

Optimierung der Lokalisierungsgüte bildgebender Ultraschallsysteme

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Wei Yap Tan, M.Sc.
aus Johor, Malaysia

Tag der mündlichen Prüfung:	10. Juli 2018
Referent:	Prof. Dr. Marc Weber
Korreferent:	Prof. Dr. Wilhelm Stork



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Kurzfassung

Ultraschall wird heutzutage als bildgebendes Messverfahren in der Medizintechnik und in der Industrie breit eingesetzt. Im Vergleich zu optischen Systemen ist Ultraschall unempfindlich gegen Farbunterschiede und optische Reflexionseigenschaften der abzubildenden Objekte. Zusätzlich können Abstände

direkt gemessen werden. Jedoch ist die Lokalisierungsgüte, z.B. der Kontrast, die Punktspreizfunktion (PSF) und gegebenenfalls die Bildartefakte, stark abhängig von der Güte der Laufzeitdetektion und der Kenntnis der zurückgelegten Wege. Mit der zunehmenden Systemkomplexität wie zum Beispiel den mehr als 2000 Ultraschallwandlern in dem Prototypen für 3D Ultraschall-Computertomographie (USCT) am KIT lassen sich Ultraschallsysteme bisher nicht automatisch kalibrieren. Dies stellt eine wesentliche Limitierung für weitere Verbesserung der Lokalisierungsgüte dar.

In dieser Doktorarbeit werden erstmals allgemein einsetzbare Verfahren zur Optimierung der Lokalisierungsgüte von Ultraschallsystemen unterschiedlicher Komplexität entwickelt. Die Optimierung der Lokalisierungsgüte wird durch die Identifikation, Kalibration und Kompensation von möglichen Fehlerquellen durchgeführt. Weiterhin wird die Lokalisierungsgüte durch eine Optimierung der Wandleranordnung für eine bessere Abdeckung des Messbereiches (*engl.: Region-of-Interest (ROI)*) und eine gleichmäßigere Verteilung der Systemleistung verbessert. Es wurden zwei Ansätze entwickelt: ein Selbstkalibrierungsverfahren und ein Verfahren zur Optimierung der Wandleranordnung.

Die Selbstkalibrierung benutzt die Schalllaufzeiten zwischen den Sender-Empfänger-Kombinationen (SEK) in einer Leermessung, um mögliche Feh-

lerquellen zu kalibrieren. Das Verfahren verbessert gängige Standardverfahren in zwei Hauptaspekten. Zum einen erlaubt es zum ersten Mal eine Kalibrierung trotz inhomogener Schallgeschwindigkeitsverteilung im Medium. Zum anderen werden durch sequentielle Kalibrierung der Fehlerquellen priorisiert nach ihrer Größenordnung der Speicherbedarf für komplexe Systeme stark reduziert. Gleichzeitig werden meßfehlerbehafteten Daten mit einer statistischen Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Verzerrung einzelner SEK detektiert und reduziert.

Das Verfahren erlaubt erstmalig die komplette automatische Kalibrierung des 3D-USCT-Prototypen. Nach der Kalibrierung konnte mit einem Drahtphantom die theoretisch berechnete Halbwertsbreite des Geräts von 0,22 mm gemessen werden. Durch die automatische Detektion fehlerhafter Daten können Bildartefakte in dem Schallgeschwindigkeitsbildern erfolgreich vermieden werden. Außerdem wurde eine Methode zur Vorhersage der Genauigkeitsgrenzen der Kalibrierung basierend auf der Konditionszahl des aufgestellten Gleichungssystems entwickelt. Diese ermöglicht zum ersten Mal die Festlegung einer realistischen Fertigungstoleranz zukünftiger Ultraschallsysteme in der USCT.

Das Ziel des Optimierungsverfahrens ist es, eine Wandleranordnung für eine gegebene ROI mit einer gegebenen Anzahl von Wandlern zu optimieren. Die Lokalisierungsgüte wird durch die Gütemaße: gleichmäßige ROI-Abdeckung, garantierte Objektdetektion und die räumliche Homogenität der Streuung der Positionsgenauigkeit (*engl.: dilution of precision*) und der Punktspreizfunktion (PSF) beschrieben. Die Optimierung erlaubt im Gegensatz zu den Standardverfahren die Detektion von Objekten über den vollen Winkelbereich, die Optimierung der Kalibrierbarkeit des Systems und mit der einzigartigen Beschreibung der Ultraschallwandlern mit Polygonen die Beachtung vorgegebener Hindernisse und beliebiger ROI-Geometrien.

Die Optimierungsverfahren wurde neben dem 3D-USCT-Gerät erfolgreich mit zwei Ultraschallsystemen unterschiedlicher Komplexität getestet: mit einem Ultraschallarray zur Abstandsmessung mit fünf Wandlern

unter extremen Temperaturbedingungen und einem weltweit ersten bildgebendem 2D-Luftultraschallsystem mit sechzehn Wandlern. Eine Anpassung der Selbstkalibrierung für das Luftultraschallarray unter extremer Temperaturbedingung verbessert die Messgenauigkeit von 9,8 mm auf 1,8 mm für Messungen der Auftragshöhe von heißem Asphalt. Das entwickelte Verfahren zur Objekterkennung, Lokalisierung und Klassifizierung mit dem bildgebenden Luftultraschallsystem für industrienahen Anwendungen zeigt eine gesamte Klassifizierungsgenauigkeit von 88,9 % und eine Positionierungsgenauigkeit von 5 mm im Vergleich zur gemessenen Systemauflösung von 1,4 cm.

Die entwickelten Verfahren ermöglichen unter der Berücksichtigung von Umwelteinflüssen die Selbstkalibrierung komplexer Ultraschallsysteme mit einer Genauigkeit besser als ein Viertel der Wellenlänge und eine optimierte Wandleranordnung für beliebige ROI-Geometrien.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
1.1	Einsatzbereiche von Ultraschall	2
1.2	Beiträge dieser Arbeit	5
2	Grundlagen	7
2.1	Ultraschall	7
2.1.1	Reflexion	7
2.1.2	Dämpfung	8
2.1.3	Schallgeschwindigkeit und Abstandsmessung	9
2.2	Bildgebende Ultraschallverfahren	12
2.2.1	Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)	18
2.2.2	Gratinglobe-Unterdrückung mit gleitendem Median	21
2.3	Lokalisierungsgüte	23
2.3.1	Einflussfaktoren auf die Lokalisierungsgüte	23
2.3.2	Ansätze zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte	31
2.4	Lösen von nichtlinearen Gleichungssystemen	32
2.4.1	Newton-Verfahren	33
2.4.2	Levenberg-Marquardt-Algorithmus	35
2.4.3	Trust-Region-Verfahren	36
2.4.4	Innere-Punkte-Verfahren	37
2.5	Lösen von linearen Gleichungssystemen	39
2.5.1	Methode der kleinsten Quadrate	40
2.5.2	Tikhonov-Regularisierung	41
3	Betrachtete Anwendungsbeispiele	43

3.1	3D-USCT-II	43
3.2	Luftultraschallarray unter extremen Temperaturbedingungen	46
3.3	Bildgebendes Luftultraschallsystem (ABUS)	49
4	Selbstkalibrierung	51
4.1	Stand der Technik	51
4.1.1	Kalibrierung des 3D-USCT-I-Systems	51
4.1.2	Kalibrierung eines Ring-Ultraschallarrays	54
4.1.3	Kalibrierung des MUBI-Systems	58
4.1.4	Zusammenfassung der betrachteten Kalibrierungs- verfahren	62
4.2	Laufzeitdetektion	64
4.2.1	Detektion mit einfachem Schwellwertverfahren	65
4.2.2	Constant Fraction Discriminator	67
4.2.3	Cepstrum-Analyse	68
4.2.4	Matched-Filter	70
4.2.5	Vergleich des SNR der Detektionsmethoden	73
4.2.6	Vergleich der Detektionsmethoden über Empfangs- winkel	76
4.2.7	Anpassung des Matched-Filters an dem Abstrahl- und Empfangswinkel	78
4.3	Schallgeschwindigkeit in inhomogenem Medium	82
4.4	Kalibrierungsmethode	84
4.4.1	Positionskalibrierung	85
4.4.2	Temperaturkalibrierung	85
4.4.3	Verzögerungskalibrierung	87
4.4.4	Vorfilterung der TOF-Messungen	89
4.4.5	Verschiebungs- und Rotationserkennung	90
4.5	Voraussage der Grenzen der Kalibrierungsgenauigkeit	93
4.5.1	Fehlerfortpflanzung im Gleichungssystem	94
4.5.2	Residuum der Kalibrierung	95

4.5.3	Kalibrierungsgenauigkeit	96
4.5.4	Untersuchung am Beispiel vom 3D-USCT-II	98
4.6	Fazit	101
5	Optimierung der Wandleranordnung	103
5.1	Stand der Technik	103
5.1.1	Optimierung eines gerichteten Sensornetzwerks	103
5.1.2	Optimierung des 3D-USCT-II-Geräts	105
5.1.3	Allgemeine Anwendbarkeit auf beliebigen Geometrien	106
5.2	Optimierungsverfahren	107
5.2.1	Systemdefinition	107
5.2.2	Abschattung der Wandler	109
5.2.3	Kostenfunktionen	111
5.2.4	Gleichungssystem	122
5.3	Beispielentwurf	123
5.4	Anzahl der benötigten Wandler	127
5.5	Allgemeine ROIs	132
5.6	Erweiterung für 3D-Systeme	134
6	Resultate	137
6.1	Kalibrierung des 3D-USCT-II-Geräts	137
6.1.1	Anwendung auf simulierten Daten	137
6.1.2	Maximale Fertigungstoleranz	140
6.1.3	Unterdrückung der Artefakte im SOS- und Dämpfungsbild	143
6.1.4	Verzögerung im 3D-USCT-II-Gerät	147
6.1.5	Fokussierung des Reflexionsbildes	150
6.1.6	Positionskalibrierung	152
6.1.7	Evaluierung mit einem Kalibrierungsobjekt	154
6.2	Kalibrierung des bildgebenden Luftultraschallsystems	157

6.2.1	Kalibrierung der relativen Positionen zwischen den Wandler	158
6.2.2	Kalibrierung des Ursprungs des Koordinatensystems	162
6.3	Verbesserung der Bildgebung mit SAFT für ein bildgebendes Luftultraschallsystem	164
7	Industriennahe Anwendungen der entwickelten Methoden	171
7.1	Luftultraschall-Array unter extremer Temperaturbedingung .	171
7.1.1	Verfahren	171
7.1.2	Simulationen und Ergebnisse	178
7.1.3	Experimentaufbau	186
7.1.4	Verbesserung des Verfahrens durch Bestimmung der kürzesten Wege	189
7.1.5	Simulation und Ergebnisse mit den Verbesserungen .	193
7.1.6	Zusammenfassung	196
7.2	Objekterkennung, Klassifizierung und Lokalisierung mit bildgebendem Luftultraschallsystem	197
7.2.1	Einführung	197
7.2.2	Herausforderungen und Ziele	197
7.2.3	Verfahren	199
7.2.4	Evaluierung	205
7.2.5	Zusammenfassung	208
8	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	209
8.1	Zusammenfassung	209
8.1.1	Selbstkalibrierung	209
8.1.2	Optimierung der Wandleranordnung	212
8.1.3	Weitere industriennahe Anwendungen	212
8.2	Diskussion und Ausblick	214
8.2.1	Selbstkalibrierung basierend auf dem Transmissionsignal	214

8.2.2	Trennung der Fehlerquellen	216
8.2.3	Minimierung der Kalibrierungsfehler	217
8.2.4	Optimierung der Wandleranordnung	217
8.2.5	Luftultraschall-Array unter extremer Temperaturbe- dingung	218

1 Motivation

Heutzutage sind die technischen Anwendungen von Ultraschall immens vielfältig. Ultraschall als bildgebendes Messverfahren ist im Vergleich zu optischen Systemen unempfindlich gegen Farbunterschiede und optische Reflexionseigenschaften der abzubildenden Objekte. Zusätzlich können Abstände direkt gemessen werden. Jedoch sind die Lokalisierungsgüte, zum Beispiel der Kontrast, die Punktspreizfunktion und gegebenenfalls die Bildartefakte, stark abhängig von der Laufzeitdetektion und der Kenntnis der zurückgelegten Wege.

Diese Doktorarbeit beschäftigt sich mit der Optimierung der Lokalisierungsgüte bildgebender Ultraschallsysteme. Die Lokalisierungsgüte eines Ultraschallsystems wird hier definiert als die Fähigkeit des Systems, die Positionen von zu messenden Objekte in einem Betrachtungsbereich unter Berücksichtigung von Eigenschaften des Ausbreitungsmediums genau zu bestimmen. Für ein bildgebendes Ultraschallsystem erweitert sich die Definition der Lokalisierungsgüte auf das Abbildungsvermögen des Systems, wie zum Beispiel der Bildkontrast und die Punktspreizfunktion.

Da der Einsatz von Ultraschall als Messverfahren auf die Interaktion zwischen der Ultraschallwelle und dem Medium beruht, wird die Lokalisierungsgüte von der Kenntnis des Messaufbaus und des Mediums beeinflusst. Zum Beispiel kann ein Temperaturmeßfehler zu einer falsch geschätzten Schallgeschwindigkeit führen. Diese kann dann einen Fehler in dem gemessenen Abstand erzeugen oder die Bildqualität verschlechtern.

Die Lokalisierungsgüte eines Ultraschallsystems wird ebenfalls von der Anzahl der Ultraschallwandler und ihrer Anordnung beeinflusst. Eine optimierte Wandleranordnung ermöglicht Verbesserungen in der räumlichen

Abdeckung des Aufnahmebereiches und der Bildqualität bei gegebenen Randbedingungen wie zum Beispiel der Anzahl der Ultraschallwandler und der Kosten.

Mit der zunehmenden Systemkomplexität steigen die technische Anforderungen beim Systementwurf und Systembau wie zum Beispiel die Fertigungstoleranz, die Robustheit der Elektronik und eine optimierte Anordnung der Ultraschallwandler. Zum Beispiel wurde das 3D-USCT-II-Gerät am KIT mit einer Fertigungstoleranz von $20\ \mu\text{m}$ angefertigt, um eine gute Abbildungsqualität zu ermöglichen. Eine gröbere Fertigungstoleranz gefolgt durch eine manuelle Kalibrierung des Systems würde die Kosten und den technischen Aufwand stark reduzieren. Allerdings wäre das Gerät aufgrund seiner Komplexität und der verborgenen Piezoarrays hinter der Auskoppelschicht nicht mehr manuell zu kalibrieren.

1.1 Einsatzbereiche von Ultraschall

Industrielle Ultraschallwandler benutzen die Reflexion der Ultraschallwelle an Objekten, um die Abstände der Objekte zum Sensor zu messen. Mögliche Einsatzgebiete sind zum Beispiel die Raumüberwachung und die berührungslose Füllstandmessung in Behältern. Im Transmissionsbetrieb, in dem zwei Ultraschallwandler gegenüber oder in einem Winkel zueinander positioniert sind, kann zum Beispiel das Vorkommen von Doppelbögen in der Druckindustrie anhand von Schalldruckänderungen aufgrund der Materialdämpfung erkannt werden.

Luftultraschallwandler finden zurzeit ihren Einsatz in einfacher Objekterkennung und Abstandmessung. Die genaue Lokalisierung mehrerer Objekte mit nur einem Ultraschallwandler ist jedoch nicht möglich [2].

Im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wird Ultraschall benutzt, um Defekte im Material zu detektieren. Andere Anwendungen von Ultraschall in der Industrie sind zum Beispiel die Ultraschallreinigung und



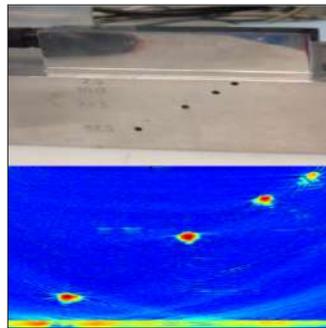
(a) Raumüberwachung



(b) Füllstandsmessung



(c) Doppelbögenerkennung



(d) Werkstoffprüfung

Abbildung 1.1: Die Abbildungen zeigen die Beispielanwendungen von Ultraschallsystemen in der Industrie. Abbildungen entnommen aus [1].

das Ultraschallschweißen. Abbildung 1.1 stellt Beispielanwendungen von Ultraschall in der Industrie dar.

Ultraschall wird auch in der Medizintechnik als bildgebendes Verfahren eingesetzt. Dieses Verfahren wird Sonografie genannt. Heutzutage ist die Sonografie aufgrund der niedrigeren Einsatzkosten sehr verbreitet [3]. Außerdem hat die Gewebeuntersuchung mit Ultraschall im Vergleich zur Röntgendiagnostik keine Strahlenbelastung.



Abbildung 1.2: 3D-USCT-II-Gerät (links) am IPE mit halb-ellipsoider Apertur (rechts)

Dank der Entwicklung von Datenerfassungssystemen mit hoher Kanaldichte ist es nun möglich, komplexere Ultraschallsysteme mit unterschiedlichen Anordnungen der Ultraschallwandler zu bauen. Ein Beispiel ist die 3D-Ultraschall-Computertomographie (3D-USCT) an Karlsruher Institut für Technologie (KIT) mit 2041 Ultraschallwandlern in einer halb-ellipsoiden Anordnung. Diese Anordnung ermöglicht gleichzeitig die Transmissionstomographie und die Reflexionstomographie [4].

Die Qualität des Ultraschallmessverfahrens wird im Allgemeinen durch die axiale und laterale Auflösung beschrieben [5]. Die axiale Auflösung beschreibt die Fähigkeit des Ultraschallsystems zwei Reflexionen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle zu unterscheiden. Diese wird wesentlich durch die Ultraschallfrequenz und die Pulslänge beeinflusst.

Die laterale Auflösung ist der minimale Abstand, bei dem zwei Reflexionen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle, noch trennbar sind. Diese ist von der Ultraschallfrequenz, der Geometrie und der Anzahl der Ultraschallwandler abhängig. In der Literatur werden diese Auflösungen als Qualitätsmaß benutzt, um die Systemeigenschaften von linearen Arrays zu beschreiben.

1.2 Beiträge dieser Arbeit

Das Ziel dieser Dissertation ist es, allgemein einsetzbare Verfahren zur Optimierung der Lokalisierungsgüte von Ultraschallsystemen zu entwickeln. Die Optimierung der Lokalisierungsgüte wird durch die Identifikation, Kalibrierung und Kompensation von möglichen Fehlerquellen durchgeführt. Weiterhin wird die Lokalisierungsgüte durch eine Optimierung der Wandleranordnung für eine bessere Abdeckung der Region-of-Interest (ROI) und gleichmäßige Verteilung der Systemleistung verbessert.

Es wurden zwei Ansätze entwickelt: ein Selbstkalibrierungsverfahren und ein Verfahren zur Optimierung der Sensoranordnung. Sie wurden mit Ultraschallsystemen unterschiedlicher Komplexität evaluiert.

Die Beiträge dieser Dissertation sind:

- Entwicklung eines Selbstkalibrierungsverfahrens für auf Laufzeitmessungen beruhende Ultraschallsysteme, welches erstmals für komplexe Systeme bei inhomogenen Schallgeschwindigkeitsverteilungen im Medium geeignet ist.
- Entwicklung einer Methode zur Vorhersage der systemspezifischen Genauigkeitsgrenzen des Kalibrierungsergebnisses basierend auf messbaren Fehlerbereichen. Diese ermöglicht die Festlegung realistischer Fertigungstoleranz für zukünftige Ultraschallsysteme.
- Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Wandleranordnung für ein bildgebendes Ultraschallsystem für beliebige ROI-Geometrien mit Hindernissen. Die einzigartige Beschreibung der Ultraschallwandler mit Polygonen erlaubt im Gegensatz zu den Standardverfahren die Detektion von Objekten über den vollen Winkelbereich, die Optimierung der Kalibrierbarkeit des Systems und die Beachtung vorgegebener Hindernisse.
- Entwicklung eines Experimentaufbaus eines optimierten bildgebenden Ultraschallsystems als weltweit ersten Systems für Reflexionstomographie mit Luftultraschall zur automatische Objektsegmentierung, Klassifizierung und Lokalisierung.

2 Grundlagen

2.1 Ultraschall

Die technischen Anwendungen von Ultraschall als Messverfahren beruhen auf den Interaktionen der Ultraschallwelle mit dem Ausbreitungsmedium. Die Schallausbreitung wird durch die akustische Impedanz und die Dämpfung α des Mediums wesentlich beeinflusst.

Die akustische Impedanz Z_F ergibt sich aus der Dichte des Materials ρ und der Schallgeschwindigkeit im Material c .

$$Z_F = \rho \cdot c \quad (2.1)$$

2.1.1 Reflexion

An Grenzübergängen von Medien mit unterschiedlichen akustischen Impedanzen wird die Schallwelle reflektiert. Der Anteil an Schallwelle, der an diesem Übergang reflektiert wird, ist für den senkrechten Einfall gegeben durch den Reflexionsfaktor R :

$$R_{12} = \frac{Z_{F,1} - Z_{F,2}}{Z_{F,1} + Z_{F,2}}, \quad (2.2)$$

wobei $Z_{F,1}$ und $Z_{F,2}$ jeweils für die akustische Impedanz des ersten und zweiten Mediums stehen. Ein negatives Vorzeichen des Reflexionsfaktors bedeutet einen Phasensprung der reflektierten Welle von 180° .

An einem Grenzübergang mit sehr hohem Impedanzunterschied kann der große Reflexionsfaktor zu einer Schallabschattung führen. Aufgrund dessen werden weitere Objekte hinter diesem Hindernis nicht mit einem Ul-

traschallwandler detektiert. Besonders oft kommt die Schallabschattung bei der Anwendung von Luftultraschall vor, da es im Allgemeinen einen großen Impedanzunterschied zwischen Luft als Ausbreitungsmedium und Festkörpern gibt. Tabelle 2.1 stellt typische Schallfeldgrößen unterschiedlicher Materialien und ihre Reflexionsfaktoren in Luft und Wasser dar.

Medium	ρ in g/cm^3	c in m s^{-1}	Z_F in MRayl	R_{Luft}	R_{Wasser}
Luft	0,0013	330	$4,3 \times 10^{-5}$	0	-0,99
Acrylnitril- Butadien- Styrol- Copolymer (ABS)	1,04	2230	2,31	1,00	0,39
Polyvinylchlorid (PVC)	1,35	2218	2,99	1,00	0,35
Aluminium	2,69	6350	17,08	1,00	0,84
Wasser	1,0	1450	1,45	0,99	0
Fett	97	1470	1,42	0,99	-0,01
Muskel	104	1568	1,63	0,99	0,06

Tabelle 2.1: Schallfeldgrößen verschiedener Materialien und ihre Reflexionsfaktoren in Luft und Wasser

2.1.2 Dämpfung

Unter der Schalldämpfung versteht man den Verlust an der Schallleistung, während sich die Schallwelle durch ein Medium ausbreitet. Die Leistungsverminderung ist von dem akustischen Dämpfungskoeffizient abhängig, der materialspezifisch ist. Die Berechnung des Leistungsverlusts erfolgt durch folgende Gleichung:

$$P(x + \Delta x) = P(x)e^{-\alpha(\omega)\Delta x}, \quad (2.3)$$

wobei Δx der zurückgelegte Abstand ist, und $\alpha(\omega)$ für den frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizient steht. Gleichung (2.3) zeigt, dass die Schallleistung exponentiell zum zurückgelegten Abstand abnimmt. Tabelle 2.2 stellt typische Werte des Dämpfungskoeffizienten α in verschiedenen Medien dar.

Medium	α in dB/(MHz · cm)
Luft	1,64 bei 20 °C
Wasser	0,0022
Fett	0,48
Muskel	1,09

Tabelle 2.2: Dämpfungskoeffizienten von Schall in verschiedenen Materialien[6], [7]

2.1.3 Schallgeschwindigkeit und Abstandsmessung

Die Abstandsmessung mit Ultraschall beruht auf der gemessenen Schalllaufzeit zwischen dem Sender und der Empfänger des Ultraschallsignals. Abbildung zeigt ein Beispiel der Abstandsmessung mit einem Ultraschallwandler als Sender und Empfänger.

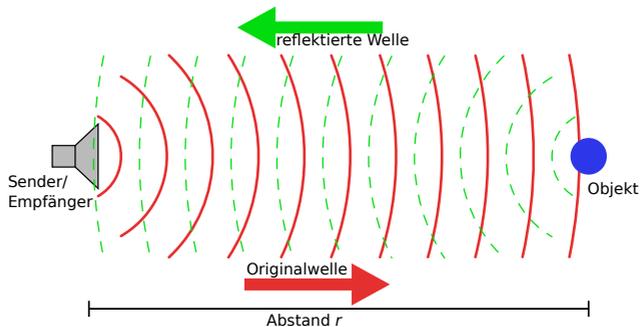


Abbildung 2.1: Abstandsmessung mit Ultraschall. Bild modifiziert aus [8].

Der Objektabstand r ist gegeben durch:

$$r = c \cdot \frac{t}{2}, \quad (2.4)$$

mit c als Schallgeschwindigkeit im Medium und t die gemessene Laufzeit. Die Laufzeit wird in der Gleichung halbiert, da die Schalllaufstrecke dem doppelten Abstand r ist.

Die Genauigkeit der Abstandmessung ist laut Gleichung (2.4) von der Kenntnis der Schallgeschwindigkeit abhängig. Da die Schallgeschwindigkeit materialspezifisch ist und sich mit Einflussfaktoren wie zum Beispiel der Temperatur und dem Druck im Medium ändert, ist es wichtig diese Faktoren bei der Messung zu berücksichtigen.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft in Abhängigkeit von der Temperatur ist gegeben durch:

$$c(T) = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (2.5)$$

mit γ als Adiabatenexponent der Luft, p ist der Luftdruck und ρ ist die Dichte. Gleichung (2.5) wird oft mit der folgenden Gleichung angenähert:

$$c(T) = 331,3 + \sqrt{1 + \frac{T}{273,15}} \text{ ms}^{-1} \quad (2.6)$$

Abbildung 2.2 stellt die Schallgeschwindigkeit in Luft für einen Temperaturbereich zwischen 15 °C und 150 °C nach Gleichung 2.6 dar.

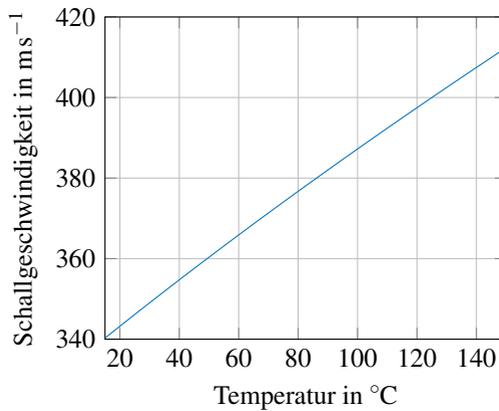


Abbildung 2.2: Die Schallgeschwindigkeit in Luft in Abhängigkeit von der Temperatur nach Gleichung (2.6)

Laut Abbildung 2.2 ergibt ein Temperaturversatz von einem Kelvin bereits einen Schallgeschwindigkeitsfehler von circa $0,6 \text{ ms}^{-1}$. Bei einem Objekt-Abstand von 1 m verursacht dieser Schallgeschwindigkeitsfehler einen Abstandsfehler von 1,7 mm.

Für die Anwendung von Ultraschall in Wasser kann die Schallgeschwindigkeit mit der Formel von Marczak [9] approximiert werden, die eine Polynomgleichung der fünften Ordnung ist:

$$\begin{aligned}
 c = & 1,402385 \times 10^3 + 5,038813T - 5,799136 \times 10^{-2}T^2 \\
 & + 3,287156 \times 10^{-4}T^3 - 1,398845 \times 10^{-6}T^4 \\
 & + 2,787860 \times 10^{-9}T^5 \text{ ms}^{-1}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

mit c als Schallgeschwindigkeit in ms^{-1} und T als Temperatur in $^\circ\text{C}$. Diese Näherung ist für den Bereich zwischen 0°C und 95°C gültig [9]. Abbildung 2.3 zeigt die Schallgeschwindigkeit im Wasser laut Marczak.

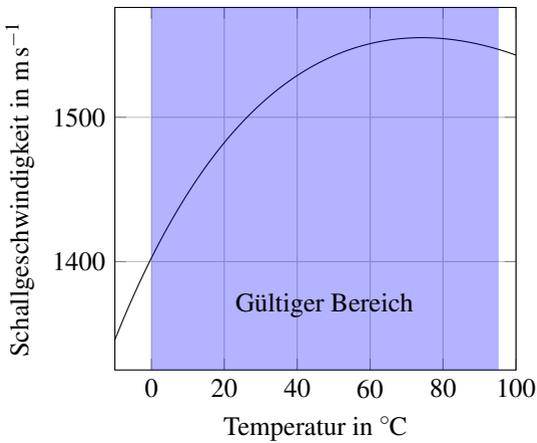


Abbildung 2.3: Schallgeschwindigkeit als Funktion der Temperatur im Wasser laut Marczak.

Im Vergleich zum Luft ist die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im Wasser zwar kleiner, aber ein Temperaturmessfehler von einem Kelvin kann zu Fehler von mm führen.

2.2 Bildgebende Ultraschallverfahren

Im Bereich der Medizintechnik wird Ultraschall als bildgebendes Verfahren eingesetzt, um Gewebe zu untersuchen. Das Verfahren wird auch Sonografie genannt. Zur Erzeugung und zum Empfangen von Ultraschallsignalen benutzt die konventionelle Sonografie ein Ultraschallarray, das aus vielen kleinen Ultraschallwandlerelementen besteht. Diese Elemente können linear in einer Reihe oder konvex angeordnet werden. Ein Ultraschallwandler kann Ultraschall gleichzeitig senden und empfangen.

Während der Messung wird der Ultraschallstrahl in einer Richtung fokussiert. An Grenzübergängen der Gewebestrukturen wird Ultraschall reflektiert und am Ultraschallarray aufgenommen. Aus der Reflexions- und Laufzeitinformationen kann die Struktur der Gewebe in der Abstrahlrichtung re-

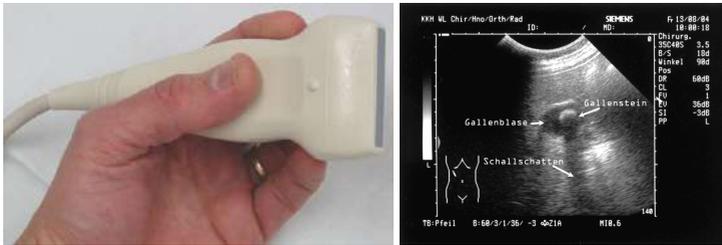


Abbildung 2.4: Die linke Abbildung stellt ein konventionelles lineares Ultraschallarray für die Sonografie dar. In der rechten Abbildung ist ein Beispiel für ein B-Scan angezeigt. Bilder entnommen aus [11] und [12].

konstruiert werden. Um ein 2D-Bild, auch B-Scan genannt, zu vermessen, wird der Ultraschallstrahl zusätzlich in der lateralen Richtung geschwenkt. Das Schwenken des Ultraschallstrahls kann mechanisch oder mit zeitverzögerter Anregung der Ultraschallwandlerelemente im sogenannten Phased-Array-Verfahren realisiert werden. Die zeitverzögerte Anregung wird das Beamforming-Verfahren genannt [10]. Abbildung 2.4 stellt ein lineares Ultraschallarray und eine Beispielaufnahme mittels Sonografie dar.

Im Bereich der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wird ähnliches bildgebendes Verfahren eingesetzt, um Fehler in Werkstücken aufzufinden [13]. Aufgrund der großen akustischen Impedanzunterschiede zwischen Luft und Festkörper wird ein geeignetes Koppelmaterial, wie zum Beispiel Wasser, auf der zu prüfenden Oberfläche aufgetragen. Der Prüfkopf wird danach mechanisch über die Fläche des Werkstücks gefahren. In Abbildung 2.5 ist eine Beispielaufnahme mit einem linearen Array dargestellt.

Die aktuelle Forschung und Entwicklung in der Medizintechnik mit Ultraschall als bildgebendes Verfahren beschäftigt sich mit der 3D-Ultraschall-Tomographie (3D-USCT).

Im Vergleich zu dem konventionellen Ultraschallarray wird hier nicht nur die Reflexion, sondern auch die Transmission der Ultraschallwelle durch das Gewebe aufgenommen. Beispielsweise können die Ultraschallwandler-

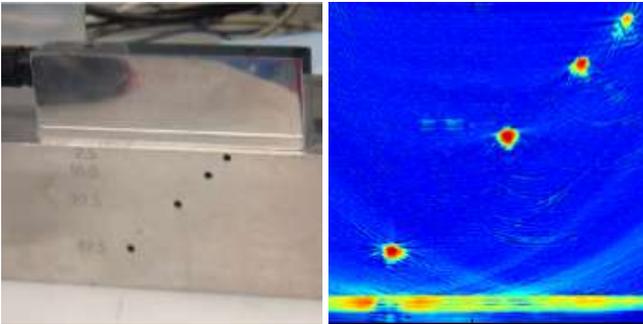


Abbildung 2.5: Die linke Abbildung zeigt das Werkstück mit dem Ultraschallarray, in der rechten Abbildung das rekonstruierte Bild. Abbildungen entnommen aus [13].

elemente in einem Ring-Array [14] oder auf einer halbellipsoiden Apertur [4] angeordnet werden. Bei dem letzteren ist eine vollständige dreidimensionale Aufnahme und Rekonstruktion der Ultraschallsignale möglich.

Ein Beispiel für USCT mit einem Ring-Array ist das SoftVue-System von der Firma Delphinus Medical Technologies aus Plymouth (USA) (siehe Abbildung 2.6). Das Ring-Array besitzt 2048 Ultraschallwandler und kann während der Messung in vertikaler Richtung verschoben werden. Die rekonstruierte 2D-Schichtbilder an jeder Aufnahme position werden in ein 3D-Bild gestapelt. Im Vergleich dazu hat der 3D-USCT-II am IPE 2041 Ultraschallwandler, die in einer halbellipsoiden Form angeordnet sind (siehe Abbildung 2.7). Beide Systeme senden die Ultraschallwellen unfokussiert und benötigen in der Software zur Bildgebung eine nachträgliche Fokussierung.

Der Vorteil solcher Systeme gegenüber konventionellen Ultraschallarrays ist die Fähigkeit drei Modalitäten der Ultraschallbilder, nämlich das Reflektionsbild, das Schallgeschwindigkeitsbild und das Dämpfungsbild zu rekonstruieren. Die Fokussierung der Ultraschallsignale zur Rekonstruktion



Abbildung 2.6: In der linken Abbildung ist das SoftVue-System von Delphinus dargestellt. Das Ring-Array mit 2048 Ultraschallwandlern zeigt die rechte Abbildung. Bilder entnommen aus [15].



Abbildung 2.7: 3D-USCT-II-Gerät (links) am IPE mit halbellipsoider Apertur (rechts)

der Reflexionsbilder wird mit der „*Synthetic Aperture Focusing Technique*“ (SAFT) realisiert [16].

Eine der ersten Untersuchungen zum Thema Bildgebung mit Luftultraschall wurde in 1991 von Knoll vorgestellt [17]. Es wurde ein Ultraschallarray mit dem Ultraschallwandler L^2QZ von Siemens mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz untersucht [18]. Die Bildrekonstruktion erfolgt durch eine Multi-Frequenz-Reflexionshologramme und erreichte einer maximale axiale Auflösung von 3 mm und eine laterale Auflösung von 30 mm.

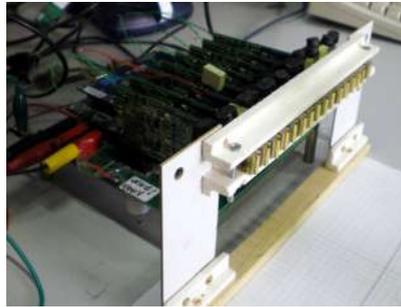


Abbildung 2.8: Lineares Ultraschallarray mit sechzehn Ultraschallwandler aus [19]

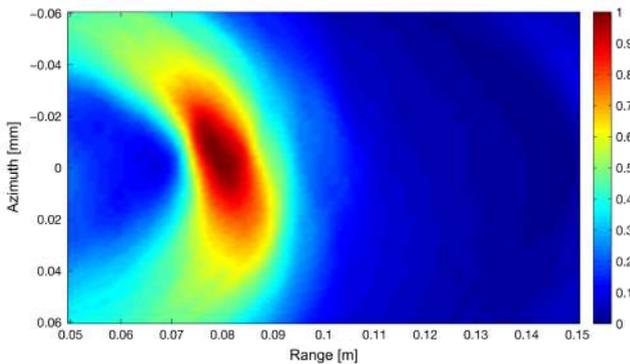


Abbildung 2.9: Rekonstruiertes Bild eines Metallzylinders mit dem Ultraschallarray aus [19]

In [19] wurde ein ähnliches Ultraschallarray mit einer Mittenfrequenz von 150 kHz vorgestellt (siehe Abbildung 2.8). Für die Bildrekonstruktion wurde die SAFT eingesetzt. Ein rekonstruiertes Bild eines Metallzylinders mit einem Durchmesser von 50 mm bei einem Abstand von 75 cm zum Array ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

Opielinski hat in [20] ein Luftultraschall-Transmissionstomographie-System (UTT) vorgestellt. Das System besitzt einen Sender und einen Empfänger, zwischen denen das abzubildende Objekt liegt. Während der Datenauf-

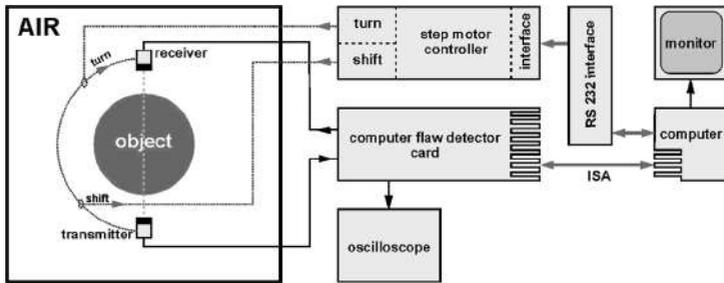
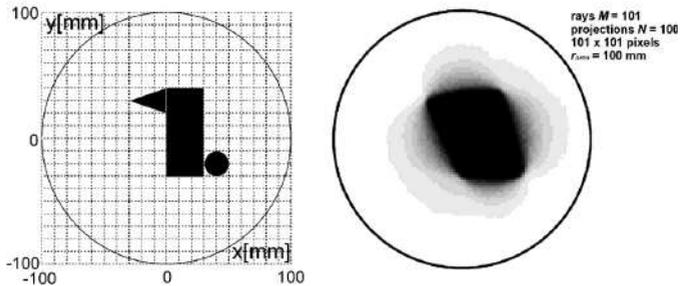


Abbildung 2.10: Luftultraschall-Transmissionstomographie-System aus [20]

Abbildung 2.11: Ein rekonstruiertes Bild mit dem Luftultraschall-Transmissionstomographie-System aus [20]. Es wurden insgesamt $101 \times 100 = 10100$ A-Scans aufgenommen.

nahme wird der Aufbau um das Objekt rotiert und verschoben, um möglichst viele Betrachtungswinkel abzudecken (siehe Abbildung 2.10).

Zur Bildrekonstruktion wurde ein Backpropagation-Verfahren in [21] angepasst. Abbildung 2.11 zeigt eine Beispielrekonstruktion mit UTT. Laut [20] ist es aufgrund der Schallabschattung der Umriss des Objekts falsch dargestellt. Dieser Effekt tritt bei zu nahem Abstand zwischen den Objekten auf. Außerdem kann das Verfahren keine konkave Objektform darstellen.

2.2.1 Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)

Die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) ist ein verbreitetes Verfahren zur Bildgebung in Radar und Sonaranwendungen [16]. Bei einer SAFT-Rekonstruktion werden die Aufnahmen von jeder Sender-Empfänger-Kombinationen (SEK) aus verschiedenen geometrischen Positionen benutzt, um ein hochqualitatives Bild zu berechnen. Für die Signalaufnahme wird mit jedem Sender ein unfokussiertes Ultraschallsignal gesendet und das Empfangssignal an allen Empfängern zeitgleich aufgenommen.

Es wird zuerst der zu rekonstruierten Aufnahmebereich mit der gewünschten Bildauflösung in ein diskretes Pixelfeld im zweidimensionalen Fall oder Voxelfeld für den dreidimensionalen Fall aufgeteilt. Der Aufnahmebereich wird Region-of-Interest (ROI) genannt, worin sich die zu rekonstruierende Objekte befinden können. Für jeden Bildpunkt \mathbf{x} in dem Pixelfeld wird die Laufzeit t_{ij} aus den euklidischen Abständen zwischen dem ausgewählten Sender S_i , dem Empfänger S_j und dem Bildpunkt berechnet und die Amplitude aus dem zugehörigen A-Scan zu dieser Laufzeit t_{ij} aufsummiert:

$$t_{ij} = \frac{\|\vec{S}_i - \mathbf{x}\| + \|\mathbf{x} - \vec{S}_j\|}{c_{ij}}, \quad (2.8)$$

mit \vec{S} als Koordinaten der Ultraschallwandler. Die Größe c_{ij} steht für die Schallgeschwindigkeit im Medium für diese SEK. Der Operator $\|\cdot\|$ bildet den euklidischen Abstand. Abbildung 2.12 dient zur Visualisierung der SAFT für ein 2D-System am Beispiel der SEK S_i und S_j für ein definiertes Pixelfeld in einer Region-of-Interest (ROI), die als graue Fläche dargestellt ist.

Laut Norton und Linzer [22] löst SAFT das inverse Problem bei der Berechnung lokales Impedanzunterschiedes z_F in dem abgebildeten Volumen. Es wurde vorausgesetzt, dass die Aufnahmeapertur nicht dünn besetzt ist und das Volumen komplett umhüllt. Eine dünn besetzte Apertur erfüllt das Abtasttheorem laut Nyquist nicht. Außerdem sind die Streuer isotropische

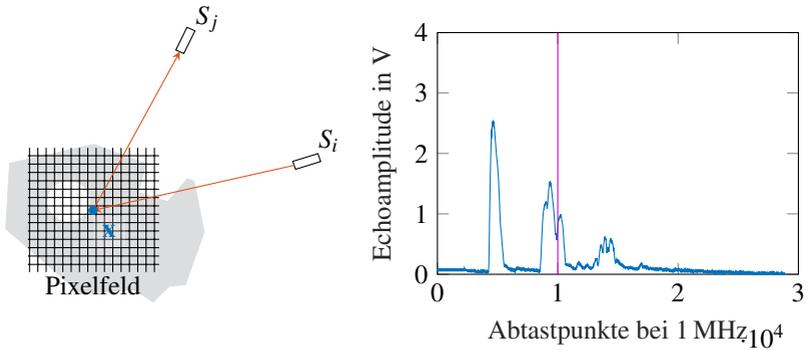


Abbildung 2.12: Die Abbildung stellt schematisch die Rekonstruktion des Bildpunktes \mathbf{x} mittels SAFT-Verfahrens für den Sender S_i und den Empfänger S_j dar. Die graue Fläche ist die ROI. In der rechten Abbildung wird beispielhaft ein A-Scan für diese SEK angezeigt. Die Maxima sind die empfangenen Ultraschallechos an dem Empfänger. Die Linie in der rechten Abbildung zeigt die Laufzeit für die Strecke zwischen S_i , \mathbf{x} und S_j .

Punktstreuer und die Ultraschallwelle erfährt in dem Medium keine Dämpfung.

Für eine gegebene Verteilung der lokalen Impedanzunterschiede $z_F(\vec{x})$ in dem abgebildeten Volumen können A-Scans $A_{(S_i, S_j)}(t_x)$ mit einer nicht fokussierten Schallquelle laut [22] folgendermaßen geschrieben werden:

$$A_{(S_i, S_j)}(t_x) = \int_{E_{(S_i, S_j), t_x}} p z_F(A) dA = p z_F(\vec{x}) + \int_{\tilde{E}_{(S_i, S_j), t_x}} p z_F(A) dA \quad (2.9)$$

mit $\int_{E_{(S_i, S_j), t_x}}$ als ein Flächenintegral des Ellipsoides, das durch den Sender S_i an der Position \vec{s}_i , den Empfänger S_j an der Position \vec{s}_j und die Position des Bildpunktes \vec{x} gegeben ist. Die Größe t_x ist die nach Gleichung 2.8 berechnete Laufzeit für eine Reflexion am Bildpunkt \vec{x} mit dem Sender S_i und Empfänger S_j . Der Skalar p dient zur Umrechnung der Impedanzunterschiede in den aufgenommenen Schalldruck in dem A-Scan. In diesem Modell wurde das Rauschen ignoriert.

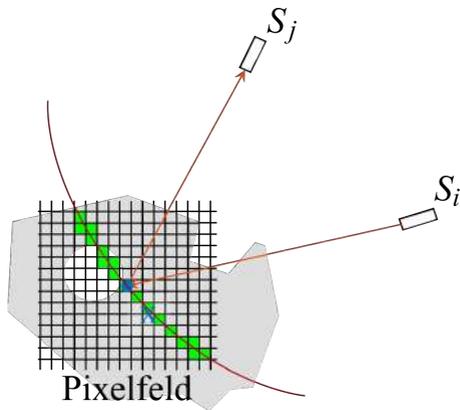


Abbildung 2.13: Die Abbildung zeigt das Eintragen einer Reflexion in den Pixeln entlang einer Ellipse (rot) mit der gleichen Laufzeit zwischen dem Sender S_i , dem Bildpunkt x und dem Empfänger S_j . Die betroffene Pixeln sind grün markiert.

Mit der SAFT wird eine Reflexion in den Pixeln mit der gleichen Laufzeit zwischen Sender, dem Bildpunkt und dem Empfänger auf einer Ellipse eingetragen (siehe Abbildung 2.13). Erst durch die konstruktive Überlagerung der Ellipsen an der tatsächlichen Position des Streuers wird dieser hervorgehoben. Abbildung 2.14 zeigt eine Beispielrekonstruktion von zwei simulierten Punktstreuern mit SAFT. Das simulierte 2D-Ultraschallsystem bestehen aus sechzehn Ultraschallwandlern. An der Positionen der Punktstreuer addieren sich die Amplitude in der A-Scans für 256 SEK zu lokalen Maxima.

In Abbildung 2.14 sind neben den beiden lokalen Maxima Artefakte zu erkennen. Sie werden Gratinglobe-Artefakt genannt [23]. Für eine ausreichend große Menge an SEK werden die Gratinglobe-Artefakte an den Bildpunkten weit weg von der Position der Streuer durch destruktive Interferenzen unterdrückt. Im Gegensatz wird an der Position der Streuer wird die Bildintensität mit der kohärenten Addition der A-Scans verstärkt. Um möglichst viele Aufnahmen aus verschiedenen geometrischen Positionen mit einer begrenzten Anzahl von Ultraschallwandler zu erreichen, wird oft

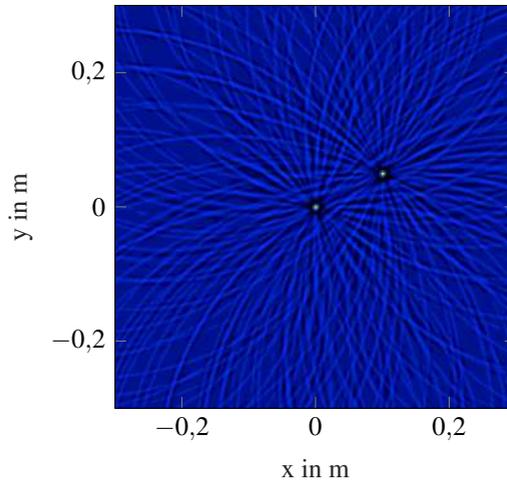


Abbildung 2.14: Die Abbildung zeigt eine Rekonstruktion von zwei simulierten Punktstreuern mit der SAFT für sechzehn Ultraschallwandler.

die Systemapertur während der Aufnahme bewegt. Beispielsweise kann die halbellipsoide Apertur des 3D-USCT-II-Geräts rotiert und angehoben werden.

2.2.2 Gratinglobe-Unterdrückung mit gleitendem Median

Ein Verfahren zur Unterdrückung der Gratinglobe-Artefakte wurde in [23] am Beispiel des 3D-USCT-II-Geräts vorgestellt. Das Verfahren beruht darauf, dass sich die Gratinglobe-Artefakte an Positionen weit weg von starken Streuern wie Ausreißer in den zu summierenden Amplituden der ausgewählten A-Scans verhalten.

Durch die Verwendung des Median-Operators auf $A_{(S_i, S_j)}(t_x)$ in Gleichung (2.9) für den Bildpunkt \vec{x} über aller SEK können solche Ausreißer erkannt und eliminiert werden. Für eine ideale SAFT-Rekonstruktion ohne Berücksichtigung der Eigenschaften der Ultraschallwandler, der akustischen Charakteristik und idealen Punktstreuern können laut [23] die Gratinglobe-

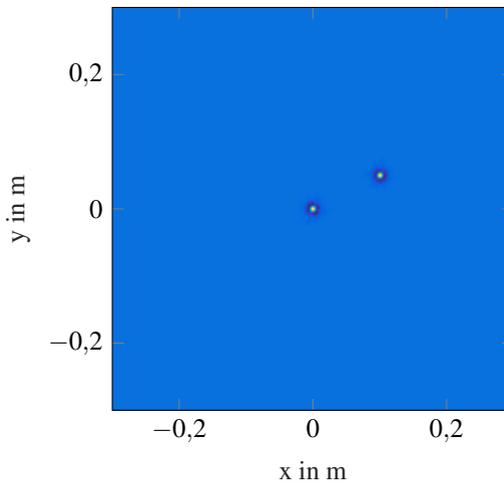


Abbildung 2.15: Die Abbildung zeigt eine Rekonstruktion von zwei simulierten Punktstreuern mit der Gratinglobe-Unterdrückung.

Artefakte komplett beseitigt werden. Abbildung 2.15 stellt ein Beispiel der SAFT-Rekonstruktion mit der Gratinglobe-Unterdrückung für die simulierten Punktstreuer in Abbildung 2.14. Der Median wurde global auf den Bildern der 256 SEK angewendet.

Unter Berücksichtigung der Winkelcharakteristik der Ultraschallwandler und der akustischen Eigenschaften der Objekte werden an Objekten reflektierte Ultraschallwellen nur von einer Untergruppe der Empfänger in der Nähe des Senders empfangen. Der Einsatz von einem globalen Median-Operator auf allen rekonstruierten Bildern wird im ungünstigen Fall diese Reflexionen als Ausreißer betrachten.

Um dieses Problem zu lösen, wurde in [23] der Einsatz eines gleitenden Medians vorgestellt. Es wurde angenommen, dass sich die aufgenommene Signalamplituden an benachbarten Empfänger nur langsam ändert. Durch die geeignete Auswahl der Untergruppengröße von Empfänger für jeden

Sender werden die Reflexionen an der Objekte erhalten und die Gratinglobe-Artefakte unterdrückt.

2.3 Lokalisierungsgüte

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, beruht die Anwendung von Ultraschall als Messverfahren auf der Interaktion der Ultraschallwelle mit ihrem Ausbreitungsmedium. Die Genauigkeit der Messwerte wie zum Beispiel die Signallaufzeit und die Temperatur und die Bekanntheit über den Messaufbau sind kritisch für die Lokalisierungsgüte des Ultraschallsystems.

2.3.1 Einflussfaktoren auf die Lokalisierungsgüte

Die Haupteinflussfaktoren der Lokalisierungsgüte sind die Fehlerquellen im System und die durch die Wandleranordnung gegebene Abbildungsqualität und Messgenauigkeit des Systems. In dieser Doktorarbeit werden die möglichen Fehlerquellen in einem Ultraschallsystem bezogen auf der Laufzeitgleichung eines Ultraschallsignals vom Sender s_i zum Empfänger r_j in die in Abbildung 2.16 dargestellten Hauptgruppen aufgeteilt.

Positionsfehler

Die Abweichungen der tatsächlichen Position der Ultraschallwandler vom Systementwurf aufgrund der Fertigungstoleranz sind ein typischer Positionsfehler in einem Ultraschallsystem. Außerdem können Verkabelungsfehler zur Vertauschung der Wandler-Position führen. Solche Fehler sollen als Defekt erkannt werden.

Ein Positionsfehler kann einen Fehler in der Rekonstruktion der Schallgeschwindigkeitsverteilung verursachen. Denn ein Positionsfehler des Senders oder des Empfängers ergibt mit der detektierten Laufzeit eine inkorrekte Schallgeschwindigkeit. Außerdem führt ein Positionsfehler zu einer

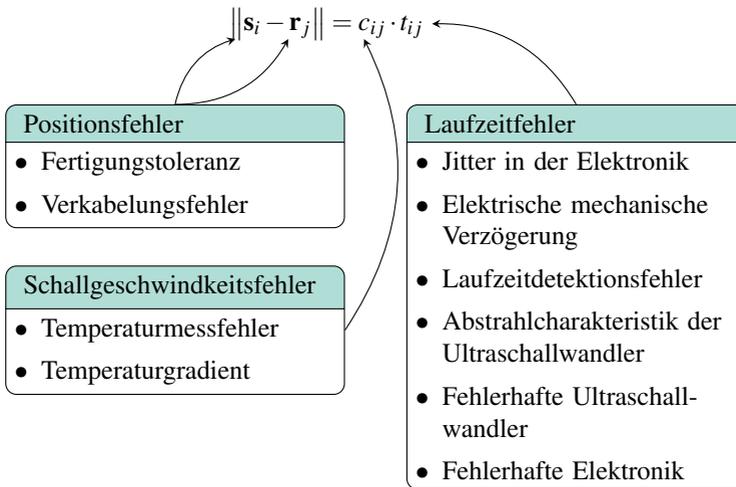


Abbildung 2.16: Einflussfaktoren auf die Lokalisierungsgüte

fehlerhaften Laufzeitberechnung zwischen den Ultraschallwandler und jedem Bildpunkt bei der SAFT-Rekonstruktion.

Abbildung 2.17 stellt den Schallgeschwindigkeitsfehler in Abhängigkeit der Positionsfehler für eine Schallausbreitung im Wasser bei einer Temperatur von 30 °C dar. Der Abstand zwischen dem Sender und Empfänger liegt bei 20 cm.

Die Positionsfehler können durch eine Vermessung der Systemgeometrie nach dem Aufbau ausgeglichen werden. Allerdings ist dieser Prozess mit der Zunahme der Anzahl von Ultraschallwandler sehr aufwendig. Außerdem sind die Ultraschallwandlerelemente meistens in einem Ultraschallarray hinter der Anpassschicht platziert und nicht direkt sichtbar. Dies verhindert eine direkte Messung der Wandler-Position.

In dieser Doktorarbeit wird deshalb ein weiterer Ansatz zur Korrektur der Positionsfehler, nämlich die Selbstkalibrierung des Ultraschallsystems, verfolgt. Dabei werden anhand einer sogenannten Leermessung die relativen Positionen zwischen allen Sendern und Empfängern im System durch

Lösen eines hochdimensionalen Gleichungssystems kalibriert. Unter einer Leermessung versteht man eine Datenaufnahme ohne Objekt in der ROI, zum Beispiel nur Wasser im USCT.

Schallgeschwindigkeitsfehler

Bei der Abstandsmessung mit Ultraschall beeinflusst die genaue Kenntnis über die Schallgeschwindigkeitsverteilung entlang des Signalweges die Genauigkeit des gemessenen Abstands. Laut Abschnitt 2.1.3 ist die Schallgeschwindigkeit im Medium beispielsweise für eine Abstandsmessung mit Luftultraschall eine Funktion von Temperatur, Feuchtigkeit und Luftdruck. Der wichtigste Faktor dabei ist die Lufttemperatur.

Aufgrund dessen wird in den meisten konventionellen Ultraschallwandlern ein Temperatursensor eingebaut, um die Schallgeschwindigkeit laut Gleichung (2.5) zu berechnen. Allerdings kann die gemessene Tempera-

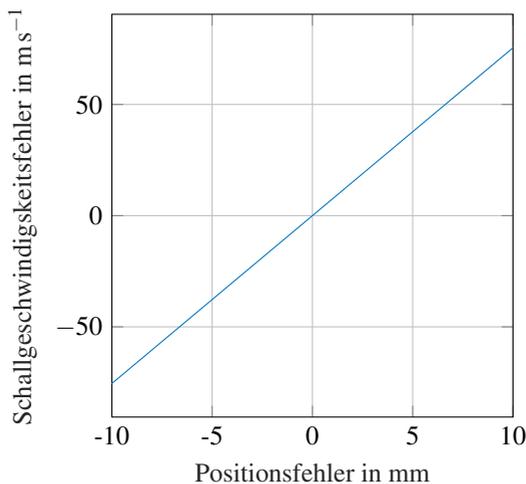


Abbildung 2.17: Die Abbildung zeigt beispielhaft den Einfluss des Positionsfehlers auf die berechnete Schallgeschwindigkeit bei bekannter Distanz.

tur fehlerbehaftet sein. Zum Beispiel kann der Wärmeübergang zwischen der Luft und dem Gehäuse zu einem Versatz in der gemessenen Temperatur führen. Bereits ein Temperaturversatz von einem Kelvin ergibt einen Schallgeschwindigkeitsfehler von circa $0,6 \text{ ms}^{-1}$. Es ergibt sich bei einem Objektabstand von 1 m einen Abstandsfehler von 1,7 mm.

Abbildung 2.18 zeigt den Einfluss des Temperaturfehlers auf die Genauigkeit der Abstandsmessung. Es wurde für den Temperaturfehler zwischen -10°C und 10°C der Abstandsfehler bei einem Messabstand von 20 cm und einer Lufttemperatur von 30°C aufgetragen.

Ein weiterer Grund für Schallgeschwindigkeitsfehler ist das Vorhandensein eines Temperaturgradienten entlang des Signalweges. Aufgrund des Temperaturgradienten propagiert die Schallwelle durch Bereiche mit unterschiedlicher Schallgeschwindigkeiten. Die Annahme von einer konstanten oder mittlerer Schallgeschwindigkeit zur Berechnung des Objektabstands ist daher fehlerhaft.

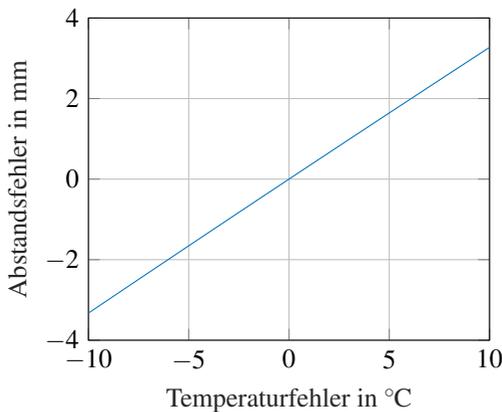


Abbildung 2.18: Fehler in gemessenem Abstand aufgrund Temperaturfehler bei einem Messabstand von 20 cm und eine Lufttemperatur von 30°C

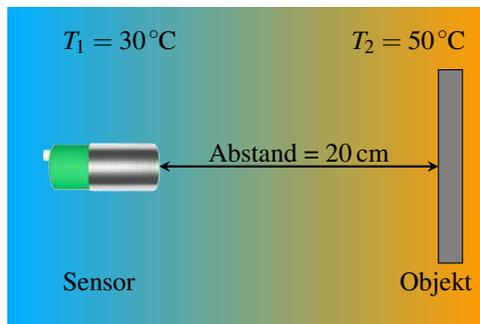


Abbildung 2.19: Abstandsmessung in Luft mit einem Temperaturgradienten

Abbildung 2.19 stellt schematisch eine Abstandsmessung in Luft mit einem Temperaturgradienten dar. Unter der Annahme einer konstanten Schallgeschwindigkeit von 349 m s^{-1} bei $T_1 = 30^\circ\text{C}$ ergibt sich ein Abstandsfehler von 3,2 mm.

Der Abstandsfehler aufgrund eines Temperaturgradienten ist ohne die Kenntnis des Gradienten nicht korrigierbar. Ein möglicher Ansatz zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte ist die Benutzung von Messwerte aus mehreren Sensoren wie zum Beispiel ein Ultraschallarray. Es ist mit der bekannten relativen Positionen der Ultraschallwandler und Laufzeiten von mehreren SEK möglich gleichzeitig den Temperaturgradienten und den Abstand zum Objekt zu messen. Dieser Ansatz wird in Kapitel 7.1 am Beispiel eines Ultraschallarrays für Schichtdickenmessung am Straßenfertiger vorgestellt und evaluiert.

Laufzeitfehler

Unter dem Laufzeitfehler versteht man die Abweichung der detektierten Laufzeit zur Laufzeit, die allein durch die Schallausbreitung im Medium gegeben ist. Ein Laufzeitfehler kann zum Beispiel durch Jitter in der Elektronik oder unerwartete Verzögerungen im System verursacht werden.

Mit dem Jitter werden sporadische Verzögerungen im System bezeichnet. Diese Art vom Fehler kommt oft bei der Digital-zu-Analog- und Analog-zu-Digital-Wandlung vor. Eine durch das Tastverhältnis gegebene Verzögerung kann daher maximal der Kehrwert der Systemabtastrate sein. Dennoch kann das Rauschen im System zu größerem Jitter aufgrund fehlerhafter Triggerung der Aufnahme führen.

Eine weitere Ursache des Laufzeitfehlers ist die elektrisch-mechanische Verzögerung in dem Ultraschallsystem. Zum Beispiel kann es zwischen der Anregung des Ultraschallwandlers und die Erzeugung einer Schallwelle eine Verzögerung geben, die durch das Ansprechverhalten des Ultraschallwandlers und der Elektronik bestimmt ist. Ebenso kann beim Empfangen eines Ultraschallsignals eine solche Verzögerung geben, bevor es in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Außerdem ist die Signalverzögerung in der elektrischen Leitungen zu berücksichtigen. Beispielsweise wurde im 3D-USCT-II-Gerät empirisch eine Signalverzögerung von $1,4\ \mu\text{s}$ gemessen. Diese Verzögerung wurde gemessen unter der Berücksichtigung der zeitlichen Verzögerung in dem digitalen Filter in der Signalverarbeitungskette, beispielhaft das Bandpassfilter nach der Analog-zu-Digital-Wandlung. Die gemessene Signalverzögerung ergibt einen Positionsfehler von $2,1\ \text{mm}$ bei $25\ ^\circ\text{C}$.

Im Weiteren kann eine schlechte Signalqualität zu einem Laufzeitfehler führen. Beim einem niedrigen Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) kann je nach Verfahren zur Signaldetektion die Genauigkeit der detektierten Laufzeit stark beeinflusst werden. Zum Beispiel kann eine Signaldetektion mit einfachem Schwellwertverfahren bei einem Rauschpegel oberhalb des eingestellten Schwellwerts kein Signal detektieren und somit keine Laufzeitinformation liefern. Dieser Laufzeitfehler unterscheidet sich von der obengenannten elektrisch-mechanischen Verzögerung darin, dass er nicht kalibriert werden kann. Allerdings kann der Laufzeitfehler bei niedrigem SNR durch geeignete Auswahl des Verfahren zur Signaldetektion reduziert werden. Im

Kapitel 4.2 werden verschiedener Detektionsmethoden im Hinblick auf ihre Robustheit und Genauigkeit untersucht.

Ein robusteres Detektionsverfahren wie zum Beispiel das Matched-Filter [24] sucht in dem Empfangssignal anhand der Korrelation mit der gesendeten Signalfolge nach einer maximalen Übereinstimmung. Allerdings ist ein Ultraschallwandler kein optimaler Punktstrahler, der in allen Richtungen mit der gleichen Amplitude und Phase eine Schallwelle aussendet und empfängt. Beim großen Abstrahlwinkel kann die Phasenverschiebung zu dem Laufzeitfehler beitragen. Abbildung 2.20 zeigt die Abstrahlcharakteristik des Ultraschallwandlers in 3D-USCT-II für verschiedene Frequenzen.

Ein möglicher Ansatz zur Verbesserung der Genauigkeit der Laufzeitdetektion ist die Anpassung des Matched-Filters für den Sende- und Empfangswinkel mithilfe der gemessenen Abstrahlcharakteristik der benutzten Ultraschallwandler. Dieser Ansatz wird in Kapitel 4.2.7 erklärt und untersucht.

Neben den oben genannten Ursachen können defekte Komponenten im System ebenfalls zu dem Laufzeitfehler beitragen. Beispiele sind abgebrochene Signalverbindungen an Ultraschallwandler oder fehlerhafte elektronische Komponenten in der Ansteuerungs- und Datenaufnahmeelektronik. Mit Hilfe einer automatischer Detektion der fehlerhaften Komponenten können die zugehörigen Daten aussortiert werden und die Laufzeitfehler minimiert werden.

Systementwurf

Die Lokalisierungsgüte eines Ultraschallsystems kann nicht nur durch Erkennung und Kompensation möglicher Fehlerquellen im System, sondern auch durch die Optimierung der Anordnung der Ultraschallwandler unter der Berücksichtigung von Randbedingungen wie zum Beispiel technischer Aufwand, Anzahl der Wandler und Kosten optimiert werden.

In [25] wurde der Einfluss der Anzahl von verfügbaren Sender-Empfänger-Kombinationen (SEK) auf die Grating-Lobe-Artefakte in der SAFT-Rekonstruktion untersucht. Abbildung 2.21 zeigt, dass die Bildartefakte mit Zunahme der SEK stark unterdrückt werden.

Laut [25] beeinflussen die Wandlergeometrie, die Charakteristik der einzelnen Wandler und die Signalvorverarbeitung die Abbildungseigenschaften eines bildgebenden Ultraschallsystems. Darunter sind die Objektausleuchtung, das Auflösungsvermögen und die allgemeine Bildqualität.

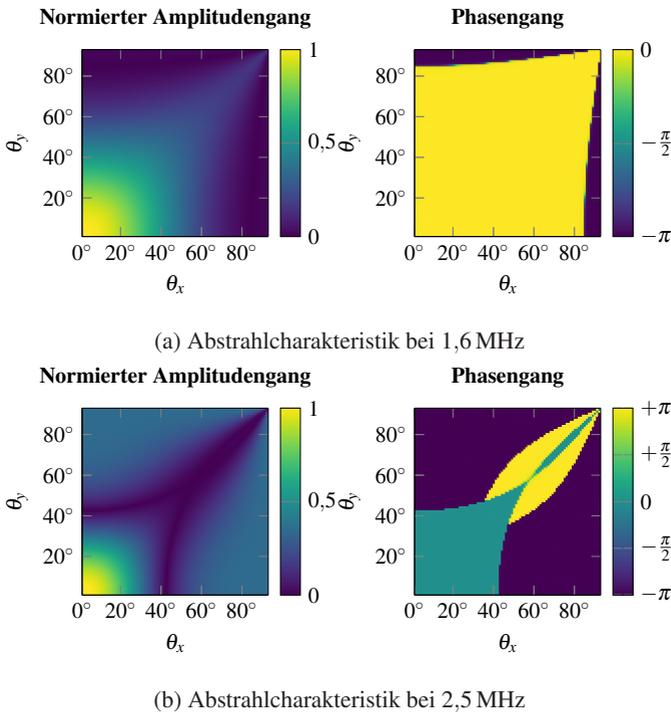


Abbildung 2.20: Die Abbildungen stellen die Abstrahlcharakteristik des Ultraschallwandlers in 3D-USCT-II dar. Eine Phasenverschiebung von $-\pi$ entsteht ab 40° bei der Mittenfrequenz von 2,5 MHz. Der Winkel θ_x ist der Azimutwinkel zur x -Achse und θ_y zur y -Achse.

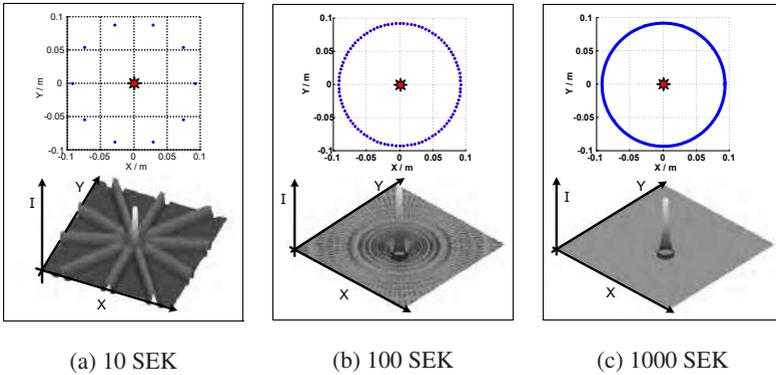


Abbildung 2.21: Bildartefakte in der SAFT-Rekonstruktion eines Punktstreuers in Abhängigkeit von der Anzahl von Sender-Empfänger-Kombinationen (SEK). Abbildung entnommen aus [25].

Mit der Objektausleuchtung bezeichnet man die optimale Abdeckung der ROI mit den Ultraschallwandlern, damit Objekte in der ROI von möglichst viele SEK vermessen werden. Das Auflösungsvermögen beschreibt die Fähigkeit des Systems, zwei nahe liegende Punktstreuer in dem rekonstruierten Bild getrennt abzubilden. Die Abbildungsartefakte und der Bildkontrast gehören zu der allgemeinen Bildqualität.

2.3.2 Ansätze zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte

Die aktuellen Entwicklungen von Ultraschallsystemen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen zielen auf komplexere Systemen, die eine erhöhte Anforderung an der Lokalisierungsgüte haben. Laut [25] soll der gesamte Fehler im System kleiner als ein Viertel der benutzten Wellenlänge sein, damit sich bei der SAFT-Rekonstruktion die Rückprojektion eines Punktstreuers genau an seiner Position konstruktiv überlagern.

In dieser Doktorarbeit wurden zwei Ansätzen zur Optimierung der Lokalisierungsgüte verfolgt. Der erste Ansatz handelt sich um die Selbstkalibrierung eines Ultraschallsystems, um die möglichen Fehlerquellen zu identi-

fizieren und zu kompensieren. Der zweite Ansatz beschäftigt sich mit der Optimierung der Wandlerpositionierung und ihrer Ausrichtung. Beide Ansätze versuchen die Lokalisierungsgüte durch die Minimierung von linearen und nichtlinearen Gleichungssystemen zu optimieren. Es wurde bei der Entwicklung der Verfahren großer Wert auf die allgemeine Einsetzbarkeit und Erweiterbarkeit für Ultraschallsysteme unterschiedlicher Komplexität gelegt.

2.4 Lösen von nichtlinearen Gleichungssystemen

Unter einem nichtlinearen Gleichungssystem versteht man ein Gleichungssystem $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ aus einer Sammlung von Gleichungen $f_i(\mathbf{x})$, bei denen ihre Unbekannten in Vektor \mathbf{x} nichtlinear auftreten [26]:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_0(\mathbf{x}), f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]^\top = 0 \quad (2.10)$$

$$f_i(\mathbf{x}) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (2.11)$$

Das Lösen von einem nichtlinearen System ist allgemein nicht einfach [27]. Meistens wird die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems durch die Linearisierung der Gleichungen angenähert. Dafür werden in der Regel numerische Methoden, wie zum Beispiel das Newton-Verfahren, das Levenberg-Marquardt-Verfahren und das Trust-Region-Verfahren, eingesetzt [27].

Zusätzlich wird in dieser Arbeit das Innere-Punkte-Verfahren [28] aus der quadratischen Programmierung untersucht, bei dem das Lösen des nichtlinearen Gleichungssystems als eine Optimierungsaufgabe betrachtet wird. Das Ziel ist durch die Minimierung der quadratischen Summe der Funktionswerte

$$\sum_1^n f^2(\mathbf{x}) \rightarrow 0 \quad (2.12)$$

die Lösung für \mathbf{x} zu finden.

Die oben genannte Methoden beruhen auf dem Ansatz, die Lösung für $F(\mathbf{x}) = 0$ zu bestimmen, indem die Schätzung der Unbekannten $\tilde{\mathbf{x}}$ iterativ verbessert wird. Daher ist die Jacobi-Matrix $J(\mathbf{x})$, die die erste partielle Ableitung von $F(\mathbf{x})$ enthält, nötig.

2.4.1 Newton-Verfahren

Das Newton-Verfahren wird oft angewendet, um ein nichtlineares Gleichungssystem zu lösen. Mit dem Newton-Verfahren [29] wird eine approximative Lösung für \mathbf{x} gesucht, die die Bedingung $\mathbf{x}: F(\mathbf{x}) = 0$ erfüllt. Der Vektor \mathbf{x} beinhaltet die Unbekannten eines Gleichungssystems $F(\mathbf{x})$ aus differenzierbaren Funktionen. Das Newton-Verfahren beginnt mit einer guten Näherung der Lösung und verbessert sie iterativ anhand folgender Gleichung:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - J^{-1}(\mathbf{x}_k) \cdot F(\mathbf{x}_k) \quad (2.13)$$

mit $J(\mathbf{x}_k)$ als Jacobi-Matrix. Eine Jacobi-Matrix enthält die erste partielle Ableitungen aller Gleichungen im Gleichungssystem $F(\mathbf{x})$. Dieser Schritt wird solange wiederholt, bis eine gegebene Genauigkeit der Lösung oder eine Abbruchbedingung erreicht ist. Ein Beispiel wäre $|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k| < \varepsilon$, mit ε als gewünschte kleinste Änderung der Unbekannten.

Das Konvergenzverhalten des Newton-Verfahren ist stark von der Startnäherung abhängig. Falls die Anfangswerte \mathbf{x}_0 weit von einer Lösung des Gleichungssystems liegt, kann das Verfahren divergieren. Außerdem darf die Jacobi-Matrix nicht singulär sein, da diese sonst nicht invertierbar ist, und somit kein Aktualisierungsschritt für das Newton-Verfahren existiert [30]. Die Berechnung der Jacobi-Matrix ist in der Praxis für großes Gleichungssystem ein aufwändiger Prozess, da für jede Unbekannte die Steigung der Funktionen um dem aktuellen Wert berechnet wird.

Invertierung der Jacobi-Matrix

Im Fall einer nicht quadratischen Jacobi-Matrix wird die sogenannte Pseudoinverse der Jacobi-Matrix berechnet. Eine Pseudoinverse einer Matrix ist die Verallgemeinerung der inversen Matrix, ihre erste Form von E. H. Moore [31] und Roger Penrose [32] beschrieben wurde.

Die Pseudoinverse einer Matrix wird auch die Moore-Penrose-Inverse einer Matrix genannt. Für eine Matrix $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$ ist ihre Moore-Penrose-Inverse eine eindeutig bestimmte Matrix $A^+ \in \mathbb{C}^{n \times m}$, die folgende Kriterien erfüllt [31], [33]:

1. $AA^+A = A$
2. $A^+AA^+ = A^+$
3. $(AA^+)^* = AA^+$
4. $(A^+A)^* = A^+A$

Die letzten zwei Kriterien setzen voraus, dass die Matrizen AA^+ und A^+A hermetisch sein sollen. Die Moore-Penrose-Inverse der Jacobi-Matrix $J(\mathbf{x}) \in \mathbb{C}^{n \times m}$ mit $n < m$ ist mit Hilfe der QR-Zerlegung [34] wie folgt konstruiert [35]:

$$J = QR \quad (2.14)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ \mathcal{O} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$J^+ = \begin{bmatrix} R_1^{-1} & \mathcal{O}^* \end{bmatrix} Q^* \quad (2.16)$$

mit \mathcal{O} als eine Nullmatrix mit der Dimension $(n - m) \times m$. Bei der QR-Zerlegung wird die Matrix J in das Produkt der Matrizen Q und R zerlegt. Die Matrix Q ist eine orthogonale Matrix und Matrix R ist eine obere Dreiecksmatrix.

In der Praxis wird die Berechnung des Verbesserungsschrittes bei dem Newton-Verfahren

$$\Delta \mathbf{x}_k = -J(\mathbf{x}_k)^{-1} F(\mathbf{x}_k) \quad (2.17)$$

oft aber durch Lösen des Gleichungssystem

$$J(\mathbf{x}_k) \Delta \mathbf{x}_k = -F(\mathbf{x}_k) \quad (2.18)$$

direkt berechnet. Mit Gleichung (2.16) eingesetzt in Gleichung (2.18) für reelle $J(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ und $f(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^m$ ergibt sich

$$\Delta \mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} R_1^{-1} & \mathcal{O} \end{bmatrix} Q^T F(\mathbf{x}_k). \quad (2.19)$$

2.4.2 Levenberg-Marquardt-Algorithmus

Der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LMA) wird oft benutzt, um nicht-lineare Probleme mit Hilfe der kleinsten Quadrate zu lösen. Der Algorithmus wurde zuerst von K. Levenberg [36] in 1944 vorgestellt, und später von D. W. Marquardt [37] wieder entdeckt.

Ähnlich wie das Newton-Verfahren ist LMA ein iteratives Verfahren. Anders als das Newton-Verfahren werden hier die Quadrate der Funktionen minimiert:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m} \|F(\mathbf{x})\|_2^2 = \min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m} \sum_{i=1}^m f_i(\mathbf{x})^2. \quad (2.20)$$

In jeder Iteration wird der Verbesserungsschritt anhand der Jacobi-Matrix mit einer Zusatzbedingung r_k berechnet. Das Problem wird dadurch linearisiert. Das Optimierungsproblem wird als folgendes Ersatzproblem formuliert [36]:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m} \|F(\mathbf{x}_k) + J(\mathbf{x}_k) \Delta \mathbf{x}_k\|_2^2 \quad (2.21)$$

$$\|\Delta \mathbf{x}_k\|_2^2 = \|\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k\|_2^2 < r_k. \quad (2.22)$$

Durch Einführung des Parameters r_k hat der LMA im Vergleich zu dem Newton-Verfahren ein besseres Konvergenzverhalten auch bei schlechten Anfangswerten. Der Parameter r_k definiert einen Suchbereich um die jetzige Schätzung, worin die Zwischenlösung als gute Repräsentation der Zielfunktion angenommen ist. Somit vermeidet LMA ungünstige Verbesserungsschritte und zwingt eine Verkleinerung der Funktionswerte $\|F(\mathbf{x}_k)\|^2$ in jeder Iteration [30]. Trotzdem ist für LMA und das Newton-Verfahren die Konvergenz nicht garantiert, da die Schrittweitenbeschränkung r_k nicht deterministisch ist.

2.4.3 Trust-Region-Verfahren

Das Trust-Region-Verfahren (TR) ist ein iteratives Verfahren zur Berechnung eines lokalen Minimums eines Gleichungssystems. Das Verfahren ist zwar mit dem LMA verwandt, aber es unterscheidet sich von LMA darin, eine deterministische Schrittweitenbeschränkung in jeder Iteration ermöglichen.

Die Iteration des Trust-Region-Verfahrens wird in zwei Schritte aufgeteilt. Zuerst wird eine Korrektur berechnet, die das zu lösende Problem minimiert. Statt eine Linearisierung des Problems wie beim LMA, werden die erste beide Terme der Taylorreihenentwicklung benutzt:

$$F(\mathbf{x}_k + \mathbf{s}) = F(\mathbf{x}_k) + J_k^T \mathbf{s} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T H_k \mathbf{s} \quad (2.23)$$

Das Teilproblem zum Berechnen der Korrektur \mathbf{s} lautet [38]

$$\min q(\mathbf{s}) = \min \left\{ \frac{1}{2} \mathbf{s}^T H \mathbf{s} + \mathbf{s}^T J \mid \|D\mathbf{s}\| \leq \Delta \right\}, \quad (2.24)$$

mit J als Jacobi-Matrix und H als Hesse-Matrix. Die Hesse-Matrix H enthält die zweiten partiellen Ableitungen des Gleichungssystems $F(\mathbf{x})$. D ist eine

diagonale Matrix zur Skalierung von \mathbf{s} und Δ ist der Trust-Region-Radius, der die Vertrauensbereiche der Korrektur definiert.

Nachdem die Korrektur \mathbf{s}_k in der k -ten Iteration berechnet ist, wird ihre Brauchbarkeit in dem zweiten Schritt überprüft. Es wird gleichzeitig entschieden, ob der Trust-Region-Radius verkleinert oder vergrößert werden. Dabei wird der Quotient

$$r_k = \frac{F(\mathbf{x}_k) - F(\mathbf{x}_k + \mathbf{s}_k)}{F(\mathbf{x}_k) - q_k(\mathbf{s}_k)} \quad (2.25)$$

berechnet, um das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Reduktion von $F(\mathbf{x})$ im Zähler zur vorhergesagten Reduktion im Nenner zu beschreiben [39].

Die aktuelle Korrektur \mathbf{s}_k wird akzeptiert, falls r_k in der Nähe von 1 ist, da das quadratische Modell q_k in dem Vertrauensbereich mit der Funktion $F(\mathbf{x})$ gut übereinstimmt. Ein $r_k \gg 1$ bedeutet eine stärkere Minimierung der Funktion $F(\mathbf{x})$ und der Punkt $\mathbf{x}_k + \mathbf{s}_k$ wird als brauchbar bezeichnet. Liegt r_k in der Nähe von 0, so wird die Korrektur \mathbf{s}_k verworfen, und Δ_k wird vergrößert.

Die Strategie des Trust-Region-Verfahrens, die Schrittweitenbeschränkung in jeder Iteration zu aktualisieren, führt zu einer deterministischen Korrektur der Lösung und ergibt damit einen Vorteil gegenüber LMA. In dieser Arbeit wird dieses Verfahren gegenüber LMA bevorzugt.

2.4.4 Innere-Punkte-Verfahren

Das Innere-Punkte-Verfahren (IPV) ist ein Optimierungsverfahren in der linearen und quadratischen Programmierung. Dieses Verfahren wurde als Konkurrenz des Simplex-Verfahrens entwickelt und sollte ein besseres Konvergenzverhalten für große dünn-besetzte Probleme aufweisen [40].

Außer seine Anwendung in der Optimierung kann das Verfahren auch zum Lösen von linearen und nichtlinearen Gleichungssystemen eingesetzt

werden. Eine wichtige Eigenschaft des Verfahrens ist die Möglichkeit, den Suchraum für die Lösung zu begrenzen [41]. Grundsätzlich kann das zu lösende Gleichungssystem mit der Suchraumbegrenzung wie folgt ausgedrückt werden:

$$f(\mathbf{x}) = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega \quad (2.26)$$

$$\Omega = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n \mid ug \leq \mathbf{x} \leq og\}, \quad (2.27)$$

mit ug und og als untere und obere Grenze.

Da es sich bei IPV um eine Minimierung oder eine Maximierung einer Zielfunktion handelt, muss das Gleichungssystem $F(\mathbf{x})$ zuerst als eine Funktion mit einem einzigen Funktionswert ausgedrückt werden. In dieser Arbeit wird die Summe der Quadrate der Funktionen genutzt:

$$f(\mathbf{x}) = \|F(\mathbf{x})\|_2^2 = \sum_{i=0}^m f_i(\mathbf{x})^2 \quad (2.28)$$

Die Randbedingungen $ug \leq \mathbf{x} \leq og$ wird durch die Einführung der sogenannten Schlupfvariable s (engl.: *slack variable*) von Ungleichungen in Gleichungen umgewandelt:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &\geq lb \\ \mathbf{x} - lb &\geq 0 \\ \mathbf{x} - lb - \mathbf{s}_{lb} &= 0 \\ \mathbf{x} &\leq ub \\ ub - \mathbf{x} &\geq 0 \\ ub - \mathbf{x} - \mathbf{s}_{ub} &= 0 \\ \mathbf{s}_{lb} \geq 0 &\quad , \quad \mathbf{s}_{ub} \geq 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Laut dem Stand der Technik gibt es unterschiedliche Definitionen des Innere-Punkte-Verfahrens [28], [42]. In dieser Arbeit wird die Version mit dem Logarithmischen-Barriere-Verfahren diskutiert, das durch Einführung logarithmischer Strafterme erzwingt, dass \mathbf{s} positiv ist.

Das Minimierungsproblem wird für $\mu > 0$ als

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{s}} F(\mathbf{x}) - \mu \sum_i^n \ln x_i, \quad (2.30)$$

mit den Randbedingungen in Gleichung (2.29) formuliert.

In jeder Iteration wird der Wert μ reduziert. Idealerweise konvergiert das Problem gegen $\mu = 0$, bei dem die Lösung des Ursprungsproblems gefunden ist [30]. Die Strafterme gewährleisten die globale Konvergenz des Verfahrens [30], [42].

2.5 Lösen von linearen Gleichungssystemen

Unter einem linearen Gleichungssystem versteht man eine Sammlung von zwei oder mehreren linearen Gleichungen $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ für die Unbekannten \mathbf{x} . Die Lösung des Gleichungssystems muss gleichzeitig alle Gleichungen erfüllen [26]. Ein lineares Gleichungssystem lässt sich in der Matrixform:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & & & \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.32)$$

für m Gleichungen und n Unbekannten zusammenfassen. Für den Fall $\mathbf{b} = \mathbf{0}$ hat man ein homogenes Gleichungssystem. Sonst handelt es sich um ein inhomogenes Gleichungssystem.

Die Lösbarkeit und die Lösungsmenge eines solchen Gleichungssystems kann mit dem (rang) der Matrix \mathbf{A} und der erweiterten Koeffizientenmatrix $(\mathbf{A}|\mathbf{b})$ überprüft werden. Ist $\text{rang}(\mathbf{A}) = \text{rang}(\mathbf{A}|\mathbf{b})$, ist das lineare Gleichungssystem laut Rouché-Frobenius-Theorem [43] genau lösbar.

Außerdem gilt für $r = \text{rang}(\mathbf{A})$:

1. Für $r = n$ ist die Lösung eindeutig,
2. für $r < n$ ist die Lösung nicht eindeutig mit $n - r$ Unbekannten als freie Parameter.

2.5.1 Methode der kleinsten Quadrate

Vorgestellt wurde das Verfahren im Jahr 1809 von Carl Friedrich Gauß, um die elliptische Laufbahn des Zwergplaneten Ceres zu aus wenigen Messpunkten zu berechnen [44]. Die Methode der kleinsten Quadrate versucht durch Minimierung der Fehlerquadrate $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2^2$, die Lösung für das Gleichungssystem zu berechnen.

Es wird das Minimierungsproblem in der Form der sogenannten Normalgleichungen umgewandelt:

$$\begin{aligned}\mathbf{Ax} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{A}^\top \mathbf{Ax} &= \mathbf{A}^\top \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &= (\mathbf{A}^\top \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b}\end{aligned}\tag{2.33}$$

Die Matrix $\mathbf{A}^\top \mathbf{A}$ ist positiv definit, sodass die Lösung \mathbf{x} ein Minimum ist [45]. Die Methode der kleinsten Quadrate setzt für eine gute Lösung des Gleichungssystem voraus, dass genug Messdaten vorhanden sind und die Abweichung der Messdaten zum Modell eine Normalverteilung annähert.

Das Vorkommen von Ausreißern kann das Ergebnis der Methode der kleinsten Quadrate beeinflussen. Mögliche Maßnahmen dagegen sind zum Beispiel die Detektion und Eliminierung der Ausreißer aus dem Gleichungssystem oder die Gewichtung der einzelnen Messwerte mit ihrem Residuen.

Dabei werden die Messungen mit großem Residuum weniger gewichtet und somit weniger zur Lösung des Gleichungssystems beitragen. Solche Verfahren werden als Verfahren gewichteter kleinster Quadrate bezeichnet [46].

2.5.2 Tikhonov-Regularisierung

Im Fall eines schlecht gestellten Gleichungssystems mit $\text{rang}(\mathbf{A}) < n$ hat das Gleichungssystem unendliche viele Lösungen. Beim Lösen solcher Gleichungssysteme wird oft eine Regularisierung eingesetzt, damit das Gleichungssystem eine spezielle Lösung ergibt. Ein bekanntes Regularisierungsverfahren ist die Tikhonov-Regularisierung, die von Andrey Tikhonov in 1966 vorgestellt wurde [47].

Es handelt sich bei der Tikhonov-Regularisierung um eine Modifikation des ursprünglichen Gleichungssystems mit einem sogenannten Regularisierungsterm. Das Minimierungsproblem von $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2$ wird:

$$\min \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2 + \|\Gamma\mathbf{x}\|^2 \quad (2.34)$$

mit $\Gamma = \alpha I$ und α als Regularisierungsparameter und I als Identitätsmatrix [48].

Die spezielle Lösung $\hat{\mathbf{x}}$ ist dann gegeben durch:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^\top \mathbf{A} + \Gamma^\top \Gamma)^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{b}. \quad (2.35)$$

Laut [49] bevorzugt die Tikhonov-Regularisierung die spezielle Lösung mit der kleinsten Norm. Mit geeigneter Auswahl des Regularisierungsparameters α kann man den Einfluss der Regularisierung einstellen.

3 Betrachtete Anwendungsbeispiele

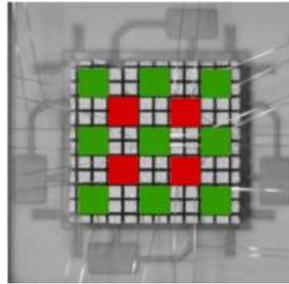
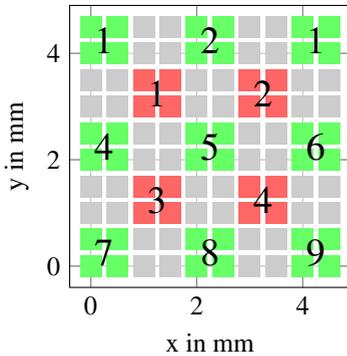
In diesem Abschnitt werden die in dieser Doktorarbeit betrachtete Ultraschallsysteme vorgestellt. Sie werden benutzt, um die vorgestellten Verfahren zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte bildgebender Ultraschallsysteme zu evaluieren.

3.1 3D-USCT-II

Das am Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektornik (IPE) entwickelte Verfahren der 3D-Ultraschall-Computertomographie (3D-USCT) am KIT hat das Ziel, hoch aufgelöste 3D-Bilder für die Brustkrebsfrüherkennung aufzunehmen und zu rekonstruieren. Das aktuelle System (3D-USCT-II) besitzt 2041 Ultraschallwandler, die in einem Halbellipsoid angeordnet sind. Diese Anordnung ist für eine räumlich wenig variable und isotrope 3D-Punktspreizfunktion innerhalb eines Halbellipsoid mit der Halbachsen von 5 cm und 10 cm optimiert [25].

Die Ultraschallwandler in dem aktuellen Aufbau sind in 157 so genannten Ultraschallwandlerarrays (TAS) mit jeweils 4 Sendern und 9 Empfängern gruppiert. Die Ultraschallwandler haben eine Mittenfrequenz von 2,5 MHz mit 50 % Bandbreite und einem Öffnungswinkel (-6 dB) bei 30° . Die Anordnung ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Das einzelne Ultraschallwandlerarray wird mit der Sende- und Empfangsstufe in einem Gehäuse zusammengebaut.

Die Halbellipsoidapertur des 3D-USCT-II-Geräts hat einen Durchmesser von 26 cm und eine Tiefe von 18 cm. Außerdem kann diese Apertur rotiert und in der Höhe verschoben werden, um zusätzliche virtuelle Position der



(a) Schema eines TAS-Arrays

(b) TAS

Abbildung 3.1: Die linke Abbildung stellt die Anordnung der Ultraschallwandler in einem Ultraschallwandlerarray (TAS) mit einem farbcodierten Beispiel in dem rechten Bild dar.

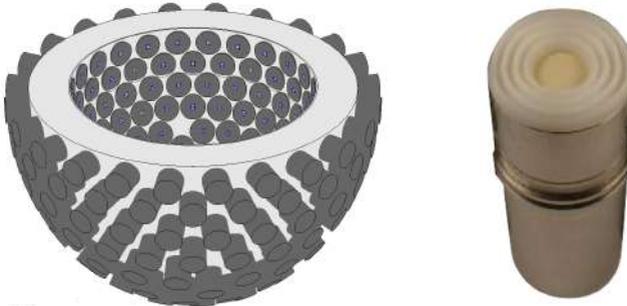


Abbildung 3.2: Die USCT-Apertur (links) und das TAS-Array in einem Gehäuse eingebaut (rechts)

Ultraschallwandler zu erzeugen. Abbildung 3.2 zeigt ein zusammengebautes TAS in einem Gehäuse und die 3D-USCT-Apertur.

Während eines Messvorgangs wird ein Sender über das DAQ-System adressiert und transmittiert ein Ultraschallsignal. Die ausgesendete Ultraschallwelle ist nicht fokussiert und breitet sich in Näherung als Kugelwelle

zu den Empfängern aus. An den Empfängern wird gleichzeitig die Signalaufnahme gestartet. Dieser Prozess wird für alle Sender wiederholt, danach kann die Apertur in die nächste Position gefahren werden, um weitere Messungen durchzuführen.

Die Positionsungenauigkeit der Ultraschallwandler zwischen dem aufgebauten System und dem Entwurf wurden aufgrund der Komplexität des Aufbaus nicht praktisch gemessen. Solche Abweichungen sind beispielsweise die Toleranz des Fertigungsprozesses bei der Herstellung der USCT-Apertur und die Verschiebung und Rotation des Ultraschallwandlerarrays bei der Montage in das Gehäuse.

Außerdem kann die Position der Ultraschallwandler nach einer Wartung verändert sein. Ein Fehler bei der Verkabelung ist zusätzlich nicht auszuschließen. Schließlich ist eine Expansion oder eine Schrumpfung der USCT-Apertur je nach Betriebstemperatur erwartet.

Laut Fertigungstoleranzen der Bohrmaschine liegt die axiale Genauigkeit der TAS-Positionierung und maximale Verdrehung in der 3D-USCT-Apertur bei $\pm 20\ \mu\text{m}$ und $\leq 0,93^\circ$. Zusätzlich ist eine Toleranz der axialen Positionierung im TAS-Gehäuse von $\pm 30\ \mu\text{m}$ erwartet. Weiterhin ist anzumerken, dass unsachgemäße Montage des TAS-Arrays in die Apertur den Anschlag zerstört, und zu größeren Winkeltoleranz führen kann.

Die Field Programmable Gate Arrays (FPGA) in dem DAQ-System werden mit einem Systemtakt von 20 MHz betrieben. Das Empfangssignal wird als A-Scan bezeichnet und wurde mit einer Abtastrate von 20 MHz und einer Abtastdauer von $300\ \mu\text{s}$ aufgenommen. Um die Datenmenge zu reduzieren, werden die A-Scans auf ein Drittel der ursprünglichen Länge, nämlich $1/3 \times 300\ \mu\text{s} / 10\text{MHz} = 1000$ Abtastpunkte bandpassunterabgetastet.

Aufgrund der großen Menge an eingebauten Ultraschallwandlern ist es unmöglich, das System manuell zu kalibrieren. Gleichzeitig ist es wegen der Bauart der Ultraschallwandler in 3D-USCT keine genaue Positionsmessung mit externen Werkzeugen ausführbar. Die möglichen Fehlerquellen des 3D-USCT-II-Geräts sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Fehlerquelle	Erwartete Fehlergröße
Fertigungstoleranz	$\leq 20 \mu\text{m}$
Mittelpunktverschiebung im TAS	$x, y \leq 1 \text{ mm}, z \leq 300 \mu\text{m}$
Radiales Offset einzelner TAS	$\leq 30 \mu\text{m}$
Rotation der TAS	$\leq 0,93^\circ$
Wärmeausdehnungskoeffizient des Polyoxymethylen (POM-C)	$1,1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} \equiv 28,6 \mu\text{m K}^{-1}$
Verzögerung im digitalen Filter	$\approx 1,4 \mu\text{s} \equiv 2,1 \text{ mm bei } 25^\circ\text{C}$
Temperaturoffset im TAS	$\approx 3,0^\circ\text{C} \equiv 1,5 \text{ mm bei } 25^\circ\text{C}$
Temperaturfehler im TAS	$\pm 2,4^\circ\text{C} \equiv 1,2 \text{ mm bei } 25^\circ\text{C}$
Potentielle Jitter in der Elektronik	$20 \text{ MHz} \equiv 76 \mu\text{m bei } 25^\circ\text{C}$

Tabelle 3.1: Fehlerquellen und ihre erwartete Größenordnung in 3D-USCT-II

3.2 Luftultraschallarray unter extremen Temperaturbedingungen

Es handelt sich hier um das Big Sonic Ski von der Firma MOBA Mobile Automation AG, das bei der Straßenfertigung die Qualität der Oberfläche ständig kontrollieren sollte[50]. Das Ultraschallarray wird an dem Straßenfertiger angebaut und liefert Abstandmessung zur Asphaltoberfläche. Das Ziel der Messung ist es, die Dicke des frisch aufgetragenen Asphalts zu bestimmen.

Die größte Herausforderung dabei ist die hohe Temperatur der Asphaltoberfläche. Während des Messvorgangs breitet sich die Ultraschallwelle durch das Medium mit großen Temperaturgradienten aus. Da keine direkte Messung der Oberflächentemperatur möglich ist und der Temperaturgradient unbekannt ist, kann es zu großen Fehlern bei der Ermittlung des Abstandes führen.



Abbildung 3.3: Sonic Ski am Straßenfertiger zur Schichtdickenmessung

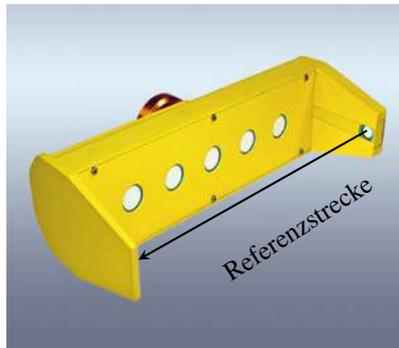


Abbildung 3.4: Die Abbildung zeigt das Big Sonic Ski von der Firma MOBA Mobile Automation AG. Der zusätzlich Ultraschallwandler dient zur Schätzung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der Referenzstrecke. Abbildung entnommen aus [50].

Typischerweise liegt die Oberflächentemperatur bei $\approx 120^\circ\text{C}$. Die Wärmeabstrahlung an der Asphaltoberfläche bildet einen Temperaturgradienten oberhalb der Oberfläche. Um aus der Schalllaufzeit über eine Referenzstrecke die momentane Temperatur im Luft herzuleiten, ist das Big Sonic Ski mit einem zusätzlichen Ultraschallwandler in einer horizontalen Ausrichtung angebaut.

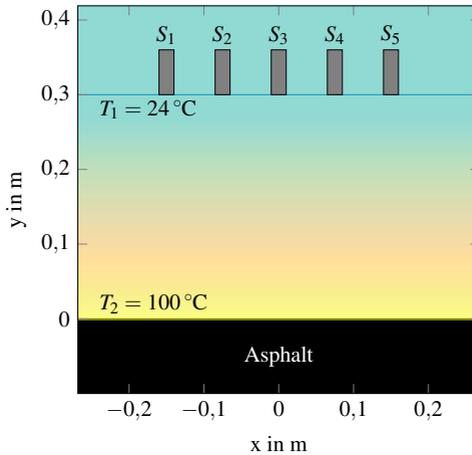


Abbildung 3.5: Die Abbildung zeigt schematisch den Messaufbau des Luftultraschallarrays unter dem Temperaturgradienten über die Asphaltoberfläche.

Anhand der gemessenen Temperatur soll die Schallgeschwindigkeit berechnet werden, um die Genauigkeit der Abstandmessung zur Asphaltoberfläche zu verbessern. Abbildung 3.5 zeigt schematisch den Messaufbau.

Trotz der Kompensation mit der Referenzmessung kann die Abstandmessung mit dem bestehenden Messaufbau einen Fehler von bis zu 2 cm haben, der abhängig von dem Abstand des Wandler-Arrays zur Asphaltoberfläche ist. Je größer der Abstand der Messposition zur Oberfläche ist, desto inhomogener kann die Temperaturverteilung sein. Dadurch ist die gemessene Schallgeschwindigkeit entlang der Referenzstrecke nicht für die Messstrecke zur Asphaltoberfläche gültig, weil die Referenzstrecke eine tiefere Temperatur als der Bereich unmittelbar oberhalb der Asphaltoberfläche hat.

Andererseits besteht bei einem kleineren Messabstand das Risiko, die Ultraschallwandler durch die Wärme zu beschädigen. Typischerweise wird das Sensorarray auf eine Messhöhe von ca. 20 bis 30 cm an dem Straßenfertiger angespannt.

3.3 Bildgebendes Luftultraschallsystem (ABUS)

Das bildgebende Luftultraschallsystem (ABUS) wurde im Rahmen dieser Doktorarbeit aufgebaut, um ein Reflexionstomographensystem mit Luftultraschall zu realisieren. Am Beispiel dieses Systems sollen die Verfahren zur Optimierung der Wandleranordnung und Selbstkalibrierung evaluiert werden. Außerdem wird mit dem System die Einsetzbarkeit der Bildgebung mit Luftultraschall in realistischen industriellen Anwendungen zur Klassifizierung und Lokalisierung mehrerer Objekte untersucht. Zur Bildgebung setzt das bildgebende Luftultraschallsystem die SAFT ein.

Das System besteht aus sechzehn Ultraschallwandler UC2000-30GM von der Firma Pepperl+Fuchs GmbH. Die Ultraschallwandler haben eine Mittelfrequenz von 200 kHz mit einer Bandbreite von circa 20 kHz. Die erwartete räumliche Auflösung δ ist laut [5] approximiert durch:

$$\delta \approx \frac{c}{\Delta f}. \quad (3.1)$$

Die Variable c ist die Schallgeschwindigkeit in Luft und die Variable Δf die Bandbreite. Für eine Schallgeschwindigkeit bei ca. 343 ms^{-1} in Luft liegt die Auflösung bei 1,7 cm.



Abbildung 3.6: Aufbau des bildgebenden Luftultraschallsystems



Abbildung 3.7: Die linke Abbildung zeigt den Ultraschallwandler in einer Halterung. Die Halterung ermöglicht die Positionierung des Wandlers auf 5 cm und 10 cm Höhe. Das DAQ-System NI USB-6363 von National Instruments™ steht in der rechten Abbildung.

Für die Ansteuerung der Wandler und die Signalaufnahme wird das DAQ-System NI USB-6363 von National Instruments™ verwendet. Das System verfügt über 32 Analogeingänge mit einer Abtastrate von 2 MHz im Einzelkanalbetrieb. Die Eingänge haben eine Auflösung von 16 Bit und können Spannungen im Bereich ± 10 V abtasten. Gleichzeitig hat das NI USB-6363 vier Analogausgänge und 48 Digital-I/O-Leitungen. Abbildung 3.7 zeigt den Ultraschallwandler und das DAQ-System.

Jedem Wandler wird ein Analogeingang und eine Digital-I/O-Leitung zugeordnet. Die Digital-I/O-Leitung dient zur Ansteuerung des Ultraschallwandlers, um ein Ultraschallsignal auszusenden. Um die Wandler mit dem DAQ-System zu verbinden, wurde eine Adapterplatine gefertigt. An jedem Ultraschallwandler sind ein linear verstärktes Empfangssignal und die Einhüllende dieses Signals zur Verfügung gestellt. Die Einhüllende wurde mit dem SA614 Verstärker der Firma NXP¹, der einen Quadraturdemodulator besitzt, erzeugt. Die beide Signale können über einen Jumper auf der Adapterplatine ausgewählt werden.

¹ <https://www.nxp.com/products/rf/rf-mixers/low-power-fm-if-systems/low-power-fm-if-system:SA614A>

4 Selbstkalibrierung

In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur Selbstkalibrierung bildgebender Ultraschallsysteme präsentiert. Bei der Selbstkalibrierung handelt es sich um die automatische Erkennung und Kompensation möglicher Fehlerquellen im System.

4.1 Stand der Technik

In folgenden werden bisherige Ansätze zur Kalibrierung bildgebender Ultraschallsysteme am Beispiel der 3D-USCT-I [51], des SoftVue Systems [52] und des MUBI-Systems [53] vorgestellt.

4.1.1 Kalibrierung des 3D-USCT-I-Systems

Zur Selbstkalibrierung des 3D-USCT-I wurde in 2009 von Adam Filipík in seiner Dissertation mit dem Thema „*Calibration of an Ultrasonic Transmissive Computed Tomography System*“ [51] ein Verfahren vorgestellt, das sich mit der Kalibrierung der Position der Ultraschallwandler beschäftigt.

Die 3D-USCT-I hat eine zylindrische Apertur mit einem Durchmesser von 18 cm und eine Höhe von 15 cm. Ähnlich zu der aktuellen Version wurden 1920 Ultraschallwandler in 48 Ultraschallwandlerarrays (TAS) gruppiert. Insgesamt sind 8 Sender und 32 Empfänger in einem TAS eingebaut. Diese Apertur kann rotiert werden, um zusätzliche virtuelle Wandlerpositionen zu erzeugen. Die Apertur ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

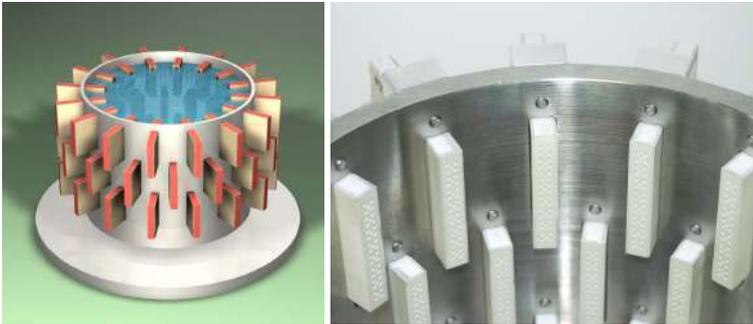


Abbildung 4.1: Die linke Abbildung stellt die Apertur der Vorgängerversion von 3D-USCT dar. In der rechten Abbildung ist der Aufbau der Ultraschallwandlerarray gezeigt.

Konzept

Für die Kalibrierung nutzte Adam Filipik eine sogenannte Leermessung, bei der die USCT-Apertur lediglich mit Wasser gefüllt ist. Anhand der detektierten Laufzeiten von den Sendern zu den Empfängern sollten die Positionen der Ultraschallwandler und die individuelle Zeitverzögerung im System gleichzeitig kalibriert werden. Das Ziel war es, die Positionen und Zeitverzögerungen zu finden, die die Differenz zwischen der berechneten und gemessenen Laufzeiten minimieren.

Methode

Laufzeitgleichung In [51] wird die Laufzeitgleichung *computed time-of-arrival* (CTOF) genannt:

$$\text{CTOF}_{sr}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r) = \frac{\sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2}}{v} + \tau_s + \tau_r, \quad (4.1)$$

mit $\mathbf{x}_s = [x_s, y_s, z_s, \tau_s]$ und $\mathbf{x}_r = [x_r, y_r, z_r, \tau_r]$ als Vektoren der unbekanntenen Ultraschallwandlerpositionen und der Systemverzögerungen. Die Variable v

steht für die Schallgeschwindigkeit im Wasser. In [51] wird sie als bekannter Parameter angenommen.

ITE- und TAS-Ansätze Es wird für jede SEK die normierte Differenz zwischen CTOF und der gemessenen Laufzeit (MTOF) minimiert:

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{F}(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x}} \frac{1}{2} \|\text{CTOF} - \text{MTOF}\|^2, \quad (4.2)$$

mit $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_r]$. Dieses Verfahren wurde *Individual Ultraschallwandler Element* (ITE) Ansatz genannt. Zum Lösen des Gleichungssystems wurde das Newton Verfahren und Levenberg-Marquardt-Verfahren untersucht.

Um das Konvergenzverhalten des Gleichungssystems zu untersuchen und die Anfälligkeit des Verfahrens gegenüber Messfehler in der Laufzeitdetektion zu verbessern, wurde der ITE-Ansatz mit der zusätzlichen bekannten Merkmales des Systems erweitert. Dabei wurde die Anordnung der Ultraschallwandler innerhalb einem TAS benutzt, um zusätzliche Randbedingungen in das Gleichungssystem einzuführen. Dieser Ansatz wurde *Ultraschallwandler Array System* (TAS) Ansatz genannt.

Das Gleichungssystem wird statt mit der Position einzelner Ultraschallwandler mit der Position und Orientierung des TAS als Unbekannte formuliert. Dadurch wurde die Anzahl von Unbekannten im Vergleich zu dem ITE-Ansatz von 7680 auf 2208 für die gesamte USCT-Apertur reduziert. Trotz der Reduzierung von Unbekannten blieb das Gleichungssystem schlecht gestellt, da der Rang des Gleichungssystems um 7 unter der Anzahl von Unbekannten liegt.

Stabilisierung durch Verankerung Aufgrund des Rangdefizits hat das Gleichungssystem beliebig viele Lösungen. Um eine spezielle Lösung zu bekommen, wurden die Position mit einer ausgewählten Untermenge der Ultraschallwandler verankert. Somit werden die Anzahl der Unbekannten weiter reduziert. In der Dissertation hat Adam Filipík ebenfalls eine Unter-

suchung auf Basis von sogenanntem *Dilution of Precision* (DOP) durchgeführt, um die optimierte Ultraschallwandler für die Verankerung zu finden.

Ergebnisse

Anwendungen des vorgestellten Kalibrierungsverfahrens auf echter USCT-Daten haben gezeigt, dass der Ansatz aufgrund großer Konditionszahl [54] der Gleichungssysteme wenig funktioniert hat. Eine Erklärung für die schlechte Kondition ist die limitierte Anzahl von Signalen aufgrund des kleinen Öffnungswinkels der Ultraschallwandler, sowie Messfehler bei der Laufzeitdetektion.

In der Dissertation wurde angegeben, dass eine Genauigkeit der Positionen ≤ 1 mm erreicht werden könnte, solange das Residuum des Gleichungssystems kleiner als 2×10^{-7} ist. In der Simulation hat der ITE-Ansatz, der einzelnen Ultraschallwandler im System getrennt kalibriert, im rauschfreien Fall eine Genauigkeit von 1×10^{-7} m erreicht. Die Genauigkeit des TAS-Ansatzes, der die Ultraschallwandler nach ihrer TAS-Gruppierung kalibriert, lag für die gleiche Simulation bei 1×10^{-8} m. Es wurde nicht berichtet, welche Genauigkeit beide Ansätze mit echten Daten erreicht wurde.

4.1.2 Kalibrierung eines Ring-Ultraschallarrays

In der Firma Delphinus Medical Technologies, Inc., einer Ausgründung des Karmanos Cancer Institutes (KCI) in Detroit, wurde ein Ultraschall-Tomographiesystem namens SoftVue™ mit einem ringförmigen Ultraschallarray entwickelt. In [52] wurde ein Verfahren zur Selbstkalibrierung des Systems vorgestellt.

Laut [52] sind die Ultraschallwandler regelmäßig auf einem Ring mit einem Durchmesser d verteilt. Anders als bei 3D-USCT-II arbeitet jeder Ultraschallwandler in dem System gleichzeitig als Sender und Empfänger. Abbildung 4.2 zeigt den schematischen Aufbau des Systems. Das Verfahren

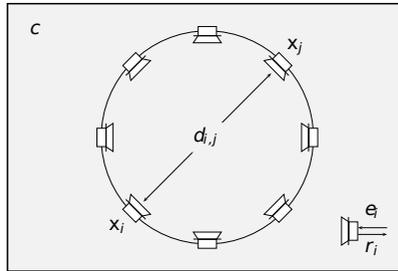


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau des Ultraschallsystems am KCI mit einer Ringform. Abbildung entnommen aus [52].

arbeitet ebenfalls mit der Minimierung der Differenz zwischen gemessener und berechneter Laufzeit.

Problembeschreibung

Das Ziel des vorgestellten Verfahrens ist eine gleichzeitige Kalibrierung der Position, Sende- und Empfangsverzögerung und Schallgeschwindigkeit im Medium. Die gemessene Laufzeit $m_{i,j}$ zwischen der i -ten und j -ten Ultraschallwandler ist gegeben durch:

$$m_{i,j} = t_{i,j} + e_i + r_j, \quad (4.3)$$

mit e_i als Sendeverzögerung und r_j als Empfangsverzögerung. Die $t_{i,j}$ ist die direkte Laufzeit des Ultraschallsignals zwischen der Ultraschallwandler.

Es wurde angenommen, dass das Medium homogen ist, und somit eine konstante Schallgeschwindigkeit hat. Der euklidische Abstand $d_{i,j}$ ist durch $d_{i,j} = c \cdot t_{i,j} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|$. Es werden die euklidischen Abstände zwischen allen Ultraschallwandler in einer Distanzmatrix \mathbf{D} zusammengefasst.

Das System wird durch die Minimierung der quadratischen Differenz zwischen der gemessenen und berechneten Laufzeitmatrizen kalibriert:

$$\min_{c, \mathbf{e}, \mathbf{r}, \mathbf{x}_i} \|\mathbf{M} - \hat{\mathbf{M}}\|^2 = \min_{c, \mathbf{e}, \mathbf{r}, \mathbf{x}_i} \|c^{-1}\mathbf{D} + \mathbf{e}\mathbf{1}_n^T + \mathbf{1}_n\mathbf{r}^T - \hat{\mathbf{M}}\|^2. \quad (4.4)$$

Die Matrix $\hat{\mathbf{M}}$ beinhaltet die gemessenen Laufzeiten.

Kalibrierungsstrategie

Das Verfahren nimmt an, dass durch eine gute initiale Schätzung der Matrix \mathbf{D} die Schallgeschwindigkeit und die Verzögerungen gut schätzbar sind. Außerdem werden fehlerhafte oder fehlende Elemente in der Distanzmatrix mit Kenntnisse über die Wandler-Positionen geschätzt. Wenn man die Matrix \mathbf{D} quadriert, erhält man eine Matrix mit folgender Eigenschaften:

1. Die Matrix ist symmetrisch.
2. Die Elemente der Hauptdiagonalen sind Nullen.
3. Die Elemente sind positiv.
4. Die Matrix hat einen maximalen Rang von 4.

Mit Hilfe des sogenannten „*Matrix Denoising*“ können Messfehler in der Matrix \mathbf{D} korrigiert werden.

Ergebnisse

In [52] wurde das Verfahren in Simulationen und mit experimenteller Daten einer Leermessung getestet. Ein Beispielkalibrierung aus der Veröffentlichung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Es wurde qualitativ gezeigt, dass die rekonstruierte Schallgeschwindigkeit nach der Verzögerungs- und Positionskalibrierung eine homogene Verteilung darstellt.

Laut [52] ist das Verfahren in der Lage, eine Positionsverschiebung in der Größe von 0,01 mm aufzulösen. Es wurde gezeigt, dass die Kalibrierungs-

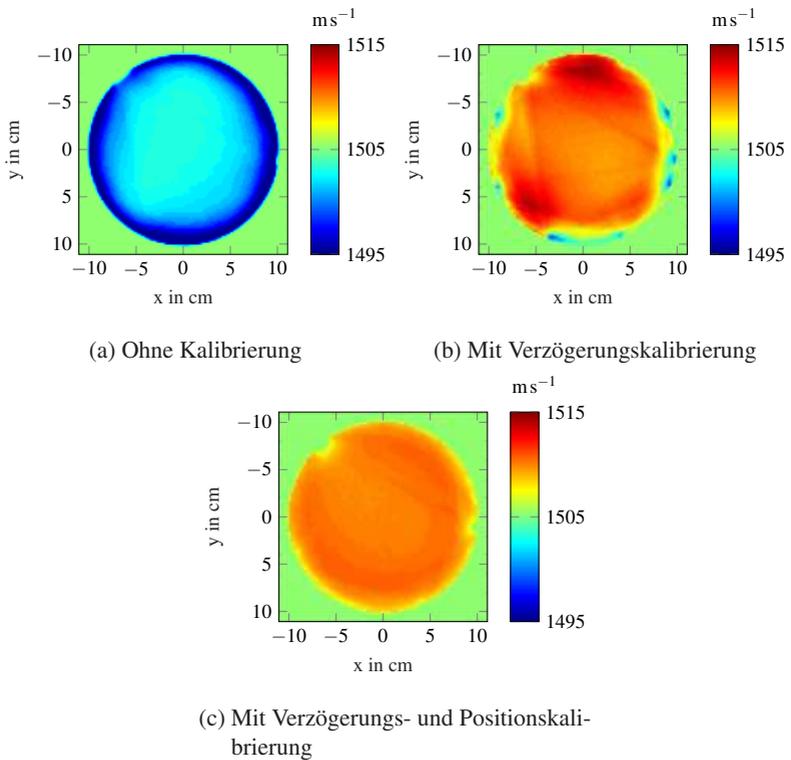


Abbildung 4.3: Die Abbildungen zeigen die rekonstruierten Schallgeschwindigkeitsbilder ohne und mit der Kalibrierung des SoftVue-Systems. Das rekonstruierte Bild nach der Kalibrierung in (c) zeigt die erwartete homogene Verteilung der Schallgeschwindigkeit in der Leermessung. Abbildung adaptiert aus [52].

genauigkeit stark von den Messfehlern abhängig ist. Daher ist es nötig, die detektierte Laufzeiten zuerst zu entrauschen.

Das angewandte „*Matrix Denoising*“ zur Schätzung der fehlenden Elemente in der Distanzmatrix verbessert laut [52] das Konvergenzverhalten der Kalibrierung, wurde allerdings nur für eine Wandleranordnung in einem Kreis evaluiert.

In [55], [56] wurde ein ähnliches Kalibrierungsverfahren für die Wandler-Positionen von Parhiskar veröffentlicht. Es wurde anhand Simulationen gezeigt, dass die Kalibrierungsgenauigkeit von den Laufzeitfehler in Matrix **D** anhängig ist. Je größer die Varianz der Fehler, desto ungenauer wird das Kalibrierungsergebnis. Außerdem zeigten die Simulationen, dass mit steigender Anzahl von SEK der Einfluss der Laufzeitfehler reduziert wird.

Beide Verfahren setzen ein homogenes Schallverteilung während der Kalibrierung aus, und die Ultraschallwandler sind sowohl Sender als auch Empfänger. Diese Annahme limitiert die direkte Einsetzbarkeit für Ultraschallsysteme wie das 3D-USCT-II-Gerät mit getrennten Sender und Empfänger.

4.1.3 Kalibrierung des MUBI-Systems

Das „Multimodal Ultrasound Breast Imaging“ System (MUBI) wurde an der Universität Complutense Madrid entwickelt [53]. Das System besitzt zwei lineare Ultraschallarrays mit insgesamt 128 Ultraschallwandlerelementen.

Die Ultraschallwandler haben eine Mittenfrequenz von 3,2 MHz und eine Bandbreite von 50 %. Die Ultraschallarrays befinden sich in einer Wassertank mit einem Radius von 100 mm zur Hauptachse und können unabhängig voneinander mit einer Winkelauflösung von $0,1^\circ$ rotiert werden. Abbildung 4.4 stellt das MUBI-System dar.

Methode

In [57] wurde ein Kalibrierungsmethode für das MUBI-System vorgestellt. Das Ziel der Kalibrierung ist die Schallgeschwindigkeit im Wasser und die genaue Positionierung der Ultraschallwandlerelementen zu ermitteln.

Es wurde angenommen, dass die Wandlerpositionen innerhalb eines Arrays einen maximalen Fehler von ein Zehntel der benutzten Wellenlänge betragen. Außerdem ist der Rotationsmechanismus der beiden Arrays aus-

reichend genau. Aufgrund dessen wird in der Kalibrierung lediglich der Radius des Arrays zur Hauptachse ermittelt.

Der Kalibrierungsprozess wird in zwei Schritten durchgeführt. Es wird zuerst die Schallgeschwindigkeit im Wasser kalibriert, gefolgt durch die Positionskalibrierung. Im Vergleich zur Kalibrierungsmethoden in den vorherigen Abschnitten werden präzise gebaute Phantome benutzt.

Schallgeschwindigkeitskalibrierung

Für die Schallgeschwindigkeitskalibrierung wurde ein Phantom aus zwei parallel positionierten Kupferdrähten gebaut. Die Kupferdrähte haben einen Durchmesser von 0,1 mm. Der Abstand zwischen den Drähten ist genau bekannt.

Während des Kalibrierungsvorgangs wird ein Wandlerelement aus einem Array in Puls-Echo-Betrieb betrieben. Aus dem aufgenommenen Signal werden die Echos für die Reflexion des Ultraschallsignals an den beiden Drähten detektiert und das Zeitintervall zwischen beiden Echos gemessen. Das Array wird weiter rotiert, bis dieses Zeitintervall maximiert ist.

An dieser Arrayposition sind das Wandlerelement und die zwei Drähte unter der Annahme von begrenzter Winkelauflösung des Schrittmotors und

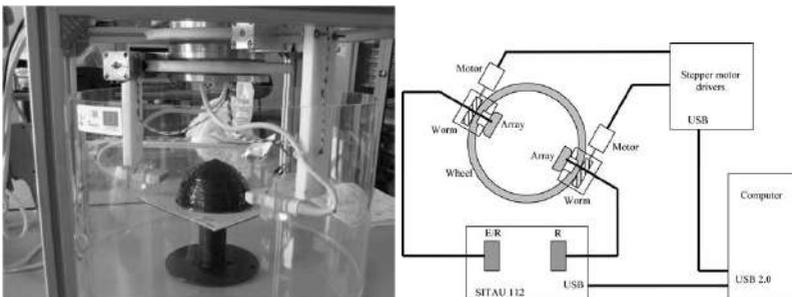


Abbildung 4.4: MUBI-System. Abbildungen entnommen aus [57].

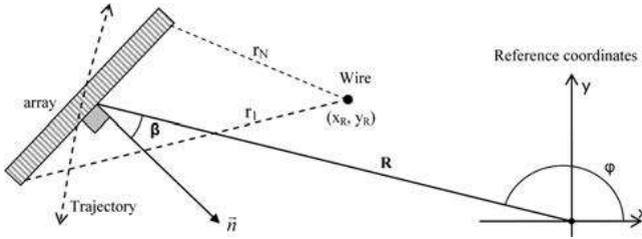


Abbildung 4.5: Abbildung zeigt schematisch die Positionskalibrierung des Arrays in MUBI. Abbildung entnommen aus [53].

begrenzter Genauigkeit des Abstands zwischen den Drähten in einer Linie ausgerichtet. Die Schallgeschwindigkeit ist dann gegeben durch:

$$c = \frac{2 \cdot s}{t}, \quad (4.5)$$

mit s als Abstand zwischen den Drähten und t das Zeitintervall. Es wird bei dieser Kalibrierungsmethode eine homogene Schallgeschwindigkeitsverteilung im Wasser angenommen.

Positionskalibrierung

Für die Positionskalibrierung wird ein Phantom mit einem Kupferdraht verwendet. Der Draht hat einen Durchmesser von 0,1 mm. Während der Kalibrierung wird dieses Phantom an einer willkürlichen Position (x_R, y_R) in der Messapertur platziert.

Die Positionskalibrierung berechnet den Radius R jeweiliges Arrays zur Hauptachse und den Winkel β zwischen der Normale des Arrays \vec{n} und dem Vektor vom Mittelpunkt des Arrays zur Hauptachse R . Abbildung 4.5 stellt schematisch den Aufbau für die Positionskalibrierung eines Arrays in MUBI dar.

Für das i -te Element in dem Array ist der Abstand zum Draht gegeben durch:

$$r_i^2 = (x_i - x_R)^2 + (y_i - y_R)^2 = \left(\frac{c \cdot t_i}{2}\right)^2, \quad (4.6)$$

mit t_i als detektierte Laufzeit des Echos mit diesem Wandlerelement im Puls-Echo-Betrieb und c die kalibrierte Schallgeschwindigkeit.

Gleichzeitig lassen sich die x - und y -Koordinaten des i -ten Elements mit folgenden Gleichungen berechnen:

$$x_i = R \cos \phi + \left(i - \frac{N-1}{2}\right) d \cos \left(\phi - \beta - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.7)$$

$$y_i = R \sin \phi + \left(i - \frac{N-1}{2}\right) d \sin \left(\phi - \beta - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.8)$$

mit $1 \leq i \leq N$. Der Winkel ϕ ist die Winkelposition des Arrays und wird als genau bekannt angenommen. N steht für die Anzahl der Wandlerelemente in einem Array. Die Variable d ist der Abstand zwischen den Wandlerelementen.

Ersetzt man die Gleichung (4.7) und (4.8) in Gleichung (4.6), erhält man ein Gleichungssystem mit N Gleichungen für vier Unbekannte (R, β, x_R, y_R). Um das Kalibrierungsergebnis zu verbessern, wurde in [57] empfohlen, die Messungen bei einer andere Position des Phantoms und Winkel ϕ zu wiederholen. Empirisch wurde gefunden, dass Messungen bei acht Winkelpositionen und vier Drahtpositionen reproduzierbare Resultate ergeben.

Anwendbarkeit auf anderen Ultraschallsysteme

Das Kalibrierungsverfahren für das MUBI-System hat eine limitierte allgemeine Einsetzbarkeit auf anderen Ultraschallsysteme, da das Verfahren speziell für die Wandleranordnung im MUBI entwickelt wurde. Die Kalibrierung mit reflektierten Ultraschallwellen am Kalibrierungsobjekt kann für Ultraschallsysteme wie zum Beispiel das Luftultraschallarray in Abschnitt

3.2 interessant werden. Allerdings ist die Genauigkeit der Schallgeschwindigkeitskalibrierung von der Präzision des Kalibrierungsobjektes abhängig.

4.1.4 Zusammenfassung der betrachteten Kalibrierungsverfahren

Abbildung 4.6 fasst die Eigenschaften der betrachteten Kalibrierungsverfahren für bildgebende Ultraschallsysteme mit unterschiedlichen Aufbauten zusammen. Die drei vorgestellten Verfahren gehen von einem homogenen Medium aus, d.h. eine homogene Schallverteilung im Medium. Diese erfüllt nicht die Anforderung im Abschnitt 2.1.3, dass eine hohe Lokalisierungsgüte des Ultraschallsystems eine genau Schallgeschwindigkeit voraussetzt.

Die Kalibrierungsverfahren in [51] und [52] für den 3D-USCT-I und das SoftVue-System benutzen die Laufzeit des transmittierten Ultraschallsignals, um die Fehlerquellen zu kalibrieren. Das Verfahren in [57] beruht im Gegensatz auf die Reflexionssignale an speziell für die Kalibrierung angefertigten Referenzobjekten.

Alle Kalibrierungsverfahren wurden mit simulierten und experimentellen Daten evaluiert. Dabei konnte die Kalibrierungsmethode für den 3D-USCT-I mit den Experimentdaten das System aufgrund des kleinen Öffnungswinkels der Ultraschallwandler nicht erfolgreich kalibrieren.

Die in dieser Doktorarbeit vorgestellte Selbstkalibrierungsmethoden für bildgebende Ultraschallsysteme bauen auf dem Stand der Technik auf und enthalten die folgenden Verbesserungen:

1. allgemeine Einsetzbarkeit
2. Berücksichtigung inhomogenes Mediums
3. getrennte Kalibrierung einzelner Fehlerquellen
4. automatische Detektion fehlerhafter Komponenten
5. Vorhersage der Kalibrierungsgenauigkeit

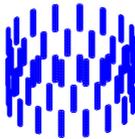
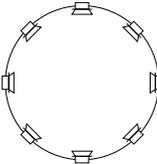
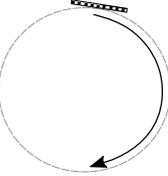
	3D-USCT-I	SoftVue	MUBI
Aufbau			
Inhomogenes Medium			
Trennung der Fehlerquellen			
Anwendung auf Messdaten			
3D			

Abbildung 4.6: Eigenschaften der betrachteten Kalibrierungsmethoden als Stand der Technik

Die in dieser Doktorarbeit entwickelte Selbstkalibrierungsmethode für bildgebende Ultraschallsysteme beruht auf den Laufzeiten der transmittierten Ultraschallsignale zwischen verfügbaren Sender und Empfänger in einer Leermessung. Die Laufzeitgleichungen werden in einem Gleichungssystem zusammengefasst:

$$\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\| = c_{ij} \cdot (t_{ij} - \tau_{s_i} - \tau_{r_j}). \quad (4.9)$$

Die Vektoren \mathbf{s}_i und \mathbf{r}_j sind Positionen von Sender i und Empfänger j in einem dreidimensionalen Koordinatensystem. Die Ankunftszeit des Ultraschallsignals entlang des direkten Weges zwischen den beiden Ultraschallwandlern wird als t_{ij} bezeichnet. Die Schallgeschwindigkeit c_{ij} entlang dieses Pfades wurde aus der hier als bekannt angenommenen Temperaturverteilung im Medium berechnet. Die Verzögerungen beim Senden und Emp-

fangen des Signals sind als τ_{s_i} und τ_{r_j} modelliert. Diese Verzögerungen sind für jeden Ultraschallwandler spezifisch und zeitlich konstant.

Die Selbstkalibrierung beginnt mit einer Schätzung der Fehlerquellen und optimiert sie bis die Differenz zwischen den simulierten Laufzeiten aller ausgewählten SEK und den detektierten Laufzeiten minimiert ist. Es handelt sich um ein iteratives Lösen des Gleichungssystems.

Um die Fehlerquellen getrennt zu betrachten, verfolgt die Selbstkalibrierung dem Ansatz, die Fehlerquellen nacheinander zu kalibrieren. In jedem Kalibrierungsschritt wird angenommen, dass andere Fehlerquellen betragsmäßig wesentlich kleiner als die betrachtete Fehlerquelle sind und somit vernachlässigbar sind. Die Reihenfolge, in der die Fehlerquellen nacheinander kalibriert werden, wird anhand von Vorkenntnissen über das System festgelegt.

Die Genauigkeit der Kalibrierung ist von den detektierten Laufzeiten abhängig. Daher spielt die angewandte Methode zur Signaldetektion eine große Rolle. Mögliche Fehler bei der Laufzeitdetektion sind ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und Störungen wie zum Beispiel elektromagnetische Einstrahlung in der Signalleitung. Weiterhin können Jitter und andere zufällige Verzögerung im System zu einer Unschärfe der gemessenen Laufzeiten führen. In dem folgenden Kapitel werden unterschiedliche Methoden zur Signaldetektion in bestehenden Literaturen vorgestellt und evaluiert.

4.2 Laufzeitdetektion

Im diesem Abschnitt werden vier Verfahren zur Signaldetektion aus dem Stand der Technik miteinander verglichen. Das Ziel ist ein Verfahren zu identifizieren, mit dem sowohl eine hohe Genauigkeit als auch eine hohe Stabilität der Signaldetektion erreicht wird.

Unter einer hohen Genauigkeit der Signaldetektion versteht man eine kleine Abweichung der detektierten Signallaufzeit zur tatsächlichen Lauf-

zeit. Ein Verfahren mit einer hohen Stabilität ist in der Lage unabhängig von der Signalqualität den gleichen Messwert wiederzugeben.

Die Untersuchung fokussiert sich lediglich auf die Detektion von Transmissionssignale zwischen den Sendern und Empfängern und nicht auf die Trennbarkeit mehrerer Ultraschallechos. Die Genauigkeit der Verfahren wird mit der Abweichung der detektierten Laufzeiten zur simulierten Laufzeiten gemessen. Die Standardabweichung der Detektionsfehler beschreibt die Stabilität der Verfahren.

4.2.1 Detektion mit einfachem Schwellwertverfahren

Ein Verfahren mit dem geringsten Aufwand ist die Signaldetektion anhand einer Schwelle. Dabei wird die Einhüllende des Empfangssignals mit einem Komparatorschwellwert verglichen. Sobald die Amplitude der Einhüllende des Signals den Schwellwert überschreitet, wird die Zeitdifferenz zum Sendezeitpunkt als Signallaufzeit registriert.

Mathematisch kann die Einhüllende berechnet werden, in dem das Empfangssignal $s(t)$ zuerst wie in Gleichung (4.10) Hilbert-transformiert wird [58]. Im diskreten Fall kann diese wie in Gleichung (4.11) vereinfacht werden [59].

$$\mathcal{H}\{s(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4.10)$$

$$\mathcal{H}\{s[k]\} = H[k] * s[k] \quad (4.11)$$

$$H[k] = \frac{1 - \cos(\pi k)}{\pi k} = \begin{cases} 0 & k \text{ gerade,} \\ \frac{2}{\pi k} & k \text{ ungerade} \end{cases}$$

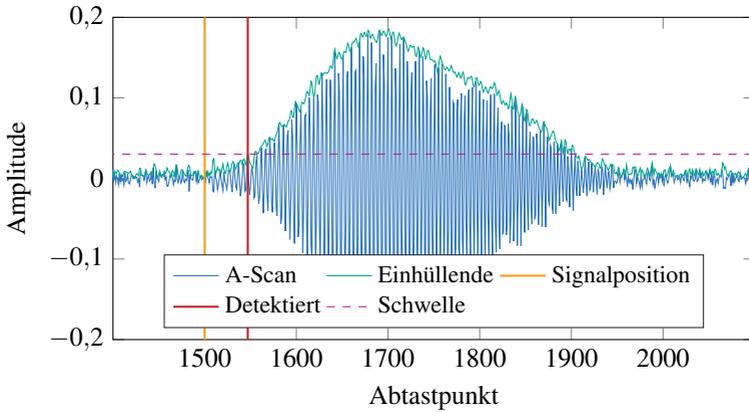


Abbildung 4.7: Die Abbildung zeigt ein Beispiel der Berechnung des analytischen Signals und der Signaldetektion. Zu erkennen ist die Abweichung der detektierten Laufzeit (rote Linie) zum eigentlichen Signalzeitpunkt (blaue Linie).

Das Hilbert-transformierte Signal $\mathcal{H}\{s[k]\}$ wird dann als Imaginärteil des Empfangssignals verwendet. Das daraus entstehende komplexe Signal wird in der Signalverarbeitung als analytisches Signal

$$s_+(t) = s(t) + j\mathcal{H}\{s(t)\} \quad (4.12)$$

bezeichnet. Der Betrag des analytischen Signals entspricht der Einhüllenden des Empfangssignals.

In der Praxis wird die Vergleichsschwelle meistens empirisch eingestellt, so dass sie über dem Rauschpegel im Signal liegt. Alternativ kann die Schwelle zum Beispiel über die Zeit unter der Berücksichtigung von Schalldämpfung über den Abstand angepasst werden. Der Nachteil des Verfahrens ist die starke Abhängigkeit von dem SNR-Verhältnis. Bei niedriger Signalamplitude und starkem Rauschen kann es dazu führen, dass kein Signal detektiert wird, oder ein falsch-positives Ergebnis detektiert wird.

Außerdem ist die Genauigkeit der Signaldetektion von der Steigung der Signaleinhüllende abhängig. Bei einer schwachen Signalsteigung überschreitet die Signalamplitude später die Schwelle als bei einer steilen Anstiegsflanke und enthält somit einen Versatz. Abbildung 4.7 zeigt das Beispiel eines analytischen Signals und die Signaldetektion mit dem Schwellwertverfahren.

4.2.2 Constant Fraction Discriminator

Ein *Constant Fraction Discriminator* (CFD) detektiert das Maximum des Signals durch Betrachtung seiner Anstiegsflanke. Dieses Verfahren wird in der Praxis oft als Hardware-Lösung implementiert. Sein Anwendungsbe-
reich ist zum Beispiel elektrische Impulse von Strahlungsdetektoren zu detektieren.

Diese Methode ist im Vergleich zum Schwellwertverfahren unabhängig von der Signalamplitude, setzt aber voraus, dass die Anstiegszeit des Signals stabil ist. Die Abbildung 4.8 stellt die Funktionsweise des CFDs dar.

Wie bei dem Schwellwertverfahren wird bei dem CFD die Einhüllende des Empfangssignals benutzt. Zuerst wird das Signal nach einem gegebenen Verhältnis in der Amplitude skaliert. Danach wird es um eine bekannte Ver-

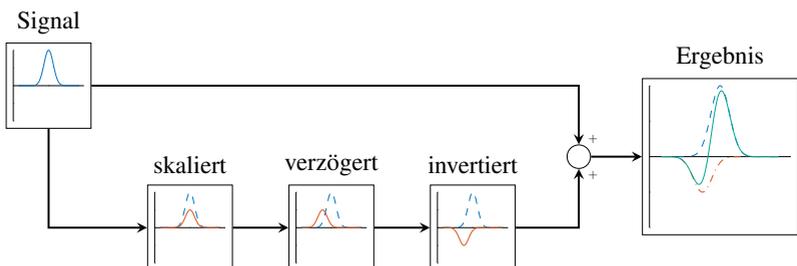


Abbildung 4.8: Die Abbildung stellt den Ablauf des Constant Fraction Discriminators dar.

zögerung verschoben und invertiert. Schließlich wird es zu dem Ursprungssignal addiert.

Die Ankunftszeit t_A des Signals kann aus dem Nulldurchgang des Resultats t_0 und der bekannten Verzögerung t_v berechnet werden:

$$t_A = t_0 - t_v \quad (4.13)$$

Die Genauigkeit der Laufzeitdetektion kann mit einer Interpolation des Signals bei der Nulldurchgangssuche erhöht werden.

4.2.3 Cepstrum-Analyse

Die Cepstrum-Analyse ist ein bekanntes Verfahren in der Sprachverarbeitung und Seismologie zur Detektion von Echos. Das Cepstrum ist definiert als Spektrum des logarithmierten Frequenzspektrums eines Signals $s(t)$ (siehe Gleichung (4.14)) [60]. Das Verfahren wurde zum Beispiel für medizinischen Ultraschall und in zerstörungsfreier Materialüberprüfung eingesetzt [61], [62].

$$c(n) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \log (|\mathcal{F}\{x(t)\}|) \right\} \quad (4.14)$$

Um die Signaldetektion mit Cepstrum-Verfahren zu erklären, wird im Folgenden ein Signal mit einem Echo als Beispiel verwendet:

$$x(t) = s(t) + \alpha s(t - t_0). \quad (4.15)$$

Die Variable $s(t)$ ist das Sendesignal. Das Echo ist eine zeitlich um t_0 verschobene und mit Faktor α abgeschwächte Kopie des Sendesignals. Dessen Leistungsspektrum ist gegeben durch:

$$X(\omega) = S(\omega) [1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos(\omega t_0)]. \quad (4.16)$$

Die Logarithmierung der Gleichung 4.16 ergibt aus dem Produkt eine Summe von zwei Terme:

$$\log X(\omega) = \log S(\omega) + \log(1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos(\omega t_0)). \quad (4.17)$$

Laut Gleichung (4.17) erscheint ein Echo mit dem Term $2\alpha \cos(\omega t_0)$ als eine kosinusförmige Welligkeit in dem Leistungsspektrum. Diese wird in Abbildung 4.9 demonstriert.

Das Spektrum des logarithmierten Leistungsspektrum wird in dem nächsten Schritt berechnet. Das Echo wird an seiner Laufzeit und dem Vielfaches davon als ein Dirac-Puls dargestellt. Da die Achse dieses Spektrums eine Zeiteinheit ist, wurde der Begriff „quefrenzy“ oder Quefrenz eingeführt. Abbildung 4.10 zeigt ein Beispiel der Echodetektion anhand der Cepstrum-Analyse.

Da ein A-Scan an einem Empfänger das Sendesignal nicht enthält, kann keine Wiederholrate für das Transmissionssignal definiert werden. Um die

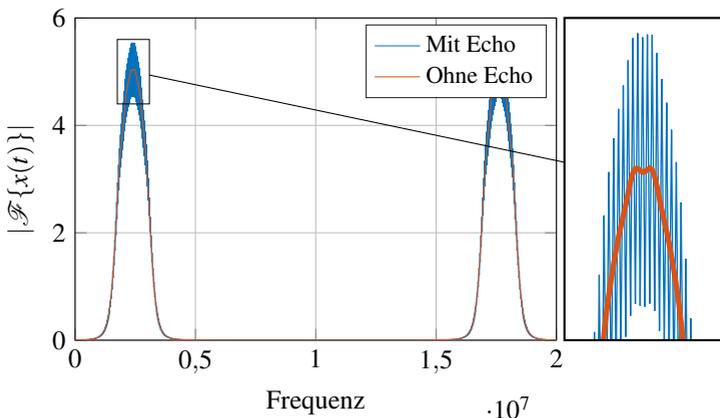


Abbildung 4.9: Die Abbildung zeigt, wie ein Echo als kosinusförmige Welligkeit in dem Leistungsspektrum des Signals erscheint.

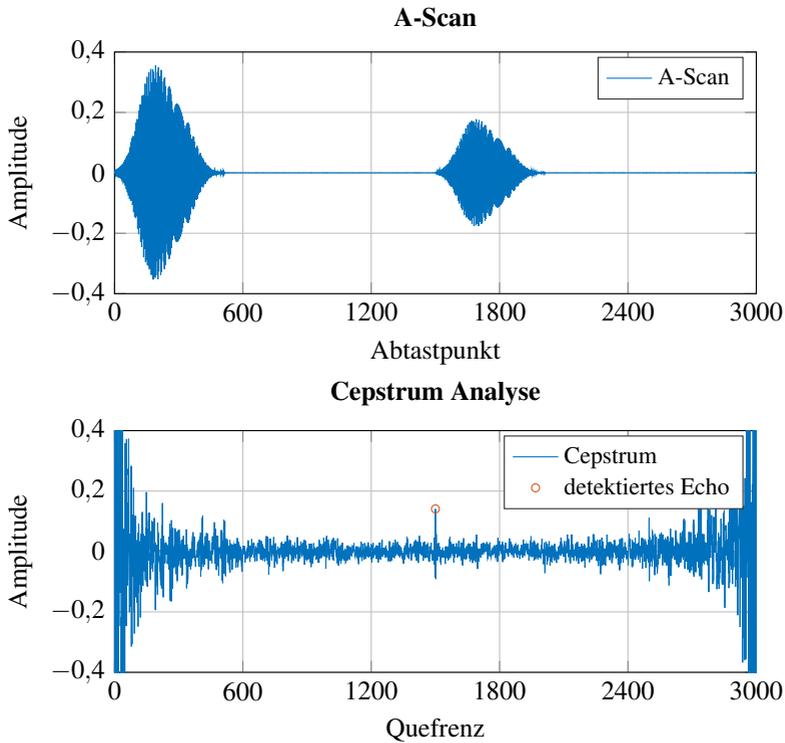


Abbildung 4.10: Die obere Abbildung zeigt ein Beispielsignal mit einem Echo am Abtastpunkt 1500. Das Cepstrum des Signals ist in der unteren Abbildung dargestellt. Die Wiederholrate des Echos, oder in diesem Fall die Echoposition ist als eine Dirac-Puls an dem Queffrenz 1500 zu sehen.

ses Problem zu umgehen, wird für die Laufzeitdetektion künstlich das gesendete Signal am Anfang eingefügt.

4.2.4 Matched-Filter

Der Matched-Filter wird in der Signalverarbeitung eingesetzt, um eine bekannte Signalform im Signal zu detektieren und optimiert das Signal-

Rausch-Verhältnis (SNR). Die Signaldetektion anhand des Matched-Filters ist robust gegen einem hohen Rauschpegel im Signal [24]. Als Matched-Filter wird das gesendete Signal angewendet. Das Ausgangssignal des Filters entspricht einer Faltung des Matched-Filters mit dem A-Scan:

$$g(t) = s(t) * H(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\tau)s(t - \tau)d\tau \quad (4.18)$$

mit $s(t)$ als das A-Scan und $H(t)$ als das Filter im Zeitbereich.

In Abbildung 4.11 ist ein Beispiel der Laufzeitdetektion mit Matched-Filter dargestellt. Das Maximum am Filterausgang liegt an dem Abtastpunkt, bei dem die Korrelation des Signals mit dem Matched-Filter maximal ist. Für die Detektion des Maximums wird der Betrag des Filterausgangs verwendet.

Die Genauigkeit der detektierten Laufzeit ist von der Abtastrate abhängig. Um diese zu erhöhen, kann der A-Scan zuerst auf einer höheren Abtastrate abgetastet werden, bevor es mit dem Matched-Filter bearbeitet wird. Die Voraussetzung dabei ist keine Verletzung des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems während der Signalaufnahme [63].

Weiterhin kann die Korrektheit der Laufzeitdetektion verbessert werden, in dem nur der plausible Zeitbereich, worin das Transmissionssignal laut der Vorkenntnisse über das System zu erwarten ist, untersucht wird. Diese kann beispielsweise durch einfache Fensterfunktion realisiert werden. Mit dieser Methode können Störungen im Signal, wie zum Beispiel die Reflexionssignale an der Wasseroberfläche im 3D-USCT-II ausgeblendet werden. Allerdings ist das Matched-Filter nur optimal, wenn die gesuchte Pulsform in dem Empfangssignal konstant ist.

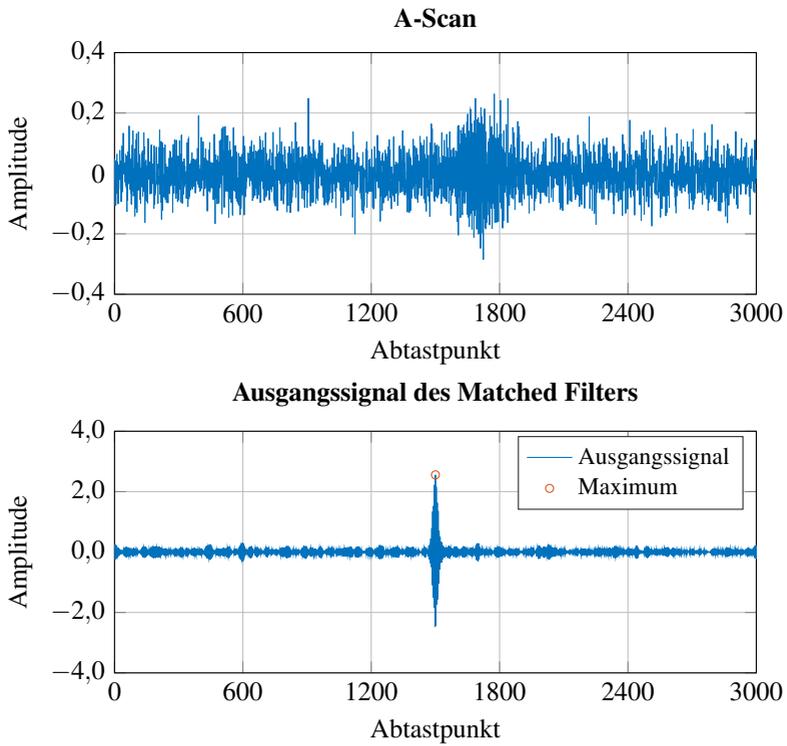


Abbildung 4.11: Die obere Abbildung zeigt einen Beispiel-A-Scan mit einem Chirp-Signal am Abtastpunkt 1500. Nach dem Matched-Filter wird das Signal durch seine hohe Korrelation mit dem Matched-Filter hervorgehoben.

4.2.5 Vergleich des SNR der Detektionsmethoden

Die Genauigkeit und Stabilität der in Abschnitt 4.2 diskutierten Methoden bei unterschiedlichem SNR wurde untersucht. Es wird für einen SNR-Bereich von 10 dB bis 80 dB fünfhundert A-Scans simuliert, bei der die Laufzeit des Transmissionssignals bekannt ist. Das weiße Rauschen wird als Signalrauschen verwendet.

Die Signaldetektion mit den diskutierten Methoden wurde durchgeführt und dabei die Fehler berechnet. Das Sendesignal ist ein Chirp-Signal von 1,33 MHz bis 3,33 MHz. Ein Chirp-Signal ist ein Signal, dessen Frequenz sich zeitlich ändert. Die Ergebnisse der Untersuchung werden mit der Kastengrafik dargestellt. Abbildung 4.12 zeigt eine Beispielkastengrafik, mit der die Streuung, der Median und die Ausreißer in der Ergebnisse angezeigt werden.

Eine ideale Detektionsmethode soll im Median einen Detektionsfehler von Null haben. Mit einer kleinen Streuung der Detektionsfehler und weniger Ausreißer zeigt eine gute Detektionsmethode eine hohe Stabilität. Für das simulierte Ultraschallsignal mit einer Mittenfrequenz von 2,5 MHz und

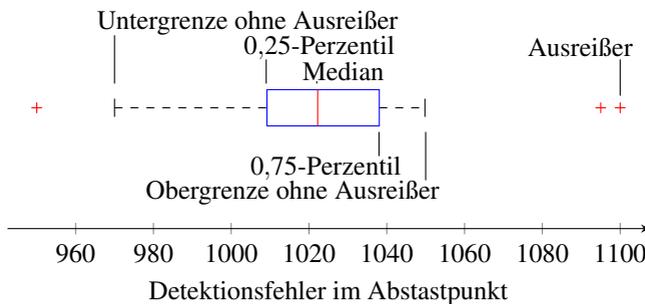


Abbildung 4.12: Kastengrafik zur Darstellung der Streuung der Untersuchungsergebnisse. Die Kasten zeigt den Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegt. Die Median wird durch die rote Linie gekennzeichnet.

einer angeforderten Detektionsgenauigkeit kleiner als ein Viertel der Wellenlänge von 0,15 mm bei einer Abtastrate des A-Scans von 10 MHz darf eine gute Detektionsmethode einen maximalen Detektionsfehler von einem Abtastpunkt haben.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Laut Abbildung 4.13(d) zeigt das Matched-Filter die größte Robustheit gegen den Rauschpegel im Signal. Die Detektion mit dem Schwellwertverfahren zeigt wie erwartet seine Schwäche, wenn das SNR schlechter als 30 dB ist, da die Signalamplitude unter den Rauschpegel sinkt und das Verfahren keine Frequenzinformation im Signal bewertet. Außerdem haben die detektierten Laufzeiten eine Verzögerung, die von dem eingestellten Schwellwert abhängig ist.

Das CFD zeigt in Abbildung 4.13(b) ähnliche Verschiebung in den detektierten Laufzeiten. Im Vergleich zum einfachen Schwellwertverfahren hat CFD generell eine robustere Laufzeitdetektion für niedrigere SNR. Das Cepstrum-Verfahren in Abbildung 4.13(c) zeigt in Median einen Fehler von Null, hat aber mit der Verschlechterung von SNR eine ansteigende Anzahl von Ausreißern.

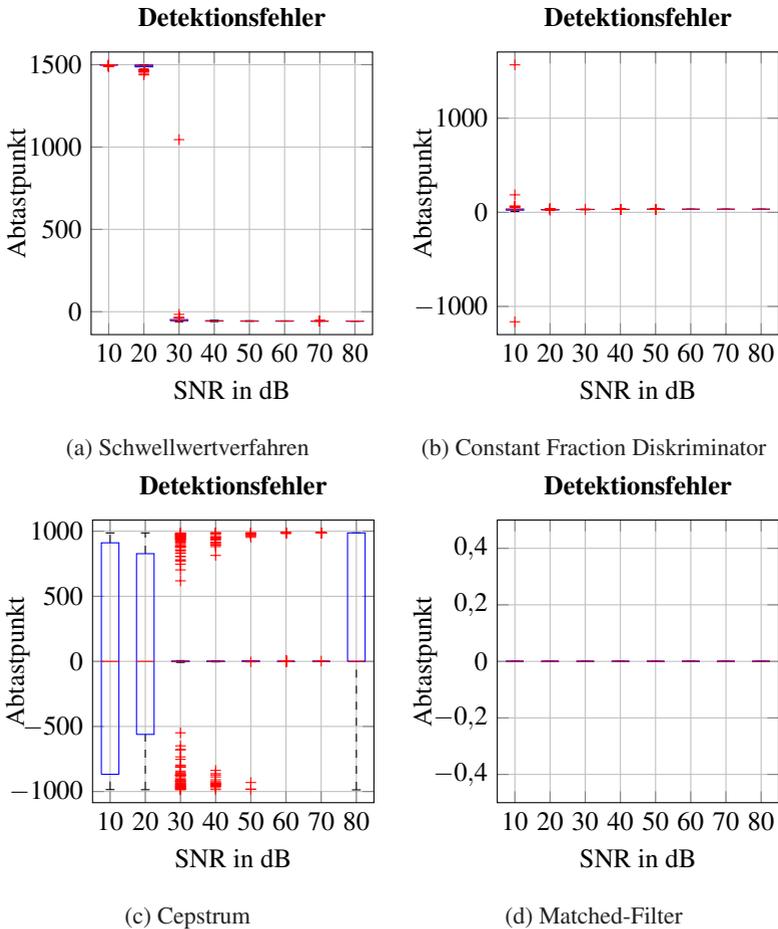


Abbildung 4.13: Die Kastengrafiken zeigen die Detektionsfehler der Detektionsmethoden gegenüber Rauschen im Signal. Es wurde für jede Detektionsmethode fünfhundert A-Scans simuliert. Das Matched-Filter in Abbildung (d) zeigt die größte Robustheit unabhängig von SNR.

4.2.6 Vergleich der Detektionsmethoden über Empfangswinkel

Wie in Abschnitt 2.3.1 diskutiert wurde, ist die Empfangscharakteristik des Ultraschallwandlers von der Frequenz und Winkel abhängig. Die simulierten A-Scans mit dem Chirp-Signal zwischen 1,33 MHz und 3,33 MHz wurden für den Winkelbereich von 0° bis 60° mit der in Abbildung 2.20 dargestellten Abstrahlcharakteristik und Phasenverschiebung des Ultraschallwandlers im 3D-USCT-II gewichtet. Das SNR der simulierten A-Scans lag bei 50 dB. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.14 dargestellt.

Bei dem Schwellwertverfahren und CFD ist der Einfluss der Phasenverschiebung deutlich an der zeitlichen Verschiebung in der detektierten Laufzeit zu sehen. Das Cepstrum-Verfahren zeigt gegenüber dem Schwellwertverfahren eine kleinere Streuung der Detektionsfehler.

Das Matched-Filter hat in dieser Untersuchung seine Robustheit wieder gezeigt. Bis auf dem 40° Winkel, bei dem die Phasenverschiebung am größten ist, macht das Matched-Filter keinen Detektionsfehler. Der Detektionsfehler beim Einfallswinkel $=40^\circ$ kann bis zu neun Abtastpunkten betragen. Diese entspricht für eine Abtastrate von 10 MHz und eine Mittenfrequenz des Ultraschallsignals von 2,5 MHz einer Phasenverschiebung von $2,25\pi$.

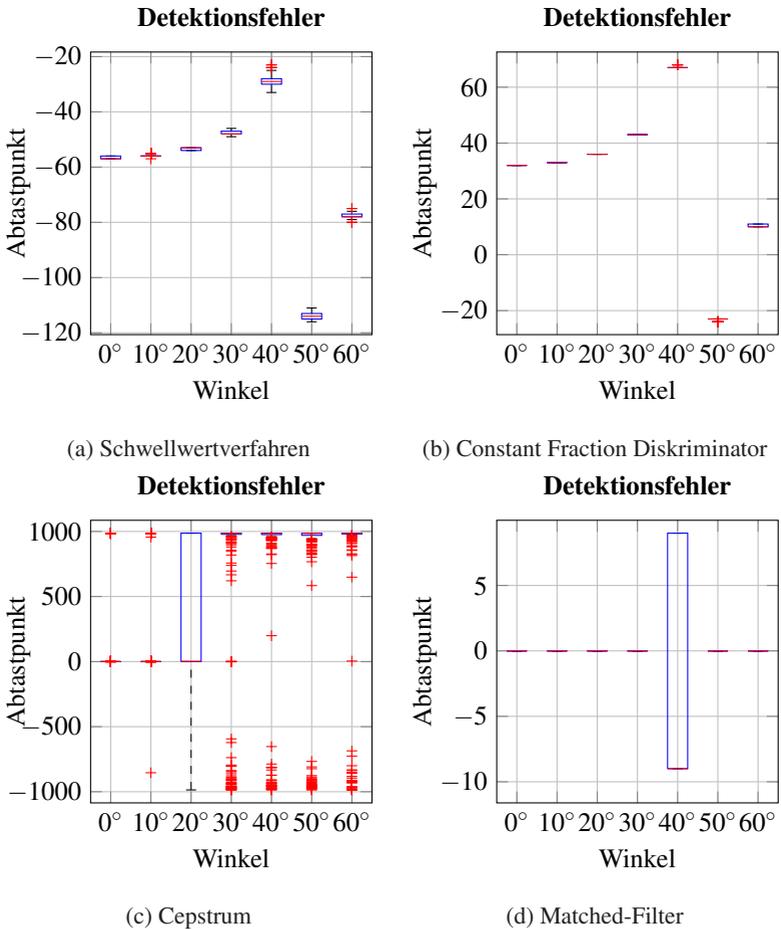


Abbildung 4.14: Die Kastengrafiken zeigen die Robustheit der Detektionsmethoden über dem Einfallswinkel des Transmissionssignals. Es wurde für jede Detektionsmethode fünf hundert A-Scans mit einem SNR von 70 dB simuliert.

4.2.7 Anpassung des Matched-Filters an dem Abstrahl- und Empfangswinkel

In der Untersuchung im Kapitel 4.2.6 zeigte das Matched-Filter eine sehr gute Robustheit gegenüber Rauschen. Allerdings hat das Matched-Filter große Detektionsfehler beim 40° Einfallswinkel aufgrund der Phasenverschiebung für das Beispiel des Ultraschallwandlers in 3D-USCT-II. Der Grund dafür ist ein nicht für die Phasenverschiebung angepasstes Matched-Filter.

Laut Abbildung 2.20 hat der Ultraschallwandler in 3D-USCT-II in seiner Bandbreite eine Phasenänderung ab ca. 30° . Für den Übergangsbereich, bei dem die Phase des Ultraschallwandlers frequenzabhängig ist, muss das Matched-Filter entsprechend angepasst werden. Die Anpassung des Matched-Filter erfolgt durch eine Faltung des gesendeten Ultraschallsignals $s(t)$ mit der Abstrahlcharakteristik $h_s(t)$ und der Empfangscharakteristik $h_r(t)$ für den Abstrahlwinkel α_s des Senders und für den Einfallswinkel α_r des Empfängers.

In Abbildung 4.15 wurde der Vorteil des angepassten Matched-Filters gezeigt. Im Vergleich zu dem normalen Matched-Filter, hat das winkelangepasste Matched-Filter die Laufzeit des Transmissionssignals richtig detektiert. Die Performance des winkelangepassten Matched-Filter wurde für den Empfangswinkel zwischen 0° bis 60° bei einem Abstrahlwinkel von 0° untersucht und in Abbildung 4.16 angezeigt.

Der Frequenzgang und Phasengang eines Transmissionssignals in einem A-Scan ist sowohl von dem Abstrahlwinkel am Sender als auch von dem Einfallswinkel am Empfänger abhängig. Das resultierende Matched-Filter $g(t)$ entspricht eine Faltung des gesendeten Ultraschallsignals und die Abstrahlcharakteristik $h_s(t)$ und Empfangscharakteristik $h_r(t)$ der Ultraschallwandler:

$$g(t) = s(t) * h_s(t) * h_r(t). \quad (4.19)$$

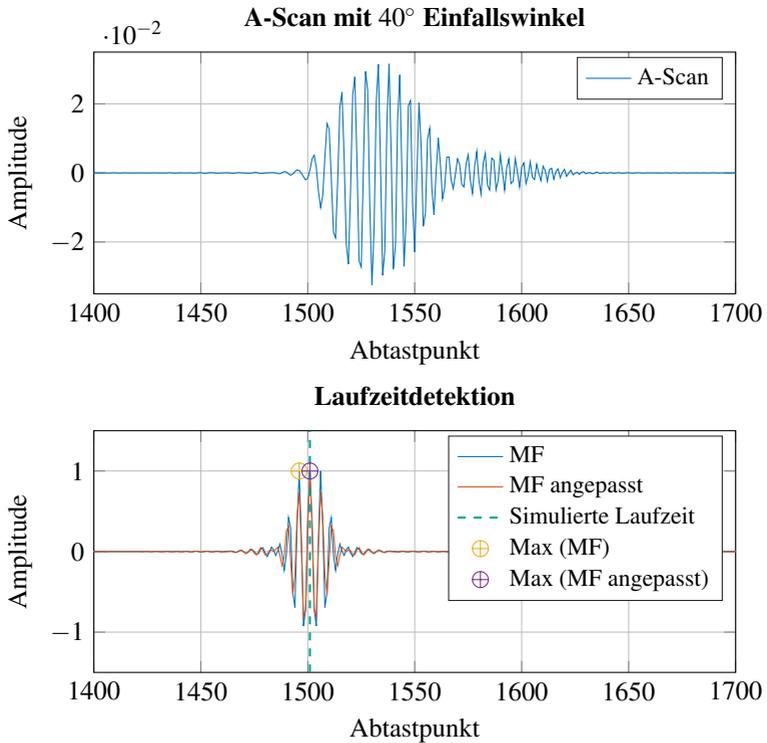


Abbildung 4.15: Die obere Abbildung zeigt einen Beispiel-A-Scan mit einem Einfallswinkel von 40° mit einem Pulsbeginn bei Abtastpunkt 1501. Die untere Abbildung zeigt den Vorteil des angepassten Matched-Filters.

Die Abstrahl- und Einfallswinkel sind definiert durch die Winkel zwischen der Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls als Vektor und dem Normalenvektor des Ultraschallwandlers projiziert auf der lokalen x - und y -Ebene.

Die Positionen und Normalenvektoren der Sender und Empfänger werden zuerst von dem globalen Koordinatensystem in das lokale Koordinatensystem umgerechnet. Abbildung 4.17 stellt das Grundprinzip der Winkelberechnung dar.

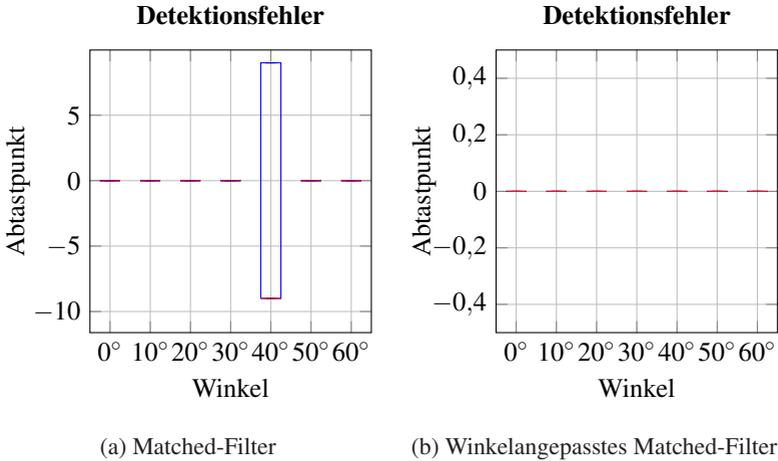


Abbildung 4.16: Die rechte Abbildung demonstriert den Vorteil des winkelangepassten Matched-Filter. Die Laufzeitdetektion ist damit winkelunabhängig.

Der direkte Ausbreitungsweg des Ultraschalls zwischen dem Sender $\mathbf{s} = (x_s, y_s, z_s)$ und dem Empfänger $\mathbf{r} = (x_r, y_r, z_r)$ wird als Vektor \vec{SR} berechnet:

$$\vec{SR} = \mathbf{r} - \mathbf{s}. \tag{4.20}$$

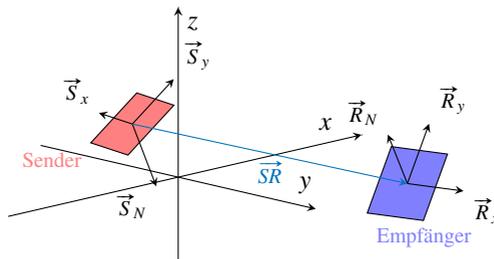


Abbildung 4.17: Die Abbildung dient zur Herleitung der Berechnung von Abstrahl- und Einfallswinkel in dem lokalen Koordinatensystem der Ultraschallwandler.

Mit Hilfe der Vektorprojektion wird Vektor \vec{SR} auf den lokalen x - und y -Achsen und auf dem Normalenvektor des Ultraschallwandlers projiziert. Als Beispiel wird hier die Projektionen des Senders vorgestellt:

$$\vec{e}_x = \frac{\vec{SR} \cdot \vec{S}_x}{|\vec{S}_x|^2} \vec{S}_x \quad (4.21)$$

$$\vec{e}_y = \frac{\vec{SR} \cdot \vec{S}_y}{|\vec{S}_y|^2} \vec{S}_y \quad (4.22)$$

$$\vec{e}_N = \frac{\vec{SR} \cdot \vec{S}_N}{|\vec{S}_N|^2} \vec{S}_N. \quad (4.23)$$

mit \vec{S}_x und \vec{S}_y als lokale x - und y -Achsen und \vec{S}_N als der Normalenvektor. Die berechnete Vektoren sind in Abbildung 4.18 dargestellt.

In 3D-USCT-II wurde der Ultraschallwandler für den Winkelbereich von 0° bis 90° in der Nx - und Ny -Ebene charakterisiert. Um den Winkel θ und ϕ laut Abbildung 4.18 zu berechnen, werden zuerst die Vektoren \vec{e}_y und

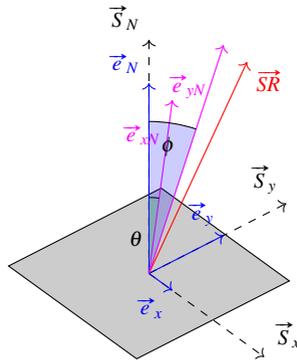


Abbildung 4.18: Die Schema zeigt die Ergebnisse der Vektorprojektion zur Berechnung des Abstrahlwinkels als Teilwinkel θ in der Ny -Ebene und ϕ in der Nx -Ebene.

\vec{e}_x jeweils mit dem Vektor \vec{e}_N zu den Vektoren \vec{e}_{yN} und \vec{e}_{xN} zusammenaddiert.

Die Winkeln θ_S und ϕ_S lassen sich dann wie folgt berechnen:

$$\theta_S = \arccos \frac{\vec{S}_N \cdot \vec{e}_{yN}}{|\vec{S}_N| |\vec{e}_{yN}|} \quad (4.24)$$

$$\phi_S = \arccos \frac{\vec{S}_N \cdot \vec{e}_{xN}}{|\vec{S}_N| |\vec{e}_{xN}|}. \quad (4.25)$$

Ähnlich wird für den Empfänger θ_r und ϕ_r berechnet. Die Anpassung des Matched-Filters laut Gleichung (4.19) wird dann:

$$g(t, \theta_s, \theta_r, \phi_s, \phi_r) = s(t) * h_s(t, \theta_s, \phi_s) * h_r(t, \theta_r, \phi_r). \quad (4.26)$$

Dieses Verfahren zur Anpassung des Matched-Filters wurde am Beispiel des Ultraschallwandlers in 3D-USCT-II demonstriert. Eine Anwendung auf anderen Ultraschallwandler setzt nur eine simulierte oder gemessene Abstrahlcharakteristik des Ultraschallwandlers voraus.

4.3 Schallgeschwindigkeit in inhomogenem Medium

Abschnitt 2.3.1 zeigte, dass die Temperaturverteilung entlang des Signalpfades für eine genaue Bestimmung der Laufzeit kritisch ist. Ebenfalls wurde gezeigt, dass bei einer inhomogenen Temperaturverteilung die einfache Annahme der Schallgeschwindigkeit als Mittelwert der Temperaturmessungen am Sender und Empfänger zur Fehlern führen kann. In diesem Abschnitt wird ein Verfahren zur genaueren Schallgeschwindigkeitsberechnung entlang des Signalweges am Beispiel von 3D-USCT-II vorgestellt.

Mit den Temperatursensoren in jedem TAS soll im 3D-USCT-II die Temperaturverteilung im Medium abgetastet werden. Dennoch sind diese Sensoren nur auf der 3D-USCT-Apertur verteilt und keine Messwerte für den

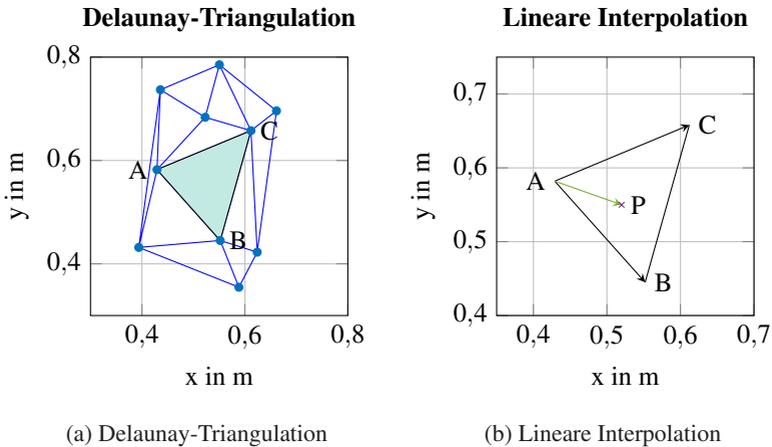


Abbildung 4.19: Die Abbildungen stellen ein Beispiel der linearen Interpolation für gestreute Datenpunkten dar. Abbildung (b) dient zur Herleitung der linearen Interpolation für den Punkt **P** in dem Simplex **ABC** mit Hilfe der baryzentrischen Koordinaten.

Bereich in der Mitte der Apertur vorhanden. Eine Möglichkeit, um die fehlenden Werte schätzen, ist die Temperatur im Medium zu interpolieren.

Bei der Interpolation der Temperaturverteilung wird zuerst das Volumen innerhalb der 3D-USCT-Apertur anhand der Delaunay-Triangulation [64] in ein Dreiecksnetz geteilt. Das Delaunay-Verfahren wird oft in für die Finite-Elemente-Methode benutzt, um ein Polygonnetz zum Lösen der Optimierungsaufgabe oder Simulation zu ermöglichen [65].

Abbildung 4.19(a) zeigt ein Beispiel der Delaunay-Triangulation. Bei der linearen Interpolation mittels Delaunay-Triangulation wird zuerst der Simplex aus dem Polygonnetz gesucht, in dem der Betrachtungspunkt sich befindet. Dabei steht die baryzentrischen Koordinaten als Hilfsmittel zur Verfügung.

Die baryzentrischen Koordinaten werden in der linearen Algebra angewendet, um einen Punkt in Bezug auf ein Simplex zu beschreiben [66]. Der

Punkt \mathbf{P} innerhalb des Dreiecks \mathbf{ABC} in Abbildung 4.19(b) kann per Definition der baryzentrischen Koordinaten durch drei spezielle Koordinaten $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, beschrieben werden:

$$\mathbf{P} = \lambda_1 \mathbf{A} + \lambda_2 \mathbf{B} + \lambda_3 \mathbf{C} \quad (4.27)$$

mit $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$.

Wenn mindestens eine baryzentrische Koordinate $\lambda < 1$ ist, liegt der Punkt \mathbf{P} außerhalb des gegebenen Simplex. Die Berechnung der baryzentrischen Koordinaten für das zweidimensionale Beispiel kann in Form eines linearen Gleichungssystems realisiert werden:

$$\mathbf{R}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{P} \quad (4.28)$$
$$\begin{pmatrix} x_A & x_B & x_C \\ y_A & y_B & y_C \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4.29)$$

Dieses Gleichungssystem lässt sich einfach für n-dimensionalen Simplex durch die Erweiterung der Matrizen anpassen. Nachdem der umhüllende Simplex gefunden und die baryzentrischen Koordinaten für den Punkt \mathbf{P} berechnet ist, kann die lineare Interpolation der Funktionswert $f(\mathbf{P})$ mit Gleichung 4.30 ermittelt werden:

$$f(\mathbf{P}) = \lambda_1 f(\mathbf{A}) + \lambda_2 f(\mathbf{B}) + \lambda_3 f(\mathbf{C}). \quad (4.30)$$

4.4 Kalibrierungsmethode

Es werden die in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Einflussfaktoren der Lokalisierungsgüte bei der Selbstkalibrierung in getrennten Kalibrierungsschritte behandelt. In jedem Kalibrierungsschritt werden die anderen Fehlerquellen

als vernachlässigbar angenommen. Die Kalibrierungsschritte werden in diesem Abschnitt vorgestellt.

4.4.1 Positionskalibrierung

Bei der Positionskalibrierung wurde es angenommen, dass die Fehlergröße der gesamten Systemverzögerung (τ_{s_i}, τ_{r_j}) vernachlässigbar ist, und die Schallgeschwindigkeit im Medium ist bekannt. Die Gleichung (4.9) wird entsprechend vereinfacht als

$$\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\| = c_{ij} \cdot t_{ij}. \quad (4.31)$$

Die Koordinaten der Sender i und Empfänger j werden als Vektor $\mathbf{s}_i = (x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i})$ und $\mathbf{r}_j = (x_{r_j}, y_{r_j}, z_{r_j})$ geschrieben. Für ein Ultraschallsystem mit m Sender und n Empfänger werden diese Koordinaten in einen Vektor $\mathbf{x} = [\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_m, \mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_n]^\top$ zusammengefasst. Die Gleichung (4.31) wird umformuliert als

$$f(\mathbf{s}_i, \mathbf{r}_j) = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\| - c_{ij} \cdot t_{ij} = 0. \quad (4.32)$$

Das zu lösende nichtlineare Gleichungssystem ist dann eine Sammlung der Gleichung (4.32) für alle verfügbare SEK. Das Gleichungssystem ist dünnbesetzt, da jede Gleichung in dem Gleichungssystem nur von einem Sender und einem Empfänger abhängt. Generell lässt sich solches Gleichungssystem iterativ mit numerischen Verfahren aus Abschnitt 2.4 lösen.

4.4.2 Temperaturkalibrierung

Bei der Temperaturkalibrierung wird vorausgesetzt, dass die Positionen der Ultraschallwandler und die Verzögerungen der Elektronik eine niedrigere Größenordnung als die Schallgeschwindigkeitsfehler haben. Unter dieser

Annahme kann die Gleichung 4.9 für den Sender s_i und den Empfänger r_j umformuliert werden als

$$f(T_{s_i}, T_{r_j}) = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\| - c(T_{s_i}, T_{r_j}) \cdot t_{ij} = 0. \quad (4.33)$$

Die Schallgeschwindigkeit $c(T_{s_i}, T_{r_j})$ entlang des Signalpfades zwischen dem Sender und Empfänger wird mit dem Verfahren in Abschnitt 4.3 ermittelt.

Es werden für alle Sender und Empfänger die Gleichung (4.33) in einem Gleichungssystem zusammengefasst. Die Temperaturen T an den Ultraschallwandlern sind in dem Vektor $\mathbf{x} = [T_{s_1}, \dots, T_{s_m}, T_{r_1}, \dots, T_{r_n}]^\top$ gegeben. Eine weitere Gleichung wurde eingefügt, um das Offset der Temperaturen zu den kalibrierten Temperatursensoren, wie zum Beispiel die JUMO-Sensoren in 3D-USCT-II zu korrigieren. Die Temperaturen der Sensoren in der Nähe von den kalibrierten Temperatursensoren werden mit der folgenden Gleichung beschränkt:

$$f(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{x}} - T_{cali} = 0. \quad (4.34)$$

Da die Temperatur während des Messvorgangs nicht sprunghaft ändern kann, wird es angenommen, dass die gemessene Temperatur an jedem Wandler den benachbarten Messungen ähnlich ist. Diese Annahme wird in der Temperaturkalibrierung als Vorfilterung benutzt, um eine bessere Startbedingung zu erreichen.

Es wird die gemessene Temperatur T_i an dem i -ten Temperatursensor mit dem Median von dem eigenen Messwert und den benachbarten Messungen ersetzt. Die Nachbarschaft der Sensoren sind über die Euklidischen Distanzen anderer Sensoren zu dem ausgewählten Temperatursensor definiert. Somit können Ausreißer in den Messdaten unterdrückt werden.

Linearisierung

Bei der Temperaturkalibrierung besteht die Möglichkeit, das Gleichungssystem zu linearisieren. Statt der Temperatur wird die Schallgeschwindigkeit kalibriert. Eine Umformulierung der Gleichung (4.33) und (4.34) ergibt:

$$f(c_{s_i}, c_{r_j}) = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\| - \frac{c_{s_i} + c_{r_j}}{2} \cdot t_{ij} = 0 \quad (4.35)$$

$$\frac{c_{s_i} + c_{r_j}}{2} = \frac{\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\|}{t_{ij}} \quad (4.36)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{s_i} \\ c_{r_j} \end{bmatrix} = \frac{\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\|}{t_{ij}} \quad (4.37)$$

$$(4.38)$$

Mit dieser Umformulierung erhalten wir ein lineares Gleichungssystem mit der Form $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Dabei ist der Vektor der Unbekannten $\mathbf{x} = [c_{s_1}, \dots, c_{s_m}, c_{r_1}, \dots, c_{r_n}]^T$.

Da die Schallgeschwindigkeit entlang des Signalpfades in dem linearisierten Fall als einfacher Mittelwert berechnet wird, kann es zu ungenauerer Laufzeitberechnung führen. Trotzdem hat der linearisierte Fall den Vorteil, dass das Gleichungssystem mit Verfahren der kleinsten Quadrate direkt lösbar ist. In weiteren Untersuchungen werden die Vorteile und Nachteile des linearisierten Gleichungssystems untersucht.

4.4.3 Verzögerungskalibrierung

Bei der Verzögerungskalibrierung wird jedem Sender s_i und jedem Empfänger r_j eine Verzögerung τ_{s_i} oder τ_{r_j} zugewiesen. Während der Verzögerungskalibrierung wird angenommen, dass die Fehlergrößenordnung ande-

rer Fehlerquellen vernachlässigbar ist. Es wird der Vektor $\mathbf{x} = [\tau_{s_1}, \dots, \tau_{s_m}, \tau_{r_1}, \dots, \tau_{r_n}]^\top$ und die folgenden Gleichungen eingeführt:

$$f(\tau_{s_i}, \tau_{r_j}) = \|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\| - c_{ij} \cdot (t_{ij} - \tau_{s_i} - \tau_{r_j}) = 0 \quad (4.39)$$

$$f(\tau_{s_i}) = |\tau_{s_i}| - \tau_{s_i} = 0 \quad (4.40)$$

$$f(\tau_{r_j}) = |\tau_{r_j}| - \tau_{r_j} = 0. \quad (4.41)$$

Gleichung (4.40) und (4.41) begrenzen die Verzögerung auf positive Zahlen. Da bei der Verzögerungskalibrierung die Euklidischen Distanzen zwischen den Sendern und Empfängern $\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\|$ und die Schallgeschwindigkeit c_{ij} konstant sind, können sie in der Implementierung vorberechnet werden, um die Rechenzeit zu reduzieren.

Linearisierung

Ähnlich wie bei der Temperaturkalibrierung kann die Gleichung (4.39) als lineare Gleichung umformuliert werden:

$$-\tau_{s_i} - \tau_{r_j} = \frac{\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\|}{c_{ij}} - t_{ij} \quad (4.42)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{s_i} \\ \tau_{r_j} \end{bmatrix} = \frac{\|\mathbf{s}_i - \mathbf{r}_j\|}{c_{ij}} - t_{ij}. \quad (4.43)$$

Korrektur der Verzögerung in den detektierten Laufzeiten

Die Korrektur der Verzögerungen in den detektierten Laufzeiten kann für jeden Sender und jeden Empfänger individuell durchgeführt werden. Alternativ kann für jede SEK eine individuelle Laufzeitkorrektur $\tau = \tau_{s_i} + \tau_{r_j}$ berechnet und korrigiert werden. Aufgrund der Austauschbarkeit zwischen dem Laufzeitfehler und dem Positionsfehler kann die individuelle Korrektur pro Sender und Empfänger zur Kalibrierungsfehler führen.

4.4.4 Vorfilterung der TOF-Messungen

4.4.4.1 Filterung anhand des Signal-Rausch-Verhältnisses

Das SNR beschreibt die Signalqualität und kann zur Erkennung nicht funktionsfähiger Ultraschallwandler und Signalkanäle benutzt werden. Um das SNR zu bestimmen, wird für jeden A-Scan nach der Fourier Transformation das Maximum in der Bandbreite des Ultraschallwandlers mit dem Rauschpegel außerhalb der Bandbreite verglichen. Die SEK mit einem SNR-Wert unterhalb des mittleren SNR-Wertes wird markiert.

Die Häufigkeit von jedem Ultraschallwandler wird auf die Anzahl der verfügbaren Sende-Empfänger-Kombinationen normiert. Ein Ultraschallwandler, der häufiger als eine vordefinierte Schwelle markiert ist, wird aus dem System genommen. Seine TOF-Messungen werden nicht für die weiteren Kalibrierungsprozesse benutzt.

Filterung anhand des TOF-Detektionsfehlers

A-Scans mit Artefakten wie Spikes haben meistens eine hohe Amplitude und werden deswegen nicht von der Filterung anhand SNR erkannt. Unter Spikes versteht man Störungen im Signal, die eine kurze Dauer und eine hohe Amplitude haben. Solche Spikes haben wegen ihrer großen Amplitude auch großen Korrelationswert mit dem Matched-Filter. Um solche Fehler zu erkennen, wird in diesem Selbstkalibrierungsverfahren eine Filterung anhand des TOF-Detektionsfehlers vorgeschlagen.

Nach der Verzögerungskalibrierung wird jedem Ultraschallwandler eine Verzögerung zugeordnet. Anhand der Standardabweichung der Verzögerungen können Ultraschallwandler mit einer großen Abweichung zur gesamten Systemverzögerung markiert werden. Es wird für jeden Ultraschallwandler ähnlich wie bei der SNR-Filterung die Häufigkeit normiert und mit einem Schwellwert aussortiert.

4.4.5 Verschiebungs- und Rotationserkennung

Um den Unterschied zwischen den kalibrierten Wandler-Positionen und dem Systementwurf zu interpretieren, wird aus dem Bereich der Robotik und Computergraphik die Quaternionen angewendet, um die Verschiebung und Rotation der Ultraschallwandler darzustellen.

In [67] wurde eine Methode basierend auf der Quaternionen von Herrn Horn vorgestellt, die die absolute Orientierung zwischen Punkten in zwei unterschiedlichen Koordinatensysteme zueinander als ein Problem der kleinsten Quadrate löst.

Horn-Verfahren

Laut [67] kann die Umwandlung von einem Koordinatensystem zu dem anderen in eine Verschiebung, eine Rotation und eine Skalierung zerlegt werden.

Eine Besonderheit des Horn-Verfahren ist, dass das Verfahren in einem Schritt das Problem der kleinsten Quadrate löst. Somit bietet das Verfahren im Vergleich zu dem iterativen Verfahren aufgrund dieser Eigenschaft eine Unabhängigkeit von guter Anfangsschätzung der absoluten Orientierung.

Bei dem Horn-Verfahren wird die Transformation der Punkten von einem Koordinatensystem ins andere, wie es in Abbildung 4.20 dargestellt ist, in der folgenden Form beschrieben:

$$\mathbf{r}_2 = sR(\mathbf{r}_1) + \mathbf{r}_0 \quad (4.44)$$

mit \mathbf{r}_i als Koordinaten der Punkten in dem i -ten Koordinatensystem, und s als Skalierungsfaktor und $R(\mathbf{r}_i)$ als angewandte Rotation auf den Punkten, die in dem i -ten Koordinatensystem gemessen waren. Die Verschiebung ist durch den Offset \mathbf{r}_0 beschrieben.

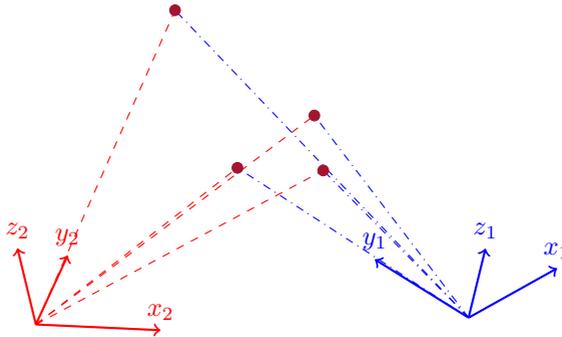


Abbildung 4.20: Die Abbildung stellt eine Beispielbetrachtung der Punkten mit zwei unterschiedlichen Koordinatensysteme. Mit dem Horn-Verfahren soll die absolute Orientierung zwischen den beiden Koordinatensysteme als eine Verschiebung und eine Rotation berechnet werden.

Berechnung der Verschiebung

Laut [67] soll die Verschiebung von der Rotation unabhängig sein. Die Punkten werden zuerst von ihren Zentroiden abgezogen, um die Bestimmung der Rotation in dem späteren Schritt zu ermöglichen.

Die Zentroide der Punkten in dem i -ten Koordinatensystem ist gegeben durch:

$$\bar{\mathbf{r}}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{r}_{i,j}. \quad (4.45)$$

Die neue Koordinaten der Punkten in dem jeweiligen Koordinatensystem ist gegeben dann durch:

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}_i - \bar{\mathbf{r}}_i. \quad (4.46)$$

Die Gleichung (4.44) wird als ein Problem der kleinsten Quadrate umformuliert:

$$\sum_{j=1}^n \|\mathbf{r}'_{2,j} - sR(\mathbf{r}'_{1,j}) - \mathbf{r}'_0\|^2 \quad (4.47)$$

mit $\mathbf{r}'_0 = \mathbf{r}_0 - \bar{\mathbf{r}}_2 + sR(\bar{\mathbf{r}}_1)$.

Die Bestimmung des Verschiebungsoperators \mathbf{r}_0 ist ohne die Kenntnisse über die Skalierung s und die Rotation R laut Gleichung (4.47) nicht möglich. Es wird in dem folgenden Abschnitt die Bestimmung der Rotation und Skalierung laut [67] erklärt.

Eine wichtige Grundlage des Horn-Verfahren zur Beschreibung der Rotation ist der Einsatz von Quaternionen. Eine Quaternion ist eine komplexe Zahl mit drei imaginäre Teilen [68]:

$$\mathring{q} = q_0 + iq_x + jq_y + kq_z. \quad (4.48)$$

Ein Vektor $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$ kann laut [67] durch die imaginären Komponenten einer Quaternion dargestellt werden:

$$\mathring{r} = 0 + ix + iy + iz \quad (4.49)$$

bei dem die reelle Komponente auf Null gesetzt wird.

Rotation und Skalierung

Beim Horn-Verfahren wird die orthogonale Eigenschaft der Multiplikation der Quaternionen benutzt, um die Rotation zwischen den Koordinatensystemen zu bestimmen. Es wird versucht, die Rotation durch die Zuordnung einer imaginären Quaternion in den anderen zu beschreiben.

Das Ziel ist eine Quaternion \mathring{q} zu bestimmen, bei der die folgende Gleichung maximiert wird:

$$\sum_{j=1}^n (\mathring{q}\mathring{r}'_{1,j}\mathring{q}^*) \cdot \mathring{r}'_{2,j}. \quad (4.50)$$

Das Ergebnis ist eine Einheitsquaternion, die die Rotationsinformation enthält. Die Rotationsmatrix R lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
 \hat{q} &= q_0 + iq_x + jq_y + kq_z \\
 \mathbf{v} &= \begin{bmatrix} q_x & q_y & q_z \end{bmatrix}^\top \\
 \mathbf{Z} &= \begin{bmatrix} q_0 & -q_z & q_y \\ q_z & q_0 & -q_x \\ -q_y & q_x & q_0 \end{bmatrix} \\
 R &= \mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^\top + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Z}.
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

Der Skalierungsfaktor s kann ohne die Information über die Rotation berechnet werden, in dem die quadratische Mittelwerte der Abweichung der Punkten zu der jeweiligen Zentroide im Verhältnis gesetzt werden.

Schließlich wird die Verschiebung berechnet, nach dem die Punkte \mathbf{r}_1 mit der Skalierung und dem Rotationsoperator transformiert ist.

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_2 - sR(\mathbf{r}_1) \tag{4.52}$$

4.5 Voraussage der Grenzen der Kalibrierungsgenauigkeit

Bei der Kalibrierung der Ultraschallsysteme interessieren wir uns nicht nur für das Konvergenzverhalten des Verfahren, sondern auch die Genauigkeit der Lösung. Es wird daher die Fehlerfortpflanzung in den Gleichungssystemen untersucht um daraus eine Voraussage der Grenzen der Kalibrierungsgenauigkeit herzuleiten. Die betrachteten Fehler sind Fehler in der Laufzeitdetektion als Eingangsdaten der Gleichungssystemen.

4.5.1 Fehlerfortpflanzung im Gleichungssystem

Es wird aus der numerischen Mathematik die Konditionszahl κ zur Beschreibung der Fehlerfortpflanzung benutzt [54]. Die Konditionszahl beschreibt für ein Gleichungssystem, wie eine kleine Änderung der Eingangsdaten in den Funktionswerten gespiegelt wird. Meistens wird sie benutzt, um die Empfindlichkeit des Gleichungssystems gegenüber Fehlern in den Eingangsdaten zu quantifizieren.

Für ein lineares Gleichungssystem $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ ist $\kappa(\mathbf{A})$ gegeben durch ihre Maximumsnorm $\|\cdot\|_\infty$ [69]:

$$\kappa(\mathbf{A}) = \|\mathbf{A}\|_\infty \|\mathbf{A}^{-1}\|_\infty. \quad (4.53)$$

Die Bestimmung der Konditionszahl für ein nichtlineares Gleichungssystem erfolgt durch eine numerische Methode. Laut [54] wird die Konditionszahl κ für ein nichtlineares Gleichungssystems berechnet durch

$$\kappa = \frac{\|J(\mathbf{x})\|}{\|f(\mathbf{x})\| \|\mathbf{x}\|}. \quad (4.54)$$

Es wird für jeden Kalibrierungsschritt die maximale Konditionszahl κ_{max} der nicht linearen Gleichungssysteme anhand wiederholter Auswertungen der Gleichung (4.54) an einem Arbeitspunkt \mathbf{x} mit kleiner Abweichungen $\delta\mathbf{x}$ bestimmt. Die Arbeitspunkte sind zum Beispiel die Wandler-Position und die erwartete Verzögerung im System.

Allgemein wird ein Gleichungssystem mit einer Konditionszahl $\kappa \geq 1$ als gut konditioniert charakterisiert. Ist $\kappa \gg 1$, spricht man von einem schlecht konditionierten Gleichungssystem. Ist $\kappa = \infty$, handelt es sich hier um ein schlecht gestelltes Problem [54].

Der relative Fehler der Lösung \mathbf{x} des Gleichungssystems in Abhängigkeit von der maximalen Konditionszahl κ_{max} und den relativen Eingangsfehler $\frac{\|\Delta\mathbf{b}\|}{\|\mathbf{b}\|}$ wird mit Gleichung (4.55) berechnet.

$$\frac{\|\Delta \mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x}\|} \leq \kappa_{max} \cdot \frac{\|\Delta \mathbf{b}\|}{\|\mathbf{b}\|} \quad (4.55)$$

Der Eingangsfehler $\|\Delta \mathbf{b}\|$ kann aus den Experimentdaten bestimmt werden. Es wird eine Reihe von Leermessungen nacheinander mit dem Ultraschallsystem aufgenommen und die Laufzeiten aller SEK detektiert. Dabei wird es angenommen, dass die Wandler-Positionen nicht verändert wurden und die Temperaturverteilung wurde beobachtet. Die Abweichungen der detektierten Laufzeiten für jede SEK entsprechen dann den gesuchten Eingangsfehler $\|\Delta \mathbf{b}\|$.

Außer der Konditionszahl ist es beim Lösen von nichtlinearen Gleichungssystemen wichtig, die Jacobi-Matrix auf Singularität zu überprüfen. Denn für iterative Verfahren, bei denen die Inverse der Jacobi-Matrix benötigt wird, ist eine singuläre Jacobi-Matrix nicht invertierbar. Die Singularität kann durch die Berechnung der Determinanten der Jacobi-Matrix bestimmt werden. Bei einer Determinanten von Null handelt sich es um eine singuläre Jacobi-Matrix.

4.5.2 Residuum der Kalibrierung

Für ein Gleichungssystem $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{b}$ mit der approximierten Lösung $\hat{\mathbf{x}}$ ist das Residuum des Gleichungssystems gegeben durch

$$\mathbf{r} = \mathbf{b} - \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (4.56)$$

mit $\hat{\mathbf{x}}$ als Lösung des Gleichungssystems.

Das Residuum wird oft in der Mathematik angewendet, um bei iterativen Verfahren die Lösung systematisch zu verbessern. Es kann neben der maximalen Iteration als ein Abbruchkriterium beim Lösen der Gleichungssysteme benutzt werden.

Je kleiner das Residuum ist, desto näher ist die approximierte Lösung $\hat{\mathbf{x}}$ zur Lösung \mathbf{x} . Falls die Lösung \mathbf{x} unbekannt ist, kann das Residuum als

Maß für die Genauigkeit der approximierten Lösung benutzt werden. In der Selbstkalibrierung wird das Residuum der Gleichungssysteme in jedem Kalibrierungsschritt mit der Einheit Meter berechnet.

4.5.3 Kalibrierungsgenauigkeit

Bei der Selbstkalibrierung von komplexen Ultraschallsystemen wie zum Beispiel dem 3D-USCT-II ist aufgrund der Abwesenheit der Grundwahrheit des Systemzustandes keine direkte Verifizierung des Ergebnisses möglich. In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur Voraussage der Kalibrierungsgenauigkeit anhand der Konditionszahl der Gleichungssysteme, der ermittelten Laufzeitfehler und des Residuums der Gleichungssysteme vorgestellt.

Die obere Grenze des Kalibrierungsfehlers $\hat{\varepsilon}$ ist gegeben durch

$$\hat{\varepsilon} = \underbrace{|\Delta \mathbf{b}| \cdot c \cdot \sum_i^N \kappa_{max,i}}_{\text{Systemfehler}} + \underbrace{\sum_i^N r_i}_{\text{Residuum}} \quad (4.57)$$

für N Kalibrierungsschritte. Die Variable c ist die Schallgeschwindigkeit. Abbildung 4.21 zeigt am Beispiel eines Gleichungssystems mit zwei Unbekannten und einem Kalibrierungsschritt die Voraussage der Grenzen der Kalibrierungsgenauigkeit.

Laut Gleichung (4.57) setzt sich die obere Grenze des Kalibrierungsfehlers aus zwei Komponenten zusammen. Die erste Komponente ist der Fehler aufgrund der Verstärkung von Eingangsfehlern durch das Gleichungssystem. Diese beschreibt die möglichen Abweichungen der gefundenen Lösung zur exakten Lösung.

In Abbildung 4.21 wird die Grenze der ersten Komponenten mit dem blauen Kreis um der exakten Lösung \mathbf{x}_0 dargestellt. Diese Grenze wird zusätzlich mit dem Residuum in der zweiten Komponenten der Gleichung

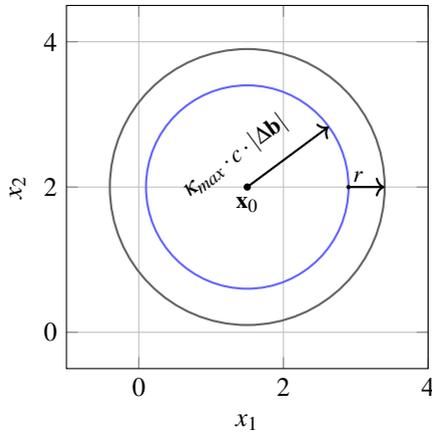


Abbildung 4.21: Die Abbildung zeigt die Voraussage der Grenzen der Kalibrierungsgenauigkeit für ein Gleichungssystem mit zwei Unbekannten x_1 und x_2 . Die exakte Lösung des Gleichungssystems ist x_0 .

(4.57) vergrößert, wie es in Abbildung 4.21 mit dem grauen Kreis gezeichnet ist.

Der Kalibrierungsgenauigkeit kann laut Gleichung (4.57) durch die Minimierung der Laufzeitfehler $|\Delta \mathbf{b}|$ und der Konditionszahl κ_{max} der Gleichungssysteme verbessert werden. Die Minimierung der Konditionszahl kann dadurch erreicht werden, dass das Verhältnis zwischen der Anzahl von Gleichungen und der Anzahl der Unbekannten maximiert wird. Somit wird der Einfluss einzelner TOF-Fehler reduziert. Für die Selbstkalibrierung kann die Anzahl von Gleichungen durch die Einbeziehung weiterer SEK erhöht werden.

Der Laufzeitfehler lässt sich minimieren, indem A-Scans mit schlechter Qualität beziehungsweise die fehlerhaften SEK aussortiert werden. Diese Strategie widerspricht die Einbeziehung weiterer SEK, um die Konditionszahl zu minimieren. Daraus schließen wir, dass eine Verbesserung der Kalibrierungsgenauigkeit nur durch einen Kompromiss zwischen der Minimie-

rung der Konditionszahl und dem TOF-Fehler erreichbar ist. Das heißt, eine gute Auswahl der SEK ist kritisch für eine gute Kalibrierungsgenauigkeit.

4.5.4 Untersuchung am Beispiel vom 3D-USCT-II

In diesem Abschnitt werden die oben genannten Zusammenhänge zwischen der Anzahl der einbezogenen SEK, der Konditionszahl der Gleichungssysteme und dem Laufzeitfehler am Beispiel des 3D-USCT-II-Geräts untersucht. In der Kalibrierungsmethode werden die Auswahl der A-Scans durch den Winkelbereich α eingestellt. Mit diesem Parameter werden Empfänger mit einem Winkel zu dem Normalenvektor jedes Senders kleiner als α für die Kalibrierung ausgewählt. Bei einem kleinen α heißt es für die 3D-USCT-II-Apertur mit einer halbellipsoiden Form, dass die Ultraschallwandler in der unteren Ebene keinen Empfänger haben. Es wird in Tabelle 4.1 die Anzahl der kalibrierten TAS in Abhängigkeit von α aufgelistet.

In der folgenden Untersuchung werden die Konditionszahlen der Kalibrierungsschritte für $\alpha = 10^\circ \dots 60^\circ$ bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.22 dargestellt.

Die Konditionszahl sinkt entsprechend der Erwartung mit der Zunahme an SEK für alle Kalibrierungsschritte außer bei der Positionskalibrierung. Ab dem Winkelbereich $\alpha \geq 40^\circ$ wird die Konditionszahl mit dem exponentiellen Verlauf nur wenig verbessert.

Der TOF-Fehler $|\Delta \mathbf{b}|$ wurde mit zehn aufeinanderfolgender Aufnahmen ermittelt. Während der Messungen wurden die Positionen der Ultraschallwandler als konstant angenommen und die Temperatur im Medium wurde

Winkelbereich α	10°	20°	30°	40°	$\geq 50^\circ$
Anzahl kalibrierter TAS	72	114	138	150	157

Tabelle 4.1: Anzahl der kalibrierten TAS in Abhängigkeit vom Winkelbereich α

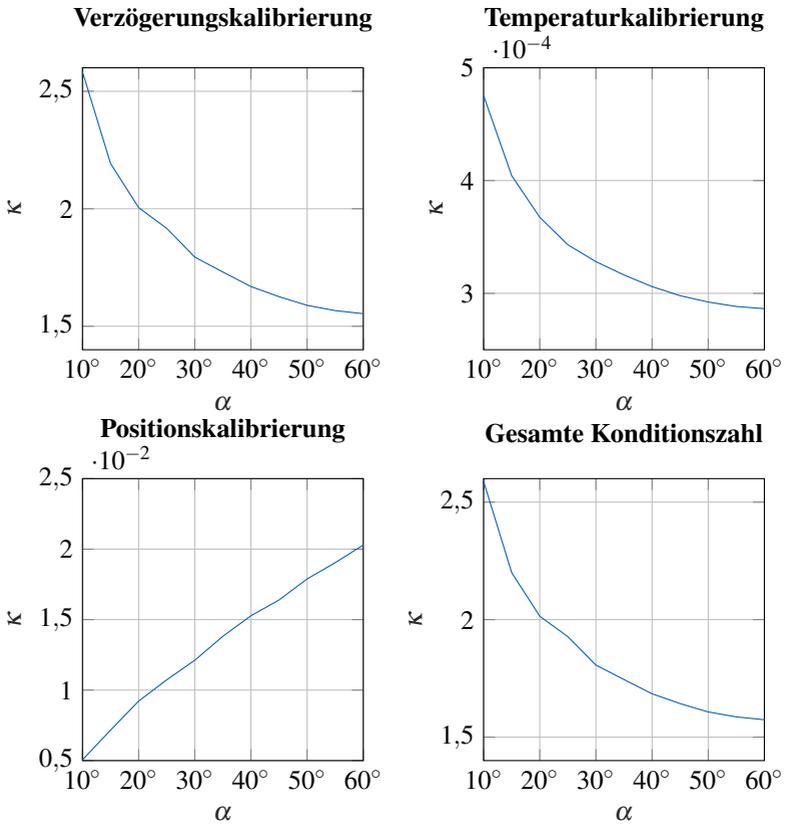


Abbildung 4.22: Die Abbildungen zeigen die Konditionszahlen κ in Abhängigkeit von dem Winkelbereich α .

beobachtet. Die Ergebnisse für $\alpha = 10^\circ \dots 60^\circ$ sind in Abbildung 4.23 dargestellt.

Laut Abbildung 4.23 steigt der maximale TOF-Fehler ab $\alpha = 20^\circ$ stark an und erreicht das eingestellte Suchfenster von $2\mu\text{s}$. Dieser Anstieg wird dadurch verursacht, dass einige A-Scans mit schlechten SNR nicht von der

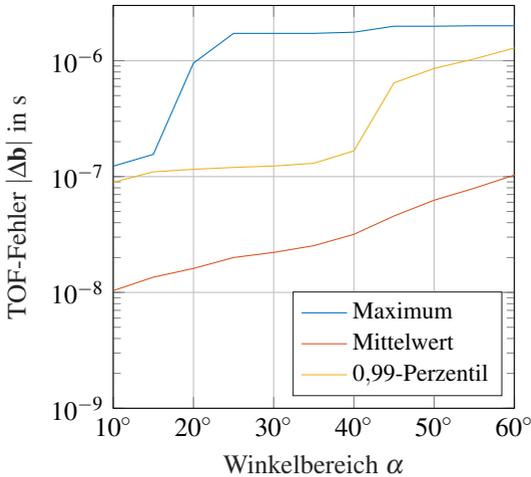


Abbildung 4.23: Der TOF-Fehler $|\Delta b|$ in Abhängigkeit von dem Winkelbereich α

SNR-Filterung mit der eingesetzten Schwelle bei 50 % aussortiert wurden und als Ausreißer in der Statistik erscheinen.

Das 0,99-Perzentil bestätigt diese Vermutung und zeigt, dass bis $\alpha = 40^\circ$ der TOF-Fehler $|\Delta b|$ kleiner als $0,2 \mu\text{s}$ ist. Laut der Abstrahlcharakteristik des Ultraschallwandlers in Abschnitt 3.1 hat der Ultraschallwandler ab 40° einen Phasensprung. Diese erklärt den starken Anstieg des TOF-Fehlers ab $\alpha = 40^\circ$. Im Mittel liegt der TOF-Fehler unterhalb $0,1 \mu\text{s}$.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung entsprechen der Erwartung, dass die Minimierung der Konditionszahl und des TOF-Fehlers ein sich gegenseitig widersprechender Prozess ist. Daher sollten die SEK bei der Selbstkalibrierung für jedes Ultraschallsystem empirisch optimiert werden.

Für eine Selbstkalibrierung des 3D-USCT-II-Geräts mit aller TAS wird α auf 45° gesetzt. Es wird für eine Wassertemperatur von 30°C die Kalibrierungsgenauigkeit berechnet und in Tabelle 4.2 dargestellt. Der mittlere Kalibrierungsfehler liegt bei $0,11 \text{ mm}$.

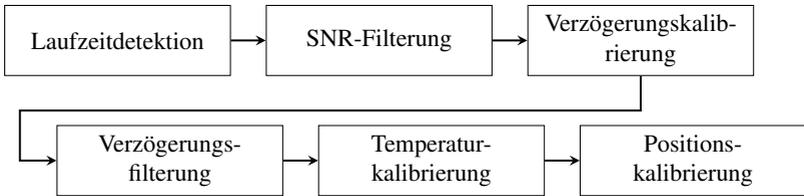


Abbildung 4.24: Sequentieller Kalibrierungsprozess

	$ \Delta b $	$ \Delta b \cdot c$	$ \Delta b \cdot c \cdot \kappa_{gesamt}$
Mittelwert	45,68 ns	68,95 μm	0,11 mm
0,99-Perzentil	0,64 μs	0,97 mm	1,60 mm
Maximum	1,98 μs	3,00 mm	4,90 mm

Tabelle 4.2: Kalibrierungsgenauigkeit für $\alpha = 45^\circ$

4.6 Fazit

In diesem Kapitel wurde ein Selbstkalibrierungsverfahren beruhend auf den Laufzeiten zwischen dem Senden und dem Empfangen eines Ultraschallsignals für bildgebende Ultraschallsysteme vorgestellt. Im Vergleich zum Stand der Technik ermöglicht die vorgestellte Kalibrierungsmethode die getrennte Kalibrierung von Positions-, Temperatur- und Verzögerungsfehler und die Berücksichtigung von inhomogenen Medien.

Die Kalibrierung der Fehlerquellen erfolgt durch einen sequentiellen Prozess. Die Fehlerquelle mit der größten Größenordnung wird zuerst kalibriert. In jedem Kalibrierungsschritt werden andere kleinere Fehlerquellen als vernachlässigbar angenommen. Außerdem können fehlerhafte Komponenten mithilfe der SNR- und Verzögerungsfilterung automatisch erkannt und aussortiert werden. Abbildung 4.24 zeigt ein Beispiel des Kalibrierungsprozesses.

Die Kalibrierungsergebnisse können bei komplexen Ultraschallsystemen oft nicht direkt evaluiert werden, da die Grundwahrheit unbekannt ist. In diesem Kapitel wurde eine Voraussage der Grenzen der Kalibrierungsgenauigkeit anhand der Analyse der Fehlerfortpflanzung in den Gleichungssystemen, dem TOF-Fehler und dem Residuum der Kalibrierung entwickelt.

5 Optimierung der Wandleranordnung

In Abschnitt 2.3.1 wurde der Einfluss der Wandler-Positionen auf die Lokalisierungsgüte bildgebender Ultraschallsysteme diskutiert. In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur Optimierung der Wandler-Position in 2D entwickelt und am Beispiel des bildgebenden Luftultraschallsystems vorgestellt. Die Erweiterung des Verfahrens auf dreidimensionale Systeme wird ebenfalls betrachtet.

5.1 Stand der Technik

Es handelt sich bei Ultraschallsystemen um gerichtete Sensornetzwerke¹. Unter diesem Begriff versteht man ein System von Sensoren, die in einer begrenzten Richtung und Reichweite Objekte erfassen können [70]. Beispiele sind Sensornetzwerke mit Ultraschallwandlern, Infrarotsensoren oder Kameras.

5.1.1 Optimierung eines gerichteten Sensornetzwerks

In [70] wurden Stand der Technik der Optimierung von DSN zusammengefasst. Die vorgestellten Verfahren haben im Allgemeinen das Ziel die Abdeckung vordefinierter Zielobjekte oder Flächen mit einer begrenzten oder minimalen Anzahl von Sensoren zu maximieren. Die meisten vorgestellten Verfahren in [70] zielen gleichzeitig auf eine Minimierung der Überlappung der Sensoren.

¹ engl. *directional sensor networks*(DSN)

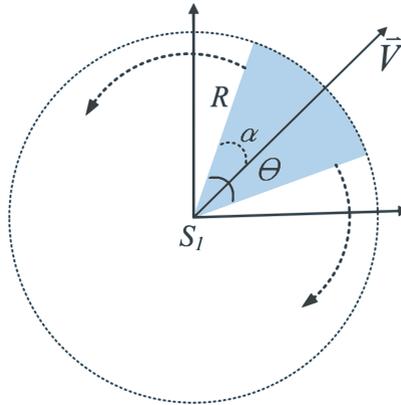


Abbildung 5.1: Sensordefinition bei der Optimierung eines DSNs mit der Reichweite R und dem Öffnungswinkel Θ . Abbildung entnommen aus [71].

Eine wesentliche Herausforderung beim Entwurf eines DSN ist die Richtungseigenschaft der Sensoren. Der winkelbegrenzte Detektionsbereich erhöht die Anzahl an Optimierungsparameter um die Ausrichtung der Sensoren. In [70]–[72] wird der Detektionsbereich eines Sensors durch die Reichweite und den Öffnungswinkel wie in Abbildung 5.1 beschrieben.

Als Qualitätsmaß wird zum Beispiel das Verhältnis zwischen der abgedeckten Fläche und der Gesamtfläche der ROI benutzt. Bei einem Verhältnis von eins sind die Sensorpositionen optimal. In [73] wurde die Berechnung der Flächenabdeckung mit der Anzahl abgedeckter Knoten eines Gitters angenähert. Die ausgewählte Gitterauflösung beeinflusst den Rechenaufwand der Optimierung.

Die in [71], [72], [74] vorgestellten Optimierungsverfahren gehen davon aus, dass die Sensorpositionen zum Anfang der Optimierung bekannt und fixiert sind. Während der Optimierung werden lediglich die Ausrichtungen der Sensoren soweit rotiert, bis die abgedeckte Fläche maximiert ist. Abbildung zeigt ein Beispiel aus [74].

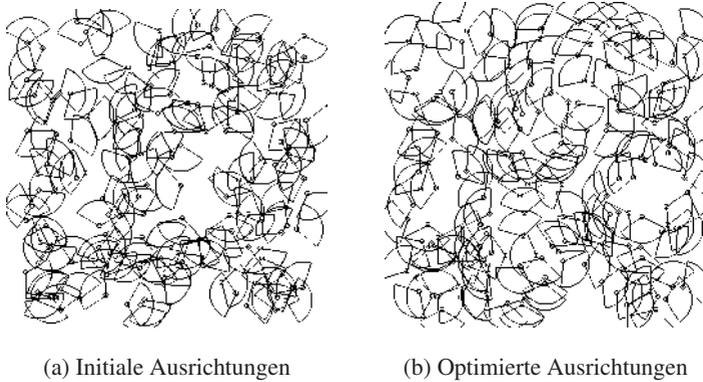


Abbildung 5.2: Die Abbildungen zeigen ein Beispiel der Optimierung von Sensorausrichtungen aus [74]. Es wurde nach der Optimierung die Flächenabdeckung vergrößert.

5.1.2 Optimierung des 3D-USCT-II-Geräts

In der Dissertation von Gregor Schwarzenberg [25] wurde ein Verfahren zur Optimierung der Wandler-Positionen des 3D-USCT-II-Geräts vorgestellt. Das Ziel der Optimierung ist eine Verbesserung des Auslösungsvermögens, des Bildkontrastes und der Objektausleuchtung in der ROI.

Es wurde eine Simulationsumgebung für Punktstreuer entwickelt, um die oben genannten Systemleistungen zu bewerten. Damit die Simulation möglichst die reelle Schallausbreitung in der ROI annähert, wurden folgenden Faktoren berücksichtigt:

1. Schalldämpfung im Medium
2. Abstrahlcharakteristik der Ultraschallwandler
3. Reflexionsverhalten der Punktstreuer

Jeder Ultraschallwandler im 3D-USCT-II-Gerät hat mit seiner Position und dem Richtungsvektor sechs Freiheitsgrade während der Optimierung. Mit den vier Sendern und neuen Empfängern in den 157 TAS hat das 3D-

USCT-II $N = 6 \cdot (157 \times 4 + 157 \times 9) = 11520$ Unbekannte, deren Optimierung laut [25] nicht mehr handhabbar ist.

Um dieses Problem umzugehen, wurde in [25] statt die einzelnen Wandler-Positionen, die Positionierung der Ultraschallwandler auf einem geometrischen Körper optimiert. Es wurde als Grundform der Wandlerpositionierung ein Rotationsellipsoid benutzt. Laut [25] ist der Parameterraum des Rotationsellipsoides zweidimensional, nämlich die Länge der beiden Halbachse eines Ellipsoides.

Die TAS werden in Schichten auf unterschiedlicher Höhe in einem Ring angeordnet. Die Anzahl von TAS-Schichten wird mit einem gewichteten Verhältnis zwischen der verfügbaren Fläche im Rotationsellipsoiden und der aufsummierten Fläche aller 157 TAS-Köpfe optimiert. Zusätzlich wurde die Ausrichtung der TAS mit einem zusätzlichen Optimierungsparameter für die optimale Objektausleuchtung optimiert. Das Ergebnis der Optimierung ist ein Kompromiss zwischen der technischen Realisierbarkeit und der besseren Lokalisierungsgüte.

5.1.3 Allgemeine Anwendbarkeit auf beliebigen Geometrien

In diesem Abschnitt wurden Optimierungsverfahren für die Wandler-Positionen aus unterschiedlichen Anwendungsgebieten diskutiert. Die Optimierungsverfahren für DSN fokussieren auf die Vergrößerung der abgedeckten Fläche mit minimalen Anzahl der Sensoren. Dabei werden die Überlappung der Detektionsbereiche möglichst vermieden. Dieses Ziel widerspricht der Anforderung an möglichst viele SEK pro Zielobjekte in der ROI für die Verbesserung der Lokalisierungsgüte eines bildgebenden Ultraschallsystems wie in Abschnitt 2.3.1 diskutiert wurde. Außerdem bildet die Sensordefinition mit der Reichweite und dem Öffnungswinkel nicht den realistischen Detektionsbereich eines Ultraschallwandlers ab.

Das Optimierungsverfahren für das 3D-USCT-II-Gerät hat mit der Randbedingung, dass die Ultraschallwandler nur auf einer Grundform positio-

nirt werden können, den Parameterraum stark reduziert. Die Systemleistung wurde anhand der Punktspreizfunktion, der Objektausleuchtung und des Bildkontrastes evaluiert. Allerdings begrenzt dieser Ansatz den Suchraum für die optimale Wandlerpositionierung und ist nicht für beliebige Geometrien einer ROI einsetzbar. Außerdem wurde Abschattung des Ultraschalls an Hindernissen nicht berücksichtigt.

5.2 Optimierungsverfahren

Das Ziel des Optimierungsverfahrens ist die Maximierung der Abdeckung der Region-of-Interest (ROI) mit einer möglichst kleinen Anzahl von Ultraschallwandlern. Dabei soll die Systemleistung wie zum Beispiel die Punktspreizfunktion (PSF) und die eindeutige Detektierbarkeit mehrerer Punktstreuer optimiert werden.

Das Optimierungsverfahren beruht auf analytischer Geometrie. Speziell wurden boolesche Operationen auf Polygonen angewendet, um die Abdeckung der ROI mit den Ultraschallwandlern und die Überlappung der Detektionsbereiche der Ultraschallwandler zu berechnen. Außer der geometrischen Betrachtungen der Wandler-Positionen werden Qualitätsmaße aus Bereichen wie Satellitenortung und Optik benutzt, um das System zu charakterisieren.

Es werden die ROI-Abdeckung und die Qualitätsmaße beschrieben durch sogenannten Kostenfunktionen in einem Gleichungssystem zusammengefasst. Die Optimierung der Wandler-Positionen wird durch Minimierung dieser Kostenfunktionen erreicht.

5.2.1 Systemdefinition

Ein wesentlicher Unterschied dieses Optimierungsverfahrens im Vergleich zu anderen Optimierungsstrategien für DSN liegt in der Definition der ROI und des Ultraschallwandlers mit Polygonen im Vergleich zum Stand der Technik mit der Reichweite und dem Öffnungswinkel.

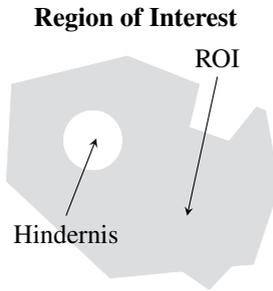


Abbildung 5.3: Die Abbildung stellt eine Beispiel-ROI mit einem Hindernis dar. Während der Optimierung wird die Systemleistung innerhalb dieses Bereiches nicht betrachtet. Für den Fall, dass das Hindernis ein unerwünschtes Objekt ist, sollen die Sensoren möglichst diesen Bereich nicht abdecken.

Region-of-Interest (ROI)

Unter der ROI versteht man den Betrachtungsbereich des Ultraschallsystems, worin sich ein oder mehrere Objekte befinden können. Mit dem Optimierungsverfahren soll die ROI-Abdeckung mit einer möglichst kleinen Anzahl der Ultraschallwandler vollständig abgedeckt werden. In dieser Arbeit wird die ROI durch ein Polygon P_{ROI} beschrieben.

Ein Vorteil der ROI-Beschreibung mit Polygonen ist die erleichterte Berücksichtigung von Hindernissen in der ROI. Ein Hindernis in der ROI (siehe Abbildung 5.3) kann generell ein unerwünschtes Objekt im Feld oder ein Bereich außer Interesse sein. In dieser Arbeit wird es mit einem Loch im Polygon beschrieben. Während der Optimierung der Wandler-Positionen wird es versucht, die Abdeckung solcher Bereiche zu minimieren. Gleichzeitig wird die Abschattung des Detektionsbereiches der Ultraschallwandler durch die Störobjekte berücksichtigt.



Abbildung 5.4: Detektionsbereich eines Ultraschallwandlers

Ultraschallwandler

Statt den Detektionsbereich des Ultraschallwandlers durch seine Reichweite und seinen Öffnungswinkel zu beschreiben, definieren wir den Detektionsbereich durch ein Polygon P_S . Dieses Polygon könnte beispielsweise aus der -3 dB-Schalldruckverteilung hergeleitet werden, worin eine Objektdetektion sicher funktioniert. Die Anordnung der Wandler wird durch ihre x, y -Koordinaten und die Winkelausrichtung θ beschrieben.

Für industrielle Ultraschallwandler werden oft mit unterschiedlichen Zielobjekten die Detektionsgrenzen gemessen. Typische Zielobjekte sind eine 10×10 cm flache Platte und ein Rundstab mit 1 cm Durchmesser. Bei der Messung der Detektionsgrenze wird über dem Winkel das Zielobjekt im Bezug auf den Wandler verschoben, bis es nicht mehr detektierbar ist. Abbildung 5.5 zeigt ein Beispiel einer solchen Messung mit dem UC2000-30GM Ultraschallwandler von Pepperl+Fuchs GmbH. Je nach Objektgröße und Objektform kann der Detektionsbereich des Wandlers entsprechend den Messungen für das Optimierungsverfahren angepasst werden.

5.2.2 Abschätzung der Wandler

Aufgrund der großen Impedanzunterschiede zwischen Luft und Festkörper wird ein großer Teil der Schallenergie am Festkörper reflektiert (siehe Tabelle 2.1). Infolgedessen sind Objekte hinter einem solchen Hindernis mit einem Ultraschallwandler nicht detektierbar.

Für das Optimierungsverfahren heißt es, dass der Detektionsbereich eines Ultraschallwandlers am Hindernis entsprechend abgeschnitten werden

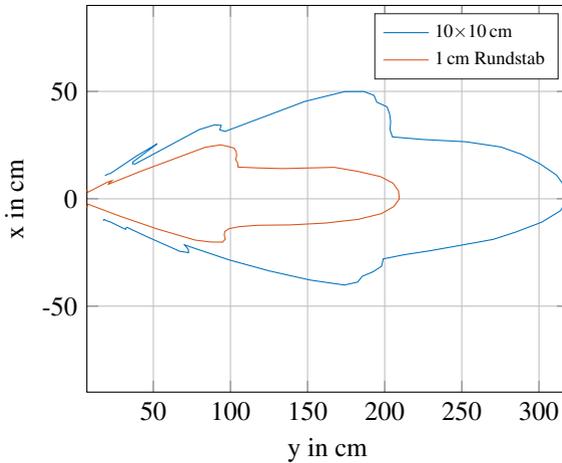


Abbildung 5.5: Die Abbildung stellt die Messergebnisse der Detektionsgrenzen des UC2000-30GM Ultraschallwandlers mit zwei Testobjekten dar.

muss, um die Abschattung zu berücksichtigen. Durch die Beschreibung des Wandlers durch ein Polygon, lässt sich dieser Effekt leicht berücksichtigen. Abbildung 5.6 dienen zur Erklärung des Verfahrens zum Abschneiden des Wandlerbetrachtungsbereichs am Hindernis.

Es wird zuerst für jeden Eckpunkt des Polygons des Hindernisses der Winkel zum Normalenvektor des Wandlers berechnet. Die zwei Eckpunkte mit jeweils den maximalen positiven und negativen Winkel zum Normalenvektor werden notiert (siehe Abbildung 5.6 (a)).

Danach werden die Vektoren zwischen diesen zwei Punkten und der Wandler-Position wie in Abbildung 5.6 (b) verlängert. Die verlängerten Vektoren müssen mindestens die Länge der Reichweite des Wandlers haben. In dem nächsten Schritt werden die Endpunkte dieser zwei Vektoren zu der Beschreibung des Hindernisses hinzugefügt.

Die konvexe Hülle des erweiterten Polygons ergibt die neue Beschreibung des Hindernisses, die den Schattenbereich beschreibt (siehe Abbildung 5.6

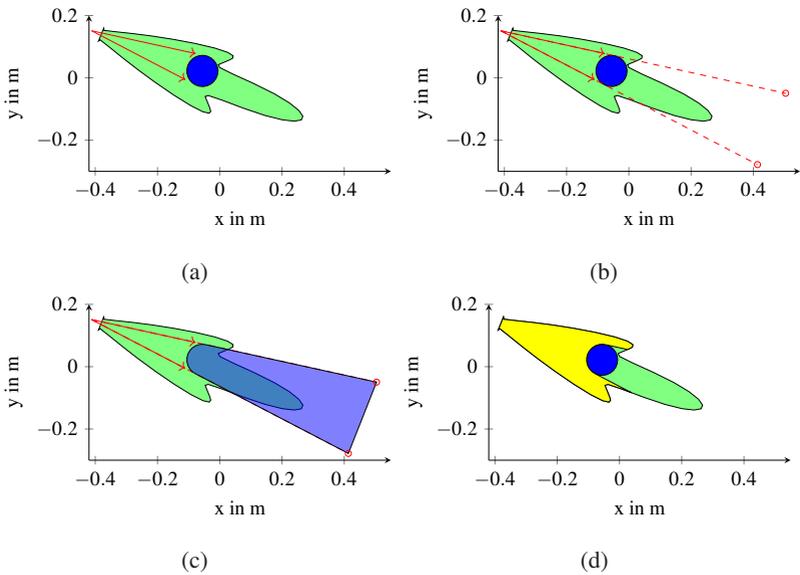


Abbildung 5.6: Die Abbildungen zeigen das Verfahren zum Abschneiden des Detektionsbereiches des Wandlers am Hindernis.

(c)). Die Differenz zwischen dem Detektionsbereich und dem erweiterten Polygon des Hindernisses ergibt den abgeschnittenen Detektionsbereich des Ultraschallwandlers (gelb markiert in Abbildung 5.6 (d)).

5.2.3 Kostenfunktionen

Das Verfahren realisiert die Optimierung der Wandler-Position mit einem Gleichungssystem $F(x)$ von Kostenfunktionen. Die Kostenfunktionen beschreiben die Systemleistung des bildgebenden Ultraschallsystems wie zum Beispiel die ROI-Abdeckung und die Abbildungsqualität. Die damit beschriebene Systemleistungen haben optimalen Eigenschaften, wenn die Kostenfunktionen einen Funktionswert von Null haben.

Allerdings können die Kostenfunktionen je nach dem Ziel der Optimierung gegenseitig einschränken. Daher ist die gefundene Lösung durch iteratives Lösen des Gleichungssystems ein Kompromiss der Kostenfunktionen.

ROI-Abdeckung

Ein Ziel der Optimierung ist die Abdeckung der ROI mit einer limitierten Anzahl von Ultraschallwandlern zu maximieren. Die abgedeckte Fläche A ist die Fläche der ROI, die mindestens von einem Ultraschallwandler geschnitten wird. Für gegebene N Wandler ist die abgedeckte Fläche gegeben durch

$$A(P_{ROI} \cap \bigcup_i^N P_{S_i}). \quad (5.1)$$

Die Maximierung der Fläche A ist gleichwertig mit der Minimierung der nicht abgedeckten Fläche. Die Kostenfunktion lautet nach der Umformulierung

$$f_{\bar{c}} = A(P_{ROI} \setminus (P_{ROI} \cap \bigcup_{i=1}^N P_{S_i})). \quad (5.2)$$

In Abbildung 5.7 ist ein Beispiel der Abdeckung der ROI dargestellt. In der grün markierten Fläche soll eine einfache Detektion von Objekten möglich sein.

Überlappung mehrerer Ultraschallwandler

Diese Kostenfunktion hat das Ziel die eindeutige Lokalisierung von einer gegebenen Anzahl von Punktstreuern in der ROI mit dem Ultraschallsystem zu garantieren. Laut dem Puls-Echo-Prinzip und dem Trilaterationsverfahren [75] müssen für K Punktstreuer in der ROI mindestens $K + 1$ Laufzeitinformationen verfügbar sein. Somit kann die Einzigartigkeit der Kreisschnittpunkte garantiert werden. Diese Grundidee soll anhand des Beispiels in Abbildung 5.8 erläutert werden.

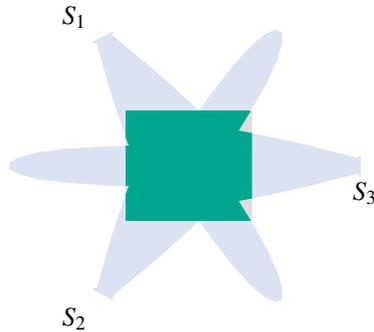


Abbildung 5.7: Die Abbildung zeigt die Abdeckung einer rechteckigen ROI mit drei Ultraschallwandlern. Die abgedeckte Fläche ist grün dargestellt.

Abbildung 5.8 zeigt ein Ultraschallsystem mit drei Ultraschallwandlern. Zu detektieren sind zwei Punktstreuer, die als Kreise dargestellt sind. In Abbildung 5.8 (a) liefert mit der Puls-Echo-Detektion der Ultraschallwandler (1) zwei gemessene Laufzeiten, mit denen die Abstände der Punktstreuer zum Wandler berechnet werden können. Mit dieser Information ist eine Erkennung der genauen Lage der Objekte in der lateralen Richtung zum Wandler nicht möglich.

Mit zwei Ultraschallwandlern (1) und (2) bekommen wir in Abbildung 5.8 (b) zwei zusätzliche Laufzeiten. Die damit gezeichneten Kreisbögen schneiden sich an vier Positionen, an den sich die Punktstreuer befinden können. Diese vier Schnittpunkte sind nicht eindeutig um die zwei Punktstreuer zu lokalisieren. Erst mit dem dritten Wandler (3) in Abbildung 5.8 (c) ergeben sich aus den Laufzeitmessungen zwei eindeutige Schnittpunkte, an denen sich die zwei Punktstreuer befinden.

Aufgrund dessen interessieren wir uns dafür, die überlappende Detektionsbereiche für $M = K + 1$ Ultraschallwandler innerhalb der ROI zu maximieren. Die überlappende Fläche ist gegeben durch

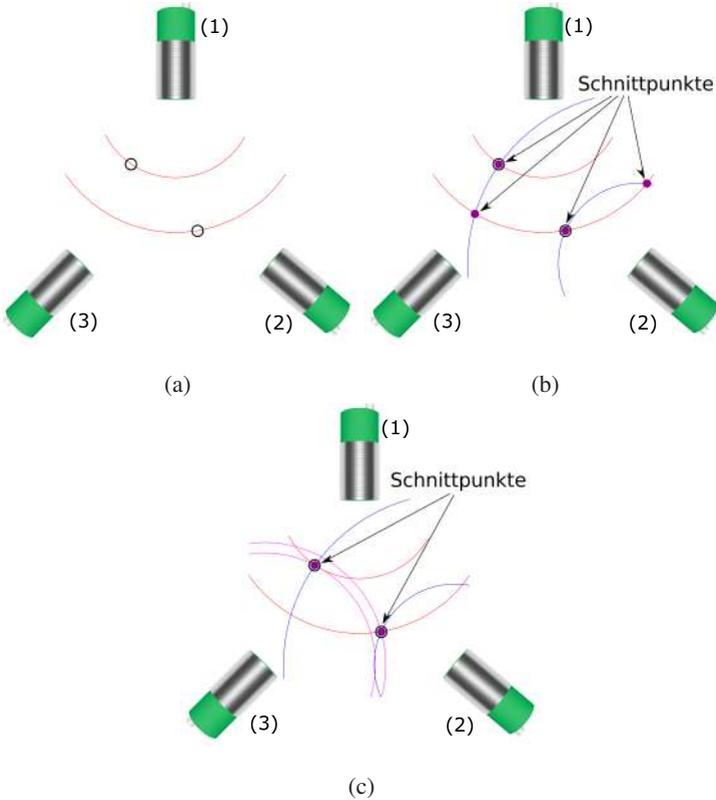


Abbildung 5.8: Die Abbildungen stellen die Detektion von zwei Objekten anhand drei Sensoren mit Hilfe des Trilaterationsverfahrens dar.

$$\begin{aligned}
 f_{\bar{v}} &= A(P_{ROI} \setminus (P_{ROI} \cap \bigcup_{j=1}^{|I|} \bigcap_{k \in I_j} P_{S_k})) \\
 I &= \binom{C}{M}
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

Die Menge I ist die M -Submenge von der Menge der Wandler $C = \{1, \dots, N\}$.

Abbildung 5.9 zeigt die Berechnung der Überlappung der Detektionsbereiche am Beispiel eines Ultraschallsystems mit drei Ultraschallwandlern.

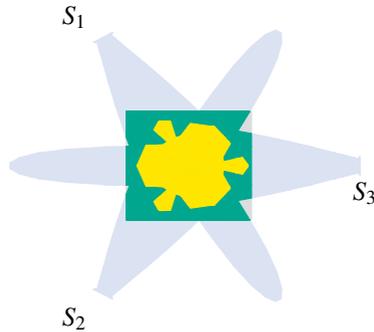


Abbildung 5.9: Der überlappende Detektionsbereich von mindestens drei Wählern sind gelb markiert. Die ROI-Abdeckung ist grün dargestellt.

Dilution of Precision (DOP)

Bei der Satellitenortung wird die Position aus der Signallaufzeit von Satelliten zum Empfänger berechnet [76]. Die Genauigkeit der Position ist von der Satellitenposition zueinander und zu dem Empfänger, sowie die Qualität der Laufzeitmessung abhängig. Das sogenannte *Dilution of Precision* (DOP) wird als ein Maß für die Messgenauigkeit der Positionsbestimmung verwendet [77].

Abbildung 5.10 dient zur Erklärung des Positionsfehlers im Zusammenhang mit der Wandler-Positionen. In den Abbildungen sind der rote und blaue Punkt zwei Ultraschallwandler in unterschiedlichen räumlichen Anordnungen in 2D.

Die Ultraschallwandler arbeiten im Puls-Echo-Modus und haben einen maximalen Messfehler, der in der Abbildung mit den grauen Kurven dargestellt ist. Die rote und blaue Kurven sind die gemessenen Abstände ohne Fehler. Die grüne Fläche stellt den Bereich dar, in dem sich das Objekt befinden kann.

In Abbildung 5.10 wird in der rechten Abbildung gezeigt, wie ungünstige Wandler-Positionen zueinander den gegebenen Messfehler einzelnes Ultra-

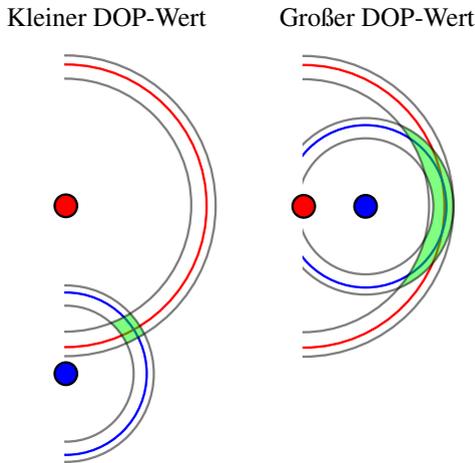


Abbildung 5.10: Die Abbildung demonstriert den Einfluss der Wandlerpositionen relativ zu der Empfangsposition (grün markiert) auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Bild adaptiert von ²

schallwandlers verstärken können. Durch die Minimierung der DOP kann der Lokalisierungsfehler des Objekts für einen gegebenen Messfehler reduziert werden [77].

Empirisch gilt für einen kleinen DOP-Wert ≤ 5 eine gute Ortungsgenauigkeit. In dieser Arbeit ist nicht nur ein kleiner DOP-Wert für das ganze Ultraschallsystem gewünscht, sondern eine homogene Verteilung der DOP-Werten innerhalb der ROI.

Die Berechnung der DOP-Werte kann nur für den Bereich in dem mindestens zwei Ultraschallwandler sich überlappen berechnet werden. In diesem Bereich wird ein regelmäßiges Punktgitter erzeugt. Abbildung 5.11 zeigt ein Beispielgitter für die Berechnung der DOP-Werte.

Für jeden Punkt $P(x,y)$ in dem Gitter werden die Menge $O \geq 2$ Ultraschallwandler, die den Punkt in ihrem Detektionsbereich umfassen, be-

² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geometric_Dilution_Of_Precision.svg

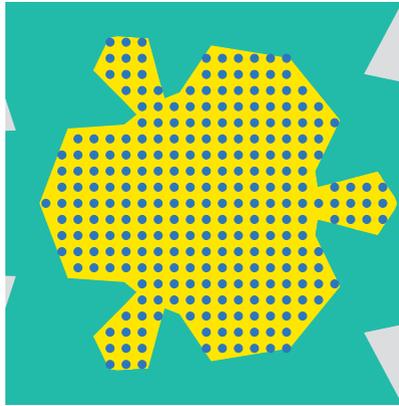


Abbildung 5.11: Die Abbildung zeigt ein Beispiel des Punktgitters (blau) für die DOP-Auswertung in dem überlappenden Bereich von mindestens zwei Ultraschallwandlern (gelbe Fläche). Die grüne Fläche zeigt die ROI-Abdeckung.

stimmt. Danach wird der DOP-Wert mit den folgenden Gleichungen berechnet:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_1-x}{R_1} & \frac{y_1-y}{R_1} & -1 \\ \frac{x_2-x}{R_2} & \frac{y_2-y}{R_2} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{x_O-x}{R_O} & \frac{y_O-y}{R_O} & -1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$Q = (A^T A)^{-1} \quad (5.5)$$

$$DOP = |\text{diag}(Q)|, \quad (5.6)$$

mit x_i und y_i als die Koordinaten des i -ten Ultraschallwandlers und R_i der euklidische Abstand zwischen der Wandler-Position und dem Punkt P . Die z -Dimension wurde für den zweidimensionalen Fall vernachlässigt.

Punktspreizfunktion (PSF)

Die Punktspreizfunktion (PSF) wird im Bereich Optik und Bildverarbeitung verwendet, um die Abbildungsqualität eines bildgebenden Systems zu charakterisieren. Sie beschreibt die Fähigkeit des Systems, zwei Punktstreuer als getrennte Strukturen abzubilden [78]. Der Abstand, bei dem die zwei Strukturen noch als getrennt wahrnehmbar ist, gibt die Systemauflösung.

Gemessen wird die PSF oft mit der Halbwertsbreite (FWHM). Die FWHM ist definiert als die Breite zwischen zwei Argumentwerten einer Funktion, bei deren Funktionswert auf die Hälfte des Maximums abgesunken ist. Abbildung 5.12 zeigt schematisch die Berechnung der Halbwertsbreite für eine eindimensionale Funktion.

Zur Auswertung der 2D-PSF benutzen wir das gleiche Punktgitter wie bei der DOP-Auswertung. Für jeden Punkt $P(x,y)$ werden zuerst nach den Ultraschallwandlern, die den Punkt in ihrem Detektionsbereich haben, gesucht. Danach werden die A-Scans von jeder SEK simuliert. Zum Schluss wird aus den A-Scans den Punktstreuer mit der *Synthetic Aperture Focusing Technique* (SAFT) rekonstruiert.

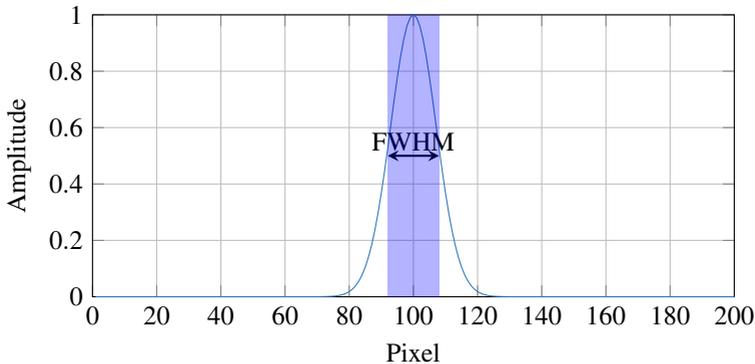


Abbildung 5.12: Die Abbildung zeigt die eindimensionale Definition der Halbwertsbreite.

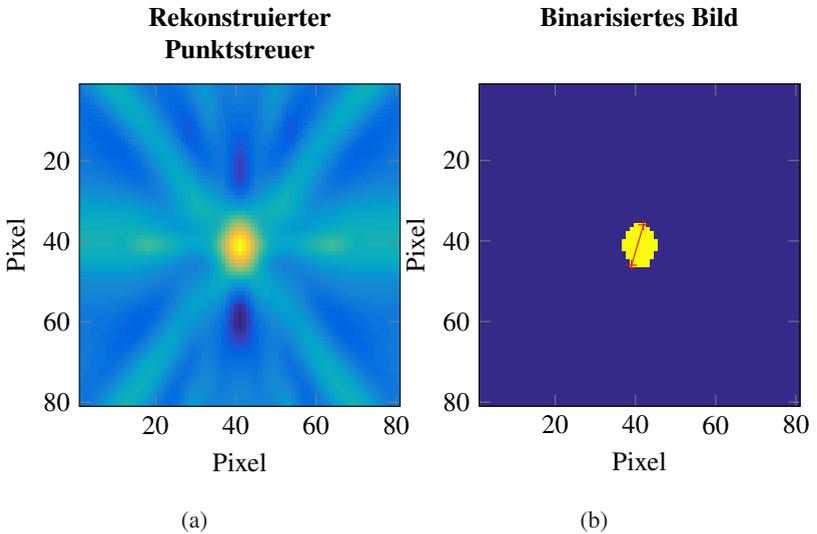


Abbildung 5.13: Die Abbildung (a) zeigt ein rekonstruiertes Bild eines Punktstreuers mit SAFT. In (b) wurde das Bild für Werte größer als das halbe Maximum des Bildes binarisiert. Die extrahierte Halbwertsbreite ist mit der roten Linie markiert.

Um die Halbwertsbreite des rekonstruierten Punktstreuers zu berechnen, wird zuerst das Bild für Werte größer als das halbe Maximum binarisiert. Dabei werden Bildpunkte mit Werte größer als das halbe Maximum auf dem Wert „1“ und die restliche Bildpunkte auf dem Wert „0“ gesetzt. Abbildung 5.13 (b) zeigt ein Beispiel solches Bildes.

Die Indices der Pixel in dem gelb markierten Gebiet werden extrahiert und die euklidische Distanz zueinander berechnet. Das Maximum dieser Distanzmatrix wird als die Halbwertsbreite der Punktspreizfunktion genommen. Mit dieser Methode wird die PSF unabhängig von ihrer räumlichen Varianz berechnet. Ähnlich zur Optimierung der DOP-Werte sind kleine Werte und eine homogene Verteilung der PSF gewünscht.

Transmissionsoptimierung

Diese Kostenfunktion soll die Anzahl von Empfänger für jeden Sender in dem Transmissionsbetrieb maximieren. Der Transmissionsbetrieb wird für die Selbstkalibrierung des Ultraschallsystems benutzt. Für N Ultraschallwandler sind N^2 Sender-Empfänger-Kombinationen möglich. Diese ist aber aufgrund des begrenzten Öffnungswinkels des Ultraschallwandlers oft nicht möglich.

Die Anzahl von Empfängern pro Sender soll mit dieser Kostenfunktion maximiert werden, um das Verhältnis zwischen der Anzahl von Gleichungen zu Anzahl der Unbekannten zu erhöhen. Je größer dieses Verhältnis ist,

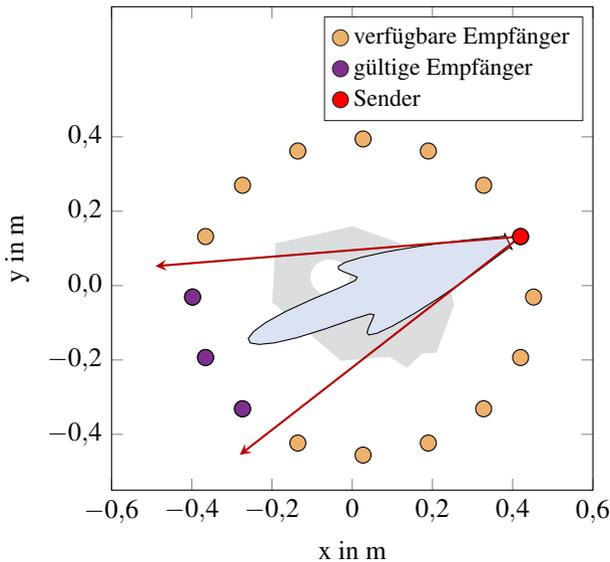


Abbildung 5.14: Die Abbildung stellt ein Beispiel zur Bestimmung der gültigen Empfänger in dem Transmissionsbetrieb dar. Die rote Pfeile zeigen den Öffnungswinkel des Senders. Empfänger zwischen der Vektoren werden ausgewählt. Die graue Fläche ist die ROI und die grüne Fläche stellt den Detektionsbereich des Sensors dar.

desto besser gestellt ist das Gleichungssystem. Außerdem wird das Kalibrierungsergebnis von Ausreißern in der Laufzeitmessung weniger abhängig.

Zur Bestimmung der ausgewählten Empfänger wird zuerst der Öffnungswinkel des Wandlers aus dem Polygon P_S berechnet. Dabei werden die Eckpunkte mit dem größten Winkel zu dem Normalenvektor des Wandlers bestimmt. Danach wird die Anzahl von Empfängern, die sich in diesem Winkelbereich gegenüber des aktuellen Senders befinden aufsummiert. Abbildung 5.14 zeigt ein Beispiel zur Bestimmung der ausgewählten Empfänger.

Schließlich wird der Funktionswert berechnet aus:

$$f_i = N^2 - \sum_{i=1}^N G_i, \quad (5.7)$$

mit G_i gleich die Anzahl der ausgewählten Empfänger für den i -ten Wandler.

Verbotene Zone

Je nach Designkriterien könnte beim Entwurf des Ultraschallsystems die Platzierung des Wandlers in den verbotenen Zonen vermieden werden. Um die Platzierung des Wandlers in solcher Zone zu beschränken, werden Wandler in solcher Zone mit einem Strafwert gewichtet:

$$f_p = \begin{cases} -\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} & \text{Sensor in verbotener Zone} \\ 0 & \text{Sensor in erlaubter Zone.} \end{cases} \quad (5.8)$$

Die Detektion solcher Fälle können beispielsweise mit dem Punkt-in-Polygon-Verfahren nach Jordanschen Kurvensatz realisiert werden [79]. Der Strafwert wird aus dem Euklidischen Abstand der aktuellen Wandlerposition zum Mittelpunkt der verbotenen Zone berechnet. Das negative Vorzeichen erzwingt später in der Berechnung des Gradienten des Gleichungssystems eine Bewegung der Wandlerposition aus der verbotenen Zone heraus.

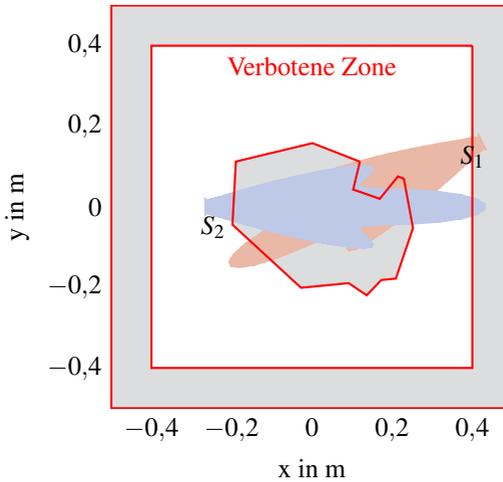


Abbildung 5.15: In der Abbildung sind die Kanten der verbotenen Zone rot dargestellt. Der Wandler S_1 , der sich in der verbotener Zone befindet, wird mit einem Strafwert gewichtet.

5.2.4 Gleichungssystem

Die Kostenfunktionen im Abschnitt 5.2.3 werden in einem Gleichungssystem $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ für N Wandler zusammengefasst

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = [f_{\bar{c}}, f_{\bar{\sigma}}, \mu_{DOP}, \sigma_{DOP}, \bar{A}_{DOP}, \mu_{PSF}, \sigma_{PSF}, \bar{A}_{PSF}, f_t, \mathbf{f}_p]^\top \quad (5.9)$$

$$\mathbf{f}_p = [f_{p_1}, \dots, f_{p_N}]^\top \quad (5.10)$$

mit $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N, y_1, \dots, y_N, \theta_1, \dots, \theta_N]^\top$ als die Optimierungsparameter. Parameter x_i und y_i sind die Koordinaten des i -ten Ultraschallwandlers und θ_i ist die Winkelausrichtung.

Für die Optimierung der DOP und PSF werden der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ der Werte als Funktionswert genommen. Die Flächen \bar{A}_{DOP} und \bar{A}_{PSF} sind die Differenzflächen zwischen der ROI-Fläche und der Flächen mit DOP- und FWHM-Werte der PSF kleiner als den ge-

gegebenen Schwellwerten. Die Funktionswerte $f_{\bar{c}}$ und $f_{\bar{o}}$ werden auf die Gesamtfläche der ROI normiert.

Das Gleichungssystem $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ ist nicht linear und unterbestimmt, da für $N = 5$ Ultraschallwandler bereits die Anzahl der Unbekannten die Anzahl der Gleichungen überschreitet.

$$9 + N < 3N \quad (5.11)$$

$$2N > 9 \quad (5.12)$$

$$N > 4,5 \quad (5.13)$$

Das Ziel der Optimierung ist, durch iterative Verbesserung der initialen Wandleranordnung die Norm des Funktionsvektors $\|\mathbf{F}(\mathbf{x})\|^2 \rightarrow 0$ zu minimieren. Es wurde der Trust-Region-Verfahren aus Abschnitt 2.4.3 aufgrund seiner Stabilität eingesetzt. Der Aktualisierungsprozess wird angehalten, sobald ein lokales Minimum erreicht ist oder eine definierte Anzahl von Iterationen überschritten wurde.

Gewichtung einzelner Kostenfunktion

Mit zusätzlichen Gewichtungen können die Kostenfunktionen mit unterschiedlichen Prioritäten minimiert werden. Tabelle 5.1 zeigt typische Zahlenbereiche der Kostenfunktionen und die Gewichtungen, damit alle Kostenfunktionen gleiche Priorität haben.

Es wird vor der Berechnung der Vektornorm $\|\mathbf{F}(\mathbf{x})\|^2$ der Funktionsvektor mit dem Gewichtsvektor elementweise multipliziert:

$$\hat{\mathbf{F}}(\mathbf{x}) = \alpha \circ \mathbf{F}(\mathbf{x}). \quad (5.14)$$

5.3 Beispielentwurf

In diesem Kapitel wird das Optimierungsverfahren mit einem Beispielentwurf näher betrachtet. Ein bildgebendes Ultraschallsystem mit sechzehn Ul-

Kostenfunktion	Wertebereich	Gewichtung α
$f_{\bar{c}}$	0 bis 1	100
$f_{\bar{v}}$	0 bis 1	100
μ_{DOP}, σ_{DOP}	0 bis 10	1
μ_{PSF}, σ_{PSF}	0 bis 1 cm	10
$\bar{A}_{DOP}, \bar{A}_{PSF}$	0 bis 1	100
f_t	0 bis 1	0,1
f_p	0 bis 1	1

Tabelle 5.1: Die Tabelle zeigt die Zahlenbereiche, die einzelne Kostenfunktion für das ABUS-System haben könnte. Die Gewichtungen sind empirisch eingestellt.

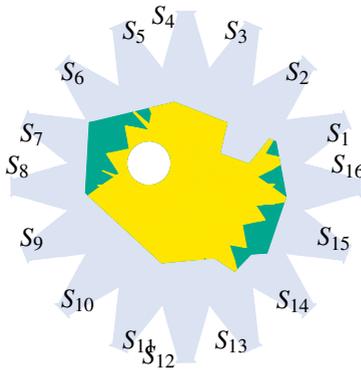
traschallwandlern wird für die ROI in Abschnitt 5.2.1 optimiert. Der Detektionsbereich des Wandlers wurde aus der gemessenen Detektionsgrenzen des UC2000-30GM Ultraschallwandlers mit dem 1 cm dicken Rundstab extrahiert. Die erwartete Systemauflösung liegt laut Gleichung (3.1) für eine Schallgeschwindigkeit von 343 m s^{-1} in Luft und eine Wandlerbandbreite von 20 kHz bei 1,7 cm.

Die sechzehn Wandler werden in einer regelmäßigen Kreisanordnung mit einem Radius von 45 cm initialisiert. Für die Auswertung von DOP und FWHM der Punktspreizfunktion wurde ein Punktraster mit einem Gitterabstand von 5 mm benutzt. Die Abtastrate der simulierten A-Scans liegt bei 2 MHz.

Für die SAFT-Bildrekonstruktion wird das Echo an den simulierten Punktstreuern durch einen Sinc-Puls mit einer Bandbreite von 7,6 kHz und einer Mittelfrequenz von 6,7 kHz ersetzt. Dieser Puls hat eine äquivalente Halbwertsbreite von ca. 14 mm. Die Bildauflösung lag bei 1 mm.

Abbildung 5.16 stellt das Ergebnis nach der Optimierung dar. Das Verfahren konvergierte nach fünf Iterationen zu einem lokalen Minimum. Die

Initiale Anordnung
ROI-Abdeckung: 100 %
Überlappungsfläche: 79,2 %



Optimierte Anordnung
ROI-Abdeckung: 100 %
Überlappungsfläche: 97,2 %

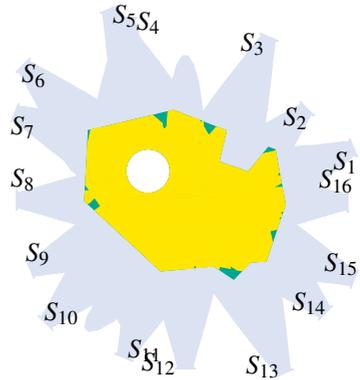


Abbildung 5.16: Die Abbildungen zeigen die Abdeckung der ROI und die Überlappungsfläche von mindestens drei Ultraschallwandler für die kreisförmige Sensoranordnung und die optimierte Anordnung. Die grüne Fläche zeigt die ROI-Abdeckung und die gelbe Fläche den Überlappungsbereich von mindestens drei Wandlern.

berechnete Flächen sind auf die Fläche der ROI normiert. Mit der kreisförmigen Wandleranordnung in der linken Abbildung wurde zwar die komplette ROI abgedeckt, aber die Überlappungsfläche lag nur bei 79,2 %.

Nach der Optimierung wurden die Wandler-Positionen so verbessert, dass in 97,2 % der ROI-Fläche eine gleichzeitige Detektion von zwei Punktstreuer mit Trilateration möglich ist. Außerdem wird die komplette ROI von mindestens einem Wandler abgedeckt.

Abbildung 5.17 stellt die Verteilung der DOP-Werten für beide Anordnungen dar. Die Fläche A mit DOP-Werten ≤ 2 wurde nach der Optimierung von 59,6 % auf 64,9 % vergrößert. Die Umriss dieser Flächen sind mit roten Linien eingezeichnet.

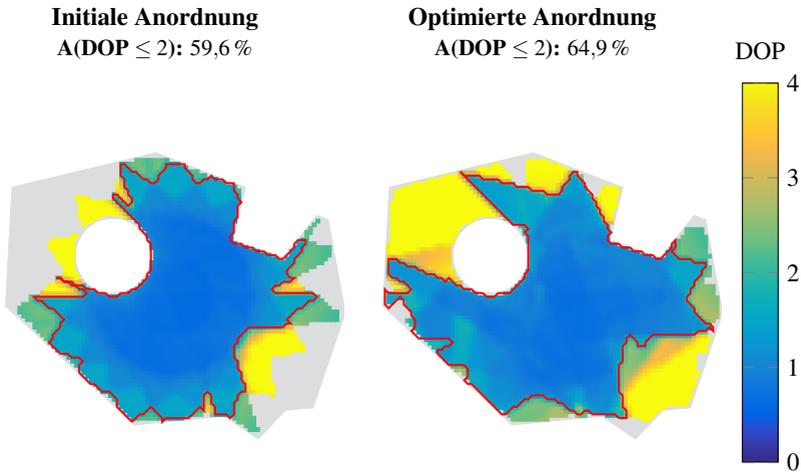


Abbildung 5.17: Die Verteilung der DOP-Werten für beide Anordnungen. Die rote Linie zeigt den Umriss der Fläche A, in denen die DOP-Werte < 2 sind. Diese Fläche liegt mit der optimierten Anordnung bei 64,9 % im Vergleich zu 59,6 % mit der initialen Anordnung.

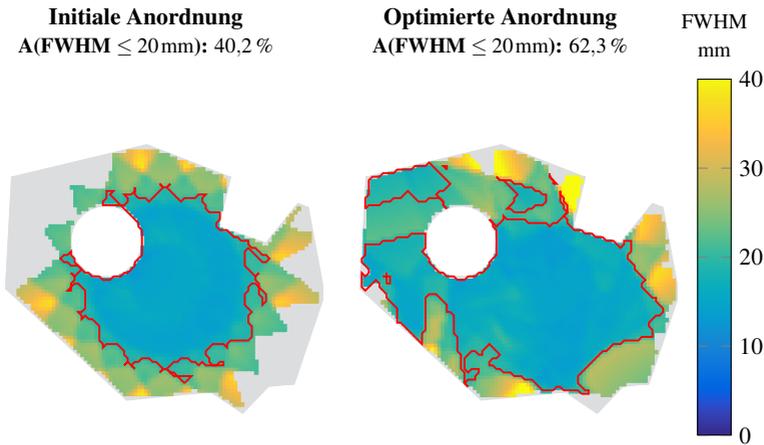


Abbildung 5.18: Die Abbildungen zeigen die Verteilung der FWHM der PSF für beide Wandleranordnungen. Die rote Linie kennzeichnet die Fläche mit FWHM ≤ 20 mm.

In Abbildung 5.18 sind die Verteilungen der Halbwertsbreite der Punktpreisizfunktion für beide Anordnungen dargestellt. Das Ergebnis nach der Optimierung zeigt eine deutliche Vergrößerung der Fläche mit FWHM der $PSF \leq 20$ mm von 40,2 % auf 62,3 %.

5.4 Anzahl der benötigten Wandler

Ein wichtiger Designparameter eines Ultraschallsystems ist die Anzahl der Ultraschallwandler. Da die Anzahl der Wandler direkt mit der Komplexität und der Kosten des Systemaufbaus verbunden ist, soll sie möglichst minimiert werden. Gleichzeitig soll die maximale Abdeckung der ROI und die gewünschte Systemleistung gewährleistet werden.

Um den Einfluss der Anzahl von Ultraschallwandlern auf die Systemleistung des optimierten Systems zu untersuchen, wurde für die ROI in Abbildung 5.3 Ultraschallsysteme mit fünf bis zwanzig Ultraschallwandlern des Typs UC2000-30GM mit dem vorgestellten Verfahren optimiert.

Es sollen in der ROI gleichzeitig zwei Objekte lokalisiert werden. Das heißt eine Maximierung der Überlappungsfläche von mindestens drei Wandlern ist nötig. Die Wandler-Positionen werden mit einer regelmäßigen Kreis-anordnung um die ROI mit einem Durchmesser von 45 cm initialisiert.

Das Optimierungsverfahren wird bei maximal 50 Iterationen oder einer Änderung in der Vektornorm $\|\mathbf{F}(\mathbf{x})\|^2 < 1 \times 10^{-12}$ abgebrochen. Die Flächen mit $DOP \leq 2$ und FWHM der $PSF \leq 20$ mm sollen maximiert werden. Dargestellt in Abbildung 5.19 ist der Einfluss der Anzahl von Ultraschallwandlern auf die Systemleistung.

Es wurde beobachtet, dass die Systemleistung mit ansteigender Anzahl der Wandler verbessert wird. Für eine Überlappung von mindestens drei Wandlern und eine Fläche von FWHM der PSF 20 mm ist die optimierte Anordnung stets besser als die initiale. Die optimierte ROI-Abdeckung ist für wenige Wandler (< 12) schlechter.

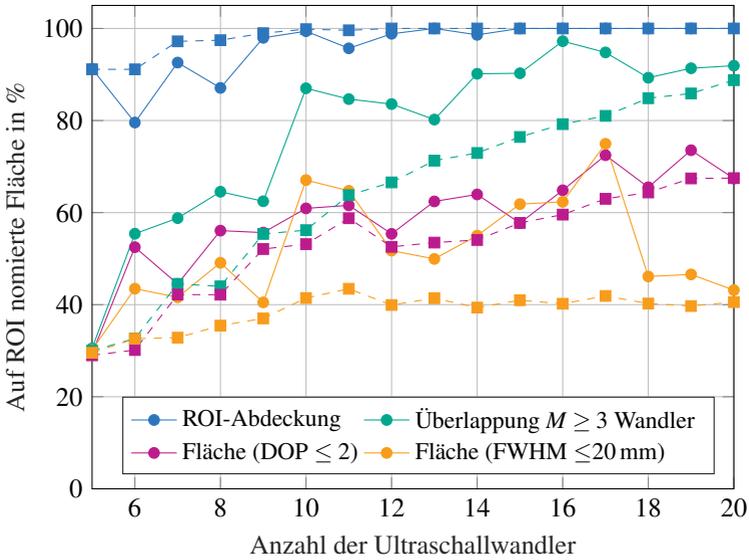


Abbildung 5.19: Die Abbildung zeigt den Einfluss der Anzahl von Wandlern auf die Systemleistung. Die gestrichelte Linien zeigen die Systemleistungen der initialen Systeme in einer Kreisarrangierung.

Ab zwölf Ultraschallwandlern erreicht das System mit beiden Anordnungen volle ROI-Abdeckung. Die Verbesserung der Überlappungen von mindestens drei Wandler stagniert ab sechzehn Wandlern. Gleichzeitig reduziert sich die Fläche, worin die FWHM der PSF kleiner als 20 mm ist.

Da das Gleichungssystem der Kostenfunktionen nichtlinear und unterbestimmt ist, ist das Ergebnis der Optimierung von der Initialisierung der Wandleranordnung abhängig. Im Folgenden wird beispielhaft untersucht, wie sich das Optimierungsergebnis für zufällige Initialisierung ändert.

Es wurde die Systemleistung vor und nach der Optimierung für sechzehn Ultraschallwandler mit fünfzig zufälligen Anordnungen der Wandler um die ROI durchgeführt. Die Wandler wurden mit unterschiedlichen Abständen zueinander in einem Kreis mit einem Durchmesser von 45 cm initialisiert.

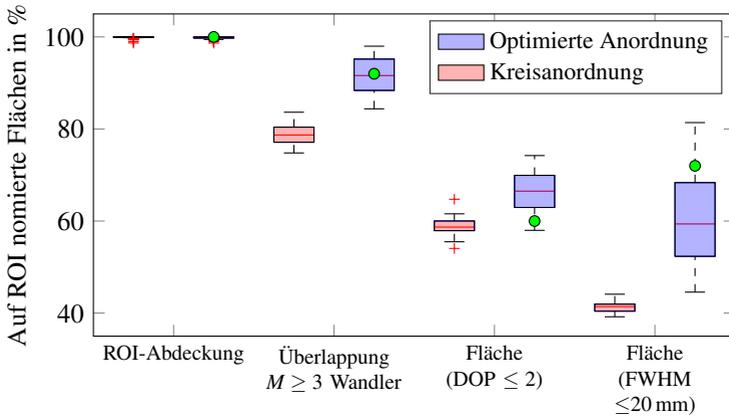


Abbildung 5.20: Die Abbildung zeigt die Streuung der Systemleistung vor und nach der Optimierung mit fünfzig zufälligen Anordnungen der Wandler um die ROI. Die grüne Punkte markieren das Ergebnis für eine regelmäßige Kreisordnung in Abbildung 5.19 .

Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Die Systemleistung für das Ergebnis mit sechzehn Ultraschallwandler in einer regelmäßigen Kreisordnung wie in Abbildung 5.19 ist mit den grünen Punkten zum Vergleich markiert. Die Kastengrafik zeigt, dass im Median das Optimierungsverfahren eine Verbesserung in allen Kostenfunktionen erzielt hat. Eine große Streuung ist in der Fläche mit FWHM der PSF kleiner als 20 mm zu beobachten. Außerdem wurde beobachtet, dass das Optimierungsergebnis in Abbildung 5.19 für eine initiale Wandleranordnung in einem regelmäßigen Kreis nicht das beste Ergebnis ist.

Das beste Ergebnis aus dieser Untersuchung ist die optimierte Anordnung mit dem größten Summenwert aller Systemleistungen. Das heißt eine optimierte Anordnung mit größter ROI-Abdeckung, größter Überlappungsfläche von mindestens drei Wandlern und der größten Fläche mit $DOP \leq 2$ und $FWHM \leq 20$ mm. Dieses Ergebnis ist in Abbildungen 5.21, 5.22 und 5.23 dargestellt.

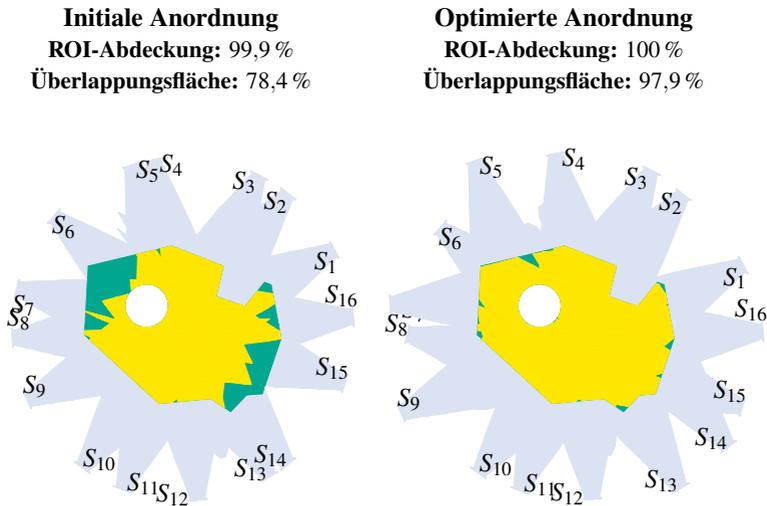


Abbildung 5.21: Die Abbildungen zeigen die initiale Wandleranordnung in einer Kreisordnung mit zufälligen Abständen zwischen den Wandlern mit dem besten Ergebnis in der Untersuchung. Die grüne Fläche zeigt die ROI-Abdeckung und die gelbe Fläche den Überlappungsbereich von mindestens drei Wandlern.

Generell kann für dieses Beispiel gezeigt werden, dass die Optimierung gegenüber jeder beliebigen initialen Anordnung die Lokalisierungsgüte verbessert. Die initiale Anordnung beeinflusst jedoch auch wie erwartet bei der Optimierung eines nichtlinearen Gleichungssystems das Optimierungsergebnis. Hier könnte es Sinn machen, die Optimierung für verschiedenen initialen Anordnungen zu wiederholen und die beste Anordnung zu verwenden.

Es ist zu beachten, dass alle betrachtete Systeme dünnbesetzte Apertur darstellen. Die dargestellte optimierte Wandleranordnung mit sechzehn Ultraschallwandler in Abbildung 5.21 zeigt eine sehr gute ROI-Abdeckung und Abbildungsqualität trotz der dünnbesetzten Apertur. Laut [80] soll der

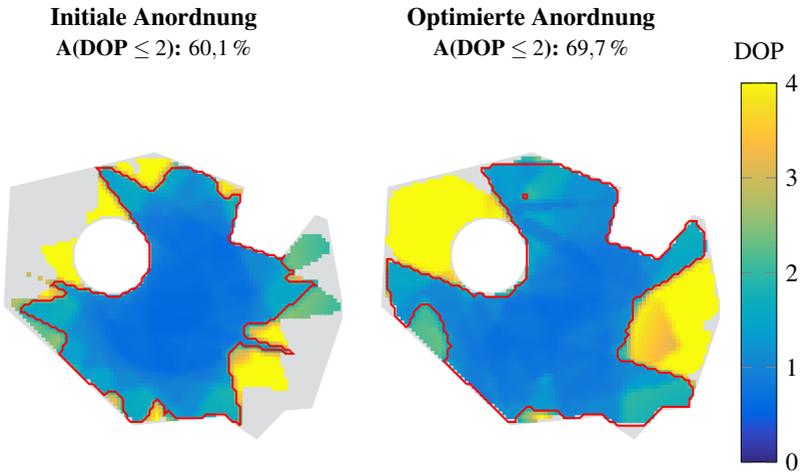


Abbildung 5.22: In der Abbildungen sind die Verteilung der DOP-Werten für beide Anordnungen in Abbildung 5.21 dargestellt. Die rote Linie zeigt den Umriss der Bereiche an, in denen die DOP-Werten < 2 sind.

maximale Abstand zwischen den Ultraschallwandler in einer Kreisanordnung um eine kreisförmige ROI das Abtasttheorem erfüllen.

Dieser Abstand ist gegeben durch $0,5 \frac{c \cdot R}{\Delta f \cdot r}$. Die Variable c ist die Schallgeschwindigkeit, Δf die Bandbreite des Ultraschallwandlers, R der Radius der Kreisanordnung und r der Radius der ROI. Für $R = 0,45 \text{ m}$, $r = 0,25 \text{ m}$ und $\Delta f = 20 \text{ kHz}$ bei einer Lufttemperatur von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ beträgt der maximale Abstand $1,56 \text{ cm}$. Um diese Randbedingung zu erfüllen braucht man 181 Ultraschallwandler.

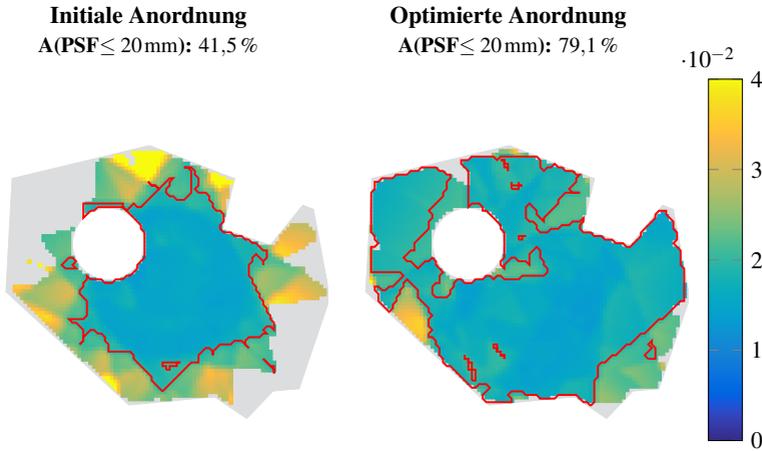


Abbildung 5.23: Die Abbildungen zeigen die Verteilung der FWHM der PSF für beide Wandleranordnungen in Abbildung 5.21. Die rote Linie kennzeichnet die Fläche mit FWHM ≤ 20 mm.

5.5 Allgemeine ROIs

Um die Robustheit des Verfahrens für unterschiedlichen ROIs zu testen, wurde die Wandleranordnung für fünfzehn unterschiedliche ROIs mit dem Optimierungsverfahren optimiert. Abbildung 5.24 stellt die fünfzehn getesteten ROIs dar.

Die fünfzehn ROIs unterscheiden sich in der Form und dem maximalen Durchmesser. Darunter sind einfache Formen, wie zum Beispiel ein Kreis und ein Rechteck, vorhanden. Es wurde vorausgesetzt, dass mindestens zwei Objekte gleichzeitig detektiert werden sollen. Die Verbesserungen der Systemleistung nach der Optimierung im Vergleich zur Kreisanordnung für die ROIs sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Das Optimierungsverfahren erreichte im Mittel eine Verbesserung von 11,99 % in der Fläche, in der eine gleichzeitige Detektion von zwei Objekten möglich ist, mit der gleichen Anzahl von Wandler im Vergleich zur Kreis-

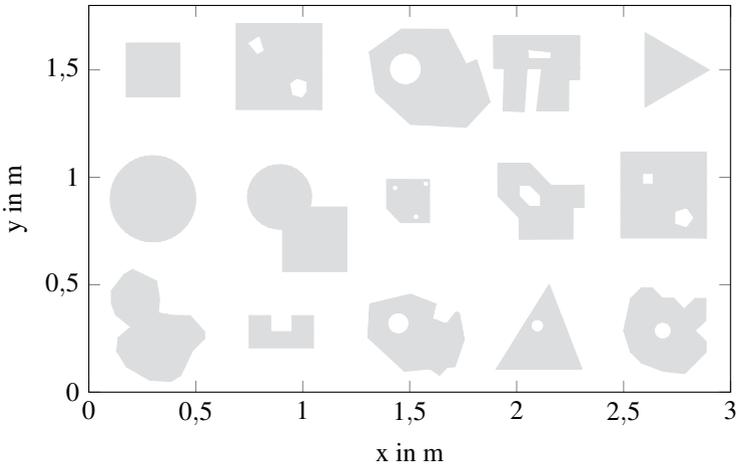


Abbildung 5.24: Die Abbildung zeigt die fünfzehn ROIs, die für den Test genutzt wurden.

Kostenfunktion	Initiale Anordnung	Optimierte Anordnung	Verbesserung
ROI-Abdeckung	99,9 %	99,8 %	-0,1 %
Überlappungsfläche	76,1 %	87,6 %	11,5 %
$A(\text{DOP} \leq 2)$	60,1 %	68,4 %	8,3 %
$A(\text{FWHM} \leq 20 \text{ mm})$	56,9 %	65,9 %	9,0 %

Tabelle 5.2: Mittlere Verbesserung der Systemleistung nach der Optimierung für die fünfzehn ROIs

anordnung. Diese Verbesserung gelang mit einem kleinen Kompromiss in der ROI-Abdeckung von $-0,1\%$. Außerdem wurde gezeigt, dass die Fläche mit kleineren DOP-Werten und FWHM der PSF durch die Optimierung vergrößert wurde.

5.6 Erweiterung für 3D-Systeme

In diesem Abschnitt werden die benötigten Anpassungen des Optimierungsverfahrens für die Erweiterung auf 3D diskutiert. Bei der Optimierung eines 3D-Ultraschallsystems werden die Wandler-Position durch ihre x -, y -, und z -Koordinaten beschrieben. Die Ausrichtung des Wandlers ist durch den Polarwinkel und den Azimutwinkel gegeben.

Damit erhöht sich die Anzahl der Unbekannten bei der Optimierung um zwei Unbekannte pro Wandler. Außerdem wird der Ultraschallwandler statt mit einem Polygon mit einem Polygonnetz beschrieben. Abbildung 5.25 zeigt einen Beispieldetektionsbereich eines Wandlers für 3D. Ähnlich kann die ROI auch für einen dreidimensionalen Fall definiert werden.

Bei der Berechnung der ROI-Abdeckung und der Überlappung mehrerer Ultraschallwandler werden booleschen Operationen auf Polygonnetzen verwendet. In [81] wurde ein effizientes Verfahren zur Berechnung der booleschen Operationen vorgestellt. Abbildung 5.26 stellt eine Beispielberechnung der ROI-Abdeckung eines 3D-Ultraschallsystems mit zwei Wandlern dar.

Für eine 2D-ROI wie in Abbildung 5.26 werden Kostenfunktionen der ROI-Abdeckung und der Überlappung mehrerer Wandler mit der Fläche berechnet. In dem Fall einer 3D-ROI wird stattdessen das Volumen benutzt.

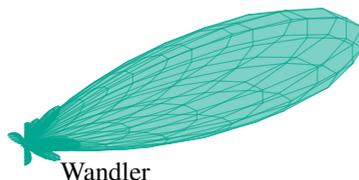


Abbildung 5.25: Beschreibung des Wandlerdetektionsbereichs mit einem Polygonnetz für 3D

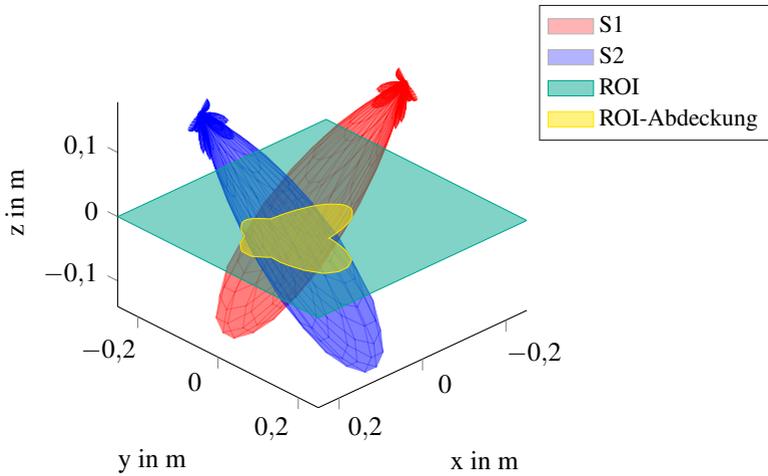


Abbildung 5.26: Eine Beispielberechnung der ROI-Abdeckung in 3D.

Bei der Berechnung der DOP-Werte für einen Punkt $P(x,y,z)$ in dem Punktgitter wird die Matrix A für die dreidimensionalen Koordinaten der Wandlerpositionen erweitert:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_1-x}{R_1} & \frac{y_1-y}{R_1} & \frac{z_1-z}{R_1} & -1 \\ \frac{x_2-x}{R_2} & \frac{y_2-y}{R_2} & \frac{z_2-z}{R_2} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \frac{x_O-x}{R_O} & \frac{y_O-y}{R_O} & \frac{z_O-z}{R_O} & -1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$Q = (A^T A)^{-1} \quad (5.16)$$

$$DOP = |\text{diag}(Q)|, \quad (5.17)$$

mit x_i , y_i und z_i als die Koordinaten des i -ten Ultraschallwandlers und R_i der euklidische Abstand zwischen der Wandler-Position und dem Punkt P .

Für die Optimierung der PSF wird statt ein 2D-Bild des simulierten Punktstreuers ein 3D-Bild mit SAFT rekonstruiert. Bei der Bestimmung der FWHM der PSF wird das 3D-Bild für Werte größer als das halbe Maximum binarisiert. Die FWHM ist der euklidische Abstand zwischen zwei am weitesten liegenden Bildvoxeln des binarisierten Bildes. Einer Erweiterung der Methode für 3D-Systeme stehen daher keine prinzipiellen Probleme entgegen.

6 Resultate

In diesem Kapitel werden die vorgestellten Verfahren zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte mit Ultraschallsystemen unterschiedlicher Komplexität evaluiert.

6.1 Kalibrierung des 3D-USCT-II-Geräts

In diesem Abschnitt wurde die Selbstkalibrierung mit dem 3D-USCT-II-Gerät evaluiert. Anhand der Simulationen und Experimentdaten wird die Verbesserung der Lokalisierungsgüte untersucht.

6.1.1 Anwendung auf simulierten Daten

In den folgenden Simulationen werden die möglichen Fehlerquellen in dem 3D-USCT-II-Gerät sequentiell hinzugefügt. Es soll damit die Trennbarkeit der Fehlerquellen mit dem Kalibrierungsverfahren untersucht werden. Gleichzeitig wird das Konvergenzverhalten der verschiedenen Methoden zum Lösen der nichtlinearen Gleichungssysteme in Abschnitt 2.4 betrachtet.

Die A-Scans in den simulierten Daten haben eine Abtastrate von 10 MHz. Das gesendete Ultraschallsignal ist ein Chirp-Signal mit einer Startfrequenz von 1,66 MHz und einer Stopfrequenz von 3,33 MHz. Der Amplitudenverlauf dieses Chirp-Signal wurde zusätzlich mit einem Gauß-Fenster gewichtet.

Die Temperaturverteilung in der 3D-USCT-Apertur wurde mit einer Auflösung von 1 mm simuliert. Zur Berechnung der Laufzeiten zwischen den

Sendern und Empfängern wird das Strahlverfolgungsverfahren in Abschnitt 4.3 eingesetzt. Für die Simulation der Signallaufzeit in den A-Scans wird das Verfahren *fractional delay filter* eingesetzt [82]. Damit wird die zeitliche Verzögerung des Signals durch eine Phasenverschiebung in dem Fourier-Raum realisiert.

Alle Experimente wurden mit einem SNR von 50 dB auf maximaler Signalamplitude der A-Scans simuliert. Die Wassertemperatur ist 25 °C. Die Abstrahl- und Empfangscharakteristik der Ultraschallwandler wurden ebenfalls berücksichtigt. Tabelle 6.1 stellt die simulierten Fälle dar.

	Verzögerung	Jitter	Temperaturoffset	Temperaturfehler	Positionsfehler
1	1,2 μ s	-	-	-	-
2	1,2 μ s	20 MHz	-	-	-
3	1,2 μ s	20 MHz	-2 °C	-	-
4	1,2 μ s	20 MHz	-2 °C	1 °C	-
5	1,2 μ s	20 MHz	-2 °C	1 °C	1 mm, <5°
6	1,2 μ s	20 MHz	-2 °C mit Gradienten	1 °C	1 mm, <5°

Tabelle 6.1: Übersicht der Simulationsparameter für unterschiedlichen Fehlerquellen dar.

Während der Kalibrierung wird die Laufzeit mit dem Matched-Filter und einer Abtastrate von 500 MHz detektiert. Dabei wurde die Winkelcharakteristik des Ultraschallwandlers abhängig von dem Einfallswinkel wie in Abschnitt 4.2.7 berücksichtigt.

Da die simulierten Experimente keine fehlerhaften Komponenten enthalten, wurden die SNR-Filterung und die Verzögerungsfilterung übersprungen. Das Lösen des Gleichungssystems mit den iterativen Verfahren wird nach 100 Iterationen oder bei einem Residuum des Gleichungssystems klei-

	Newton	LMA	TR	IPV	Linearisiert + TR
1	Divergiert	$3,1 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-11}$	$2,3 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-6}$
2	Divergiert	$1,2 \times 10^{-7}$	$8,6 \times 10^{-8}$	$6,9 \times 10^{-4}$	$2,9 \times 10^{-4}$
3	Divergiert	$3,6 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-3}$	$4,3 \times 10^{-3}$
4	Divergiert	$2,8 \times 10^{-8}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^3$
5	Divergiert	$3,2 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$5,7 \times 10^{-3}$	$5,8 \times 10^4$
6	Divergiert	$2,5 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$6,5 \times 10^4$

Tabelle 6.2: Residuum des Gleichungssystems nach der Kalibrierung für die verschiedenen Löser. Die Werte haben die Einheit Meter.

ner als 1×10^{-9} m abgebrochen. Die Gleichungssysteme werden mit der Wandlerpositionen laut dem Systemdesign des 3D-USCT-II-Geräts ohne Verzögerungen und Temperaturfehler initialisiert.

Die Differenz der gefundenen Lösung zur simulierten Grundwahrheit wurde berechnet. Das Residuum nach dem kompletten Kalibrierungsprozess wird ebenfalls als Qualitätsmaß benutzt, um die Verfahren zum Lösen der Gleichungssysteme zu bewerten. Tabelle 6.2 zeigt die Residuen der unterschiedlichen Verfahren.

Das Newton-Verfahren ist für alle simulierten Fälle divergiert. Das Innere-Punkte-Verfahren (IPV) konvergiert zu einer kleinen Verzögerung in der Größenordnung der benutzten Maschinengenauigkeit bei 1×10^{-16} und hat die simulierte Verzögerung von $1,2 \mu\text{s}$ nicht gefunden. Die linearisierten Gleichungssysteme für die Verzögerungs- und Temperaturkalibrierung haben in der Anwesenheit vom Jitter und Temperaturgradienten große Abweichung zur Grundwahrheit.

Das Trust-Region-Verfahren (TR) und der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LMA) haben nach dem kompletten Kalibrierungsprozess einen ähnlichen Fehler zur Grundwahrheit. In der Untersuchung konvergiert im Allgemeinen TR schneller als LMA. Die normierten Fehler in Tabelle 6.3 beider

	Newton	LMA	TR	IPV	Linearisiert + TR
1	Divergiert	78 μm	76 μm	1,8 mm	0,4 mm
2	Divergiert	79 μm	76 μm	1,8 mm	0,6 mm
3	Divergiert	70 μm	62 μm	1,8 mm	1,2 mm
4	Divergiert	78 μm	76 μm	1,9 mm	1,3 mm
5	Divergiert	75 μm	69 μm	1,9 mm	1,4 mm
6	Divergiert	74 μm	70 μm	1,8 mm	1,2 mm

Tabelle 6.3: Normierte Differenz zwischen der Lösung und der simulierten Grundwahrheit in Metern

Verfahren lagen im Mittel um 74 μm . Dieser entspricht dem aufgrund des Jitters von 20 MHz verursachten Abstandsfehler von 75 μm bei einer Wassertemperatur von 25 °C.

Außerdem erfolgt bei TR laut Abschnitt 2.4.3 mit der Schrittweitenbeschränkung in jeder Iteration zu einer deterministischen Korrektur der Lösung. Daher wird der TR in weiteren Evaluierung der Selbstkalibrierung mit Experimentdaten verwendet.

6.1.2 Maximale Fertigungstoleranz

Die hohe Komplexität des 3D-USCT-II-Geräts und die halb-ellipsoide Apertur stellen eine große Herausforderung für die mechanische Genauigkeit bei dem Aufbau dar. Die benutzte Fertigungstoleranz von 20 μm bei der Anfertigung der Apertur bringt hohe Kosten und technischen Aufwand mit sich.

In diesem Abschnitt wurde untersucht, ob die Anforderung an die Fertigungstoleranz mit der Selbstkalibrierung reduziert werden kann. Die 3D-USCT-II-Apertur wurde mit einem maximalen Positionsfehler der Ultraschallwandler zwischen 1 μm und 1 cm simuliert. Die simulierte Positionsfehler haben eine Normalverteilung.

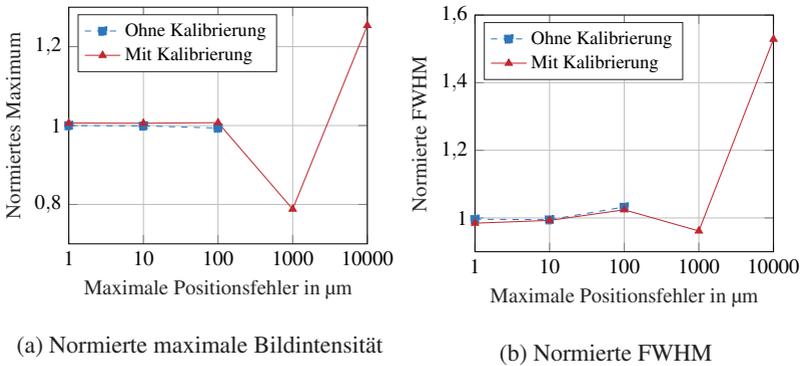


Abbildung 6.1: Abbildung zeigt die auf der Grundwahrheit normierte maximale Bildintensität und Halbwertsbreite des rekonstruierten Punktstreuers.

Für jeden maximalen Positionsfehler wurde eine Leermessung und eine Messung mit einem Punktstreuer in der Mittel der Apertur simuliert. Die A-Scans wurde mit einer Abtastrate von 10 MHz abgetastet. Das gesendete Ultraschallsignal ist ein Chirp-Signal mit einer Startfrequenz von 1,66 MHz und einer Stopfrequenz von 3,33 MHz. Der Amplitudenverlauf dieses Chirp-Signal wurde zusätzlich mit einem Gauß-Fenster gewichtet. Bei der Simulation wurden andere Fehlerquellen wie zum Beispiel Verzögerung und Temperaturfehler im System vernachlässigt.

Nach der Positionskalibrierung mit der zugehörigen Leermessung für jeden simulierten Fall wurde der Punktstreuer mit dem SAFT-Verfahren rekonstruiert. Als Grundwahrheit wurde die SAFT-Rekonstruktion für die 3D-USCT-II-Apertur ohne Positionsfehler rekonstruiert. Die Bildauflösung ist $10 \mu\text{m}$.

In Abbildung 6.1 wurde die maximale Intensität und die Halbwertsbreite des Punktstreuers auf die Grundwahrheit normiert. Die Rekonstruktion mit der normierten maximalen Intensität und Halbwertsbreite am nächsten zu dem Wert Eins hat die beste Bildqualität.

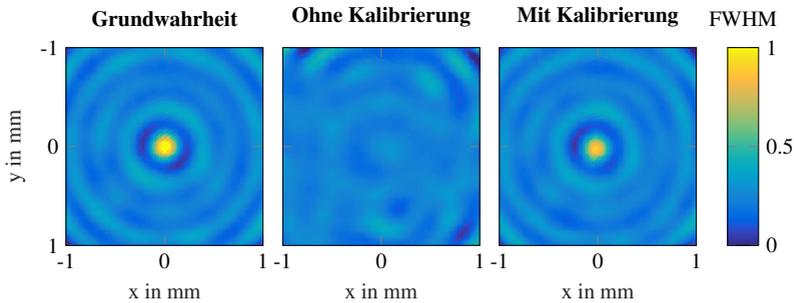


Abbildung 6.2: Die Grundwahrheit und die Rekonstruktionen des Punktstreuers mit und ohne Kalibrierung für einen maximalen Positionsfehler von 1 mm.

Die rekonstruierten Bilder haben mit und ohne Positionskalibrierung für einen maximalen Positionsfehler bis $100\ \mu\text{m}$ ähnliche Bildqualität wie die Grundwahrheit. Diese Beobachtung entspricht der Erwartung laut [25], dass für eine hohe Bildqualität ein Laufzeitfehler kleiner als ein Viertel der benutzten Wellenlänge λ nötig ist. Für eine Mittenfrequenz von $2,5\ \text{MHz}$ ist $\lambda/4 = 152\ \mu\text{m}$.

Für einen maximalen Positionsfehler größer als 1 mm ergibt die SAFT-Rekonstruktion ohne Kalibrierung kein fokussiertes Bild, wie es in Abbildung 6.2 dargestellt ist. Die Rekonstruktion mit der kalibrierten 3D-USCT-II-Apertur bei einem maximalen Fehler von 1 cm hat zwar ein höheres maximales Bildintensität aber auch eine größere Halbwertsbreite im Vergleich zur Grundwahrheit.

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass die Selbstkalibrierung bei einem maximalen Positionsfehler von 1 mm die Wandlerpositionen kalibrieren kann. Somit darf die maximale Fertigungstoleranz von $20\ \mu\text{m}$ beispielsweise auf $100\ \mu\text{m}$ erhöht werden.

Da in dieser Untersuchung der Temperaturfehler, Verzögerungen in der Aufnahme und fehlerhaften Systemkomponenten vernachlässigt wurden, ist die Erhöhung der Fertigungstoleranz auf $100\ \mu\text{m}$ nur realistisch, wenn die

durch andere Fehlerquellen verursachten Laufzeitfehler insgesamt kleiner als die Fertigungstoleranz sind. Das heißt für einen Durchmesser der 3D-USCT-II-Apertur von 26 cm und eine Wassertemperatur bei 30 °C:

- Temperaturfehler $\leq 0,5$ °C
- Jitter in der Aufnahme ≤ 66 ns
- Erfolgreiche Detektion fehlerhafter Komponenten

6.1.3 Unterdrückung der Artefakte im SOS- und Dämpfungsbild

Die Qualität des rekonstruierten Schallgeschwindigkeits- und Dämpfungsbildes mit dem Verfahren in [83] ist von der Genauigkeit der Laufzeitdetektion des transmittierten Ultraschallsignals abhängig. Falls Ausreißern in den Messungen aufgrund fehlerhafter Systemkomponenten in dem 3D-USCT-Gerät auftreten, kann es zur Artefakte in den Bildern führen.

Das Brustphantom wurde aus Gelatine hergestellt und eine Olive mit Kern wurde in der Mitte eingebettet. Abbildung 6.3 stellt die Rekonstruktion der Schallgeschwindigkeitsverteilung ohne Detektion von fehlerhaften SEK dar. Für die Bildrekonstruktion wurden die ersten 128 TAS benutzt und die Bildauflösung ist 1 mm. In dem Bild ist ein Bildartefakt mit einer hohen Schallgeschwindigkeit außerhalb des Brustphantoms zu beobachten.

Ein typischer Grund für diese Art der Bildartefakte liegt in den Ausreißern der detektierten Laufzeiten. Die Position der Bildartefakte entspricht meistens der Wandler-Positionen von den beteiligten Sendern und Empfängern. Bis jetzt wurde die Unterdrückung solcher Artefakte durch einen manuellen Prozess realisiert, in dem die TAS der fehlerhaften Ultraschallwandler von der Rekonstruktion aussortiert werden. Der Prozess wird solange wiederholt, bis alle Bildartefakte beseitigt sind.

Mit der SNR- und Verzögerungsfilterung in dem vorgestellten Kalibrierungsverfahren wurden die fehlerhaften SEK automatisch detektiert. Bei der SNR-Filterung wurden die SNR-Werte der A-Scans auf den SNR-Wert eines

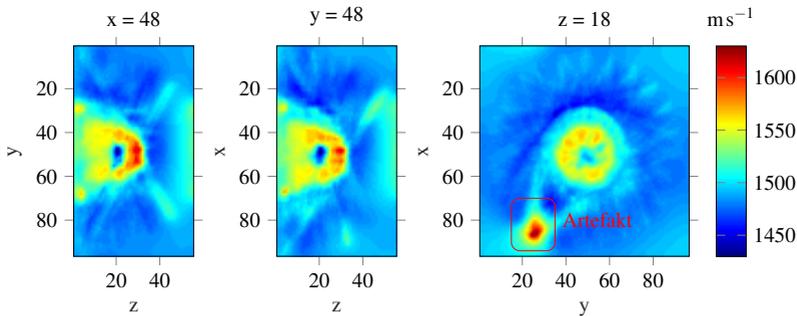


Abbildung 6.3: Ein Schallgeschwindigkeitsbild ohne Kalibrierung an den Schichten $x=48$, $y=48$, und $z=18$. Die Bilder haben eine Auflösung von 1 mm.

Referenz-A-Scans zwischen dem ersten Sender und dem ersten Empfänger in TAS 1 normiert.

Abbildung 6.4 stellt die Ergebnisse der SNR-Filterung für die Leermessung unmittelbar nach der Aufnahme des Brustphantoms für die ersten fünfhundert SEK dar. Für die einfache Darstellung sind in der Abbildung nur die relativen SNR-Werte der ersten fünfhundert SEK dargestellt. Die Sender-Empfänger-Kombinationen mit SNR-Werten außerhalb des grünen Bereichs werden als Ausreißer markiert. Die obere und untere Grenzen dieses Bereichs wurde empirisch für das 3D-USCT-II-Gerät gesetzt.

In dem weiteren Schritt wurden die zugehörigen Sender und Empfänger der markierten SEK auf ihre Häufigkeit der Markierung als Ausreißer normiert, wie es in Abbildung 6.5 dargestellt ist. Es werden Sender und Empfänger mit einer normierten Häufigkeit größer als 50 % für die Bildrekonstruktion aussortiert.

Bei der Verzögerungsfilterung wurden Ausreißer in den kalibrierten Verzögerungen pro SEK ähnlich wie bei der SNR-Filterung mithilfe der empirisch eingestellten oberen und unteren Grenzen aussortiert. Danach wurde das Schallgeschwindigkeitsbild ohne die fehlerhaften Sender und Empfän-

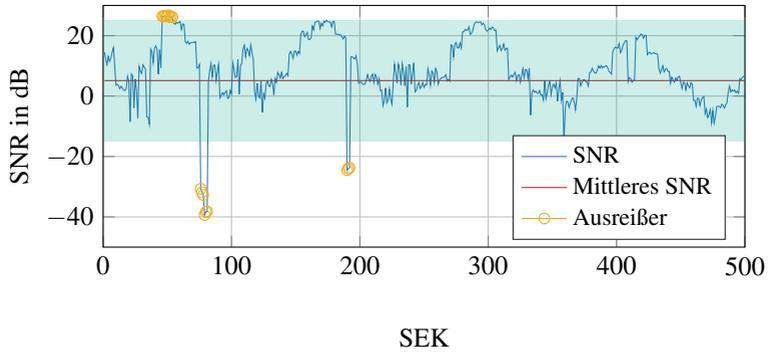


Abbildung 6.4: Die relative SNR der A-Scans für die ersten fünfhundert SEK. Die SEK mit SNR-Werten außerhalb des eingestellten Wertebereiches (grüne Fläche) sind markiert.

ger erneut rekonstruiert. Das resultierende Bild mit einer erfolgreichen Unterdrückung der Bildartefakte ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

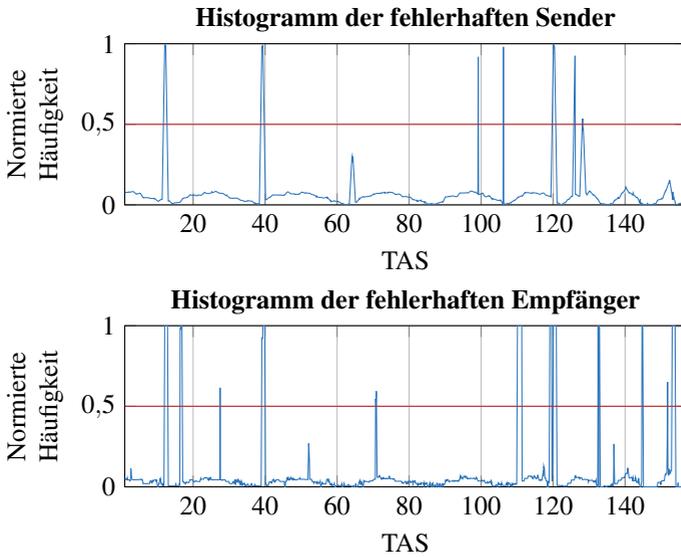


Abbildung 6.5: Die normierte Häufigkeit der markierten Sender und Empfänger sortiert nach ihrer TAS-Nummer in der SNR-Filterung. Die Sender und Empfänger mit einer normierten Häufigkeit $\geq 50\%$ werden als fehlerhaft für die Bildrekonstruktion aussortiert.

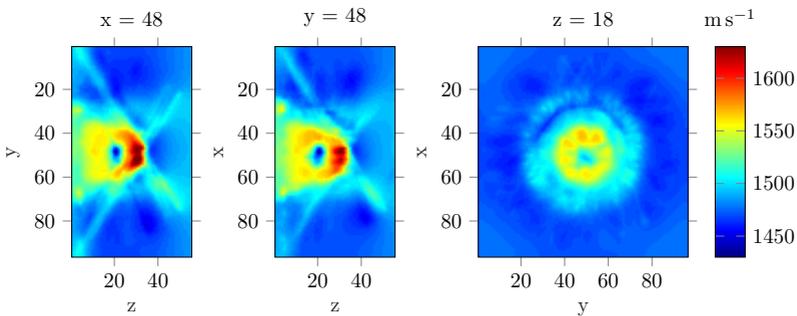


Abbildung 6.6: Das Schallgeschwindigkeitsbild nach der Kalibrierung bei der Schicht $x=48$, $y=48$, und $z=18$. Das Bildartefakt außerhalb des Brustphantoms in Abbildung 6.3 wurde erfolgreich unterdrückt.

6.1.4 Verzögerung im 3D-USCT-II-Gerät

In diesem Abschnitt wurde die Verzögerungskalibrierung auf allen Leermessungen mit dem 3D-USCT-II-Gerät zwischen Mai 2012 und Februar 2017 durchgeführt, um die Kalibrierungsergebnisse mit dem empirisch gefundenen Erfahrungswerten zu vergleichen.

Bei der Kalibrierung wurde den Winkel α zur Auswahl der benutzten SEK in Abschnitt 4.5.4 auf 45° gesetzt, um alle TAS gleichzeitig zu kalibrieren. Die Laufzeitdetektion wurde bei einer Abtastrate von 500 MHz durchgeführt. Vor der Verzögerungskalibrierung wurde die SNR-Filterung angewendet, um Ausreißer in den detektierten Laufzeiten zu beseitigen. Das Offset in den an den TASs gemessenen Temperaturen wurde mit der gemessenen Temperatur an den kalibrierten JUMO-Sensoren korrigiert.

Ab dem Experiment 23 wurde zur Messung der Verzögerung in der Signalaufnahme das „gemessene CE“ (*engl.: CEMeasured*) in dem 3D-USCT-II-Gerät eingeführt. Es handelt sich um eine zusätzliche Aufnahme des Signals am Sender während der Datenaufnahme. In diesem Signal soll die durch die Signalverarbeitung im DAQ-System verursachten Verzögerung aufgenommen werden. Die Benutzung des gemessenen CE als Matched-Filter für die Laufzeitdetektion soll die Verzögerung im DAQ-System vollständig kompensieren.

In dieser Untersuchung wird die Verzögerungskalibrierung mit dem normalen CE und dem gemessenen CE (wenn vorhanden) durchgeführt. Zum Lösen des Gleichungssystems wird das Trust-Region-Verfahren angewendet. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

In Abbildung 6.7 wurde neben der kalibrierten Verzögerung die Schallgeschwindigkeit in dem Medium für alle Experimente dargestellt. Die Schallgeschwindigkeit wurde aus der gemessenen Temperatur an den kalibrierten JUMO-Sensoren mit der Gleichung (2.7) berechnet.

Die Leermessungen 15, 16 und 17 wurden unter der Zugabe von Kochsalz mit $7,5 \text{ gL}^{-1}$ durchgeführt. Die Salzkonzentration im Experiment 21

war 75 gL^{-1} . In der dargestellten Schallgeschwindigkeit wurde der Einfluss der Salzmenge für die betroffenen Experimente laut [84] berücksichtigt. Im Allgemeinen sorgt das Salz im Wasser für eine höhere Schallgeschwindigkeit. Diese veränderte Schallgeschwindigkeit ist dem Kalibrierungsprozess unbekannt.

Es wurde die Verzögerungskalibrierung bei den Experimenten mit unvollständigen Daten und mit mehr als 50 % fehlerhaften SEK in der SNR-Filterung abgebrochen. In Abbildung 6.7 zeigt die kalibrierte Verzögerung einen Sprung von Experiment 6 auf Experiment 7 nach der Einführung der Bandpassunterabtastung. Die zusätzliche Verzögerung aufgrund des erhöhten Aufwands in der Signalverarbeitung zur Datenreduktion wurde erwartet.

Die leicht erhöhte Schallgeschwindigkeit in Experimenten 15 bis 17 wurde mit einer kleineren kalibrierten Verzögerung im Vergleich zu den Experimenten ohne Salz kompensiert. Dieser Effekt wurde bei der verzehnfachten Salzmenge im Experiment 21 an der sehr kleinen Verzögerung ebenfalls beobachtet.

Die Untersuchung zeigt, dass die Einführung des gemessenen CE ab dem Experiment 23 einen großen Teil der Systemverzögerung kompensiert. Die Differenz zwischen der kalibrierten Verzögerung mit dem normalen CE und mit dem gemessenen CE ist durch die grüne Linie in Abbildung 6.7 dargestellt. Diese Differenz ist über die Experimente konstant und zeigt ein gutes Konvergenzverhalten der Selbstkalibrierung mit dem Trust-Region-Verfahren.

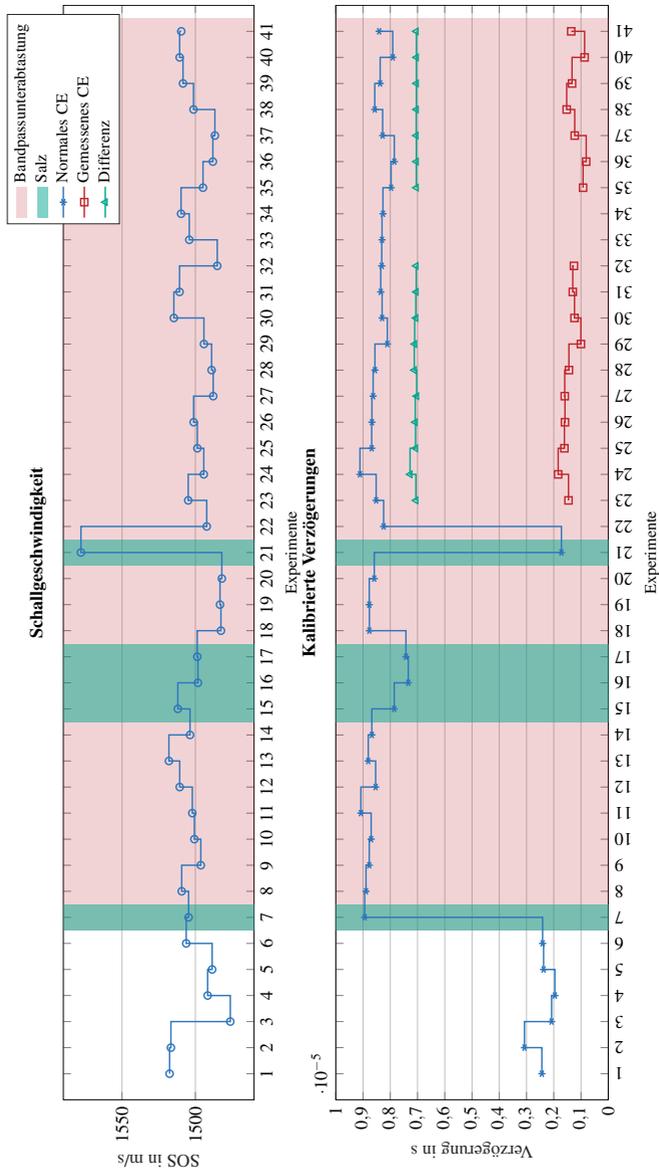


Abbildung 6.7: Schallgeschwindigkeit und kalibrierte Verzögerung im 3D-USCT-II-Gerät für Leermessungen zwischen Mai 2012 und Februar 2017

6.1.5 Fokussierung des Reflexionsbildes

Für ein fokussiertes Bild mit der SAFT-Rekonstruktion soll die Systemverzögerung bei der Laufzeitberechnung berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt wurde die Fokussierung des Reflexionsbildes mithilfe der Selbstkalibrierung mit einem Drahtphantom untersucht. Das Drahtphantom besteht aus einem Draht mit einem Durchmesser von 0,07 mm. Abbildung 6.8 stellt das Phantom dar.

Für die Selbstkalibrierung wurde eine Leermessung direkt nach der Aufnahme des Phantoms aufgenommen. Vor der SAFT-Rekonstruktion wurden die A-Scans mit gemessenem CE als Matched-Filter bearbeitet. Die SAFT-Rekonstruktion wurde mit der empirisch ermittelten Verzögerung von $1,2 \mu\text{s}$ und der kalibrierten Verzögerung von $0,87 \mu\text{s}$ durchgeführt. Das rekonstruierte Volumen ist in Abbildung 6.8 mit dem roten Quader eingezeichnet und die Bildauflösung beträgt $100 \mu\text{m}$.

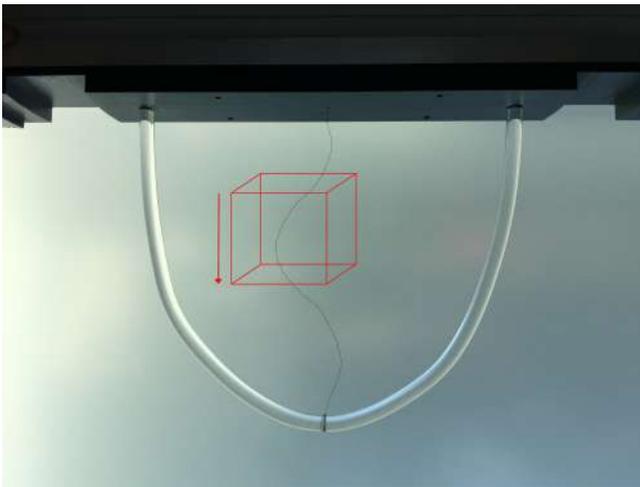


Abbildung 6.8: Die Abbildung stellt das Drahtphantom dar. Der rote Quader zeigt das rekonstruierte Volumen in der Untersuchung

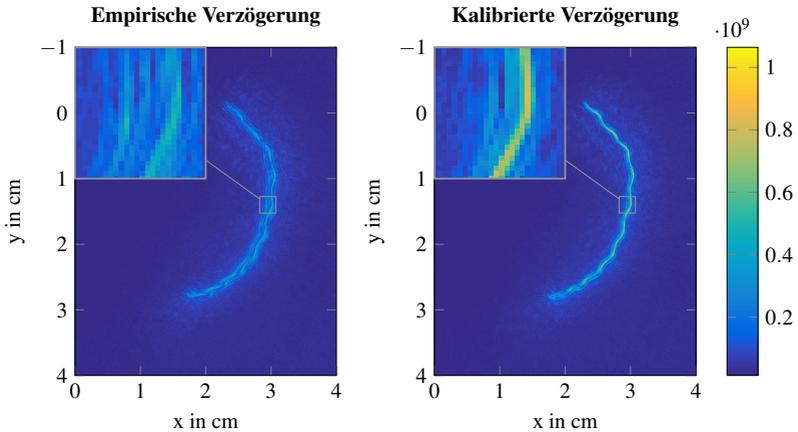


Abbildung 6.9: Maximal-Intensitäts-Projektion (MIP) der rekonstruierten Reflexionsbilder mit empirischer und kalibrierter Verzögerungskorrektur

Abbildung 6.9 stellt die Maximal-Intensitäts-Projektionen (MIP) der rekonstruierten Bilder entlang der z -Achse dar. Das mit der kalibrierten Verzögerung rekonstruierte Bild hat eine bessere Fokussierung, wie es in der vergrößerten Ansicht zeigt ist.

Es wurde angenommen, dass die Reflexionen des Ultraschallsignals an dem Drahtphantom mit einer erfolgreichen Fokussierung in der SAFT-Rekonstruktion entlang des Drahtphantoms konstruktiv zu einem Maximum aufsummieren. Daher wurde die maximale Bildintensität der rekonstruierten Bilder als ein Qualitätsmaß der Fokussierung benutzt. Je höher die Bildintensität, desto besser ist die Fokussierung.

Die maximale Bildintensität mit der kalibrierten Verzögerung hat den Wert $8,7 \times 10^8$ im Vergleich zu der maximalen Intensität von $5,8 \times 10^8$ in dem mit der empirischen Verzögerung rekonstruierten Bild.

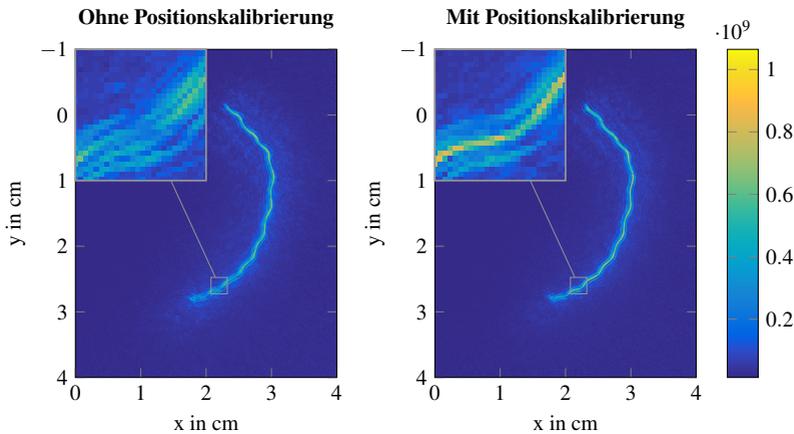


Abbildung 6.10: Maximal-Intensitäts-Projektion (MIP) der rekonstruierten Reflexionsbilder mit und ohne Positionskalibrierung. Bei der SAFT-Rekonstruktion wurde die kalibrierte Verzögerung korrigiert.

6.1.6 Positionskalibrierung

Die Wandler-Positionen aller 157 TAS in dem 3D-USCT-II-Gerät wurden mit der Leermessung für das Drahtphantom kalibriert. Die Positionskalibrierung konvergierte nach zwölf Iterationen zu einem Minimum mit einem Residuum von 21 nm. Nach der Kalibrierung wurde das Reflexionsbild des Drahtphantoms mit der kalibrierten USCT-Geometrie und Verzögerung rekonstruiert. Abbildung 6.10 stellt die Rekonstruktionen mit und ohne Positionskalibrierung dar.

Die vergrößerte Ansicht in Abbildung 6.10 zeigt eine Verbesserung der Bildfokussierung in dem unteren Bereich des Drahtphantoms mit der Positionskalibrierung. Die maximale Bildintensität ist $1,1 \times 10^9$ im Vergleich zur $8,7 \times 10^8$ in dem rekonstruierten Bild ohne Positionskalibrierung.

Im Weiteren wurde die Halbwertsbreite entlang des Drahtphantoms an 50 diskreten Positionen untersucht. Zuerst wurde ein kleines Volumen ($1 \times 1 \times 1$ cm) um die betrachtete Position ausgeschnitten. Die Größe des Volumens

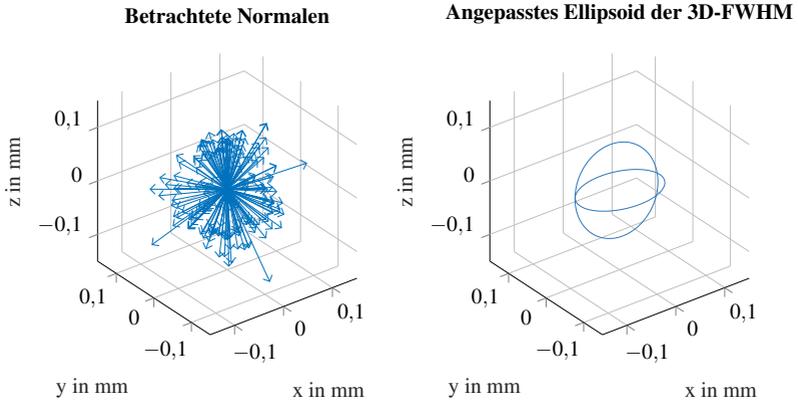


Abbildung 6.11: Die Normalen an der betrachteten Positionen entlang des Drahtphantoms sind in der linken Abbildung dargestellt. Die Länge der Vektoren zeigt die gemessene 2D-FWHM. Die rechte Abbildung stellt das angepasste Ellipsoid auf der projizierten 2D-FWHM dar.

ist kleiner als die lokale Krümmung des Drahtphantoms. Somit kann der Ausschnitt des rekonstruierten Drahtphantoms als Zylinder angenommen werden.

Danach wird das Volumen um Polar- und Azimutwinkel zwischen -90° und 90° rotiert, bis der Verlauf des Drahtschnittes parallel zur z -Achse ist. Schließlich wird das Volumen entlang der z -Achse projiziert. Die benutzten Polar- und Azimutwinkel für die Projektion wurden gespeichert.

Um die FWHM dieser 2D-Profil zu bestimmen, wird das Projektionsbild für Werte größer als die Hälfte der maximalen Bildintensität binarisiert. Es wurden achtzehn gleichwinklige Durchmesser dieser segmentierten Region gemessen. Der Mittelwert dieser Durchmesser gibt die Systemauflösung des kalibrierten 3D-USCT-Geräts und lag bei 0,22 mm (Simulation 0,22 mm). Die Standardabweichung der Durchmesser beschreibt die räumliche Varianz der FWHM und beträgt $40\ \mu\text{m}$ im Vergleich zur Vorhersage bei $35\ \mu\text{m}$ laut [85].

	d_x	d_y	d_z
Gemessen	0,20 mm	0,21 mm	0,26 mm
Vorhergesagt	0,20 mm	0,20 mm	0,25 mm

Tabelle 6.4: Gemessene 3D-FWHM im Vergleich zur Vorhersage laut [85]

Die 3D-FWHM wurde aus den gemessenen mittleren 2D-FWHM und den Normalen an den betrachteten Positionen berechnet. Die Normalen wurden aus dem für die Projektion benutzten Polar- und Azimutwinkel an jeder Position bestimmt. Die 2D-Profile wurden um dem Ursprung zentriert und ein Ellipsoid in den Profilen approximiert. Abbildung 6.11 zeigt die Normalen an den betrachteten Positionen und das angepasste Ellipsoid zur Berechnung der 3D-FWHM. Tabelle 6.4 zeigt die gemessenen Durchmesser des Ellipsoides im Vergleich zur Vorhersage in [85].

6.1.7 Evaluierung mit einem Kalibrierungsobjekt

In diesem Abschnitt wurde die Genauigkeit der Selbstkalibrierung anhand eines Kalibrierungsobjekts evaluiert. Das Kalibrierungsobjekt ist eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 5 cm. Die Fertigungsgenauigkeit war $50\ \mu\text{m}$. Die Stahlkugel wurde an einer Metallstange befestigt und mithilfe einer Halterung in der Mitte der 3D-USCT-Apertur positioniert, wie es in Abbildung 6.12 gezeigt ist.

Die Kugel wurde mit und ohne die Selbstkalibrierung des 3D-USCT-Geräts mit einer Bildauflösung von $100\ \mu\text{m}$ rekonstruiert. Die A-Scans wurden mit dem Matched-Filter bei einer Abtastrate von 10 MHz verarbeitet. Die Schallgeschwindigkeitsverteilung für die Schallgeschwindigkeitskorrektur während der SAFT-Rekonstruktion wurde als homogen angenommen und mit der gemessenen Wassertemperatur an den JUMO-Sensoren erzeugt.

Nach der Rekonstruktion wurde die Kugel aus dem Reflexionsbild segmentiert. Es wird in den Schichtbildern des entlang der z -Achse mit dem



Abbildung 6.12: Der Messaufbau mit der Stahlkugel als das Kalibrierungsobjekt.

Flutfüllung-Verfahren aus der Computergrafik [86] die rekonstruierte Objektkante gesucht. Die Koordinaten der äußeren Pixel der segmentierten Region werden extrahiert. Abbildung 6.13 zeigt ein Beispiel der automatischen Segmentierung.

Aufgrund der variierenden Bildintensitäten und Gratinglobe-Artefakten können Ausreißer in den segmentierten Koordinaten auf der rekonstruierten Kugeloberfläche vorkommen. Diese Ausreißer werden mit der Annahme, dass die segmentierte Flächen in jeden Schichtbildern mindestens einen Durchmesser von 2 cm und einen maximalen Durchmesser von 6 cm haben können, aussortiert. Eine Nebenwirkung dieser Filterung ist die Vernachlässigung der Koordinaten in den unteren z -Schichten, in denen der Durchmesser der Kreisschnitte kleiner als 2 cm sind.

In dem nächsten Schritt werden die extrahierten Koordinaten an eine Kugel angepasst, um das Zentrum der Kugel und den Radius zu bestimmen. Es wurde ein Gleichungssystem mit der folgenden Gleichung für alle extrahierten Koordinaten aufgestellt und gelöst:

$$(\mathbf{x} - x_c)^2 + (\mathbf{y} - y_c)^2 + (\mathbf{z} - z_c)^2 - r^2 = 0. \quad (6.1)$$

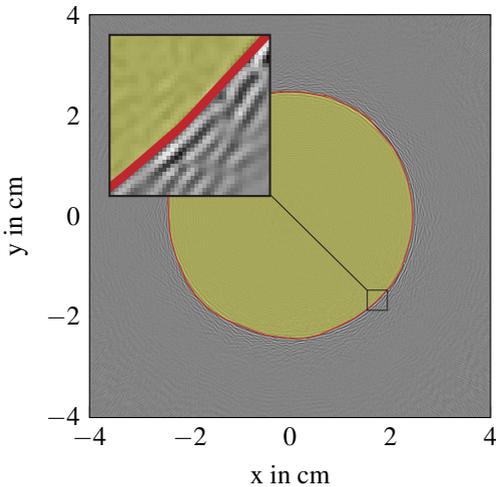


Abbildung 6.13: Illustration der Segmentierung der rekonstruierten Kugel aus einem Schichtbild entlang der z -Achse. Die gelbe Fläche ist das Ergebnis des Flutfüllung-Verfahrens. Die Koordinaten der Pixel auf der roten Linie werden extrahiert.

Die Vektoren \mathbf{x}, \mathbf{y} und \mathbf{z} sind die segmentierten Koordinaten und x_c, y_c und z_c sind die Koordinaten des Kugelzentrums. Die Variable r ist der Radius. Abbildung 6.14 stellt die angepasste Kugel und die extrahierten Koordinaten dar.

Die angepasste Kugel hat einen Durchmesser von 5,01 cm und ein Zentrum an der Koordinate (68 μm , 0,3 mm, 8,4 cm). Die extrahierte Koordinaten haben im Mittel eine Abweichung von 56 μm mit einer Standardabweichung von 212 μm . Die Rekonstruktion ohne Kalibrierung ergibt einen Durchmesser der Kugel von 5,02 cm mit einer Standardabweichung von 333 μm .

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass eine genaue Rekonstruktion des Kalibrierungsobjekts mit der Selbstkalibrierung erfolgreich war. Der erwartete Durchmesser der rekonstruierten Kugel wurde gemessen. Die Stan-

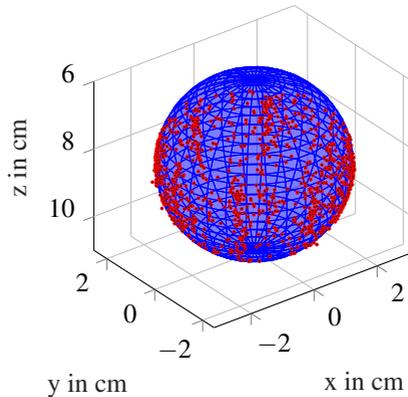


Abbildung 6.14: Die Abbildung zeigt die angepasste Kugel und die extrahierte Koordinaten.

dardabweichung ist allerdings größer als die erwarteten $50\ \mu\text{m}$ und durch die Bildauflösung von $100\ \mu\text{m}$ verursacht.

Die maximale Bildauflösung wird zurzeit für das zu rekonstruierte Volumen durch die Speichergröße des Grafikprozessors (GPU) begrenzt. Während der SAFT-Rekonstruktion werden die A-Scans mit einer Abtastrate von $10\ \text{MHz}$ in dem GPU linear interpoliert. Die damit erreichbare Auflösung bei einer Schallgeschwindigkeit von $1500\ \text{m s}^{-1}$ liegt bei $150\ \mu\text{m}$. Eine bessere Interpolationsmethode wie zum Beispiel die Spline-Interpolation oder Interpolation mit höhergradiger Polynome kann die Genauigkeit der Rekonstruktion verbessern.

6.2 Kalibrierung des bildgebenden Luftultraschallsystems

In diesem Abschnitt wurde die Wandleranordnung des bildgebenden Luftultraschallsystems (ABUS) in Abschnitt 3.3 optimiert und nach dem Aufbau mit der Kalibrierungsmethode kalibriert.

6.2.1 Kalibrierung der relativen Positionen zwischen den Wandler

Bei der Selbstkalibrierung wurde angenommen, dass die Temperatur in der ROI bekannt ist und ihre Verteilung homogen ist. Der Kalibrierungsprozess umfasst nur die Verzögerungs- und Positionskalibrierung.

Der Kalibrierungsprozess beginnt mit der Datenaufnahme einer Leermessung. Die sechzehn Ultraschallwandler senden hintereinander und die Einhüllende der Empfangssignale an allen Wandlern wurden mit einer Abtastrate von 2 MHz abgetastet. Für die Laufzeitdetektion wurde das CFD-Verfahren eingesetzt.

Da die Ultraschallwandler einen begrenzten Öffnungswinkel haben, werden die für die Kalibrierung benutzten SEK entsprechend ausgewählt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Wandler-Positionen nur geringfügig von dem Systementwurf abweichen. Somit können mit Hilfe des Normalenvektors der Ultraschallwandler die in dem Öffnungswinkel liegenden Empfänger ausgewählt werden. Außerdem werden A-Scans mit schlechtem SNR aussortiert.

Die Verzögerungen wurden mit Zufallszahlen in der Größenordnung der maschinellen Genauigkeit bei $2,22 \times 10^{-16}$ initialisiert. Abbildung 6.15 stellt das Ergebnis der Verzögerungskalibrierung dar. Das Trust-Region-Verfahren konvergierte nach einer Iteration, und gab an, dass ein lokales Minimum erreicht wurde. Die kalibrierte Verzögerungen haben einen Mittelwert von $1,1 \times 10^{-16}$ s und liegt unterhalb der maschinellen Genauigkeit.

Dieses Ergebnis konnte anhand der Ansteuerungselektronik des bildgebenden Luftultraschallsystems bestätigt werden. In ABUS werden die Sendestufe der Ultraschallwandler mit einer Digital-I/O-Leitung des DAQ-Systems direkt angesteuert. Die Datenaufnahme und die Signalerzeugung werden in dem DAQ-System mit dem gleichen Taktgeber eingespeist und gleichzeitig gestartet. Es wurde daher keine Verzögerung erwartet.

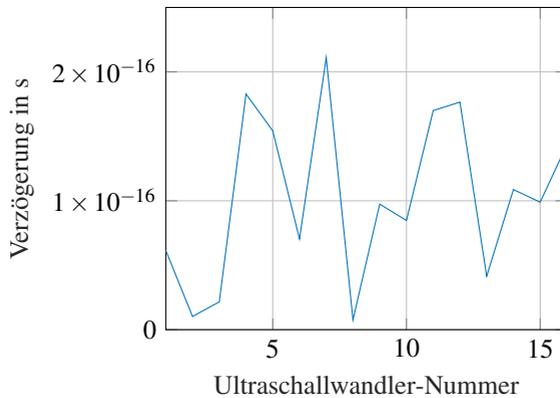


Abbildung 6.15: Kalibrierte Verzögerungen in ABUS

Nach der Verzögerungskalibrierung wurde die Positionskalibrierung durchgeführt. Das Trust-Region-Verfahren konvergierte nach fünf Iterationen. Das Ergebnis wurde nach der Kalibrierung auf die Wandler-Positionen laut dem Systementwurf mit dem Horn-Verfahren im Abschnitt 4.4.5 verschoben und rotiert. Abbildung 6.16 stellt das Ergebnis der Positionskalibrierung dar.

Um die Verbesserung der Abbildungsqualität nach der Kalibrierung zu evaluieren, wurde ein Testobjekt mit ABUS vor und nach der Kalibrierung aufgenommen. Das Testobjekt ist ein Draht mit einem Durchmesser von 2 mm und wurde im Zentrum des Koordinatensystems platziert. Es wird nach der SAFT-Rekonstruktion die FWHM des abgebildeten Objekts als Qualitätsmaß der Abbildungsqualität gemessen. In der Vorverarbeitung der A-Scans wurden die detektierten Echos durch einen Sinc-Puls mit einer Bandbreite von 7,6 kHz und einer Mittelfrequenz von 6,7 kHz ersetzt. Dieser Puls hat eine äquivalente Halbwertsbreite von ca. 1,7 mm. Die Bildauflösung lag bei 1 mm. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.17 dargestellt.

Nach der Kalibrierung wurde die FWHM des abgebildeten Testobjekts von 16,1 mm auf 11,2 mm verbessert. Außerdem wurde das Testobjekt

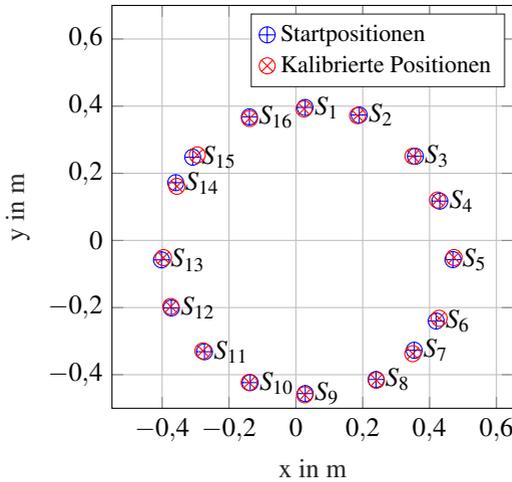


Abbildung 6.16: Kalibrierte Wandler-Positionen

kreisförmiger in Abbildung 6.17 (b) dargestellt, das eine bessere Fokussierung während der SAFT-Rekonstruktion zeigt.

Im Weiteren wurde die FWHM der Punktspreizfunktion an diskreten Positionen in der ROI gemessen und mit der Vorhersage in dem Optimierungsergebnis verglichen. Es wurde die ROI in ein Raster von 2 cm unterteilt. Abbildung 6.18 stellt das Ergebnis dar.

Das Messergebnis zeigt eine homogene Verteilung der FWHM der PSF mit einem Mittelwert von 1,4 cm und eine Standardabweichung von 5 mm. Während der Messung war das Hindernis in der ROI nicht vorhanden, somit hat das Ergebnis eine größere Fläche mit einer FWHM ≤ 2 cm im Vergleich zur Vorhersage.

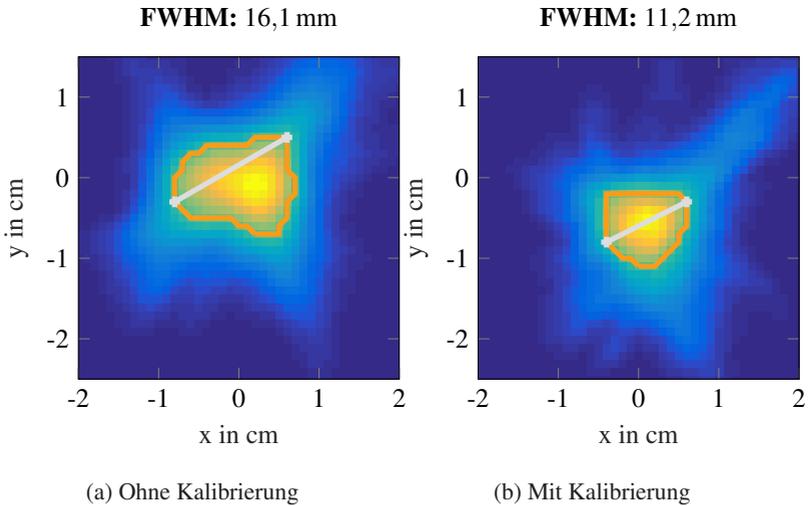


Abbildung 6.17: Die Abbildungen zeigen die gemessenen FWHM des abgebildeten Testobjekts mit ABUS vor und nach der Kalibrierung. Die orangenen Linien zeichnen den Bereich mit einer Bildintensität größer als die Hälfte der maximalen Intensität. Die weiße Linie stellt die Hauptachse dar, an der die FWHM ermittelt wurde.

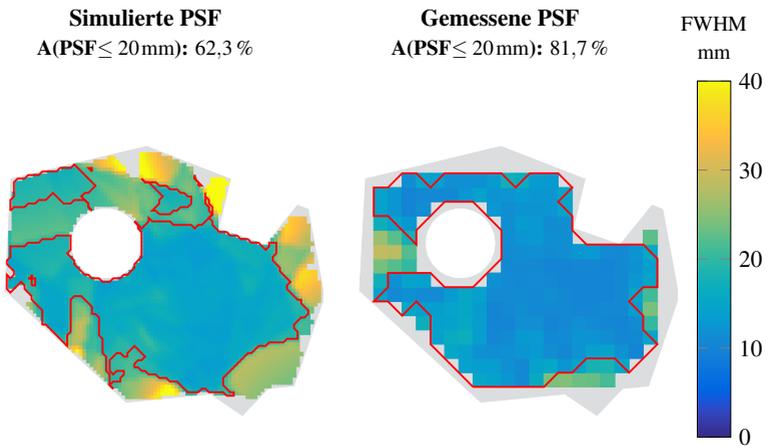


Abbildung 6.18: Die Abbildung vergleicht die gemessene FWHM der PSF mit der Simulation. Die rote Linie zeigt die Fläche mit einer FWHM der PSF ≤ 2 cm.

6.2.2 Kalibrierung des Ursprungs des Koordinatensystems

In dem rekonstruierten Bild nach der Kalibrierung in Abbildung 6.17 (b) wurde neben der Verbesserung der Abbildungsqualität eine Verschiebung des Testobjekts beobachtet. Da die Selbstkalibrierung nur auf Laufzeiten zwischen den Sender und Empfänger beruht und keine externen Randbedingungen wie zum Beispiel Ankerpositionen für die Ultraschallwandler hat, können die Wandler-Positionen nach der Kalibrierung eine Rotation und eine Verschiebung haben.

Um diese Rotation und den Versatz zum eigentlichen Ursprung des Koordinatensystems zu kompensieren, wurde ein weiteres Kalibrierungsobjekt aus vier Drähten gebaut. Die Drähte haben einen Durchmesser von 2 mm und sind unsymmetrisch angeordnet, wie in Abbildung 6.19 dargestellt.

Das Kalibrierungsobjekt bei der Ursprungskalibrierung im Zentrum des Koordinatensystems platziert und aufgenommen. Nach der SAFT-Rekonstruktion werden die vier Drähte mit einer lokalen Maxima-Suche segmentiert und ihre Positionen extrahiert. Mit dem Horn-Verfahren in Abschnitt 4.4.5 werden diese Positionen mit der bekannten Geometrie und den Positionen des Kalibrierungsobjekts verglichen.

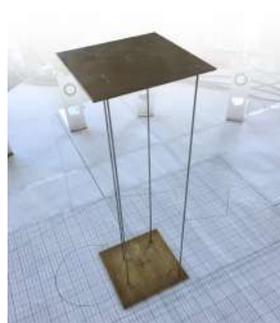
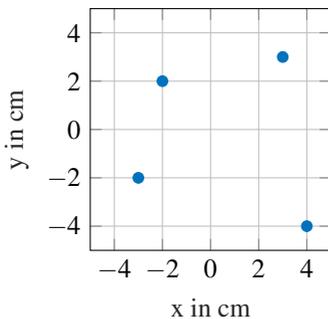


Abbildung 6.19: Das Kalibrierungsobjekt für die Ursprungskalibrierung (links) mit der Anordnung der vier Drähte in der rechten Abbildung

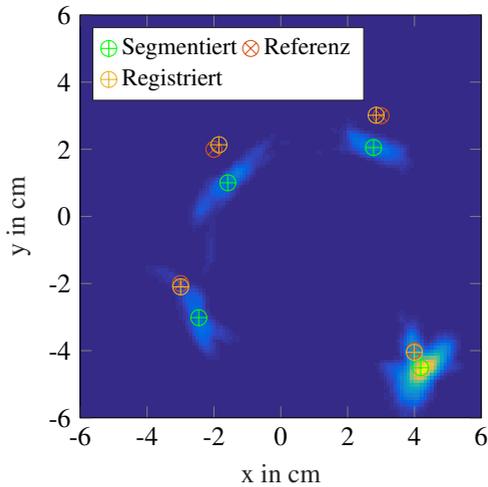


Abbildung 6.20: Ursprungskalibrierung des ABUS mit dem Kalibrierungsobjekt

Fehler	
x -Verschiebung	2,17 mm
y -Verschiebung	-9,81 mm
Rotation	-2,94°

Tabelle 6.5: Kalibrierte Verschiebung und Rotation des Ursprungs des Koordinatensystems

Abbildung 6.20 zeigt das Ergebnis der Ursprungskalibrierung. Die kalibrierte Verschiebung und Rotation des Koordinatensystems dieses Beispiels sind in Tabelle 6.5 aufgelistet. Die Wandler-Positionen werden entsprechend korrigiert.

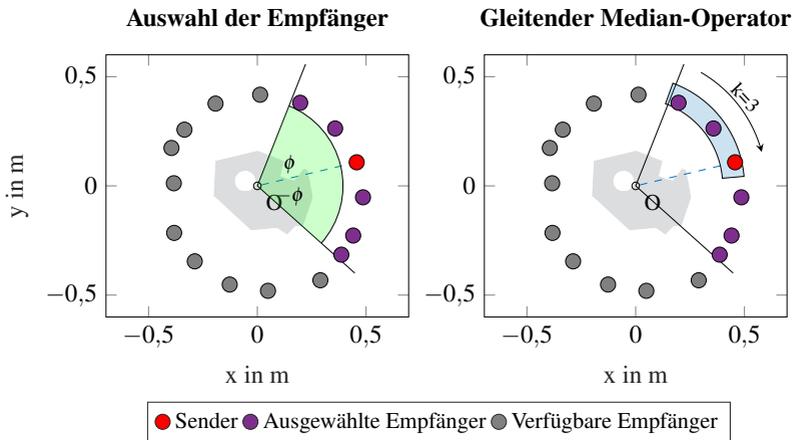


Abbildung 6.21: Die Abbildungen zeigen schematisch das Verfahren zur Gratinglobe-Unterdrückung in ABUS.

6.3 Verbesserung der Bildgebung mit SAFT für ein bildgebendes Luftultraschallsystem

In diesem Abschnitt wird die Anpassung der SAFT-Rekonstruktion beruhend auf der Gratinglobe-Unterdrückung in [23] für ABUS beschrieben. Laut dem Verfahren können die Gratinglobe-Artefakte durch eine geeignete Auswahl von Empfängern pro Sender und dem Einsatz eines gleitenden Median-Operators unterdrückt werden.

Bei der Anpassung der SAFT-Rekonstruktion für ABUS wurden zwei Parameter eingeführt, nämlich der Winkel ϕ zur Auswahl an Empfänger und die Median-Länge k für den gleitenden Median-Operator. Der Ablauf des angepassten Verfahrens wird anhand der folgenden Abbildungen schematisch erklärt.

Zuerst werden zwei Vektoren wie in der Abbildung 6.21 mit den Winkel ϕ und $-\phi$ zu dem Normalenvektor vom Sender berechnet. Alle Empfänger, die sich in diesem Winkelbereich befinden, werden für die SAFT-

Rekonstruktion ausgewählt. In diesem Beispiel sind $N = 6$ Empfänger einschließlich des Senders selektiert.

Es werden mit dieser ausgewählten Untermenge von verfügbaren Empfängern M Zwischenbilder rekonstruiert. In dem nächsten Schritt werden diese Bilder mit dem gleitenden Median-Operator bearbeitet. Für eine Median-Länge $k = 3$ für das Beispiel in Abbildung 6.21 werden im Uhrzeigersinn immer drei Zwischenbilder ausgewählt und ein Median-Bild berechnet. Im Fall $M < k$ wird k gleich M für diesen Sender gesetzt. Es entstehen für $M = 6$ und $k = 3$ eine Anzahl von $O = M - k + 1 = 4$ Median-Bilder für diesen Sender, die zum Schluss zusammen addiert werden. Diese Schritte werden mit allen $N = 16$ Sender von ABUS durchgeführt und die daraus resultierende Bilder zu aufsummiert.

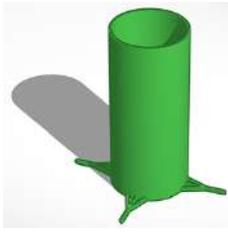
Die Auswahl von dem Winkel ϕ und der Median-Länge k ist von dem Öffnungswinkel der Ultraschallwandler und den akustischen Reflexionseigenschaften abhängig. Um die Einflüsse dieser Parameter auf die Bildqualität zu untersuchen, wurden zwei Objekte mit unterschiedlichen geometrischen Eigenschaften im Zentrum der ROI aufgenommen und rekonstruiert.

Das erste Objekt ist ein Zylinder mit einem Durchmesser von 6 cm und einer Höhe von 12 cm, das zweite Objekt ein ähnlicher Zylinder mit einem asymmetrischen Merkmal. Das Merkmal hat einen Durchmesser von 2 cm. Abbildung 6.22 stellen die CAD-Zeichnungen der Objekte dar.

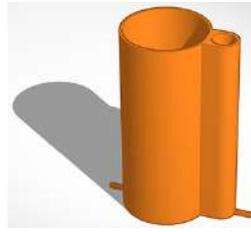
Abbildungen 6.23 und 6.24 stellen SAFT-Rekonstruktionen dieser Objekte mit unterschiedlichen Einstellungen von dem Winkel ϕ und der Median-Länge k dar. Die Bildauflösung ist 1 mm.

Um die Qualität der rekonstruierten Bilder miteinander zu vergleichen, wurde das Qualitätsmaß Vordergrund-Hintergrund-Verhältnis (FBR) eingeführt. Die Bildpixel des abgebildeten Objektes werden als Vordergrund definiert. Die restlichen Bildpixel inklusiv der Gratinglobe-Artefakte sind der Hintergrund.

Mit Hilfe einer manuell erstellten Maske wird das abgebildete Objekt von dem Hintergrund getrennt. Die Bildintensitäten der segmentierten Pi-



(a) Zylinder



(b) Zylinder mit asymmetrischem Merkmal

Abbildung 6.22: CAD-Zeichnungen der Untersuchungsobjekte

xel werden aufsummiert. Der FBR-Wert ist das Verhältnis dieser Summe mit der Summe der Bildintensitäten im Hintergrund. Bei einer SAFT-Rekonstruktion mit erfolgreicher Gratinglobe-Unterdrückung wird ein großer FBR-Wert erwartet, da im Hintergrund nur sehr niedrige Pixelintensitäten sind.

In Abbildung 6.23 wurde die kreisförmige Form des Zylinders mit größerem Winkel ϕ vollständiger abgebildet. Der Median-Operator zeigt bereits ab einer Länge von drei eine gute Unterdrückung der Gratinglobe-Artefakte. Allerdings haben die rekonstruierten Objektkanten starke stachelige Artefakte mit ansteigendem Winkel ϕ .

Die Untersuchung der FBR-Werte zeigt, dass für eine gegebene Auswahl von ϕ die größtmögliche Median-Länge $k < M$ für alle Sender die beste Bildqualität liefert. Die SAFT-Rekonstruktion mit $\phi = 80^\circ$ und $k = 7$ ergibt den größten FBR-Wert.

Allerdings zeigt die Untersuchung mit dem Zylinder mit asymmetrischem Merkmal in Abbildung 6.24 mit dieser Parameter eine nicht vollständige Objektkante. Die Einstellung des Winkels ϕ und der Median-Länge k soll daher an der Objekte optimiert werden.

Sind die abzubildende Objekte bekannt, können gleichzeitig mehrere Reflexionsbilder mit unterschiedlichen Parametern rekonstruiert werden, um

möglichst für alle Objekte Rekonstruktionen mit vollständiger Objektkante und minimaler Artefakte für die Objektsegmentierung und Klassifizierung zu bekommen. In Abschnitt 7.2.3 wird die Multi-Parameter SAFT-Rekonstruktion genauer beschrieben.

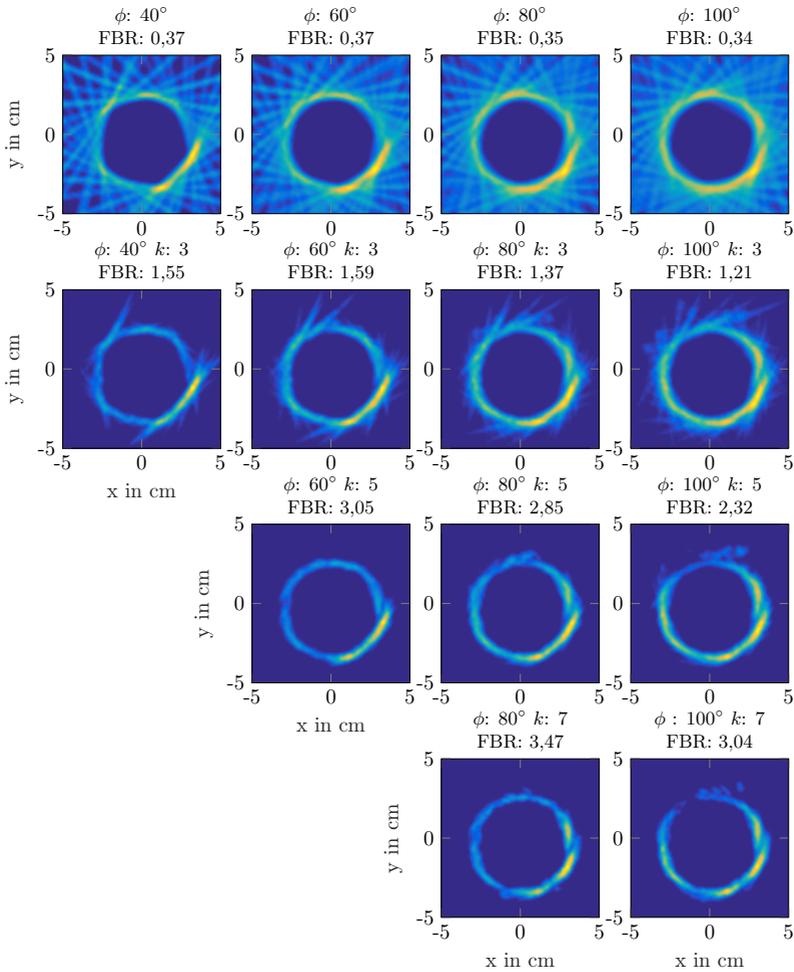


Abbildung 6.23: Die Abbildungen zeigen die SAFT-Rekonstruktionen eines Zylinders mit einem Durchmesser von 6 cm im Mittelpunkt der ROI mit verschiedenen Winkeln ϕ und Breite des gleitenden Medians k . Die erste Zeile stellt die Rekonstruktion ohne die Gratinglobe-Unterdrückung dar.

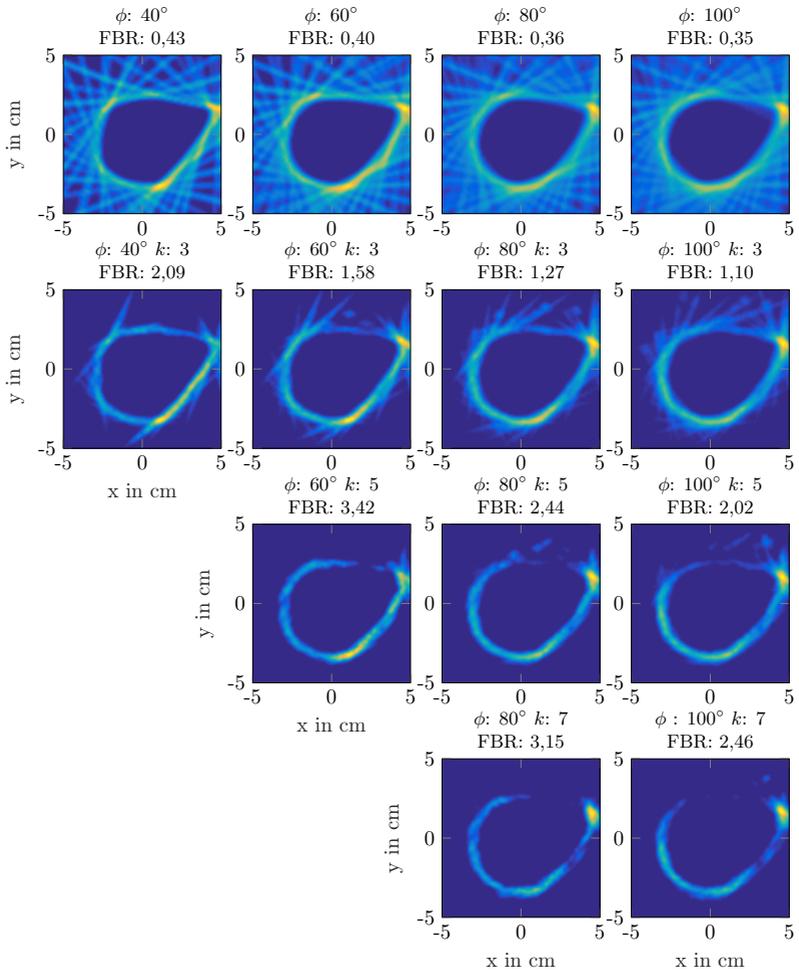


Abbildung 6.24: Die Abbildungen zeigen die SAFT-Rekonstruktionen eines Zylinders mit einem asymmetrischen Merkmal im Mittelpunkt der ROI mit verschiedenen Winkeln ϕ und Breite des gleitenden Medians k . Die erste Zeile stellt die Rekonstruktion ohne die Gratinglobe-Unterdrückung dar. Das Objekt hat einen Durchmesser von 6 cm.

7 Industrienae Anwendungen der entwickelten Methoden

In diesem Abschnitt sind weitere Beispielanwendungen des Verfahrens zur Optimierung der Lokalisierungsgüte vorgestellt. Zum Beispiel wurde die Selbstkalibrierung zur Verbesserung der Messgenauigkeit eines Ultraschallarrays unter extremer Temperaturbedingung angepasst. Weiterhin wurde die Einsetzbarkeit des bildgebenden Luftultraschallsystems für die Objekterkennung und Klassifizierung evaluiert.

7.1 Luftultraschall-Array unter extremer Temperaturbedingung

Durch leichte Anpassung der Kalibrierungsmethode wird ein neues Verfahren entwickelt, mit dem gleichzeitig der Abstand und der Temperaturverlauf entlang der Messstrecke zwischen dem Luftultraschall-Array in Abschnitt 3.2 und der Asphaltoberfläche ermittelt werden können.

7.1.1 Verfahren

In der Anwendung werden die Ultraschallwandler in einer Reihe angeordnet. Der Messabstand zur Asphaltoberfläche beträgt ca. 20 bis 30 cm. Dieser Abstand ist durch die Reichweite des benutzten Ultraschallwandlers bedingt.

Es wird angenommen, dass die Straßenoberfläche so rau ist, dass ein Ultraschallsignal an der Oberfläche diffus in aller Richtungen reflektiert und von allen Ultraschallwandlern aufgenommen wird. Um einen sicheren Emp-

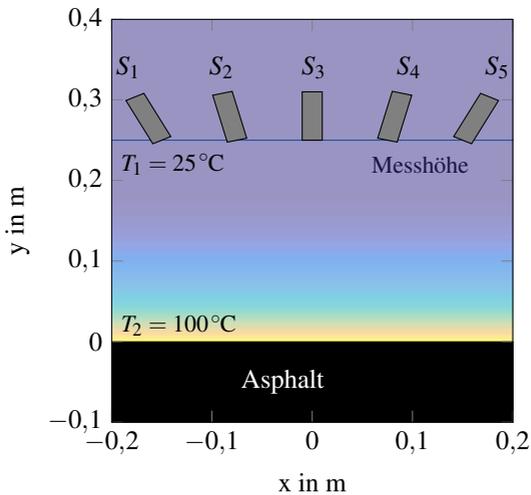


Abbildung 7.1: Die Abbildung zeigt den Messaufbau mit fünf Wandlern S_1 bis S_5 . Als Beispiel wurde hier ein Temperaturgradient mit einem linearen Verlauf von 25°C bis 100°C simuliert.

fang des reflektierten Ultraschallechos zu ermöglichen, wurden in dieser Arbeit die Ultraschallwandler im Vergleich zum aktuellen Aufbau des Big Sonic Ski der Firma MOBA Mobile Automation AG mit einem Neigungsgrad in dem Array platziert.

Abbildung 7.1 zeigt den Messaufbau. Die Ultraschallwandler haben einen Abstand von $7,5\text{ cm}$ zueinander. Die Neigungsgrade der Wandler θ sind $\{-34^\circ, -18^\circ, 0^\circ, 18^\circ, 34^\circ\}$. Mit diesen fünf Ultraschallwandlern erhalten wir $5 \times 5 = 25$ Laufzeiten, die für die Messaufgabe benutzt werden.

Mit der Kenntniss über die relativen Abstände zwischen den Ultraschallwandlern und ihren Neigungsgraden zum Normalenvektor des Arrays erstellt das Messverfahren eine Annäherung der Messumgebung mit dem Abstand zur Oberfläche und dem Temperaturverlauf als gesuchte Parameter. Es wird angenommen, dass das Ultraschallarray horizontal ausgerichtet ist.

Die Aufgabe des Messverfahrens ist die Messhöhe und den Temperaturverlauf iterativ zu verbessern, bis die Differenz zwischen den mit diesen Parametern simulierten Laufzeiten $\hat{\mathbf{t}}$ und den gemessenen Laufzeiten \mathbf{t} minimiert wird:

$$\|\mathbf{t} - \hat{\mathbf{t}}\| \rightarrow 0. \quad (7.1)$$

Simulation der Temperaturverteilung

Es handelt sich hier um eine Wärmekonvektion von einer warmen Oberfläche in Luft. Der Wärmeaustausch findet in der sogenannten thermischen Grenzschicht statt. Der Temperaturverlauf kann in diesem Bereich nichtlinear sein und ist von der Temperatur der zu messenden Oberfläche, der Lufttemperatur, der Zusammensetzung der Stoffe und der lokalen Strömungsgeschwindigkeit abhängig [87], [88].

In dem vorgestellten Messverfahren können ein exponentieller Verlauf und ein linearer Verlauf zur Beschreibung des Temperaturgradienten benutzt werden. Der Temperaturverlauf wird in dem linearen Fall mit der Temperatur T_1 am Sensorarray und der Temperatur T_2 auf der Asphaltoberfläche simuliert. Für eine Höhe y ist die Temperatur gegeben durch:

$$T(y) = \frac{T_1 - T_2}{H} \cdot y + T_2 \quad (7.2)$$

mit Variable H als Abstand des Arrays zur Asphaltoberfläche.

Für den Fall eines exponentiellen Verlaufs wird ein zusätzlicher Parameter α eingeführt:

$$T(y) = \begin{cases} (T_2 - T_1) \cdot [\exp((1 - \frac{y}{H})^\alpha) - 1] + T_1 & 0 \leq y \leq H \\ T_1 & y > H \end{cases} \quad (7.3)$$

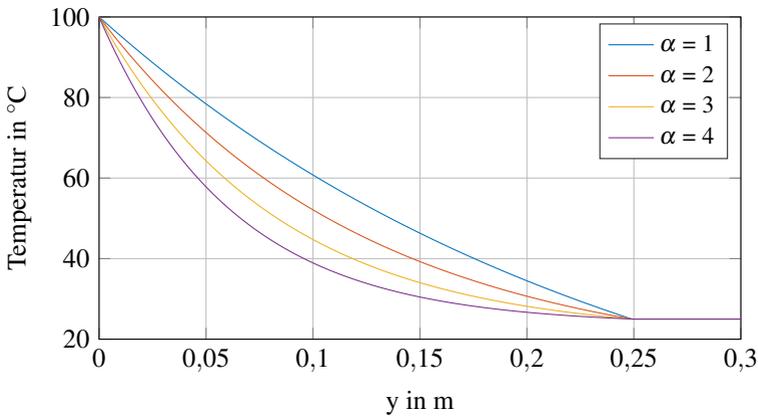


Abbildung 7.2: Die Abbildung stellt Beispieltemperaturverläufe bei unterschiedlichen α dar.

Der Exponent α bestimmt die Steilheit des Temperaturverlaufs. Für den Bereich oberhalb der Messhöhe wird die Temperatur gleich T_1 gesetzt. Der Einfluss vom α wird in Abbildung 7.2 veranschaulicht.

Der simulierte Temperaturverlauf wird für den Bereich zwischen dem Array und der Asphaltoberfläche mit der Auflösung Δs diskretisiert. Mit dem i -ten Wandler als Sender und dem j -ten Wandler als Empfänger können mithilfe des im Kapitel 4.3 beschriebenen Verfahrens die Laufzeiten mittels der Strahlverfolgung berechnet werden. Dabei wird der Laufweg des Signals in zwei Teilstrecken geteilt werden, nämlich der Weg zwischen dem Sender und der Asphaltoberfläche und der Weg vom Reflexionsort auf der Oberfläche zum Empfänger:

$$t = \underbrace{\sum_i \frac{\Delta s_i}{c_i}}_{\text{Sender} \rightarrow \text{Asphalt}} + \underbrace{\sum_j \frac{\Delta s_j}{c_j}}_{\text{Asphalt} \rightarrow \text{Empfänger}}. \quad (7.4)$$

Bestimmung des Reflexionsortes

Es wird angenommen, dass das gesendete Ultraschallsignal sich entlang des Normalenvektors des Senders auf dem kürzesten Weg bis der Asphaltoberfläche ausbreitet. An der Oberfläche wird dieses Signal reflektiert und an allen Empfängern aufgenommen. Der kürzeste Weg zum Empfänger ist der direkte Laufweg zwischen dem Reflexionsort und dem Empfänger.

Zur Bestimmung des Reflexionsorts x_P auf der Oberfläche sind die horizontale Position x_S des Senders zum Mittelpunkt des Array und sein Neigungsgrad θ zum Normalenvektor des Arrays nötig. Abbildung 7.3 zeigt schematisch ein Beispiel zur Bestimmung des Reflexionsortes und die Laufwege des Ultraschallpulses vom Sender zum Empfänger. Der Wandler S_1 ist der Sender und der Wandler S_4 der in diesem Beispiel betrachtete Empfänger. Die x -Koordinate des Reflexionspunktes x_P ist gegeben durch:

$$x_P = H \tan(\theta_{S_1}) + x_{S_1}, \quad (7.5)$$

mit der Variable H als der Abstand zwischen dem Array und der Asphaltoberfläche. Die Variable x_{S_1} ist die horizontale Position des Senders S_1 . Der Neigungsgrad des Senders S_1 ist θ_{S_1} .

Die Laufzeit für diese SEK setzt sich dann aus der mit der Strahlverfolgung ermittelten Laufzeit von der Position des Senders $P_S = (x_{S_1}, H)$ zum Reflexionsort mit der Position $P_P = (x_P, 0)$ und der Laufzeit von dem Reflexionsort zum Empfänger an der Position $P_R = (x_{R_4}, H)$ für das Beispiel in Abbildung 7.3.

Gleichungssystem

Nach jedem Messvorgang wird zuerst die Laufzeiten aller SEK detektiert. Anhand einer initialen oder letzten Schätzung der Parameter T_1 , T_2 , α und H wird die Temperaturverteilung simuliert. Danach werden für die SEK die Laufzeiten mit dem eben vorgestellten Verfahren berechnet. Die Differenz

der simulierten Laufzeiten zur Messungen werden in einem Vektor $F(\mathbf{x})$ zusammengefasst:

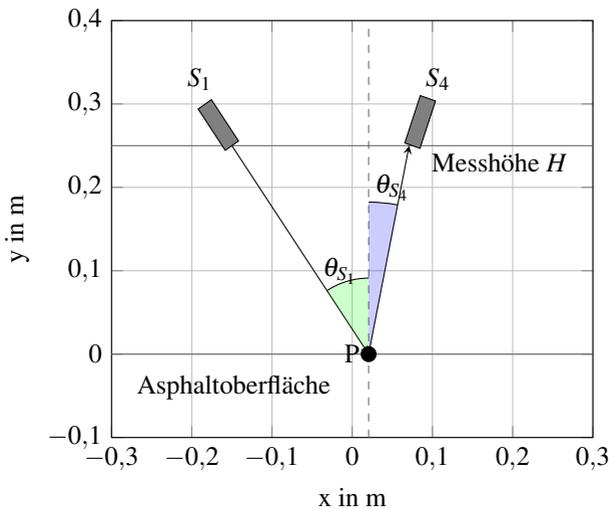


Abbildung 7.3: Abbildung stellt ein Beispiel zur Berechnung der Signallaufzeit zwischen dem Wandler S_1 als Sender und dem Wandler S_4 als Empfänger dar. Der Punkt P ist der Reflexionsort auf der Asphaltoberfläche. Hier ist zu beachten, dass der Winkel zum Normalenvektor der Oberfläche im Uhrzeigersinn positiv definiert ist.

$$F(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} f(\mathbf{x}, S_1, R_1) \\ f(\mathbf{x}, S_1, R_2) \\ \vdots \\ f(\mathbf{x}, S_1, R_n) \\ f(\mathbf{x}, S_2, R_1) \\ \vdots \\ f(\mathbf{x}, S_n, R_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{S_1, R_1} - \hat{t}_{S_1, R_1} \\ t_{S_1, R_2} - \hat{t}_{S_1, R_2} \\ \vdots \\ t_{S_1, R_n} - \hat{t}_{S_1, R_n} \\ t_{S_2, R_1} - \hat{t}_{S_2, R_1} \\ \vdots \\ t_{S_n, R_n} - \hat{t}_{S_n, R_n} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

Gesucht ist eine spezielle Lösung für $\mathbf{x} = [T_1, T_2, \alpha, H]$, bei dem $\|F(\mathbf{x})\|_2^2$ minimiert. Ein mögliches Verfahren zum Lösen des Gleichungssystems ist das Trust-Region-Verfahren, das im Abschnitt 2.4.3 vorgestellt wurde.

Median-Filterung gegen Ausreißer

Aufgrund der extremen Messumgebung können unter Umständen fehlerhafte Laufzeitmessungen gegeben werden, wie zum Beispiel fehlerhafte Signaldetektion aufgrund schlechtes SNR-Verhältnisses. Um die Wirkung von Ausreißern in der gemessenen Laufzeiten auf das Ergebnis zu unterdrücken, wird in diesem Messverfahren ein Median-Filter eingesetzt.

Mit dem Median-Filter werden die aktuell gemessene Laufzeiten mit einer ausgewählten Anzahl von Laufzeiten aus den vergangenen Messungen gewichtet. Beispielsweise werden mit einer Median-Länge gleich fünf für jede Sender-Empfänger-Kombinationen die letzten fünf Messungen behalten.

Der Einsatz von Median-Filterung bietet zwar eine Stabilisierung an, erzeugt aber eine Verzögerung in dem Messverfahren, so dass eine schnelle Änderung in dem Messabstand oder in der Temperatur verzögert wahrge-

nommen wird. Zum Beispiel wird für ein Median-Filter mit einer Länge gleich fünf eine Abstandsänderung erst nach drei Messungen ausgegeben.

7.1.2 Simulationen und Ergebnisse

Es wurden Simulationen mit unterschiedlichen Temperaturverläufen und Messhöhen durchgeführt, um das Verfahren zu untersuchen. In den Simulationen wird zu den simulierten Laufzeiten zusätzlich ein zufälliger Laufzeitfehler von bis zu $10\ \mu\text{s}$ addiert. Dieser Laufzeitfehler entspricht einem maximalen Abstandsfehler von $3,4\ \text{mm}$ bei einer Lufttemperatur von $25\ ^\circ\text{C}$ pro Sender-Empfänger-Kombinationen.

Die Temperaturverteilung wurde mit einer Auflösung von $1\ \text{mm}$ diskretisiert. Als Vergleich zum Stand der Technik wird die Abstandsmessung ohne die Temperaturkompensation an dem Wandler S_3 berechnet.

Die simulierten Messungen beinhalten einen Aufwärmvorgang und einen Abkühlvorgang der Asphaltoberfläche. Zwischen den beiden Vorgängen wird die Temperatur T_2 auf der Oberfläche konstant gehalten. Die Umgebungstemperatur T_1 an den Ultraschallwandlern liegt bei $24\ ^\circ\text{C}$. Beim Aufwärmen steigt die Temperatur T_2 unmittelbar über der Oberfläche von der Umgebungstemperatur auf $50\ ^\circ\text{C}$. Danach sinkt T_2 wieder auf die $30\ ^\circ\text{C}$. Das Wandlerarray wurde auf einer Messhöhe von $30\ \text{cm}$ platziert. Tabelle 7.1 fasst die simulierten Fälle und die benutzten Temperaturmodelle zusammen.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Fehler in den Ergebnissen sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Im Fall 1 wurde gezeigt, dass das vorgestellte Messverfahren Änderungen in der Temperatur T_2 über die Messungen verfolgen kann. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

Das Ergebnis des Falls 2 mit der Anpassung von T_1 zeigt eine Überkompensation der Temperaturänderungen in T_1 und T_2 . Während des Aufwärmvorgangs in T_2 zwischen der Messung 500 bis 1250 zeigt das Ergebnis eine höhere Temperatur an dem Wandlerarray und gleichzeitig eine niedrigere

	Simulierter Temperaturverlauf	Änderung an T_1	Benutztes Temperaturmodell	Kalibrierungsparameter
1	Linear	-	Linear	T_2, H
2	Linear	$24\text{ °C} \rightarrow 30\text{ °C}$	Linear	T_1, T_2, H
3	Exponentiell	-	Linear	T_1, T_2, H
4	Exponentiell	-	Exponentiell	T_1, T_2, α, H

Tabelle 7.1: Die Tabelle listet die simulierten Fälle, die benutzten Temperaturmodelle und die Kalibrierungsparameter auf.

Temperatur auf der Asphaltoberfläche im Vergleich zur simulierten Verläufe.

Das umgekehrte Verhalten wurde beim Abkühlvorgang zwischen der Messung 2500 bis 3500 beobachtet. Trotz der Abweichungen in der kalibrierten Temperaturen T_1 und T_2 bleibt der ermittelte Abstand stabil. Im Vergleich dazu zeigt das Ergebnis ohne Kompensation von T_1 einen ansteigenden Offset über die Messungen. Der Anstieg in T_1 wurde mit einer Erhöhung von T_2 kompensiert. Der damit gemessene Abstand hat einen mittleren Fehler von $-50\text{ }\mu\text{m}$ und eine Standardabweichung von 2,3 mm. Abbildung 7.6 stellt das Ergebnis des Falls 2 dar.

	T_1	T_2	α	H	H_0
1	-	$0,6 \pm 0,9\text{ °C}$	-	$0,18 \pm 0,24\text{ mm}$	$-3,7 \pm 2,1\text{ mm}$
2	$1,2 \pm 2,8\text{ °C}$	$0,6 \pm 1,2\text{ °C}$	-	$0,23 \pm 0,27\text{ mm}$	$-0,05 \pm 2,4\text{ mm}$
3	-	$-13,3 \pm 6,8\text{ °C}$	-	$0,18 \pm 0,2\text{ mm}$	$-3,8 \pm 1,5\text{ mm}$
4	-	$-11,1 \pm 3,4\text{ °C}$	$-0,9 \pm 2,8$	$0,24 \pm 0,26\text{ mm}$	$-3,7 \pm 2,2\text{ mm}$

Tabelle 7.2: Die Tabelle zeigt den Mittelwert und die Standardabweichung der Fehler. Die Variable H_0 ist der gemessene Abstand ohne Kompensation.

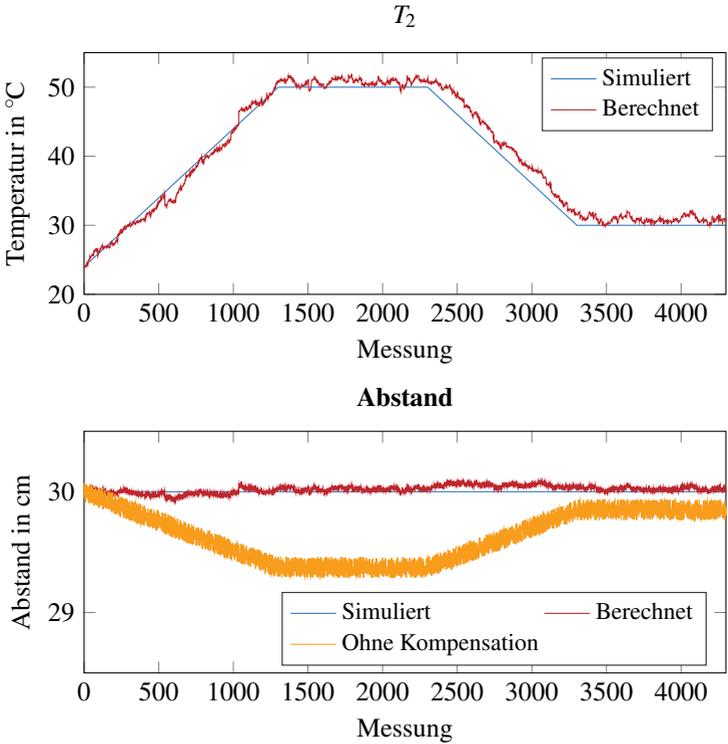


Abbildung 7.4: Die obere Abbildung zeigt die simulierten und kalibrierten Temperaturverläufe im Fall 1. In der unteren Abbildung sind die simulierten und kalibrierten Abstände zur Asphaltoberfläche dargestellt. Außerdem wird der gemessene Abstand ohne die Temperaturkompensation gezeigt.

Im Fall 3 wurde ein exponentieller Temperaturverlauf mit einem Exponenten $\alpha = 2$ zwischen dem Sensorarray und der Asphaltoberfläche simuliert. Das Modell kalibriert weiterhin mit einem linearen Temperaturverlauf. Es wird erwartet, dass dadurch eine Abweichung in der Temperatur T_2 gegeben wird. Abbildung 7.5 zeigt den Vergleich zwischen den simulierten

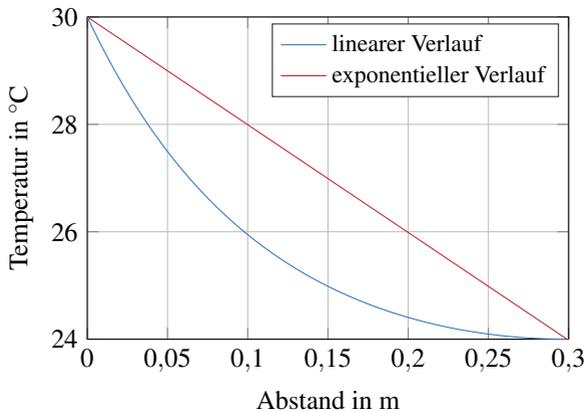


Abbildung 7.5: Die Abbildung stellt die simulierten linearen und exponentiellen Temperaturverläufe zwischen dem Sensorarray und der Asphalt-Oberfläche im Fall 3 dar.

exponentiellen und linearen Temperaturverläufen für $T_1 = 24\text{ °C}$ und $T_2 = 30\text{ °C}$.

In der Simulation wurde die Temperatur T_1 mit 24 °C festgehalten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.7 dargestellt. Der kalibrierte Verlauf von der Temperatur T_2 zeigt wie erwartet eine Abweichung zur Simulation. Je größer der Temperaturunterschied zwischen dem Wandlerarray und der Oberfläche ist, desto größer wird die Abweichung in der kalibrierten Temperatur T_2 .

Bei dem exponentiellen Temperaturverlauf sinkt die Temperatur schneller im Vergleich zum linearen Temperaturverlauf ab. Somit erfährt der Schall entlang seiner Ausbreitungsstrecke einen größeren Anteil des Mediums mit einer höheren Schallgeschwindigkeit. In dem linearen Temperaturverlauf in der simulierten Messumgebung wird dieser Effekt durch eine zu niedrige Temperatur T_2 kompensiert. Trotz dieser Abweichung gibt das Messverfahren ein gutes Ergebnis in der Abstandsmessung, wie in Tabelle 7.2 aufgelistet ist.

Im Ergebnis des Falls 4 in Abbildung 7.8 beobachten wir eine Austauschbarkeit zwischen der Temperatur T_2 und dem exponentiellen Faktor α . Die berechnete Ergebnisse für beide Unbekannten weichen von der Simulation ab. Trotz der Ungenauigkeit in der berechneten Temperatur T_2 und dem Faktor α hat das Verfahren den richtigen Abstand zur Asphaltoberfläche gegeben. Der mittlere Fehler liegt bei 0,24 mm mit einer Standardabweichung von 0,26 mm.

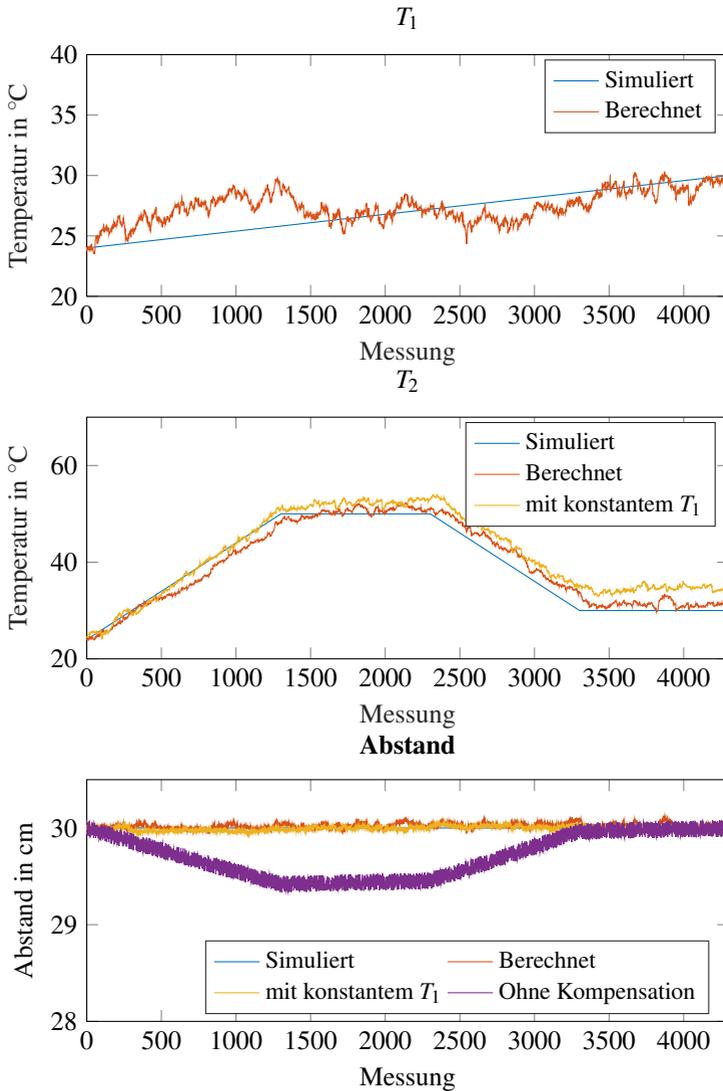


Abbildung 7.6: Die obere und mittlere Abbildung zeigen die simulierten und kalibrierte Temperaturverläufe T_1 und T_2 im Fall 2. In der unteren Abbildung sind die simulierten und kalibrierten Abstände sowie der gemessene Abstand ohne die Temperaturkompensation zur Asphaltoberfläche gezeigt.

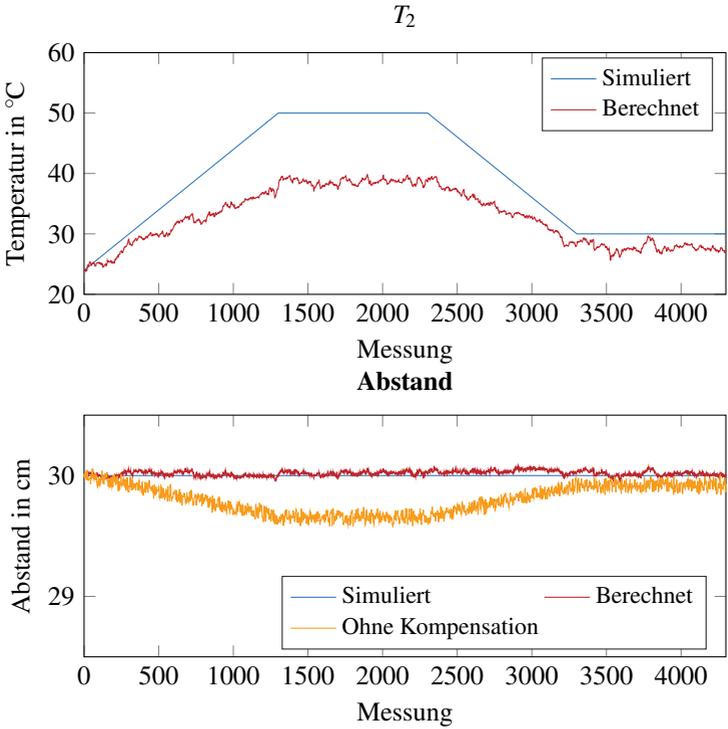


Abbildung 7.7: Die obere Abbildung stellt die simulierten und kalibrierte Temperaturverläufe T_2 für den Fall 4 dar. In der unteren Abbildung sind die simulierten und kalibrierten Abstände sowie der gemessene Abstand ohne die Temperaturkompensation zur Asphaltoberfläche gezeigt.

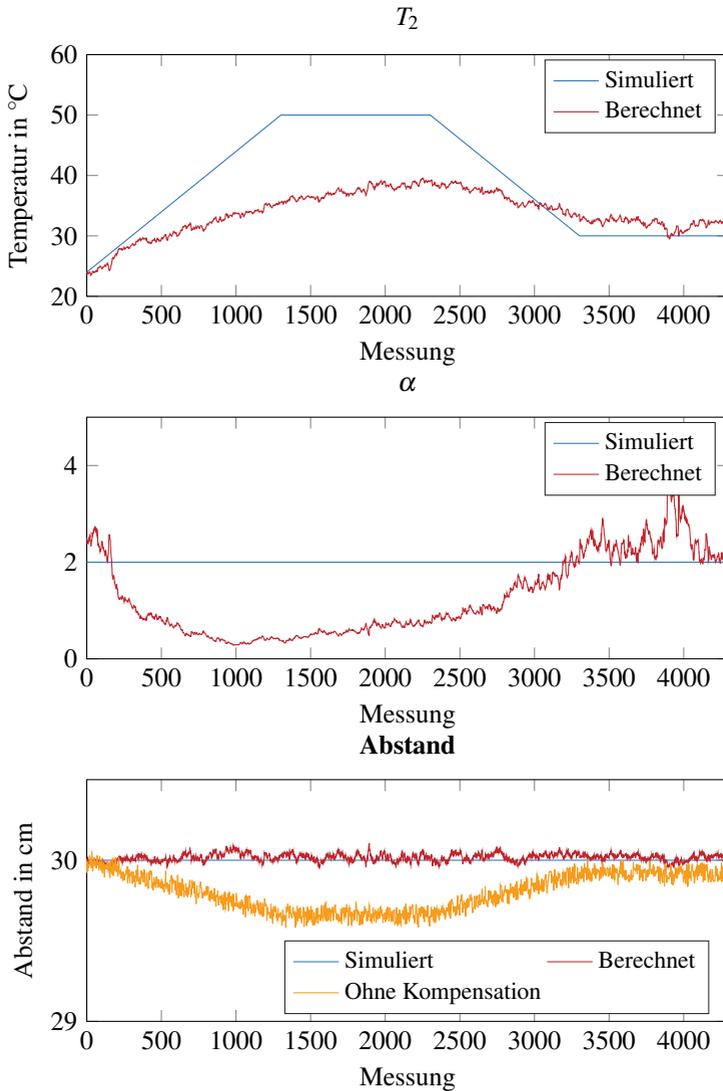


Abbildung 7.8: Die obere Abbildungen stellen die simulierten und kalibrierte Temperaturverläufe T_2 und den exponentiellen Faktor α dar. In der unteren Abbildung sind die simulierten und kalibrierte Abstände sowie der gemessene Abstand ohne die Temperaturkompensation zur Asphaltoberfläche gezeigt.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen mit den Simulationen zeigen, dass das Verfahren unabhängig von der Art des Temperaturverlaufs einen stabileren Messabstand im Vergleich zum Stand der Technik ohne Temperaturkompensation ergibt.

In dem Fall eines linearen Temperaturgradienten zwischen dem Array und der Asphaltoberfläche ist das Verfahren in der Lage den Temperaturänderungen zu folgen und hat dabei einen mittleren Abstandsfehler kleiner als den maximalen simulierten Fehler von 3,4 mm.

Das Verfahren zeigt in Fall 3 bei dem simulierten exponentiellen Temperaturverlauf mit dem linearen Temperaturmodell eine Abweichung in der berechneten Temperatur T_2 zur Simulation. Trotz der Abweichung wurden der Aufwärmvorgang und der Abkühlvorgang sowie der Bereich mit der konstanten Temperatur detektiert.

Mit dem exponentiellen Temperaturmodell zeigt das Verfahren großen Fehler in der Schätzung von der Temperatur T_2 und dem Exponenten α . Der berechnete Abstand hat einen größeren mittleren Fehler im Vergleich zu dem linearen Temperaturmodell.

7.1.3 Experimentaufbau

Das Verfahren wurde mit einem experimentellen Aufbau bei Pepperl+Fuchs GmbH am Standort Amberg getestet. Das Ultraschallarray besteht aus fünf UC2000-30GM Ultraschallwandlern mit einer Mittenfrequenz von 200 kHz.

Die Wandler sind wie in Abbildung 7.9 aufgrund der einfachen Realisierung statt auf der gleichen Höhe in einem Bogen angeordnet. Das Wandlerarray wird über einer Heizplatte mit einem Abstand von 29,7 cm zum mittleren Wandler in dem Array fixiert. Die Heizplatte wärmt beim Anschalten laut dem Benutzerhandbuch auf 120 °C. Danach schaltet die Heizplatte selbst aus und kühlt bis circa 60 °C ab, bevor sie mit dem Aufwärmvorgang wieder anfängt. Die Wandler werden mit der gleichen Ansteuerungselektronik wie in dem ABUS-System angesteuert.

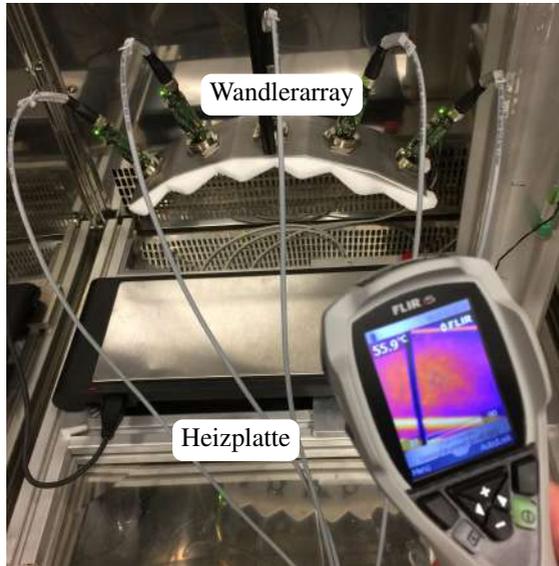


Abbildung 7.9: Experimenteller Aufbau zur Evaluierung des Verfahrens. Das Wandlerarray wird bei einem Abstand von 29,7 cm über der Heizplatte fixiert. Die Heizplatte simuliert die warme Asphaltoberfläche.

Die Temperatur der Heizplatte wird mit einer Wärmebildkamera beobachtet. Es werden die Einhüllenden der Ultraschallsignale nach dem IQ-Demodulator mit einer Abtastrate von 2 MHz abgetastet. Danach werden die Laufzeiten des ersten Echos für allen Sender-Empfänger-Kombinationen mit dem CFD-Verfahren detektiert.

Die Messungen wurden über mehreren Aufwärm- und Abkühlvorgang der Heizplatte durchgeführt. Das Messverfahren wurde mit dem linearen und exponentiellen Temperaturmodell evaluiert. Dabei wurde die Temperatur T_1 am Wandlerarray auf die gemessene Raumtemperatur gesetzt und ist während der Messungen konstant.

Aufgrund der Wärmekonvektion durch die Grenzschicht zwischen der Metallplatte und Luft wird eine niedrige Lufttemperatur unmittelbar ober-

	Berechnet	Ohne Kompensation
Mittlerer Abstand	29,8 cm	28,7 cm
Standardabweichung	1,3 mm	2,3 mm
Mittlerer Fehler	1,8 mm	9,8 mm

Tabelle 7.3: Die Tabelle zeigt die Ergebnisse mit dem vorgestellten Verfahren und ohne Kompensation dar.

halb der Heizplatte erwartet. Trotz der angegebenen maximalen Temperatur der Platte von 120 °C, wurde mit der Wärmebildkamera eine Temperatur von 55 °C gemessen.

Abbildung 7.10 stellt das Ergebnis der Untersuchung für das lineare Temperaturmodell dar. Wie es in dem simulierten Fall 3 gezeigt ist, liefert das Verfahren mit einem linearen Temperaturmodell eine niedrigere Temperatur T_2 . Das Verfahren divergierte mit dem exponentiellen Temperaturmodell.

Der berechnete Abstand zeigt ähnliche Schwankungen wie in der Simulation während des Aufwärm- und Abkühlvorgangs der Heizplatte. Ein mittlerer Abstandsfehler von 1,8 mm im Vergleich zum Stand der Technik ohne Kompensation des Temperaturgradienten mit einem mittleren Fehler von 9,8 mm wurde gemessen. Das Median-Filter hat ebenfalls die Ausreißer in der Messungen unterdrückt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

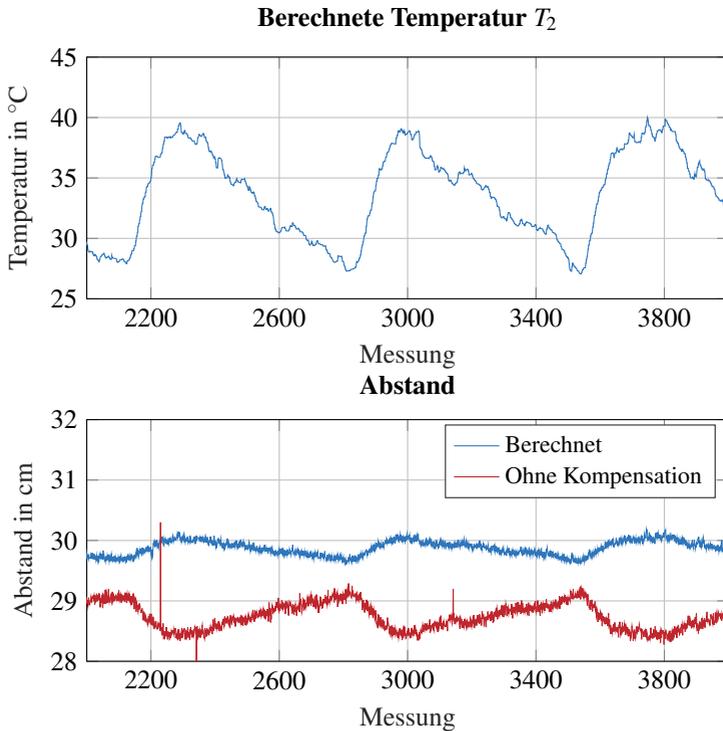


Abbildung 7.10: Die Abbildungen zeigt die Ergebnisse des Experiments mit dem linearen Temperaturmodell. Zum Vergleich ist der gemessene Abstand am mittleren Wandler mit dem Stand der Technik ohne Kompensation dargestellt.

7.1.4 Verbesserung des Verfahrens durch Bestimmung der kürzesten Wege

Die Ergebnisse in Abbildung 7.10 zeigt, dass das Verfahren bei der Berechnung des Abstandes zur Heizplatte während des Aufwärmvorgangs überschätzt und des Abkühlvorgangs den Abstand unterschätzt. Außerdem divergierte das Messfahren mit dem exponentiellen Temperaturmodell.

Es wurde vermutet, dass der kürzeste Schalllaufweg vom Sender zum Empfänger nicht mit dem im Abschnitt 7.1.1 vorgestellten Laufweg übereinstimmt, und somit eine falsche Laufzeitschätzung liefert und die Stabilität des Verfahrens beeinflusst.

Die folgende Untersuchung soll diese Vermutung evaluieren. Dabei wurden die berechnete Schallwege über den Normalenvektor vom Sender S_1 zu allen Empfänger mit den kürzesten Wegen verglichen. Die kürzeste Wege sind unter der Annahme berechnet, dass der Sender S_1 einen Öffnungswinkel von 30° hat. Abbildung 7.11 zeigt, dass die kürzesten Wege andere Reflexionsorte auf der Asphaltoberfläche haben.

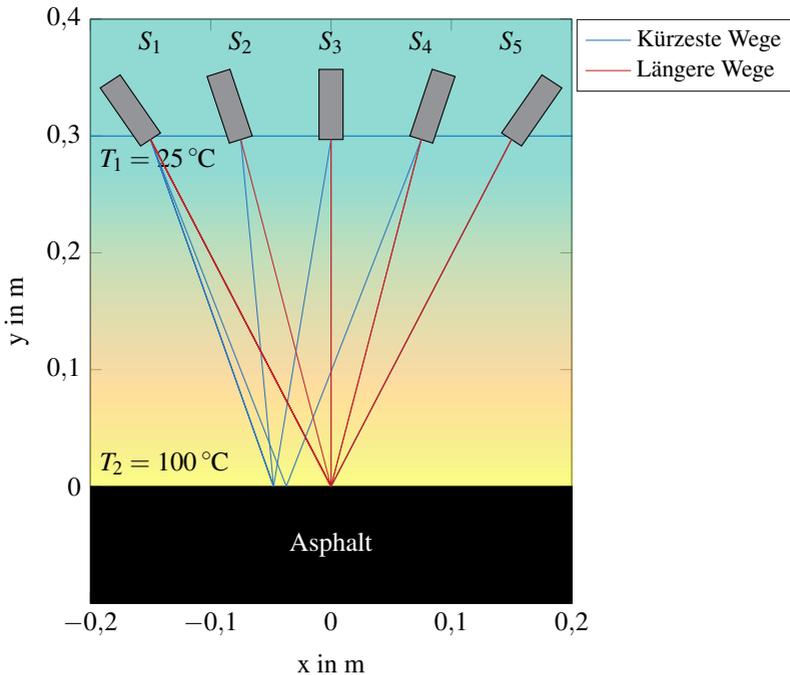


Abbildung 7.11: Die Abbildung zeigt den Unterschied zwischen den kürzesten Schallwegen vom Sender S_1 zu allen Empfängern und den Schallwegen über den Normalenvektor vom S_1 .

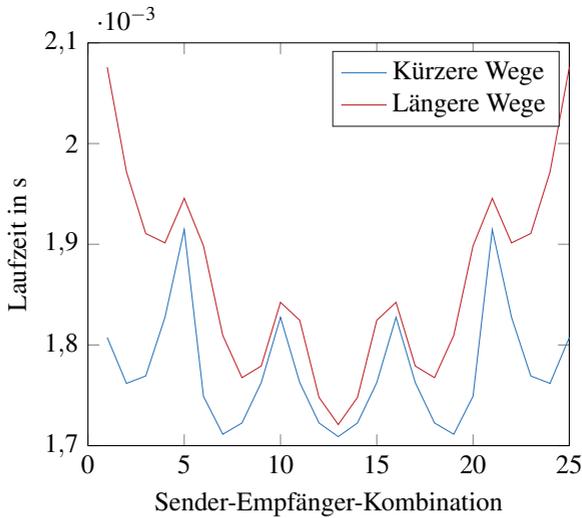


Abbildung 7.12: Abbildung zeigt die Laufzeiten mit den kürzesten Wegen zwischen den Sendern und Empfängern im Vergleich zu den über dem Normalenvektor des Senders simulierten Laufzeiten.

Die damit simulierte Laufzeiten sind in Abbildung 7.12 dargestellt. Die Laufzeitunterschiede sind größer bei dem Ultraschallwandler mit einem großen Neigungsgrad, nämlich den ersten fünf Sender-Empfänger-Kombinationen mit Wandler S_1 als Sender und den letzten fünf Sender-Empfänger-Kombinationen mit Wandler S_5 als Sender.

Die Bestimmung des kürzesten Weges wird anhand Abbildung 7.13 schematisch vorgestellt. Der Wandler S_1 ist der Sender und Wandler S_5 der Empfänger. Es wird ein Winkelbereich $\pm\phi$ um dem Normalenvektor des Wandlers S_1 definiert. Dieser Bereich entspricht dem Öffnungswinkel des Wandlers.

Es wird nach dem Winkel γ gesucht, mit dem der kürzeste Weg zwischen dem Sender $S_1 = (x_S, h)$, dem Reflexionspunkt $P = (x_P, 0)$ auf der Oberflä-

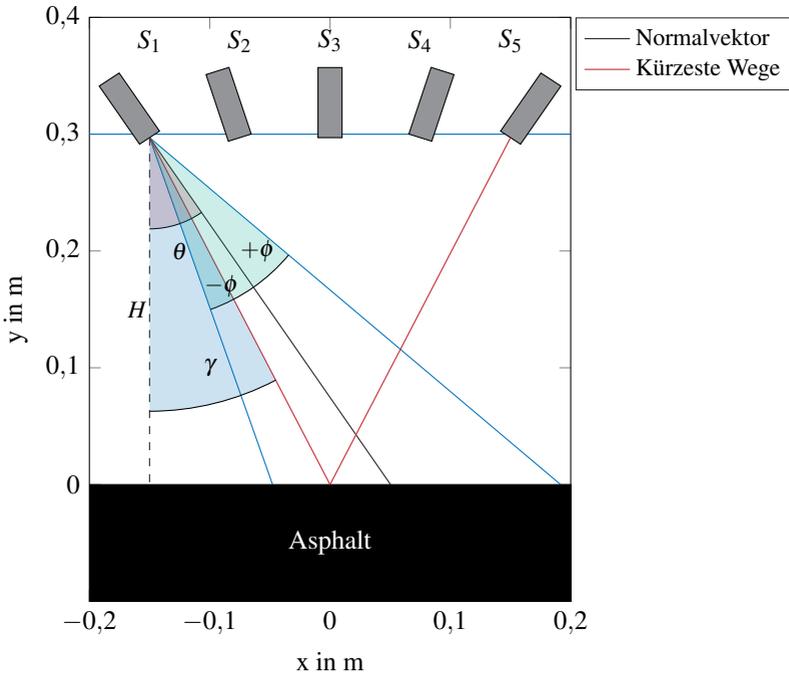


Abbildung 7.13: Abbildung zeigt schematisch die Bestimmung des kürzesten Weges zwischen dem Sender S_1 und Empfänger S_5 .

che und dem Empfänger $S_5 = (x_R, h)$ gegeben wird. Der Suchbereich liegt zwischen $\theta - \phi$ und $\theta + \phi$.

Für einen gegebenen Winkel γ ist die x -Position des Reflexionsorts x_P auf der Oberfläche gegeben durch:

$$x_P = x_S + H \tan(\gamma). \tag{7.7}$$

Die Variable x_S ist die horizontale Position des Senders zum Mittelpunkt des Arrays und die Variable H der Abstand zwischen dem Array und der Oberfläche. Der Weglänge l bis zum Empfänger ist:

$$l = \sqrt{x_S - x_P^2 + H^2} + \sqrt{x_R - x_P^2 + H^2}, \quad (7.8)$$

mit der Variable x_R als horizontale Position des Empfängers im Array.

7.1.5 Simulation und Ergebnisse mit den Verbesserungen

In diesem Abschnitt wird das verbesserte Messverfahren anhand der Simulationen mit unterschiedlichen Temperaturverläufen und Abstandsänderungen evaluiert. Im Fall 1 wurde das Wandlerarray auf eine Messhöhe von 30 cm platziert. Die Temperatur am Wandlerarray T_1 beträgt 24°C und ist über die Messungen eine Konstante. Die Temperatur auf der Oberfläche beginnt mit 24°C und steigt auf 50°C an und bleibt für 1000 Messungen konstant bevor sie auf 30°C sinkt. Zwischen dem Wandlerarray und der Asphaltoberfläche wurde ein linearer Temperaturverlauf simuliert. Zu den simulierten Laufzeiten wurden Laufzeitfehlern von bis zu $10\ \mu\text{s}$ addiert.

Zusätzlich zu den Temperaturänderungen wurde eine Abstandsänderung simuliert. Das Messverfahren geht von einem linearen Temperaturverlauf zwischen dem Array und der Oberfläche. Das Ergebnis der Untersuchung ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, dass das Verfahren den Temperaturänderungen und den Abstandsänderungen gleichzeitig verfolgen kann. Der mittlere Fehler von T_2 beträgt $1,0^\circ\text{C}$ und hat eine Standardabweichung von $1,3^\circ\text{C}$. Der Abstandsfehler hat einen Mittelwert von $0,15\ \text{mm}$ und eine Standardabweichung von $0,5\ \text{mm}$. Im Vergleich dazu hat der gemessene Abstand ohne Temperaturkompensation einen mittleren Messfehler von $-3,3\ \text{mm}$ und eine Standardabweichung von $2,1\ \text{mm}$.

Der Fall 2 hat die gleiche Messumgebung wie der Fall 1. Statt ein linearer Temperaturverlauf wurde ein exponentieller Temperaturverlauf zwischen dem Array und der Oberfläche mit einem Exponenten $\alpha = 5$ simuliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.15 dargestellt.

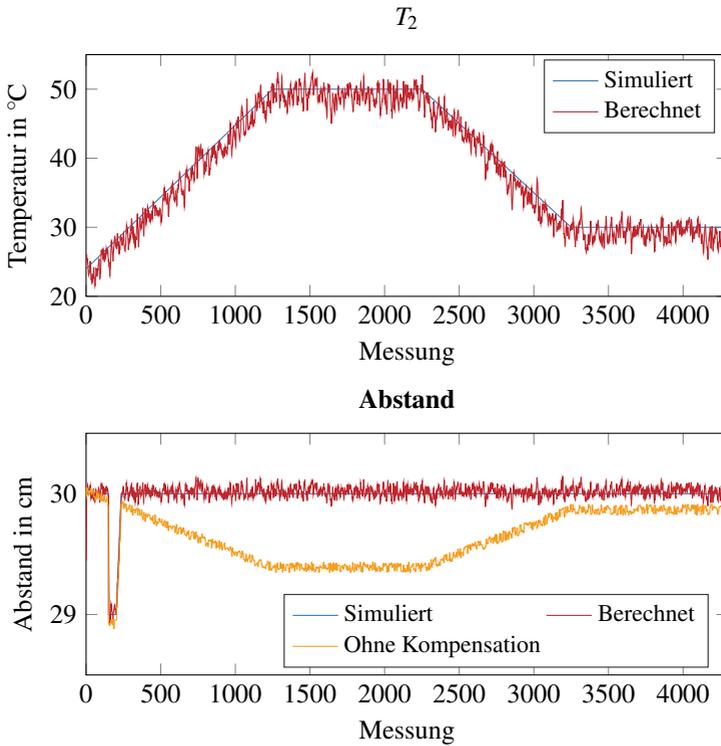


Abbildung 7.14: Die obere Abbildung zeigt die simulierten und kalibrierten Temperaturverläufe. In der unteren Abbildung sind die simulierte und kalibrierte Abstände zur Asphaltoberfläche dargestellt. Außerdem wurde der gemessene Abstand ohne die Temperaturkompensation gezeigt.

Dem verbesserten Messverfahren ist es gelungen, den Temperaturänderungen in T_2 über die Messungen zu folgen. Die Austauschbarkeit des Exponenten α und der Temperatur T_2 wurde im Vergleich zur vorherigen Simulation in Abschnitt 7.1.2 minimiert.

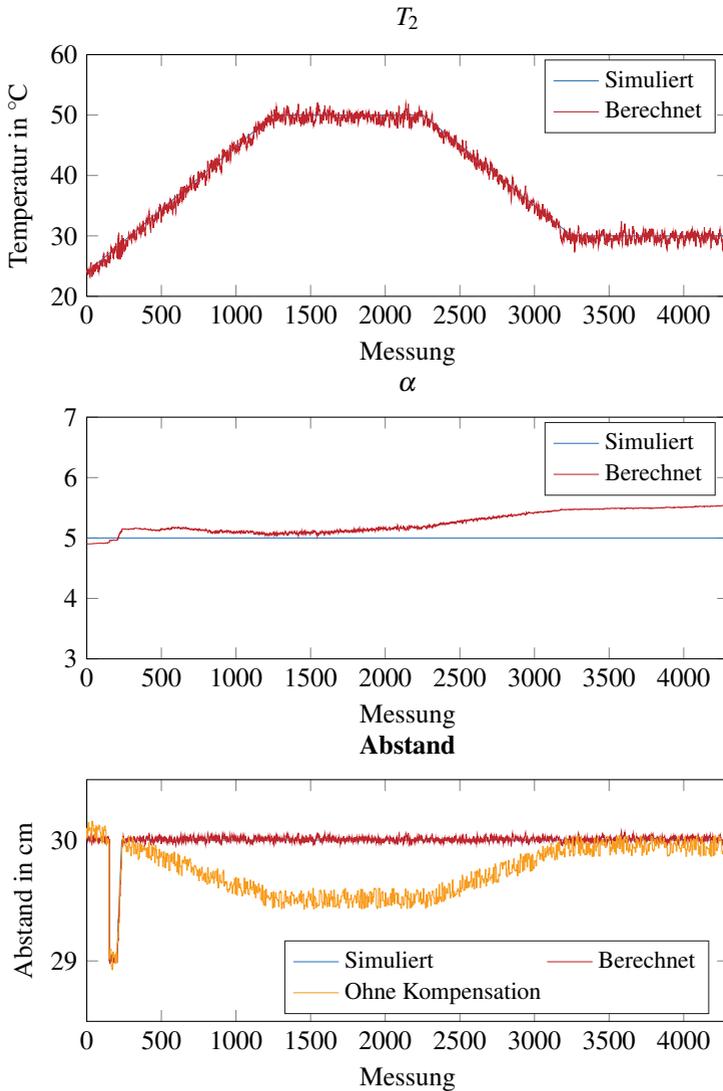


Abbildung 7.15: Die oberen Abbildungen stellen die simulierten und kalibrierte Temperaturverläufe T_2 und den exponentiellen Faktor α dar. In der unteren Abbildung sind die simulierten und kalibrierten Abstände sowie der gemessene Abstand ohne die Temperaturkompensation zur Asphaltoberfläche gezeigt.

Der mittlere Abstandfehler lag bei 0,18 mm mit einer Standardabweichung von 0,8 mm. Der Temperaturfehler hat einen Mittelwert von 1,7 °C und eine Standardabweichung von 1,5 °C. Der berechnete Exponent α hat einen mittleren Fehler von 0.5 mit einer Standardabweichung von 0.24.

7.1.6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die Einsetzbarkeit der Kalibrierungsmethode für das Luftultraschall-Array unter extremen Temperaturbedingungen evaluiert. Das angepasste Messverfahren wurde mit einer industrienahen Anwendung in Straßenbau getestet. In dieser Anwendung soll das Messverfahren eine genaue Abstandsmessung zwischen dem Array und der frisch aufgetragenen Asphaltoberfläche trotz des großen Temperaturgradienten gewährleisten.

Anhand der Simulationen und eines Experiments wurde das Verfahren evaluiert. Die Ergebnisse des Experiments zeigen, dass das Verfahren bei einem exponentiellen Temperaturverlauf zwischen dem Array und der Oberfläche divergierte. Außerdem wurde eine Abweichung zwischen den simulierten und detektierten Laufzeiten beobachtet. Es wurde vermutet, dass die Bestimmung der Schalllaufwege nicht die kürzesten Laufwege ergibt.

In Abschnitt 7.1.4 wurde eine Verbesserung des Messverfahrens vorgestellt. Es wurde mithilfe der Simulationen das verbesserte Konvergenzverhalten des Verfahrens bei exponentiellem Temperatur gezeigt. In den nächsten Schritten sollten die Verbesserungen mit Experimenten bestätigt werden.

7.2 Objekterkennung, Klassifizierung und Lokalisierung mit bildgebendem Luftultraschallsystem

7.2.1 Einführung

In Abschnitt 6.3 wurde die SAFT-Rekonstruktion mit der Gratinglobe-Unterdrückung für das ABUS-System vorgestellt. Es wurde mit Hilfe zweier einfachen Objekte die Abbildungsqualität des Systems erprobt. In diesem Abschnitt wird die Einsetzbarkeit des Systems für die Objekterkennung, die Klassifizierung und die Lokalisierung in einem industrienahen Anwendung getestet.

Abbildung 7.16 stellt einen möglichen Anwendungsfall des ABUS-Systems dar. Um die ROI werden die Ultraschallwandler platziert. Die Objekte stehen in der ROI und werden mit ABUS aufgenommen und SAFT-Rekonstruktion. Aus dem resultierenden Bild sollen die Objekte segmentiert und klassifiziert werden. Anhand der detektierten Positionen und Ausrichtungen der Objekte kann der Roboterarm sie richtig aufnehmen und platzieren.

7.2.2 Herausforderungen und Ziele

Abbildung 7.17 stellt eine Beispielrekonstruktion mit ABUS im Vergleich zu einem Kamerabild dar. Das rekonstruierte Bild des ABUS-Systems ist eine Schichtaufnahme der Objekte in der ROI. Dabei werden die Objekt-oberflächen als Kanten mit variierenden Intensitäten abgebildet. Außerdem wurde in der vergrößerten Ansicht gezeigt, dass die rekonstruierte Kanten Artefakte enthalten.

Aufgrund der dünnbesetzten Apertur mit sechzehn Ultraschallwandler und der niedrigen Bandbreite der Wandler ist die Systemauflösung und der Kontrast laut Gleichung (3.1) begrenzt. Die gemessene FWHM der PSF des Systems in Abschnitt 6.2.1 hat einen Mittelwert von 1,4 cm. Es wurde er-

wartet, dass naheliegende Objekte mit einem Abstand kleiner als dieser gemessenen Systemauflösung in dem rekonstruierten Bild nicht trennbar sind.

Gleichzeitig ist die Transmission der Ultraschallwelle durch die Objekte aufgrund der großen Impedanzunterschiede zwischen Luft und Festkörper limitiert. Dies führt zur Abschattung der Ultraschallwelle und verursacht in dem rekonstruierten Bild unvollständige Objektkanten.

Im Rahmen einer betreuten Masterarbeit [89] wurde ein Verfahren zur automatischen Segmentierung, Klassifizierung und Lokalisierung der abgebildeten Objekte entwickelt. Das Verfahren soll mit den variierenden Intensitäten und der Unvollständigkeit der Objektkanten im Bild umgehen können. Das Ziel des Verfahrens ist eine Klassifizierungsgenauigkeit $\geq 90\%$ und eine mit der gemessenen Systemauflösung vergleichbare Lokalisierungsgenauigkeit von 1,4 cm zu erreichen.

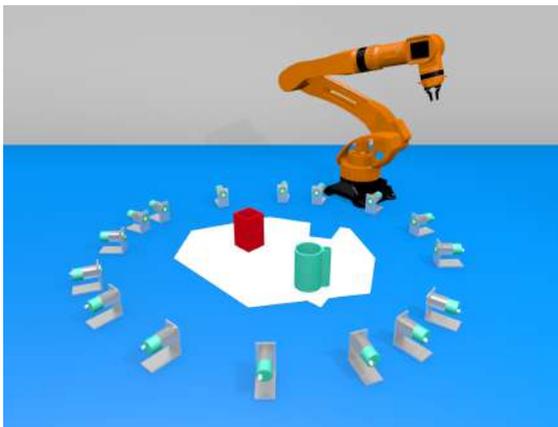


Abbildung 7.16: Abbildung zeigt eine industrienähe Anwendung des ABUS-Systems für Objekterkennung, Klassifizierung und Lokalisierung. Der Roboterarm soll die Objekte in der richtigen Ausrichtung nehmen und platzieren. Die weiße Fläche ist die ROI.

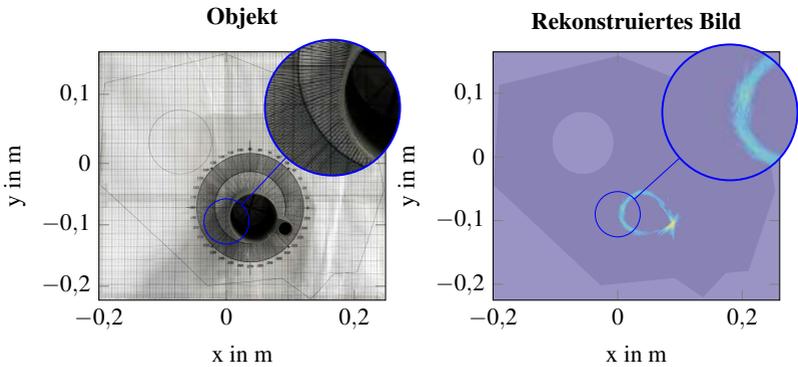


Abbildung 7.17: Die Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen dem Kamerabild des Objekts (links) und dem rekonstruierten Bild mit ABUS (rechts).

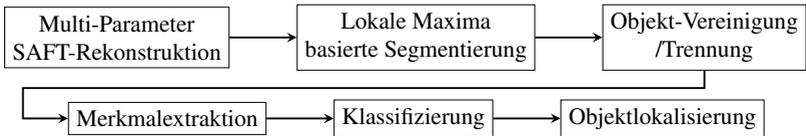


Abbildung 7.18: Ablauf des Verfahrens zur automatischen Objektsegmentierung, Klassifizierung und Lokalisierung mit dem ABUS-System

7.2.3 Verfahren

Das Verfahren ist ein sequentieller Prozess und umfasst die Bildrekonstruktion, die Bildverarbeitung, die Klassifizierung und die Lokalisierung der Objekte. Abbildung 7.18 stellt den Ablauf des Verfahrens dar.

Multi-Parameter-SAFT-Rekonstruktion

In der Untersuchung in Abschnitt 6.3 wurden die Einflüsse des Winkels ϕ zur Auswahl von Empfänger pro Sender und der Länge des Median-Operators k auf die rekonstruierten Bildinhalte und Bildartefakte gezeigt. Es wurde beobachtet, dass die Einstellung der beiden Parameter von der

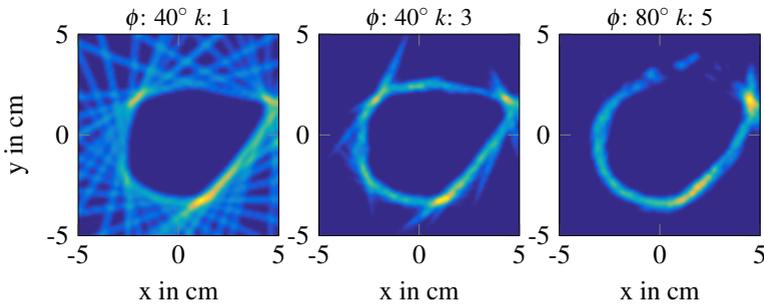


Abbildung 7.19: Abbildung zeigt den Einfluss von dem Winkel ϕ und die Median-Länge k auf die Bildartefakte

Größe und der Oberflächenkrümmung der abgebildeten Objekte abhängig ist.

Beispielsweise reflektiert ein zylindrisches Objekt mit einem kleinen Radius die Ultraschallwelle in einem größeren Winkel im Vergleich zur einer flachen Oberfläche. Diese reflektierten Ultraschallechos werden von mehr Ultraschallwandlern in der Nähe des Senders empfangen. Aufgrund dessen können einen größeren Winkel ϕ und Median-Länge k für die SAFT-Rekonstruktion benutzt werden. Diese Einstellung ist für eine Reflexion an einer flachen Oberfläche weniger geeignet, da die Reflexion von dem Median-Operator als Ausreißer betrachtet werden.

Abbildung 7.19 zeigt den Einfluss des Winkels ϕ und der Median-Länge k am Beispiel des Zylinders mit einem asymmetrischen Merkmal. Die Artefakte auf der Objektkante wurden mit einer Einstellung von $\phi = 80^\circ$ und einer Median-Länge gleich fünf reduziert im Vergleich zu der Rekonstruktion mit der Median-Länge $k = 3$.

Da die SAFT-Rekonstruktion vollen Zugriff auf alle A-Scans hat, wird in diesem Verfahren die Multi-Parameter-SAFT-Rekonstruktion eingeführt, bei der mehrere Bilder mit unterschiedlichen Einstellungen des Winkels ϕ und der Median-Länge k rekonstruiert werden. Das Ziel ist ein besseres Seg-

mentierungsergebnis unabhängig von der Größe und der Oberflächenkrümmung der Objekte anhand der Zusammenführung von Segmentierungsergebnissen dieser Bilder zu erreichen.

Segmentierung mit lokalen Maxima

Die variierende Bildintensitäten entlang der Objektkante limitieren die Anwendung einer globalen Schwelle um die Objekte vom Hintergrund zu trennen. Daher wird in diesem Verfahren ein Segmentierungsverfahren beruhend auf die Detektion lokaler Maxima mithilfe einer gleitenden zweidimensionalen Gauß-Maske angewendet. Die Breite der Gauß-Maske kann entsprechend der gemessenen Punktspreizfunktion des ABUS-Systems eingestellt werden.

In einer getrennten Matrix mit der gleichen Dimension werden die Häufigkeit eines als lokales Maximum erfassten Pixels eingetragen. Empirisch wurde beobachtet, dass ein lokales Maximum mit einer Häufigkeit kleiner als drei meist ein Bildartefakte ist und das Maximum wird daher aussortiert. In dem nächsten Schritt werden die verbleibenden lokalen Maxima mit Bildintensitäten höher als das 0.98-Perzentil ausgewählt, was zu dem Bild in Abbildung 7.20 (b) führt.

Es wird allgemein angenommen, dass Pixel mit höherer Intensität wahrscheinlicher Teil der Objektkanten sind und die Objektkanten nur eine kleine Menge von Pixeln in den Bildern bedecken. Die ausgewählten lokalen Maxima aus den mit unterschiedlichen Parameter rekonstruierten Bildern werden kombiniert. Im Anschluss wird ein morphologisches Schließen [90] angewendet, um diese lokalen Maxima in verbundenen Regionen zu verwandeln, wie in Abbildung 7.20 (c) gezeigt ist. Schließlich werden die morphologischen Skelette dieser Regionen berechnet, um das segmentierte Objekt in Abbildung 7.20 (d) zu erhalten.

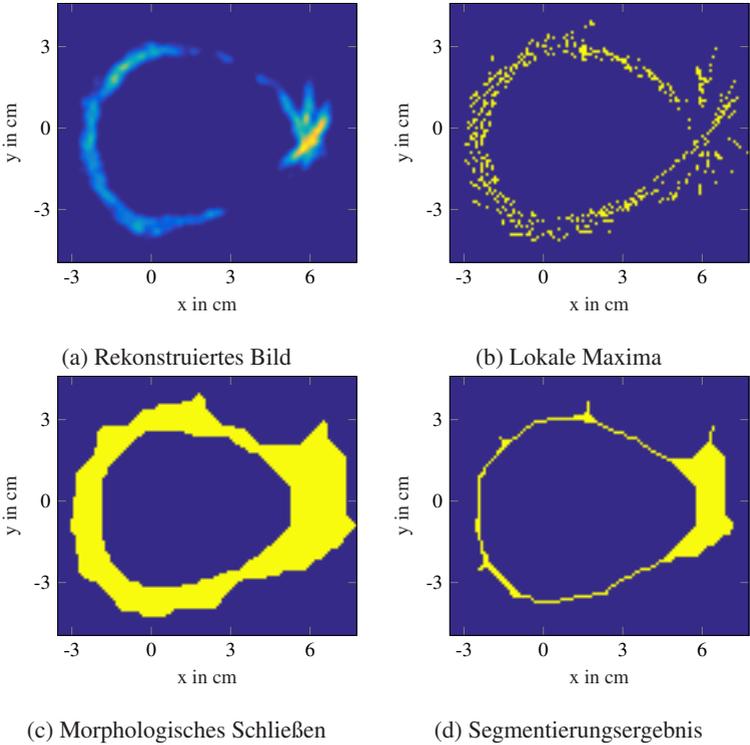


Abbildung 7.20: Die Abbildung zeigt die Lokale-Maxima-basierte-Segmentierung.

Vereinigung oder Trennung segmentierter Objekte

Aufgrund der dünnbesetzten Apertur und der Abschattung von Ultraschall an Hindernissen kann ein Objekt unvollständig rekonstruiert und als separate Regionen segmentiert werden. In diesem Verfahren wird die Kenntniss über die Abbildungseigenschaft des ABUS-Systems benutzt, um diese getrennten Regionen zu vereinen.

Es werden nach der Segmentierung die euklidischen Abstände zwischen Pixeln jeder segmentierten Regionen berechnet. Pixeln aus unterschiedlichen Regionen mit einem Abstand unter dem gegebenen Schwellwert werden

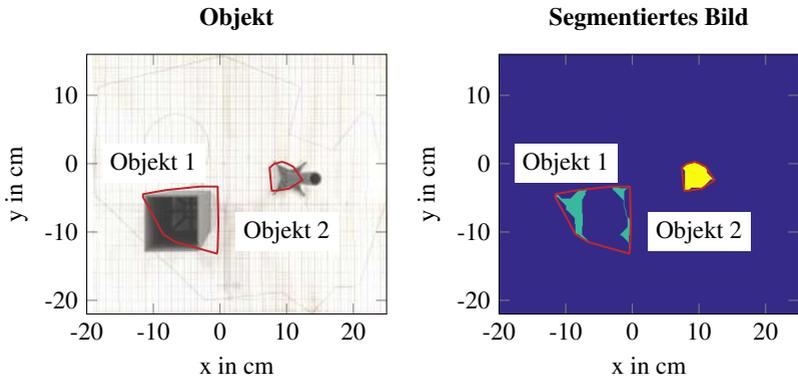


Abbildung 7.21: Beispiel der Objekt-Vereinigung oder -Trennung.

demselben Objekt zugeordnet. Dieser Schwellwert kann entsprechend der PSF des Systems oder der minimalen Größe der abzubildenden Objekte eingestellt werden. Abbildung 7.21 zeigt ein Beispiel der Objekt-Vereinigung mit einer Rekonstruktion zweier Objekte.

Merkmalextraktion und Klassifizierung

Die Klassifizierung des segmentierten Objekts wird mit einem neuronalen Netzwerk zur Mustererkennung implementiert [91]. In dieser Arbeit werden die folgenden Merkmale aus dem segmentierten Objekt als Eingabewerte für die Klassifizierung extrahiert:

- Fläche
- Fläche des konvexen Bereiches
- Hauptachsenlänge
- Nebenachsenlänge
- Exzentrizität

- Umfang
- Rundheit R
- Rechtwinkligkeit S
- Summe der euklidischen Abständen zwischen den Pixeln und dem Zentroid der Region

Die Rundheit R wird berechnet mit

$$R = \frac{4 \cdot \pi \cdot \text{Fläche}}{\text{Umfang}^2}. \quad (7.9)$$

Die Rechtwinkligkeit berechnet sich wie folgt:

$$S = \frac{\text{Fläche}}{16 \cdot \text{Umfang}^2}. \quad (7.10)$$

Für eine Reihe von Trainingsobjekten werden die Merkmale aus den Rekonstruktionen mit nur einem Objekt extrahiert. Das neuronale Netzwerk wird mit diesen Merkmalen als Eingangsdaten unter dem überwachten Lernen mit dem *Bayesian Regularization Backpropagation* trainiert, das ein Übertrainieren des Netzwerks verhindern kann [92].

Objektlokalisierung

Die Position und Ausrichtung eines segmentierten Objekts kann mit dem Zentrum der Region und dem Winkel zwischen der Hauptachse und der horizontalen Achse berechnet werden. Bei komplexeren Objekten mit bekannter Geometrie kann ein Schablonenabgleich wie die *Generalized Hough Transform* (GHT) angewendet werden **GHT**, um die Objekte zu lokalisieren.

In diesem Verfahren wird jedem Objekt in dem Datensatz eine benutzerdefinierte Schablone zugewiesen. Bei dieser Schablone handelt sich um ein

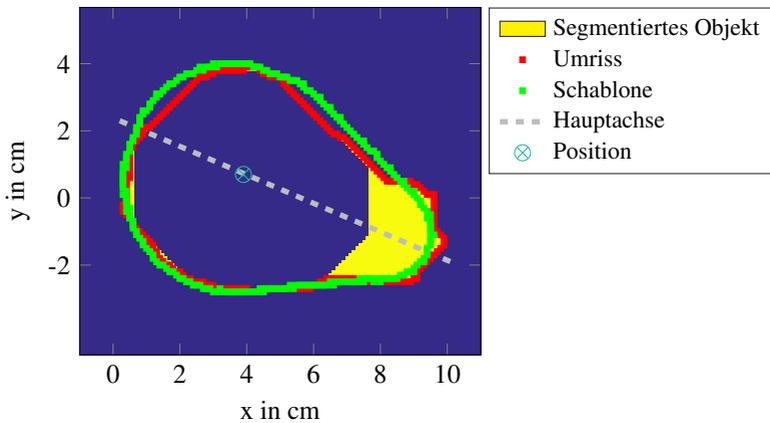


Abbildung 7.22: Objektlokalisierung mit *Generalized Hough Transform*

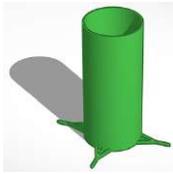
Binärbild, das aus dem Umriss des Objekts besteht. Die Schablone wird während der Anwendung von GHT verschoben und gedreht, um die Position und die Ausrichtung des Objekts zu detektieren. Die Position und Winkel der Schablone mit dem Maximum in dem Hough-Raum ergeben die Position und Ausrichtung des Objekts.

Abbildung 7.22 zeigt ein Beispiel der Objektlokalisierung mit GHT. Die gelbe Fläche ist die segmentierte Region. Der Umriss ist mit einer roten Linie dargestellt. Die Schablone mit dem besten Abgleich mit dem Umriss des Objekts ist mit der grünen Linie eingezeichnet.

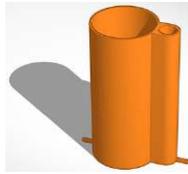
7.2.4 Evaluierung

Für die Evaluierung des Verfahrens wurden sechs Objekte mit unterschiedlicher Form und Größe entworfen. Die Objekte haben im Allgemeinen einen Durchmesser von 6 cm und eine Höhe von 12 cm mit der Ausnahme des kleineren Zylinders mit einem Durchmesser von 1,5 cm.

Die Querschnitte der Objekte sind primitive Formen wie Kreise, Ellipsen, Rechtecke, Dreiecke und ein Kreis mit einem asymmetrischen Merkmal.



(a) Zylinder 1 (Z1)



(b) Zylinder mit asymmetrischen Merkmal (ZA)



(c) Zylinder 2 (Z2)



(d) Elliptischer Zylinder (EZ)



(e) Quader (Q)



(f) Dreieckiges Prisma (DP)

Abbildung 7.23: Testobjekte

In Abbildung 7.23 sind die CAD-Modelle der Objekte dargestellt. Diese Modelle wurden für den 3D-Druck verwendet.

Die Multi-Paramter-SAFT-Rekonstruktion wurde in der Evaluierung mit den Winkeln $\phi = \{60^\circ, 80^\circ, 100^\circ\}$ und den Median-Längen $k = \{5, 6, 7\}$ durchgeführt. Daraus entstehen drei Bilder für die Objektsegmentierung. Es wurden für jedes Objekt vierzig Messungen an diskreten Positionen und Winkeln in der ROI durchgeführt.

Die Trainingsdaten beinhalten die extrahierten Merkmale und wurden in drei Teile aufgeteilt, mit 75 % der Daten für das Trainieren des neuronalen Netzwerks und jeweils 15 % für die Validierungs- und Testphase. Das neuronale Netzwerk hat eine verborgene Schicht mit fünfzehn Neuronen und eine Ausgangsschicht mit sechs Neuronen für die sechs Testobjekte. Es wird bei der Klassifizierung der Objekte immer das zugehörige Neuron aktiviert.

Ist-Klasse	Z1	38 15.8%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100%
	ZA	0 0.0%	39 16.3%	0 0.0%	0 0.0%	2 0.8%	0 0.0%	95.1%
	EZ	0 0.0%	0 0.0%	40 16.7%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.4%	97.6%
	Z2	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	39 16.3%	0 0.0%	1 0.4%	97.5%
	Q	2 0.8%	1 0.4%	0 0.0%	0 0.0%	37 15.4%	2 0.8%	88.1%
	DP	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.4%	1 0.4%	36 15.0%	94.7%
	Alle	95.0% 5.0%	97.5% 2.5%	100% 0.0%	97.5% 2.5%	92.5% 7.5%	90.0% 10.0%	95.4% 4.6%
	Z1	ZA	EZ	Z2	Q	DP	Alle	
	Soll-Klasse							

Abbildung 7.24: Die gesamte Wahrheitsmatrix der Trainings-, Validierungs-, und Testphase des trainierten neuronalen Netzwerk für die sechs Testobjekte.

Das Trainieren des neuronalen Netzwerks konvergierte nach achtzehn Iterationen. Die Klassifizierungsgenauigkeit in der Trainings-, Validierungs- und Testphase ist mit der Wahrheitsmatrix in Abbildung 7.24 dargestellt. Es wurde eine Klassifizierungsgenauigkeit von 98,8 % in der Trainingsphase, 86,1 % in der Validierungsphase und 88,9 % in der Testphase erreicht.

Der asymmetrische Zylinder wurde für die Evaluierung der Lokalisierungsgenauigkeit verwendet. Es wurden sechzig Messungen an diskreten Positionen und Winkeln in der ROI durchgeführt. Die tatsächliche Positionen und Ausrichtungen des asymmetrischen Zylinders wurde notiert.

Für die Lokalisierung mit GHT wurde die Schablone aus dem Beispiel in Abbildung 7.22 benutzt. Es wurde ein mittlerer Positionsfehler von 5 mm mit einer Standardabweichung von 2,7 mm gefunden. Die mittlere Ausrichtungsgenauigkeit lag bei $2,8^\circ$ mit einer Standardabweichung von $5,4^\circ$.

7.2.5 Zusammenfassung

Es wurde ein Verfahren zur automatischen Objektsegmentierung, Klassifizierung und Lokalisierung für das ABUS-System entwickelt. Die Segmentierung kann trotz variierender Bildintensitäten die Objektkanten erfolgreich segmentieren. In Kombination mit der Multi-Parameter-SAFT-Rekonstruktion kann das Verfahren Objekte mit unterschiedlicher Größen und Oberflächenkrümmungen segmentieren und klassifizieren.

Die Evaluierung zeigt eine gesamte Klassifizierungsgenauigkeit von 88,9 % und eine Positionierungsgenauigkeit von 5 mm. Diese ist kleiner als die gemessene Systemauflösung von 1,4 cm.

Aufgrund der dünnbesetzten Apertur und limitierter Bandbreite des Ultraschallwandlers kann das ABUS-System Objektmerkmale kleiner als ca. 2 cm nicht unterscheiden. Mögliche Verbesserungen sind Ultraschallwandler mit größerer Bandbreite oder eine höhere Anzahl von Wandlern.

8 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit wurden zwei Verfahren zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte von Ultraschallsystemen entwickelt, nämlich die Selbstkalibrierung und die Optimierung der Wandleranordnung. Die Verfahren wurden mithilfe von Simulationen und Experimenten mit Ultraschallsystemen unterschiedlicher Komplexitäten evaluiert.

8.1 Zusammenfassung

8.1.1 Selbstkalibrierung

Die Selbstkalibrierung benutzt die Schalllaufzeiten zwischen den Sender-Empfänger-Kombinationen (SEK) in einer Leermessung, um mögliche Fehlerquellen in einem Ultraschallsystem wie zum Beispiel Positionsfehler, Verzögerungen in der Aufnahme, Temperaturfehler und fehlerhaften Systemkomponenten zu kalibrieren. Dabei werden die Laufzeitgleichungen der ausgewählten SEK für die Kalibrierung in nichtlinearen Gleichungssystemen zusammengefasst und mit dem Trust-Region-Verfahren iterativ gelöst. Im Weiteren werden fehlerhafte Systemkomponenten mithilfe der Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) und kalibrierter Verzögerungen detektiert.

Die Fehlerquellen werden mithilfe von Vorkenntnissen über das System nach ihrer möglichen Größenordnung priorisiert und sequentiell kalibriert. Die Selbstkalibrierung beginnt mit der größten Fehlerquelle und nimmt kleinere Fehler als vernachlässigbar an. Im Vergleich zum Stand der Technik er-

möglicht diese Strategie erstmalig die Trennung der Fehlerquellen. Außerdem werden die Anzahl der Unbekannten in dem Gleichungssystem und den Speicherbedarf in jedem Kalibrierungsschritt stark verringert. Somit ist das Verfahren für komplexe Ultraschallsysteme mit großer Anzahl von Ultraschallwandlern und Datenkanälen einsetzbar.

Da die Güte der Laufzeitdetektion die Genauigkeit der Selbstkalibrierung beeinflusst, wurde in dieser Arbeit die Robustheit unterschiedlicher Detektionsverfahren aus der Literatur gegenüber Rauschen und Abstrahlcharakteristik der Ultraschallwandler untersucht. Die Untersuchung zeigt, dass das Matched-Filter die größte Robustheit hat. Durch die Einführung einer Anpassung des Matched-Filter an den Abstrahl- und Empfangswinkel in dieser Doktorarbeit konnte die Detektionsgenauigkeit für die Kalibrierung weiter verbessert werden.

Außerdem ermöglicht das entwickelte Kalibrierungsverfahren im Vergleich zu anderen Kalibrierungsmethoden für bildgebende Ultraschallsysteme erstmalig die Berücksichtigung einer inhomogenen Schallgeschwindigkeitsverteilung im Medium. In der Kalibrierung wird das Medium mit der Delaunay-Triangulation in ein Dreiecksnetz geteilt und die Temperaturverteilung linear interpoliert. Eine Strahlverfolgung entlang des Ausbreitungsweges zwischen dem Sender und Empfänger ergibt einen genaueren Schallgeschwindigkeitsverlauf im Vergleich zur einfachen Mittelwert für die Berechnung der Schalllaufzeit.

Für komplexe Systeme wie zum Beispiel das 3D-USCT-II-Gerät existiert keine Grundwahrheit, um das Ergebnis der Selbstkalibrierung zu verifizieren. Durch Analyse der Fehlerfortpflanzung in den Gleichungssystemen wurde ein Verfahren zur Vorhersage der Kalibrierungsgenauigkeit vorgestellt. Mit diesem Verfahren konnte zum ersten Mal anhand der Untersuchung mit Experimentdaten des 3D-USCT-II-Geräts eine obere Grenze der Kalibrierungsfehler von 0,11 mm vorhergesagt werden. Dieser Fehler ist kleiner als ein Viertel der Wellenlänge von 0,14 mm. Laut [25] ist die-

se Genauigkeit die Voraussetzung für eine sehr gute Bildqualität mit dem 3D-USCT-II-Gerät.

Ein weiteres wichtiges Erkenntnis aus der Untersuchung ist, dass die Minimierung des Kalibrierungsfehlers ein Kompromiss zwischen der Minimierung der Konditionszahl der Gleichungssysteme und der Minimierung des Laufzeitfehlers ist. Der Optimierungsparameter ist die Anzahl der benutzten SEK für die Selbstkalibrierung, die mit dem Winkel α zum Normalenvektor des Senders ausgewählt werden. Ein größerer Winkel α bezieht mehr gegenüber liegende Empfänger innerhalb des Winkelbereiches für die Kalibrierung ein. Damit wird die Anzahl der SEK erhöht und die Konditionszahl verkleinert. Da Ultraschallwandler jedoch einen begrenzten Öffnungswinkel haben, verschlechtert sich das SNR des Empfangssignals mit dem Winkel größer als dem Öffnungswinkel und der Laufzeitfehler steigt.

Das Kalibrierungsverfahren wurde mit Simulationen und Experimenten evaluiert. Die Untersuchung mit der Simulation hat ergeben, dass das Trust-Region-Verfahren zum Lösen der nichtlinearen Gleichungssystemen in der Kalibrierung aufgrund der numerischen Stabilität am besten geeignet ist. Die Anwendung der SNR- und Verzögerungsfilterung hat die Bildartefakte aufgrund fehlerhafter Daten in dem rekonstruierten Schallgeschwindigkeitsbild erfolgreich vermieden.

Im Weiteren wurde mit einem Drahtphantom die verbesserte Fokussierung des Reflexionsbildes mit der SAFT-Rekonstruktion gezeigt. Das Drahtphantom hat einen Durchmesser von 0,07 mm. Die gemessene Halbwertsbreite entlang des Drahtphantoms lag entsprechend der theoretischen Vorhersage bei 0,22 mm mit einer kleinen räumlichen Varianz bei 40 μm (Vorhersage 35 μm). Die Rekonstruktion einer Stahlkugel als ein Kalibrierungsobjekt hat den Durchmesser der Kugel von 5 cm mit einer Standardabweichung von 56 μm ergeben.

Zusätzlich wurde die allgemeine Einsetzbarkeit der Selbstkalibrierung mit dem bildgebenden Luftultraschallsystem (ABUS) evaluiert. Das ABUS-System hat im Vergleich zu dem 3D-USCT-II-Gerät nur sechzehn Ultra-

schallwandler. Die Selbstkalibrierung hat die relativen Positionen der Ultraschallwandler erfolgreich kalibriert. Eine Verbesserung FWHM eines Drahtphantoms von 16,1 mm auf 11,2 mm in der Mitte der ROI wurde gemessen.

8.1.2 Optimierung der Wandleranordnung

Die Optimierung der Wandleranordnung beschreibt die Ultraschallwandler und die Region-of-Interest (ROI) mit Polygonen. Die Benutzung von Polygonen ermöglicht im Vergleich zur anderen Standardverfahren eine einfache Bestimmung der ROI-Abdeckung und der Abschattung des Ultraschalls an Hindernissen. Die ROI-Abdeckung und andere Qualitätsmaßen aus dem Bereich der Satellitenortung und Optik werden in einem Gleichungssystem von Kostenfunktionen zusammengefasst. Die Minimierung dieser Kostenfunktionen gibt eine verbesserte Wandleranordnung für eine gegebene Anzahl von Ultraschallwandlern.

Der Einfluss der Anzahl der Ultraschallwandler und der initialen Anordnung auf das Ergebnis der Optimierung und die allgemeine Einsetzbarkeit des Verfahren auf beliebiger Geometrien der ROI wurden untersucht. Die Untersuchung zeigt, dass das Optimierungsverfahren eine verbesserte Wandleranordnung im Vergleich zu der regelmäßigen Kreisanordnung unabhängig von der Anzahl der Wandler ergibt. Im Weiteren wurde beobachtet, dass das Ergebnis der Optimierung von der initialen Anordnung abhängig ist. Es kann die beste Wandleranordnung mit mehrfacher Durchführung der Optimierung von unterschiedlichen initialen Anordnungen erhalten werden. Mögliche initiale Anordnungen sind die zufällige Anordnungen der Wandler auf einem Kreis um die ROI.

8.1.3 Weitere industriennahe Anwendungen

Bei der Evaluierung des Verfahrens ist das weltweit erste bildgebende Luftultraschallsystem mit sechzehn Ultraschallwandlern entstanden. Das System

ist in der Lage gleichzeitig zwei Objekte in einer ROI mit einem Durchmesser von 50 cm zu klassifizieren und lokalisieren. Es wurde ein Verfahren zur automatischen Segmentierung, Klassifizierung und Lokalisierung der Objekte entwickelt und an einem industrienahen Anwendungsbeispiel evaluiert.

Das Verfahren benutzt die Multi-Parameter-SAFT-Rekonstruktion, um Objekte unterschiedlicher Größe und Oberflächenkrümmung möglichst mit vollständigen Kanten zu rekonstruieren. Die Segmentierung mit lokalen Maxima kann trotz variierender Bildintensitäten die Objektkanten erfolgreich segmentieren. Es wurden Merkmale aus den segmentierten Regionen extrahiert. Für die Klassifizierung wurde ein neuronales Netz mit diesen Merkmalen trainiert. Bei der Evaluierung mit sechs Objekten wurde eine Klassifizierungsgenauigkeit von 88,9 % in der Testphase erreicht.

Die Objektlokalisierung wird nach der Klassifizierung durchgeführt. Es wird mit dem Klassifizierungsergebnis eine definierte Schablone aus der Datenbank der Objekte ausgewählt und das Objekt mit der *Generalized Hough Transform* (GHT) lokalisiert. In der Untersuchung wurde eine Positionierungsgenauigkeit von 5 mm und eine Ausrichtungsgenauigkeit von $2,8^\circ$ erreicht.

Im Weiteren wurde das Selbstkalibrierungsverfahren für ein Ultraschallarray zur Abstandsmessung unter extremen Temperaturbedingungen adaptiert und mit Simulationen und Experimenten evaluiert. Mit dem Experimentaufbau wurde die Messgenauigkeit von 9,8 mm auf 1,8 mm für Messungen der Auftragshöhe von heißem Asphalt verbessert. Auf Basis der Messergebnisse in dem Experiment wurde die Bestimmung der Schalllaufwege in dem vorgestellten Messverfahren durch die inhomogene Schallgeschwindigkeitsverteilung verbessert und mit Simulationen evaluiert.

8.2 Diskussion und Ausblick

8.2.1 Selbstkalibrierung basierend auf dem Transmissionsignal

Ein Vorteil der entwickelten Selbstkalibrierung beruhend auf dem Transmissionsignal ist, dass kein Kalibrierungsobjekt benötigt ist. Dieser Vorteil ist wichtig für die Massenproduktion bildgebender Ultraschallsysteme, da die Anfertigung eines Kalibrierungsobjekts meist mit einem hohen technischen Aufwand verbunden ist. Da keine genaue manuelle Platzierung eines Kalibrierungsobjekts gefordert ist, kann die Selbstkalibrierung häufiger durchgeführt werden, zum Beispiel eine Leermessung vor der Aufnahme der Patientinnen mit dem 3D-USCT-II-Gerät, um die optimale Abbildungsqualität zu erreichen.

Allerdings ist die Genauigkeit der vorgestellten Selbstkalibrierung basierend auf dem Transmissionsignal wesentlich durch den begrenzten Öffnungswinkel der Ultraschallwandler limitiert. Bei der halbellipsoiden Wandleranordnung des 3D-USCT-II-Geräts ist der Winkel der Ultraschallwandler in den unteren Ringen zu den am nächsten gegenüber liegenden Wandlern größer als der Öffnungswinkel. Die durch das niedrige SNR des Signals verursachten Detektionsfehler in der Schalllaufzeit begrenzen damit die Genauigkeit der Kalibrierung.

Um die Selbstkalibrierung dieser Wandler zu verbessern, können die Reflexionen der Ultraschallwelle an einem Kalibrierungsobjekt benutzt werden. Im Idealfall sollte das Kalibrierungsobjekt einen Punktstreuer simulieren, um eine eindeutige Detektion der Reflexion zu ermöglichen. Es wird angenommen, dass die Ultraschallwelle von jedem Sender an dem Punktstreuer gleichmäßig in aller Richtungen reflektiert und von allen Empfängern mit einem senkrechten Einfall empfangen wird.

In der Laufzeitdetektion muss dann die Laufzeit des reflektierten Ultraschallpulses von dem transmittierten Signals getrennt werden. Mit der Vor-

kenntnis, dass das Transmissionssignal den kürzeren Weg von dem Sender zum Empfänger hat, kann die Laufzeitdetektion mit einem Suchfenster begrenzt werden.

Mit den detektierten Laufzeiten kann ein Gleichungssystem der Laufzeitgleichungen zwischen jedem Sender, dem Punktstreuer und jedem Empfänger aufgestellt und gelöst werden. Die Unbekannten sind die Wandlerpositionen, die genaue Position des Punktstreuers und andere Fehlerquellen in dem Ultraschallsystem. Es kann weiterhin der sequentielle Kalibrierungsprozess zur Trennung der Fehlerquellen benutzt werden.

Bei der Realisierung des Kalibrierungsobjektes sollte die mechanische Stabilität beachtet werden, damit sich das Objekt während des Messvorgangs nicht bewegt. Gleichzeitig sollte die Aufhängung wesentlich kleiner als das den Punktstreuer simulierenden Kalibrierungsobjekt sein, damit sie die Ultraschallwelle nur schwach reflektiert und die genaue Bestimmung der Laufzeiten nicht beeinflusst. Für hohe Frequenzen ergeben sich dabei unrealistische beziehungsweise sehr schwer zu realisierende Größen für Punktstreuer und Aufhängung im Submillimeter-Bereich. Insgesamt bringt diese Methode einen hohen mechanischen Aufwand mit sich.

Alternativ kann ein einfaches Kalibrierungsobjekt mit einer definierten Geometrie benutzt werden. Ein Beispiel ist die Stahlkugel in Abschnitt 6.1.7. Die Stahlkugel hat einem Durchmesser von 5 cm und wurde mit einer Genauigkeit von 50 μm angefertigt. Die Aufhängung der Stahlkugel ist eine Stange mit einem Durchmesser von 1,2 cm.

Es wird angenommen, dass die Reflexion an der Kugeloberfläche eine kürzere Laufzeit im Vergleich zur Reflexion an der Stange hat. Mit dieser Vorkenntnis sollte eine eindeutige Detektion der Reflexion an der Kugeloberfläche möglich sein.

Das zu lösende Gleichungssystem beinhaltet die Gleichungen für die Schalllaufzeiten zwischen dem Sender, den Reflexionspunkten auf der Kugeloberfläche und den Empfängern. In jeder Iteration beim Lösen des Glei-

chungssystemen werden die Wandlerpositionen und die Reflexionspunkten optimiert. Die Anzahl der Unbekannten O ist:

$$O = 3(M + N) + 3G_{SEK}. \quad (8.1)$$

Die Variable M ist die Anzahl der Sender, N die Anzahl der Empfänger und G_{SEK} ist die Anzahl der benutzten SEK.

Da der Durchmesser der Kugel genau bekannt ist, wird ein Reflexionspunkt $R_i = (x_{R_i}, y_{R_i}, z_{R_i})$ mit dem Radius r und den Koordinaten des Zentrums der Kugel (x_0, y_0, z_0) beschrieben durch

$$(x_{R_i} - x_0)^2 + (y_{R_i} - y_0)^2 + (z_{R_i} - z_0)^2 - r^2 = 0. \quad (8.2)$$

Damit kann die Anzahl der Unbekannten O auf $3(M + N) + 4$ reduziert werden. Mit dieser Reduzierung der Anzahl der Unbekannten hat die Methode vergleichbare Größe des Gleichungssystems in der Kalibrierung basierend auf dem Transmissionssignal. Allerdings müssen aufgrund der Abschattung des Schalls an der Stahlkugel die SEK entsprechend ausgewählt werden, damit das Gleichungssystem lösbar ist.

8.2.2 Trennung der Fehlerquellen

Die Selbstkalibrierung benutzt einen sequentiellen Prozess, um einzelne Fehlerquellen zu kalibrieren. Dabei wird die Vorkenntnis über die Größenordnung der Fehlerquelle benutzt, um die Reihenfolge der Kalibrierungsschritte zu sortieren. Es wird mit dem größten Fehler angefangen und andere kleinere Fehlerquelle vernachlässigt.

Dies ermöglicht zwar die Reduzierung der Anzahl von Unbekannten in den Gleichungssystemen, beschränkt aber die Anwendbarkeit auf Systeme, bei denen zwei oder mehrere Fehlerquellen gleiche Größenordnung haben. Zum Beispiel kann ein Temperaturoffset von 3 °C bei einer Wassertempera-

tur von 25 °C einen Abstandsfehler von 1,5 mm verursachen. Die erwartete Verzögerung von ca. 1,4 μs ergibt einen Abstandsfehler von 2,1 mm.

In einem solchen Fall kann die Trennung wieder erfolgen, wenn zusätzliche Systeminformation verfügbar gemacht werden kann. Zum Beispiel wurde in der Untersuchung mit Experimentdaten des 3D-USCT-II-Geräts der Offset in den an den TAS gemessenen Temperaturen mit der Temperatur an den kalibrierten Sensoren korrigiert. Somit hat der Temperaturfehler eine kleinere Größenordnung als die Systemverzögerung und kann nach der Verzögerung kalibriert werden.

8.2.3 Minimierung der Kalibrierungsfehler

Die Kalibrierungsgenauigkeit des 3D-USCT-II-Geräts ist wesentlich durch den Öffnungswinkel der Ultraschallwandler von ca. 30° und den ermittelten Laufzeitfehler von 0,2 μs begrenzt. Aktuell wird am IPE eine neue Generation der Ultraschallwandler mit größerem Öffnungswinkel entwickelt [93], [94]. Das Ziel der Entwicklung ist ein Öffnungswinkel von 60°, der eine komplette Kalibrierung des 3D-USCT-II-Geräts ohne die Beschränkung der Genauigkeit der Ultraschallwandler im unteren Bereich des Systems ermöglichen würde.

8.2.4 Optimierung der Wandleranordnung

Die Beschreibung des Ultraschallwandlers mit einem Polygon bietet zwar eine einfache Berechnung der ROI-Abdeckung und Überlappungen von Ultraschallwandlern an, vernachlässigt aber die inhomogene Schalldruckverteilung in diesem Bereich. Ebenfalls wurde die Abstrahl- und Empfangscharakteristik der Ultraschallwandler nicht betrachtet.

Generell konvergiert das Optimierungsverfahren mit dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus in wenigen Iterationen zu einer verbesserten Wandleranordnung. Allerdings steigt der Rechenaufwand mit der Anzahl der Ultraschallwandler, besonders in den booleschen Operationen auf Polygonen,

um die ROI-Abdeckung und die Überlappung der Ultraschallwandler zu berechnen. Eine effizientere Implementierung dieser Operationen auf einem Grafikprozessor würde die Rechenzeit reduzieren.

Während der Optimierung wird die Abbildungsqualität mit der FWHM der simulierten Punktstreuer vorhergesagt. Damit wird die Abschattung des Schalls an größeren Objekten nicht berücksichtigt. Um eine bessere Vorhersage der Abbildungsqualität zu ermöglichen, können statt dem Punktstreuer einfache Objekte simuliert werden.

Dies würde zwar einen größeren Rechenaufwand bei der Simulation und gegebenenfalls auch komplexere Simulationsmethoden voraussetzen, könnte aber für gewisse Anwendungen von Vorteil sein. Die Abbildungsqualität könnte zum Beispiel mit der Vollständigkeit der rekonstruierten Objektkante und die Varianz der Bildintensität entlang der Objektkante beurteilt werden.

8.2.5 Luftultraschall-Array unter extremer Temperaturbedingung

Die erste Untersuchung mit einem Experimentaufbau zeigt eine Verbesserung der Messgenauigkeit mit der angepassten Selbstkalibrierung gegenüber dem Stand der Technik von 9,8 mm auf 1,8 mm. Die Verbesserung des Verfahrens durch Bestimmung der kürzesten Wege in Abschnitt 7.1.4 soll die Messgenauigkeit des Ultraschallarrays unter extremer Temperaturbedingung weiter erhöhen.

In einem weiteren Schritt soll das verbesserte Verfahren mit weiteren Experimenten evaluiert werden. Es soll auch die Implementierbarkeit des Verfahrens auf einem gängigen Mikrocontroller in industriellen Sensoren untersucht werden. Eine Möglichkeit das Verfahren zu vereinfachen ist die Berechnung der Schallgeschwindigkeit entlang des Schallweges durch das inhomogene Medium statt mit einer Strahlverfolgung mit der Auswertung eine Polynomfunktion an diskreten Positionen zu ersetzen.

Eigene und in Zusammenarbeit entstandene Veröffentlichungen

[1] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Rüter, “Newton’s method based self calibration for a 3D ultrasound tomography system”, in *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2015.

[2] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Rüter. “Automatic Optimization of Sensor Positioning for an Airborne Ultrasound Imaging System”. in *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2016.

[3] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Rüter, “Optimierung der Sensoranordnung für ein bildgebendes Luftultraschallsystem”, in *VDI-Kongress Automation 2017*, 2017.

[4] T. Hopp, W. You, M. Zapf, W. Y. Tan, H. Gemmeke und N. V. Rüter, *Automated breast segmentation in ultrasound computer tomography SAFT images*, 2017.

[5] W. Y. Tan, G. Erbacher, T. Steiner und N. V. Rüter, “Automatic Segmentation and Object Classification with Neural Network for an Airborne Ultrasound Imaging System”, in *2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2017.

[6] W. Y. Tan, G. Erbacher, T. Steiner und N. V. Rüter, “Object Classification and Localization with an Airborne Ultrasound Imaging System”, in

Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2018.

[7] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Ruiter, “Upper Bound of Accuracy for Self-Calibration of a 3D Ultrasound Tomography System without Ground Truth”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2018.

[8] H. Gemmeke, N. V. Ruiter, T. Hopp, M. Zapf, I. Peric, L. Berger, W. Y. Tan, R. Blanco und R. Leys, “The New Generation of the KIT 3D USCT”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2018.

Literatur

- [1] Pepperl+Fuchs GmbH, *The Pulse of Automation - Ultraschallsensoren*. 2017.
- [2] K. Audenaert, H. Peremans, Y. Kawahara und J. V. Campenhout, “Accurate ranging of multiple objects using ultrasonic sensors”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992.
- [3] J. S. Abramowicz, “Benefits and risks of ultrasound in pregnancy”, *Seminars in Perinatology*, Jg. 37, Nr. 5, S. 295–300, 2013, Fetal Imaging.
- [4] N. V. Ruiters, M. Zapf, T. Hopp, R. Dapp, E. Kretzek, M. Birk, B. Kohout und H. Gemmeke, “3D ultrasound computer tomography of the breast: A new era?”, *European Journal of Radiology*, Jg. 81, S133–S134, 2012.
- [5] O. Dössel und T. M. Buzug, *Biomedizinische Technik - Medizinische Bildgebung*, Ser. 7. De Gruyter, Mai 2014.
- [6] M. O. Culjat, D. Goldenberg, P. Tewari und R. S. Singh, “A Review of Tissue Substitutes for Ultrasound Imaging”, *Ultrasound in medicine and biology*, Jg. 36, S. 861–873, 1. Juni 2010.
- [7] L. Jakevicius, A. Demcenko und R. Mardosaite, “Ultrasound attenuation dependence on air compression or expansion processes”, *Ultragarsas*, Jg. 65, Nr. 1, 2010.
- [8] G. Wiora. (2005). Prinzip der Sonar- oder Radarabstandsmessung, Adresse: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonar%5C_Principle%5C_DE.svg.

- [9] W. Marczak, “Water as a standard in the measurements of speed of sound in liquids”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Jg. 102(5), S. 2776–2779, 1997.
- [10] P. Kruizinga, F. Mastik, N. de Jong, A. F. W. van der Steen und G. van Soest, “Plane-wave ultrasound beamforming using a nonuniform fast fourier transform”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Jg. 59, Nr. 12, 2012.
- [11] D. W. Drickey. (2006). Medical Ultrasound linear array Probe/scan head/transducer., Adresse:
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UltrasoundProbe2006a.jpg>.
- [12] Milliways. (2004). Sonographie der Gallenblase mit Gallensteinen, Adresse: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonografie%5C_Gallenstein.png.
- [13] M. Li und G. Hayward, “Ultrasound Nondestructive Evaluation (NDE) Imaging with Transducer Arrays and Adaptive Processing”, *Sensors*, Jg. 12, Nr. 1, S. 42–54, 2012.
- [14] F. Simonetti und L. Huang, “Synthetic aperture diffraction tomography for three-dimensional imaging”, *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Jg. 465, Nr. 2109, S. 2877–2895, 2009.
- [15] O. Roy, S. Schmidt, C. Li, V. Allada, E. West, D. Kunz und N. Duric, “Breast imaging using ultrasound tomography: From clinical requirements to system design”, in *2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2013, S. 1174–1177.
- [16] T. Stepinski, “An Implementation of Synthetic Aperture Focusing Technique in Frequency Domain”, *IEEE Transactions on*

- Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Jg. 54, Nr. 7, S. 1399–1408, 2007.
- [17] A. C. Knoll, “Ultrasonic holography techniques for localizing and imaging solid objects”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Jg. 7, Nr. 4, S. 449–467, 1991.
- [18] P. Kleinschmidt und V. Magori, “Ultrasonic Robotic-Sensors for Exact Short Range Distance Measurement and Object Identification”, in *IEEE 1985 Ultrasonics Symposium*, 1985, S. 457–462.
- [19] L. Capineri, A. Bulletti, M. Calzolari und P. Giannelli, “An Airborne Ultrasonic Imaging System Based on 16 Elements: 150 kHz Piezopolymer Transducer Arrays—Preliminary Simulated and Experimental Results for Cylindrical Targets Detection”, *Sensing and Imaging*, Jg. 17, Nr. 1, S. 1–23, 2016.
- [20] K. J. Opielski und T. G., “Recognition of external object features in gas media using ultrasound transmission tomography”, *Ultrasonics*, Jg. 44, Supplement, e1069–e1076, 2006, Proceedings of Ultrasonics International (UI’05) and World Congress on Ultrasonics (WCU).
- [21] R. M. Lewitt, “Reconstruction algorithms: Transform methods”, *Proceedings of the IEEE*, Jg. 71, Nr. 3, S. 390–408, 1983.
- [22] S. J. Norton und M. Linzer, “Ultrasonic Reflectivity Imaging in Three Dimensions: Reconstruction with Spherical Transducer Arrays”, *Ultrasonic Imaging*, Jg. 1, Nr. 3, S. 210–231, 3 1. Juli 1979.
- [23] N. V. Rüter, R. Dapp, M. Zapf und H. Gemmeke, “A new method for grating lobe reduction for 3D synthetic aperture imaging with ultrasound computer tomography”, in *2010 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2010, S. 2372–2375.

- [24] S. W. Smith, *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes, 2013.
- [25] G. F. Schwarzenberg, “Untersuchung der Abbildungseigenschaften eines 3D-Ultraschall-Computertomographen zur Berechnung der 3D-Abbildungsfunktion und Herleitung einer optimierten Sensorgeometrie”, Diss., Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), 2008.
- [26] I. Bronstein und K. Semendjajew, *Taschenbuch der Mathematik*, 5. Aufl., G. Musiol und H. Mühlig, Hrsg. Verlag Harri Deutsch, 2001.
- [27] C. G. Broyden, “A Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations”, *Mathematics of Computation*, Jg. 19, Nr. 92, S. 577–593, 1965.
- [28] J. Gondzio, “Interior point methods 25 years later”, *European Journal of Operational Research*, 2012.
- [29] R. Brent, “Some Efficient Algorithmus for Solving of Nonlinear Equations”, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Jg. 10, Nr. 2, S. 327–344, 1973.
- [30] J. Nocedal und S. J. Wright, *Numerical Optimization*, 2. Aufl., T. V. Mikosch, S. I. Resnick und S. M. Robinson, Hrsg. Springer Science+Business Media, 2006.
- [31] E. H. Moore, “On the reciprocal of the general algebraic matrix”, *Bulletin of American Mathematical Society*, Nr. 26, S. 394–395, 1920.
- [32] R. Penrose, “A genegeneral inverse of matrices”, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Nr. 51, S. 406–413, 1955.
- [33] G. H. Golub und C. F. V. Loan, *Matrix computations*, 3. Aufl. The John Hopkins University Press, 1996.

-
- [34] T. H. Robey und D. L. Sulsky, “Row Ordering for a Sparse QR Decomposition”, *SIAM J. Matrix Anal. Appl.*, Jg. 15, Nr. 4, S. 1208–1225, 1994.
- [35] R. MacAusland, *The Moore-Penrose Inverse and Least Squares*, [Online; zugegriffen am 11-April-2016], 2014.
- [36] K. Levenberg, “A method for the solution of certain non-linear problems in least squares”, *Quarterly Journal of Applied Mathematics*, Jg. II, Nr. 2, S. 164–168, 1944.
- [37] D. W. Marquardt, “An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters”, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Jg. 11, Nr. 2, S. 431–441, 1963.
- [38] Moré, J.J. und D. Sorensen, “Computing a Trust Region Step”, *SIAM Journal on Optimization*, Jg. 3, S. 553–572, 1983.
- [39] A. Conn, N. Gould und P. Toint, *Trust Region Methods*, Ser. MPS-SIAM Series on Optimization. Society for Industrial und Applied Mathematics, 2000.
- [40] Z. Szabó und M. Kovács, “On interior-point methods and simplex method in linear programming”, *An. St. Univ. Ovidius Constanta*, Jg. 11, Nr. 2, S. 155–162, 2003.
- [41] J. Francisco, N. Krejić und J. Martinez, “An interior-point method for solving box-constrained underdetermined nonlinear systems”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Jg. 177, Nr. 1, S. 67–88, 2005.
- [42] Y. Nesterov und A. Nemirovskii, *Interior-Point Polynomial Algorithms in Convex Programming*. Society for Industrial und Applied Mathematics, 1994.
- [43] G. Frobenius, “Zur Theorie der linearen Gleichungen”, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Jg. 129, S. 175–180, 1905.

- [44] S. M. Stigler, “Gauss and the Invention of Least Squares”, *Ann. Statist.*, Jg. 9, Nr. 3, S. 465–474, 1981.
- [45] H. R. Schwarz und N. Köckler, *Numerische Mathematik*, Ser. Lehrbuch Mathematik. Teubner, 2004.
- [46] M. Abell, J. Braselton und J. Rafter, *Statistics with Mathematica*, Ser. Statistics with Mathematica®. Academic Press, 1999.
- [47] A. Tikhonov, “On the stability of the functional optimization problem”, *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Jg. 6, Nr. 4, S. 28–33, 1966.
- [48] D. Calvetti, S. Morigi, L. Reichel und F. Sgallari, “Tikhonov regularization and the L-curve for large discrete ill-posed problems”, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Jg. 123, Nr. 12, S. 423–446, 2000, Numerical Analysis 2000. Vol. III: Linear Algebra.
- [49] A. Y. Ng, “Feature Selection, L1 vs. L2 Regularization, and Rotational Invariance”, in *Proceedings of the Twenty-first International Conference on Machine Learning*, Ser. ICML '04, Banff, Alberta, Canada: ACM, 2004.
- [50] MOBA Mobile Automation AG. (2017). Big Sonic Ski, Adresse: <http://moba.de/maschinen-applikationen/asphaltfertiger/big-sonic-ski/>.
- [51] A. Filipík, “Calibration of An Ultrasonic Transmissive Computed Tomography System”, Diss., BRNO University of Technology, 2009.
- [52] O. Roy, I. Jovanović, N. Durić, L. Poulo und M. Vetterli, “Robust array calibration using time delays with application to ultrasound tomography”, in *Proc. SPIE*, Bd. 7968, 2011, S. 796 806–796 811.

-
- [53] M. P. Liva, “Time Domain Image Reconstruction Methods for Transmission Ultrasound Computed Tomography”, Diss., Universidad Complutense De Madrid, Facultad De Ciencias Físicas, Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, 2017.
- [54] L. Trefethen und D. Bau, *Numerical Linear Algebra*. Society for Industrial und Applied Mathematics (SIAM, 3600 Market Street, Floor 6, Philadelphia, PA 19104), 1997.
- [55] R. Parhizkar, A. Karbasi und M. Vetterli, “Calibration in circular ultrasound tomography devices”, in *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2011, S. 549–552.
- [56] R. Parhizkar, A. Karbasi, S. Oh und M. Vetterli, “Calibration Using Matrix Completion With Application to Ultrasound Tomography”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Jg. 61, Nr. 20, S. 4923–4933, 2013.
- [57] J. Camacho, L. Medina, J. Cruza, J. Moreno und C. Fritch, “Multimodal Ultrasonic Imaging for Breast Cancer Detection”, *Archives of Acoustics*, Jg. 37, Nr. 3, 2013.
- [58] H. Söhngen, “Zur Theorie der endlichen Hilbert-Transformation”, *Mathematische Zeitschrift*, Jg. 60, Nr. 1, S. 31–51,
- [59] M. Sabri und W. Steenaart, “Discrete Hilbert transform filtering”, in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Bd. 1, Apr. 1976, S. 116–119.
- [60] B. P. Bogert, M. J. Healy und J. W. Tukey, “The quefrency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum, and saphe cracking”, *Time Series Analysis*, S. 209–243, 1963.

- [61] K. Falińska, J. Litniewski und J. Tasinkiewicz, “Assessment of Cortical Bone Thickness Using Cepstrum Analysis. Simulation Study”, *Hydroacoustics*, Jg. 17, S. 47–56, 2014.
- [62] Y. Ito, Y. Kawamura, K. Muzutani und S. Kuraoka, “Cepstrum Analysis Applied to Ultrasonic Reflection Wave Detection Wave Method to Investigate the Depth and the Damage of Pile”, *SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006.
- [63] P. Seibt, *Algorithmic Information Theory: Mathematics of Digital Information Processing*, Ser. Signals and Communication Technology. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [64] D. T. Lee und B. J. Schachter, “Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation”, *International Journal of Computer & Information Sciences*, Jg. 9, Nr. 3, S. 219–242, 1980.
- [65] D. Field, “A generic Delaunay triangulation algorithm for finite element meshes”, *Advances in Engineering Software and Workstations*, Jg. 13, Nr. 5, S. 263–272, 1991.
- [66] J. Hoschek und D. Lasser, *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*, Ser. Teubner-Ingenieurmathematik. Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [67] B. K. P. Horn, “Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions”, *Journal of the Optical Society of America A*, Jg. 4, Nr. 4, S. 629–642, 1987.
- [68] J. H. Conway und D. A. Smith, *On quaternions and octonions: Their geometry, arithmetic, and symmetry*, 1. Aufl. A K Peters/CRC Press, 2003.
- [69] N. Neuß. (2011). Einführung in die Numerische Mathematik für Studierende der Fachrichtungen Informatik und Ingenieurwesen, Institut für Angewandte und Numerische Mathematik, Karlsruher Institut für Technologie, Adresse:

- <http://www.math.kit.edu/ianm3/lehre/numainfing2011s/media/skriptnumerikinfig.pdf>.
- [70] M. A. Guvensan und A. G. Yavuz, “On coverage issues in directional sensor networks: A survey”, *Ad Hoc Networks*, Jg. 9, Nr. 7, S. 1238–1255, 2011.
- [71] C. K. Liang, C. H. Tsai und T. H. Chu, “Coverage Enhancing Algorithms in Directional Sensor Networks with Rotatable Sensors”, in *IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference (APSCC)*, 2011, S. 377–383.
- [72] H. Ma, X. Zhang und A. Ming, “A Coverage-Enhancing Method for 3D Directional Sensor Networks”, in *IEEE INFOCOM 2009*, 2009, S. 2791–2795.
- [73] H. Chen, H. Wu und N. F. Tzeng, “Grid-based approach for working node selection in wireless sensor networks”, in *2004 IEEE International Conference on Communications*, Bd. 6, 2004, 3673–3678 Vol.6.
- [74] D. Tao, H. Ma und L. Liu, “Coverage-Enhancing Algorithm for Directional Sensor Networks”, in *Mobile Ad-hoc and Sensor Networks: Second International Conference*, J. Cao, I. Stojmenovic, X. Jia und S. K. Das, Hrsg. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 256–267.
- [75] C. Hoene und J. Willmann, “Four-way TOA and software-based trilateration of IEEE 802.11 devices”, in *IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, IEEE, 2008, S. 1–6.
- [76] B. Parkinson und J. Spilker, *Global Positioning System: Theory and Applications*, Ser. Progress in astronautics and aeronautics Bd. 1. American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1996.
- [77] R. B. Langley, “Dilution of Precision”, *GPS World*, 1999.

- [78] P. Suetens, *Fundamentals of Medical Imaging*, Ser. Cambridge medicine. Cambridge University Press, 2009.
- [79] J. O' Rourke, *Computational Geometry in C*, Ser. Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science. Cambridge University Press, 1998.
- [80] N. V. Ruiter, M. Zapf, T. Hopp und H. Gemmeke, *Experimental evaluation of noise generated by grating lobes for a sparse 3D ultrasound computer tomography system*, 2013.
- [81] J. Yongbin, W. Liguang, B. Lin und C. Jianhong, "Boolean Operations on Polygonal Meshes Using OBB Trees", in *2009 International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, Bd. 1, 2009, S. 619–622.
- [82] T. Laakso, V. Välimäki, M. Karjalainen und U. Laine, "Splitting the Unit Delay - Tools for fractional delay filter design", *IEEE Signal Processing Magazine*, S. 30–60, 1996.
- [83] R. Dapp, "Abbildungsmethoden für die Brust mit einem 3D-Ultraschall-Computertomographen", Diss., Karlsruhe Institut für Technologie, 2013.
- [84] G. S. K. Wong und S. Zhu, "Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature, and pressure", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 97, Nr. 3, S. 1732–1736, 1995.
- [85] N. V. Ruiter, M. Zapf, T. Hopp, R. Dapp und H. Gemmeke, *Phantom image results of an optimized full 3D USCT*, 2012.
- [86] A. Treuenfels, "An Efficient Flood Visit Algorithm", *C/C++ Users J.*, Jg. 12, Nr. 8, S. 39–62, 1994.
- [87] H. Schlichting, E. Krause, K. Gersten und H. Oertel, *Grenzschicht-Theorie*. Springer, 2006.

-
- [88] W. Polifke und J. Kopitz, *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*, Ser. Ing - Maschinenbau. Pearson Studium, 2009.
- [89] G. Erbacher, “Automatische Segmentierung und Objektklassifikation mit einem Neuronalen Netz für ein bildgebendes 2D-Luftultraschallsystem”, Magisterarb., Fakultät für Informationstechnik, Hochschule Mannheim, 11. Sep. 2017.
- [90] P. Soille, *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [91] C. Bishop, *Neural Networks for Pattern Recognition*, Ser. Advanced Texts in Econometrics. Clarendon Press, 1995.
- [92] F. Burden und D. Winkler, “Bayesian Regularization of Neural Networks”, in *Artificial Neural Networks: Methods and Applications*, D. J. Livingstone, Hrsg. Humana Press, 2009, S. 23–42.
- [93] M. Zapf, B. Leyrer, P. Pfistner, C. Liberman, K. van Dongen, N. de Jong, H. Gemmeke und N. Ruiters, “Dice-and-fill single element octagon transducers for next generation 3D USCT”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, 2018.
- [94] M. Zapf, K. Hohlfeld, P. Pfistner, S. Gebhardt, C. Liberman, A. Michaelis, H. Gemmeke und N. Ruiters, “Piezofibre composite transducers for next generation 3D USCT”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, 2018.
- [95] G. Brown und D. Reilly, “Proceedings of Ultrasonics International 1995 Ultrasonic tomographic imaging of solid objects in air using an array of fan-shaped-beam electrostatic transducers”, *Ultrasonics*, Jg. 34, Nr. 2, S. 111–115, 1996.

- [96] S. S. Dhillon und K. Chakrabarty, “Sensor placement for effective coverage and surveillance in distributed sensor networks”, in *Wireless Communications and Networking*, Bd. 3, 2003, 1609–1614 vol.3.
- [97] R. Driggers, *Encyclopedia of Optical Engineering*, Ser. Dekker Encyclopedias Series. Marcel Dekker, 2003.
- [98] D. Ensminger, *Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Applications, Second Edition, Revised and Expanded*, Ser. Dekker Mechanical Engineering. Taylor & Francis, 1988.
- [99] S. Holm und C. I. C. Nilsen, “Robust ultrasonic indoor positioning using transmitter arrays”, in *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2010, S. 1–5.
- [100] R. Kemerait und D. Childers, “Signal detection and extraction by cepstrum techniques”, *IEEE Transactions on Information Theory*, Jg. 18, Nr. 6, S. 745–759, 1972.
- [101] W. Kester und i. Analog Devices, *Mixed-signal and DSP Design Techniques*, Ser. Analog Devices series. Newnes, 2003.
- [102] C. Li, L. Huang, N. Duric, H. Zhang und C. Rowe, “An improved automatic time-of-flight picker for medical ultrasound tomography”, *Ultrasonics*, Jg. 49, Nr. 1, S. 61–72, 2009.
- [103] A. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*. Elsevier Science, 2001.
- [104] M. A. Noor und M. Waseem, “Some iterative methods for solving a system of nonlinear equations”, *Computers & Mathematics with Applications*, Jg. 57, Nr. 1, S. 101–106, 2009.
- [105] E. G. Sarabia, J. R. Llata, S. Robla, C. Torre-Ferrero und J. P. Oria, “Accurate Estimation of Airborne Ultrasonic Time-of-Flight for Overlapping Echoes”, *Sensors*, Jg. 13, S. 15 465–15 488, 2013.

-
- [106] R. Shaback und H. Wendland, *Numerische Mathematik*, 5. Aufl. Springer, 2005.
- [107] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Ruiters, “Automatic Optimization of Sensor Positioning for an Airborne Ultrasound Imaging System”, in *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2016.
- [108] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Ruiters, “Newton’s method based self calibration for a 3D ultrasound tomography system”, in *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2015.
- [109] B. D. V. Veen und J. C. Rogers, “Measurement of Acoustic Reflection Coefficients Using the Power Cepstrum”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Jg. IM-35, Nr. 1, S. 24–30, 1986.
- [110] D. F. Watson und G. M. Philip, “Triangle based interpolation”, *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, Jg. 16, Nr. 8, S. 779–795, 1984.
- [111] C. Wittenbeck, “Konzeption, Fertigung und Evaluierung von brustähnlichen Phantomen für die 3D-Ultraschalltomographie”, Hochschule Pforzheim, Karlsruher Institut für Technologie, 2017.
- [112] M. Moebus und A. M. Zoubir, “Three-Dimensional Ultrasound Imaging in Air using a 2D Array on a Fixed Platform”, in *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*. 2007, Bd. 2.
- [113] M. Moebus und A. M. Zoubir, “Three-Dimensional Ultrasound Imaging in Air for Parking and Pedestrian Protection”, in *In-Vehicle Corpus and Signal Processing for Driver Behavior*. Springer US, 2009, S. 137–147.
- [114] J. Wu, *Advances in K-means Clustering: A Data Mining Thinking*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2012.

- [115] D. H. Ballard, “Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms”, in, M. A. Fischler und O. Firschein, Hrsg., San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987, Kap. Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, S. 714–725.
- [116] W. Y. Tan, G. Erbacher, T. Steiner und N. V. Ruiter, “Automatic Segmentation and Object Classification with Neural Network for an Airborne Ultrasound Imaging System”, in *2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2017.
- [117] N. V. Ruiter, E. Kretzek, M. Zapf, T. Hopp und H. Gemmeke, *Time of flight interpolated synthetic aperture focusing technique*, 2017.
- [118] N. V. Ruiter, R. Dapp, M. Zapf und H. Gemmeke, “Evaluation of 3D point spread function of a semi-ellipsoidal ultrasound computer tomography system”, in *2011 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2011, S. 242–245.
- [119] F. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, Ser. Fundamentals of Heat and Mass Transfer Bd. 1. John Wiley, 2007.
- [120] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Ruiter, “Optimierung der Sensoranordnung für ein bildgebendes Luftultraschallsystem”, in *VDI-Kongress Automation 2017*, 2017.
- [121] T. Hopp, W. You, M. Zapf, W. Y. Tan, H. Gemmeke und N. V. Ruiter, *Automated breast segmentation in ultrasound computer tomography SAFT images*, 2017.
- [122] W. Y. Tan, G. Erbacher, T. Steiner und N. V. Ruiter, “Object Classification and Localization with an Airborne Ultrasound Imaging System”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2018.

- [123] W. Y. Tan, T. Steiner und N. V. Ruiter, “Upper Bound of Accuracy for Self-Calibration of a 3D Ultrasound Tomography System without Ground Truth”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2018.
- [124] H. Gemmeke, N. V. Ruiter, T. Hopp, M. Zapf, I. Peric, L. Berger, W. Y. Tan, R. Blanco und R. Leys, “The New Generation of the KIT 3D USCT”, in *Proceedings of the International Workshop on Medical Ultrasound Tomography*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2018.