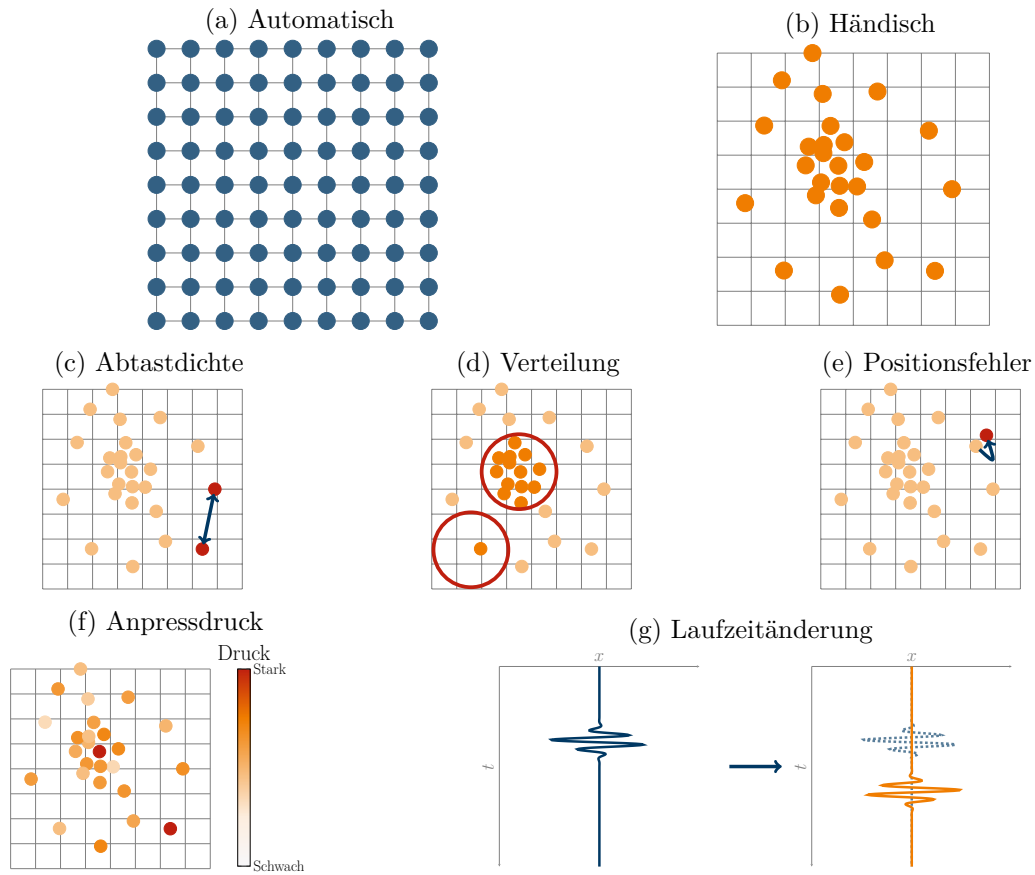


Abbildung 4.1: Prinzipskizze verschiedener Unterschiede zwischen handaufgenommenen und maschinell aufgenommenen Daten

Darüber hinaus ist die Datenmenge der handaufgenommenen Messung erwartungsgemäß viel geringer als die von der maschinellen Messung, wie in die Abbildung 4.1b und 4.1a dargestellt wird.

### Herausforderungen bezüglich der Messungenauigkeiten

Weiterhin ist der systematische oder menschliche Fehler besonders bei händischer Messungen sehr schwer zu vermeiden. Mit dem Messsystem, das wir in dieser Arbeit als Messmodell betrachten, ist eine gewisse Ungenauigkeit bei der Kameraerkennung der Prüfpositionen zu erwarten, wie in Abbildung 4.1e dargestellt wird. Dies kann zu Positionsfehlern führen, die so wohl die Messung als auch die Rekonstruktion beeinflussen könnten.

Zudem wird oft bei der maschinellen Messung ein direkter Kontakt zwischen dem Prüfkopf und dem Testkörper vermieden, um die Kopplung zu optimieren. Dies ge-

schiebt beispielsweise durch eine Tauchbad-Wasserankopplung. Bei unserem Messmodell hingegen wird die Messung mit einem direktem Kontakt zwischen Prüfkopf und Testkörper durchgeführt. Um die durch Reflexionen an der Grenzfläche zwischen dem Prüfkopf und dem Testkörper verursachte Energie zu verringern, wird gewöhnlicherweise ein Kopplungsmittel, beispielsweise Öl oder Glycerin, verwendet. Allerdings könnte der Anpressdruck aufgrund des Kopplungsmittels nicht konstant gehalten werden. Dadurch wäre es möglich, dass sich der Abstand zwischen dem Prüfkopf und dem Testkörper ändert (Abbildung 4.1f). Als Folge dessen könnte die Laufzeit des Echos von Prüfstelle zu Prüfstelle variieren (Abbildung 4.1g).

## 4.2 Mögliche Fehlerquellen

Die obengenannten Einflussfaktoren sind als Fehlerquellen unseres händischen Messmodells zu betrachten und werden in der Tabelle 4.1 zusammengefasst. Im folgenden Teil werden bisherige Forschungen und deren aktueller Stand bezüglich dieser Fehlerquellen diskutiert.

	Aspekte	Maschinell	Händisch
Unterschied bezügl. Prüfstelle	Abtastdichte	fein	grob
	Verteilung	gleichmässig	ungleichmässig
	Abdeckung bzw. Datenmenge	vollständig ausreichend	unvollständig gering
Unterschied bezügl. Messsystem	Positionsgenauigkeit	präzise	ungenau
	Kontakt mit dem Testkörper bzw. Anpressdruck	keine Kontakte bzw. konstanter Druck	nicht konstant

Tabelle 4.1: Darstellung von Unterschieden zwischen einer automatisierten und einer handaufgenommenen Messung

### (1) Grobe Abtastdichte

Wenn der Ortsbereich mit einem größeren Abstand, bzw. einer geringeren Abtastdichte abgetastet wird, kann es zu einer Unterabtastung führen, wie im Teil 2.2.1 diskutiert wird. Der Grenzwert der Abtastdichte bzw. des Abstandes zwischen zwei benachbarten Prüfpositionen wurde von [12] bereits untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Abtastdichte von einer Wellenlänge  $\lambda$ , im Gegensatz zur Abtasttheorie, unabhängig von den Messszenarien eine zufriedenstellende Abbildungsqualität liefert. Außerdem kann die Abtastdichte je nach Messszenario noch erweitert werden. Wenn sich zum Beispiel die Streuer sehr tief im Testkörper befinden oder der Öffnungswinkel des Prüfkopfes größer als  $20^\circ$  ist, kann die Abtastdichte größer als  $\lambda$  verwendet werden, während sich die durch Unterabtastung verursachten Artefakte im zulässigen Niveau halten [12].

## **(2) Ungleichmäßige Verteilung**

Bei händischen Messungen wird ein Ortsbereich möglicherweise viel dichter als andere Bereiche abgetastet. Es kann bei der SAFT Superposition zu einer Überbetonung dieses Bereiches führen [18]. Dennoch kann es auch zur Unterabtastung im dünn abgetasteten Bereich führen. Solch eine ungleichmäßige Abtastung bzw. Verteilung der Prüfpositionen wird im Bericht von [20] als eine der hauptsächlichen Herausforderungen bei der SAFT Rekonstruktion der händischen Messdaten behandelt.

Um uns diesem Problem anzunähern, wird in [20] die Amplitudenwichtung als eine Maßnahme vorgeschlagen. Wenn ein A-Scan bei einer Prüfposition aufgenommen wird, wird die Dichte aller bereits abgetasteten Prüfpositionen bestimmt. Nach dieser Prüfpositionsichte wird die Wichtung der Amplitude einzelner A-Scans bestimmt, so dass die Überbetonung eines dicht abgetasteten Bereiches verhindert werden kann. Das bedeutet, dass die Amplitude jedes A-Scans durch die Wichtung reduziert wird, wenn mehrere A-Scans in einem Bereich vorhanden sind. Mit dieser Herangehensweise wird die Rekonstruktionspräzision durch die im entsprechenden Bereich erhöhte Abtastdichte verbessert [20]. Darüber hinaus kann das Rauschen in diesem Bereich auch verringert werden [20].

## **(3) Kleinere Datenmenge und niedrige Abdeckung**

Da der SAFT Algorithmus auf Superpositionen aller vorhandenen Daten basiert, hängt die Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion von der Abdeckung des Ortsbereiches ab. Das bedeutet, es wird eine Verschlechterung der Abbildungsqualität erwartet, wenn nicht ausreichende Daten für die Rekonstruktion vorhanden sind (Teil 2.2.1). Andererseits kann die Abbildungsqualität durch eine höhere Abdeckung verbessert werden, falls keine anderen Fehlerfaktoren existieren.

Es ist allerdings noch nicht bekannt, welche Datenmenge für eine ausreichende Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion erforderlich ist (Anhang .2). Diese Frage ist für die Rekonstruktion handaufgenommener Messdaten besonders relevant, da dies als ein Indikator für die Messung herangezogen werden kann. Daraus folgt, dass die Messzeiten und der -arbeitsaufwand durch solch einen Indikator verringert werden könnten.

Darüber hinaus sollte auch diskutiert werden, ob die Einflüsse der anderen Fehlerfaktoren durch eine höheren Abdeckung reduziert werden können.

## **(4) Positionsungenauigkeiten**

Der Effekt der Positionsungenauigkeit auf die SAFT Rekonstruktion wurde bisher nicht viel erforscht (Anhang .2). Bei der händischen Messung im Bericht von [20] werden die Messpositionen mit Hilfe der Abstandmessgeräte bestimmt und deren Ungenauigkeit wird nicht diskutiert.

In [7] andererseits wird der Effekt positioneller Ungenauigkeit der Messung auf die SAFT Rekonstruktion berücksichtigt. Hier werden die Messdaten mit Hilfe mehrerer kleiner Messfahrzeugroboter, die eine gewisse Positionsungenauigkeit besitzen, auf dem äquidistanten Messraster aufgenommen. Die Messdaten werden danach mit SAFT re-



konstruiert. Dabei wurde präsentiert, dass SAFT auf positionelle Ungenauigkeit sensibel reagiert [7]. Die positionelle Ungenauigkeit der Roboter wurde durch die Varianz der Drehabweichung des Rades analytisch bestimmt. Allerdings könnten die Werte des gegebenen Positionsfehlers von den eigentlichen Werten abweichen, da die Drehung des rechten und linken Rades nicht ganz identisch ist [7, S.225]. Darüber hinaus weichen die Roboter durch die ungenaue Raddrehung vom gewollten Prüfpfad ab, was zum zusätzlichen Ausrichtungsfehler des Prüfkopfes führt [7, S.226]. Deren Effekt muss bei den gewonnenen Rekonstruktionsergebnissen [7, Abb. 7.25, 7.27] auch berücksichtigt werden.

Aus diesem Grund sollte der Effekt der Positionsungenauigkeit anhand der händischen Messung noch untersucht werden.

## (5) Laufzeitänderung

Im Bericht von [20] wurde der Prüfkopf durch ein Vakuum auf dem Testobjekt festgelegt, wodurch keine Anpressdruckänderung mehr vorkam. Allerdings wird bei unserem Anwendungsmodell eine gewisse Abweichung vom Anpressdruck erwartet. Wenn die Laufzeiten des eingestrahnten Ultraschalls durch den variierenden Anpressdruck über dem Ortsbereich nicht konstant sind, entspricht die Summation der Zeitverzögerung der aufgenommenen A-Scans nicht mehr der richtigen Signalantwort der Streuer. Aus diesem Grund sollte deren Effekt auf die Rekonstruktion auch untersucht werden.

Ein solches Verhalten kann als Prüfung eines Testobjektes mit einer rauen Oberfläche betrachtet werden. Allgemein ist bei UP Messungen der Effekt von Rauheit der Oberfläche bereits bekannt. Wenn ein Testobjekt eine raue Oberfläche besitzt, wird die Kopplung verringert und die zusätzliche Streuung wird an der Oberfläche verursacht. Dies führt zu einer Reduzierung der Signalamplitude und lässt die richtigen Streuer im Objekt schwer detektieren [5]. Dafür wurde festgestellt, dass die Rauheit von bis zu  $\frac{\lambda}{10}$  vernachlässigt werden kann [9]. Darüber hinaus verursacht die Oberflächenrauheit die durch Phasenschiebung verursachten Verzerrung der eingestrahnten Welle und deren Effekt muss auch berücksichtigt werden [5] [23].

Die Rekonstruktionsmöglichkeit solcher Messdaten wurde bisher kaum erforscht (Anhang .2). In [3] wird als eine erweiterte Anwendung der Total Focusing Method (TFM) untersucht, ob Messdaten mit unterschiedlichen Zeitverzögerungen durch TFM rekonstruiert werden können. Hier wurde die TFM für die Tauchbad-Messdaten angewendet und es wurde gezeigt, dass die Prüfdaten mit einer unbekannten Oberflächengeometrie durch die Anpassung des Ausbreitungspfades erfolgreich rekonstruiert werden können.

Allerdings wird bei unserem Modell ein Testkörper mit einer flachen Oberfläche betrachtet und auch mit einem direkten Kontakt, also ohne Tauchbad, geprüft. Das bedeutet es werden keine Streuer an der Oberfläche erwartet und die Änderung des Ausbreitungspfades ist vernachlässigbar, da es keinen Vorlauf zwischen dem Prüfkopf und dem Testkörper gibt. Die vermutete Abstandsänderung ( $\Delta z$ ) ist viel geringer als der Ausbreitungspfad ( $l$ ) (bzw.  $\Delta z \ll l$ ). Aus diesem Grund kann die Änderung des Anpressdrucks bei unserem Anwendungsfall als reine Laufzeitänderung des eingestrahnten Ultraschalls bzw. Zeitverschiebung des Signals betrachtet werden. Da die Korrelation von SAFT und der variierenden Laufzeit bisher nicht bekannt ist (Anhang .2), sollte deren Effekt auch

evaluiert werden.

### 4.3 Hauptaugenmerk der Arbeit

Wie im vorherigen Teil 4.2 gezeigt, wird der Einfluss einer gröberen Abtastdichte bereits von [12] untersucht. Der Effekt von einer ungleichmäßigen Prüfpositionsverteilung auf die SAFT Rekonstruktion wird auch in [20] diskutiert und eine Maßnahme dafür wird vorgeschlagen [20].

Die restlichen drei Faktoren für unser Anwendungsmodell wurden bisher nicht viel erforscht. Der Einfluss einer niedrigen Abdeckung des Ortsbereiches kann bei unserem Anwendungsmodell nicht vernachlässigt werden, jedoch haben wir auf sie keinen Einfluss. Währenddessen kann der Effekt der vom System abhängigen Ungenauigkeiten durch die angemessene Anpassung des Systems, sowie Verbesserung der Kameraerkennung oder Integration von Drucksensoren im Messsystem, möglichst gering gehalten werden. Da die Abdeckung des Ortsbereiches bei einer Simulation variiert und damit deren Effekt evaluiert werden kann, werden zwei Simulationen in dieser Arbeit durchgeführt: eine zur Evaluierung des Einfluss der Positionsungenauigkeit und die andere zur Untersuchung des Effektes der Laufzeitänderungen.

## 5 Simulationsszenario

In diesem Kapitel wird das Simulationsszenario dieser Arbeit präsentiert. Zuerst wird im Teil 5.1 der Messaufbau, auf dem die Simulationen dieser Arbeit basieren, zusammen mit deren Annahmen beschrieben. Im nächsten Teil 5.2 werden die bei der Simulationen verwendeten Parameterwerte dargestellt. Am Ende dieses Kapitels, Teil 5.3, werden die Referenzdaten für die Simulationen gezeigt, um die gewonnenen Ergebnisse besser evaluieren zu können.

### 5.1 Messaufbau

Die Simulationen basieren auf einem Messaufbau, in dem Ultraschallmessdaten mit einem Handprüfkopf mittels Kontakttechnik aufgenommen werden (Abbildung 1.1).

Wenn der Prüfkopf auf eine Prüfposition gestellt wird, wird ein A-Scan an der Stelle aufgenommen und im System gespeichert. Während der Messung wird die Position des Prüfkopfs auch durch eine Kamera aufgenommen, bevor die Ortsinformationen ins System gesendet werden. In dieser Arbeit wurde betrachtet, dass die A-Scans durch einen Prüfkopf mit dem Puls-Echo-Verfahren aufgenommen werden.

Mit den aufgenommenen A-Scans und deren Ortsinformationen wird eine Rekonstruktion errechnet und simultan zur Messung dem Prüfer angezeigt. Durch diese sofortige Visualisierung der Rekonstruktion soll die Abdeckung des Prüfobjektes durch den Prüfer verbessert werden. Außerdem kann der Prüfer so schon während der Messung mögliche Problemstellen, die sich in der Rekonstruktion zeigen, genauer untersuchen.

#### Annahmen für den Messaufbau

Für die Implementierung unseres Modells wurden einige Annahmen bezüglich des Testkörpers, des Prüfkopfes und der Wellenausbreitung genommen. Damit können wir ein einfaches Modell beschreiben und deshalb kann das Modell für komplexe Fälle mit einer passenden Berücksichtigung erweitert werden (Tabellendarstellung in 5.1).

Für den Testkörper wird angenommen, dass er eine flache Oberfläche besitzt und homogene und isotropische Eigenschaften hat. Das bedeutet, dass sich nur bei den Streuern, beispielsweise Materialfehler wie Lunker, die Wellenimpedanzen ändern. Die Streuer im Testkörper werden als Punktstreuer angenommen, so dass die eingefügte Welle immer in Richtung der Quelle, in diesem Fall der Prüfkopf, zurück reflektiert wird [14]. Allerdings wird nur ein Teil des unendlich gedehnten Testkörpers berücksichtigt, so dass der Effekt von dem Rückwand- oder dem Seitenwandecho vernachlässigt werden kann. Die Signale im Testkörper wurden als rauschfrei betrachtet.

Darüber hinaus wird betrachtet, dass ein Senkrecht-Prüfkopf sowohl als Sender und auch als Empfänger des Ultraschalls verwendet wird. Mit der Puls-Echo-Verfahrens Messung wird überwiegend der longitudinale Wellenanteil genutzt [24]. In dieser Arbeit wird die longitudinale Welle als die Wellenmode betrachtet, da die Transversalwellen infolge des längeren Schallweges ausgeblendet werden können [24].

Für die Implementierung der eingefügten Welle wird das Gabor Modell, das heißt ein Gauss-moduliertr Sinus, der oft als eine realistische Approximation der Ultraschallwelle betrachtet wird [19], verwendet. Das Gabor Modell kann wie folgt beschrieben werden:

$$s(t) = \begin{cases} e^{-\alpha \cdot (t - \frac{T}{2})^2} \cdot \cos(2\pi f_c(t - \frac{T}{2}) + \phi), & \text{if } |t| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5.1)$$

Aspekt	Annahme
Oberfläche	flach
Streuer	Punktstreuer
Bildbereich	ein Teil des unendlich gedehnten Testkörpers
Signal im Testkörper	rauschfrei
Prüfkopf	Sende- und Empfangskopf, Senkrechteinschallung
Wellenmode	longitudinale Welle
Pulsform	Gabor Modell

Tabelle 5.1: Übersicht über die für die Simulation der UP genutzten Modellannahmen

## 5.2 Simulationsszenario

### Konstante Parameter

Zusätzliche zu den Annahmen aus dem Teil 2.2.1 wird ein gleiches Simulationsszenario in dieser Arbeit verwendet, um die kohärenten Ergebnisse für die unterschiedlichen Simulationen zu erzeugen.

Das Material des Testkörpers wird als Aluminium betrachtet, in dem Schallgeschwindigkeit  $c_0$   $6300 \text{ m s}^{-1}$  beträgt. Bei der Messung wird angenommen, dass sie durch eine zeitdiskrete Aufnahme mit der Abtastfrequenz  $f_S$  durchgeführt wird. Der in dieser Arbeit betrachtete Bereich beinhaltet eine Dimension von 20 mm Breite ( $x$ ), 20 mm Länge ( $y$ ) und 35 mm Tiefe. Wenn die Daten auf dem äquidistanten Messraster gerechnet werden, werden sie im Ortsbereich in einem Intervall von  $dx = dy = 0.5 \text{ mm}$  abgetastet. Das gleiche gilt auch für die Rekonstruktion.

Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich vier Punktstreuer im betrachteten Bereich des Testkörpers, wie in Abbildung 5.1, befinden. Die vier Streuer liegen aus der Draufsicht, hier die  $xy$ -Ebene (Abbildung 5.1a) quasi diagonal im Testkörper. Aus der Seitenansicht, hier die  $xz$ - bzw.  $yz$ -Ebene (Abbildung 5.1b), liegen die mittleren zwei

Streuer fast nebeneinander. Dadurch kann man die Trennbarkeit dieser zwei nebeneinander liegenden Streuer bewerten. Die zwei Streuer, die außen liegen, werden in eine unterschiedliche Tiefe gelegt, um den Fokus bestimmter Öffnungswinkel bzw. deren Effekt darzustellen.

Für die Generierung des Pulses wird das Gabor-Modell mit der Trägerfrequenz  $f_C$  von 5 MHz, der Pulslänge von  $20 \cdot dt$  und der relativen Bandbreite von 0.5, das entspricht einer Bandbreite von 2.5 MHz, verwendet.

In der Tabelle 5.2 werden die Werte der oben genannten Parameter und des verwendeten Pulses zusammengefasst.

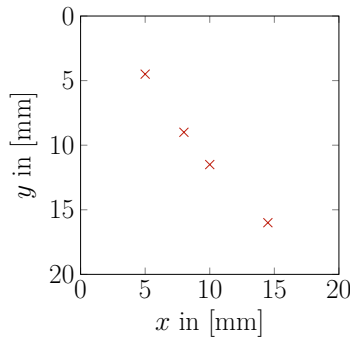
	Parameter	Werte
Testkörper	Material	Aluminium
	Dimension ( $L \times B \times H$ )	20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 35 mm
	$N_x \times N_y \times N_z$	40 $\times$ 40 $\times$ 880
	Schallgeschwindigkeit $c_0$	6300 m s <sup>-1</sup>
	Abtastfrequenz $f_S$	80 MHz
	$dt = \frac{1}{f_S}$	12.5 ns
	Abtastintervall Oberfläche (dx, dy)	0.5 mm
	Abtastintervall Tiefe (dz)	39.375 $\mu$ m
Puls	Position der Punktstreuer	[10, 9, 520] = [5 mm, 4.5 mm, 20.67 mm], [16, 18, 554] = [8 mm, 9 mm, 22.02 mm], [20, 23, 571] = [10 mm, 11.5 mm, 22.70 mm], [29, 32, 614] = [14.5 mm, 16 mm, 24.41 mm]
	Modell	Gaussian (hier Gabor)
	Trägerfrequenz $f_C$	5 MHz
	Wellenlänge $\lambda$	1.26 mm
	Relative Bandbreite	0.5
	Länge des Pulses	$20 \cdot dt$

Tabelle 5.2: Liste der über alle Simulationen konstant gehaltenen Parameter

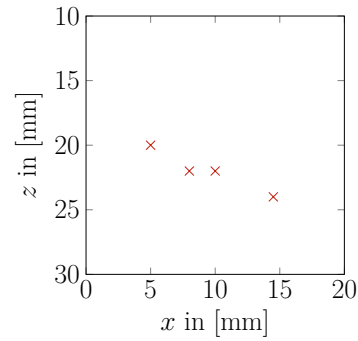
## Variablen

Es gibt auch zwei frei wählbare Parameter in den Simulationen. Wie bereits im Kapitel 2.2.1 diskutiert, kann der Öffnungswinkel des Prüfkopfes unabhängig von dem Messszenario variiert werden. Allerdings sind die Öffnungswinkel antiproportional zur Größe bzw. dem Durchmesser des Prüfkopfes 2.2.1 und deren Bereich ist dementsprechend begrenzt.

Üblicherweise ist ein Ultraschall-Prüfkopf mit einem Durchmesser zwischen 5 bis 25 mm verfügbar [21]. Das entspricht, mit der Gleichung 2.1, den Öffnungswinkeln von 4° bis 22°. Da wir für die SAFT Rekonstruktion die Öffnungswinkel möglichst groß auswählen wollen [15], wurden sie in dieser Arbeit im Bereich von 10° und 20° variiert. 20° ist als



(a) Lage der Punktstreuer in der Seitenansicht



(b) Lage der Punktstreuer in der Draufsicht

Abbildung 5.1: Lage der simulierten Punktstreuer

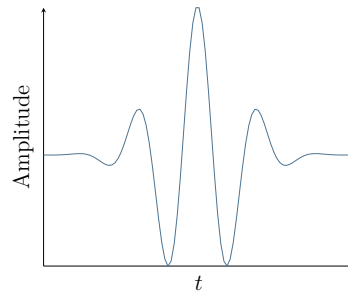


Abbildung 5.2: Pulsform des Gabor Modells

der Defaultwert für den Öffnungswinkel eingesetzt und es wurde dieser verwendet, wenn es keine andere Angabe dafür gibt.

Der zweite Parameter ist die Anzahl der Prüfpositionen. Um den Effekt der Abdeckung des Ortsbereiches auf die Rekonstruktionsqualität zu untersuchen, wurde die Anzahl der Prüfpositionen variiert. Da es insgesamt 1600 Pixel in der  $x$ - $y$ -Ebene gibt, beträgt der Variationsbereich zwischen 10% und 100% aller Pixel. Existieren keine weitere Angaben wurden 1600 Prüfpositionen simuliert und in der Verarbeitungskette verwendet.

Genaue Werte für beide Variablen sind in den Tabellen 6.2 und 7.1 zu finden.

### 5.3 Referenzdaten

Als Referenz fungiert eine simulierte quasi-maschinell aufgenommene Messung, das bedeutet es wurde eine vollständige Abtastung im Ortsbereich auf einem äquidistanten Messraster simuliert. Daraus folgt, dass die Daten an jedem Abtastpunkt im Ortsbereich mit  $dx = dy = 0.5\text{ mm}$  generiert wurden. Diese Daten können als die maschinell aufgenommenen Messdaten betrachtet werden. Die Rekonstruktionsdaten sind in der

Abbildung 5.3 zu finden. Die Annahmen, die in Kapitel 5.1 dargestellt werden, werden auch für die Generierung der Referenzdaten genommen.

Mit diesen Referenzdaten wurden die optimalen Öffnungswinkel für unser Simulations-szenario bestimmt. Obwohl der Öffnungswinkel von  $20^\circ$  für eine fokussierte Abbildung der Messdaten eigentlich zu breit ist (Abbildung 5.3b) und die ROI damit nicht im Fokus liegt, liefert dieser Öffnungswinkel die beste Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion bei unserem Messszenario (5.3c). Denn SAFT profitiert von großen Öffnungswinkeln. Da  $20^\circ$  der größte Öffnungswinkel ist, der in den Simulationen verwendet wird, wird es als der Ausgangspunkt der Simulationen betrachtet und die Rekonstruktionsdaten von Abbildung 5.3c als fReferenz dieser Arbeit verwendet.

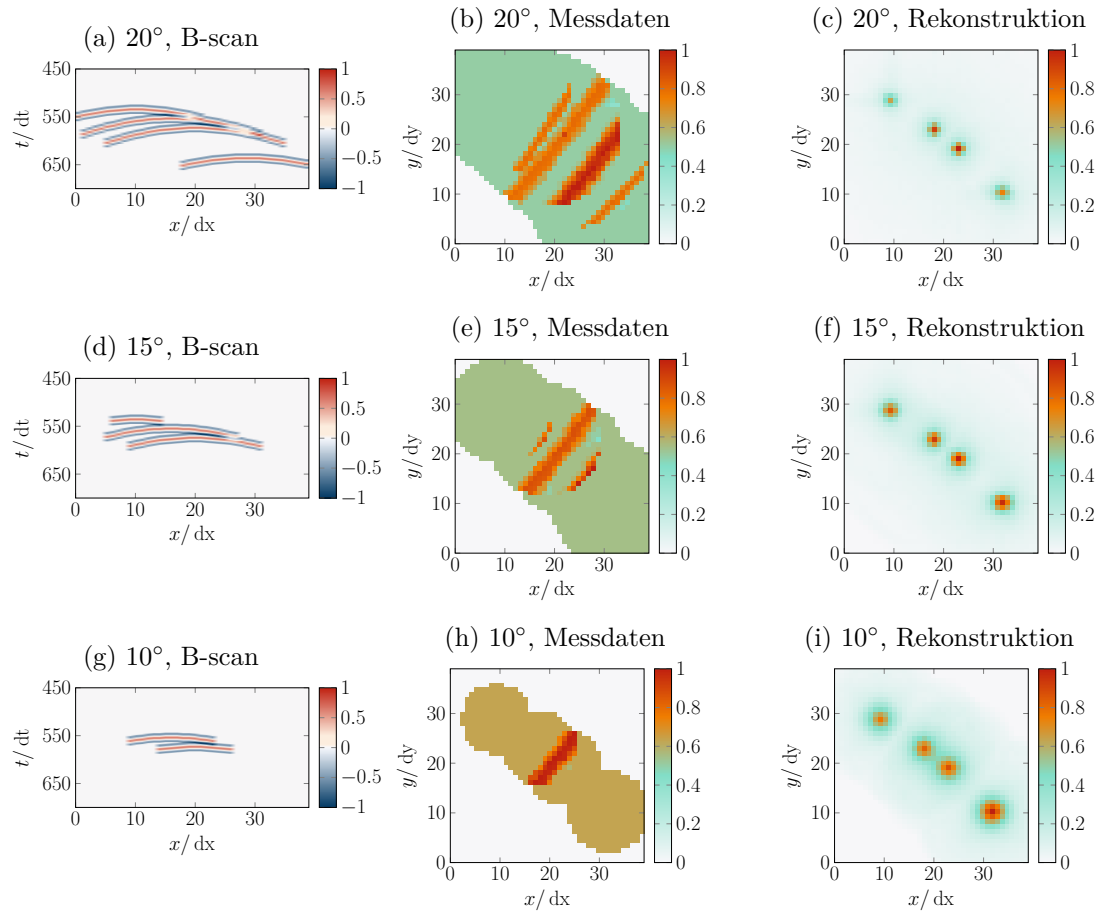


Abbildung 5.3: B-Scan-Darstellung der simulierten maschinellen Datenaufnahme bei  $y = 19 \text{ dy}$  (links), C-Scan-Darstellung der Messdaten der simulierten maschinellen Datenaufnahme (Mitte) sowie C-Scan-Darstellung der Rekonstruktion (rechts) für unterschiedliche Öffnungswinkel. Alle Darstellungen sind mit dem Betragsmaxima normiert

## 6 Positionungenauigkeit

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Positionungenauigkeiten auf die Rekonstruktion handaufgenommener Messdaten untersucht und diskutiert. Wie bereits in Kapitel 5.1 dargestellt wird, werden bei unseren händischen Messungen die Positionen des Prüfkopfes mit Hilfe des Kameraerkennungssystems bestimmt. Bei diesem Anwendungsfall ist ein gewisser Fehler bei der Positionsschätzung zu erwarten: dieser kann einerseits durch das Messsystem und andererseits durch die Quantisierung der Prüfpositionen, die bei der verwendeten SAFT, die wie in Kapitel 2.2.2 bereits dargestellt wird und erforderlich ist, verursacht werden.

Für die Untersuchung von deren Auswirkungen wird in dieser Arbeit eine Simulation durchgeführt. Das Simulationsprinzip und der Simulationsaufbau wird zunächst im Teil 6.1 dargestellt. Der dazu zugehörige Quantisierungsfehler und die Abdeckung des Ortsbereiches werden im Teil 6.1.3 und 6.2 diskutiert. Im Teil 6.3 werden die gewonnenen Daten als exemplarische Ergebnisse gezeigt. Schließlich werden im Teil 6.4 die Daten mit Hilfe der modifizierten  $\text{RMSE}^\dagger$  ausgewertet und deren Ergebnis wird diskutiert.

### 6.1 Simulationsprinzip und -aufbau

#### 6.1.1 Simulationsaufbau

Für die synthetische Datengenerierung wird angenommen, dass die Prüfpositionen auf zufälligen Stellen im Ortsbereich, hier  $xy$ -Ebene (Abbildung 5.1a), verteilt sind, so dass die Simulation nicht nur die Quantisierungsfehler untersucht sondern auch die Fehlerschätzung der Positionen berücksichtigt. Das bedeutet, dass die Prüfpositionen nicht mehr gleichmäßig auf dem Raster verteilt sind, im gegensatz zu den Referenzdaten 5.3c.

Außerdem spielt die Anzahl der Prüfpositionen,  $N_{\text{point}}$  eine wesentliche Rolle, dennoch ist bisher unbekannt, wie viele Prüfpositionen für eine zufriedenstellende Rekonstruktion erforderlich sind. Von daher wurden 4 verschiedene Werte von  $N_{\text{point}}$  bei dieser Simulation verwendet. Der Variationsbereich der Anzahl simulierter Messungen ( $N_{\text{point}}$ ) liegt zwischen 10% und 100% aller Pixel und die jeweiligen Werte sind in der Tabelle 6.2 zu finden. Für die kohärente Simulation, wurde für jede  $N_{\text{point}}$  ein gleiches Datenset der Prüfpositionen, die in Abbildung 6.1 dargestellt werden, verwendet.

Bei unserem Anwendungsfall kann man sich den Simulationsverlauf wie folgt vorstellen:

1. Der Prüfkopf wird auf eine Position  $(x_0, y_0)$  gestellt
2. Es wird eine Puls-Echo Messung, den A-Scan  $\mathbf{a}_0$ , aufgenommen



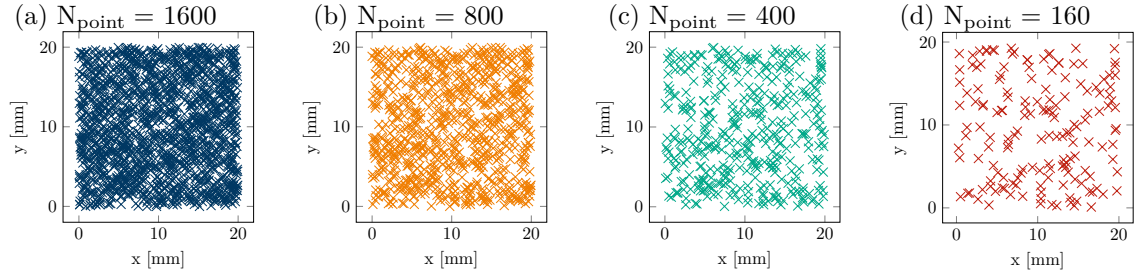


Abbildung 6.1: Beispielhafte Darstellung der Prüfstellen für unterschiedliche  $N_{\text{point}}$

3. Die Kamera schätzt deren Position als  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$ , gegebenenfalls mit Fehler, und sendet diese Positionsinformation ins System
4. Das System speichert die  $\mathbf{a}_0$  und die zugehörige Positionsinformation  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$
5. Die Position  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$  wird auf den nächstgelegenen Abtastpunkt  $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$  quantisiert
6. Der aufgenommene A-Scan  $\mathbf{a}_0$  wird nach der Quantisierungsmethode angepasst  $\bar{\mathbf{a}}_0$  (Siehe Teil 6.1.3)
7. An der Stelle  $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$  wird die Rekonstruktion mit  $\bar{\mathbf{a}}_0$  durchgeführt
8. Die Rekonstruktionsdaten werden aktualisiert (nach der Gleichung 2.5)

Dieser Verlauf wurde wie Abbildung 6.2 implementiert. Die bei dieser Simulation spezifischen Parameter (sowohl die Konstante als auch die Variable) sind in der Tabelle 6.2 zu finden.

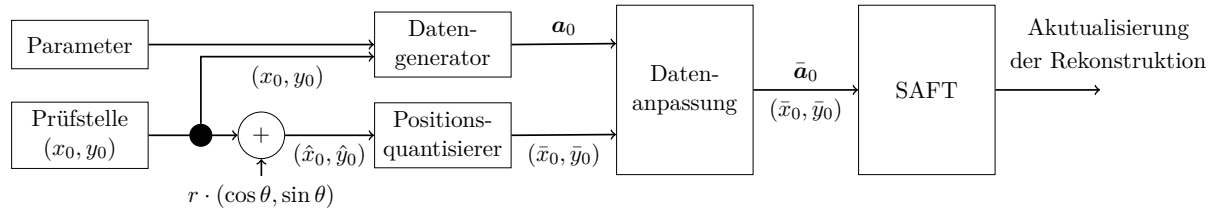


Abbildung 6.2: Blockdiagramm des Simulationsverlaufes

### 6.1.2 Manipulation der Positionen

Für die Manipulation der Prüfpositionen in der Abbildung 6.2 wurden die Polarkoordinaten verwendet, so dass sich die Positionsfehler innerhalb eines gleichen Abstandes von

Bezeichnung	Beschreibung
$(x_0, y_0)$	echte Positionen für die Datengenerierung / -aufnahme
$(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$	durch die Kamera geschätzte Positionen
$(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$	auf dem Rekonstruktionsraster quantisierte Positionen

Tabelle 6.1: Bezeichnungen der einzelnen Zwischenzustände der Prüfpositionen

	Parameter	Werte
Konstant	Prüfposition	beliebig, nicht auf dem Abtastraster (Abbildung 6.1)
	Öffnungswinkel	20°
	Durchführung der Simulation pro $\sigma$	10
Variabel	Positionsabweichung ( $\sigma$ )	0...2 mm
	Anzahl der Prüfstellen ( $N_{\text{point}}$ )	160, 400, 800, 1600 (10%, 25%, 50%, 100% )

Tabelle 6.2: Parameter bei der Simulation der Positionsungenauigkeit

der richtigen Stelle  $(x_0, y_0)$  verteilen können. Das bedeutet, dass die manipulierten bzw. von der Kamera falsch geschätzten Positionen  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$  mit

$$(\hat{x}_0, \hat{y}_0) = (x_0, y_0) + r \cdot (\cos \theta, \sin \theta) \quad (6.1)$$

ausgedrückt werden können. Die Parameter  $r$  und  $\theta$  wurden zufällig ausgewählt, allerdings wurde für  $r$  die Normalverteilung mit der variierenden Standardabweichung  $\sigma$  [mm] verwendet, während  $\theta$  mit der Gleichverteilung im Bereich von  $[0^\circ, 360^\circ)$  bestimmt wurde. Für jeden  $\sigma$  Wert wurden jeweils 10 Simulationen durchgeführt.

### 6.1.3 Quantisierung der Prüfpositionen auf dem Abtastraster

Diese manipulierten Positionen wurden danach quantisiert, da der in dieser Arbeit verwendete SAFT Algorithmus momentan nur auf die auf dem äquidistanten Raster liegenden Prüfpositionen anwendbar ist, wie in Kapitel 2.2.2 erklärt wird. Die quantisierte Position  $(\bar{x}_0, \bar{y}_0)$  kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$(\bar{x}_0, \bar{y}_0) = \left( dx \cdot \text{round} \left( \frac{\hat{x}_0}{dx} \right), dy \cdot \text{round} \left( \frac{\hat{y}_0}{dy} \right) \right). \quad (6.2)$$

Durch die Quantisierung der Prüfpositionen auf dem Raster kann sich mehr als ein A-Scan für einen Rasterpunkt ergeben. Dies verursacht eine Überbetonung der betroffenen Rasterpunkte und dementsprechend verschlechtert sich die Abbildungsqualität [18]. Aus diesem Grund muss entweder nur ein A-Scan pro Rasterpunkt für die Rekonstruktion berücksichtigt werden [18] oder alle betroffenen A-Scans müssen gewichtet werden [20].

**Discard Repetitions (DR)** Für eine Echtzeitrekonstruktion wäre es schneller und weniger rechenaufwendig, wenn nur der erste aufgenommene A-Scan für jeden Rasterpunkt gespeichert wird und alle anderen A-Scans für den gleichen Rasterpunkt vernachlässigt bzw. im System nicht mehr gespeichert werden [18]. Diese Strategie wird in [18] favorisiert.

Seien  $\mathbf{a}_k$  der  $k$ -te A-Scan,  $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$  deren Prüfposition und  $(\bar{x}_h, \bar{y}_h)$  die quantisierte Prüfposition, wobei  $k, h \in \mathbb{N} \cap [0, N_{\text{scan}})$  sind. Wenn die quantisierte Position  $(\bar{x}_h, \bar{y}_h)$  im System noch nicht gespeichert wurde, wird  $\mathbf{a}_k$  als der zur quantisierten Position  $(\bar{x}_h, \bar{y}_h)$  zugehörige A-Scan  $\bar{\mathbf{a}}_h$  betrachtet. Wenn die Position  $(\bar{x}_h, \bar{y}_h)$  im System bereits vorhanden ist, wird  $\mathbf{a}_k$  verworfen. In dieser Arbeit wird diese Quantisierungsmethode als DR bezeichnet.

Allerdings wird bei dem Quantisierungsverfahren DR ein größerer Einfluss des Quantisierungsfehlers erwartet, da hier nur der erste aufgenommene A-Scan für jeden Punkt auf dem Rekonstruktionsgitter im System gespeichert wird und für die Rekonstruktion verwendet wird. Allgemein lässt sich mit dem SAFT-Algorithmus mit einer höheren Abdeckung des Ortsbereiches eine bessere Abbildungsqualität erreichen (Teil 4.2). Das bedeutet, dass die Überbetonung eines bestimmten Bereiches nicht unbedingt zur Verbesserung der Abbildungsqualität führt. Stattdessen spielt eine vollständige Abtastung des Ortsbereiches bei der SAFT Rekonstruktion eine wichtigere Rolle [18].

Eine höhere Abdeckung kann bei unserem Fall erreicht werden, wenn der Prüfer vom System eine Rückmeldung über die bisherige Abdeckung bekommt und damit länger die Messung durchführt. Dadurch nähert sich die Messung mehr einer vollständig äquidistant abgetasteten Messung an, was den Einfluss des Quantisierungsfehlers kompensieren kann [18].

**Take Average (TA)** Als eine andere Herangehensweise der Datenanpassung bei der Rundung der Prüfpositionen wurde eine Wichtung der Beiträge der einzelnen A-Scans in der SAFT Rekonstruktion von [20] vorgeschlagen. Dabei wird aus der Publikation nicht klar, wie die Wichtung genau vorgenommen wird. In Anlehnung an die grundsätzliche Herangehensweise soll hier der arithmetische Mittelwert der A-Scans, die auf einem Rasterpunkt zusammenfallen, verwendet werden. In dieser Arbeit wird diese Quantisierungsmethode als TA bezeichnet.

Seien  $N_{\text{same}}$  die Anzahl der auf einer gleichen Position  $(\bar{x}_h, \bar{y}_h)$  quantisierten A-Scans. Wenn die betroffenen A-Scans bei der  $k$ -ten bis  $k + N_{\text{same}} - 1$ -ten Datenaufnahme bzw. -generierung erscheinen, kann der zur quantisierten Position  $(\bar{x}_h, \bar{y}_h)$  zugehörige A-Scan  $\bar{\mathbf{a}}_h$  wie folgt beschrieben werden:

$$\bar{\mathbf{a}}_h = \frac{1}{N_{\text{same}}} \sum_{i=k}^{N_{\text{same}}-1} \mathbf{a}_i. \quad (6.3)$$

Mit der Quantisierungsmethode TA wird eine Reduzierung des Einflusses des Quantisierungsfehlers erwartet, allerdings muss die Anzahl der auf einem gleichen Rasterpunkt gerundeten A-Scans gezählt werden. Dies ist möglich in dem entweder das System bis

zum Ende aller Datenaufnahmen im betroffenen Bereich wartet, oder die Rekonstruktion bei jeder Datenaufnahme erneut gerechnet wird. Bei beiden Fällen erhöht sich der Aufwand für die Rekonstruktion erheblich und dadurch wird eine langsamere Rekonstruktion erwartet.

Die Abbildungen 6.3a und 6.3b zeigen jeweils ein Beispiel für die mit den oben genannten zwei Quantisierungsmethoden rekonstruierten Daten in C-Scan Form. Hier wurden keine Positionsfehler betrachtet, das bedeutet die Positionen wurden nicht manipuliert, und die Anzahl der Prüfstellen  $N_{\text{point}}$  wurde auf 1600 gestellt. Wie sich zeigt, gibt es optisch keinen großen Unterschied zwischen beiden Quantisierungsmethoden zu erkennen. Da sich die DR besser für die Echtzeitrekonstruktion eignet, wurde die DR als Quantisierungsmethode für die Simulationen dieser Arbeit verwendet.

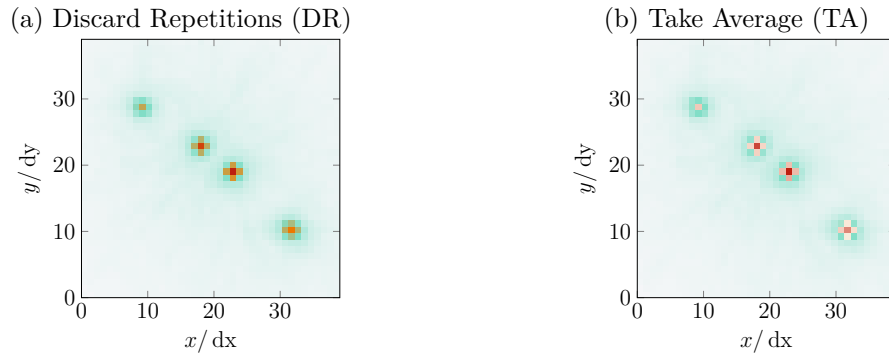


Abbildung 6.3: Vergleich der Quantisierungsstrategien Discard Repetitions (DR) und Take Average (TA) anhand einer C-Scan-Darstellung: Simulation auf  $N_{\text{point}} = 1600$  zufällig gewählten Messpositionen ohne zusätzlichen Positionsfehler ( $\sigma = 0$ )

## 6.2 Abdeckung des Ortsbereiches

Wie in Kapitel 4.2 diskutiert wird, spielt die Anzahl der für die SAFT Superpositionen vorhandene A-Scans, bzw. Abdeckung des Ortsbereiches, bei der Rekonstruktion eine große Rolle. Je mehr Daten für die Rekonstruktion verwendet werden, desto besser wird die Abbildungsqualität, wenn eine gleichmäßige Abtastung vorausgesetzt ist. Diese Abhängigkeit der Abbildungsqualität von der Anzahl der Prüfstellen,  $N_{\text{point}}$ , wird in der Abbildung 6.4 dargestellt. Bei den Abbildungen in 6.4 wurden keine Positionsfehler betrachtet, bzw. die Positionen wurden nicht manipuliert ( $\sigma = 0$ ).

Bei einer kleineren  $N_{\text{point}}$ , beispielsweise 160 Prüfstellen (Abbildung 6.4d), sind die Artefakte im Bild deutlicher als bei der Rekonstruktion mit 1600 Prüfstellen (Abbildung 6.4a). Allerdings sind die Artefakte bei  $N_{\text{point}} = 160$  noch tolerierbar und

alle Streuer im Bild sind noch zu erkennen. Bei den gegebenen Simulationsparametern in unserem Modell, mit den zufällig auf den Ortsbereich verteilten Prüfpositionen wird festgestellt, dass 10% der Abdeckung noch eine zufriedenstellende Abbildungsqualität liefern kann.

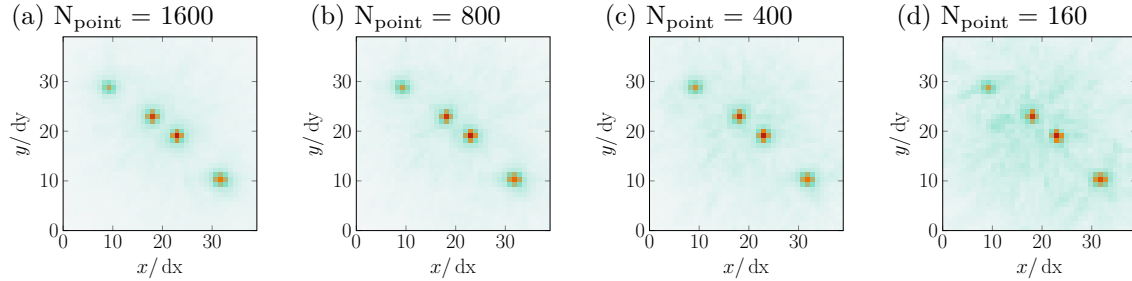


Abbildung 6.4: C-Scan-Darstellung der Rekonstruktion in Abhängigkeit von der Anzahl der einfließenden Messwerte  $N_{\text{point}}$  ohne zusätzlichen Positionsfehler

Nun wird bei der Simulation gezeigt, dass der Positionsfehler dennoch auch auf die Abdeckung des Ortsbereiches einen Einfluss hat. Abdeckung bedeutet hier, wie viele Rasterpositionen nach der Quantisierung der Prüfpositionen, die beliebig auf dem Ortsbereich liegen bzw. nicht mehr auf dem Raster liegen, noch abgedeckt sind. Die Abbildung 6.5 stellt die Beziehung zwischen der Abdeckung und der Positionsabweichung bei unterschiedlicher Anzahl der Prüfstellen  $N_{\text{point}}$  dar. 100% entspricht einer Anzahl von  $N_x \cdot N_y = 1600$  Messpunkten im Ortsbereich, die zur Rekonstruktion beitragen.

Die Kennlinie in Abbildung 6.5 zeigt, dass die Abdeckung des Ortsbereiches mit der steigenden Abweichung  $\sigma$  um ungefähr 2% pro mm relativ zu jeder  $N_{\text{point}}$  sinkt. Mit einer größeren Abweichung können viele von den manipulierten Positionen  $(\hat{x}, \hat{y})$  außerhalb des Bildbereiches liegen, was zur Reduzierung der Abdeckung führt.

Da der Effekt der mit der Positionsabweichung reduzierenden Abdeckung vom Positionsfehler nicht abgekoppelt werden kann, muss dieser Effekt auch bei der Rekonstruktion handaufgenommener Messdaten berücksichtigt werden.

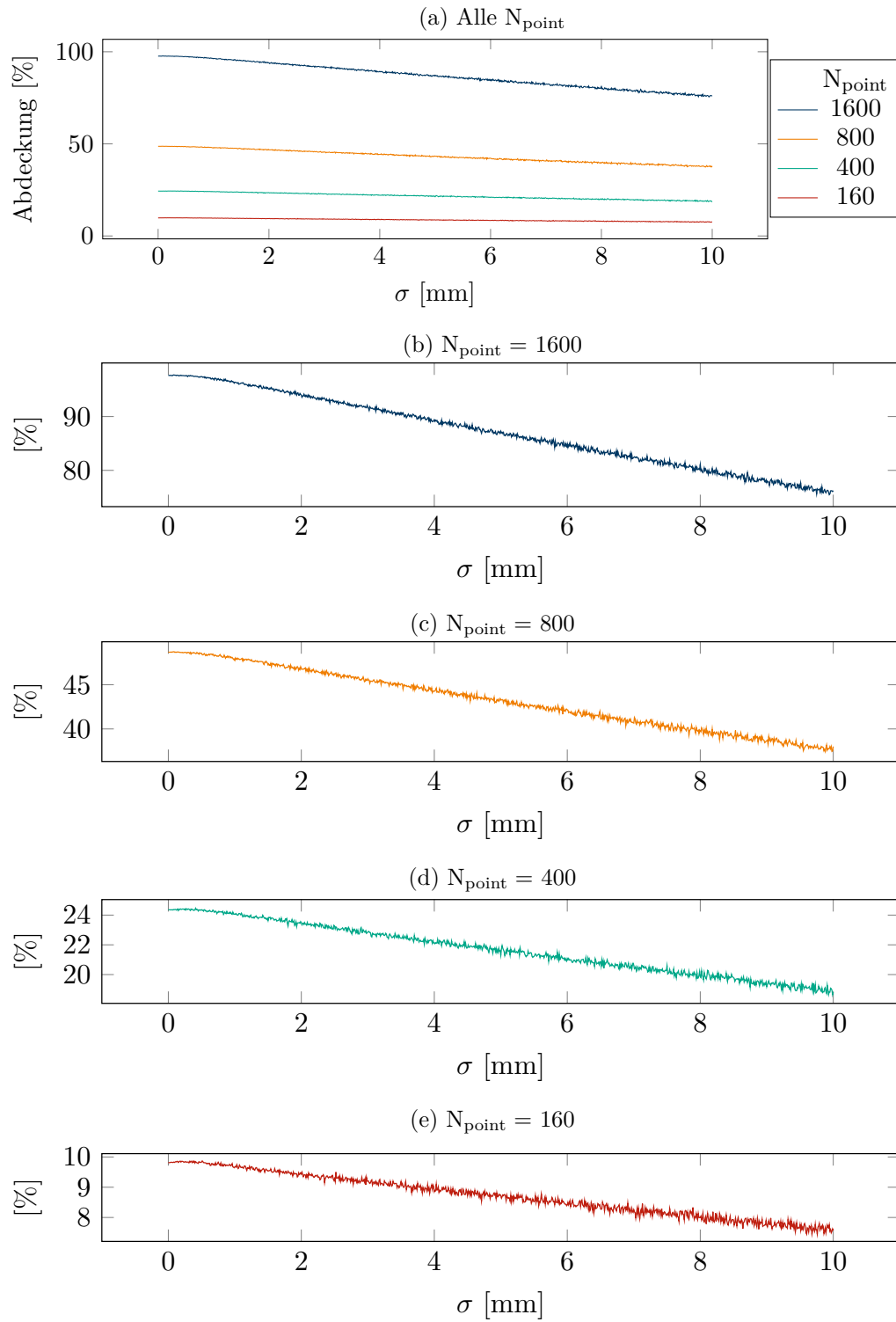


Abbildung 6.5: Relative Anzahl der Messungen (hier als Abdeckung bezeichnet), die, in Abhängigkeit von der Standardabweichung  $\sigma$  des Positionsfehlers und der Anzahl der Prüfstellen  $N_{\text{point}}$ , zur Rekonstruktion beitragen

## 6.3 Exemplarische Rekonstruktionsergebnisse

Einige Beispiele von der C-Scan Darstellung der gewonnenen Rekonstruktionsdaten werden in der Abbildung 6.6 dargestellt.

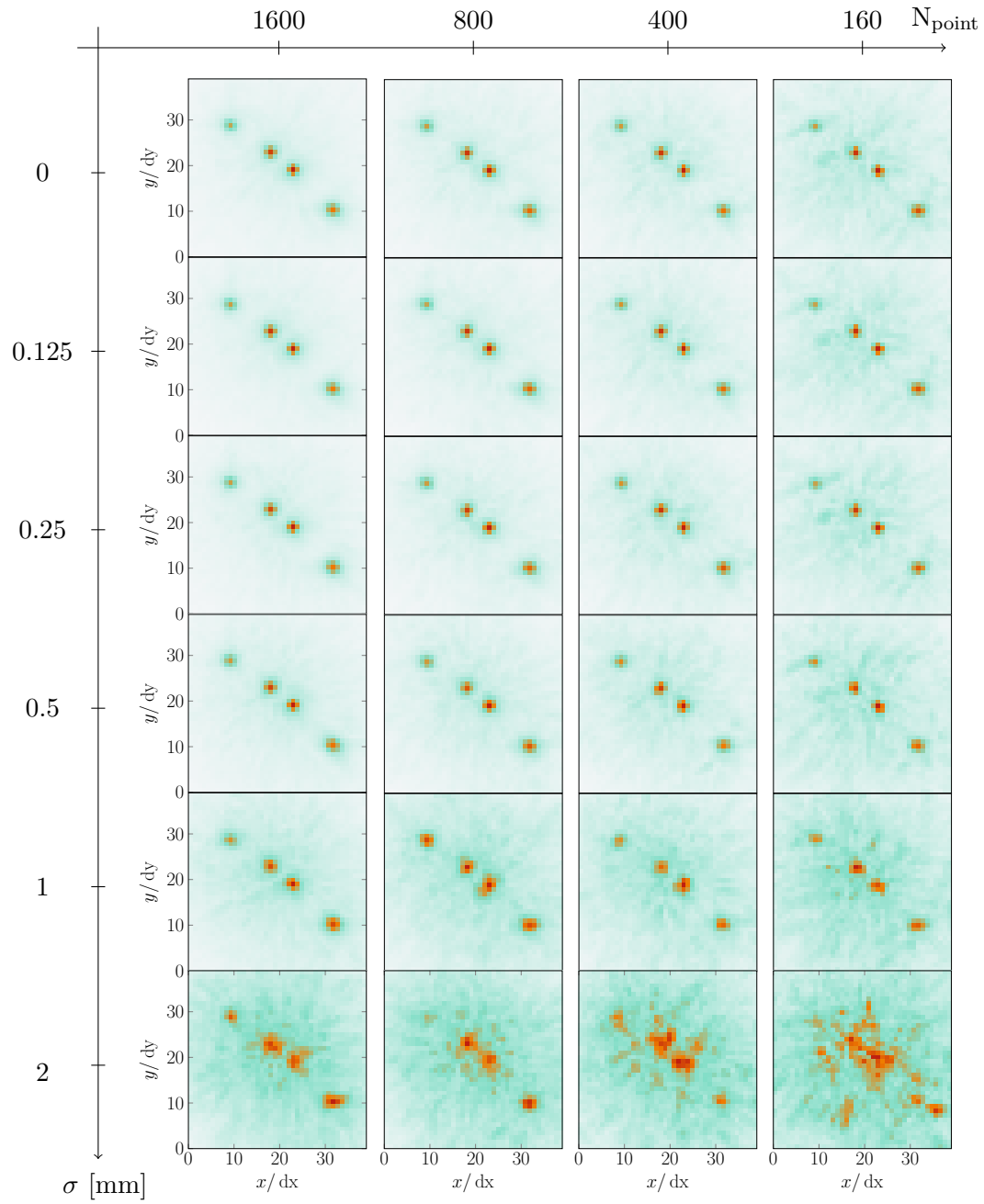


Abbildung 6.6: C-Scan-Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse für verschieden große Fehler in der Messung der Abtastposition ( $\sigma$ ) und Anzahl der aufgenommenen Messwerte ( $N_{\text{point}}$ )



## 6.4 Auswertung

Die Abbildung 6.7 stellt die modifizierten  $\text{RMSE}^\dagger$  Werte der gewonnenen Rekonstruktionsergebnissen mit der Abhängigkeit von der Standardabweichung  $\sigma$  und der Anzahl der Prüfstellen  $N_{\text{point}}$  dar. Die genauen Werte für die ausgewählten  $\sigma$  sind auch in der Tabelle 6.3 zu finden.

Bei allen  $N_{\text{point}}$  ist ein ähnlicher Verlauf über  $\sigma$  zu beobachten: der  $\text{RMSE}^\dagger$  bleibt bis  $\sigma = 0.1\lambda$  kaum verändert und ab dann fängt die Steigung an. Bis  $\sigma = \lambda$  ist die Steigung steil und danach verlangsamt sie sich. Ungefähr ab  $1.5\lambda$  nähert sich die Steigung an 0 an und es zeigt sich, dass der Kennlinienverlauf stationär wird.

Der  $\text{RMSE}^\dagger$  ist selbst mit  $\sigma = 0$ , also ohne Fehler, nicht gleich 0, da die gewonnenen Ergebnisse mit den Referenzdaten in der Abbildung 5.3c verglichen werden. Allerdings können auch die oben genannten Faktoren wie der Quantisierungsfehler oder die Verschlechterung der Abdeckung beim  $\text{RMSE}^\dagger$  von  $\sigma = 0$  beobachtet werden. Mit der  $N_{\text{point}} = 1600$  entspricht der  $\text{RMSE}^\dagger$  dem Quantisierungsfehler und der durch die fehlende Abdeckung verursachte Unterabtastung, während mit kleineren  $N_{\text{point}}$  dazu noch der Effekt der reduzierenden Abdeckung zu erkennen ist. Mit kleineren  $N_{\text{point}}$  kann der Ortsbereich nicht mehr vollständig abgetastet werden, von daher ist die dadurch resultierende Artefaktenbildung, die in der Abbildung 6.6 dargestellt ist, auch nicht vermeidbar. Aus diesen Gründen sind die Anfangswerte des  $\text{RMSE}^\dagger$ s bei dieser Simulation allgemein hoch.

Der anfänglich gleichbleibende Verlauf kann in unserem Fall so interpretiert werden, dass die positionelle Abweichung innerhalb von  $0.1\lambda$  die Messdaten kaum beeinflusst und deshalb bezüglich der Abbildungsqualität der Rekonstruktion vernachlässigbar ist.

Die Steigung des  $\text{RMSE}^\dagger$  ab  $\sigma > 0.1\lambda$  ist bei allen  $N_{\text{point}}$  zu beobachten, jedoch ist die Steigung steiler bei größeren  $N_{\text{point}}$ . Dieses Verhalten kann mit der sinkenden Abdeckung des Ortsbereiches zusammenhängen. Bei  $N_{\text{point}} = 1600$  ist die Abdeckung bei  $\sigma = 2\text{ mm}$  von ca. 98% auf 94% gesunken, während diese bei  $N_{\text{point}} = 160$  nur von 9.8% auf 9.4% abgenommen hat. Hier kann festgestellt werden, dass der Effekt der mit der Positionsabweichung reduzierenden Abdeckung auf die Abbildungsqualität der Rekonstruktion deutlich zu erkennen ist.

Durch den Vergleich von den  $\text{RMSE}^\dagger$  Werten und den C-Scans in der Abbildung 6.6 kann man feststellen, dass ein  $\text{RMSE}^\dagger$  Wert von bis zu 0.5 bei unserem Modell eine Abbildungsqualität sichert, mit der alle Streuer detektiert werden können. Hier wird das als  $\text{RMSE}_{\text{krit}}^\dagger$  benannt. Mit  $N_{\text{point}} = 160$  erreicht den  $\text{RMSE}_{\text{krit}}^\dagger = 0.5$  bereits bei  $\sigma = 0.48\text{ mm}$ , was allerdings kleiner als das Abtastintervall  $dx, dy$  in unserem Fall ist, währenddessen mit 400 Prüfstellen der  $\text{RMSE}_{\text{krit}}^\dagger$  erst bei  $\sigma = 1\text{ mm}$  überschritten wird (Tabelle 6.4). Wie die Kennlinie in Abbildung 6.7 zeigt, kann mehr örtliche Abweichung toleriert werden, wenn die Anzahl der Prüfstellen steigt, bzw. die Abdeckung des Ortsbereiches verbessert wird.

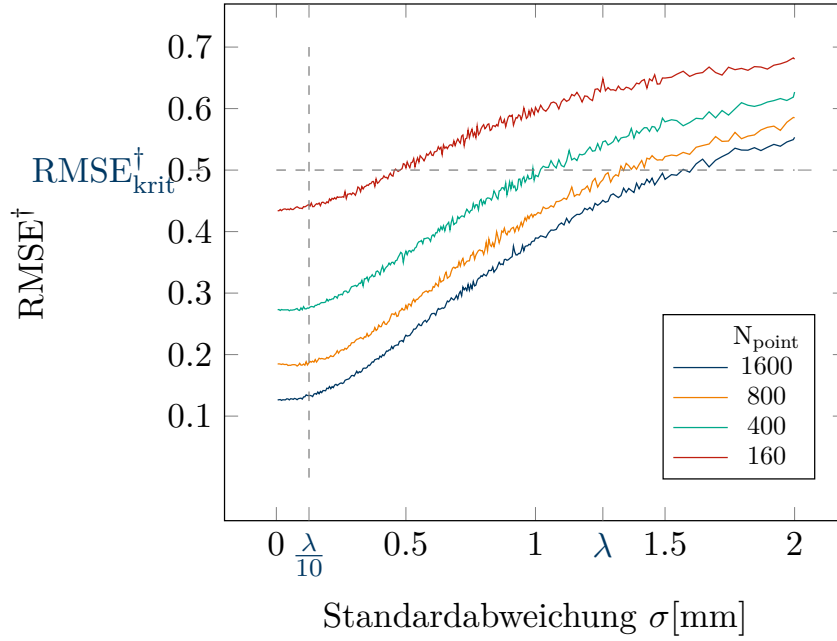


Abbildung 6.7: Verlauf des  $\text{RMSE}^\dagger$  in Abhängigkeit der Standardabweichung  $\sigma$  des Positionsfehlers sowie der Anzahl der Prüfpositionen  $N_{\text{point}}$

$N_{\text{point}}$	$\sigma$ [mm]				$[\lambda]$			
	0	$\frac{\lambda}{10}$	0.25	0.5	1	$\lambda$	1.5	2
1600	0.125	0.133	0.154	0.232	0.39	0.451	0.485	0.553
800	0.184	0.186	0.207	0.28	0.427	0.484	0.522	0.63
400	0.272	0.275	0.298	0.368	0.492	0.546	0.578	0.63
160	0.434	0.44	0.456	0.5	0.602	0.65	0.65	0.68

Tabelle 6.3: Gegenüberstellung von modifizierten Root Mean Square Error ( $\text{RMSE}^\dagger$ ), Standardabweichung des Positionsfehlers  $\sigma$  sowie Anzahl der Prüfpositionen  $N_{\text{point}}$

$N_{\text{point}}$	1600	800	400	160
$\sigma$ [mm]	1.62	1.35	1.02	0.48

Tabelle 6.4: Standardabweichung in Abhängigkeit von der Anzahl der einfließenden Prüfpositionen, für die  $\text{RMSE}^\dagger_{\text{krit}}$  erreicht wird

## 7 Laufzeitänderung

In diesem Kapitel wird der Effekt der durch händische Ankopplung verursachten Laufzeitänderung auf die Rekonstruktionsqualität untersucht und diskutiert.

Herkömmlicherweise werden Messdaten, die in weiteren Schritten mit SAFT verarbeitet werden, maschinell in Wasserankopplung aufgenommen. Damit ist der Abstand zwischen dem Prüfkopf und der Testkörperoberfläche überall innerhalb des Ortsbereiches gleich und die Phase der eingefügten Welle bleibt konstant. Bei unserem Simulationsmodell der händischen Messaufnahme hat der Prüfkopf einen direkten Kontakt mit dem Testkörper über das Kopplungsmittel, das allerdings den Anpressdruck variabel lässt. Wir nehmen an, dass sich mit variierendem Anpressdruck oder Verkopplung des Prüfkopfs der Abstand zwischen dem Prüfkopf und der Oberfläche des Testkörpers ändert. Dieser Effekt wird hier als reine Laufzeitänderung bzw. Zeitverschiebung des Signals simuliert. Das bedeutet, dass die vertikale Abstandsänderung  $\Delta z$  genau der Zeitverschiebung des Signals entspricht.

In dieser Arbeit wurde eine Simulation für die Überprüfung dieses Effektes durchgeführt. Das Simulationsprinzip und der Simulationsaufbau sind im Teil 7.1 zu finden. Die erhaltenen Rekonstruktionsergebnisse werden im Teil 7.2 dargestellt. Schließlich wird im Teil 7.3 das Ergebnis mit MSE ausgewertet und diskutiert.

### 7.1 Simulationsprinzip und -aufbau

Bei dieser Simulation wurden die Prüfpositionen auf den äquidistanten Messraster gelegt, so dass der Einfluss der Laufzeitänderung auf die Rekonstruktion abgekoppelt von anderen Fehlerquellen, wie der Unterabtastung, untersucht werden kann. Das in dieser Simulation verwendete Messraster beträgt 0.5 mm für  $x$  und  $y$ , wie bei der Referenzdatengenerierung 5.3 (Tabelle 5.2). Die Laufzeitänderung kann in unserem Fall als Prüfung vom Testkörper mit einer nicht flachen Oberfläche betrachtet werden. Dementsprechend kann der Ablauf der Messung folgendermaßen beschrieben werden:

1. Der Prüfkopf wird auf eine Prüfposition  $(k \cdot dx, l \cdot dy)$  gestellt und diese wird im System gespeichert ( $k, l \in \mathbb{N}$ )
2. An der Prüfstelle wird der Abstand zwischen Oberfläche des Testobjektes und dem Prüfkopf durch einen starken Anpressdruck um  $|\Delta z_{p_{kl}}|$  verkürzt, d.h. die eigentliche Prüfstelle ist  $(k \cdot dx, l \cdot dy, \Delta z_{p_{kl}}) = (k \cdot dx, l \cdot dy, -|\Delta z_{p_{kl}}|)$
3. A-Scan  $a_{kl}$  wird an der Stelle  $(k \cdot dx, l \cdot dy, \Delta z_{p_{kl}})$  aufgenommen

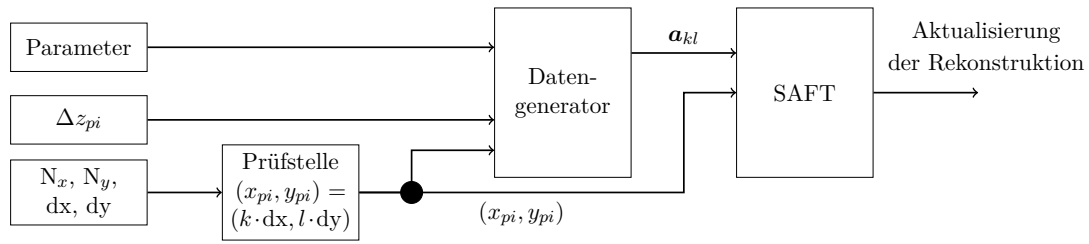


Abbildung 7.1: Blockdiagramm des Simulationsverlaufes

4. Das System betrachtet allerdings die Prüfposition als  $(k \cdot dx, l \cdot dy, 0)$  und speichert diese Information
5. Mit der Ortsinformation  $(k \cdot dx, l \cdot dy, 0)$  und  $\mathbf{a}_{kl}$  wird die Rekonstruktion durchgeführt
6. Rekonstruktion wird aktualisiert

Dieser Verlauf wurde in Abbildung 7.1 dargestellt.

Die Manipulation der Oberflächenhöhe wurde durch die Datengenerierung mit der zusätzlichen Positionsinformation des Prüfkopfes  $\Delta z_p$  ermöglicht. Das bedeutet, dass in dieser Simulation jede Prüfposition die Information der  $x$ ,  $y$  und  $z$  Achse als  $(x_{pi}, y_{pi}, \Delta z_{pi})$  mit  $0 \leq i < N_x N_y = 1600$  besitzt. Die Variable  $\Delta z_p$  wird normalverteilt generiert und die Standardabweichung  $\sigma$  wird als Parameter für die Simulationen verwendet. Bei unserem Modell wird die Tiefe des Fokusbereiches von SAFT lediglich durch den Öffnungswinkel entschieden. Es wird erwartet, dass die Laufzeitänderung die longitudinale Auflösung beeinflusst, von daher wurde der Öffnungswinkel des Prüfkopfs auch in dieser Simulation variiert. Die Werte dieser Parameter sind in der Tabelle 7.1 zu finden.

	Parameter	Werte
Konstant	Prüfposition	auf dem Abtastraster
	dx	0.5 mm
	$N_x = N_y$	40
	Durchführung der Simulation pro $\sigma$	10
Variabel	Vertikale Abstandsabweichung ( $\sigma$ )	0...0.3 mm
	Öffnungswinkel	20°, 15°, 10°

Tabelle 7.1: Parameter bei der Simulation der Laufzeitänderung

## 7.2 Exemplarische Rekonstruktionsergebnisse

Einige Beispiele C-Scans für die Darstellung der gewonnenen Rekonstruktionsdaten werden in der Abbildung 7.2 präsentiert. Mit der größeren Abweichung des Abstandes zwischen dem Prüfkopf und dem Testkörper wird die laterale Auflösung der gewonnenen Rekonstruktion erheblich verschlechtert, so dass die Trennung der Streuer kaum möglich ist.

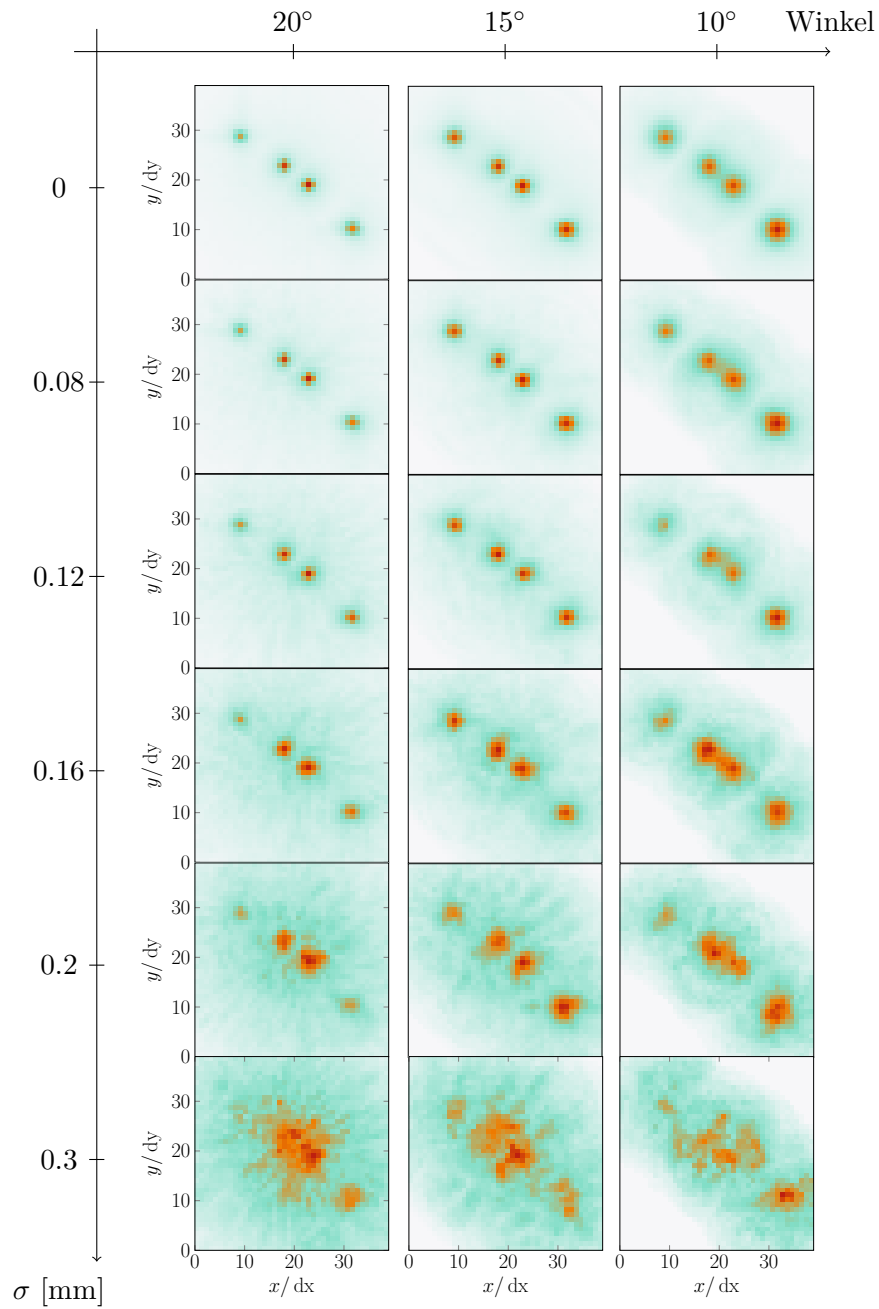


Abbildung 7.2: C-Scan-Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse bei Variation der Laufzeit, dargestellt als Abhängigkeit von der Standardabweichung  $\sigma$  des Abstands vom Prüfkopf zur Oberfläche des Testkörpers, sowie Variation des Öffnungswinkels des Prüfkopfes

## 7.3 Auswertung

Die Abbildung 7.3 präsentiert die modifizierten  $\text{RMSE}^\dagger$  Werte der Rekonstruktionsergebnisse mit der Abhängigkeit von der Standardabweichung  $\sigma$  des Abstandes zwischen dem Prüfkopf und dem Testkörper sowie dem Öffnungswinkel des Prüfkopfes. Auch hier können die genauen Werte in der Tabelle 7.2 gefunden werden.

Der allgemeine Verlauf des modifizierten  $\text{RMSE}^\dagger$ s ist folgender: der modifizierte  $\text{RMSE}^\dagger$  Wert nimmt langsam zu bevor die Steigung zwischen  $\sigma = \text{ca. } 0.04...0.08 \text{ mm}$  (entspricht  $0.032\lambda$  bis  $0.063\lambda$ ) steiler wird. Der  $\text{RMSE}^\dagger$  wächst stetig weiter bis  $\sigma \approx 0.2 \text{ mm}$ , wo der  $\text{RMSE}^\dagger$  den kritischen Punkt ( $\text{RMSE}_{\text{krit}}^\dagger = 0.5$ ) erreicht. Danach wird die Steigung langsamer mit der Andeutung, dass die Kennlinie bald die Sättigung erreichen wird.

Da diese Messsimulation auf dem äquidistanten Raster durchgeführt wurde, wurde bei  $\sigma = 0$ , das bedeutet ohne Laufzeitänderung, die gleichen Ergebnisse wie bei den Referenzdaten gewonnen 5.3. Daraus lässt sich schließen, dass die  $\text{RMSE}^\dagger$  Werte hier die numerische Evaluierung vom Einfluss des Öffnungswinkels auf die Rekonstruktion sind. Da der Öffnungswinkel von  $20^\circ$  für unser Simulationsmodell die beste Abbildungsqualität liefert, sind deren Anfangswerte am kleinsten.

Bis ungefähr  $\sigma \approx 0.063\lambda$  bleibt der  $\text{RMSE}^\dagger$  Verlauf bei dem Öffnungswinkel von  $15^\circ$  und  $10^\circ$  unverändert und ab dann fängt die Steigung an. Währenddessen nimmt der  $\text{RMSE}^\dagger$  bei einem Öffnungswinkel von  $20^\circ$  bis  $\sigma = 0.032\lambda$  langsam zu und ab  $\sigma = 0.032\lambda$  ist die Steigung steiler. Wie allerdings in den Abbildungen 7.2 dargestellt wird, gibt es bezüglich der Abbildungsqualität kaum Unterschiede zwischen den Rekonstruktionsergebnissen bei einem Öffnungswinkel von  $20^\circ$  mit  $\sigma = 0 \text{ mm}$  und  $\sigma = 0.063\lambda$ . Das bedeutet die Änderung des  $\text{RMSE}^\dagger$  ist so gering, dass die Abstandsänderung im Bereich von 0 bis  $2 \text{ dz}$  bezüglich der Abbildungsqualität vernachlässigt werden kann.

Im Bereich von  $\sigma = 0.032\lambda$  bis  $0.2 \text{ mm}$  steigt die Kennlinie bei allen Öffnungswinkeln. Allerdings ist die Steigung vom  $20^\circ$  Öffnungswinkel am größten und bei  $\sigma \approx 0.15 \text{ mm}$  erreicht sie den gleichen  $\text{RMSE}^\dagger$  Wert von  $15^\circ$ . Die beiden  $\text{RMSE}^\dagger$  nehmen mit einem ähnlichen Verlauf weiter zu, bevor die  $\text{RMSE}^\dagger$  Werte von allen Öffnungswinkeln bei  $\sigma \approx 0.2 \text{ mm}$  ( $\hat{=} 0.16\lambda$ ) den  $\text{RMSE}_{\text{krit}}^\dagger$  erreichen. Allerdings wird die Abbildungsqualität bei dem Öffnungswinkel von  $10^\circ$  vergleichsweise stärker beeinträchtigt als bei den anderen Öffnungswinkeln. Daraus lässt sich schließen, dass eine vertikale Abweichung von  $0.16\lambda$  toleriert werden kann, solange ein passender Öffnungswinkel bzw. eine angemessene Größe des Prüfkopfes ausgewählt wird.

Nachdem die  $\text{RMSE}^\dagger$  aller Öffnungswinkeln den  $\text{RMSE}_{\text{krit}}^\dagger$  erreicht haben, werden die Kennlinien der kleineren Öffnungswinkeln von den Linien der größeren Winkel überholt. Danach wird bei allen die Steigungen flacher. Das kann am Rauschen des Außenbereiches der ROI liegen. Wie die Abbildungen 7.2 darstellen, wird der gewonnene C-Scan vom  $20^\circ$  Öffnungswinkel mit steigenden  $\sigma$  immer mehr verrauscht, während der C-Scan von  $10^\circ$  noch den Kontrast zwischen der ROI und dem Bereich außerhalb erhält. Dieses Rauschen im Außenbereich der ROI ist bei größeren Winkeln eindeutiger (Abbildung 7.4). Das führt zu höheren  $\text{RMSE}^\dagger$  bei größeren Öffnungswinkeln am Ende der Kennlinien.

Allerdings ist auch zu beobachten, dass die C-Scan-Darstellungen mit dem gleichen

$\text{RMSE}^\dagger$  bei Positions- und Laufzeitabweichung nicht unbedingt gleiche Abbildungsqualitäten liefern. Beispielsweise hat die Abbildung 6.6 bei  $N_{\text{point}} = 160$  und  $\sigma = 1 \text{ mm}$  den  $\text{RMSE}^\dagger$  Wert von ca. 0.6, trotzdem kann man alle vier Streuer erkennen. Währenddessen beträgt der  $\text{RMSE}^\dagger$  von der Abbildung 7.2 beim Öffnungswinkel von  $10^\circ$  und  $\sigma = 0.3 \text{ mm}$  0.593, aber die Trennung der Streuer ist in diesem Bild kaum möglich. Das deutet an, dass die Laufzeitabweichung den gesamten Ortsbereich verrauscht und die laterale Auflösung der SAFT Rekonstruktion verschlechtert wird. Aus diesem Grund muss ein anderes Fehlermaß gefunden werden.

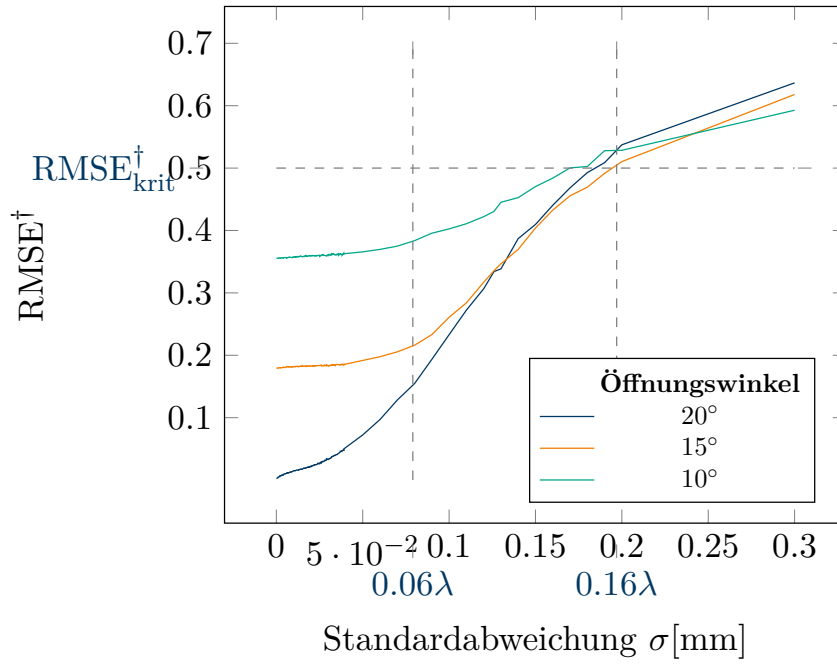


Abbildung 7.3:  $\text{RMSE}^\dagger$  in Abhängigkeit von der Standardabweichung  $\sigma$  des Abstandes des Prüfkopfes und der Oberfläche sowie des Öffnungswinkels des Prüfkopfes



Tabelle 7.2: RMSE<sup>†</sup> in Abhängigkeit von der Standardabweichung  $\sigma$  des Abstandes zwischen Prüfkopf und Oberfläche sowie dem Öffnungswinkel

	$\sigma$ [mm], [λ]							
Öffnungs- winkel	0	0.04	0.08 (0.06λ)	0.1	0.12	0.16	0.2 (0.16λ)	0.3
20°	0	0.05	0.155	0.233	0.306	0.44	0.51	0.637
15°	0.179	0.185	0.216	0.261	0.317	0.433	0.5	0.62
10°	0.356	0.363	0.384	0.403	0.422	0.484	0.53	0.593

Tabelle 7.3: Zusammenfassung der Werte der Standardabweichung  $\sigma$  des Abstandes zwischen dem Prüfkopf und der Oberfläche, für die RMSE<sup>†</sup><sub>krit</sub> erreicht wird

Öffnungswinkel	20°	15°	10°
$\sigma$ [mm]	0.19	0.2	0.17
Zeitverschiebung [ns]	60.3	63.5	54

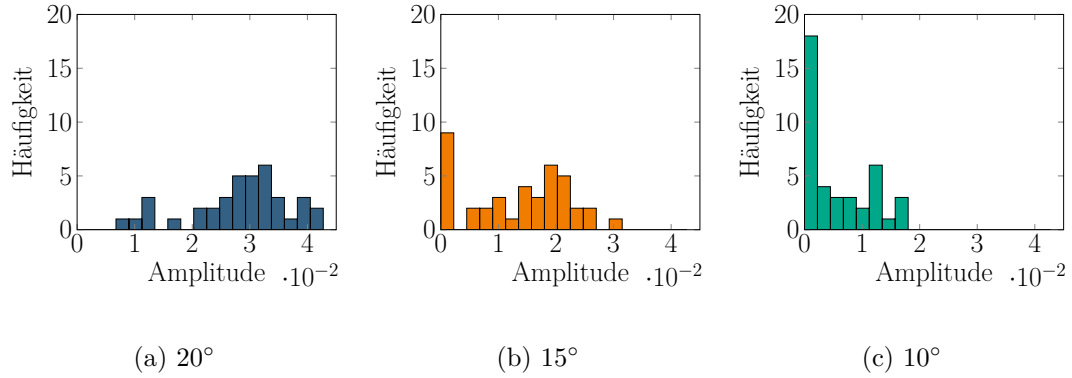


Abbildung 7.4: Histogramme der Signalamplituden der C-Scans der Rekonstruktion für  $\sigma = 0.2$  mm und  $x = 0$

# 8 Fazit und Ausblick

## 8.1 Fazit der Arbeit

In dieser Arbeit wurden mögliche Fehlerquellen bei der SAFT Rekonstruktion der handaufgenommenen Messdaten festgestellt. Darüber hinaus wurden deren Einflüsse auf die Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion untersucht, so dass Maßnahmen dafür abgeleitet werden können.

Da zugrundliegende Annahmen des SAFT Algorithmus oft für händische Messungen nicht gelten und deshalb SAFT konventionell an maschinell aufgenommenen Messdaten angewendet wird, gibt es kaum Vorarbeiten über dessen Anwendungsmöglichkeit für handaufgenommene Messdaten. Aus diesem Grund haben wir mögliche Fehlerquellen in fünf Faktoren unterteilt: grobe Abtastdichte, ungleichmäßige Verteilung der Prüfstellen, niedrige Abdeckung des Ortsbereiches, Ungenauigkeit bei der Positionsbestimmung und variierender Anpressdruck. Über die erste beide Faktoren existieren bereits Vorarbeiten, wodurch deren Effekte geschätzt werden können. Von daher wurden in dieser Arbeit andere Faktoren, wie Positionsungenauigkeiten in Abhängigkeit von Abdeckungen des Ortsbereiches sowie der variierende Anpressdruck, untersucht. Um deren Einflüsse auf die Abbildungsqualität zu evaluieren, wurden die gewonnenen Ergebnisse mit den Referenzdaten verglichen. Als Referenzdaten wurde die Abbildungsqualität der SAFT-Rekonstruktion genommen, die man mit maschinell aufgenommenen Daten erreichen würde.

Um den Effekt der Positionsungenauigkeit zu untersuchen, wurden die Messdaten an den Prüfstellen, die unabhängig vom Messraster auf dem Ortsbereich zufällig verteilt sind, synthetisch generiert. Dann wurden die Messpositionen auf dem äquidistanten Messraster quantisiert, so dass die Messdaten mit dem vorgegebenen SAFT Algorithmus verarbeitet werden können. Um die durch Positionsquantisierung hervorgerufene Überbetonung eines bestimmten Bereiches zu vermeiden, wurde die Discard Repetitions (DR) Methode verwendet. Mit dieser Methode wird nur der erste Beitrag pro Messrasterpunkt aufgenommen und alle anderen werden im System nicht mehr gespeichert. Diese Methode ist für eine Echtzeitrekonstruktion gut geeignet, da die Rechnung der Rekonstruktion damit schneller und weniger rechenaufwendig wird [18]. Durch die Simulation wurde gezeigt, dass eine Abweichung von bis zu  $0.1\lambda$  vernachlässigbar ist. Außerdem wurde auch dargestellt, dass die Abbildungsqualität der SAFT Rekonstruktion der fehlerhaften Messdaten auch durch eine höhere Abdeckung des Ortsbereiches verbessert werden kann. Beispielsweise darf bei einer 10% Abdeckung eine Abweichung von ca. 0.5 mm nicht überschritten werden, während bei einer 25% Abdeckung die doppelte Abweichung toleriert werden kann.

Bei der Untersuchung des nicht konstanten Anpressdrucks wurde die durch den variierenden Abstand zwischen dem Testkörper und dem Prüfkopf verursachte Laufzeitänderung als Fehlerquelle betrachtet. Die Messdaten wurden hier auf dem äquidistanten Messraster generiert und dasselbe Gitter wurde für die SAFT Rekonstruktion angenommen. Durch die Simulation wurde gezeigt, dass die vertikale Abstandsabweichung von ca.  $0.06\lambda$  bzw. Laufzeitänderung von 25 ns vernachlässigbar ist. Darüber hinaus kann eine Abstandsabweichung von  $0.16\lambda$  ( $\hat{=}$  62.5 ns Laufzeitänderung) toleriert werden, wenn der passende Öffnungswinkel, das bedeutet eine angemessene Größe des Prüfkopfes, für das Messszenario ausgewählt ist. Allerdings wurde gezeigt, dass bei einer größeren Laufzeitabweichung der ganze Ortsbereich verrauscht und dadurch die laterale Auflösung der SAFT Rekonstruktion erheblich beeinträchtigt wird. Durch den Vergleich der gewonnenen Ergebnisse der beiden Simulationen haben wir festgestellt, dass der gleiche RMSE<sup>†</sup> Wert nicht unbedingt die selbe Abbildungsqualität liefert. Von daher ist RMSE<sup>†</sup> nicht zur Evaluierung der Abbildungsqualität geeignet.

Durch die Simulationen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass eine gewisse Ungenauigkeit der händischen Messung bei der SAFT Rekonstruktion toleriert werden kann. Mit passenden Maßnahmen können die Einflüsse solcher Faktoren sehr gering gehalten oder sogar vernachlässigt werden. Daraus lässt sich schließen, dass wir von SAFT auch bei der Rekonstruktion handaufgenommener Messdaten profitieren können. Die gewonnenen Simulationsergebnisse können als ein Indikator verwendet werden, mit dem die Anpassung eines Messunterstützungssystems, das in dieser Arbeit betrachtet wird, einfacher durchgeführt werden kann.

## 8.2 Ausblick

Diese Arbeit hat gezeigt, dass wir von SAFT auch bei der Rekonstruktion handaufgenommener Messdaten profitieren können, wenn wir die nötigen Maßnahmen für mögliche Fehlerquelle anwenden. Das deutet darauf hin, dass dieser Themenbereich weitere Forschungsmöglichkeiten enthält, um ein Messunterstützungssystem zu entwickeln. Diese Möglichkeiten werden wie folgt aufgelistet.

**Kombinieren mehrerer Fehlerfaktoren** In dieser Arbeit werden mögliche Fehlerquellen in fünf Aspekten unterteilt und deren einzelne Effekte wurden unabhängig von den anderen Faktoren durch die Vorarbeiten oder unsere Simulationen evaluiert. Nun können diese Faktoren miteinander kombiniert werden, um eine realitätsnähere Simulation durchzuführen. Dadurch können verlässlichere Toleranzwerte für die in dieser Arbeit betrachteten Systemungenauigkeiten hergeleitet werden.

**Verwendung verschiedener Wichtungsmethoden** Um das Überbetonungsproblem zu behandeln, wurde die Take Average (TA) Methode in dieser Arbeit als Wichtungsmethode berücksichtigt. Allerdings können noch verschiedene Wichtungsmethode für den gleichen Zweck verwendet werden. Es wäre dabei aber sinnvoll, wenn die ausgewähl-

ten Wichtungsmethoden die Positionsichte eines betroffenen Bereiches widerspiegeln würde.

**Andere Fehlermaße** Für die Evaluierung der Abbildungsqualität der gewonnenen Ergebnisse wurde hier Modifizierter Root Mean Square Error ( $\text{RMSE}^\dagger$ ) wegen seiner Einfachheit und der Allgemeingültigkeit verwendet. Dennoch wurde durch die Simulationen gezeigt, dass  $\text{RMSE}^\dagger$  für die Evaluierung der Abbildungsqualität nicht unbedingt geeignet ist und deshalb ein anderes Fehlermaß erforderlich ist. Es gibt bereits verschiedene Evaluierungsmethoden für die Abbildungsqualität visualisierter Daten, beispielsweise Contrast-to-Noise Ratio (CNR) oder auch die auf Human Visual System (HVS) basierte Methode. Das Problem bei unserem Modell war, dass wir die ROI in der Abbildung schwer definieren konnten, da die Streuer im Testkörper als Punktstreuer betrachtet worden sind. In Zukunft könnte ein realistischeres Messmodell, in dem die Streuer eine begrenzte Größe besitzen, betrachtet werden, wodurch diese Methoden eine verlässlichere Evaluierung ermöglichen könnten.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Transducer beam spread. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/beamspread.htm>, 2014. Online : last accessed 09.01.2019.
- [2] Data presentation. <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm>, 2014. Online : last accessed 09.01.2019.
- [3] M Sutcliffe, M Weston, P Charlton, K Donne, B Wright, I Cooper. Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through dual-layered media. In *Insight*, volume vol 55, 2013. [https://repository.uwtsd.ac.uk/690/1/Sutcliff,%20M.et%20al..\(2013\)Full%20Matrix%20capture%20with%20time-efficient.pdf.pdf](https://repository.uwtsd.ac.uk/690/1/Sutcliff,%20M.et%20al..(2013)Full%20Matrix%20capture%20with%20time-efficient.pdf.pdf).
- [4] Fabian Krieg, Rick Pandey, Jan Kirchhof, Alexander Ihlow, Florian Römer, Giovanni del Galdo, Ahmad Osman. Progressive online 3-d saft processing by matrix structure exploitation. In *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2018.
- [5] Zhe Wang, Ximing Cui ID, Hongbao Ma, Yihua Kang, Zhiyang Deng. Effect of surface roughness on ultrasonic testing of back-surface micro-cracks. *applied science*, 2018. <https://www.ndt.net/article/ndt-review/papers/applsci-08-01233-v2.pdf>.
- [6] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung. Was ist zerstörungsfreie Prüfung? <http://www.dgzfp.de/Startseite/Wir-%C3%BCber-uns/ZfP-Einf%C3%BChrung>. Online : last accessed 09.01.2019.
- [7] Gordon Dobie. *Ultrasonic sensor platforms for non-destructive evaluation*. PhD thesis, University of Strathclyde, 2010. <https://strathprints.strath.ac.uk/59953/>.
- [8] Anton Erhard. Aufgaben und Abgrenzung der zerstörungsfreien Prüfung. In *DGZfP-Jahrestagung*, 2007. <https://www.ndt.net/article/dgzfp07/Inhalt/v11.pdf>.
- [9] Ed Ginzel. Ultrasonic inspection 2 – training for nondestructive testing – variables affecting test results. [https://www.ndt.net/article/v04n06/gin\\_ut2/gin\\_ut2.htm](https://www.ndt.net/article/v04n06/gin_ut2/gin_ut2.htm), June 1999. online : last accessed 10.01.19.
- [10] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, 1968.

- [11] Jian-Yu Lu, Hehong Zou , James F. Greenleaf. Biomedical ultrasound beam forming. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 20(5), 1994. [https://ac.els-cdn.com/0301562994900973/1-s2.0-0301562994900973-main.pdf?\\_tid=25e6c663-e68e-49ad-8aee-8865592f6e4f&acdnat=1542830295\\_e3683687e6f1c7127013757d7b3b7902](https://ac.els-cdn.com/0301562994900973/1-s2.0-0301562994900973-main.pdf?_tid=25e6c663-e68e-49ad-8aee-8865592f6e4f&acdnat=1542830295_e3683687e6f1c7127013757d7b3b7902).
- [12] J. Vrana H. Mooshofer. Optimization of the inspection duration for saft. In *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2016.
- [13] Mordor Intelligence. Global non-destructive testing market. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-non-destructive-testing-market-industry>, May 2018. Online : last accessed 09.01.2019.
- [14] Fabian Krieg. Advanced image reconstruction techniques for ultrasonic imaging applications. Master’s thesis, Technische Universität Ilmenau, 2015.
- [15] Fredrik Lingvall. *Time-domain Reconstruction Methods for Ultrasonic Array Imaging*. PhD thesis, Uppsala University, 2004. [http://www.signal.uu.se/Publications/pdf/fredrik\\_thesis.pdf](http://www.signal.uu.se/Publications/pdf/fredrik_thesis.pdf).
- [16] Tadeusz Stepinski, Fredrik Lingvall. Synthetic aperture focusing techniques for ultrasonic imaging of solid objects. In *EUSAR*, 2010.
- [17] Polymer Service GmbH Merseburg. Ultraschall-Normal-Prüfköpfe. <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Ultraschall-Normal-Pr%C3%BCfk%C3%B6pfe>, Dezember 2018. Online last accessed : 24.12.2018.
- [18] F. Krieg, S. Lugin, J. Kirchhof, A. Ihlow, T. Schwender, G. Del Galdo, F. Römer, A. Osman. Saft processing for manually acquired ultrasonic measurement data with 3d smartinspect. In *SHM-NDT*, 2018.
- [19] J. Saniie R. Demirli. Asymmetric gaussian chirplet model for ultrasonic echo analysis. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2010.
- [20] K. Mayer, M. Ibrahim, M. Krause, M. Schubert. Requirements for a small size ultrasonic imaging system for inspection of concrete elements. In *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2016.
- [21] Sonatest. Transducer catalogue. <http://www.grimas.hu/wp-content/uploads/2014/03/Transducers.pdf>, 2014. Online : last accessed November 2018.
- [22] Fredrik Lingvall, Tomas Olofsson, Tadeusz Stepinski. Synthetic aperture imaging using sources with finite aperture: Deconvolution of the spatial impulse response. *Acoustical Society of America*, pages p.225–234, July 2003.
- [23] Daniel Benstock, Frederic Cegla, Mark Stone. The influence of surface roughness on ultrasonic thickness measurements. *Acoustic Society of America*, 2014. <https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/1.4900565>.

- [24] Institut für Werkstofftechnik Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Versuchsanleitung Ultraschallprüfung 1. <https://www.tu-ilmenau.de/wt/lehre/praktika/weitere-studiengaenge-wintersemester/>, 2018. Online : last accessed 03.01.2019.
- [25] Baldev Raj, T. Jayakumar, M. Thavasimuthu. *Practical Non-destructive Testing*. Woodhead Publishing Ltd., 1987.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Messaufbau . . . . .	3
2.1	Puls-Echo-Verfahren . . . . .	5
2.2	A-Scan und B-Scan Darstellung . . . . .	5
2.3	Synthetische Aperture . . . . .	6
2.4	SAFT Superposition . . . . .	7
2.5	SAFT Matrix-Vektor Produkt . . . . .	10
4.1	Unterschied zwischen automatischer und händischer Messung . . . . .	16
5.1	Lage der simulierten Punktstreuer . . . . .	24
5.2	Pulsform des Gabor Modells . . . . .	24
5.3	Referenzdaten . . . . .	25
6.1	Prüfstellen für unterschiedliche $N_{\text{point}}$ . . . . .	27
6.2	Blockdiagramm des Simulationsverlaufes . . . . .	27
6.3	C-Scan Darstellung mit 2 Quantisierungsmethoden . . . . .	30
6.4	Abhängigkeit der Abbildungsqualität von der Anzahl der Prüfstellen . . . . .	31
6.5	Abdeckung des Ortsbereiches . . . . .	32
6.6	C-Scan-Darstellung mit Positionsabweichungen . . . . .	34
6.7	$\text{RMSE}_{\text{krit}}^{\dagger}$ Auswertung des Positionsfehlers . . . . .	36
7.1	Blockdiagramm des Simulationsverlaufes . . . . .	38
7.2	C-Scan-Darstellung mit Laufzeitänderungen . . . . .	40
7.3	$\text{RMSE}_{\text{krit}}^{\dagger}$ Auswertung der Laufzeitänderung . . . . .	42
7.4	Histogrammen im Außenbereich der ROI . . . . .	43



# Tabellenverzeichnis

4.1	Unterschieden zwischen einer automatischen und handaufgenommenen Messung . . . . .	17
5.1	UP Modellannahmen in den Simulationen . . . . .	22
5.2	Konstante Parameter . . . . .	23
6.1	Bezeichnungen für die Prüfpositionen . . . . .	28
6.2	Parameter bei der Simulation der Positionsungenauigkeit . . . . .	28
6.3	$\text{RMSE}_{\text{krit}}^{\dagger}$ Werte mit variierender Positionsungenauigkeit . . . . .	36
6.4	Standardabweichung für $\text{RMSE}_{\text{krit}}^{\dagger}$ bei unterschiedlicher Anzahl der Prüfstellen . . . . .	36
7.1	Parameter bei der Simulation der Laufzeitänderung . . . . .	38
7.2	$\text{RMSE}_{\text{krit}}^{\dagger}$ Werte mit variierender Laufzeitänderung . . . . .	43
7.3	Standardabweichung für $\text{RMSE}_{\text{krit}}^{\dagger}$ bei unterschiedlichen Öffnungswinkeln . . . . .	43
.1	Literaturrecherche : SAFT und handaufgenommene Daten . . . . .	54
.2	Literaturrecherche : SAFT und Fehlerquellen . . . . .	54

# Glossar

**A-Scan** ein Oszillogramm, das an einer Prüfposition aufgenommen wird und in dem die einzelnen Echos über einer Zeitachse dargestellt sind [24]. 5, 8–10, 14, 18, 19, 21, 26–30, 37

**B-Scan** eine Profildarstellung des Testkörpers, wobei die ToF der akustischen Energie entlang der vertikalen Achse dargestellt und die Prüfpositionen entlang der horizontalen Achse präsentiert sind [2]. 5, 25

**C-Scan** Draufsicht von 3D Daten, wobei die relative Signalamplitude oder die ToF Werte bei jeder Prüfposition durch die Farbenintensität dargestellt sind [2]. In dieser Arbeit wird die C-Scan Darstellung für die Visualisierung der Daten verwendet, da sich dadurch 3D Daten in eine 2D Darstellung transformieren lassen. 25, 30, 31, 33–35, 39–41, 43, 52

**DAS** Delay and sum, Zeitbereich Rekonstruktions Algorithmus, (siehe Teil 2.2). 6

**DR** Discard Repetitions, Quantisierungsmethode, die nur einen Beitrag für einen Rasterpunkt nimmt und alle anderen ignoriert (siehe Teil 6.1.3). 29, 30, 44

**Normal-Prüfkopf** ein Ultraschall Prüfkopf, der im Wesentlichen aus einem piezoelektrischen Schwinger, der infolge der elektrischen Anregung durch Spannungsimpulse mechanische Spannungswellen und damit Longitudinalwellen erzeugt, besteht [17]. 2

**Puls-Echo-Verfahren** Ein Prüfungsverfahren mit Ultraschall, wobei der in den Testkörper eingefügte Ultraschall von einem Prüfkopf gesendet und die reflektierte Welle vom gleichen Kopf empfangen wird. Die Welle wird oft senkrecht in das Testobjekt eingestrahlt (Siehe Teil 2.1.3). 2, 4, 5, 21, 22

**TA** Take Average, Quantisierungsmethode, die den Mittelwert aller Beiträge für den selben Rasterpunkt nimmt (siehe Teil 6.1.3). 29, 30, 45

**TFM** Total Focusing Method, eine Rekonstruktionsmethode, die auf dem gleichen Grundprinzip wie SAFT basiert. TFM wird für Messdaten angewendet, die mit mehreren Transducerelementen auf einmal aufgenommen werden. 19

# Akronyme

**CNR** Contrast-to-Noise Ratio. 46

**HVS** Human Visual System. 46

**MSE** Mean Square Error. 4, 11, 12, 37

**RMSE** Root Mean Square Error. 11, 12

**RMSE<sup>†</sup>** Modifizierter Root Mean Square Error. 4, 11–13, 26, 35, 36, 41–43, 45, 46, 53

**RMSE<sup>†</sup><sub>krit</sub>** Kritischer Wert für Modifizierten Root Mean Square Error (RMSE<sup>†</sup>). 35, 41

**ROI** Region of Interest. 7, 8, 25, 41, 46

**SAFT** Synthetic Aperture Focusing Technique. 2–4, 6–11, 14, 15, 18–20, 23, 25, 26, 28–30, 38, 42, 44, 45, 52, 54

**SAR** Synthetic Aperture Radar. 6

**SHM** Structural Health Monitoring. 1

**ToF** Laufzeit bzw. Time-of-Flight. 9, 52

**UP** Ultraschallprüfung. 1–7, 19, 22, 51

**ZfP** Zerstörungsfreie Prüfung. 1

# Anhang

## Stichwörter Literaturrecherche

Suchbegriffe (bezüglich SAFT und händische Datenaufnahme)	Treffer	Relevanz
ultrasonic "NDT" "SAFT" "arbitrary scan"	7	-
ultrasonic "NDT" "SAFT" "random scan"	9	-
ultrasonic "NDT" "SAFT" "gridless"	14	-
ultrasonic "NDT" "SAFT" "manual scan"	23	-
ultrasonic "NDT" "SAFT" "manual measurement"	28	-
ultrasonic "NDT" "SAFT" "handheld device"	56	-
ultrasonic "synthetic aperture focusing technique" "freehand"	343	-
ultrasonic synthetic aperture focusing technique "arbitrary sampling"	348	-

Tabelle .1: Überblick über die zur Literaturrecherche bezüglich Vorarbeiten zu SAFT für handaufgenommene Daten verwendeten Stichwörter und Treffer

Suchbegriffe (bezüglich SAFT und Fehlerquellen)	Treffer	Relevanz
ultrasonic NDT "SAFT" "minimum data size"	0	-
ultrasonic NDT "SAFT" "scan position error"	0	-
ultrasonic NDT "SAFT" "positional inaccuracy"	2	-
ultrasonic NDT "SAFT" "course surface"	6	-
ultrasonic NDT "SAFT" "inconsistent time"	6	-
ultrasonic NDT "SAFT" "positional error"	17	1 [7]
ultrasonic NDT "SAFT" "non planar surface"	24	1 [3]
ultrasonic "NDT" "SAFT" "grid size"	160	1 [12]
ultrasonic NDT "SAFT" "position error"	226	-
ultrasonic "NDT" "SAFT" "small size"	3300	1 [20] (bis zu den ersten 100)

Tabelle .2: Überblick über die zur Literaturrecherche bezüglich einzelner Fehlerquellen für die SAFT-Rekonstruktion verwendeten Stichwörter und Treffer

# Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbstständig durchgeführt und abgefasst habe. Quellen, Literatur und Hilfsmittel, die von mir genutzt wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Ilmenau, 16.01.2019

---

Sayako Koderä

---