

Fakultät VI

Institut für Geodäsie und
Geoinformationstechnik

Fachgebiet Geodäsie und
Ausgleichsrechnung



Diplomarbeit

**„Einsatz von Ultraschall bei hydrostatischen
Messverfahren“**

Petra Helmholz

September 2003

Betreuer:

Herr Prof. Lothar Gründig, Technische Universität Berlin

Herr Prof. Willfried Schwarz, Bauhaus- Universität Weimar

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Das hydrostatische Nivellement	7
2.1	Grundprinzip	7
2.2	Methoden der Abtastung einer Wasseroberfläche	8
2.2.1	Abtastung der Wasseroberfläche mit mechanischen Spitzen	9
2.2.2	Optische Abstandsmessungen	11
2.2.3	Elektrische Abstandsmessungen	15
2.2.4	Akustische Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche	18
2.2.5	Abtastung mittels hydrostatischen Drucks	20
2.3	Fazit	20
3	Grundlagen des Ultraschalls	23
3.1	Beschreibende Größen des Ultraschallfeldes	23
3.1.1	Schallfeldgrößen	23
3.1.2	Energiegrößen des Schallfeldes	25
3.2	Eigenschaften des Ultraschalls	26
3.2.1	Räumliche Ausbreitung	26
3.2.2	Schwingungsarten	28
3.2.3	Reflexion und Brechung	30
3.2.4	Dämpfung und Streuung	33
3.2.5	Ultraschallanwendung unter Wasser	36
3.3	Erzeugung von Ultraschallwellen	37
3.3.1	Arten von Sensorköpfen	42
4	Das hydrostatische Messsystem	45
4.1	Überblick über die Instrumente und Geräte	46
4.1.1	Eigenschaften des Prüfkopfes H10 KB3	47
4.1.2	Eigenschaften und Funktionen des USM25	49
4.1.3	Der Messstift	51
4.2	Theoretische Genauigkeitsabschätzungen	52
5	Experimentelle Untersuchungen	55
5.1	Untersuchung der Strahlenkeule	56
5.2	Untersuchung der Genauigkeit (Kalibrierung)	62

5.3	Vorlaufzeit	69
5.4	Temperaturabhängigkeit des Sensors	73
5.5	Sprungeffekte	79
6	Zusammenfassung	87
A	Verwendete Geräte	97
A.1	Sensorkopf H10 KB3	98
A.2	Inkrementaltaster der Firma Heidenhain	99
A.3	Agilent 34970A	105
B	Abbildungen und Skizzen	107
B.1	Aussehen der Strahlenkeule	107
B.2	Genauigkeitsbetrachtung	112
B.3	Temperaturabhängigkeit des Sensors	117

Kapitel 1

Einleitung

Das DESY (Deutsche Elektronen- Synchrotron) in Hamburg betreibt Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Hochenergiephysik. Die Hochenergiephysik beschäftigt sich unter anderem mit Fragen wie: Was ist Materie? Woraus besteht sie, wie ist sie entstanden? Was ist Vakuum? Was sind Raum und Zeit? Die wahrscheinlich kleinsten Bausteine der Materie sind Quarks und Leptonen. Doch schon die Frage, was eigentlich ihre Masse ausmacht und wodurch diese bestimmt ist, stellt uns vor Rätsel. Um der Lösung solcher Fragen näher zu kommen, wird in dem bereits vorhandenen Ringtunnel am Forschungszentrum CERN in Genf ein Beschleuniger für Atomkerne errichtet. Bis 2006 soll das LHC (Large Hadron Collider) fertig gestellt sein. Ergänzend zu diesem Projekt soll der lineare Kollisionsbeschleuniger für Elektronen und Positronen (TESLA) gebaut werden.

In internationaler Zusammenarbeit (38 Institute aus 10 Ländern) plant DESY die Forschungsanlage TESLA. TESLA ist ein 33 km langer supraleitender Kollisionsbeschleuniger (Linearcollider). Dabei steht TESLA für „TeV Energy Superconducting Linear Accelerator“ (supraleitender linearer Beschleuniger für Tera- Elektronenvolt- Energie). In Hamburg beginnt der Linearbeschleuniger für Elektronen im HERA- Ring und in Weserhorn (Kreis Pinneburg) befindet sich der Ausgangspunkt der Positronenbeschleunigung. Bei Ellershoop treffen Elektronen und Positronen zusammen. Der Tunnel des Linearbeschleunigers befindet sich 10- 30m unter der Erde, hat einen Innendurchmesser von 5m und verläuft entlang einer Äquipotentialfläche.

Die geforderte Genauigkeit der vertikalen Komponente des Linearbeschleunigers beträgt 0,2mm auf 600m. Erreicht werden soll die Genauigkeiten mit Hilfe eines hydrostatischen Messsystems mit freier Wasseroberfläche. Das geometrische und trigonometrische Nivellement erreichen nur unter größtem Aufwand die geforderten Genauigkeiten und sind gegenüber dem hydrostatischen Nivellement arbeitsintensiver.

Im zweiten Kapitel wird das Grundprinzip des hydrostatischen Nivellements kurz erklärt. Anschließend werden Möglichkeiten der Abtastung einer Flüssigkeitsoberfläche genannt und erklärt. Dabei wird auch auf Genauigkeiten von Messinstrumenten verschiedener Firmen eingegangen. Abschließend sollen die Methoden in Hinsicht auf einen

möglichen Einsatz beim Linearbeschleuniger TESLA wertend gegenübergestellt werden.

Im dritten Kapitel werden physikalische und sonstige Grundlagen der Ultraschallmessung aufgearbeitet. Zunächst wird auf beschreibende Größen des Ultraschalls eingegangen und deren allgemeine Eigenschaften ausgearbeitet. Im Anschluss daran wird besonders auf die Erzeugung von Ultraschall eingegangen. Die Erzeugung des Ultraschallsignals erfolgt meist als „Black Box“. So werden viele Untersuchungen betreffs der Genauigkeit und der Eigenschaften von Ultraschall unternommen, ohne zu wissen, wie das Signal erzeugt wird oder erzeugt werden kann. Es wird zunächst auf sehr einfache Verfahren wie die Galton- Pfeife eingegangen, um später die „modernen“ Verfahren anschaulich zu erklären.

Im vierten Kapitel wird das zu untersuchende hydrostatische Messverfahren kurz beschrieben. Es werden Erläuterung zum verwendeten Prüfkopf und Ultraschallmessgerät gegeben, die Form und das Material einer Referenzstrecke werden diskutiert und theoretische Genauigkeitsabschätzungen vorgenommen.

Im letzten Kapitel werden die praktischen Untersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Stabilität des Ultraschallsystems dargestellt. Es wird geprüft, ob das Ultraschallsystem die oben genannten Genauigkeiten erreicht.

Eine abschließende Zusammenfassung soll die wichtigsten Erkenntnisse wiedergeben.

An dieser Stelle möchte ich darauf hinweisen, dass Kenntnisse über Grundbegriffe der Physik (z.B. Wellenlänge, Phase, stehende Welle und Interferenz) sowie Grundlagen der Statistik (wie T- Test, F- Test, lineare Regression) vorausgesetzt und nicht näher erläutert werden.

Der Diplomarbeit ist eine CD mit HTML- Präsentation und PDF- Dokument beigelegt.

Kapitel 2

Das hydrostatische Nivellement

2.1 Grundprinzip

Das hydrostatische Nivellement arbeitet nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren, bei denen die Flüssigkeitsoberfläche einer ruhenden homogenen Flüssigkeit infolge des Erdschwerefeldes eine Niveauebene beschreibt. Die Flüssigkeitsoberfläche verläuft annähernd entlang der Erdkrümmung, Höhenunterschiede beziehen sich auf Niveauflächen. Die Flüssigkeit kann als sichtbarer Horizont zur Bestimmung von Höhenunterschieden genutzt werden.

Es wird zwischen Kanalwaagen und Schlauchwaagen unterschieden. Kanalwaagen bestehen aus einem gefüllten starren Rohr. Es gibt geschlossene Kanalwaagen, bei denen das Rohr die Form eines Kreises oder Vierecks besitzt, und offene Kanalwaagen, bei denen mindestens zwei senkrechte offene Glasrohre auf einem längeren Verbindungsrohr angeordnet sind. Bei Schlauchwaagen wird das Verbindungsrohr der offenen Kanalwaage durch einen Schlauch ersetzt. Beide Glasrohre sind mit einer Skala versehen, so dass Höhenunterschiede durch Differenzbildung der Ablesungen direkt bestimmt werden können.

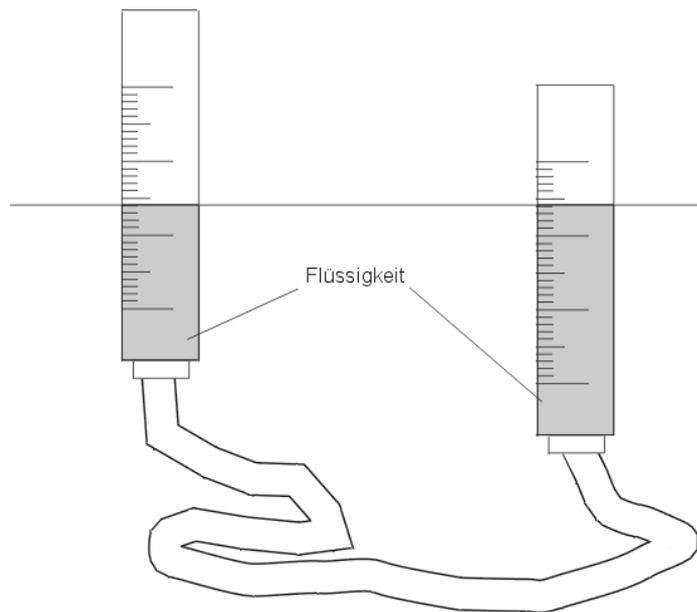


Abbildung 2.1: Schlauchwaage

Fehlereinflüsse auf die Schlauchwaage können dadurch verursacht werden, dass

- keine homogene Flüssigkeit vorliegt (Blasenbildung, unterschiedliche Dichteverhältnisse der Flüssigkeit auf Grund von Temperaturdifferenzen, ...)
- unterschiedliche Luftdrücke über den Flüssigkeiten herrschen
- unterschiedliche Schwerebeschleunigungen wirken
- Einfluss der Kapillarität in den Standgefäßen vorhanden ist
- Schwingungen der Flüssigkeiten auftreten können

Die Fehlereinflüsse werden an dieser Stelle nicht näher erläutert. Vielmehr beschäftigt sich dieses Kapitel mit den Möglichkeiten der Abtastung von Wasseroberflächen, sowie deren Bewertung.

2.2 Methoden der Abtastung einer Wasseroberfläche

Für die Bestimmung der Füllstandshöhe stehen zahlreiche Verfahren zur Verfügung. Zwischen folgenden Verfahren kann unterschieden werden:

- manuelle Ablesung an Skalen
- Abtastung durch Wiegen der Flüssigkeit
- berührende Abtastung mit mechanischen Spitzen bzw. durch Schwimmer
- Berührungslose Abtastung

Die manuelle Ablesung an Skalen bietet für die Ingenieurvermessung keine ausreichende Genauigkeit. Diese einfachste aller Methoden findet jedoch in der Praxis ein weites Anwendungsfeld, wenn nur geringe Genauigkeiten gefordert werden.

Die Abtastung durch Wiegen der Flüssigkeit ist im Vermessungswesen eher unüblich.

Im Weiteren werden die Methoden der Flüssigkeitsabtastung unterteilt in:

- Berührende Abtastung mit mechanischen Spitzen

- Optische Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche

- Elektrische Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche

- Akustische Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche

- Abtastung mittels hydrostatischen Drucks

2.2.1 Abtastung der Wasseroberfläche mit mechanischen Spitzen

Bei diesem Verfahren wird mit einer Messspitze die Flüssigkeitsoberfläche abgetastet. Zum Antrieb der Messspitze wird eine Mikrometereinheit benutzt. Im Allgemeinen tastet die Messspitze die Flüssigkeitsoberfläche von oben an, es gibt jedoch auch Systeme, wo dies von unten geschieht.

Bei den meisten Systemen wird die Messspitze direkt auf die Flüssigkeit gesetzt. Dabei „springt“ das Wasser aufgrund der Kapillarität der Flüssigkeit der Nadel entgegen. Als Beispiel für die Abtastung der Wasseroberfläche mit Mikrometereinteilung kann die Freiburger Schlauchwaage genannt werden. Diese Schlauchwaage kommt besonders bei Präzisionsnivellements zum Einsatz. Der Messbereich der Schlauchwaage beträgt 100mm, die Mikrometereinrichtung lässt Ablesungen von 0,01mm zu, wobei bis auf tausendstel Millimeter geschätzt werden kann.

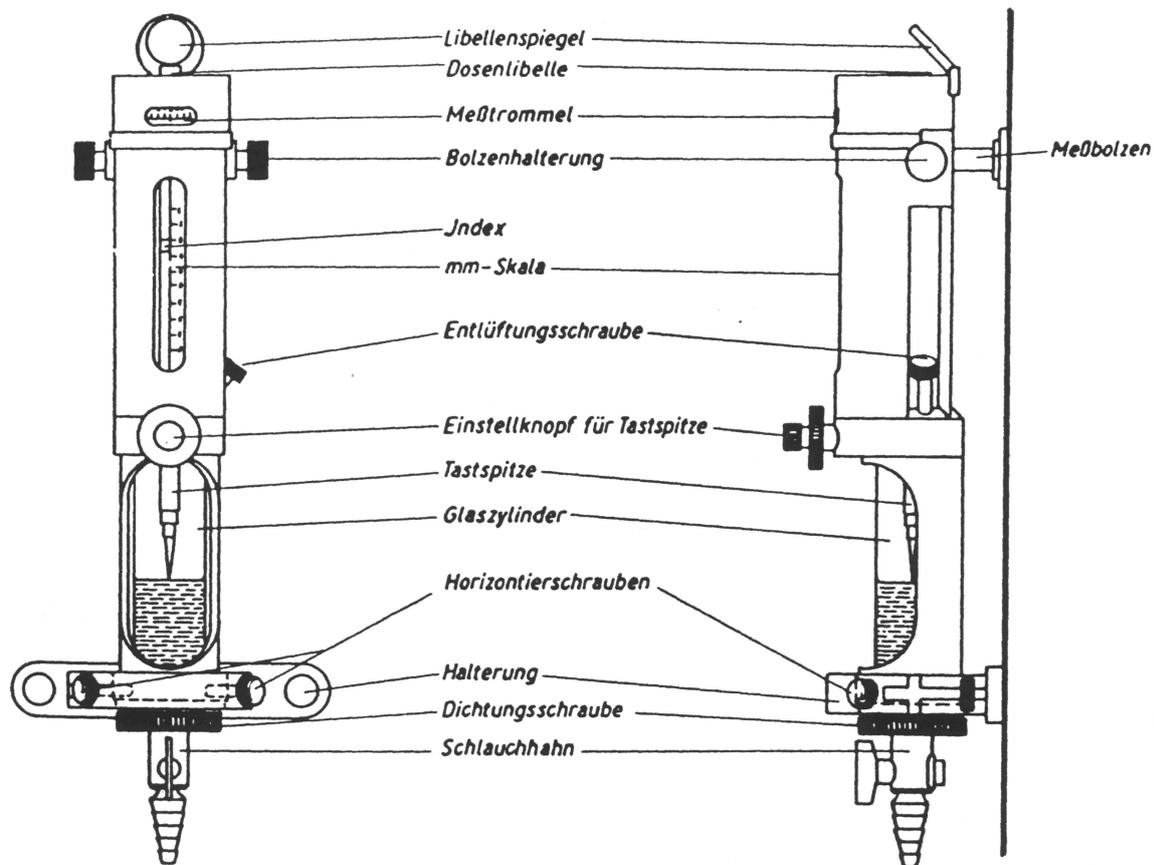


Abbildung 2.2: Freiberger Schlauchwaage (Quelle: [21])

Bei der hydrostatischen Messeinrichtung von Escher- Wyss wird die Messspitze auf eine auf Quecksilber schwimmende Schraube gesetzt. Die Ermittlung der Füllstandhöhe im Gefäß erfolgt durch elektrisches Abtasten der Schraube mittels einer Mikrometereinrichtung. Der elektrische Kontakt wird hergestellt, wenn die Messspitze die Schraube berührt.

Es gibt auch automatisierte Abtastungen der Flüssigkeitsoberfläche mit Messspitzen. Der Weg der Messspitze wird dabei automatisch erfasst. Ein Beispiel ist die Schlauchwaage mit Impulzzählung von Wedzony. Die vertikale Schraubspindel wird über einen Servomotor bewegt und gleichzeitig werden während der Laufzeit des Motors durch einen am Elektromotor angebrachten Unterbrecherkontakt elektrische Impulse erzeugt. Diese Impulse werden einem Zähler zugeführt. Die Messspindel stoppt automatisch bei Berührung der Wasseroberfläche. Aus der Impulzzahl wird die Strecke bis zur Wasseroberfläche ermittelt und der Höhenunterschied kann berechnet werden.

Firma	Produkt	Messbereich	Auflösung/ Genauigkeit	Bemerkungen
Freiberger Präzisionsmechanik	PSW 2	0- 100 mm	$\pm 0,01$ mm	
	ASW 101N	0- 50 mm	$< \pm 0,02$ mm	automatisiert
	ASW 200	0- 60 mm	$< \pm 0,02$ mm	automatisiert

Tabelle 2.1: Produkte zur Abtastung der Wasseroberfläche mit mechanischen Spitzen

Quellen: <http://www.fpm.de>

2.2.2 Optische Abstandsmessungen

Im Folgenden werden nur noch automatisierte Verfahren beschrieben.

Eine Art der optischen Abstandsmessung ist die Interferenzmessung. Ein Strahlenbündel kohärenten Lichts trifft von der Lichtquelle aus auf den teildurchlässigen Spiegel 1. Ein Teil des Strahlenbündels wird gebrochen, an Spiegel 3 reflektiert und zum Spiegel 1 zurückgelenkt, von dort aus gelangt es zur Kamera. Der Spiegel 3 liegt unter der Wasseroberfläche. Der andere Teil des Lichtes wird am Spiegel 2 reflektiert und gelangt ebenfalls über den Spiegel 1 zur Kamera. Die Abbildung in der Kamera zeigt ein Interferenzstreifenmuster. Wenn die Entfernungen zwischen Spiegel 1 und 3 und zwischen Spiegel 1 und 2 gleich sind oder ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt, entsteht ein heller Interferenzstreifen (Verstärkung). Wenn sich die Entfernung der Spiegel um ein Vielfaches der halben Wellenlänge unterscheidet, entsteht ein dunkler Interferenzstreifen (Auslöschung des Signals). Ändert sich die Mächtigkeit der Wasserschicht über dem Spiegel 3, ändert sich ebenfalls der Weg des Lichtstrahls. Eine Änderung des Wasserstandes hat somit eine scheinbare Wanderung des Interferenzstreifens zur Folge, die auf der Mattscheibe sichtbar ist. Die Interferenzstreifen können ebenso auf einem Film festgehalten werden. Mit dieser Methode konnten schon 1918 Genauigkeiten von 0,005mm erreicht werden.

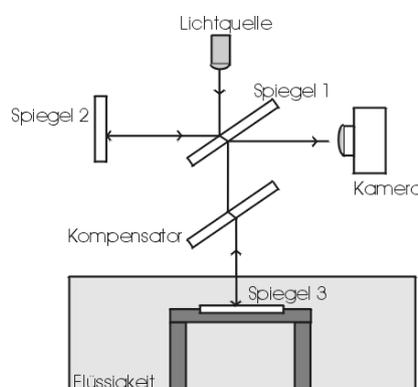


Abbildung 2.3: Aufbau eines Interferometersystems

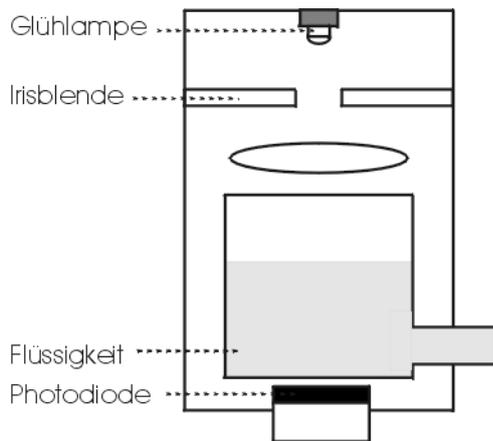


Abbildung 2.4: Schema: Elektrooptische Tiefenmessung

Bei der elektrooptischen Methode kommen Photodioden zum Einsatz. Über der Flüssigkeit wird im Messgefäß eine Lampe (oder andere Lichtquelle) installiert, bei der Stromschwankungen unterbunden werden müssen. Die Standgefäße sind durchsichtig, so dass die Lichtstrahlen der Glühlampe auf der Photodiode einen Strom erzeugen. Dieser Strom ist messbar. Ändert sich die Flüssigkeitshöhe, so ändert sich ebenfalls der Strom der Photodiode.

Die Genauigkeit des Systems hängt vor allem von der Güte der Photodiode ab.

Eine ähnliche elektrooptische Methode ist im Bild rechts zu sehen.

Hier wird als Strahlenquelle keine Glühlampe, sondern ein Infrarotlicht verwendet. Das Infrarotlicht wird an der Flüssigkeitsoberfläche reflektiert und gelangt zum Empfänger. Dabei handelt es sich wiederum um eine Photodiode. Je nach Füllhöhe des Behälters ändert sich der Strom, der durch die Photodiode entsteht.

Weiter Ausführungen sind [21] zu entnehmen.

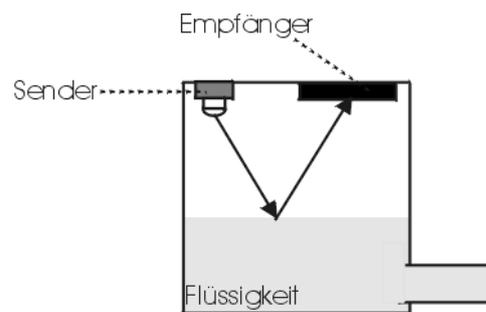


Abbildung 2.5: Elektrooptische Abstandsmessung

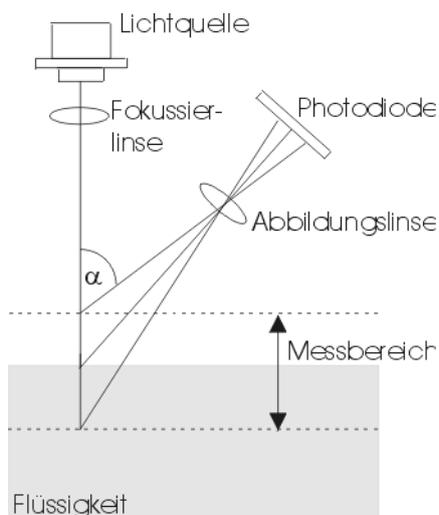


Abbildung 2.6: Triangulationssensoren

Triangulationssensoren arbeiten nach einem ähnlichen Prinzip. Eine Lichtquelle sendet kohärentes Licht aus, das an einer Oberfläche reflektiert wird. Das Licht sollte dabei senkrecht auf die Fläche einfallen. Mit Hilfe einer Linse wird der Strahl fokussiert. An der Oberfläche kommt es zu einer diffusen Reflexion, so dass nur ein Teil des ausgesendeten Lichtes zur Photodiode gelangt. Mit Hilfe der Photodiode oder eines anderen Sensors kann der Winkel bestimmt werden, mit dem das Licht an der Oberfläche reflektiert wird. Da der Abstand der Lichtquelle von der Photodiode bekannt ist, kann die Entfernung der Lichtquelle zur Oberfläche mittels Vorwärtsschnitt berechnet werden.

An Wasseroberflächen kommt es zu keiner diffusen Reflexion. Es besteht die Möglichkeit das Wasser durch andere Flüssigkeiten mit diffusen Eigenschaften wie Bohrmilch zu ersetzen oder den Sensor gegenüber der Wasseroberfläche zu neigen (s. [2]).

Fehlerquellen können unter anderem Mehrfachreflexion an der Wasseroberfläche und eine räumlich ungleichmäßige Intensitätsverteilung durch die Reflexionseigenschaften des Objekts sein.

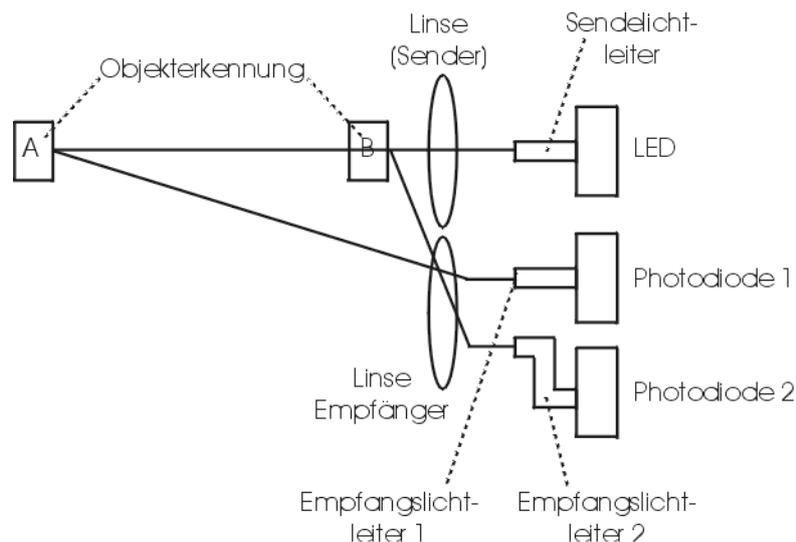


Abbildung 2.7: Prinzip der faseroptischen Methode

Die faseroptische Methode wird auch „Dreistrahl- Entfernungsmesser mit Lichtleitern“ genannt. Es werden 3 Lichtleiter benötigt, einer zum Senden und zwei zum Empfangen. Der vom LED erzeugte Lichtstrahl wird am Gegenstand reflektiert und durch die Empfangslichtleiter zu den jeweiligen Photodioden geleitet. Die Photodioden erzeugen einen Ausgangsstrom entsprechend der empfangenen Lichtmenge. Das Verhältnis der beiden Stromwerte wird zur Entfernungsbestimmung verwendet. Ist das Objekt weit entfernt, wird die Lichtverteilung zur Photodiode 1 abweichen. Ist das Objekt nahe, erfolgt die Lichtverteilung überwiegend zur Photodiode 2. Selbst bei unterschiedlichen Reflexionseigenschaften des Objektes oder bei Änderung der Lichtmengen ändert sich das Lichtverhältnis nicht. Das Verhältnis der elektrischen Ströme bleibt konstant, wenn die Entfernung zum Objekt konstant bleibt.

Firma	Produkt		Messbereich	Auflösung/ Genauigkeit	Bemerkungen
$\mu\epsilon$	OptoNCDT 1400	T	5- 200 mm	0,01- 0,02% des Messbereiches (dM)	
	OptoNCDT 1800	T	2- 750 mm	0,01% dM	ca. 4000 EUR

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Firma	Produkt		Messbereich	Auflösung/ Genauigkeit	Bemerkungen
	OptoNCDT 2200	T	2- 200 mm	0,005% dM	ca. 7000 EUR
Finger GmbH & Co KG	LTS 12/12	T	9-21 mm	0,0012 mm	ca. 4800 EUR
	SLS 5020/ 100	T	80- 100 mm	0,005 mm	ca. 6300 EUR
	SLS 5070/ 300	T	230- 300 mm	0,02 mm	ca. 6300 EUR
ATOS	D170	F	30 mm	0,00622 mm	
	D171	F	50 mm	0,0166 mm	
	RC 190	F	15 mm	0,0071 mm	ca. 3000 EUR
Baumer electric	OADM 12	T	15- 120 mm	0,002 mm	
	OADM 20 (Teach- in)	T	30- 1000 mm	0,004 mm	
Keyence	LK- 081/ 086	T	65- 95 mm	0,003 mm	ca. 4000 EUR
Optimes	OMS	T	90- 110 mm	0,01 mm	
	OMS 2040	T	130- 170 mm	0,02 mm	
Waycon	LAM	T	23,75- 270 mm	0,0001- 0,03 mm	
	LSCAN	T	5- 22 mm	0,03- 0,36 mm	

Tabelle 2.2: Produkte zur optischen Abstandsmessung

T...Triangulationssensoren

F...Faseroptische Sensoren

Quellen: <http://www.micro-epsilon.de> <http://www.finger-kg.de>
<http://www.atos-online.de> <http://www.baumelectric.de>
<http://www.keyence.de> <http://www.optimes.de>
<http://www.wegaufnehmer.de>

2.2.3 Elektrische Abstandsmessungen

Eine sehr einfache Möglichkeit die Wasserstandshöhe elektrisch zu bestimmen, ist die Methode des Niveaumessers (von Boekels). In einem Gefäß befindet sich eine bestimmte Anzahl an Kontaktstiften. Tauchen die Stifte ins Wasser ein, wird ein Stromkreis geschlossen und die Höhe des Wassers kann ermittelt werden. Die Auflösungsgenauigkeit hängt von der Anzahl und der Länge der Kontaktstifte ab. Es können Auflösungsgenauigkeiten von 0,5 mm bei einem Messbereich von 50 mm erreicht werden (Niveaumesser von Boekels 1964 [21]).

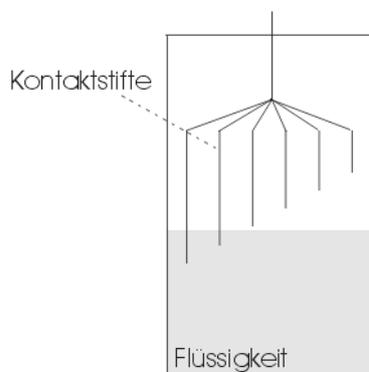


Abbildung 2.8: Niveaumesser (Schema)

Eine weitere sehr simple Methode der Bestimmung der Wasserhöhe erfolgt mit Hilfe von Widerstandsmessungen. Die Flüssigkeit dient dabei als Widerstand, der von einem Gerät registriert wird. Wenn der Wasserspiegel steigt, steigt ebenfalls der Widerstand. Die Standardabweichung solcher Geräte liegt bei ± 1 mm.

Beim kapazitiven Abgriff wird das Prinzip des Plattenkondensators ausgenutzt. Der Plattenkondensator wird durch die Wasseroberfläche im Gefäß und einer darüber angebrachten Metallplatte gebildet. Sinkt der Wasserspiegel, entfernen sich die Platten voneinander und die Kapazität sinkt. Bei jeder Änderung des Wasserspiegels ändert sich ebenso der Wasserwiderstand. Eine genaue Justierung des Systems ist daher von großer Bedeutung. Die Empfindlichkeit des Systems lässt sich durch einen variablen Abstand der Kondensatorplatte über dem Wasser verändern. Von Nachteil sind die sehr kleinen Messbereiche (max. 5 cm, meist weniger). Genauigkeiten im μm - Bereich sind möglich.

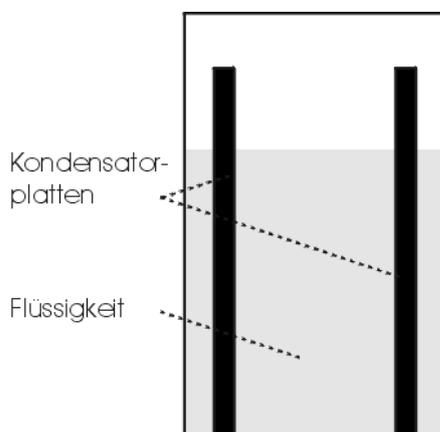


Abbildung 2.9: Kapazitiver Abgriff (2)

Eine andere Methode des kapazitiven Abgriffs (2) besteht darin, die Flüssigkeit als elektrischen Leiter zu benutzen. Die Kondensatorplatten sind je zwei isolierte Messsonden, deren Länge der Größe des Messbereiches entspricht. Die Kapazität ist vom Flüssigkeitsstand abhängig.

Um Anwendungsbeispiele des induktiven Abgriffs zu nennen, wird zunächst die Funktionsweise näher erläutert. Es ist bekannt, dass bei einer Verschiebung eines ferromagnetischen Kerns in einer Spule Strom induziert wird. Bei der Differentialdrossel werden zwei Spulen in verschiedene Zweige einer Wechselstrommessbrücke installiert. Eine Kernverschiebung führt in der Differentialdrossel zu einer Änderung der Brückenspannung.

Der Differentialtransformator besteht aus einer Primärspule und zwei gegensinnig gewickelten Sekundärspulen. Aus der Stellung des Kernes resultiert eine bestimmte Sekundärspannung, die bestimmt werden kann.

Wird der Kern durch die Spulen der Differentialdrossel oder des Differentialtransformators bewegt, kommt es zu einer Spannungsänderung. Die Spannung in Abhängigkeit der Position des Kernes in einem Diagramm dargestellt ist sinusförmig. Nur der geradlinige mittlere Teil der Sinusfunktion wird verwendet.

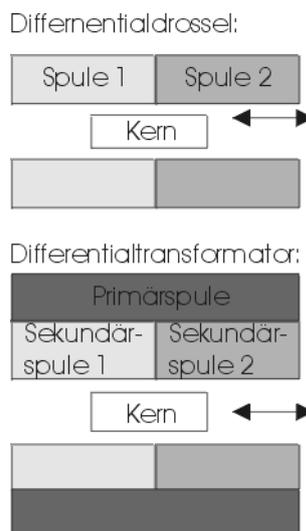


Abbildung 2.10: Differentialdrossel und Differentialtransformator

Differentialdrosseln besitzen einen sehr geringen Messbereich von wenigen Millimetern und ein sehr hohes Auflösungsvermögen von 0,001 mm oder weniger. Differentialtransformatoren hingegen besitzen einen Messbereich von Bruchteilen eines Millimeters bis zu 1,5 m, wobei das Auflösungsvermögen vom Messbereich abhängig ist (ca. 0,5- 1% der Messbereiches).

Nebenstehendes Bild soll die Anwendung einer Differentialdrossel bei einer Schlauchwaage verdeutlichen. Der Kern in der Differentialdrossel wird durch einen Schwimmer bewegt, dabei hat eine Änderung des Flüssigkeitsniveaus eine Änderung des elektrischen Ausgangswertes zur Folge. Der Höhenunterschied kann somit bestimmt werden. Ungenauigkeiten bei diesem Messsystem entstehen durch Linearitätsfehler und Nullpunktdriften. Der mit dem Schwimmer verbundene Anker (Wegaufnehmer) kann nicht reibungsfrei in den Spulen geführt werden, ebenso kann Kondenswasser auf den Schwimmkörpern das Messergebnis zusätzlich verfälschen.

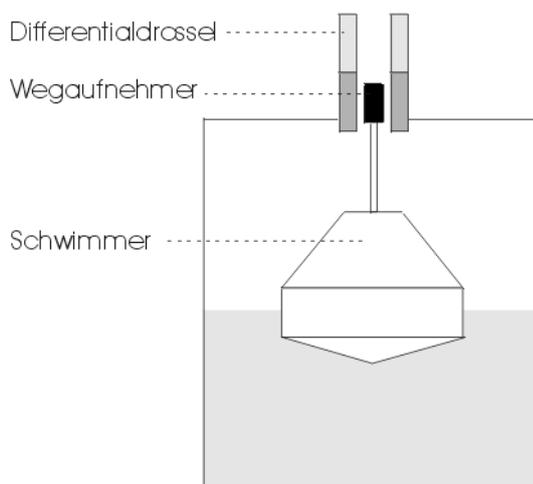


Abbildung 2.11: Induktiver Abgriff mittels Schwimmer

Die Abstandsmessung kann auch mit Hilfe von Wirbelströmen erfolgen. Der Sensor (meist eine Spule mit halboffenem Ferritkern) erzeugt ein magnetisches Wechselfeld,

dessen Feldlinien aus der Sensorebene austreten. Beim Eindringen der Feldlinien in das elektrisch bzw. magnetisch leitfähige Material wird das elektromagnetische Feld abgeschwächt. Die physikalische Erklärung hierfür ist, dass in der Nähe der leitenden Oberfläche der Flüssigkeit ein Wirbelstrom induziert wird, der nach dem LENZ'schen Gesetz der Ursache der Entstehung entgegenwirkt. Die Wirbelstromverluste sind proportional zur Entfernung der Flüssigkeit und können messtechnisch erfasst werden. Die Frequenz des magnetischen Wechselfeldes sollte hoch sein (100 kHz- 1 MHz), um hohe Wirbelstromverluste in der Flüssigkeit und kleine Eindringtiefen gegenüber der Füllhöhe zu erreichen.

Nachteil dieses Systems ist es, dass durch die induzierten Wirbelströme die Flüssigkeit erwärmt wird. Die Abtastung erfolgt über eine Fläche, so dass Inhomogenitäten der Flüssigkeit zur Verfälschung der Messung führen (Verschmutzungen im Wasser führen zur unterschiedlichen Ausbildung der Wirbelströme).

Firma	Produkt		Messbereich	Auflösung/ Genauigkeit	Bemerkungen
$\mu\epsilon$	CapaNCDT 600	K	0,055- 200 mm	bis 0,004 % des Messbereiches (dM)	
	CapaNCDT 610	K	0,2- 10 mm	bis 0,05 % dM	
	CapaNCDT 620	K	0,05- 20 mm	bis 0,004 % dM	
	Serie IS 200	I	0,8- 10 mm	0,1 dM	
	Serie IS 115	I	0,4- 2mm	0,1 dM	
	Serie IWS	I	3- 16 mm	0,5 dM	
Baumer electric	IWRM 30	I	5- 10 mm	0,01 mm	
Keyence	EX- 500W	I	10 mm	0,003 mm	
Althen	KD- 2300	W	0...0,5 bis 0...50,8 mm	0,0001... 0,0051 mm	ca. 1500EUR
	KD- 8000	W	0...0,5 bis 0...60 mm	0,0001... 0,0004 mm	
Waycon	SL- Serie	I	1- 500 mm	ca.0,01 % dM	

Tabelle 2.3: Produkte zur elektrischen Abstandsmessung

K... Kapazitiv; I... Induktiv; W... Wirbelstrom

Quellen: <http://www.micro-epsilon.de> <http://www.baumelectric.de>
<http://www.keyence.de> <http://www.althen.de>
<http://www.wegaufnehmer.de>

2.2.4 Akustische Abtastung der Flüssigkeitsoberfläche

Der Vorteil der Messung mittels Ultraschalls besteht darin, dass auch bei großen Messbereichen hohe Genauigkeiten erreicht werden. Die Anwendungsmöglichkeiten von Ultraschall bei hydrostatischen Messsystemen sind sehr vielfältig.

Bei der rechts dargestellten Aachener Schlauchwaage befindet sich der Weggeber mit seiner ganzen Länge zentrisch im Gefäße. Damit er diese Lage beibehält, umgibt ihn ein Schwimmring mit einem Permanentmagneten. Bei dem Weggeber handelt es sich um einen Ultraschallweggeber mit der Bezeichnung Temposonic DCTL 152. Der Weggeber besteht aus einem magnetostruktiven Draht (ab S. 23). Die von einem Sender ausgesandten Stromimpulse hoher Intensität bewegen sich mit großer Geschwindigkeit auf dem Draht fort. Jeder der Impulse wird von einem den Draht konzentrisch umgebenden Magnetfeld begleitet. Das Magnetfeld des auf dem Schwimmer befindlichen Permanentmagneten verläuft in Richtung des Wellenleiters und hat diesen vormagnetisiert. Durch das Zusammentreffen der beiden gegensinnig gerichteten Magnetfelder erfolgt eine plötzliche Magnetfeldänderung. Die dadurch hervorgerufene relative Längenänderung des Drahtes erzeugt einen Ultraschallimpuls. Ein Ultraschallempfänger ermittelt die Laufzeit des Signals, die proportional der Strecke zwischen Magnetring und Empfänger ist.

Der Messbereich der Aachener Schlauchwaage beträgt 10 mm, die Genauigkeit ca. $\pm 0,02$ bis $\pm 0,03$ mm.

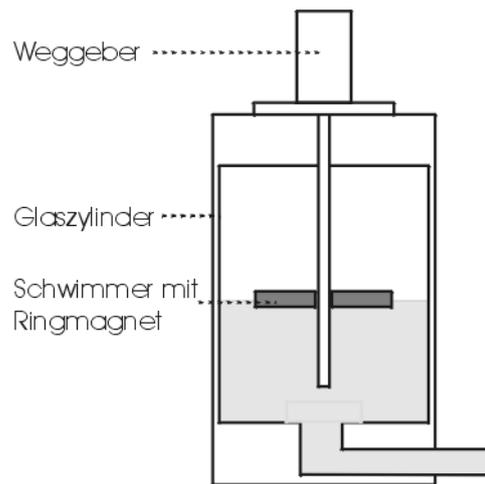


Abbildung 2.12: Aachener Schlauchwaage [21]

Im Jahre 2001 hat die Fachhochschule Oldenburg ein weiteres Ultraschallmesssystem zur hydrostatischen Höhenüberwachungsmessung vorgestellt. Ein Ultraschallsensor (US-Sensor) erzeugt ein Ultraschallsignal (2), das an der Grenzschicht von Luft zu Wasser reflektiert wird und zurück zum Sensor gelangt (3). Fast jeder Ultraschallsensor ist gleichzeitig auch ein US-Empfänger (dazu später mehr). Aus der ermittelten Laufzeit des Signal lässt sich die Entfernung US-Sensor/ Wasser bestimmen. Da die Ultraschallmessung vor allem temperaturabhängig ist, wurde in das Konzept eine Referenzstrecke eingebaut, mit der eine Korrektur berechnet wird.

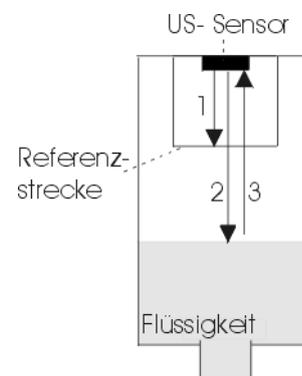


Abbildung 2.13: US-Sensor der FH Oldenburg [3]

Bei der Puls-Radar-Methode wurde das oben beschriebene Prinzip der Abstandsmessung benutzt, wobei der Ultraschallsensor gegen eine Antenne ausgetauscht wird. Jedoch wird hier keine Referenzstrecke gemessen. Temperatur und Druck werden zusätzlich bestimmt, so dass Korrekturen vorgenommen werden können. Die Genauigkeit des Systems liegt bei ± 1 mm, dabei wird meist mit einer Frequenz von 5,8 GHz gemessen (Frequenzen bis 10 GHz sind möglich). Das Prinzip findet Anwendung bei der Lagerung von flüssigen Kohlenwasserstoffen in der Petrochemie.

Ein weiteres Verfahren stammt aus der Werkstoffprüfung. Der Ultraschallsensor misst von unten gegen die Flüssigkeitsoberfläche (1). Auch hier hat die Temperatur starken Einfluss auf die Messung, so dass mit Hilfe der Messung einer Referenzstrecke (2) eine Maßstabskorrektur errechnet wird. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die sehr hohe Messgenauigkeit bei großen Mächtigkeiten (bis zu 3 m Wassersäule). Das Auflösungsvermögen des Sensors beträgt 0,003 mm.

Ein Ziel dieser Diplomarbeit ist die genauere Untersuchung dieses Systems. Weitere Erläuterungen folgen daher in den nachfolgenden Kapiteln.

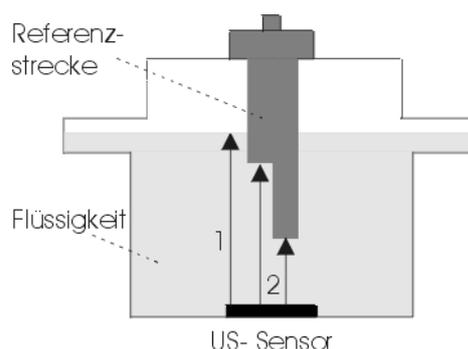


Abbildung 2.14: Ultraschallsensor DE-SY/ Bauhaus- Universität Weimar

Firma	Produkt		Messbereich	Auflösung/ Genauigkeit	Bemerkungen
	Aachener Schlauchwaage	U	10 mm	$\pm 0,02$ mm bis \pm mm	
FH Oldenburg		U	100- 400 mm	0,05 mm	
Endress+ Hauser GmbH, Maulburg		R	sehr großer Messbereich (mehrere Meter)	1 mm	Für dynamische Messungen gut geeignet
Krautkrämer	USM25	U	60- 300 mm	0,005 mm	Sensor 100 EUR, Auswertegerät 5000 EUR
Baumer electric	UNDK 20	U	20- 150 mm	0,5 mm	

Tabelle 2.4: Produkte zur akustischen Abstandsmessung

U... Ultraschallabstandsmessung; R... Puls- Radar- Methode

Quellen: <http://www.endress.de>
<http://www.baumelectric.de>
<http://www.krautkramer.de>

2.2.5 Abtastung mittels hydrostatischen Drucks

Das System besteht aus zwei Einheiten, die luftdicht mit Wasser gefüllt sind. Die erste Einheit besteht nur aus einem Gehäuse mit verformbaren Kammern im Inneren. Im Gehäuse des Ablesegerätes befinden sich ebenfalls verformbare Kammern. Auf diesen Kammern befindet sich eine Zahnstange, die bei Verschiebung ein Ritzel in Bewegung setzt. Mit dem Ritzel ist das Ablesegerät verbunden. Ändert sich die Höhe des Ablesegerätes im Verhältnis zum ersten Gehäuse, ändern sich ebenso die verformbaren Kammern. Fallen sie zusammen, ist die Höhendifferenz geringer und wird am Ablesegerät angezeigt.

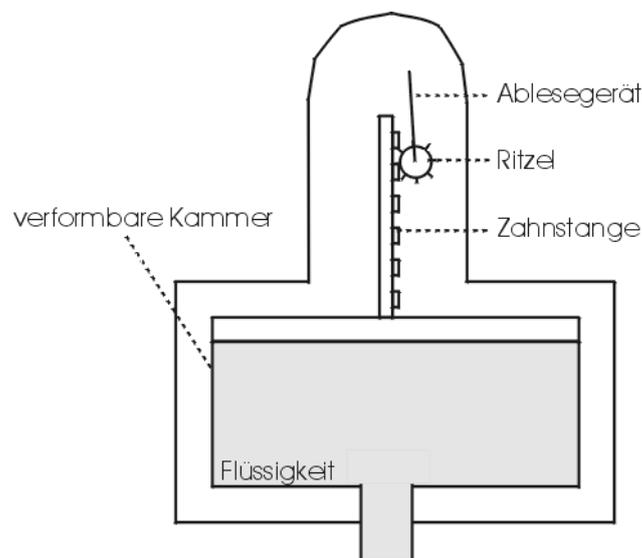


Abbildung 2.15: Messung mittels hydrostatischen Drucks [21]

Die Genauigkeiten dieser Methode sind sehr gering und liegen im Bereich mehrerer Millimeter pro Kilometer. Von Vorteil ist der sehr große Messbereich des Gerätes. Der Skalenwert des Gerätes beträgt 1,5 cm bei ± 8 m und 3 cm bei ± 16 m.

2.3 Fazit

Die oben aufgeführten Produkte sind nur eine kleine Auswahl, die auf dem Markt von einer Vielzahl von Firmen angeboten wird. Die im Text beschriebenen Produkte können repräsentativ zur Auswahl eines Messsystems genutzt werden.

Aus den aufgeführten vielfältigen Möglichkeiten soll beim DESY in Hamburg nur eine zum Einsatz kommen. Bedingungen an das System sind, dass der Messbereich mindestens 80 mm beträgt, eine Genauigkeit von weniger als 0,2 mm auf 600 m erreicht wird. Die Anschaffungs- und Unterhaltskosten sind gering zu halten.

Das Verfahren mittels hydrostatischen Drucks ist unvorteilhaft. Die Genauigkeitsanforderungen entsprechen nicht den Vorgaben. Die Abtastung der Wasseroberfläche mittels mechanischer Spitzen besitzt einen großen Messbereich, die Genauigkeitsanforderungen werden erfüllt und das System ist genügend erforscht. Die Anschaffung von 1500 Freiburger Schlauchwaagen ist jedoch nicht finanzierbar.

Bei den optischen Verfahren gibt es sowohl faseroptische Sensoren als auch Triangulationssensoren, die den Anforderungen entsprechen. Das Produkt D171 der Firma ATOS mit einem faseroptischen Sensor besitzt zwar nur einen Messbereich von 50 mm, doch das Auflösungsvermögen beträgt 0,0166 mm. Bei den Triangulationssensoren würden die Produkte OptoNCDT 2200 (Firma: $\mu\epsilon$, Messbereich: 2- 200 mm; Auflösungsvermögen: 0,005% des Messbereiches (DM)), OADM12 (Baumer Electric; 15- 120 mm; 0,002 mm) und LAM (Waycom; 23,75- 270 mm; 0,0001- 0,03 mm) den Anforderungen entsprechen. Hier liegen die Anschaffungspreise bei ca. 4000 EUR, das macht bei 1500 Sensoren 6 Mio.EUR.

Der Messbereich der kapazitiven Sensoren ist zu klein. Wirbelstromsensoren hingegen erreichen Messweiten von 60 mm mit einer Genauigkeit von 0,0004 mm (Produkt KD-8000 d er Firma Althen). Sie sind auch kostengünstiger als die Triangulationssensoren. Vom induktiven Sensor der SL- Serie der Firma Waytec (Messbereich: 1- 500 mm; Auflösungsvermögen: ca. 0,01% dM) liegen leider keine Preise vor.

Die in der Werkstoffprüfung tätige Firma Krautkrämer (heute: AgfaNDT) bietet Ultraschallsensoren mit einem Auflösungsvermögen von 0,003 mm im Wasser für 100E UR an. Der Messbereich von 40- 3000 mm ist sehr groß. Die Auswerteeinheit (USM25) zu den Sensoren kostet ca. 5000 EUR, doch es ist nicht nötig für jeden Messtopf eine Auswerteeinheit zu kaufen. Ultraschallsensoren anderer Firmen bieten nicht die benötigte Genauigkeit.

Beim TESLA-Projekt in Hamburg fiel die Entscheidung zu Gunsten der Abtastung der Wasseroberfläche mittels Ultraschall. Das Messsystem Prüfkopf und USM25 bieten die Genauigkeit, der Messbereich ist groß genug und die Anschaffungskosten sind relativ günstig.

Kapitel 3

Grundlagen des Ultraschalls

Schall ist eine Druckwelle, die sich in elastischen Medien ausbreitet. Die mit dem Schall verknüpfte Energie füllt einen Raum aus, der Schallfeld genannt wird. Mit Ultraschall werden mechanische Schwingungen der Frequenzen von 20 kHz bis 1 GHz bezeichnet. Es gelten die gleichen Gesetze wie im Bereich des hörbaren Schalls (Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 20 kHz), die Anwendungsgebiete sind jedoch grundlegend verschieden. Passive Anwendungen des Ultraschalls (US) sind die Echolotung, Werkstoffprüfung und Diagnostik in der Medizin. Reinigen und Schweißen gehören zu den aktiven US- Anwendungen.

Frequenzbereich	Gebiet der Akustik
0- 20 Hz	Infraschall
10 Hz- 20 kHz	Hörschall
16 kHz- 1 GHz	Ultraschall
über 500 MHz	Hyperschall

Tabelle 3.1: Gebiete der Akustik

3.1 Beschreibende Größen des Ultraschallfeldes

3.1.1 Schallfeldgrößen

Für die Ausbreitung von Ultraschall ist Materie als Träger der Schwingung nötig. Die US- Ausbreitung ist niemals völlig verlustfrei, je nach Stoffeigenschaften werden Amplituden und Frequenzen schwächer oder stärker absorbiert. „Stehende Wellen“ können auftreten, sind aber meistens unerwünscht.

Im US- Schallfeld führen die Materie- Teilchen periodische Schwingungsbewegungen aus, die ihnen von einer Energiequelle (Schallsender) aufgezwungen werden. Die Schwingungen sind im Normalfall sinusförmig. Die Ausbreitung im Raum wird durch die Schwingungsamplitude a und die Frequenz f beschrieben.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Schallwellen ausbreiten, wird mit c angegeben und Schallgeschwindigkeit genannt. Die Schallgeschwindigkeit ist mit der Phasengeschwindigkeit identisch und frequenzunabhängig. Bei unterschiedlichen Wellenarten (z.B. Transversal- und Longitudinalwellen), Temperaturen und Zusammensetzungen des Mediums liegen unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten vor. In allen folgenden Berechnungen wird c mit 1440 m/s angenommen. Dies entspricht der Schallgeschwindigkeit in 10°C warmen destillierten Wasser.

Die Geschwindigkeit der Materieteilchen um ihre Ruhelagen wird Schallschnelle genannt. Die Schallschnelle ist somit zeit- und ortsabhängig. Die maximale Schallschnelle U ist Null, wenn die Amplitude ihr Maximum erreicht. Eine weitere grundlegende Eigenschaft ist die Teilchenbeschleunigung, die mit b bezeichnet wird.

Der Schalldruck ist der durch die Schallgeschwindigkeit hervorgerufene Wechseldruck. Die Übertragung von longitudinalem Schall (s. Kapitel 3.2.2) ist an Druckschwankungen gebunden. Die mit dem Schallwechseldruck verbundenen Dichteschwankungen bleiben dabei klein. Der Schallwechseldruck P ist am größten, wenn die Auslenkung maximal ist. Der zeitliche Mittelwert des Schallwechseldruckes ist Null.

Der Schallwellenwiderstand W ist der Quotient aus Schallwechseldruck und Schallschnelle. Er ist kein Wirkwiderstand und vergleichbar mit dem Wellenwiderstand eines elektrischen Energieleiters (z.B. eines Kabels).

Bezeichnung	Einheit	Formel
Schwingungsamplitude	1[m]	$a = b + A \cdot \sin\left(t - \frac{x}{c}\right)$
Schallgeschwindigkeit	1[m/s]	$c = \sqrt{\frac{\chi \cdot p}{\rho}}$ in Gasen $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ in Flüssigkeiten $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ in festen Stoffen
Maximale Schallschnelle	1[m/s]	$U = \omega \cdot A$
Maximale Beschleunigung	1[m/s ²]	$B = \omega \cdot U = \omega^2 \cdot A$
Schallwechseldruck	1[N/m ²] = 1[Pa]	$P = \rho \cdot c \cdot U = W \cdot U = W \cdot \omega \cdot A$
Schallwellenwiderstand	1[Ns/m ³]	$W = \rho \cdot c$
Wellenlänge	1[m]	$\lambda = \frac{c}{f}$

Tabelle 3.2: Schallfeldgrößen

wobei:

$\chi = c_p/c_V \dots$ Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck c_p

	und konstantem Volumen c_V
a...	Schwingungsauslenkung zu einem beliebigen Zeitpunkt t an dem Ort x
b...	Konstante ($b=0$, wenn bei $t=0$, $x=0$ auch $a=0$ gilt)
A...	Amplitude
ω ...	Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$)
ρ ...	Materialdichte
E...	Elastizitätsmodul
K...	Kompressionsmodul
p...	Druck

3.1.2 Energiegrößen des Schallfeldes

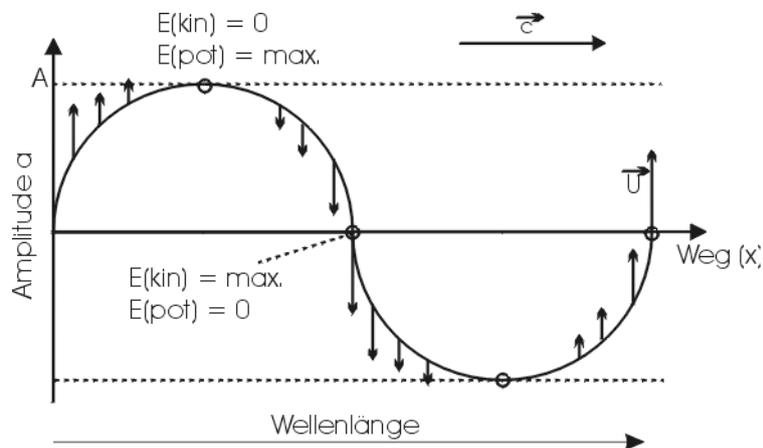


Abbildung 3.1: Energiegrößen

Der Energietransport der Ultraschallwelle erfolgt ohne Materietransport. Die Materieteilchen schwingen um ihre Ruhelage und die Energie fließt mit Schallgeschwindigkeit vom Schallsender weg. Ein Maß für die Schwingungsenergie der Teilchen innerhalb eines Volumenelementes ist die Energiedichte.

Die Schalleistung gibt die Schallenergie je Zeiteinheit an. Die Leistungsdichte gibt an, wie viel Leistung je Flächeneinheit senkrecht zur Richtung des Energieflusses transportiert wird und entspricht somit der Ultraschallintensität. Die quadratische Abhängigkeit der Schallintensität von der Frequenz (oder Schallschnelle) weist auf die besondere Eigenschaft des Ultraschalls hin, relativ große Intensitäten erzeugen zu können.

Ein Maß für die Stärke beim Auftreffen von US- Energie auf eine reflektierende oder absorbierende Fläche ist der Schallstrahlungsdruck. Er ist nicht mit dem Schallwechseldruck zu verwechseln! Der Schallstrahlungsdruck ist ein statischer Druck (zeitlich konstant). Der Vektor zeigt in die gleiche Richtung wie der des Energietransportes.

Bezeichnung	Einheit	Formel
Energiedichte	$1[N/m^2] = 1[Pa]$	$\bar{E} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2$
Ultraschallintensität	$1[W/m^2]$	$J = \bar{E} \cdot c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot W \cdot U^2$
Schallstrahlungsdruck	$1[N/m^2]$	$S = \frac{J}{c}$

Tabelle 3.3: Energiegrößen des Ultraschalls

3.2 Eigenschaften des Ultraschalls

3.2.1 Räumliche Ausbreitung

Voraussetzung für die verlustfreie Ausbreitung der Ultraschallwellen ist, dass keine Energie in Wärme umgesetzt wird. Dies wird erfüllt, wenn die Schwingungen rein elastisch erfolgen und dadurch keine Reibung auftritt. Ungestörte Wellenausbreitung setzt die Homogenität des durchstrahlten Mediums voraus. Ein homogenes Medium hat keinen Einfluss auf die Schallwelle durch Brechung, Reflexion oder Streuung. Es gibt keinen idealen, völlig verlustfreien Schallleiter, aber es gibt Stoffe, die dieser Forderung im Bereich kleiner US- Intensitäten sehr nahe kommen. Im weiteren Verlauf wird auf Eigenschaften des Ultraschalls eingegangen unter der Annahme der verlustfreien Ausbreitung der US- Strahlen.

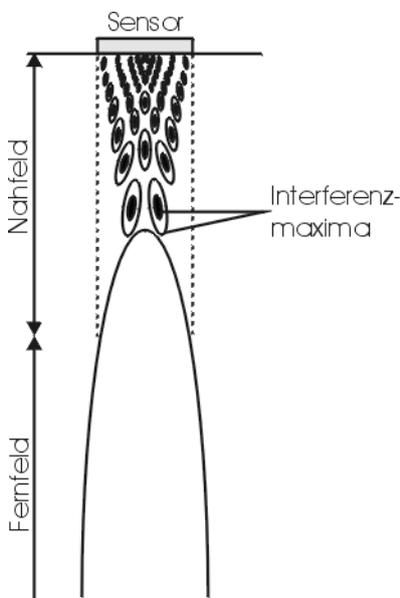


Abbildung 3.2: Interferenzfeld

Zwei Wellen von verschiedenen Punkten der gleichen Schallquelle (Sensor) sind kohärent. Beide Wellen besitzen exakt die gleiche Frequenz f und Wellenlänge λ , die Amplituden sind identisch. Es ist bekannt, dass es bei kohärenten Wellen zu Interferenzen kommt. Es entsteht ein Interferenzfeld (s. links). Ein Interferenzfeld ist ein (zeitlich konstantes) Feld räumlich stark schwankender Intensitäten. Treffen an einem Punkt im Schallfeld Wellen gleicher Frequenz aufeinander, kann es zur Auslöschung oder Verstärkung der Signale kommen. Es kommt zur Auslöschung, wenn Wellen entgegengesetzter Phasenlage (um $\lambda/2$ verschoben) aufeinander treffen. Diese Orte werden als Minima bezeichnet. Wenn die Phasenlage, Amplitude und Frequenz übereinstimmen, kommt es zur Verstärkung des Signals (Bildung eines Maximums). Interferenzerscheinungen sind im US- Feld keine Seltenheit.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, herrscht in der Nähe der Kopplungsfläche ein ausgeprägtes räumliches Interferenzbild. Als Kopplungsfläche wird die abstrahlende

Fläche (Oberfläche des Sensors) bezeichnet. Ursache dieser starken Interferenzen ist die Tatsache, dass jeder Punkt der Kopplungsfläche Ursprung einer Kugelwelle ist. Bei einer kreisförmigen Kopplungsfläche mit dem Durchmesser D bildet sich senkrecht dazu ein Zylinder aus. Minima und Maxima treten im Zylinder bis zu einer bestimmten Entfernung auf. Diese Entfernung wird Nahfeldlänge N genannt.

$$N = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda}$$

Bei kreisförmigen Kopplungsflächen liegt im Abstand $N/2$ das letzte Maxima. In den Abständen kleiner als N wechseln Maxima und Minima ab, und zwar umso häufiger, je größer D/λ ist. Erst im Fernfeld bildet sich ein Strahlenkegel aus. Das $1/r^2$ -Gesetz gilt also erst im Fernfeld. Die Strahlungskeule ist rotations-symmetrisch und liegt innerhalb eines Kegelmantels. Die Spitze des Mantels steht auf dem Mittelpunkt des Schwingers. Der Querschnitt des Mantels ist im Abstand N gleich dem des Schwingers.

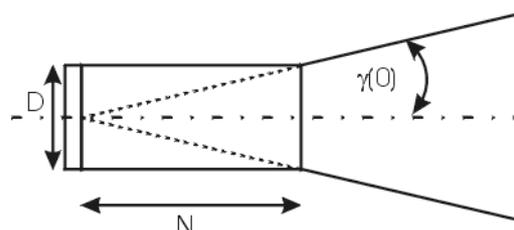


Abbildung 3.3: Öffnungswinkel

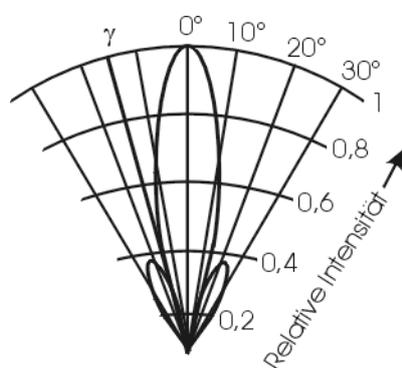


Abbildung 3.4: Strahlenkeule mit Nebenmaxima

Die Strahlenkeule in nebenstehender Abbildung besteht aus einem zentralen Kern und ihn umgebenden Nebenzipfeln. Je größer D/λ ist, desto mehr Nebenzipfel treten auf, aber um so größer ist auch die Energie im zentralen Kern.

Aufgrund der Interferenzen gibt es eine erste Nullzone, die die zentrale Keule rotations-symmetrisch umgibt und begrenzt. Sie liegt im Fernfeld auf einem Kegel um die Mittelachse mit dem halben Öffnungswinkel γ_0 .

$$\sin \gamma_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

Auf dem Kegelmantel mit dem halben Öffnungswinkel γ_0 herrscht im Fernfeld überall die Intensität 0. Der größte Teil der Energie wird in das Innere dieses Kegels abgestrahlt. Die US- Intensität ist auf der Kegelachse maximal und nimmt von der Mitte

nach außen kontinuierlich ab. Die Halbwertsbreite beträgt im Winkelmaß etwas weniger als $\gamma_0/2$.

Ist der Durchmesser der schallanregenden Fläche wesentlich kleiner als die Wellenlänge, so verteilt sich die Energie im Raum fast kugelförmig. Wellenberge und -täler folgen aufeinander wie konzentrische Kugelschalen. Die Leistungsdichte ist in allen Raumrichtungen nahezu gleich und nimmt indirekt proportional im Quadrat mit der Entfernung zum Sender ab.

Wenn mindestens eine Kantenlänge der abstrahlenden Fläche die Größenordnung der Wellenlänge erreicht oder überschreitet, tritt die Strahlungsenergie gebündelt auf. Je größer die Kopplungsfläche ist, desto stärker wird die Strahlungsenergie gebündelt (umso kleiner ist der Raumwinkel). Die Energie breitet sich als Kugelwelle aus, das $1/r^2$ -Gesetz besitzt Gültigkeit. Die Intensität ist auf der Hauptachse (senkrecht zur Abstrahlungsfläche) um den Bündlungsfaktor F größer.

Wenn keine kreisförmigen Kopplungsflächen vorliegen, ist das Strahlungsdiagramm nicht mehr rotationssymmetrisch. Anstelle des Kegelmantels treten komplizierte kegelähnliche Flächen auf. Aber auch hier befindet sich die Spitze im Schwerpunkt der Kopplungsfläche.

3.2.2 Schwingungsarten

Allgemein wird zwischen Transversal- und Longitudinalwellen unterschieden.

Ein Welle, bei der die einzelnen Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, wird als Querwelle oder **Transversalwelle** bezeichnet. Bei einer Transversalwelle folgen Wellenberge und Wellentäler aufeinander.

Eine Welle, bei der die einzelnen Teilchen in der Ausbreitungsrichtung der Welle schwingen, wird als Längswelle oder **Longitudinalwelle** bezeichnet. Bei einer Longitudinalwelle folgen Verdichtungen und Verdünnungen aufeinander.

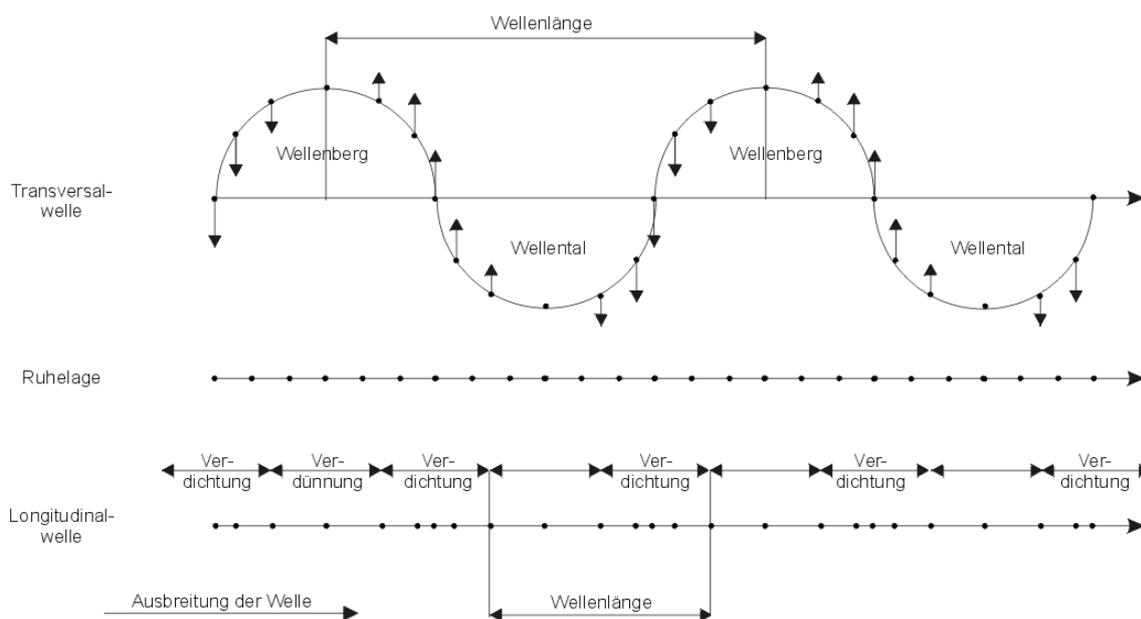


Abbildung 3.5: Wellenarten

Elektromagnetische Wellen (wie Radio-, Licht-, UV- Wellen und Röntgenstrahlen) sind stets Transversalwellen. Bei mechanischen Schwingungen in festen Körpern sind hingegen verschiedene Schwingungsarten möglich. Treten Transversal- und Longitudinalwellen gleichzeitig auf, addieren sie sich vektoriell zu einem resultierenden Wellenzug von unter Umständen komplizierter Gestalt, besonders an der Oberfläche. Es treten so genannte Mischformen auf. In Flüssigkeiten und Gasen sind nur Longitudinalwellen möglich. Die Ausbreitung von Transversalwellen setzt die Übertragung von Schubkräften voraus. Dies ist in Flüssigkeiten oder Gasen nicht möglich.

Die Schallgeschwindigkeit (Ausbreitungsgeschwindigkeit der Spitze des Wellenzuges) und damit die Wellenlänge unterscheiden sich bei den verschiedenen Wellenarten. Longitudinalwellen sind stets am schnellsten. In den meisten Medien ist die Geschwindigkeit der Transversalwellen halb so groß wie die der Longitudinalwellen. Damit ist im gleichen Medium mit der gleichen Frequenz auch die Wellenlänge von Transversalwellen ungefähr halb so groß wie die der Longitudinalwellen.

Material	c_L in [m/s]	c_T in [m/s]	c_L/c_T
Aluminium	6300	3080	2,05
Stahl	5940	3240	1,83
Quarz- Einkristall	5760	3840	1,50
Plexiglas	2730	1430	1,90

Tabelle 3.4: Schallgeschwindigkeiten von Longitudinal- und Transversalwellen

Beide Wellenarten laufen in festen Stoffen völlig voneinander getrennt. Somit sind Interferenzen, verursacht durch das gemeinsame Auftreten beider Wellenarten, nicht

möglich. Transversal- und Longitudinalwellen unterliegen den gleichen Ausbreitungsgesetzen. Auch Transversalwellen bilden eine Strahlungskeule aus. Die obigen Formeln behalten ihre Gültigkeit.

Die meisten Sensoren arbeiten mit Longitudinalwellen. Die Kopplungsfläche schwingt sinusförmig, vergleichbar mit dem Kolben eines Motors. Wenn auf der gesamten Stirnfläche nahezu die gleiche Schwingungsamplitude herrscht, werden diese Schwinger auch *Kolbenschwinger* genannt. Steht die Stirnfläche mit einem anderen Medium in mechanischem Kontakt, werden die Longitudinalwellen in dieses Medium übertragen.

Schwingt die Stirnfläche transversal, können die Wellen nur übertragen werden, wenn das zweite Medium ein fester Körper ist. Die Sensorfläche muss fest verkittet sein. Meist wird ein longitudinal schwingender Sensor benutzt, um Transversalwellen zu erzeugen. Die Longitudinalwellen werden in einem Kunststoffkeil erzeugt. Beim Übergang der Longitudinalwellen in das Prüfstück kommt es zur Brechung der Wellen. Bei der Brechung von Longitudinalwellen treten neben Longitudinalwellen auch Transversalwellen auf. Durch die Wahl eines bestimmten Winkels gelangen nur Transversalwellen in das Prüfstück. Die Ankopplung des Keils an das Prüfstück erfolgt mit Öl oder Wasser. Hierzu mehr im nächsten Abschnitt.

Wie bei elektromagnetischen Wellen bekannt ist, können nur Transversalwellen polarisiert werden. Longitudinalwellen sind nicht polarisierbar.

Weitere Schwingungsarten sind die Biegeschwingung, Torsionswelle, Oberflächenwelle und Plattenwelle. Auf eine detaillierte Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet.

3.2.3 Reflexion und Brechung

Bei den vorhergehenden Betrachtungen der Ultraschallausbreitung wurde ein homogenes Medium angenommen. Trifft aber die US- Welle auf eine Grenzfläche, ändert sich der Schallwiderstand sprunghaft. Es kommt zur teilweisen oder totalen Reflexion. Es gelten ähnliche Gesetze wie in der Optik. Ein Maß für die Stärke der Reflexion ist der Reflexionsfaktor R . Er gibt an, wie stark die Reflexion bei nicht absorbierenden Medien ist. Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktor sind durch die Verhältnisse der Schalldrücke (oder der Schallintensitäten) gegeben.

$$R = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \right)^2$$

wobei: W_i ...Schallwellenwiderstände

Der Durchlässigkeitsfaktor errechnet sich aus: $D = 1 - R$. Die Schallwellenwiderstände zwischen Luft und Wasser sind so groß, dass es bei diesem Übergang praktisch zu einer

Totalreflexion kommt.

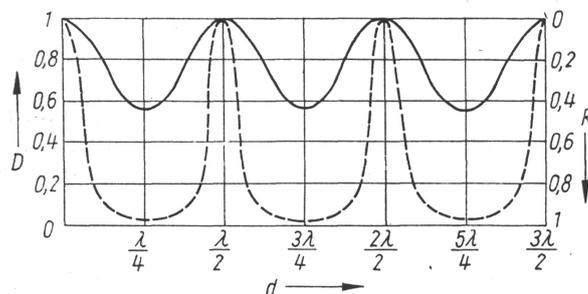


Abbildung 3.6: Reflexionskoeffizient R und Durchlasskoeffizient D (Quelle: [13])

Im Bild oben werden Reflexionskoeffizient R und Durchlasskoeffizient D von Platten aus Aluminium (gestichelte Linie) und Plexiglas (durchgehende Linie) dargestellt.

Bei schrägem Auftreffen auf eine Grenzfläche kommt es zur Brechung der Wellen. Es gilt das Brechungsgesetz der Optik.

$$\frac{c_1}{\sin \alpha} = \frac{c_2}{\sin \beta} \quad \text{oder} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

Beim Übergang vom harten in ein weiches Medium werden die Wellen vom Lot weg gebrochen. αE ist der Eintrittswinkel, αR der Reflexionswinkel und β der Brechungswinkel (Austrittswinkel).

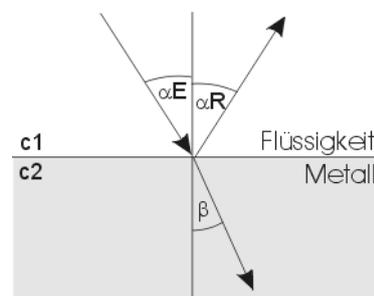


Abbildung 3.7: Brechung I

Beim Übergang von einem weichen auf ein hartes Medium werden die Wellen zum Lot hin gebrochen. Bei einer Reflexion an einer solchen Grenzschicht kommt es zu einer Phasenverschiebung ($\lambda/2$ -Verschiebung).

Totalreflexion tritt auf, wenn $c_2/c_1 \cdot \sin \alpha > 1$. Der Grenzwinkel der Totalreflexion α_0 errechnet sich somit aus $c_1/c_2 = \sin \alpha_0$.

Beim schrägen Auffall einer Longitudinalwelle auf eine Grenzfläche zweier Medien wird im zweiten Körper neben einer Longitudinalwelle auch eine Transversalwelle angeregt. Beide Wellen haben unterschiedliche Richtungen. Überschreitet der Einfallswinkel den „Grenzwinkel der Totalreflexion“ für die Longitudinalwelle, so läuft immer noch eine Transversalwelle im Körper weiter. Es muss zwischen einem Grenzwinkel für Longitudinal- und Transversalwelle unterschieden werden. Zur Unterscheidung der Wellenarten werden für nachfolgende Betrachtungen die Indizes T (für Transversalwellen) und L (für Longitudinalwellen) eingeführt.

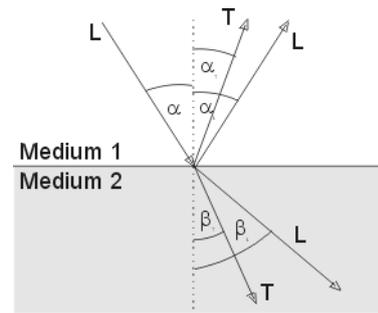


Abbildung 3.8: Brechung II

Der Grenzwinkel für Longitudinalwellen berechnet sich aus:

$$\sin \alpha_{0L} = \frac{c_{1L}}{c_{2L}}$$

Wird der Grenzwinkel überschritten, entstehen im zweiten Körper Transversalwellen, obwohl diese nur durch Longitudinalwellen angeregt wurden. Die Richtung der Transversalwellen im zweitem Medium β_T berechnen sich aus:

$$\frac{c_{1L}}{c_{2L}} = \frac{\sin \alpha_L}{\sin \beta_T}$$

Der Winkel α_{0T} ($\alpha_{0T} > \alpha_{0L}$) beschreibt, ab wann auch im zweiten Medium keine Transversalwellen mehr verlaufen. Wird genau unter dem Winkel α_{0T} eingestrahlt, entstehen Oberflächenwellen. Erst wenn $\alpha > \alpha_{0T}$ ist, wird die gesamte Energie im ersten Körper total reflektiert. Bei senkrechter Einstrahlung entstehen im zweiten Körper nur Longitudinalwellen.

Die durch Brechung oder Reflexion an schrägen Grenzflächen entstehenden Transversalwellen sind linear polarisiert. Die Polarisationssebene ist mit der Ebene identisch, in der alle einfallenden, gebrochenen und reflektierten Strahlen liegen.

Zu totalen Durchlässigkeiten kann es kommen, wenn eine ebene Platte in eine Flüssigkeit eingetaucht wird. Die Dicke der Platte muss in Strahlungsrichtung ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge besitzen ($d = n \cdot \lambda/2$). In diesem Fall tritt bei senkrechter Einstrahlung eine totale Durchlässigkeit auf, die wie folgt zu erklären ist. Die US-Wellen gelangen in das Innere der Platte. Beim Übergang von der Platte ins Wasser kommt es zur Reflexion des Signals. Da es sich um einen Übergang vom harten in ein weiches Medium handelt, sind die reflektierten Wellen phasenverschoben. Es kommt zu einer strengen Überlagerung beider Wellen (stehende Welle) und damit zur totalen Durchlässigkeit. Eine stehende Welle transportiert keine Energie. Ebenfalls kommt es zu selektiven Durchlässigkeiten für bestimmte schräge Einstrahlungsrichtungen.

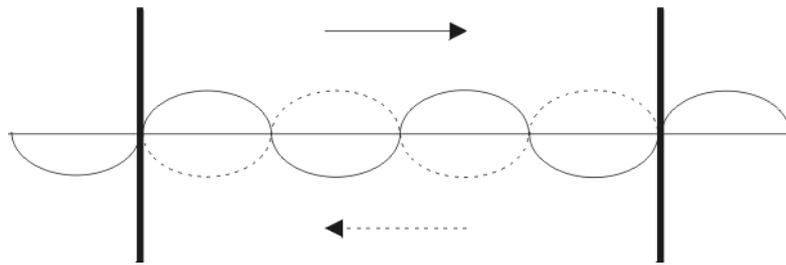


Abbildung 3.9: Zeitlich konstante Schwingung in stehender Welle

Zur totalen Reflexion kann es kommen, wenn die Bedingung $d = (2n + 1) \cdot \lambda/4$ erfüllt ist. Dies gilt jedoch nur für eine Schallfrequenz. Auf Breitbandimpulsen trifft diese Bedingung nicht zu.

3.2.4 Dämpfung und Streuung

Bisher wurde angenommen, dass die Ausbreitung der US-Wellen in einem verlustfreien Medium erfolgt. Das bedeutet, dass keine Verluste durch innere Reibung auftreten und dass bei auftretenden Schwingungsamplituden die elastischen Grenzen des Mediums nicht überschritten werden. In der Praxis gibt es keine verlustfreie Ausbreitung der Wellen in einem Medium. Die elastischen Grenzen werden zwar so gut wie nie überschritten, dafür treten umso häufiger Absorptionen der Wellen durch innere Reibung auf.

Allgemein kann eine Schwächung des Ultraschallsignals folgende Ursachen haben:

- Absorption (irreversible oder reversible Umwandlung von Schallenergie in andere Energieformen)
- Schallfeldgeometrie (Abnahme der Schallenergie im Fernfeld eines Wandlers wie bei einer Kugelwelle - $1/r^2$ - Gesetz)
- Reflexion an Grenzschichten
- Streuung (an vorhandenen Inhomogenitäten)

Die Dämpfung ist die Summe aller oben aufgeführten Ursachen.

Die **Absorption** unterliegt allgemein dem Exponentialgesetz. Dies gilt für mechanische und elektromagnetische Schwingungen gleichermaßen.

$$P_x = P_0 \cdot e^{-ax} \quad (3.1)$$

wobei:

P_0 ... Schallwechseldruck an einer beliebigen Stelle x_0

P_x ... Schallwechseldruck im weiteren Verlauf der Wellenausbreitung (im Abstand x)

a ... Absorptionskoeffizient

Es gibt verschiedene Arten der Absorption. Zum einen gibt es die Absorption durch Viskosität. Bei der Überwindung der Kohäsionskräfte, die der Bewegung der Materieteilchen im Schallfeld entgegenwirken, wird Schallenergie in Wärme umgewandelt.

Es kommt weiterhin zur Absorption durch Wärmeleitung. Im Bereich der Verdichtungen herrscht durch einen höheren Druck auch eine höhere Temperatur. Es kommt zur Wärmeleitung von Orten höherer Temperatur zu Orten niedrigerer Temperatur.

Bei der Absorption durch Reflexion wird Schallenergie vorübergehend in Strukturenergie überführt. Der gemeinsame Absorptionskoeffizient ergibt sich aus der Summe der Absorptionskoeffizienten der oben aufgeführten Absorptionsarten.

In der Praxis wird die obige Formel vereinfacht benutzt.

$$P_x = P_0 \cdot 10^{-\frac{k}{20} \cdot x}$$

Der Absorptionskoeffizient k (in Dezibel je Längeneinheit) steigt bei allen Stoffen nahezu linear mit zunehmender Frequenz. Die Absorption in Wasser ist sehr gering.

Eine Absorptionskonstante bei Flüssigkeiten kann nur im Bereich kleiner Intensitäten definiert werden. Grund dafür ist die nichtlineare Schallausbreitung bei hohen Intensitäten. Bei linearer Schallausbreitung wird vorausgesetzt, dass die Schallfeldgrößen klein gegenüber den Ruhebedingungen bleiben.

Bei hohen Intensitäten treten nicht lineare Effekte auf. So kann es z.B. in Flüssigkeiten zur Kavitation kommen. Dabei reißen Flüssigkeiten unter dem Einfluss des Schallwechseldrucks auf. Gelöste Luft wird frei und bildet Bläschen. Diese schlagen mit der Druckphase wieder zusammen, dabei wird Schwingungsenergie in Wärme umgesetzt wird. Hier tritt echte Absorption auf.

Neben der echten Absorption kommt es zur **Streuung** von US-Wellen an Inhomogenitäten wie Poren, kleinsten Fremdeinschlüssen oder Korngrenzen. Besitzt die Inhomogenität die Größenordnung einer Wellenlänge, so wird ein Teil der Strahlung in alle Raumrichtungen abgelenkt. Dieser Anteil wird Streuwelle genannt. Bei vielen Inhomogenitäten interferieren die einzelnen Streuwellen im Raum mit dem ungestörten Wellenzug. Es kommt zur Schallauffächerung. Die Schallauffächerung ist abhängig von der Art der streuenden Objekte und deren räumlicher Verteilung. Streuzentren sind Materialinhomogenitäten von elastischer Größe, Dichte und Absorption. Die Streuung ist stärker frequenzabhängig als die Absorption.

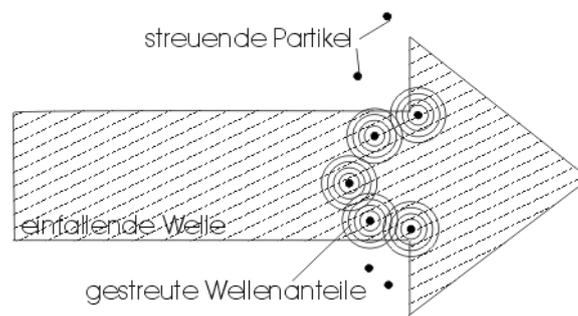


Abbildung 3.10: Streuschema

Besonders auffällige Streuerscheinungen entstehen, wenn die Streuzentren in regelmäßigen Abständen auftreten oder selbst zu Eigenresonanzen angeregt werden.

Solange die Wellenlänge groß gegenüber der Pore oder des Korns ist, gilt:

$$k_{str} \approx 50 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^3 \cdot 10^{-3} dB/mm$$

wobei:

k_{str} ... Dämpfungskoeffizient (verursacht durch Streuung)

d ... mittlerer Durchmesser der Poren

Für die Berechnung der Streuung gilt dieselbe Formel wie bei der Absorption (3.1). Streuung spielt nur bei hohen Frequenzen (also kleinen Wellenlängen) und großen Poren eine wesentliche Rolle.

Zur besseren Unterscheidung von Reflexion und Streuung dient nachstehende Tabelle:

	Reflexion	Streuung
Arte des Echos	direkt oder Spiegelecho	rückgestreut
Echoverteilung	regelmäßig	unregelmäßig
Grad der Abhängigkeit der Amplitude vom Einfallswinkel	stark	gering
Abhängigkeit der Streuamplitude von der Wellenlänge	unabhängig	abhängig

Tabelle 3.5: Vergleich Reflexion/ Streuung

Weitere Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten zum Thema Streuung und Absorption sind der Quelle [13] zu entnehmen.

Bei Ultraschall kommt es auch zum Phänomen der **Beugung** (ähnlich wie bei anderen mechanischen Wellen). Trifft eine Wellenfront auf ein Hindernis, so treten die US-Wellen teilweise in den Schattenraum ein. In diesem Bereich kommt es ebenfalls zur Schwächung der US-Wellen. Ist die Öffnung bzw. das Hindernis gegenüber der Wellenlänge sehr klein, entstehen keine merklichen Schallschatten.

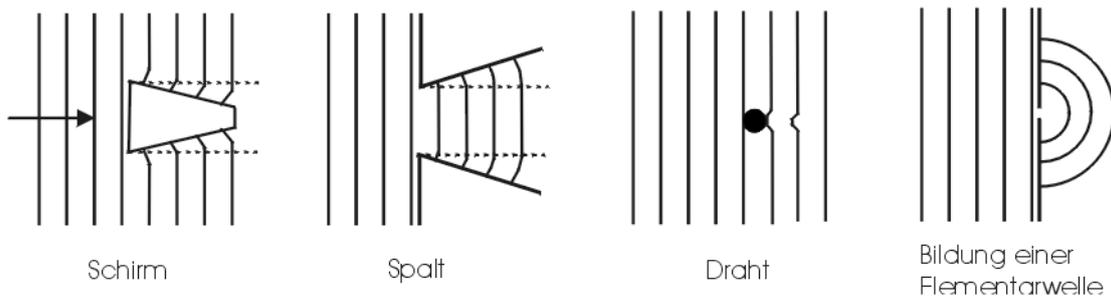


Abbildung 3.11: Schallbeugung an Hindernissen und Öffnungen

Allgemein kann noch erwähnt werden, dass das $1/r^2$ -Abstandsgesetz in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielt. Der Einfluss von Absorption und Streuung ist größer. Eine Ausnahme bildet hierbei Stahl.

3.2.5 Ultraschallanwendung unter Wasser

Bei einer relativ zur Wellenlänge großen Schwingerfläche kommt es zu einer gut gebündelten Schallabstrahlung unter Wasser. Die Reichweite der US-Wellen richtet sich neben der Sendeleistung nach den geometrischen Ausbreitungsgesetzen und der Absorption. Wie oben beschrieben beruht die Absorption überwiegend auf der inneren Reibung der frei beweglichen Moleküle. Dies ist nicht nur bei Wasser, sondern bei allen Flüssigkeiten der Fall. Theoretisch ist die Absorption direkt proportional zum Quadrat der Frequenz. Das tatsächliche Absorptionsverhalten ist jedoch etwas geringer: $k \sim f^{1,5}$.

Dies gilt für Intensitäten unter der Kavitationsschwelle. Bei höheren Frequenzen (ab 100 kHz) ist die Absorption stärker. Die Absorption hängt neben der Frequenz auch von Temperatur, Verunreinigung und Salzgehalt des Wassers ab. Bei steigenden Temperaturen sinkt die Absorption.

Für die praktischen Anwendungen ist es wichtig, die Schallgeschwindigkeit c im Wasser genau zu kennen. Die Schallgeschwindigkeit ist abhängig von der Temperatur T [°C], vom Salzgehalt S [%] und vom Druck. Der Druck wiederum ist vor allem abhängig von der Wassertiefe D [m]. Unten stehende Näherungsformel ist für den Einsatz von Sonar entwickelt worden.

$$c = 1410 + 4,21 \cdot T - 0,0377 \cdot T^2 + 11,4 \cdot S + 0,018 \cdot D$$

Für die weiteren Untersuchungen kann die Formel gekürzt werden, da die Wassertiefe nie mehr als 15 cm beträgt und bei den Experimenten Leitungswasser (mit sehr geringem Salzgehalt) verwendet wird.

$$c = 1410 + 4,21 \cdot T - 0,0377 \cdot T^2$$

Wie im Abschnitt 3.2.2 erwähnt, breiten sich in Wasser nur Longitudinalwellen aus.

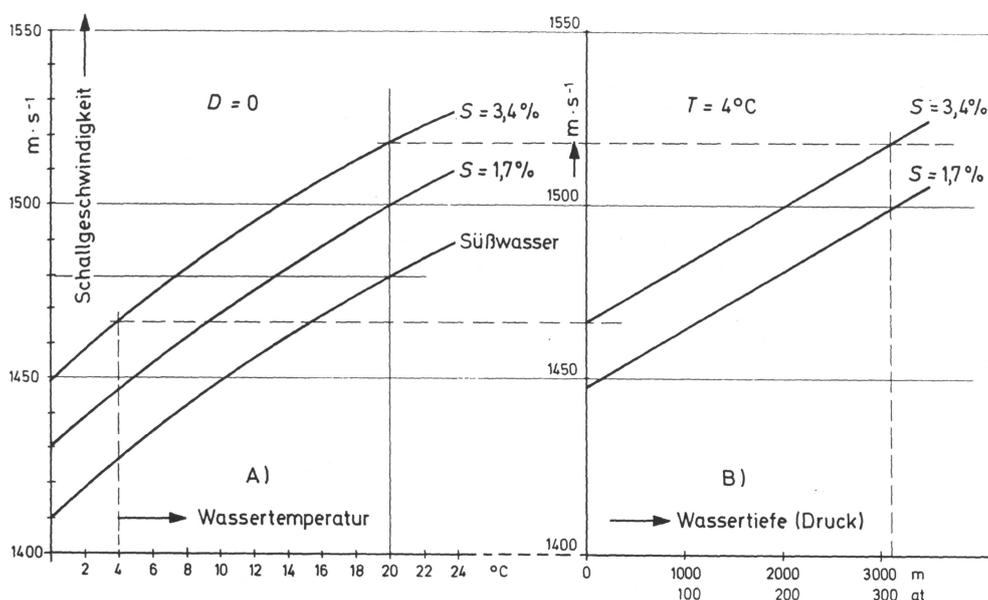


Abbildung 3.12: Schallgeschwindigkeit in Meerwasser (Quelle: [12])

Das Messkonzept beruht auf der Reflexion des Ultraschalls an der Grenzschicht Wasser/ Luft. Der Reflexionsfaktor für diesen Übergang liegt bei 0,99886. An dieser Grenzschicht tritt fast eine Totalreflexion des Ultraschallsignals auf. Beim Übergang Wasser/ Stahl herrscht ein Reflexionsfaktor von 0,86175. Ein Teil des Ultraschallsignals wird nicht reflektiert, sondern dringt in das Innere des Sensors ein, wo es vom Schallwandler registriert wird. Alle Strahlen (ausschließlich Longitudinalwellen) treffen annähernd senkrecht auf die Grenzschichten auf, so dass die Brechungswinkel annähernd Null sind. Totale Durchlässigkeit tritt nicht auf.

3.3 Erzeugung von Ultraschallwellen

Es gibt drei grundlegende Arten der Ultraschallerzeugung: mechanische, elektromechanische und thermische Schallerzeugung. Die optischen Schallerzeuger arbeiten nach dem selben Prinzip wie die thermischen. Es werden meist Platten, Stäbe oder Röhren

zur US- Erzeugung eingesetzt. Die meisten Schallerzeuger können ebenfalls als Empfänger eingesetzt werden.

Mechanische Schwingungserzeuger finden in der Praxis nur noch selten Anwendung. Sie funktionieren nach dem Prinzip der Lippenpfeifen. Ein vorgegebenes kleines Luftvolumen V wird durch mechanische Rückkopplung zu Resonanzschwingungen angeregt. Die Rückkopplung wird erzeugt, indem der Luftstrom gegen eine meist ringförmige Schneide geblasen wird. Nach diesem Prinzip arbeitet die Galton- Pfeife.

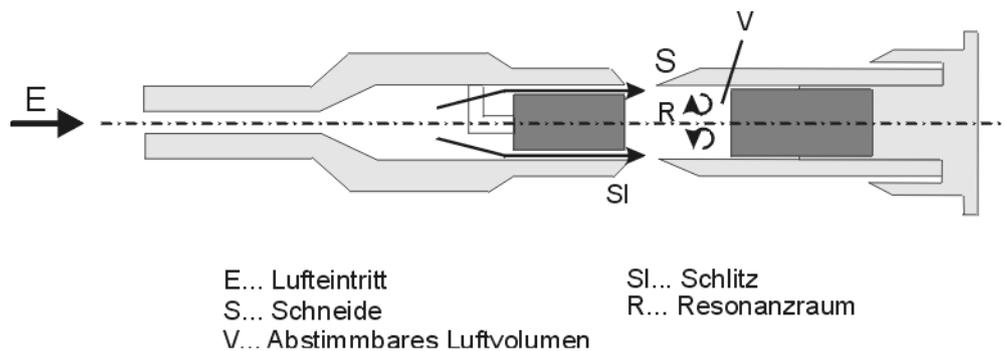


Abbildung 3.13: Galton- Pfeife

Ein Beispiel für eine Flüssigkeitspfeife ist die Pohlman- Pfeife. Sie arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie die Galton- Pfeife, nur dass eine Flüssigkeit an Stelle des Gases (der Luft) verwendet wird. Diese Pfeife kann dort eingesetzt werden, wo die Flüssigkeit selbst beschallt werden soll. Viele weitere Lösungsideen zur mechanischen Erzeugung von Ultraschall sind bekannt. Es gibt jedoch keine zufrieden stellende Möglichkeit, um Ultraschall auf feste Körper oder beliebige Flüssigkeiten zu übertragen. Aus diesem Grund sind die mechanischen Schwingungserzeuger in der Praxis unüblich.

Bei der **thermischen Ultraschallerzeugung** werden Gase und Flüssigkeiten periodisch überhitzt. Dadurch werden lokal ausgelöste mechanische Druckschwankungen hervorgerufen. Dieses Verfahren wird bei der Erzeugung höchster Ultraschallfrequenzen im Gigahertzbereich eingesetzt.

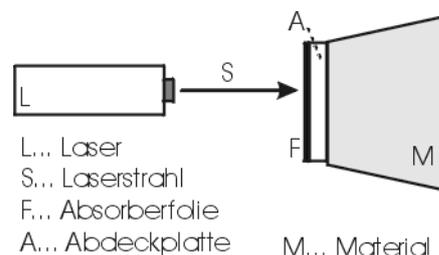


Abbildung 3.14: Impulsanregungsverfahren

Durch Einstrahlung von Licht lassen sich ebenfalls Ultraschallwellen in Flüssigkeiten und Festkörpern anregen. Es handelt sich hier um ein **optisches Verfahren**. Ein Laser kann Ultraschallimpulse auslösen. Die Laserstrahlung trifft auf eine Absorberfolie. Durch Hitzeschock entstehen über thermische Ausdehnungen Spannungen und damit Stoßwellen im Material. Dieses Prinzip ist für flüssige und feste Körper geeignet.

Das am häufigsten verwendete Prinzip zur Ultraschallerzeugung basiert auf der Erzeugung elektrischer Schwingungsenergie mit einem nachgestellten **elektromechanischen Schallwandler**. Die elektrische Schwingungsenergie wird mittels Hochfrequenzgeneratoren erzeugt. Der Schallwandler setzt die elektrische Hochfrequenzenergie in mechanische Energie gleicher Frequenz um. Grundlage von „Lautsprechern“ ist eine schwingungsfähige Membran kleiner Masse, aber großer Fläche. Sie wird als Biegeschwinger betrieben. Bewegt wird die Membran durch elektrostatische, elektromagnetische oder elektrodynamische Kräfte. Eine Eigenfrequenz von nur 10 Hz ist jedoch zu tief zur Ultraschallerzeugung. Aus diesem Grund wird keine Membran, sondern ein Resonator hoher Güte benutzt. Ein Resonator ist ein Körper, der bei der Übertragung von Energie einer Erzeugerquelle, bei einer bestimmten Frequenz f_0 , die gesamte abgegebene Energie aufnimmt und dann mit maximaler Amplitude schwingt. Diese Frequenz wird Resonanzfrequenz genannt, schwingungsfähige Systeme und Körper werden als Resonatoren bezeichnet. Der Resonator wird als Ganzes zur Schwingung angeregt. In den meisten Fällen kommen Longitudinalschwinger zum Einsatz. Biegeschwinger und Transversalschwinger sind auch möglich, aber selten. Bei allen Varianten ist die Anregung einer mechanischen Resonanz Voraussetzung.

Ein Wandler bzw. Resonator sollte bei hohen US- Intensitäten in Flüssigkeiten und festen Stoffen:

- bei der gewünschten Frequenz eine ausgeprägte Eigenresonanz besitzen,
- bei seiner Eigenfrequenz möglichst geringe mechanische und elektrische Verluste besitzen,
- zur Erzeugung hoher oder höchster Intensitäten eine ausgezeichnete Wechselfestigkeit besitzen, damit auch bei hohen Schwingungsamplituden seine elastischen Grenzen nicht überschritten werden.

Als Resonator werden Platten oder Stäbe benutzt, die zu longitudinalen Eigenschwingungen in Richtung der Dicke (im Fall einer Platte) oder der Länge (im Fall eines Stabes) angeregt werden. Bei einer quadratischen oder runden Platte mit wesentlich kleinerer Dicke d als Querdimension gilt:

$$f_0 = \frac{c}{2d} \quad (3.2)$$

Analog verhält sich ein Stab mit erheblich größerer Länge als Querabmessungen. Die tiefste Frequenz berechnet sich ebenfalls nach der Formel 3.2, nur dass die Länge l des Stabes statt der Dicke d eingesetzt wird.

Der **Piezoeffekt** tritt in einigen kristallinen Isolatoren auf. Sie besitzen eine Achse, die in Richtung der polaren Achse eine von Natur vorhandene (oder künstlich erzeugte) Asymmetrie hinsichtlich der inneren dielektrischen Struktur des Kristallgefüges besitzt. Diese Achse wird auch elektrische Kristallachse genannt. Platten aus diesen Kristallen

werden senkrecht zur elektrischen Kristallachse geschnitten. Wird die Platte mechanischem Druck ausgesetzt, werden beidseitig auf den Oberflächen elektrische Ladungen induziert. Der reziproke Piezoeffekt ist die Umkehrung dieser Erscheinung. Wenn die Platte parallel zur elektrischen Kristallachse in ein elektrisches Feld gebracht wird, dann ändert sich die Dicke der Platte geringfügig. Die Platte schwingt mit der gleichen Frequenz wie das elektrische Feld. Der elektromechanische Kopplungsfaktor k ist ein Maß für die Stärke des piezoelektrischen Effektes. Es gilt:

$$k^2 = \frac{\omega_{em}}{\omega_m} \quad \text{bzw.} \quad k^2 = \frac{\omega_{me}}{\omega_m}$$

wobei:

ω_m ... aufgewendete mechanische Energie

ω_{em} ...piezoelektrisch erzeugt Energie

ω_e ... aufgewendete elektrische Energie

ω_{me} ...piezoelektrisch erzeugte mechanische Energie

Piezoelektrische Schwinger eignen sich sowohl zur Erzeugung als auch zum Empfang von US- Schwingungen. Werden die Plattenoberflächen metallisiert, kann die elektrische Wechselspannung direkt angelegt werden. Die Eigenfrequenz f_d ist abhängig von der Dicke d der Platte.

$$f_d = \frac{2880}{d}$$

Bei einer Eigenfrequenz von 10 MHz darf der Kristall nur 0,288 mm dick sein. Dicken-schwinger sind aus Herstellungsgründen auf den Dickenbereich zwischen 10 und 0,1 mm beschränkt. Dies entspricht einem Frequenzbereich von 0,2 bis 20 MHz. Ein Beispiel für solch ein Kristall ist Quarz. Quarz besitzt jahrzehntelang eine natürliche Polarität. Hinzu kommt, dass Quarz eine sehr hohe mechanische Festigkeit sowie sehr geringe Eigendämpfung besitzt und Wasser unempfindlich ist. Außerdem besitzt Quarz einen hohen Umwandlungspunkt von 576°C. Ab dieser Temperatur ändert sich die Kristallstruktur sprunghaft. Von Nachteil ist, dass sich Quarz nur in sehr beschränkter Größe herstellen läßt und der elektromagnetische Kopplungsfaktor trotz größtmöglichem Wirkungsgrad sehr gering ist. Quarz kann nur bis Temperaturen von 200°C eingesetzt werden, weil Quarz- Einkristalle einen sehr hohen und in verschiedenen Achsenrichtungen unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten besitzen. Daher besteht die Gefahr, dass der Kristall bei plötzlichen Temperaturänderungen zerspringt.

Inzwischen wird auch Keramik verwendet. Keramische Massen werden als kristallines Pulver hergestellt und anschließend zu einem sehr harten keramischen Formkörper hoher Festigkeit gebrannt. Die fertige Keramik muss nochmals auf 100°C erwärmt werden, wobei ein elektrisches Feld angelegt wird. Die elektrischen Dipole der Keramik richten sich entlang des Feldes aus. Eine elektrische Kristallachse wird gebildet, die Dipole werden polarisiert. Der Körper besitzt und behält die piezoelektrischen Eigenschaften

auch nach dem Abkühlen. Der **Curie- Punkt** gibt an, ab welcher Temperatur der Körper diese Eigenschaft wieder verliert. Bei einigen Körpern liegt dieser bei über 1000°C . Hinzu kommt, dass keramische Massen wesentlich kleinere Ausdehnungskoeffizienten besitzen, so dass sie gegenüber Quarz temperaturunempfindlicher sind. Keramische Schwinger können je nach Gebrauch (z.B. hohe mechanische Festigkeit und Güte für Schwinger höchster Leistungsdichte, möglichst hohe Curie- Temperatur, möglichst geringe elektrische Verluste, möglichst hohe Frequenzkonstanz oder hoher Kopplungsfaktor) speziell hergestellt werden.

Piezoelektronische Schallwandler sind auch für niedrigere Frequenzen zwischen 10 und 50 kHz für aktive US- Anwendungen geeignet. Die Wandler müssen hier „gedämpft“ werden.

Der Magnetostruktionseffekt tritt nur bei einigen leitenden ferromagnetischen Körpern auf. Wenn der Körper einem parallel zu seiner Achse verlaufenden Magnetfeld ausgesetzt wird, ändert er geringfügig seine Länge. Der Magnetostruktionseffekt ist nicht polar, d.h. von der Richtung des Magnetfeldes unabhängig. Wenn der Stab in ein magnetisches Wechselfeld gebracht wird, führt er mechanische Schwingungen der doppelten Frequenz wie die des Magnetfeldes aus. Ein Nachteil bei diesem Prinzip ist, dass bei jeder Umkehrung des Magnetfeldes in einem ferromagnetischen Stab Hystereseverluste auftreten. Hierbei kommt es zur Umwandlung von Energie in Wärme. Die Hystereseverluste können verringert werden, indem das magnetische Wechselfeld mit einem magnetischen Gleichfeld überlagert wird. In diesem Fall schwingt der magnetostruktive Körper mit der gleichen Frequenz wie die erzeugende elektromagnetische Schwingung.

Magnetostruktive Schwinger werden besonders für Unterwasserortung benutzt, da sie gegenüber Salzwasser unempfindlich sind. Die Schwinger sind fast ausschließlich platten- oder stabförmige Körper. Sie besitzen ein Fenster (s. rechte Skizze). Dadurch entstehen Schenkel, die von stromdurchflossenen Wicklungen zur Erzeugung des Magnetfeldes umhüllt sind. Durch diese Form entsteht ein geschlossener magnetischer Kreis. Beide Schenkel verlängern bzw. verkürzen sich gleichzeitig entsprechend der Stromrichtung. Die Massen an beiden Enden, die außerhalb der Wicklungen liegen, tragen nicht aktiv zur Schwingungserzeugung bei. Sie sind aber mitbestimmend bei der Resonanzfrequenz des Gebildes.

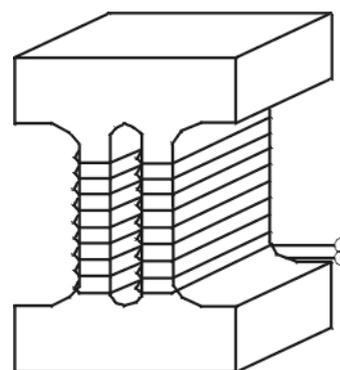


Abbildung 3.15: Magnetostruktiver Schwinger

Um Hystereseverluste zu minimieren, ist eine Vormagnetisierung mittels Gleichstrom zweckmäßig. Auftretende Wirbelströme werden vermindert, indem der Schwinger nicht aus einem kompakten Material, sondern aus geschichteten Blechen (0,1 bis 0,5 mm Dicke) hergestellt wird. Der Schwinger wird zur besseren elektrischen Isolation meist oberflächlich oxydiert und häufig zusammengekittet.

Sowohl die Produktion als auch der Betrieb von magnetostriktiven Schwingern ist teurer als bei piezoelektrischen Schwingern. Die benötigte elektrische Spannung ist dafür geringer. Bei guter Isolation des Wicklungsdrahtes ist es möglich, diese Schwingern ohne zusätzlichen Schutz in aggressive oder kochende Flüssigkeiten zu tauchen. Die Verwendbarkeit ist auf Frequenzen unter 50 kHz beschränkt.

Bei der **zerstörungsfreien Prüfung** (Frequenzbereich von 0,2- 20 MHz) werden in fast allen Fällen eher kurze US- Impulse von wenigen Einzelschwingungen benötigt. Hier kommen ausschließlich piezoelektrische Schwingern zum Einsatz. Es werden mechanisch außerordentlich stark gedämpfte Schwingern eingesetzt, um das Nachschwingen nach Beendigung des anregenden elektrischen Impulses zu unterdrücken. Die mechanische Dämpfung erfolgt durch eine an der rückseitigen Oberfläche angekittete Kunstharzplatte. Die Kunstharzplatte ist zudem mit Schwermetallpulver beschichtet. Die Dämpfung wird umso besser, je größer der Schallwiderstand des Dämpfungskörpers und je kleiner der des Schwingers ist. Der Dämpfungskörper selbst muss eine starke Absorption für die benutzte Frequenz aufweisen, damit keine von seiner Rückwand reflektierte US- Energie zum Schwingern zurückgelangt. Die Vorderseite des Schwingers muss zur Schallübertragung auf den Prüfling möglichst gut angekoppelt sein. Dies geschieht unter Verwendung einer Wasser-, Öl- oder Fettschicht. Schwingern mit kleinen Wellenwiderständen sind besser geeignet, denn je stärker der Schwingern gedämpft ist, desto geringer wird seine Empfindlichkeit und umso geringer wird der Wirkungsgrad.

3.3.1 Arten von Sensorköpfen

Bei passiven US- Anwendungen (z.B. der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung) werden drei unterschiedliche Arten von Sensoren benutzt, die kurz vorgestellt werden sollen.

Beim **Normalprüfkopf** dient der piezoelektrische Schallwandler zum Senden und Empfangen der longitudinalen US- Wellen. Das Anpassungselement schaltet die jeweils benötigte Option ein. Normalprüfköpfe besitzen rückseitig Dämpfungskörper, um mechanische Nachschwingungen nach Ablauf des elektrischen Sendeimpulses zu verhindern. Gleichzeitig dienen sie zur mechanischen Abstützung des Schwingers. Dies ist besonders bei hohen Frequenzen nötig, da der Schwingern selbst sehr dünn und zerbrechlich ist. Vor dem Schwingern befindet sich meist eine Schutzschicht. Sie dient nicht nur der Vermeidung mechanischer Beschädigungen des Schwingers, sondern auch der Verbesserung der Ankopplung bei nicht ganz glatten Oberflächen des Prüflings. Die Ankopplung an das Prüfstück erfolgt mit Wasser, Öl oder Fett (Kopplungsschicht). Die Vorderseite trägt

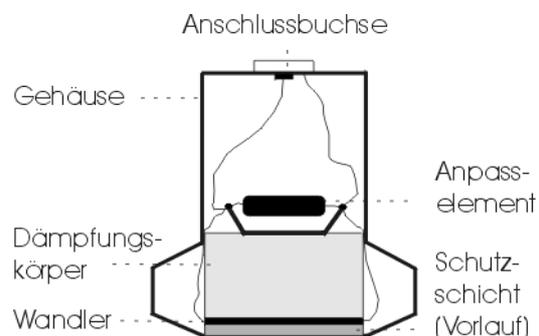


Abbildung 3.16: Normalprüfkopf

Die Vorderseite trägt

eine dünne, elektrisch mit Masse verbundene Silberschicht, da der Schwinger sich zwischen zwei definierten Elektroden befinden muss. Unmittelbar vor dem Prüfkopf kommt zunächst das Nahfeld, dann schließt sich das Fernfeld an.

Der **S/E- Prüfkopf** besitzt einen Wandler zum Senden und einen Wandler zum Empfangen der longitudinalen US- Wellen. S/E- Köpfe werden vor allem bei der oberflächennahen Prüfung eingesetzt. Die mechanische Entkoppelung beider Köpfe ist sehr wichtig, denn der Sendeimpuls soll möglichst nicht auf den Eingang des Empfangsverstärkers fallen. Als Vorlaufstrecke werden oft zwei Klötze aus Kunststoff verwendet. Dadurch wird der zeitliche Abstand zum Sendeimpuls größer und direkt über der Oberfläche des Prüflings endet das Nahfeld. Durch die leichte Neigung beider Wandler (dachförmige Anordnung) können größere Flächen mit geringerer Tiefe (ca. 1 mm) geprüft werden.

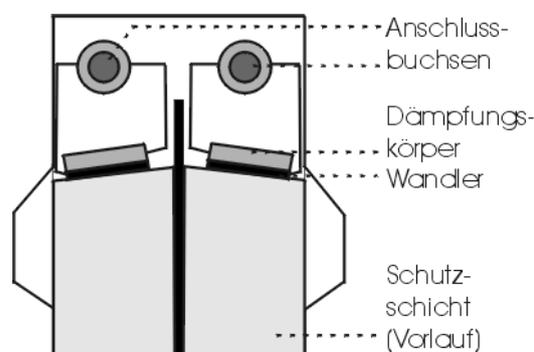


Abbildung 3.17: S/E- Prüfkopf

Für viele Prüfaufgaben sind nicht senkrechte, sondern schräge Schallwellen erwünscht, die mit einem **Winkelprüfkopf** erzeugt werden. So können senkrechte Risse besser erfasst werden. Ein Beispiel dafür ist die Prüfung von Schweißnähten. Der Schwinger steht schräg und strahlt über einen Keil aus Kunststoff auf den Prüfling. Im Keil selbst laufen die Wellen als Longitudinalwellen mit der Schallgeschwindigkeit c_L . Beim Übergang vom Keil auf das Prüfstück treffen die US- Wellen schräg auf. Es kommt zur Brechung und Wellenumwandlung. Da es für die Prüfung ungeeignet ist, mit zwei Arten von Wellen zu operieren, wird der Wandler so schräg auf den Keil gesetzt, dass im Prüfling nur Transversalwellen entstehen.

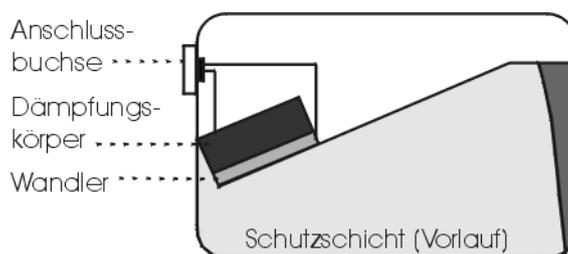


Abbildung 3.18: Winkelprüfköpfe

Eine weitere Prüfkopfart sei nur am Rande erwähnt. Es handelt sich hierbei um Prüfköpfe mit verstellbaren Winkeln.

Kapitel 4

Darstellung des zu untersuchenden hydrostatischen Messsystems

Es wird zwischen zwei verschiedenen Arten von Schlauchwaagensystemen unterschieden. Zum einen die klassische Variante, wie sie Abbildung 2.1 auf Seite 8 darstellt. Dabei werden zwei oder mehrere Gefäße mit einem flüssigkeitsgefüllten Schlauch oder einer Röhre verbunden. Optional können die Gefäße auch mit einem Luftschlauch zum Druckausgleich verbunden sein. Zum anderen kommen Schlauchwaagen mit einer freien Flüssigkeitsoberfläche zum Einsatz.

Für Schlauchwaagensysteme ist die Bernoulligleichung gültig:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho \cdot g \cdot z = \text{const.}$$

wobei:

ρ ...Dichte der Flüssigkeit

v ...Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit

p ...Druck

g ...Erdbeschleunigung

z ...Höhe über einem beliebigen Niveau

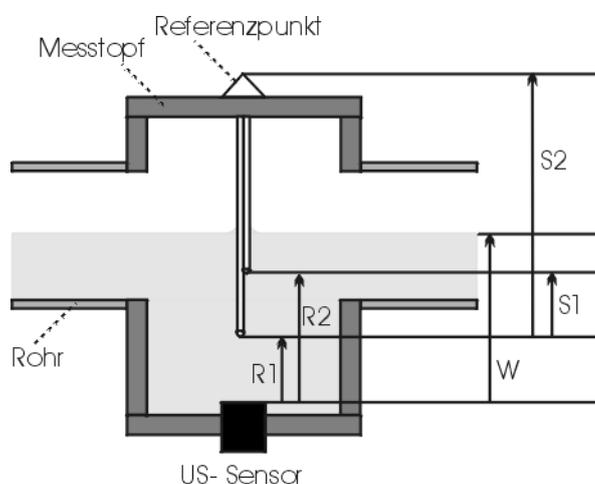
In Schlauchwaagen wird von einer ruhenden Flüssigkeit ausgegangen ($v = 0$), so dass die Bernoulligleichung vereinfacht werden kann.

$$p + \rho \cdot g \cdot z = \text{const.}$$

Der größte Nachteil der klassischen Variante besteht in der hohen Temperaturabhängigkeit. Bei der vertikalen Wassersäule auftretende Temperaturänderungen verursachen eine Änderung der Dichte und somit eine Volumenänderung der Flüssigkeit. Ebenfalls ist ein zusätzlicher Schlauch zum Druckausgleich hinderlich.

Bei einer Schlauchwaage mit freier Flüssigkeitsoberfläche sind die vertikale Wassersäule und die dadurch verursachten Temperaturschwankungen Null. Ein zusätzlicher Schlauch zum Druckausgleich ist nicht nötig, da die Luft in der Röhre zirkulieren kann. Ein Nachteil bei einer Länge von 33 km sind Wellen, die sich über die Wasseroberfläche ausbreiten können. Wellen werden durch Erschütterungen von Anlagen im Tunnel oder durch die Erdbeben verursacht. Die Erdbeben sind rechnerisch zu berücksichtigen. Nähere Untersuchungen hierzu befinden sich in der Quelle [15].

Das Konzept des zu untersuchenden Messsystems besteht darin, ein Rohr annähernd horizontal zu verlegen und bis zur Hälfte mit einer Flüssigkeit (Leitungswasser) zu füllen. In bestimmten Abständen werden nachfolgend skizzierte Messeinrichtungen eingebaut.



- R1... Messung zum ersten Referenzpunkt
- R2... Messung zum zweiten Referenzpunkt
- W... Messung zur Wasseroberfläche
- S1... Sollstrecke 1
- S2... Sollstrecke 2

Abbildung 4.1: Messaufbau

In den Messtopf wird eine Referenzstrecke (S1) installiert, die es ermöglicht, das System vor jeder Messung zu kalibrieren. Die Streckenmessung erfolgt mit dem Ultraschallmessgerät USM25 der Firma Agfa NDT (früher Krautkrämer). Um die Höhenmessung auf einen Referenzpunkt außerhalb des Messtopfes zu beziehen, wird eine weitere Sollstrecke benötigt (S2). Der Referenzpunkt dient für weitere trigonometrische Messungen zwischen Beschleuniger und Schlauchwaagensystem.

4.1 Überblick über die Instrumente und Geräte

Das Messsystem besteht aus dem Ultraschallprüfgerät USM25, dem Prüfkopf H10 KB3 (beides Produkte der Firma AgfaNDT GmbH (früher Krautkrämer)) und der Referenz-

strecke zur Kalibrierung des Systems.

4.1.1 Eigenschaften des Prüfkopfes H10 KB3 der Firma AgfaNDT (Krautkrämer)

Sensor und Gerät arbeiten nach dem Prinzip des Impulsechoverfahrens. Der Prüfkopf H10 KB3 ist ein Normalprüfkopf, der gleichzeitig zum Senden und Empfangen benutzt wird (s.S. 42). Die Dauer des erzeugten Impulses ist wesentlich kürzer als die Mindestlaufzeit eines Impulses im Medium, damit am Schallkopf der Sendepuls völlig abgeklungen ist, wenn der reflektierte Impuls (Echo) dort wieder eintrifft. Neben dem Impulsverfahren gibt es noch das Resonanzverfahren, das Durchstrahlungs- oder Intensitätsverfahren und das Laufzeitverfahren. Das Impulsechoverfahren ist das genaueste der genannten Verfahren.

Der Prüfkopf H10 KB3 (Bezeichnung 10-5 im unteren Bild) arbeitet mit einer Frequenz von 10 MHz. Bei einer Frequenz von 10 MHz beträgt die Wellenlänge des Ultraschalls $\lambda = 0,144 \text{ mm}$ (für 10°C warmes Wasser bei einer Schallgeschwindigkeit von $c = 1440\text{m/s}$).

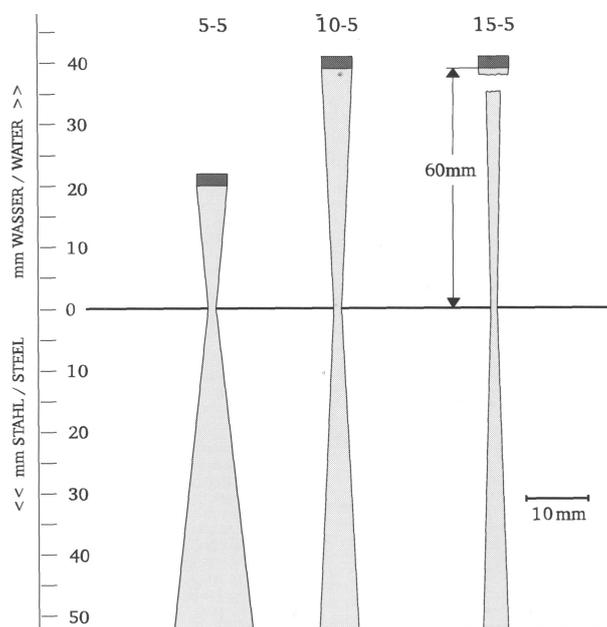


Abbildung 4.2: Aussehen der Strahlenkeule (Quelle [10])

Der Schwinger hat einen Durchmesser von 5 mm und besteht aus der Piezokeramik Bleizirkonattitamat. Die Keramik besitzt eine Curietemperatur von 350°C und eine Dichte von ca. 8 g/cm^3 . Die akustische Impedanz (entspricht dem Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit) beträgt ca. 30 Mrayl. Schutzschicht und Gehäuse bestehen aus Edelstahl. Im Anhang auf Seite 98 befindet sich eine technische Zeichnung des

Sensors.

Durchmesser:	5 mm
Frequenz:	10 MHz
Wellenlänge in 10°C warmen Wasser:	0,144 mm
Nahfeldlänge/ Fokusabstand:	40 mm

Tabelle 4.1: Eigenschaften des Sensors H10 KB3

Nachdem vom Sensor ein Impuls erzeugt wurde, schaltet sich das USM25 für $3838\mu\text{s}$ auf Empfang. Die erzeugten Longitudinalwellen treffen auf eine Grenzschicht und werden reflektiert. Das vom USM25 registrierte Signal ähnelt der unten dargestellten Hf-Welle. Je nachdem, ob eine starke oder schwache Dämpfung vorliegt, verändert sich das Aussehen der Wellen.

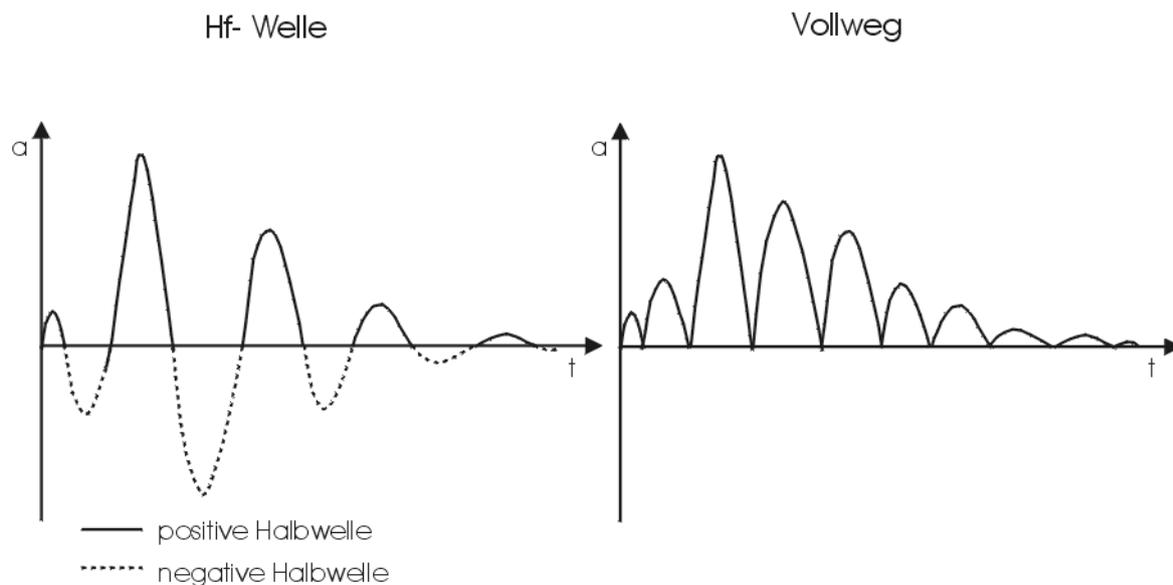


Abbildung 4.3: Hf- Welle, positive und negative Halbwelle, Vollweg

4.1.2 Eigenschaften und Funktionen des USM25 der Firma AgfaNDT (Krautkrämer)



Abbildung 4.4: USM25 mit Sensorkopf der H18 KB3 Firma Krautkrämer (Quelle [15])

Das USM25 bestimmt die Laufzeitmessung des vom Messsensor erzeugten Signals. Mit Hilfe der im Gerät gespeicherten Schallgeschwindigkeit wird die Zeitmessung in Strecken umgerechnet. Korrekturen, aufgrund einer falschen Schallgeschwindigkeit, sind nachträglich zu berechnen.

Beim USM25 kann ausgewählt werden, ob das empfangene Signal als Vollweg, positive oder negative Halbwellen oder Hf-Welle graphisch dargestellt werden soll. Die Abbildung 4.3 veranschaulicht die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten. Die Hf-Welle kann in positive und negative Halbwellen unterteilt werden. Werden nur die Absolutbeträge dargestellt, ergibt sich der Vollweg. Die Abbildung 4.1.2 zeigt eine positive Halbwellen.

Mit Hilfe von Blenden wird die Streckenmessung vorgenommen. Eine Blende wird auf ein Signal eingestellt und je nach Messmodus erfolgt die Streckenmessung. Innerhalb einer Blende wird die Position, an der die Streckenmessung erfolgt, durch ein kleines Dreieck markiert. Es ist vorteilhaft, das Signal mit der größten Amplitude (stärkstes Pik) anzumessen. Wenn gegen eine Wasseroberfläche gemessen wird, ist dies das zweite Pik der positiven Halbwellen (eventuelle Phasenverschiebungen beachten). Die Entscheidung, welche Wellen angezeigt und gemessen werden soll, ist sehr wichtig, da dies einen systematischen Einfluss auf die Streckenmessung besitzt. Wird eine falsche Einstellung gewählt, wird das Messergebnis verfälscht.

Es kann zwischen den Messmodus „Spitze“ und „Flanke“ gewählt werden. Wenn die Spitze des stärksten Piks registriert werden soll, ist der Messmodus „Spitze“ zu benutzen. Die Vorteile des Modus „Spitze“ bestehen darin, dass die Messung auch dann durchgeführt werden kann, wenn das Signal unter dem Schwellenwert liegt und der Messwert unabhängig von der Steilheit der Flanke ist. Der Schwellenwert kann im USM25 vom Benutzer eingestellt werden.

Beim Modus „Flanke“ wird der Schnittpunkt der ersten Echoflanke mit der Blende gemessen. Der Messmodus „Flanke“ ist vorteilhaft, wenn immer dieselbe Flanke an gemessen werden soll, egal, ob der zweite Pik stärker wird oder nicht. Mit diesem Verfahren können Phasensprünge am besten vermieden werden.

Die Messung „Flanke“ ist zu bevorzugen (s. Kapitel 5.1). Das Ergebnis der Messung wird auf dem Monitor ausgegeben oder kann über eine Schnittstelle abgefragt werden.



Abbildung 4.5: Monitor des USM25

Der Frequenzbereich, in dem das USM25 Messungen durchführen kann, beträgt 20 MHz. Dies bedeutet nicht, dass mit einer Frequenz von 20 MHz gemessen wird, sondern dass empfangene Frequenzen im Bereich von 0- 20 MHz vom Gerät ausgewertet werden können. Der Prüfkopf arbeitet wie oben erwähnt mit einer Frequenz von 10 MHz. Durch Absorption und Streuung des US- Signals empfängt das USM25 nicht nur Signale mit einer Frequenz von 10 MHz, sondern ein breites Frequenzspektrum. Es besteht die Möglichkeit im Gerät einzustellen, welche Frequenzen dargestellt werden sollen. Die Darstellung niedriger Frequenzen ist bei sehr starken Mächtigkeiten (z.B. 3 m Wassersäule) sinnvoll. Bei normaler Anwendung ist die Darstellung der Frequenzen zwischen 2- 20 MHz zu empfehlen.

Während der Messung besteht die Möglichkeit Bildbreite, Lautstärke und Bildanfang zu variieren. Die Lautstärke des Signals reicht von 0 dB bis 110 dB.

Weitere Einstellungen müssen vorgenommen werden, damit die Messung optimal durchgeführt werden kann. So ist eine kleine INTENSITÄT zu wählen, da hierbei die Flanken steiler werden. Die Vorlaufzeit (mehr ab Seite 69) muss eingegeben werden, sofern diese bekannt ist. Wenn sie nicht bekannt ist, wird die Messung um einen konstanten Wert verfälscht.

Alle Einstellungen können auch über die RS 232- Schnittstelle programmiert werden. Die Ergebnisse der Messung können ebenfalls über die Schnittstelle ausgegeben werden.

Auflösungsvermögen in Wasser:	4,3 ns (entspricht 3 μm)
Ausgabegenauigkeit:	Auf 0,01 mm genau auf dem Monitor, 0,003 mm genau bei Abfrage über die Schnittstelle
Frequenzbereiche:	0,5- 20 MHz
Schallgeschwindigkeit:	1000- 15000 m/s
Verstärkung:	0- 110 dB in Schritten von 0,5/ 1/ 2/ 6/ 12 dB (Stufe 0: verriegelt)
Impulsfolgefrequenz:	8- 1000 Hz, in 10 Stufen einstellbar
Echodarstellung:	Vollweg, negative und positive Halb- welle, Hf- Welle
Schnittstelle:	RS 232 bidirektional
Abmessungen:	245 x 265 x 46 mm (H x B x T)
Gewicht:	1,6 kg einschließlich Batterien

Tabelle 4.2: Eigenschaften des Ultraschallmessgerätes USM25

4.1.3 Der Messstift

Die Messung der Referenzstrecke muss hoch genau geschehen, da sie zur Kalibrierung des Systems genutzt wird. Damit besitzt sie systematischen Einfluss auf die Höhenbestimmung.

Optimal ist eine konvex geformte Oberfläche wie die einer Kugel. Das Ultraschallsignal wird an der Oberfläche diffus reflektiert. Es erfolgt eine punktuelle Messung des Messstiftes. Ist die Spitze des Messstiftes eben, werden viele Strahlen zum Sensor zurückreflektiert. Dabei legen alle Strahlen unterschiedliche Wege zurück. Die Form des Messstiftes sollte somit konvex sein.

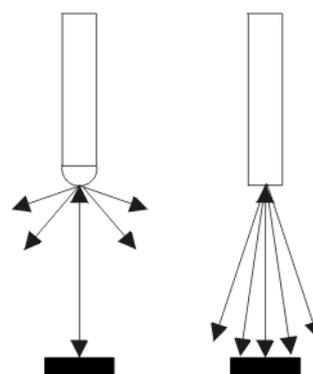


Abbildung 4.6: Messstift

Wichtig ist, dass das Material nicht rostet oder korrodiert, da es sich ständig im Wasser befindet. Ebenfalls sehr wichtig ist, dass das Material einen sehr geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzt, da eine Längenänderung systematischen Einfluss auf die Messung hat. Empfehlenswerte Materialien sind Invar, Zerodur oder Diamant. Im nächsten Kapitel 4.2 wird dieses Problem näher betrachtet.

4.2 Theoretische Genauigkeitsabschätzungen

Das Ultraschallmessgerät USM25 besitzt eine zeitliche Auflösung von 4,3 ns. Wird eine Schallgeschwindigkeit in Wasser von $c = 1440 \text{ m/s}$ (bei 10°C) angenommen, ergibt sich eine Auflösung einer Messung von $3 \mu\text{m}$.

$$\begin{aligned} c &= \frac{2s}{t} \\ s &= \frac{c \cdot t}{2} \\ \Delta s &= \frac{c \cdot \Delta t}{2} \\ &= \frac{1440 \text{ m/s} \cdot 4,3 \text{ ns}}{2} \\ &= 3 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Die geforderte Genauigkeit der vertikalen Komponente beträgt: $\sigma_v \leq 0,2 \text{ mm}$ auf 600 m. Diese Genauigkeitsforderung muss in verschiedene Komponenten geteilt werden. So hat nicht nur die Höhenbestimmung des Referenzpunktes sR darauf Einfluss, sondern auch trigonometrische Messung zwischen Referenzpunkt und Komponenten des Beschleunigers σ_T . σ_T^2 kann mit $0,0064 \text{ mm}^2$ geschätzt werden, wenn eine Entfernung von 12 m zwischen Referenzpunkt und Komponenten des Beschleunigers angenommen wird und davon ausgegangen wird, dass nur horizontale Zenitdistanzen mit einer Genauigkeit von $\sigma_z = 0,3 \text{ mgon}$ gemessen werden. Dann gilt: $\sigma_T^2 \approx 2 \cdot (s\sigma_z)^2$ (s. [15]).

Daraus ergibt sich eine Genauigkeit für sR von ca. 0,180 mm.

Die Wasseroberfläche ist eine Äquipotentialfläche und damit laut Definition fehlerfrei.

Einen sehr großen Einfluss auf die Streckenmessung mit Ultraschall hat die Temperatur. Eine Näherungsformel wurde bereits im Abschnitt 3.2 auf Seite 37 genannt.

Nun soll untersucht werden, welche Standardabweichung die Temperaturmessung haben darf, damit die Streckengenauigkeit dem Auflösungsvermögen des Sensors von $3 \mu\text{m}$ entspricht.

$$\begin{aligned} s &= t \cdot c = t \cdot (1410 + 4,21 \cdot T - 0,037 \cdot T^2) \\ \sigma_s^2 &= t^2 \cdot (4,21 - 0,037 \cdot 2 \cdot T)^2 \cdot \sigma_T^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_T^2 = \frac{\sigma_s^2}{t^2 \cdot (4,21 - 0,037 \cdot 2 \cdot T)^2}$$

Die Zeitmessung erfolgt fehlerfrei. Bei einer 5 cm langen Strecke in 21°C warmem Wasser muss die Temperatur auf 0,033 K genau bestimmt werden.

Die Zeit ist proportional zur Strecke. Je größer die Strecken werden, desto genauer müssen die Temperaturen beobachtet werden. Das Mindestmaß einer Streckenmessung entspricht der Länge des Nahfeldes (4 cm).

Bei nachfolgenden Experimenten erfolgte die Temperaturmessung mit dem Agilent 34970A. Mit diesem Gerät sind Messungen auf 0,01 K Genauigkeit möglich. An allen gemessenen Strecken wird die Temperaturkorrektur angebracht.

Beim späteren Einsatz des Gerätes soll auf Temperaturmessungen verzichtet werden. Mit Hilfe der integrierten Referenzstrecke wird bei jeder Messung der Wasseroberfläche das Messsystem für den Zeitpunkt der Messung kalibriert.

Die Höhe des Referenzpunktes HR kann mit der folgenden Formel ermittelt werden (HW ist die Höhe der Wasseroberfläche). Die Skizze, in der die untenstehenden Strecken der Formel erklärt werden, befindet sich auf Seite 46.

$$H_R = H_W - (W - R_2) - (R_2 - R_1) + S_2$$

Die gemessenen Strecken werden mit dem Maßstab m ($m = S_1 / (R_1 - R_2)$) multipliziert.

$$\begin{aligned} H_R &= H_W - m \cdot (W - R_2) - m \cdot (R_2 - R_1) + S_2 \\ &= H_W + S_2 - S_1 \cdot \frac{W - R_1}{R_2 - R_1} \end{aligned}$$

Die Standardabweichung der Streckenmessung wird mit σ_M angegeben, die Standardabweichung der Referenzstrecken mit σ_S und die Standardabweichung der Höhe des Referenzpunktes mit σ_R (wie oben).

$$\sigma_R^2 = \sigma_S^2 \cdot \left[1 + \frac{(W - R_1)^2}{(R_2 - R_1)^2} \right] + \sigma_M^2 \cdot \left[S_1^2 \cdot \left(\frac{1 + (W - R_2)^2}{(R_2 - R_1)^2} + \frac{(W - R_1)^2}{(R_2 - R_1)^4} \right) \right]$$

Die Referenzstrecke (R2 - R1) sollte sehr groß gewählt werden, der Abstand zwischen R2 und W sehr klein.

Wenn σ_R auf 0,02 mm genau bestimmt werden soll und σ_M dem Auflösungsvermögen des Sensors entspricht (0,003 mm), dann muss σ_S auf 0,002 mm genau bekannt sein.

(weitere Annahmen: $W - R1 = 40 \text{ mm}$, $W - R2 = 10 \text{ mm}$, $R2 - R1 = 30 \text{ mm}$).

Die Standardabweichung der Referenzstrecke sollte $2 \mu\text{m}$ oder weniger betragen. Es ist nun zu prüfen, welches Material diese Genauigkeit erreichen kann. Selbst bei größeren Temperaturschwankungen sollte der Grenzwert nicht überschritten werden.

Stoff	$\alpha [K]^{-1}$	$\Delta l \text{ [mm]} \text{ (Länge der Referenzstrecke: 3cm)}$			
		$\Delta T = 10K$	$\Delta T = 20K$	$\Delta T = 30K$	$\Delta T = 50K$
Stahl	$11,0 \cdot 10^{-6}$	0,003	0,007	0,010	0,017
Diamant	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,000	0,001	0,001	0,002
Graphit	$7,0 \cdot 10^{-6}$	0,002	0,005	0,007	0,012
Porzellan	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,001	0,002	0,004	0,006
Quarzglas	$9,0 \cdot 10^{-6}$	0,003	0,005	0,008	0,014
Invar	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,000	0,001	0,001	0,002
Zerodur	$5,0 \cdot 10^{-6}$	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabelle 4.3: Genauigkeitsbetrachtungen zum Material der Referenzstrecke

Nur Diamant, Invar und Zerodur erfüllen die Bedingungen. Zerodur ist eine Glaskeramik mit quasi Nullausdehnung und hervorragender 3D- Homogenität. Alle drei Stoffe eignen sich auch für den längeren Einsatz im Wasser.

Kapitel 5

Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften des Messsystems (USM25 und Prüfkopf H10 KB3) experimentell näher untersucht. Zu den Experimenten gehört die Untersuchung der räumlichen Ausbreitung des Ultraschalls, die Genauigkeitsbetrachtung und Temperaturabhängigkeit des Sensors, sowie das Bestimmen der Vorlaufzeit und eventuell vorhandener Sprungeffekte. Diese Untersuchungen werden hinsichtlich Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Stabilität und Einsatzmöglichkeiten beim DESY durchgeführt.

Während der Auswertung werden oft statistische Tests angewendet. Grundlage jedes statistischen Tests ist das Aufstellen einer Hypothese. Es wird geprüft, ob diese Hypothese angenommen oder zugunsten einer Alternativhypothese verworfen wird. Die Wahl der Alternativhypothese ist abhängig von der Problemstellung. Begriffe wie „Richtig“ und „Falsch“ sind unangebracht, da durch stochastische Einflüsse diese Art der Feststellung nicht möglich ist.

Wird die Hypothese verworfen, obwohl sie richtig ist, liegt ein Fehler 1.Art vor. Ein Fehler 2.Art liegt vor, wenn die Hypothese angenommen wird, obwohl sie falsch ist. Für jeden Test ist eine Signifikanzzahl α zu wählen. Die Signifikanzzahl ist problemabhängig und muss somit bei jeder zu prüfenden Größe der Aufgabenstellung entsprechend gewählt werden. α dient auch zur Berechnung der Sicherheitsgrenze S mit $S = 1 - \alpha$. Der zu α gehörende Wert der Zufallsveränderlichen X wird mit Hilfe der Hypothese als kritischer Wert berechnet. Für alle Berechnungen bei der Auswertung wird mit $\alpha = 5\%$ gerechnet.

Die Standardabweichung wird mit σ_0 und die geschätzte Standardabweichung wird mit m_0 bezeichnet.

5.1 Untersuchung der Strahlenkeule

Bei diesem Experiment wird geprüft, ob die Aussagen, die zuvor über die räumliche Ausbreitung des Ultraschalls getroffen wurden, zutreffen. Ebenfalls von Interesse sind die Schwankungen der Streckenmessungen innerhalb der Strahlenkeule.

Im Kapitel 3.2.1 wurde bereits auf das Aussehen der Strahlenkeule eingegangen. Im Nahfeld herrscht ein ausgeprägtes räumliches Interferenzfeld. Der Sensor ist kreisförmig ($D = 5 \text{ mm}$), so dass sich senkrecht zum Sensor ein Zylinder ausbildet. Die Strahlenkeule ist rotationssymmetrisch und liegt innerhalb des Kegelmantels. Der Öffnungswinkel des Kegels beträgt ca. 2° , wobei $\lambda = 0,144 \text{ m}$.

$$\sin \gamma_0 = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} = 2,0136^\circ$$

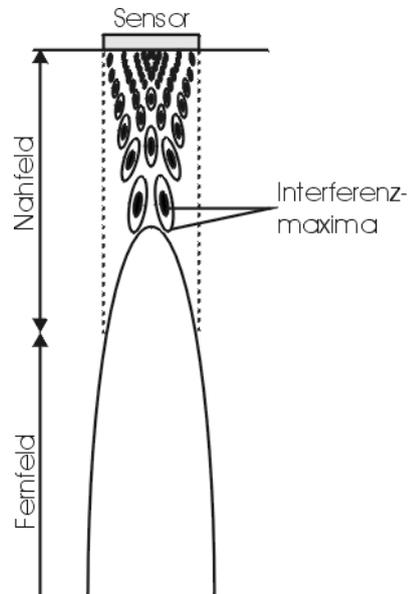


Abbildung 5.1: Interferenzfeld

Die Größe des Nahfeldes beträgt ca. 4 cm . Erfahrungswerte in der Ultraschallprüftechnik empfehlen Messungen erst im $1,5$ fachen Abstand des Nahfeldes (also ca. 6 cm).

$$N = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda} = \frac{(50 \text{ mm})^2}{4 \cdot 0,144 \text{ mm}} = 43,40 \text{ mm}$$

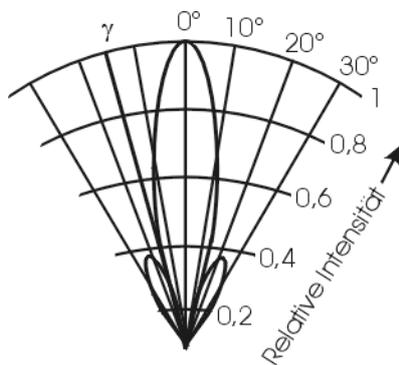


Abbildung 5.2: Strahlenkeule mit Nebenmaxima

Die Strahlenkeule besteht aus einem zentralen Kern und den ihn umgebenden Nebenzipfel. Je größer D/λ ist, desto mehr Nebenzipfel treten auf, aber desto größer ist auch die Energie im zentralen Kern.

$$D/\lambda = 34,7\bar{2}$$

Ein Wert von $34,7\bar{2}$ ist relativ hoch. Der größte Teil der Energie wird in das Innere dieses Kegels abgestrahlt. Die US-Intensität ist auf der Keulachse maximal und nimmt von der Mitte nach außen kontinuierlich ab.

Der Aufbau des Experiments ist schematisch im unteren Bild dargestellt. Über dem Messstift mit dem Ultraschallsensor wird ein Messstift befestigt. Dieser Messstift ist

am unteren Ende flach und besitzt keine Kugel (wie empfohlen). Ein flacher Messstift ist an dieser Stelle zu bevorzugen, da durch die gewölbte Oberfläche der Kugel keine Signale am Rand der Strahlenkeule zum Sensor zurückreflektiert werden. Der Messstift ist fest installiert, der Messtopf ist beweglich. Er ist fest verbunden mit zwei Linear-einheiten, die mit Hilfe von Mikrometerschrauben verstellt werden können. Der ganze Aufbau des Experiments befindet sich auf einem erschütterungssicheren horizontalen Neigungstisch. Der Messstift wird in einem quadratischen Raster durch die Strahlenkeule geführt. An den Rasterpunkten werden die Stärke des Signals sowie die Flanken- und Spitzenwerte registriert.

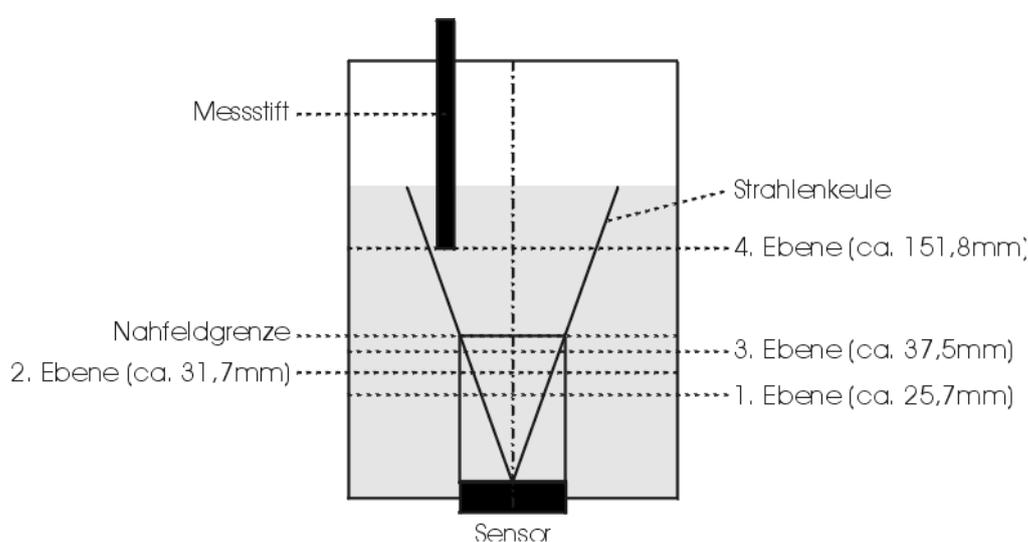


Abbildung 5.3: Experimentaufbau zur Untersuchung der Strahlenkeule (Schema)

Neben den Strecken wird ebenfalls die Temperatur gemessen, um eine Temperaturkorrektur an den Strecken anbringen zu können. Eine vorhandene Vorlaufzeit ist für dieses Experiment unerheblich, da sie konstant ist. Verdunstungseffekte, Effekte aufgrund von Kapillarität und eine schwankende Wasseroberfläche haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse, da der Messstift im Wasser und nicht die Wasseroberfläche angemessen wird. Um weitere lineare Effekte ausschließen zu können, müssen die Bedingungen während des Experiments konstant gehalten werden.

Die Untersuchung der Strahlenkeule erfolgt in 4 Ebenen mit 2 verschiedenen Sensoren (Sensornummer 505 und 511). Die Ebenen 1- 3 befinden sich im Nahfeld, Ebene 4 im Fernfeld.

Die Abbildungen in 5.4 zeigen die Signalstärken der Sensoren in verschiedenen Ebenen. Die Angaben geben die Stärke des Signals in % bezogen auf den Bildschirm an. Das bedeutet, dass ein Signal, das den kompletten Bildschirm ausfüllt, den Wert 100% besitzt. Der maximale Wert, der registriert werden kann, ist 90%.

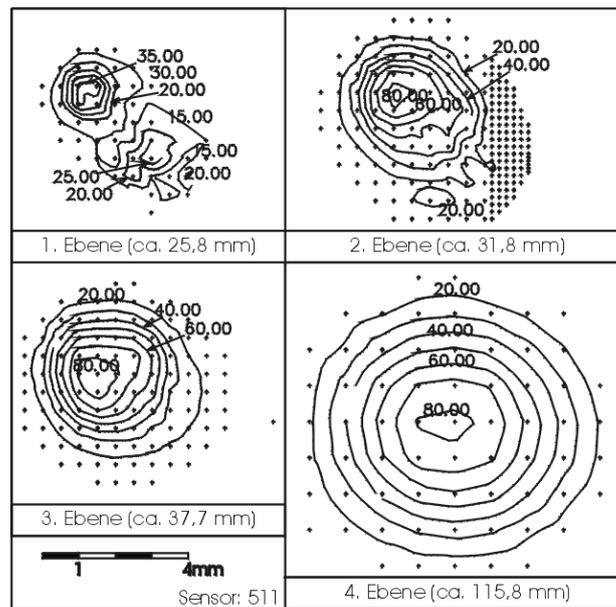


Abbildung 5.4: Signalstärke in verschiedenen Ebenen (Sensor 511)

In der untersten Ebene des Sensors 511 ist ein Nebenmaxima zu erkennen, das auch noch in der 2. Ebene vorhanden ist. Kurz vor Beginn des Fernfeldes (3. Ebene) ist das zweite Maximum verschwunden und der Radius des Strahlenkegels ist etwas geringer als 5 mm (entspricht dem Durchmesser des Sensors). Im Fernfeld (4. Ebene) ist deutlich sichtbar, dass der größte Teil der Energie im Inneren des Kegels abgestrahlt wird. Die US- Intensität ist auf der Kegelachse maximal und nimmt von der Mitte nach außen hin kontinuierlich ab. Der Durchmesser des Strahlenkegels d muss ca. 8,1 mm groß sein, das bestätigt die Abbildung 5.4.

$$d = 2 \cdot h \tan \gamma_0 = 8,1 \text{ mm}$$

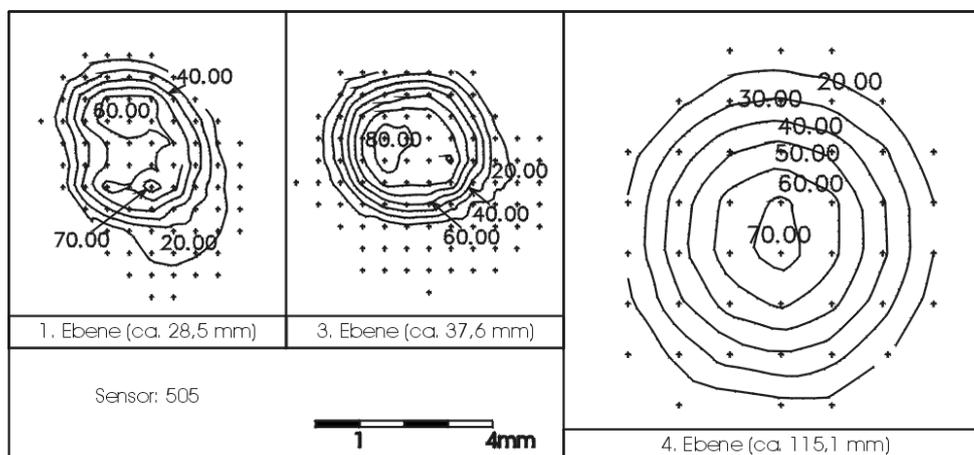


Abbildung 5.5: Signalstärke in verschiedenen Ebenen (Sensor 505)

Beim Sensor 505 tritt kein Nebenmaximum auf, jedoch ist die Strahlenkeule in der tiefsten Ebene sehr unregelmäßig. Die Größenordnung der Strahlenkeule in der 3. Ebene, kurz vor Beginn des Fernfeldes, stimmt wie oben mit der Theorie überein. Der Durchmesser des Strahlenkegels d muss ca. 8,1 mm groß sein, was die Abbildung 5.5 bestätigt.

Das Experiment liefert somit den empirischen Beweis für die theoretischen Vorüberlegungen.

Interessant ist nun, wie stark die Streckenmessungen innerhalb der Strahlenkeule schwanken. Zu dieser Betrachtung werden hier nur die Messungen der 4. Ebene abgebildet. Alle weiteren Skizzen befinden sich im Anhang.

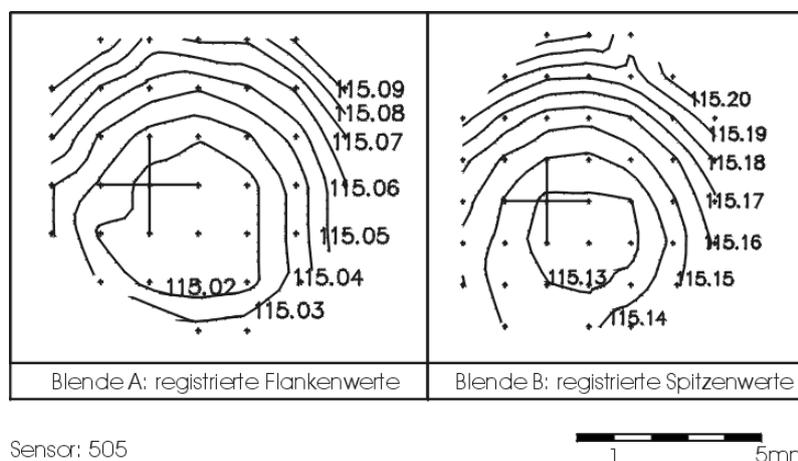


Abbildung 5.6: Streckenmessungen in Ebene 4 (Sensor 505)

Die Kreuze in den Abbildungen für einen Sensorkopf kennzeichnen identische Punkte. Beim Sensor 505 zeigt die Abbildung der Blende A und B gleichmäßige Kreise. Die Differenzen der Streckenmessungen betragen bei beiden Blenden $70 \mu\text{m}$.

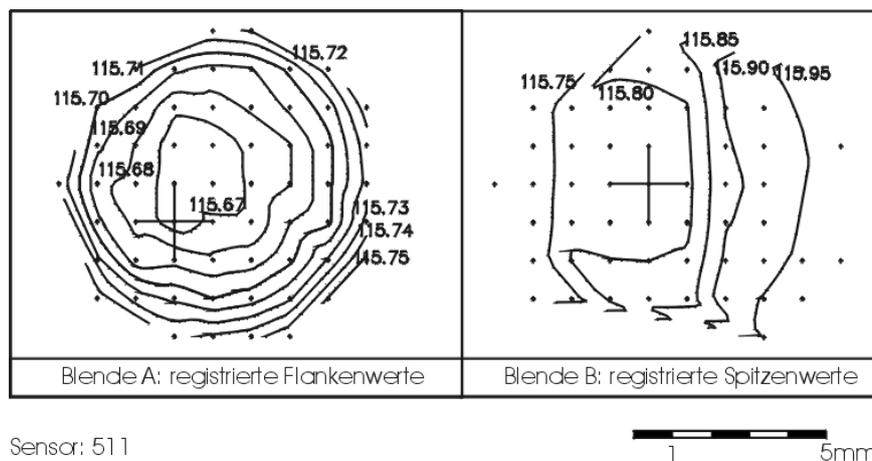


Abbildung 5.7: Streckenmessungen in Ebene 4 (Sensor 511)

Beim Sensor 511 schwanken die Messwerte der Blende A um $80 \mu\text{m}$ und die der Blende

Das Auflösungsvermögen des Sensors liegt bei $3 \mu\text{m}$. Die Abweichungen schwanken zwischen $-4 \mu\text{m}$ und $24 \mu\text{m}$ und liegen damit weit oberhalb des Auflösungsvermögens des Sensors. Die Abweichungen nehmen mit der Entfernung zur Kegelachse zu.

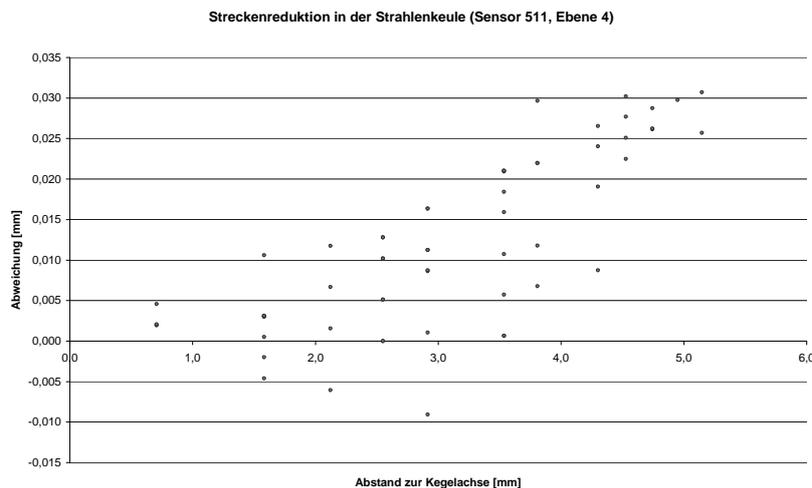


Abbildung 5.10: Streckenreduktion in der Strahlenkeule (Sensor 511)

Beim Sensor 511 schwanken die Abweichungen zwischen $-9 \mu\text{m}$ und $31 \mu\text{m}$ und liegen ebenfalls oberhalb des Auflösungsvermögens. Auch hier nehmen die Abweichungen mit zunehmendem Abstand zur Kegelachse (und schwächer werdendem Echosignal) zu.

Bei starken Intensitäten (starkes Echosignal) ist die Flanke steiler als bei schwachen Intensitäten. Dies bedeutet, dass bei schwachen Intensitäten die registrierten Strecken länger sein müssen als zu erwarten. Dies könnte die Ursache für oben beschriebenes Phänomen sein. Es ist daher immer darauf zu achten, das maximale Signal einzustellen. Bei einer Wiederholungsmessung sollte die Intensität (Stärke des Signals) identisch sein.

Es ist für den späteren Einsatz zu empfehlen, den Messstift in der Mitte der Strahlenkeule zu platzieren. Die US- Intensität ist auf der Kegelachse maximal. In den Abbildungen 5.6 und 5.7 ist ein 3 mm^2 großes Fenster um die Kegelachse zu erkennen, in dem die Messungen konstant sind. In diesem Fenster sollte der Messstift platziert werden.

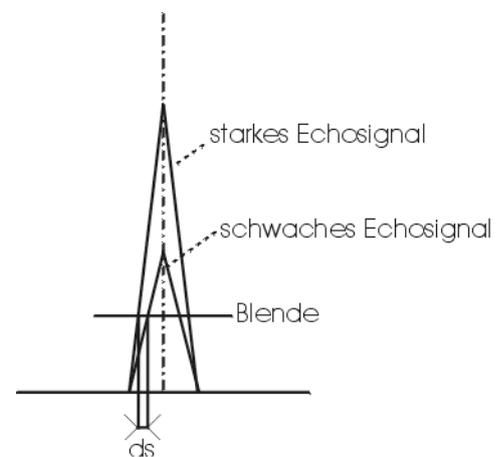


Abbildung 5.11: Einfluss der US- Intensitäten auf die Streckenmessung

5.2 Untersuchung der Genauigkeit (Kalibrierung)

Das Ultraschallmessgerät USM25 besitzt wie bereits erwähnt eine zeitliche Auflösung von 4,3 ns. Wird eine Schallgeschwindigkeit in Wasser von $c = 1440 \text{ m/s}$ (bei 10°C) angenommen, ergibt sich eine Auflösung einer Messung von $3 \mu\text{m}$ (s.S. 53).

Um die Gerätegenauigkeit zu bestimmen, ist eine Sollstrecke nötig. Gleichzeitig zur Ultraschallmessung wird deshalb die Strecke mit dem Inkrementaltaster MT2501 der Firma Heidenhain gemessen. Die mit dem Inkrementaltaster bestimmte Strecke kann als Sollstrecke betrachtet werden, da die Genauigkeit des Tasters eine Zehnerpotenz höher ist als die Auflösung des USM25. Die Genauigkeit laut Hersteller beträgt $0,2 \mu\text{m}$, nachgewiesen wurde eine Genauigkeit von $0,6 \mu\text{m}$. Mehr zum Inkrementaltaster befindet sich im Anhang ab S. 99.

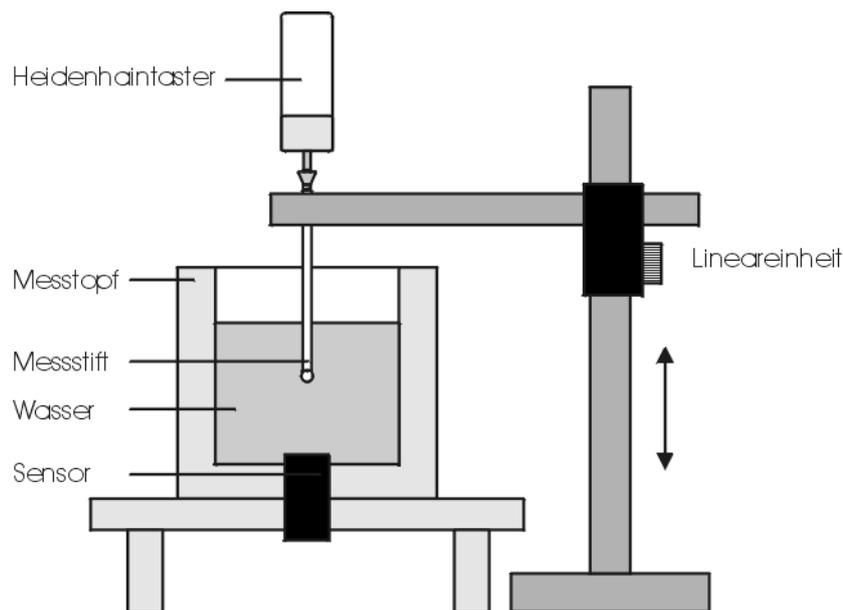


Abbildung 5.12: Schematischer Aufbau zur Genauigkeitsuntersuchung

Zur Untersuchung der Absolutgenauigkeit muss der Messstift auf den Sensor gesetzt und anschließend in der Höhe verstellt werden. Das Nahfeld der benutzten Sensoren beträgt 4 cm. Messungen mit dem USM sollten somit erst ab ca. 6 cm durchgeführt werden (1,5 fache Länge des Nahfeldes). Im Nahfeld sind Messungen durch starke Interferenzen erst ab einer Höhe von ca. 1,5 cm möglich. Selbst dort kommt es noch sehr häufig zu Phasensprüngen. Hinzu kommt, dass der Inkrementaltaster nur einen Messbereich von 25mm besitzt. Aus diesem Grund wurde nicht die absolute Genauigkeit, sondern die relative Genauigkeit untersucht.

Kapillarität, Sprungeffekte und Verdunstungseffekte des Wassers haben keinen Einfluss auf die Messung, da nicht die Wasseroberfläche angemessen wird, sondern ein Objekt im Wasser. Eine nähere Beschreibung des verwendeten Messstifts erfolgte bereits im Abschnitt 4.1.3.

Da Temperaturänderungen zu Änderungen der Streckenlänge führen, wird die Temperatur während der Messung aufgezeichnet und an den Strecken eine geeignete Korrektur angebracht (s. Nährungsformel auf S. 37).

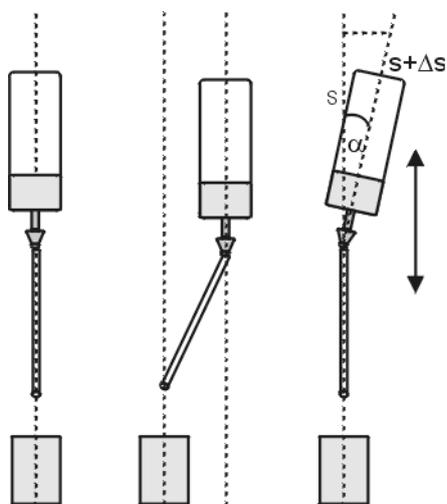


Abbildung 5.13: Abbessche Komparatorprinzip

Mit Hilfe einer Lineareinheit kann der Messstift verschoben werden. Die Lineareinheit und der Messstift mit Sensor sind fest auf einem Neigungstisch montiert. Die Horizontierung des Neigungstisches erfolgte mit zwei 30“ Libellen. In der Abbildung 5.13 ist zu sehen, dass die Stellung des Messstiftes für die Messung unerheblich ist. Bei einer Schrägstellung des Messstiftes wird der vertikale Abstand zwischen der Spitze des Messstiftes und dem Inkrementaltaster kleiner. Diese Verkürzung bleibt jedoch bei der Translationsbewegung konstant und besitzt keinen Einfluss bei der Gegenüberstellung der Messwerte des US- Sensors und der des Inkrementaltasters.

Wichtig hingegen ist die genaue Ausrichtung von Sensor und Inkrementaltaster zueinander und die Einheitung des Abbesschen Komparatorprinzips.

Durch eine eventuelle Schrägstellung des Inkrementaltasters ist die Streckenmessung des Inkrementaltasters systematisch verfälscht. Die Schrägstrecke ist länger gegenüber der gemessenen Strecke des US- Sensors, so dass ein Maßstabsfehler auftritt. Analog gilt dies auch, wenn der Sensor geneigt ist oder beides der Fall ist. Der Sensor ist genau horizontiert, und der Inkrementaltaster wird mit zwei senkrecht zueinander stehenden Theodoliten lotrecht ausgerichtet.

Der Winkel α gibt an, wie genau der Inkrementaltaster zum Sensor ausgerichtet sein muss.

$$\cos \alpha = \frac{s}{s + \Delta s} = \frac{25\text{mm}}{25\text{mm} + 0,003\text{mm}}$$

$$\alpha = 0,986\text{gon}$$

Die Ausrichtung des Inkrementaltaster geschah auf 1 cgon und die Horizontierung des Sensors auf 0,9 mgon genau (1/10 der Genauigkeit der Libelle). Dabei wird nicht der Sensor direkt horizontiert, sondern eine Ebene, auf der der Sensor fest installiert ist. Das Abbessche Komparatorprinzip wurde somit eingehalten (s. [20]).

Sensor/ Experiment	505- 1.Ex- periment	511- 2.Ex- periment	511- 3.Ex- periment	511- 4.Ex- periment
Messbereich	17,871mm	17,746mm	18,534mm	14,401mm

Tabelle 5.1: Messbereiche

Die Tabelle 5.1 zeigt die Messbereiche der einzelnen Experimente. Es kann nicht der gesamte Bereich des Inkrementaltasters ausgenutzt werden, da auch die Linearität begrenzt ist.

Die Messwerte von USM25 und Inkrementaltaster werden im Sekundentakt durch ein Programm abgefragt und gespeichert. Im USM25 ist der Messmodus „Flanke“ eingestellt. Die Untersuchung der Strahlenkeule hat gezeigt, dass der Messmodus „Flanke“ dem Messmodus „Spitze“ vorzuziehen ist. Während der Messung muss darauf geachtet werden, dass immer dieselbe Flanke angemessen wird (Phasensprünge vermeiden). Wenn ein solcher Phasensprung sichtbar ist, muss die Beobachtung bei der späteren Auswertung gestrichen werden.

Bei der Auswertung werden die Messungen des Inkrementaltasters (Sollwerte) dem des USM25 (Istwerte) gegenübergestellt und eine lineare Regression berechnet.

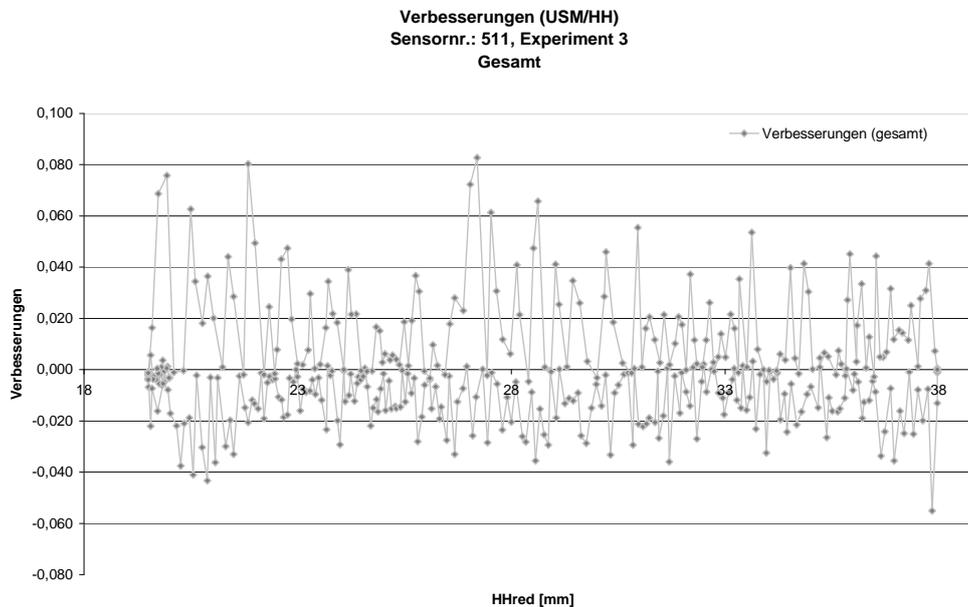


Abbildung 5.14: Verbesserungen der Gesamtausgleichung (Sensors 511, Experiment 3)

In der graphischen Darstellung der Verbesserungen v_i der Ausgleichung ist zu sehen, dass Hin- und Rückweg nicht gemeinsam ausgewertet werden können. Beim Umkehrpunkt kommt es zu einem eindeutigen Hystereseeffekt. Diese Hysterese trat bei allen Experimenten auf. Die unten stehende Abbildung zeigt ein Beispiel vom Sensorkopf 511. Mit diesem Sensor wurden insgesamt drei Experimente durchgeführt.

Die Ursache für die Hysterese liegt beim Inkrementaltaster. Weitere Untersuchungen zeigten, dass der Effekt bei dem Gerät immer auftritt. Dazu mehr im Anhang (S. 99).

Bei der weiteren Auswertung werden Hin- und Rückweg getrennt untersucht. Zunächst wird eine lineare Regression berechnet und anschließend die Verbesserungen grafisch dargestellt. Die folgenden Abbildungen beziehen sich auf denselben Sensor wie oben. Da die Abbildungen für alle Sensoren und Experimente identisch sind, wird hier auf weitere Beispiele verzichtet (im Anhang ab Seite 112).

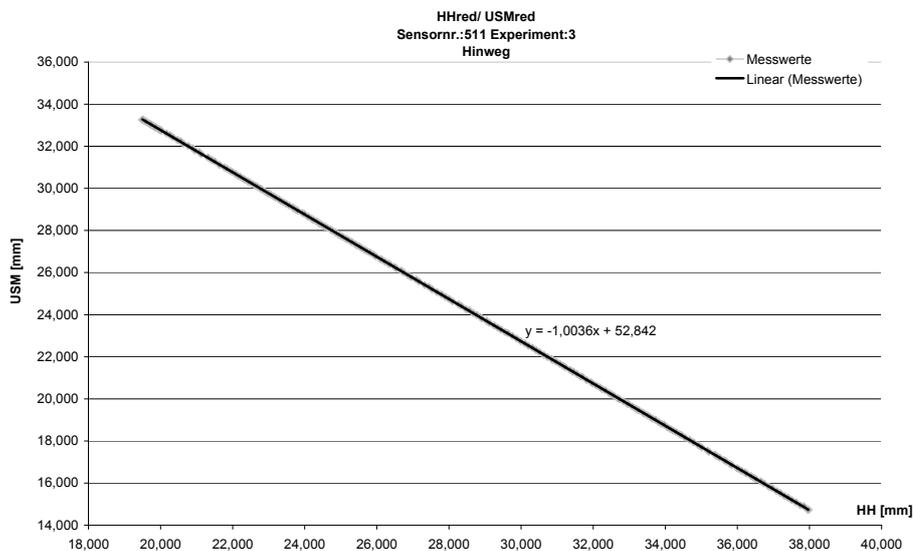


Abbildung 5.15: Genauigkeitsuntersuchung (Sensor 511, Hinweg, Experiments 3)

Die Verbesserungen sehen wie folgt aus:

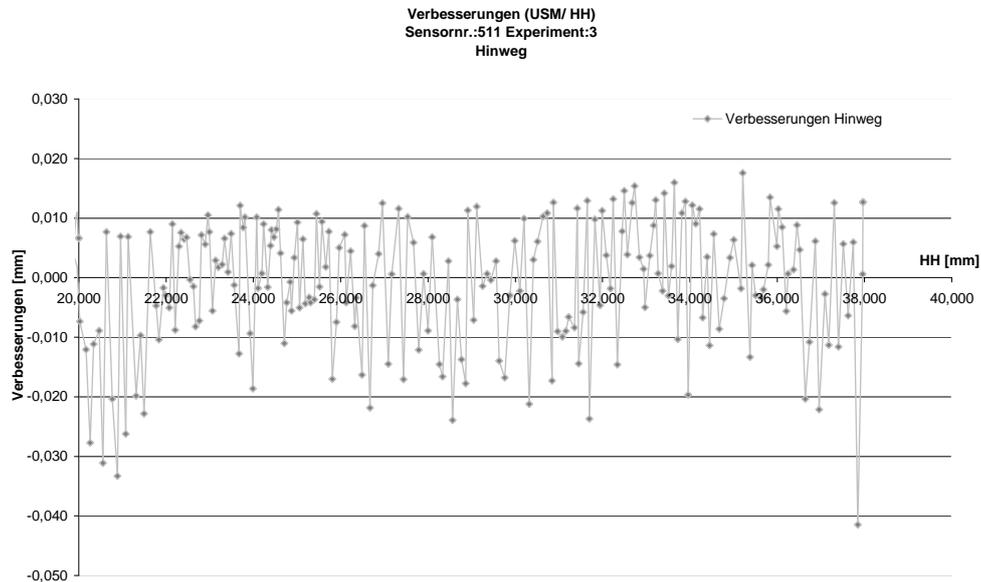


Abbildung 5.16: Verbesserung der linearen Regression (Sensor 511, Hinweg, Experiment 3)

Die Abbildungen aller anderen Experimente befinden sich im Anhang. Die Ergebnisse der Experimente sind in folgender Tabelle zusammengefasst:

Sensor	505		511					
	1. VR		2. VR		3. VR		4. VR	
	Hin	Rück	Hin	Rück	Hin	Rück	Hin	Rück
Redundanz	197	143	171	164	239	163	140	110
Anstieg m	-1,000	-1,002	-1,003	-1,003	-1,004	-1,003	-1,003	-1,003
σ_m	0,0001	0,0004	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0003	0,0004
Achsen. n [mm]	14,714	14,171	14,660	14,631	52,844	52,803	52,836	52,791
σ_n	0,001	0,004	0,002	0,003	0,003	0,008	0,009	0,014
m_0	0,008	0,022	0,013	0,018	0,011	0,019	0,013	0,019
m_0^*	0,011	0,022	0,015	0,019	0,011	0,019	0,013	0,015
Ist $m_0 = m_0^*$ statistisch gesichert?	nein	ja						

Tabelle 5.2: Auswertung der Experimente der Genauigkeitsuntersuchung

wobei: VR = Versuchsreihe und m_0^* aus einer Ausgleichung mit zusätzlichem quadratischem Term stammt.

Durch den Hystereseffekt des Inkrementaltasters und durch den Aufbau bedingt sind die Achsenschnitte unterschiedlich. Beim Sensor 511 ist ein fast konstanter Anstieg zu sehen. Alle Ergebnisse sind mit einem zweiseitigen T- Test kontrolliert worden (Schrankenwert $\alpha = 5\%$). Die Hypothese lautet $m = -1$, die Alternativhypothese lautet $m \neq -1$. Die Hypothese wird zugunsten der Alternativhypothese abgelehnt, der Maßstab ist ungleich „-1“.

Als Standardabweichung σ_0 wird die mögliche Auflösung einer Messung in Wasser ($3 \mu\text{m}$) angenommen. Die Hypothese des einseitigen χ^2 - Tests ($\sigma_0 = m_0$) mit $\alpha = 5\%$ zur Überprüfung des mathematischen und stochastischen Modells wird bei allen Experimenten abgelehnt. $\sigma_0 < m_0$. Die Einführung eines zusätzlichen quadratischen Terms bringt keine Genauigkeitssteigerung (m_0 s wurden mit einem F- Test verglichen), der quadratische Term ist nicht signifikant. Ein Fehler im mathematischen Modell ist somit unwahrscheinlich. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass σ_0 zu optimistisch ist. Diese Aussage ist bei einer Redundanz von mindestens 110 zulässig, weitere Berechnungen sollen diese These stützen.

Die Messung des Hinwegs vom Sensor 505 stellt eine Ausnahme dar. Der Anstieg m ist signifikant „-1“. Durch die Einführung eines zusätzlichen quadratischen Terms verschlechtert sich m_0 und weicht signifikant vom m_0 der Ausgleichung ohne quadratischen Term ab.

Da sich sonst ein konstanter Anstieg erkennen lässt, wird eine Gesamtausgleichung berechnet, die alle Messungen eines Sensors enthalten. Als Unbekannte werden der Maßstab und die jeweiligen Achsenschnitte eingeführt. Beim Sensor 505 ergeben sich daraus 3 Unbekannte.

	Getrennte Ausgleichungen		Ausgleichung aller
	Hinweg	Rückweg	Beobachtungen
Redundanz	197	143	341
Anstieg m	-1,000	-1,002	-1,001
σ_m	0,0001	0,0004	0,001
m_0	0,008	0,022	0,017
$v^T P v$	0,027	0,070	0,103

Tabelle 5.3: Auswertung Sensor 505

Mit dem Sensor 505 wurde nur ein Experiment durchgeführt. Die Redundanz der Gesamtausgleichung beträgt knapp 350. Auch bei dieser Ausgleichung wird die Hypothese des einseitigen χ^2 - Test $\sigma_0 = m_0$ zugunsten der Alternativhypothese $\sigma_0 < m_0$ abgelehnt. Bei Einführung eines zusätzlichen quadratischen Terms kommt es zu keiner Genauigkeitssteigerung. Die Abweichung der m_0 s ist nicht signifikant, die Genauigkeit kann

nicht gesteigert werden.

Beim Sensor 511 ergeben sich 7 Unbekannte. Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der Ausgleichung des Sensors 511.

	Getrennte Ausgleichungen						Ausgleichung aller Beobach- tungen
	2. VR		3. VR		4. VR		
	Hin	Rück	Hin	Rück	Hin	Rück	
Redundanz	171	164	239	163	140	110	992
Anstieg m	-1,003	-1,003	-1,004	-1,003	-1,003	-1,003	-1,003
σ_m	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0003	0,0004	0,001
m_0	0,013	0,018	0,011	0,019	0,013	0,019	0,016
$v^T P v$	0,038	0,061	0,027	0,060	0,024	0,038	0,249

Tabelle 5.4: Auswertung Sensor 511

Die Redundanz der Gesamtausgleichung beträgt fast 1000. Wie beim Sensor 505 wird auch hier die Hypothese des χ^2 - Test abgelehnt. Auffallend ist, dass m_0 aus beiden Gesamtausgleichungen fast identisch sind. Ein F- Test hat bewiesen, dass der Unterschied nicht signifikant ist.

Ein in die Ausgleichung eingeführtes quadratisches Glied ist nicht signifikant, es kommt zu keiner Genauigkeitssteigerung.

Um zu prüfen, ob die Ergebnisse der Gesamtausgleichung nicht signifikant von den Ergebnissen der Einzelausgleichungen abweichen, wird ein F- Test durchgeführt. Die Indizes i stehen für die jeweiligen getrennten Ausgleichungen, der Index g steht für die Gesamtausgleichung aller Beobachtungen.

Sensor	$\sum v_i^T P v_i$	$\sum r_i$	$\sum v_g^T P v_g$	$\sum r_g$
505	0,097	340	0,103	341
511	0,248	987	0,249	992

Tabelle 5.5: Werte zur Berechnung des F- Testes

Der Test kann nur durchgeführt werden, wenn zwei unabhängige Terme aufgestellt werden können. Dies wird durch folgende Formel erreicht (F- Test aus der Deformationsanalyse):

$$F = \frac{\left(v_G^T P v_G - \sum_{i=1}^P v_i^T P v_i \right) \cdot r_p}{(r_G - r_p) \cdot \sum_{i=1}^P v_i^T P v_i}$$

Nach obiger Formel wird die Hypothese des F- Tests (m_0 der Einzelausgleichungen = m_0 der Gesamtausgleichungen) für den Sensor 505 abgelehnt, aber für den Sensor 511 angenommen.

Insgesamt entspricht die Wiederholgenauigkeit der Kombination Sensor/ USM25 nicht dem Auflösungsvermögen von 0,003 mm. Für die Kombination USM25/ Sensor 505 können keine genauen Aussagen getroffen werden, jedoch ist dieses m_0 mit dem m_0 des Sensors 511 identisch. Bei der Kombination USM25/ Sensor 511 beträgt m_0 0,016mm. Die Systemgenauigkeit entspricht der Standardabweichung nach der Ausgleichung m_0 . Die Standardabweichung des Messsystems beträgt somit 16 μm .

Die Ursache für den ermittelten Maßstab könnte bei den Temperaturkorrekturen der Streckenmessungen liegen. Bei der verwendeten Formel handelt es sich um eine Näherungsformel. Da die Temperatur einen fast linearen Einfluss auf die Messung hat, könnte es sich bei dem Maßstab um eine Restkorrektur handeln.

Eine andere Ursache könnte im Versuchsaufbau liegen. Fehler beim Aufbau (Verletzung des Abbe'schen Komparatorprinzips) können zwar weitestgehend ausgeschlossen werden, aber bei der Verschiebung der Lineareinheit können, aufgrund eines nicht genügend stabilen Aufbaus, Fehlereinflüsse entstehen. Die Durchführung eines Experiments mit einem stabileren Aufbau ist ratsam.

Eine weitere Ursache könnte beim Inkrementaltaster liegen. Der Maßstab im Taster besteht aus Zerodur. Zerodur besitzt praktisch keine thermische Längenausdehnung ($\alpha = 0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Messbolzen und Halterung sind aus Stahl und somit temperaturabhängig. An den Streckenmessungen des Inkrementaltasters wurden jedoch keine Korrekturen angebracht.

Natürlich könnte auch eine Summation mehrerer der hier aufgeführten Fehlerquellen vorliegen.

5.3 Vorlaufzeit

Die Vorlaufzeit ist eine mögliche Fehlerquelle des Sensorkopfes, sie ist mit der Additionskonstante bei EDM- Messgeräten vergleichbar. Sie tritt bei allen Arten von Sensorköpfen (Normalprüfköpfe, SE- Prüfköpfe und Winkelprüfköpfe) auf (s.S. 42). Die verwendeten Prüfköpfe vom Typ H10 KB3 sind, wie bereits erwähnt, Normalprüfköpfe mit einer Frequenz von 10 MHz.

Die Vorlaufzeit wird als Zeitmaß angegeben, da ein Zeitmaß unabhängig vom Medium und somit von c ist. Es gibt zwei unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Vorlaufzeit. Zum einen lässt sie sich mit Hilfe einer bekannten Sollstrecke bestimmen und zum anderen durch Messung der mehrfachen Reflexion eines Signals. Wenn die Vorlaufzeit durch eine Sollstrecke bestimmt wird, muss die Schallgeschwindigkeit im Medium hoch genau bekannt sein. Aus diesem Grund wird im weiteren die zweite Variante (Mehrfachmessung) benutzt.

Der Ultraschallsensor wurde in einem wassergefüllten Messtopf fest installiert. Wasser konnte nicht austreten oder verdunsten, da der Messtopf geschlossen war und das Experiment nur ca. 2- 3 min dauerte. Bei der Messung gegen die Wasseroberfläche kommt es zu Mehrfachreflexionen (s. Abbildung 5.17). Es wurden während der Messung so viele Echos wie möglich registriert. Die Vorlaufzeit (Abstand zwischen elektrischem und mechanischem Nullpunkt) kann nicht direkt gemessen werden.

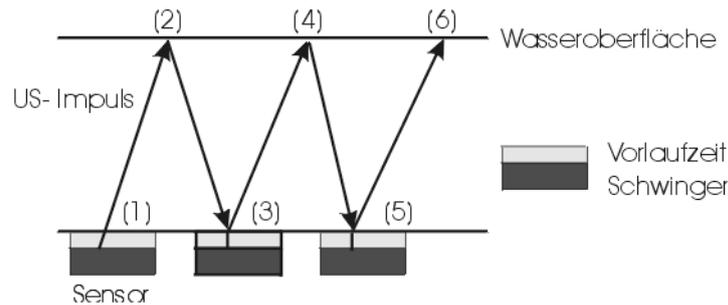


Abbildung 5.17: Reflexionen an der Wasser- bzw. Sensoroberfläche

Im Punkt (1) sendet der Schwinger ein Ultraschallimpuls aus. Dabei durchläuft das Signal erst die Vorlaufstrecke und dann das Medium. An der Wasseroberfläche wird das Signal reflektiert (2) und gelangt wieder zum Sensor (3). Ein Teil des Impulses dringt in den Sensor ein, durchläuft die Vorlaufzeit und wird vom Schwinger registriert (erstes Echo). Der andere Teil des Impulses wird reflektiert, ohne die Vorlaufzeit zu durchlaufen. Da es sich dabei um einen Übergang von einem weichen in ein hartes Medium handelt, kommt es zu einer Phasenverschiebung von 180° . Das Signal, das nun wiederum an der Oberfläche reflektiert wird (4), ist gegenüber dem Signal an der Stelle (2) um 180° Phasenverschoben. Bei (5) wird das phasenverschobene Signal registriert (2. Echo) und wiederum ein Teil reflektiert. Auch an dieser Grenzschicht kommt es zu einer erneuten phasenverschiebung von 180° . So ist nur jedes zweite Signal phasengleich. Dies muss bei der Messung bzw. bei der Auswertung beachtet werden. Wird die Phasenverschiebung während der Messung berücksichtigt, muss das Gerät vor jeder Beobachtung von „positiver Halbwelle“ auf „negative Halbwelle“ oder umgekehrt umgestellt werden. Wenn dies nicht geschieht, können jeweils nur die geraden bzw. ungeraden Echos zusammen ausgewertet werden. Mehr dazu weiter unten.

Während der Messung lagen für alle Beobachtungen gleiche Bedingungen vor. Die Temperatur war konstant, sonstige Einflüsse wie Kapillarität und andere Effekte des Wassers können vernachlässigt werden. Sie alle besitzen einen konstanten Einfluss auf die Messwerte. Das USM25 registriert die Beobachtungen als Strecken in [mm]. Dabei werden intern im Gerät nur die gemessenen Zeiten mit der eingestellten Schallgeschwindigkeit multipliziert. Wie bereits oben erklärt, ist die Vorlaufzeit nicht metrisch zu bestimmen. Vor der Auswertung müssen zunächst die registrierten Strecken wieder in Zeitmaße zurückgerechnet werden.

Im folgenden Teil wird davon ausgegangen, dass die Phasenverschiebung während der

Auswertung berücksichtigt wird.

Es ergeben sich folgende Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{aligned}
 1. \text{Echo} : t_1 + v_1 &= 2a + t_{BC} \\
 2. \text{Echo} : t_2 + v_2 &= 2a + t_{BD} \\
 3. \text{Echo} : t_3 + v_3 &= 2a + 3 \cdot t_{BC} \\
 4. \text{Echo} : t_4 + v_4 &= 2a + 2 \cdot t_{BD} \\
 5. \text{Echo} : t_5 + v_5 &= 2a + 5 \cdot t_{BC} \\
 6. \text{Echo} : t_6 + v_6 &= 2a + 3 \cdot t_{BD}
 \end{aligned}$$

Für alle weiteren Berechnungen wird statt mit $2a$ mit a' gerechnet ($a' = 2a$).

Die Anzahl der Beobachtungen beträgt 6 (es wurden sechs Echos registriert). Als Unbekannte müssen die Zeiten t_{BC} und t_{BD} für die jeweiligen Strecken und die Vorlaufzeit a eingeführt werden. Somit liegen 3 Unbekannte vor. Dies ergibt eine Überbestimmung (Redundanz) von 3.

Die Genauigkeitsuntersuchung ergab eine Standardabweichung von 0,016 mm. Dies entspricht 0,011 μs und wird als σ_0 angenommen. Die Standardabweichung einer Beobachtung entspricht dem σ_0 . Die Gewichtsmatrix ist somit eine Einheitsmatrix.

Für die vermittelnde Ausgleichung ergibt sich die Kofaktorenmatrix (A- Matrix):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 3 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \\ 1 & 5 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

Es handelt sich um ein lineares Ausgleichungsproblem. Der Differenzvektor der Beobachtungen Δl ist gleich dem Beobachtungsvektor l_{gem} ($\Delta l = l_{gem}$).

$$\Delta l = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \end{bmatrix}$$

Die ausgeglichenen Unbekannten errechnen sich aus $x = N^{-1}A^T P l_{gem}$ mit $N = A^T P A$. Die Verbesserungen können nach $v = Ax - \Delta l$ berechnet werden. Daraus ergibt sich:

$$m_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{r}}$$

Die geschätzte Standardabweichung der Unbekannten errechnet sich aus $C_{xx} = m_0^2 \cdot N^{-1}$. Die Beobachtungen wurden nach groben Fehlern mit Hilfe der „Data - Snooping - Methode“ durchsucht. Es liegen keine groben Fehler bei den Messwerten vor.

Sensor	505		511	
Messung vom	23.03.2003	23.03.2003	07.04.2003	07.04.2003
Vorlaufzeit a'	0,047 μ s	-0,355 μ s	-0,310 μ s	-0,308 μ s
$\sigma_{a'}$	0,060 μ s	0,060 μ s	0,060 μ s	0,060 μ s
σ_0	0,011	0,011	0,011	0,011
m_0	0,019	0,449	0,322	0,324
max. NV	0,02	0,78	0,41	0,41

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Experimente unter rechnerischer Berücksichtigung des Phasensprunges

Der σ_0 - m_0 - Vergleich (Hypothese des einseitigen χ^2 - Tests mit der Alternativhypothese $\sigma_0 > m_0$) zur Überprüfung des mathematischen/ stochastischen Modells wird immer abgelehnt. Eine mögliche Fehlerquelle im mathematischen Modell kann die fehlende Berücksichtigung einer Maßstabskorrektur der Streckenmessung sein. Diese Messkonfiguration erlaubt jedoch nicht die Einbringung eines solchen Maßstabes. Während der Genauigkeitsuntersuchung ist ein Maßstab bestimmt worden, der wahrscheinlich jedoch durch die Näherungsformel der Streckenkorrektur verursacht wurde. Da bei diesem Experiment die Strecken wieder in Zeiten umgerechnet werden, hat dieser Maßstab keinen Einfluss auf dieses Experiment und bleibt unberücksichtigt. Die berechnete Vorlaufzeit ist nicht signifikant, die Hypothese des T- Tests ($\alpha = 5\%$, zweiseitig) wird abgelehnt ($a' = 0$).

Wenn die Phasenverschiebungen während der Messung berücksichtigt werden, gelten die gleichen Verbesserungsgleichungen wie für die Echos 2, 4 und 6. Die Ausgleiche erfolgt analog zu der obigen. Bei der Messung am 14.4.03 sind die Phasensprünge bereits während der Messung berücksichtigt worden. Es wurde zwischen „positiver“ und „negativer Halbwelle“ umgeschaltet. Die Redundanz bei diesen Ausgleichen betrug nur 1.

Sensor	505		511	
Vorlaufzeit a'	0,017 μ s	0,012 μ s	0,106 μ s	0,139 μ s
$\sigma_{a'}$	0,402 μ s	0,412 μ s	0,113 μ s	0,173 μ s
σ_0	0,011	0,011	0,011	0,011
m_0	0,069	0,073	0,005	0,013
max. NV	0,07	0,07	0,01	0,01

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Experimente mit messtechnischer Berücksichtigung des Phasensprunges

Alle Vorlaufstrecken sind positiv. Die Hypothese des χ^2 - Tests (s. oben) wird beim Experiment mit dem Sensor 505 abgelehnt, aber beim Sensor 511 angenommen. Bei den Beobachtungen mit dem Sensor 511 wurde die Hypothese des stochastisch/ mathematischen Modells angenommen. Der T- Test belegt, dass keine Vorlaufzeit signifikant ist.

Es ist zu empfehlen, die Sensoren nochmals zu überprüfen. Die Firma Krautkrämer AgfaNDT bietet die Möglichkeit an, die Vorlaufzeit mit Hilfe einer Sollstrecke zu bestimmen. Mit dieser Methode könnte auch ein eventuell vorhandener Maßstab bestimmt werden.

Die dann bestimmten Vorlaufzeiten der Sensoren können im USM eingestellt werden, so dass sie bei jeder Messung berücksichtigt werden.

5.4 Temperaturabhängigkeit des Sensors

Wie bereits mehrfach erwähnt, ist die Schallgeschwindigkeit und damit die Streckenmessung des USM25 temperaturabhängig. Die Temperatur besitzt direkten Einfluss auf das Messergebnis. Dieser Einfluss kann mit Hilfe einer Referenzstrecke eliminiert werden, die zeitgleich mit der Wasseroberfläche angemessen wird. Es ist noch zu klären, welchen Einfluss eine Temperaturänderung des Sensors (Typ H10 KB3) selbst hat.

Die Piezofolie besteht aus dem keramischen Stoff Bleizirkonattitanat (PZT). Eigenschaften dieses Stoffes sind:

- Dichte ca. 8 g/cm^3
- Curie- Temperatur: ca. 350°C

Weitere Eigenschaften des Sensors sind:

- Akustische Impedanz: ca. 30 Mrayl
- Gehäuse und Schutzschicht bestehen aus Edelstahl

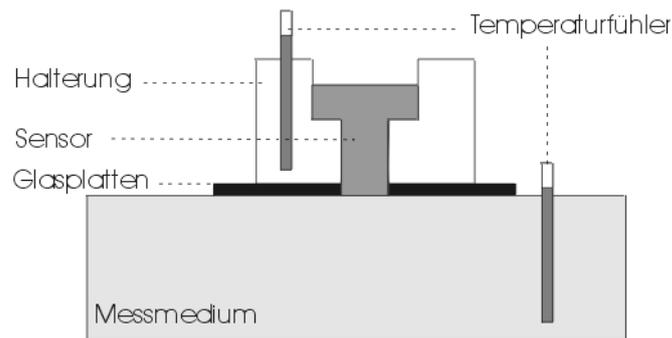


Abbildung 5.18: Querschnitt des Experimentaufbaus

Um eine Temperaturabhängigkeit des Sensors zu prüfen, wird dieser erhitzt und auf das Messmedium aufgesetzt. Damit der Sensor eine stabile Lage besitzt, wird er in einer Stahlhalterung befestigt. Die Halterung besitzt keinen direkten Kontakt mit dem Messmedium, sondern befindet sich auf Glasplatten (gute Wärmeisolation). Die Temperaturen des Sensors und des Messmediums werden kontinuierlich überprüft. Durch Übertragung der Wärmemenge erhitzt sich das Messmedium und kann eine unerwünschte Änderung der Schallgeschwindigkeit hervorrufen. Die Mischtemperatur von Sensor und Medium kann mit der Riemannschen Mischregel berechnet werden.

$$t_M = \frac{c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2}$$

wobei:

m... Masse

c... Spezifische Wärmekapazität

t... Temperatur

Ausgehend von dieser Formel kann der Einfluss der Mischtemperatur auf die Streckenmessung untersucht werden.

Die spezifische Wärmekapazität von Wasser liegt bei $4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. Wasser ist damit als Messmedium ungeeignet, da die spezifische Wärmekapazität und daraus resultierend die Mischtemperatur sehr hoch sind. Oben wurde bereits gezeigt, dass schon geringe Temperaturänderungen einen Einfluss auf die Streckenmessung in Wasser haben. Da sowohl Sensorkopf als auch das Ultraschallgerät aus der Werkstoffprüfung stammen, kann auch durch Materialien wie Stahl und Aluminium gemessen werden. Diese Stoffe sind besser geeignet, wie der Tabelle 5.8 entnommen werden kann.

Stoff	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
Aluminium	0,90	
Kupfer	0,39	
Messing	0,38	
Stahl	0,47	

Tabelle 5.8: Spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe

Zur Messung stand eine ca. 5 kg schwere Stahlplatte mit einer Mächtigkeit von 2 cm zur Verfügung. Für die Berechnung der Mischtemperatur wird für den Sensor eine spezifische Wärmekapazität wie bei Stahl und eine Ausgangstemperatur von 40°C angenommen. Sensor und Halterung werden zusammen erhitzt und besitzen eine Masse von ca. 150 g. Die Platte besitzt eine Temperatur von 12°C (Zimmertemperatur). Daraus ergibt sich eine Mischtemperatur von ca. 12,8°C.

Eigenschaften von Stahl:

Kubischer Ausdehnungskoeffizient γ : 0,000 039 [3/K]
 Linearer Ausdehnungskoeffizient α : 0,000 013 [1/K]
 Spezifische Wärmekapazität: 0,47 [kJ/(kg · K)]
 Schallgeschwindigkeit c bei 20°C: 5100 [m/s]
 Dichte ρ bei 20°C: 7,8 [g/cm³]

Die Masse ist bekanntlich temperaturunabhängig, die Dichte temperaturabhängig. Die Dichte bei einer Temperaturänderung kann über die Volumenänderung berechnet werden (hier $\Delta T = 29$ K). Das Volumen V der Stahlplatte beträgt bei 20°C ca. 641,03 cm³,

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{5000g}{7,8g/cm^3} = 641,03cm^3$$

und bei 49°C ($\Delta T = 29$ K) ca.

$$V_{\Delta T} = V_{20}(1 + \gamma \cdot \Delta T) = 641,76cm^3$$

$$\rho_{\Delta T} = \frac{m}{V_{\Delta T}}$$

Die jeweiligen Schallgeschwindigkeiten berechnen sich aus Dichte und E- Modul. Das E- Modul für Stahl beträgt $2 \cdot 10^{11}$ GPa.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$c_{20} = 5063,7m/s$$

$$c_{\Delta T} = 5066,6m/s$$

Bei einer Mächtigkeit von 2 cm und einer Temperatur von 20°C (Anfangstemperatur) beträgt die Laufzeit des Ultraschallsignals ca. 3,9 μ s. Daraus ergibt sich eine Streckendifferenz bei einer Temperaturänderung $\Delta T = 29$ K von

$$\Delta s = t \cdot \Delta c = 0,011mm$$

Dies entspricht der zeitlichen Auflösung des Sensors in Stahl. Eine Temperaturänderung von bis zu 29 K (durch Aufsetzen des Sensors) hat somit keinen Einfluss auf die Streckenmessung. Das Auflösungsvermögen in Stahl beträgt:

$$\Delta s = \frac{c \cdot \Delta t}{2} = \frac{5064m/s \cdot 4,3ns}{2} = 0,011mm$$

Während der Experimente werden die Temperaturen der Stahlplatte und des Sensors sowie die Strecken gemessen. Als erstes wird überprüft, ob der Sensor bei konstanter Temperatur eine konstante Strecke bestimmt. Beim Sensor 505 kam es zu Schwankungen von 11 μ m (Auflösungsgenauigkeit des Sensors), beim Sensor 511 wurden immer die gleichen Strecken gespeichert. Bei den weiteren Experimenten traten in der Stahlplatte maximale Temperaturschwankungen von 1,6 K auf. Diese Temperaturänderung hat keinen Einfluss auf die Streckenmessung.

Versuchsreihe		Max. Temperaturdifferenz im Stahl [K]
505	1.	0,954
	2.	0,769
511	1.	1,634
	2.	1,666

Tabelle 5.9: Maximale Temperaturdifferenzen während der Experimente

Im USM25 ist die Schallgeschwindigkeit für Stahl mit 5100 m/s eingetragen. Wie oben gezeigt, beträgt die tatsächliche Geschwindigkeit ca. 5064 m/s. An den vom USM registrierten Strecken ist bei der Auswertung eine Maßstabskorrektur anzubringen.

$$s = \frac{c_{5064}}{c_{5100}} \cdot s_{gem}$$

wobei:

- s_{gem} ... gemessene Strecke
c... Schallgeschwindigkeit bei der jeweiligen Temperatur
s... maßstabskorrigierte Strecke

Die maßstabskorrigierten Strecken (Höhen) sind in Diagrammen im Verhältnis zur Temperatur aufgetragen. Nachstehend ein Beispiel des Sensors 511 (1. Experiment).

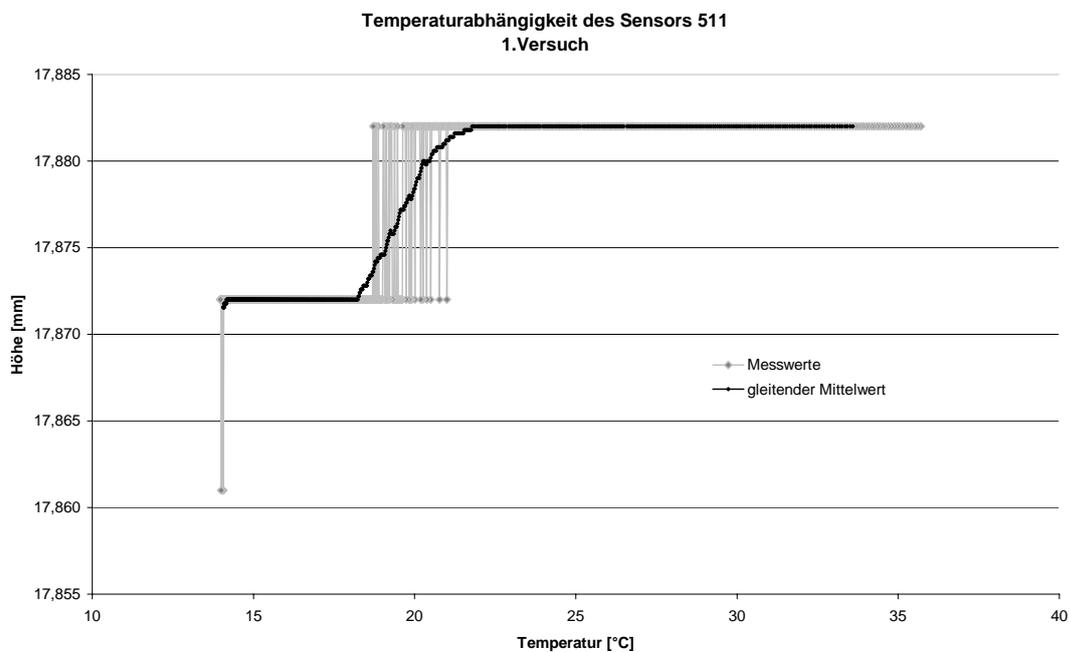


Abbildung 5.19: Temperaturabhängigkeit des Sensors 511

Während der Messung kam es zu mehreren Sprüngen. Ähnliche Bilder ergeben sich auch bei den anderen Experimenten und sind im Anhang zu finden.

Der Verlauf der Temperatur im Sensor sieht wie folgt aus:

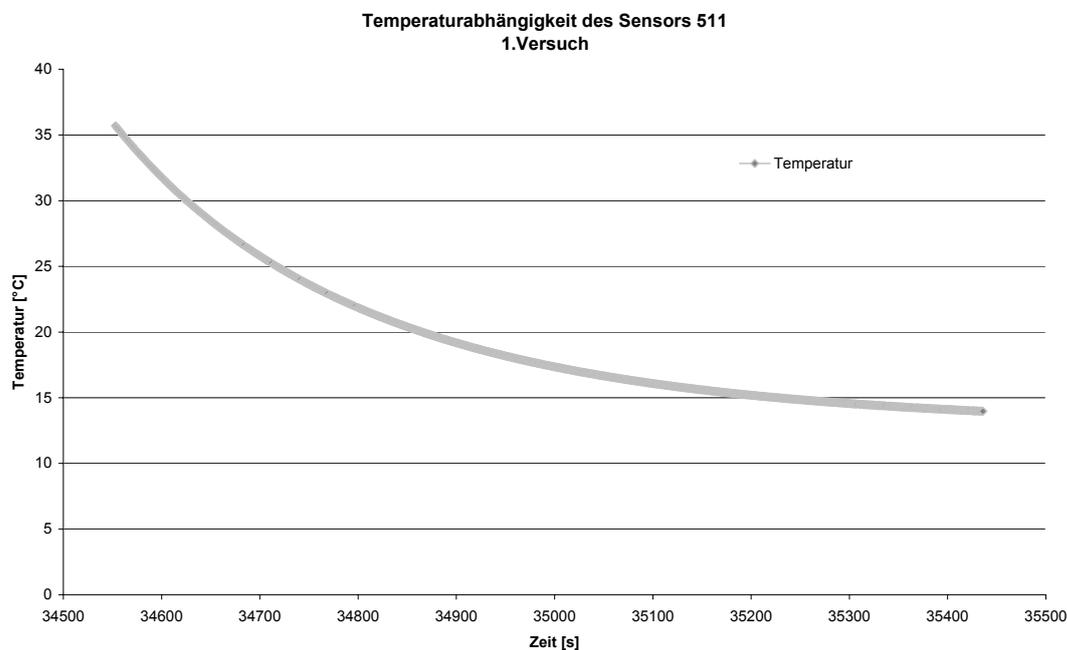


Abbildung 5.20: Temperaturverlauf beim Sensors 511

Da die Skizzen der anderen Experimente identisch sind, wird auf weitere Darstellungen des Temperaturverlaufes verzichtet.

Insgesamt wurden folgende Beobachtungen gemacht:

Versuchsreihe		ΔT des Sensors [K]	max. Differenzen der registrierten Strecken
505	1.	0,000	0,010
	2.	29,064	0,021
	3.	27,271	0,021
511	1.	0,000	0,000
	2.	21,730	0,021
	3.	26,514	0,010

Tabelle 5.10: Maximale Differenzen der registrierten Strecken

Auch die anderen Versuche haben gezeigt, dass es zu Änderungen der Streckenmessung beim Abkühlen des Sensors kommt. Die Streckenänderungen betragen oft das Doppelte des Auflösungsvermögens, aber nur einen Bruchteil der Genauigkeit des Sensors. Die

Bauteile des Sensorkopfes besitzen Längenausdehnungskoeffizienten ungleich NULL. Dies hat natürlich Einfluss auf die Messergebnisse. Wenn starke Temperaturschwankungen vorliegen, sollte der Einfluss berücksichtigt werden. Die Messgenauigkeit sinkt in diesem Fall. Falls keine starken Temperaturschwankungen auftreten, kann der Effekt vernachlässigt werden. Er liegt innerhalb der Messgenauigkeit des Sensors (vgl. Abschnitt 5.2 ab S. 62).

5.5 Sprungeffekte

Dieses Experiment untersucht keine spezielle Eigenschaft des USM25, sondern befasst sich mit einem allgemeinen Problem des hydrostatischen Nivellements. An den Gefäßwänden kommt es zu Höhen- und Formänderungen der Flüssigkeitsoberfläche, verursacht durch Kohäsions- und Adhäsionskräfte. Kohäsionskräfte sind Anziehungskräfte der Moleküle einer Substanz, Adhäsionskräfte wirken zwischen den Molekülen zweier verschiedener Substanzen (z.B. Flüssigkeit und Gefäßwand). Die Formänderung der Flüssigkeitsoberfläche wird Kapillarität genannt. Zum Problem der Kapillarität allgemein sind vielfältige Untersuchungen in der Literatur zu finden. Ein anderes eng mit diesem verbundenes Problem wurde jedoch noch nicht näher untersucht. Beim Ansteigen oder Sinken des Flüssigkeitsstandes kann es möglich sein, dass die Adhäsionskräfte ein „Springen“ der Flüssigkeitsoberfläche an den Gefäßwänden verursachen, ähnlich dem, wenn der Daumen unter Druck über eine glatte Oberfläche bewegt wird. Wenn dieser Sprungeffekt auftritt, hat dies Einfluss auf das Messergebnis einer kontinuierlichen Messung. Es ist nun zu untersuchen, ob dieser Effekt Einfluss auf das vorhandene Messsystem hat.

Um den Effekt nachweisen zu können, muss das kontinuierliche Ansteigen der Flüssigkeit beobachtet werden. Es besteht die Möglichkeit, die vom Ultraschallgerät registrierten Messwerte einer genaueren (von Störeinflüssen des Wassers freien) Messung gegenüberzustellen. Eine einfachere Variante setzt das hoch genaue kontinuierliche Ansteigen des Wassers voraus. Mit Hilfe der Messwerte kann eine lineare Regression berechnet werden (Darstellung der Höhenänderung gegenüber der Zeit). Sind die Abweichungen von der Geraden zu groß und können andere Störeinflüsse ausgeschlossen werden, so ist der Sprungeffekt nachgewiesen. Die Messungen erfolgen im Sekundentakt.

Zunächst wird nun der Aufbau des Experiments ausführlich beschrieben.

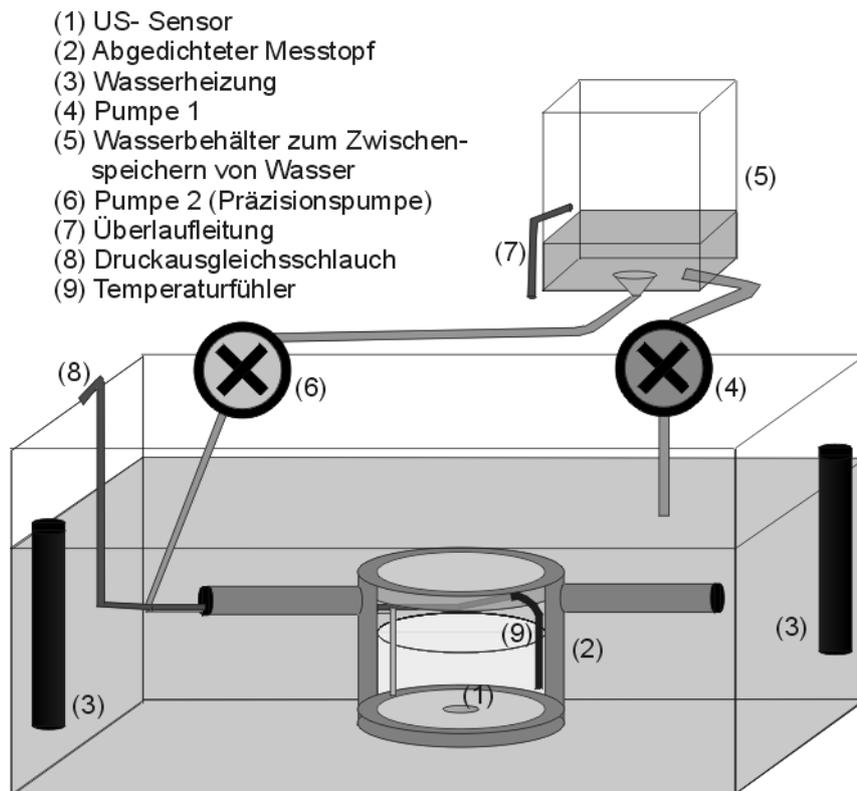


Abbildung 5.21: Experimentaufbau zur Untersuchung von Sprungeffekten

Die Temperatur des Wassers in einem Wasserbad (großer (Glas-) Behälter) wird von mehreren Heizungen (3) konstant gehalten. Durch Umwälzsteine wird dafür gesorgt, dass überall im Behälter die gleiche Wassertemperatur herrscht. Zusätzlich wird die Wassertemperatur im Becken von mehreren Temperaturfühlern aufgezeichnet. Es ist sehr wichtig, dass die Temperatur konstant bleibt, da sie einen erheblichen Einfluss auf die US- Streckenmessung besitzt. Durch eine handelsübliche Pumpe aus dem Modellbau (4) wird das temperierte Wasser in einen Zwischenbehälter (5) befördert. Dieser Behälter fasst etwas mehr Wasser als benötigt wird. Dadurch, dass das temperierte Wasser in den unteren Teil des Behälters gepumpt wird und der Überlauf (7) sich oben befindet, zirkuliert auch hier das Wasser gleichmäßig und es herrscht weiterhin eine konstante Temperatur. Von diesem Behälter wird das Wasser mit Hilfe einer hoch genauen Ernährungspumpe (6) aus der Medizin (min. 1 ml/h, max. 300 ml/h) in den abgedichteten Messtopf (2) gepumpt. Dabei wird das Wasser zunächst nochmals mittels Röhren durch das Wasserbad geführt, damit die Temperatur konstant bleibt. In den Messtopf gelangt das Wasser unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche, damit Erschütterungen der Wasseroberfläche vermieden werden. Im Topf wird die Temperatur durch einen weiteren Messfühler (9) kontrolliert. Damit im Messtopf kein Druck auf die Flüssigkeit ausgeübt wird, wird die durch das Wasser verdrängte Luft nach außen geleitet (8). Das Ansteigen des Wassers wird mit dem Ultraschallsensor (1) überwacht.

Das Experiment wurde mit dem Sensor 505 und dem Sensor 511 durchgeführt. Die Ernährungspumpe wurde mit einer Geschwindigkeit von 150 ml/h (entspricht ca. 0,83

mm/min) und 250 ml/h (entspricht ca. 1,38 mm/min) betrieben. Beide Werte wurden durch das Experiment empirisch bestätigt. Zum Wasser wurde für zwei Versuchsreihen ein Tensid (Netzmittel aus der Photographie) hinzugegeben. Das Tensid senkt die Wirkung der Adhäsionskräfte und setzt damit die Oberflächenspannung herab. In diesem Fall müsste der Einfluss des Sprungeffektes nachlassen. Das USM- Gerät misst im Messmodus „Flanke“. Zur Auswertung der Strecken wird eine Temperaturkorrektur angebracht.

Wie sich nachweisen läst, übt der Atmosphärendruck keinen Einfluss auf die Messung der Wasseroberfläche aus, obwohl durch den Druckausgleichsschlauch kein geschlossenes System mehr vorliegt. Die Kompression von Flüssigkeiten lässt sich berechnen nach:

$$\Delta V = -\frac{V \cdot p}{K}$$

wobei:

ΔV ... Volumenänderung

V ... Volumen

p ... Druck

K ... Kompressionsmodul ($K_{Wasser} = 2 \cdot 10^9 Pa$)

Die Höhenänderung lässt sich anschließend aus folgender Formel berechnen:

$$\Delta h = -\frac{\Delta V}{\pi r^2}$$

wobei:

Δh ... Höhenänderung

r ... Radius des Messtopfes

Der Atmosphärendruck liegt zwischen 900 und 1100 hPa.

p [hPa]	$\Delta V [mm^3]$	$\Delta h [mm]$
900	4,212	-0,001
1100	-5,148	-0,002

Tabelle 5.11: Maximal zulässige Luftdruckänderungen

Bei einem Luftdruck von 900 hPa wird die Flüssigkeit um 1 μm zusammengedrückt, bei 1100 hPa um 2 μm . Die Differenz von 1 μm liegt innerhalb des Auflösungsvermögens des Sensors. Somit hat eine Änderung des Atmosphärendrucks keinen Einfluss auf die Messung.

Wie erwähnt, wird während des Experiments die Temperatur der Flüssigkeit im Messtopf gemessen und eine Temperaturkorrektur an den Strecken angebracht. Falls trotz

der Temperaturkorrektur noch ein kleiner linearer Restfehler vorhanden ist, wird dieser durch die Berechnung der linearen Regression eliminiert.

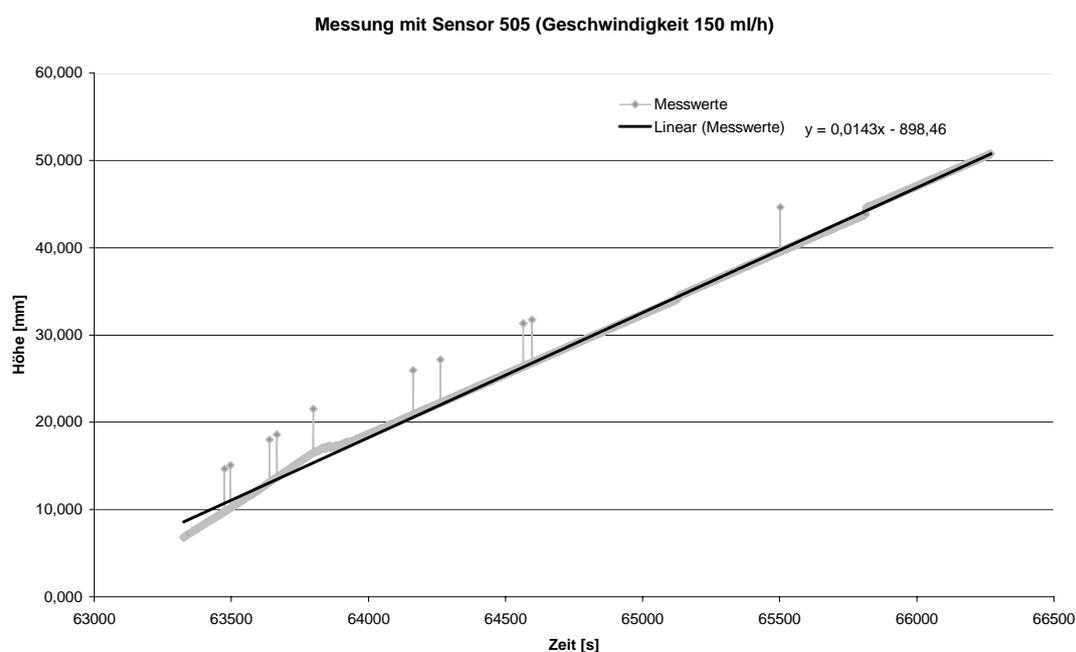


Abbildung 5.22: Unbearbeitete Messwerte des Sensors 505 (bei einer Füllgeschwindigkeit von 150 ml/h)

Nach ca. 1,5 cm ist die Einfüllphase beendet. Bis zu dieser Höhe gibt es im Messtopf Plastikringe, die dafür sorgen, dass Temperaturfühler und Zuleitung nicht in die Strahlenkeule gelangen. Die Plastikringe verändern den Radius im Messtopf, so dass sich der Anstieg der Geraden ändert. Dieser Teil der Messung wird nicht mit ausgewertet.

Während der Messungen kommt es immer wieder zu größeren Sprüngen. Diese könnten durch kondensierte Wassertropfen am Messtopftrand, die die Wasseroberfläche berühren, verursacht werden. Infolge der dadurch entstehenden Erschütterungen der Wasseroberfläche müssen einige Messreihen in unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden. Im Bild 5.22 und 5.23 sind 3 Messbereiche zu erkennen. Bevor die Messreihe jedoch in Bereich aufgeteilt wird, werden grob falsche Messwerte gestrichen. Im Bild 5.22 sind diese deutlich zu erkennen.

Nach Eliminierung der Werte und Streichung der Einfüllphase sieht das Diagramm wie folgt aus (als „Linear“ ist in den Bildern eine ausgleichende Gerade durch die Messwerte

gemeint):

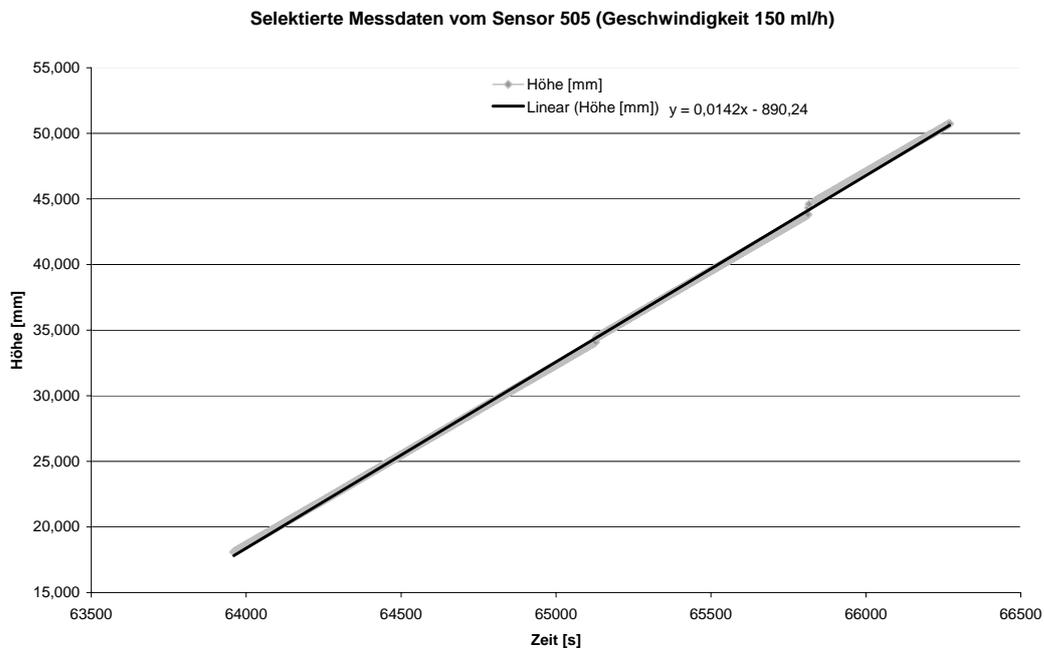


Abbildung 5.23: Selektierte Messwerte des Sensors 505 (bei einer Füllgeschwindigkeit von 150 ml/h)

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der untenstehenden Tabelle 5.12 zusammengefasst.

Sensor	505		
Bereich	1	2	3
Anzahl der Messungen	1151	663	421
Redundanz	1149	661	419
m_0 [mm]	0,004	0,004	0,004
Anstieg m [ml/s]	0,0137	0,0137	0,0136
σ_m [mm]	$3,4013 \cdot 10^{-7}$	$8,6272 \cdot 10^{-7}$	$1,5082 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 5.12: Ergebnisse des Sensors 505 (bei einer Füllgeschwindigkeit von 150 ml/h)

Die Messungen des Sensors 505 passen gut zusammen, der Anstieg m ist konstant, die Werte für m_0 sind identisch. Auffällig ist, dass m_0 kleiner als die Standardabweichung des Sensors (0,016 mm) ist. m_0 ist ein Maß dafür, wie stark die Verbesserungen

schwanken (Abweichungen von der ausgleichenden Geraden). Da diese Abweichungen kleiner als die Standardabweichung des Gerätes sind, können bei diesem Versuch auf keine Sprungeffekte geschlossen werden. Die Abweichungen befinden sich innerhalb der Gerätegenauigkeit.

Bei derselben Geschwindigkeit von 150 ml/h ergaben sich für den Sensor 511 folgende Ergebnisse:

Sensor	511					
	1		2	3		4 (mit Tensid)
Bereiche	1	2		1	2	1
Anzahl der Messungen	391	1309	463	1012	898	2469
Redundanz	389	1307	461	1010	896	2467
m_0 [mm]	0,005	0,003	0,020	0,003	0,003	0,008
Anstieg m [ml/s]	0,0131	0,0131	0,0199	0,0137	0,0136	0,0135
σ_m	$2,04 \cdot 10^{-6}$	$1,74 \cdot 10^{-7}$	$6,83 \cdot 10^{-6}$	$3,12 \cdot 10^{-7}$	$3,36 \cdot 10^{-7}$	$2,28 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 5.13: Ergebnisse des Sensors 511 (bei einer Füllgeschwindigkeit von 150 ml/h)

Die Messungen der Versuchsreihe 2 mit dem Sensor 511 müssen gestrichen werden. Besonders auffällig an dieser Messung ist, dass der Anstieg m sich stark von den anderen Versuchsreihen des Sensors unterscheidet. Es lag wahrscheinlich ein Fehler während der Reihe vor. Eventuell war der Messtopf nicht richtig abgedichtet, so dass zusätzlich Wasser in den Messtopf gelangte. Dies würde auch den größeren Anstieg m erklären. Auch hier sind die geschätzten Standardabweichungen nach der Ausgleichung m_0 fast identisch und immer kleiner als die Standardabweichung des Systems.

Beim Experiment mit Zusatz eines Tensides ist die besonders hohe Redundanz auffällig. Die gesamte Messreihe konnte ausgewertet werden, ohne sie in Teilbereiche zerlegen zu müssen. Der Maßstab ist mit dem der anderen Experimente identisch, so dass das Tensid insgesamt keinen erkennbaren Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

Die gleitenden Mittelwerte der Verbesserungen in einem Diagramm dargestellt ergibt folgendes Bild:

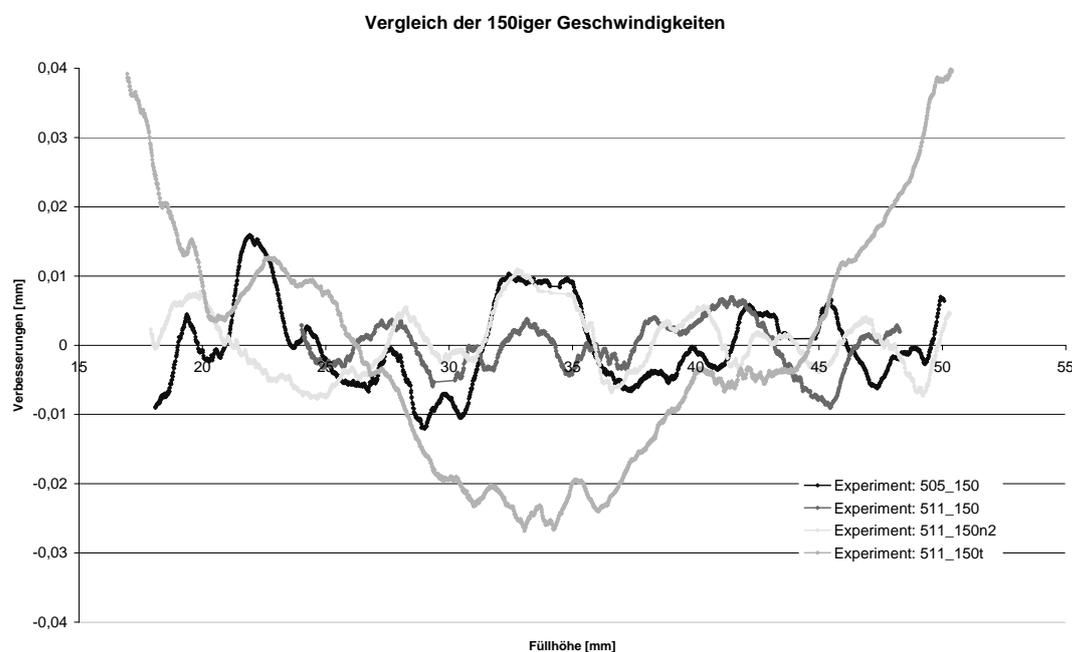


Abbildung 5.24: Vergleich aller Messungen mit einer Geschwindigkeit von 150ml/h

Der Skizze ist eine gewisse Systematik der Verbesserungen zu entnehmen. So ist bei einer Füllstandshöhe von ca. 33 mm ein Maximum in allen Messreihen vorhanden. Eine Ursache dafür können Unebenheiten wie Wölbungen im Messtopf sein. Der Effekt der Variation des Durchmessers des Messtopfes überlagert sich mit eventuell vorhandenen Sprungeffekten. Dieser lässt sich somit nicht mit den vorgenommenen Experimenten bestimmen. Um die Sprungeffekte festzustellen, muss dieser Einfluss ausgeschlossen werden. Dies ist durch ein aufwändiges Kollokationsverfahren möglich. Das Kollokationsverfahren trennt Verbesserungen aufgrund systematischer Einflüsse (wie die Variationen des Durchmessers) von zufälligen Verbesserungen, die durch den Sprungeffekt verursacht werden können. Diese Verbesserungen sollten dann mit Hilfe einer Fast-Fourier-Transformation analysiert werden. Falls ein Sprungeffekt vorhanden ist, müsste er eine bestimmte Frequenz besitzen. Die in den Messreihen vorhandenen Frequenzen lassen sich mit der Fast-Fourier-Transformation ermitteln. Die Frequenz bei den Versuchsreihen mit Zugabe des Tensids sollte größer sein, da durch das Tensid die Oberflächenspannung herabgesetzt wird.

Ziel des Experiments war es zu untersuchen, ob der Sprungeffekt direkt nachgewiesen werden kann. Eine rein statistische Analyse sollte nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden keine weiteren Berechnungen vorgenommen, da sie den Rahmen

der Diplomarbeit sprengen würden.

Sensor	505			511	511 (mit Tensid)
Bereich	1	2	3	1	1
Anzahl der Messungen	429	543	253	1312	1526
Redundanz	427	541	251	1310	1524
m_0 [mm]	0,004	0,004	0,005	0,011	0,004
Anstieg m [ml/s]	0,0230	0,0230	0,0228	0,0227	0,0219
σ_m [mm]	$1,46 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$3,84 \cdot 10^{-6}$	$7,03 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 5.14: Ergebnisse der Sensoren 505 und 511 (Füllgeschwindigkeit: 250 ml/h)

Auch bei einer Füllgeschwindigkeit von 250 ml/h ist der Anstieg identisch und m_0 ist wesentlich kleiner als die Standardabweichung des Instruments. So können auch hier eventuell vorhandene Sprungeffekte nicht erkannt werden, da sie unterhalb der Messgenauigkeit des Sensors liegen.

Bei der Messung mit Tensid konnte wiederum die gesamte Messreihe ohne Zerlegung in Teilbereiche ausgewertet werden. Der Anstieg ist mit dem der anderen Experimente vergleichbar.

Auf eine Darstellung der Verbesserungen wird verzichtet, da daraus keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können.

Falls Sprungeffekte vorhanden sind, haben diese auf das untersuchte Messsystem keine Einflüsse, da sie unterhalb der Messgenauigkeit liegen. Wenn ein Sprungeffekt des Wassers nachgewiesen werden soll, sind andere Messsysteme (z.B. Kapazitive und mit Hilfe von Wirbelströmen) zu benutzen.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Die Abtastung der Wasseroberfläche erfolgt mittels Ultraschall. Ultraschall bietet die geforderte Genauigkeit und ist eine preisgünstige Lösung. Die Ultraschallmessung ist induktiven, kapazitiven und faseroptischen Systemen und Triangulationssensoren vorzuziehen. Diese Verfahren erreichen auch die geforderte Genauigkeit, sind aber gegen die extremen Bedingungen im Tunnel des Linearbeschleunigers anfälliger. Bei der Ultraschallmessung ist durch Integration einer Referenzstrecke eine Kalibrierung des Systems vor jeder Messung möglich. Diese Möglichkeit besteht bei keinem der anderen Sensoren.

Der zur Ultraschallmessung verwendete Prüfkopf H10 KB3 besitzt eine Nahfeldlänge von 40mm mit ausgeprägten räumlichem Interferenzfeld. Die US- Intensität ist auf der Kegelachse maximal und nimmt von der Mitte nach außen kontinuierlich ab. Die Streckenmessung sollte im Zentrum der Strahlenkeule vorgenommen werden. Der Messmodus „Flanke“ ist zu bevorzugen.

Die Frequenz des Sensors beträgt 10MHz. Durch hohe Frequenzen ist eine genauere Laufzeitmessung möglich, gleichzeitig kommt es zu starker Absorption. Da nur Messungen mit geringen Wassersäulen nötig sind, ist dies unerheblich für das Messkonzept. Phänomene der Streuung konnten nicht beobachtet werden (z.B. unregelmäßige Echoverteilung).

Die Referenzstrecke sollte aus einer konvex geformten Oberfläche bestehen, da die Reflexionseigenschaften dort besser als an ebenen Flächen sind. Da die Kalibrierung des Sensors mit Hilfe der Referenzstrecke erfolgt, ist es sehr wichtig, dass die Länge der Referenzstrecke hoch genau bekannt (mindestens 2 μm) und gegen äußere Einwirkungen wie Temperaturänderungen unempfindlich ist. Diese Eigenschaften besitzen z.B. die Stoffe Diamant, Invar und Zerodur.

Die Standardabweichung des Gerätes bei Messungen in Wasser liegt bei 0,016 mm und ist damit ca. fünfmal schlechter als das Auflösungsvermögen des Sensors von 0,003 mm. Die ermittelten 0,016 mm sind ausreichend für die geforderten Genauigkeiten.

Das Material des Sensors ist temperaturabhängig. Die Temperaturabhängigkeit muss nur bei sehr starken Temperaturschwankungen berücksichtigt werden.

Eine Vorlaufzeit und Sprungeffekte der Wasseroberfläche am Messtopfrand konnten nicht nachgewiesen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Aehnelt, G., „Hydrostatische und barometrische Höhenbestimmung“, Ingenieurschule für Geodäsie und Kartographie Dresden, 1981
- [2] Becker, Christian, „Diplomarbeit - Untersuchung von Sensorsystemen zur hochgenauen Abstandsmessung“, unveröffentlicht, Bauhausuniversität Weimar 2000
- [3] Brunn, B., Weber, H., Wübbelmann, H., „Hydrostatisches Höhenüberwachungssystem - Neues automatisiertes System mit Ultraschallabstandsmessung“, Der Vermessungsingenieur 3/01
- [4] Deumlich, F., „Vermessungstechnik - Libellen und Kompensatoren“, Ingenieurschule für Geodäsie und Kartographie Dresden 1977
- [5] Gründig, Lothar, Aufzeichnungen aus den Lehrveranstaltungen Ausgleichsrechnung I- III
- [6] Heim, Michael, Endress + Hauser GmbH, Maulburg, „Puls- Radar zur mm- genauen Füllstandsmessung“, tm- Technisches Messen 67 (5/2000)
- [7] Kopka, Helmut, „Latex - Band 1: Einführung“, 3. überarbeitete Auflage, Addison-Wesley Verlag 2000v
- [8] Krautkrämer GmbH & Co. OHG, „Echo 38“, 7/99
- [9] Krautkrämer GmbH & Co. OHG, „Echo 39“, 12/02
- [10] Krautkrämer Ultrasonic Systems „Prüfköpfe - Handliche Präzisionswerkzeuge für die Ultraschallprüfung“ Stand April 2003
- [11] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H., „Werkstoffprüfung mit Ultraschall“, 5. völlig überarbeitete Auflage, Springer- Verlag 1986
- [12] Lehfeldt, Wilhelm, „Ultraschall - kurz und bündig (Physikalische Grundlagen und Anwendungen)“, Vogel Verlag 1973
- [13] Millner, Rudolf „Ultraschalltechnik - Grundlagen und Anwendungen“, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1987
- [14] Niemeier, Wolfgang, „Ausgleichsrechnung“, deGruyter- Verlag 2002

-
- [15] Schlösser Markus, Herty Andreas, DESY, „High precision survey and Aligment of large linear colliders - Vertical Aligment“
- [16] Schwarz, Willfried, „Die Vermessung von Teilchenbeschleunigern unter besonderer Berücksichtigung des geplanten, über 30km langen Linearbeschleunigers“, Schriftenreihe des DVW 1998, Verlag Konrad Wittwer
- [17] Schwarz, Willfried, „Geodätische Messverfahren für das Bauwesen“, DVW e.V.-Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landesmanagement, Schriftenreihe 43/ 2002, S.23- 42
- [18] Schwarz, Willfried, „Hydrostatisches Messsystem mit Ultraschall“
- [19] Schwarz, Willfried, „Stand der Entwicklung der Sensorvermessung“, aus „Moderne Sensorik für die Bauvermessung“ Verein deutscher Ingenieure, 1999
- [20] Schwarz, Willfried, „Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagebau“, Wittwer- Verlag 1995
- [21] Thierbach, Helmut, „Hydrostatische Messsysteme - Entwicklungen und Anwendungen“, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe 1979
- [22] „Das große Tafelwerk“, Verlag für Volk und Wissen
- [23] „Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II“, Patec- Verlag (Gesellschaft für Technik und Bildung)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schlauchwaage	8
2.2	Freiberger Schlauchwaage (Quelle: [21])	10
2.3	Aufbau eines Interferometersystems	11
2.4	Schema: Elektrooptische Tiefenmessung	12
2.5	Elektrooptische Abstandsmessung	12
2.6	Triangulationssensoren	12
2.7	Prinzip der faseroptischen Methode	13
2.8	Niveaumesser (Schema)	15
2.9	Kapazitiver Abgriff (2)	15
2.10	Differentialdrossel und Differentialtransformator	16
2.11	Induktiver Abgriff mittels Schwimmer	16
2.12	Aachener Schlauchwaage [21]	18
2.13	US-Sensor der FH Oldenburg [3]	18
2.14	Ultraschallsensor DESY/ Bauhaus- Universität Weimar	19
2.15	Messung mittels hydrostatischen Drucks [21]	20
3.1	Energiegrößen	25
3.2	Interferenzfeld	26
3.3	Öffnungswinkel	27
3.4	Strahlenkeule mit Nebenmaxima	27
3.5	Wellenarten	29
3.6	Reflexionskoeffizient R und Durchlasskoeffizient D (Quelle: [13])	31
3.7	Brechung I	31
3.8	Brechung II	32
3.9	Zeitlich konstante Schwingung in stehender Welle	33
3.10	Streuschema	35
3.11	Schallbeugung an Hindernissen und Öffnungen	36
3.12	Schallgeschwindigkeit in Meerwasser (Quelle: [12])	37
3.13	Galton- Pfeife	38
3.14	Impulsanregungsverfahren	38
3.15	Magnetostriktiver Schwinger	41
3.16	Normalprüfkopf	42
3.17	S/E- Prüfkopf	43
3.18	Winkelprüfköpfe	43

4.1	Messaufbau	46
4.2	Aussehen der Strahlenkeule (Quelle [10])	47
4.3	Hf- Welle, positive und negative Halbwelle, Vollweg	48
4.4	USM25 mit Sensorkopf der H18 KB3 Firma Krautkrämer (Quelle [15])	49
4.5	Monitor des USM25	50
4.6	Messstift	51
5.1	Interferenzfeld	56
5.2	Strahlenkeule mit Nebenmaxima	56
5.3	Experimentaufbau zur Untersuchung der Strahlenkeule (Schema)	57
5.4	Signalstärke in verschiedenen Ebenen (Sensor 511)	58
5.5	Signalstärke in verschiedenen Ebenen (Sensor 505)	58
5.6	Streckenmessungen in Ebene 4 (Sensor 505)	59
5.7	Streckenmessungen in Ebene 4 (Sensor 511)	59
5.8	Streckenreduktion in der Strahlenkeule	60
5.9	Streckenreduktion in der Strahlenkeule (Sensor 505)	60
5.10	Streckenreduktion in der Strahlenkeule (Sensor 511)	61
5.11	Einfluss der US- Intensitäten auf die Streckenmessung	61
5.12	Schematischer Aufbau zur Genauigkeitsuntersuchung	62
5.13	Abbesche Komparatorprinzip	63
5.14	Verbesserungen der Gesamtausgleichung (Sensors 511, Experiment 3)	64
5.15	Genauigkeitsuntersuchung (Sensor 511, Hinweg, Experiments 3)	65
5.16	Verbesserung der linearen Regression (Sensor 511, Hinweg, Experiment 3)	66
5.17	Reflexionen an der Wasser- bzw. Sensoroberfläche	70
5.18	Querschnitt des Experimentaufbaus	74
5.19	Temperaturabhängigkeit des Sensors 511	77
5.20	Temperaturverlauf beim Sensors 511	78
5.21	Experimentaufbau zur Untersuchung von Sprungeffekten	80
5.22	Unbearbeitete Messwerte des Sensors 505 (150 ml/h)	82
5.23	Selektierte Messwerte des Sensors 505 (150 ml/h)	83
5.24	Vergleich aller Messungen mit einer Geschwindigkeit von 150ml/h	85
A.1	Technische Skizze des Prüfkopfes (H10 KB3)	98
A.2	Heidenhain Messtaster	99
A.3	Inkrementaltaster	99
A.4	Schematischer Aufbau zur Überprüfung des Inkrementaltasters	100
A.5	Verbesserungen der linearen Regression (über den Gesamtweg)	101
A.6	Verbesserungen der Gesamtausgleichung	102
A.7	Verbesserungen der Einzelausgleichung (Hinweg)	104
A.8	Verbesserungen der Einzelausgleichung (Rückweg)	104
A.9	Messaufbau Agilent 34970A (der Bedienungsanleitung entnommen)	105
B.1	Aussehen der Strahlenkeule: 1. Ebene	108
B.2	Aussehen der Strahlenkeule: 2. Ebene	109
B.3	Aussehen der Strahlenkeule: 3. Ebene	110
B.4	Aussehen der Strahlenkeule: 4. Ebene	111

B.5	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 505, Hinweg, Experiment 1	113
B.6	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 505, Rückweg, Experiment 2	113
B.7	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 511, Hinweg, Experiment 2	114
B.8	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 511, Rückweg, Experiment 2	114
B.9	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 511, Hinweg, Experiment 3	115
B.10	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 511, Rückweg, Experiment 3	115
B.11	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 511, Hinweg, Experiment 4	116
B.12	Genauigkeitsuntersuchung Sensor 511, Rückweg, Experiment 4	116
B.13	Temperaturabhängigkeit des Sensors 505, 1. Experiment	118
B.14	Temperaturabhängigkeit des Sensors 505, 2. Experiment	118
B.15	Temperaturabhängigkeit des Sensors 511, 1. Experiment	119
B.16	Temperaturabhängigkeit des Sensors 511, 2. Experiment	119

Tabellenverzeichnis

2.1	Produkte zur Abtastung der Wasseroberfläche mit mechanischen Spitzen	11
2.2	Produkte zur optischen Abstandsmessung	14
2.3	Produkte zur elektrischen Abstandsmessung	17
2.4	Produkte zur akustischen Abstandsmessung	19
3.1	Gebiete der Akustik	23
3.2	Schallfeldgrößen	24
3.3	Energiegrößen des Ultraschalls	26
3.4	Schallgeschwindigkeiten von Longitudinal- und Transversalwellen	29
3.5	Vergleich Reflexion/ Streuung	35
4.1	Eigenschaften des Sensors H10 KB3	48
4.2	Eigenschaften des Ultraschallmessgerätes USM25	51
4.3	Genauigkeitsbetrachtungen zum Material der Referenzstrecke	54
5.1	Messbereiche	64
5.2	Auswertung der Experimente der Genauigkeitsuntersuchung	66
5.3	Auswertung Sensor 505	67
5.4	Auswertung Sensor 511	68
5.5	Werte zur Berechnung des F- Testes	68
5.6	Rechnerischer Berücksichtigung des Phasensprunges	72
5.7	Messtechnischer Berücksichtigung des Phasensprunges	72
5.8	Spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe	75
5.9	Maximale Temperaturdifferenzen während der Experimente	76
5.10	Maximale Differenzen der registrierten Strecken	78
5.11	Maximal zulässige Luftdruckänderungen	81
5.12	Ergebnisse des Sensors 505 (Füllgeschwindigkeit: 150 ml/h)	83
5.13	Ergebnisse des Sensors 511 (Füllgeschwindigkeit: 150 ml/h)	84
5.14	Ergebnisse der Sensoren 505 und 511 (Füllgeschwindigkeit: 250 ml/h) .	86

Anhang A

Verwendete Geräte

In diesem Kapitel wird auf Funktion und Genauigkeit der Geräte eingegangen, die bei den Experimenten verwendet wurden und im Haupttext nicht näher erläutert wurden.

A.1 Sensorkopf H10 KB3

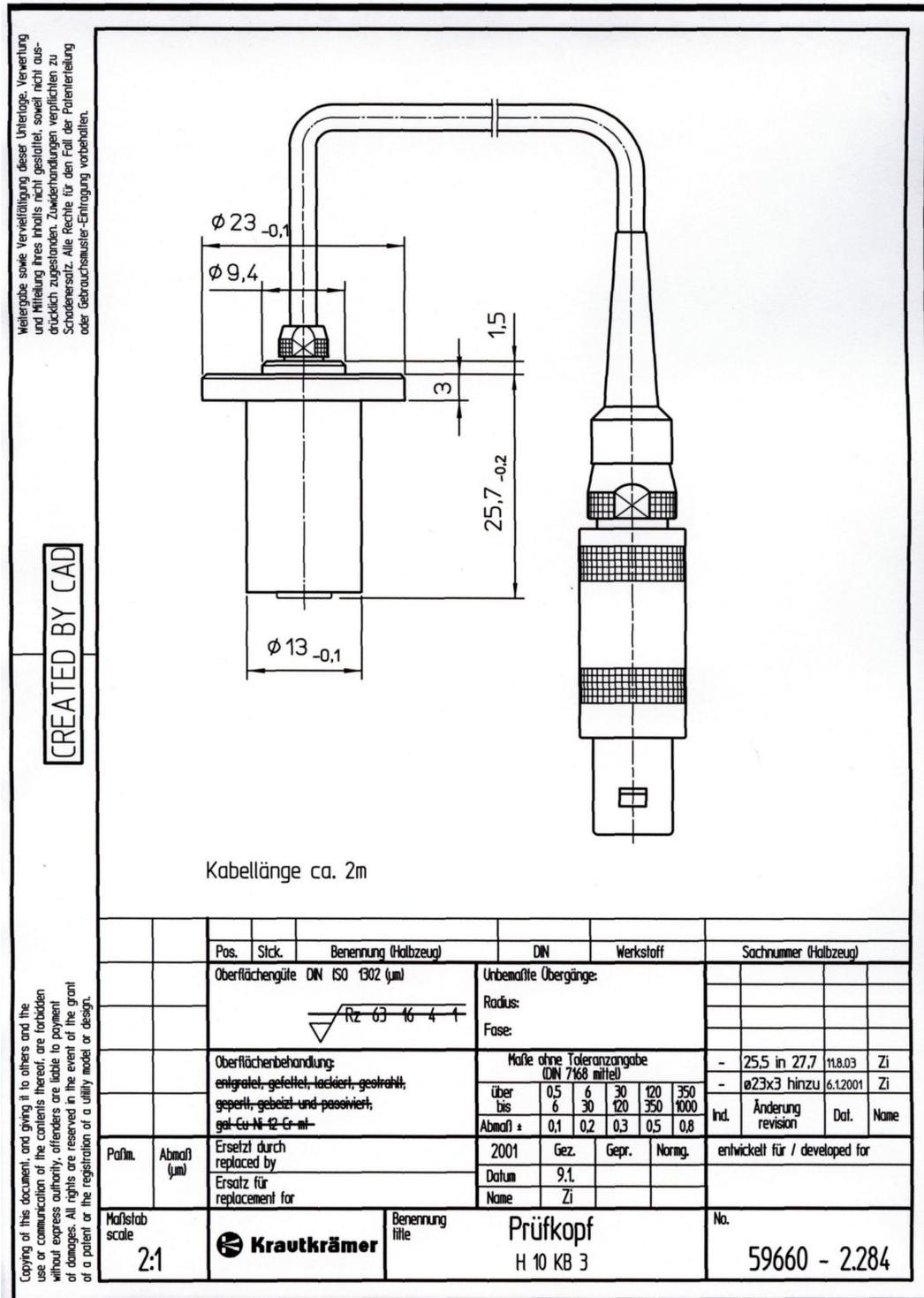


Abbildung A.1: Technische Skizze des Prüfkopfes (H10 KB3)

A.2 Inkrementaltaster der Firma Heidenhain

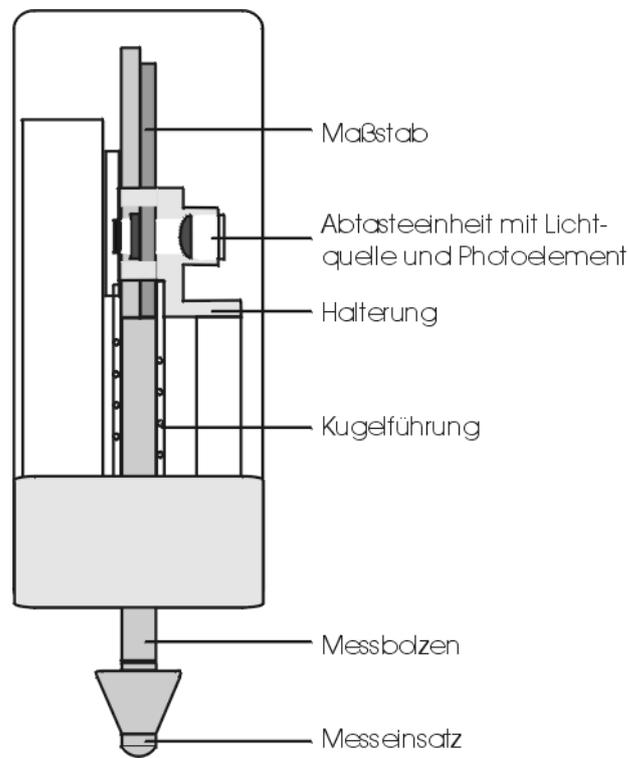


Abbildung A.2: Heidenhain Messtaster

Funktionsprinzip: Das Messprinzip beruht auf der photoelektronischen Abtastung eines inkrementalen Maßstabes. Die Teilungsperioden betragen zwischen 2 und $5\mu\text{m}$. Die inkrementale Teilung befindet sich auf Trägerkörpern aus Glas oder Keramik. Diese Trägerkörper ermöglichen einen großen Messweg, sind unempfindlich gegenüber Vibrationen und Schockbelastung und haben ein definiertes thermisches Verhalten. Luftdruck und Feuchtigkeit haben laut Hersteller keinen Einfluss auf die Messung.

Die photoelektronische Abtastung der Inkrementalteilung erfolgt berührungslos. Dabei fällt Licht auf die strukturierte Abtastplatte über den Maßstab auf Photoelemente und erzeugt elektrische Signale. Die Abtastung erfolgt durch Messung von Interferenzen zwischen der Referenzmarke (Bezugspunkt einer Messung) und der Position des Tasters. Durch Interpolation in der Folgeelektronik sind sehr kleine Messschritte möglich. Alle Taster arbeiten nach dem Abbe'schen Messprinzip.

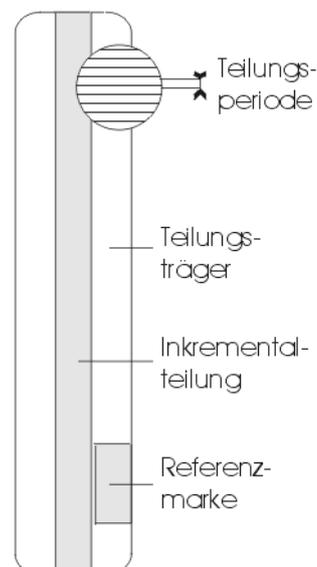


Abbildung A.3: Inkrementaltaster

Während der Experimente wurde der Taster MT2501 der Firma Heidenhain benutzt. Der Maßstab im Taster besteht aus Zerodur. Zerodur besitzt praktisch keine thermische Längenausdehnung. Messbolzen und Halterung sind aus Stahl. Der Messbereich beträgt 2,5 cm. Die Genauigkeit liegt laut Hersteller bei $0,2 \mu\text{m}$. Es erfolgte vorab eine Kalibrierung mittels eines Interferometers. Die Ergebnisse werden auf den nächsten Seiten zusammengefasst.

Technische Daten (Herstellerangaben):

Systemgenauigkeit: $0,2 \mu\text{m}$
 Messweg: 25 mm
 Arbeitstemperatur: 10- 40°C
 Bezugstemperatur: 20°C
 Masse: 180g

Überprüft wurde der Inkrementaltaster MT2501 (Inventarnummer: 1082 der Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Geodäsie und Photogrammetrie der Bauhaus- Universität Weimar) der Firma Heidenhain mit Hilfe des Interferometers HP5519A der Firma Hewlett Packard (jetzt Agilent). Das Interferometer besitzt laut Hersteller eine Auflösung von 10 nm. Die Wellenlänge des Lichtes (im Vakuum) beträgt $632,991354 \text{ nm}/64$.

Der Aufbau des Experiments ist schemenhaft in Abbildung A.4 dargestellt.

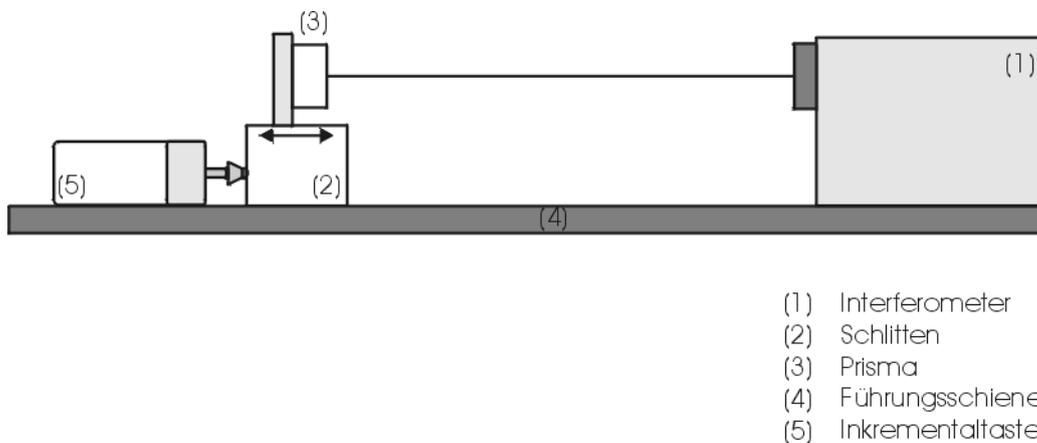


Abbildung A.4: Schematischer Aufbau zur Überprüfung des Inkrementaltasters

Interferometer (1) und Inkrementaltaster (5) sind fest an einer Lineareinheit installiert. Das Prisma, das vom Interferometer angemessen wird, ist Bestandteil der Lineareinheit. Die Lineareinheit kann entlang der Führungsschiene stufenweise verstellt werden. Bewegt sich die Lineareinheit, kann die Positionsänderung sowohl vom Interferometer als auch vom Inkrementaltaster bestimmt werden.

Ähnlich wie bei der Überprüfung der Genauigkeit des Ultraschallsensors, werden die Messungen des Inkrementaltasters den Messungen des Interferometers gegenübergestellt. Es wird eine lineare Regression gerechnet. Werden die Verbesserungen gegenüber den Messungen des Interferometers dargestellt, ergibt sich folgendes Bild:

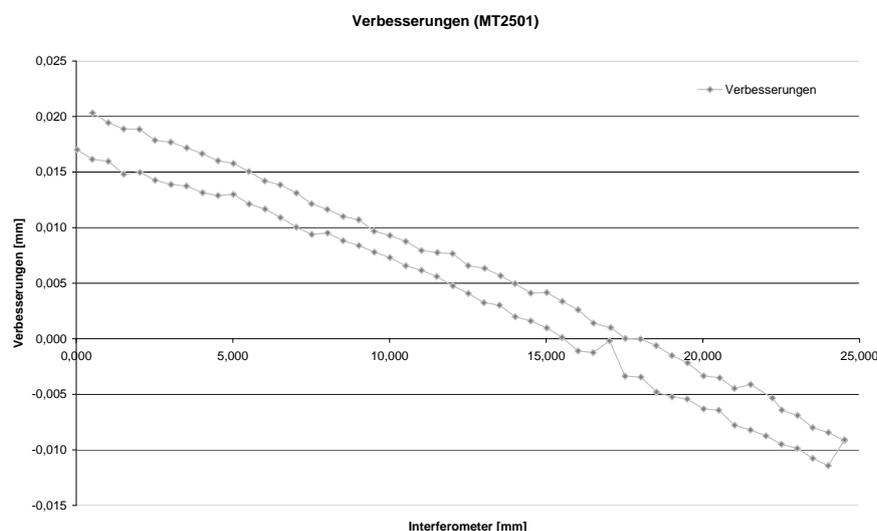


Abbildung A.5: Verbesserungen der linearen Regression (über den Gesamtweg)

Dieses Bild belegt, dass der Hystereseeffekt durch den Inkrementaltaster verursacht wird (vgl. Abschnitt 5.2). Aus diesem Grund wurden für Hin- und Rückweg getrennte Ausgleichungen gerechnet. Die Verbesserungen sind am Ende dieses Abschnittes graphisch dargestellt.

	Hinweg	Rückweg
Redundanz	49	49
Anstieg m	1,00026	1,00024
σ_m	0,00001	0,00002
m_0 [mm]	0,0005	0,0008
$v^T P v$	$9,83 \cdot 10^{-6}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$

Als Standardabweichung σ_0 wurden die Herstellerangaben von 0,0002 mm angenommen. Die Hypothese des einseitigen χ^2 - Tests ($\sigma_0 = m_0$, mit $\alpha = 5\%$) wurde abgelehnt, die Maßstäbe sind signifikant von „1“ verschieden (zweiseitiger T- Test).

Es ist anzunehmen, dass die Anstiege aus Hin- und Rückweg identisch sind und nicht signifikant voneinander abweichen. Aus diesem Grund wird eine Ausgleichung mit allen Beobachtungen aus Hin- und Rückweg berechnet. Als Unbekannte werden zwei Achsenschnittpunkte und der gemeinsame Maßstab eingeführt.

	Gesamtausgleichung
Redundanz	95
Anstieg m	1,00025
σ_m	0,00037
m_0 [mm]	0,0006
$v^T P v$	$4,32 \cdot 10^{-5}$

Auch hier wird die Hypothese des einseitigen χ^2 - Test zur Überprüfung des mathematischen Modells wieder abgelehnt ($\sigma_0 < m_0$). Die Hypothese des zweiseitigen T- Tests (α), dass der Maßstab signifikant von „1“ abweicht, wird angenommen. Der errechnete Maßstab ist signifikant.

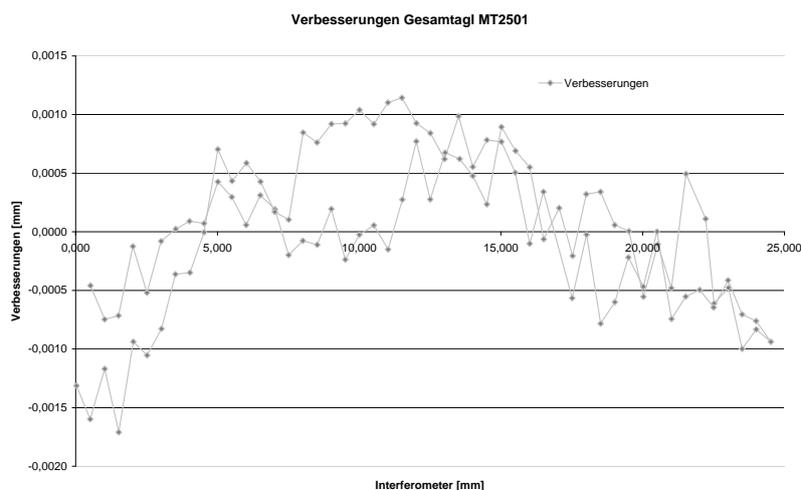


Abbildung A.6: Verbesserungen der Gesamtausgleichung unter Berücksichtigung zweier Achsenschnittpunkte

Ein F- Test hat die Hypothese bestätigt, dass das m_0 der Gesamtausgleichung nicht signifikant von den m_0 der Einzelausgleichungen abweicht. Die Standardabweichung des Gerätes wird mit $0,6 \mu\text{m}$ angenommen, ein Maßstab liegt nicht vor.

Das obige Bild A.6 der Verbesserungen läßt erkennen, dass nicht nur ein linearer Term enthalten ist, sondern auch ein quadratischer. Deshalb werden die Einzelausgleichungen und die Gesamtausgleichung mit einem zusätzlichen quadratischen Term nochmals

berechnet. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

	Hinweg	Rückweg	Gesamtausgleichung
Redundanz	46	46	93
Anstieg m	1,000074	0,999867	0,999976
σ_m	0,000026	0,000016	0,000023
Quadratischer Term q	0,000007	0,000016	0,000011
σ_q	0,000001	0,000001	0,000001
m_0	0,0003	0,0005	0,0004
$v^T P v$	$4,56 \cdot 10^{-6}$	$9,32 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$

Die Hypothese des einseitigen χ^2 - Tests zur Überprüfung des mathematischen und stochastischen Modells ($\sigma_0 < m_0$) wird bei allen Ausgleichungen angenommen. Ein F-Test hat bewiesen, dass durch die Einführung des quadratischen Terms die Genauigkeit gesteigert werden konnte. Der quadratische Term q ist signifikant. Es wurde auch bewiesen, dass die Gesamtausgleichung genau der Einzelauswertungen entspricht. Die bei der Gesamtausgleichung ermittelten Unbekannten weichen nicht signifikant von den der Einzelausgleichungen ab.

Bei der Gesamtausgleichung ist der berechnete Anstieg m nicht signifikant von „1“ verschieden. Der quadratische Term hingegen ist wie bereits erwähnt signifikant. Die Standardabweichung des Inkrementaltasters bei Berücksichtigung des quadratischen Terms beträgt $0,4 \mu\text{m}$ (entspricht dem m_0).

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Standardabweichung des Inkrementaltasters unter Berücksichtigung eines linearen Terms bei $0,6 \mu\text{m}$ liegt. Der lineare Term ist signifikant. Die Standardabweichung liegt bei $0,4 \mu\text{m}$ bei Erweiterung um einen quadratischen Term. Der lineare Term ist in diesem Fall nicht signifikant, dafür jedoch der quadratische Term. In keinem der beiden Fälle konnten die Genauigkeitsangaben des Herstellers (Standardabweichung von $0,2 \mu\text{m}$) nachgewiesen werden.

Alle genannten Standardabweichungen sind für die Überprüfung des Ultraschallsensors (Auflösungsvermögen von $3 \mu\text{m}$) zulässig.

Verbesserungen der beiden Einzelausgleichungen:

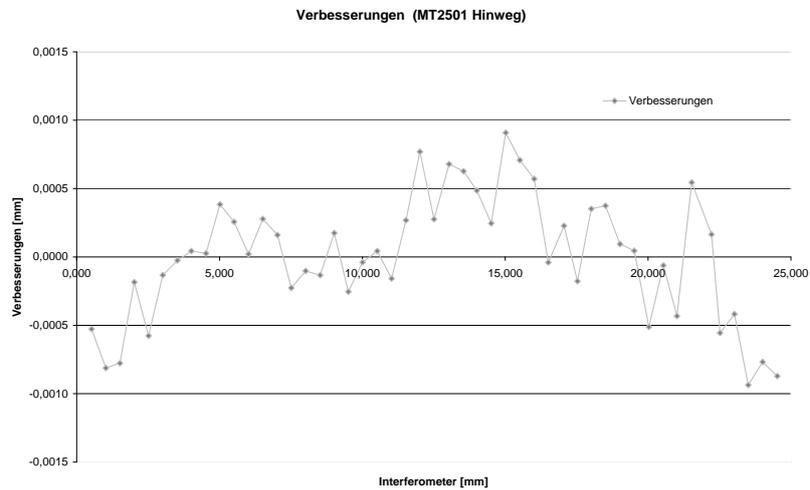


Abbildung A.7: Verbesserungen der Einzelausgleichung (Hinweg)

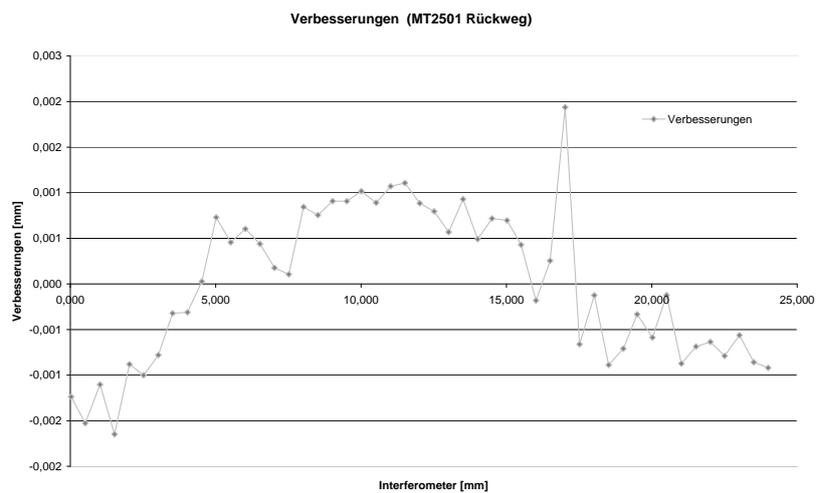


Abbildung A.8: Verbesserungen der Einzelausgleichung (Rückweg)

A.3 Agilent 34970A

Die Temperaturmessungen erfolgten mit dem Agilent 34901A. Bei diesem Gerät handelt es sich um ein Messdatenerfassungs-/ Schaltsystem für vielseitige Anwendungszwecke. Das Gerät kann 11 verschiedene Inputsignale registrieren. Dies wären Temperaturmessungen mit Thermoelementen, RTDs und wärmeabhängigen Widerständen, 2- und 4- Kabel Widerstände, Gleich- und Wechselstrom, Frequenz und Periode, Gleich- und Wechselspannung. Es besitzt 3 Steckplätze mit bis zu 96 Matrix- Koppelpunkten oder 120 einpoligen Kanälen. Die Konfiguration jedes Kanals erfolgt einzeln.

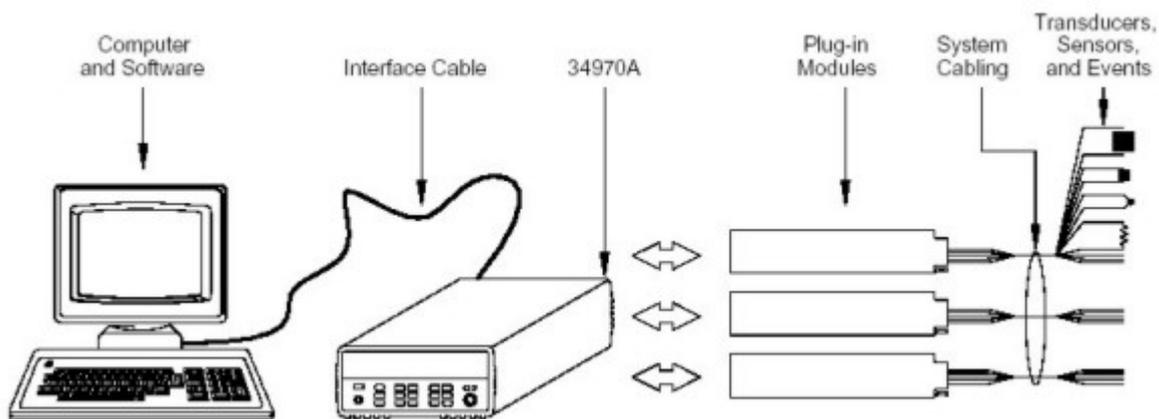


Abbildung A.9: Messaufbau Agilent 34970A (der Bedienungsanleitung entnommen)

Grundausrüstung des Agilents 34970A:

- Grundausrüstung: 3 Steckplätze (Plug-in Modules) mit bis zu 96 Matrix- Koppelpunkten oder 120 einpoligen Kanälen
- 8 Einschubmodule für Schaltung und Steuerung
- Nichtflüchtiger Speicher für 50.000 Messwerte
- Integrierte GPIB- RS-232- Schnittstelle
- Skalierungsfunktionen für die Umwandlung der eingehenden Rohdaten in benutzerfreundliche Einheiten
- Einstellbare Alarmgrenzwerte für jeden Eingangskanal

Software und Sensoren müssen den Anforderungen entsprechend gewählt werden. Die Genauigkeit der Messung hängt vor allem von den eingesetzten Sensoren ab.

Technische Daten Agilent 34970A:

- Geschwindigkeit der Datenerfassung: 60 Kanäle/ Sekunde
- Maximale Spannung: 300 V
- Maximale Stromstärke: 1 A
- Bandbreite: 10 MHz
- Thermaler Offset: $<3 \mu\text{V}$

Weitere Informationen sind der Homepage <http://www.agilent.com> oder <http://www.agilent.de> zu entnehmen.

Anhang B

Experimentelle Untersuchungen (Abbildungen und Skizzen)

In diesem Kapitel werden alle Skizzen abgebildet, die auf Grund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt wurden. Dabei handelt es sich um Abbildungen der Untersuchungen der Strahlenkeule, der Genauigkeitsbetrachtung und der Temperaturabhängigkeit des Sensors.

B.1 Aussehen der Strahlenkeule

Auf den nächsten Seiten sind die Skizzen der Auswertung zum Aussehen der Strahlenkeule zusammengefasst. Die Skizzen jeder Ebene werden jeweils auf einem Blatt dargestellt. Oben befinden sich die Ergebnisse des Sensors 505, unten die des Sensors 511. Die reinen Messergebnisse beinhalten noch Phasensprünge, die entstehen, wenn innerhalb der Blende des USM25 unterschiedliche Extreme registriert werden. Dadurch kommt es zu Längenänderungen, wie den Skizzen entnommen werden kann. Die von Phasensprüngen bereinigten Skizzen besitzen eine gleichmäßigere Form.

1. Ebene

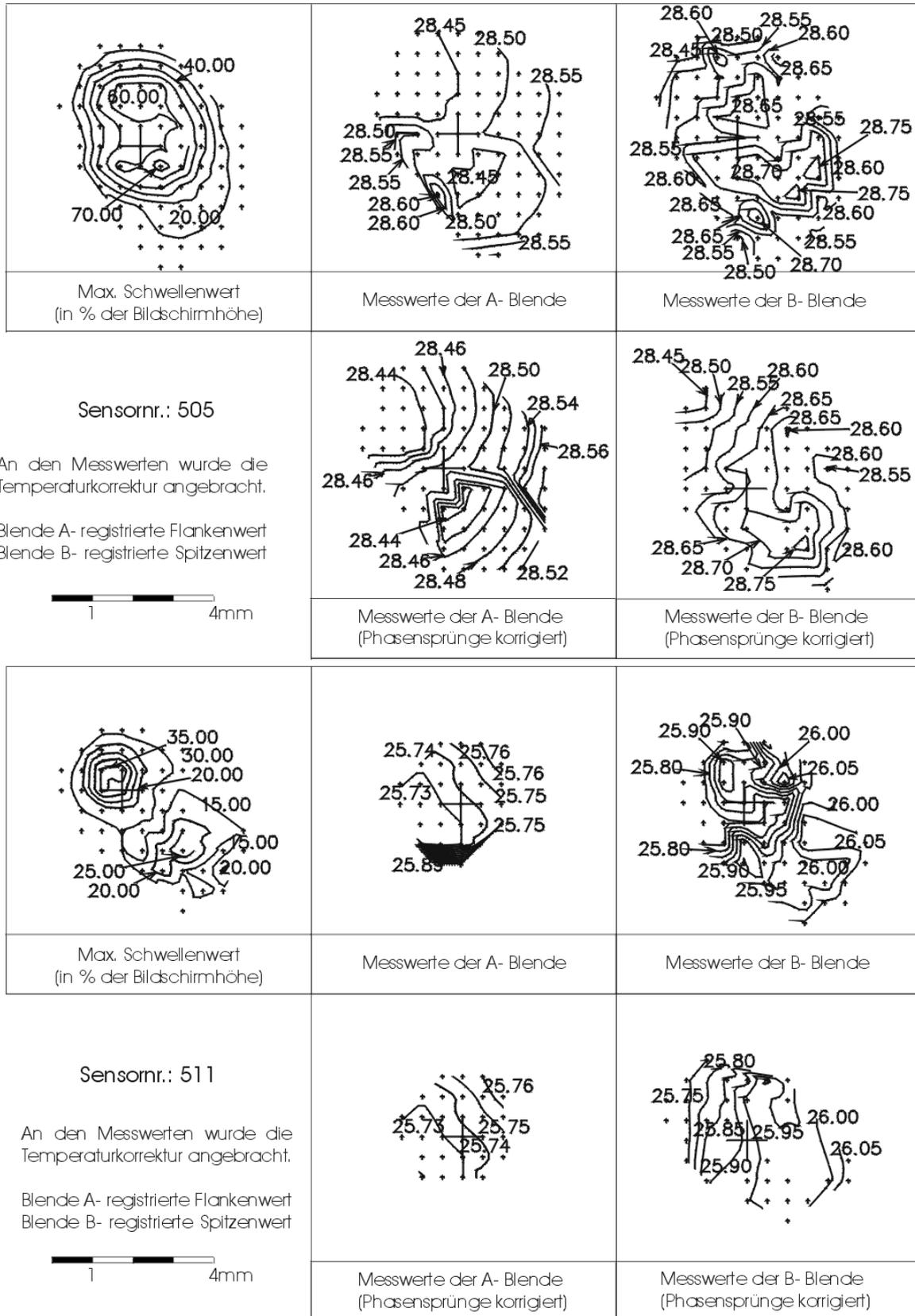


Abbildung B.1: Aussehen der Strahlenkeule: 1. Ebene

2. Ebene

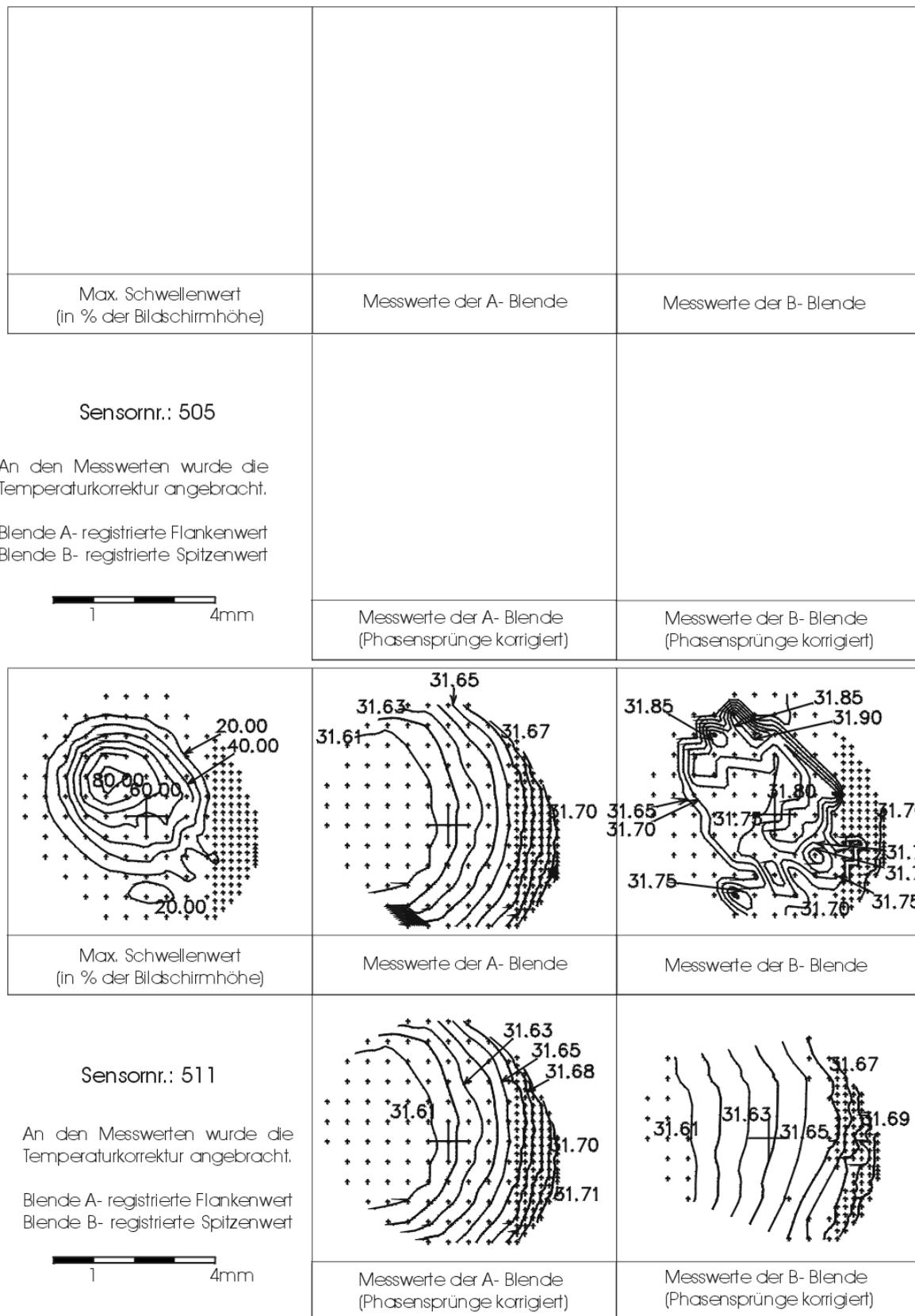


Abbildung B.2: Aussehen der Strahlenkeule: 2. Ebene

3. Ebene

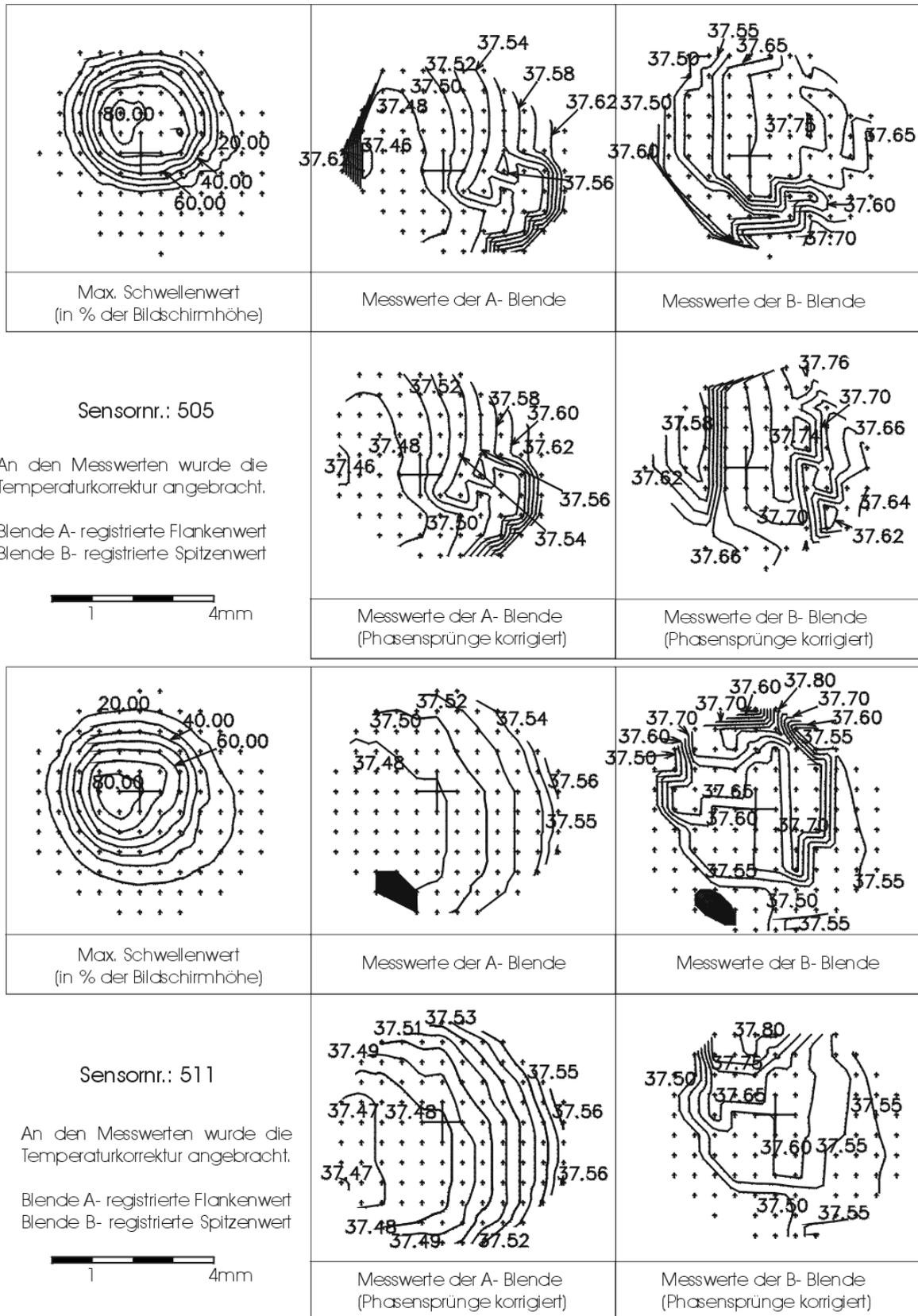


Abbildung B.3: Aussehen der Strahlenkeule: 3. Ebene

4. Ebene

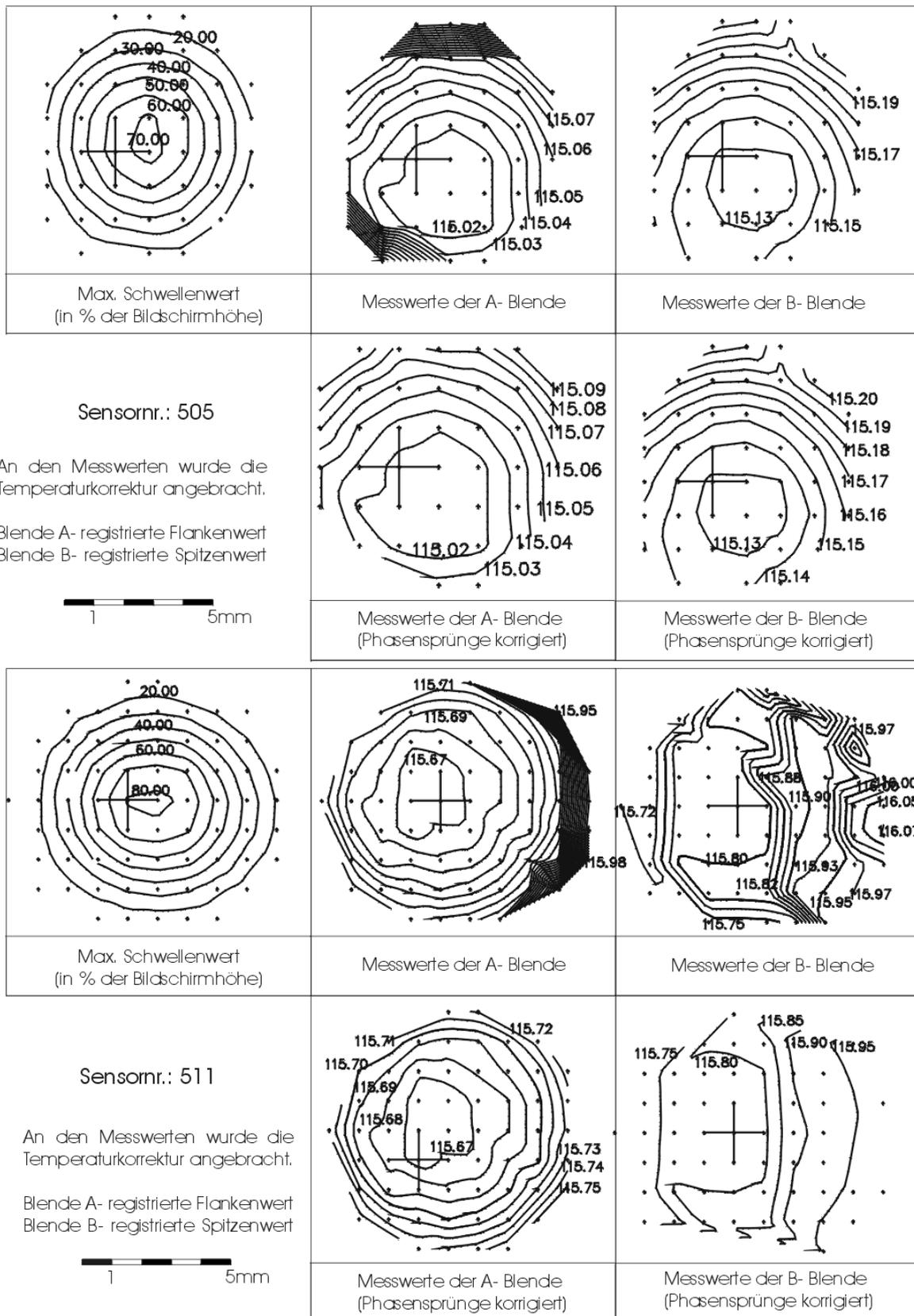


Abbildung B.4: Aussehen der Strahlenkeule: 4. Ebene

B.2 Genauigkeitsbetrachtung

Auf den folgenden Seiten werden die Verbesserungen der ausgleichenden Gerade von Hin- und Rückweg der einzelnen Experimente dargestellt. Es wurden insgesamt vier Experimente durchgeführt. Auf einem Blatt befinden sich jeweils Hin- und Rückweg eines Experiments.

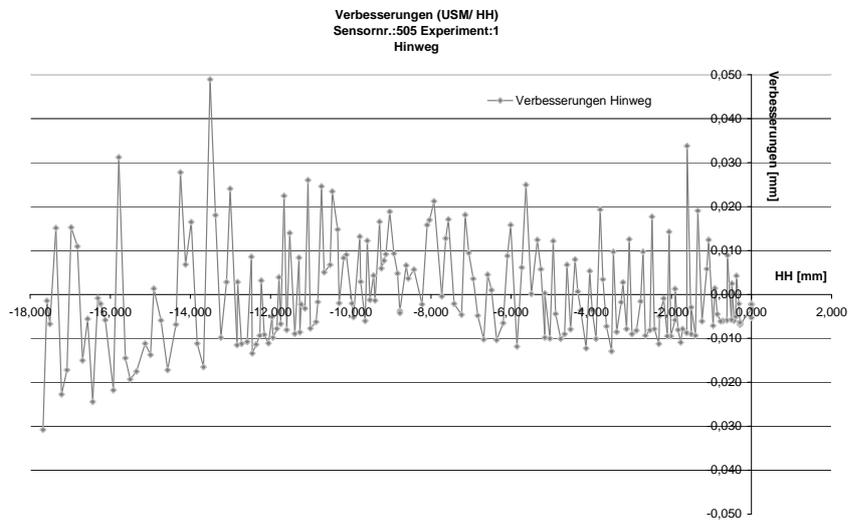


Abbildung B.5: Verbesserungen des Sensors 505, Hinweg, Experiment 1

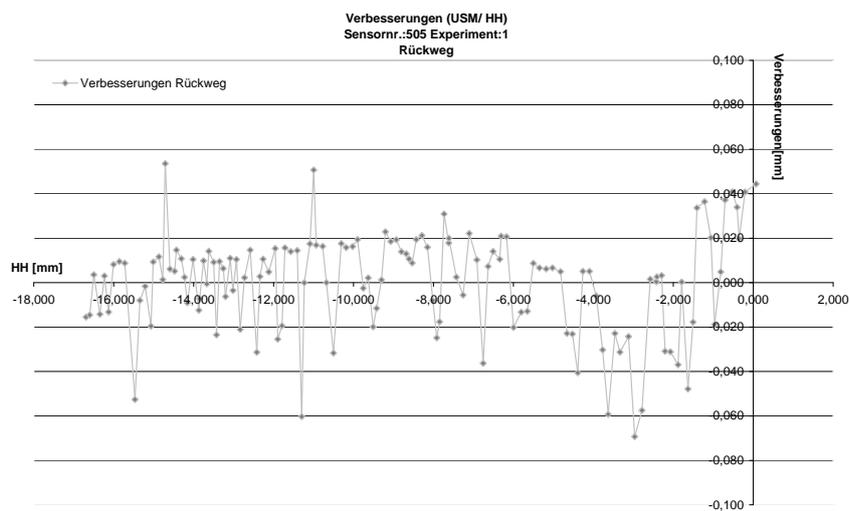


Abbildung B.6: Verbesserungen des Sensors 505, Rückweg, Experiment 2

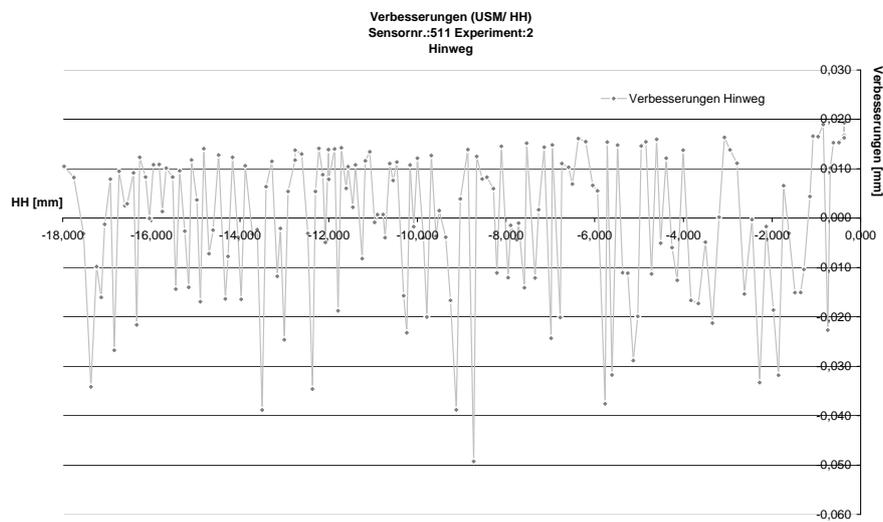


Abbildung B.7: Verbesserungen des Sensors 511, Hinweg, Experiment 2

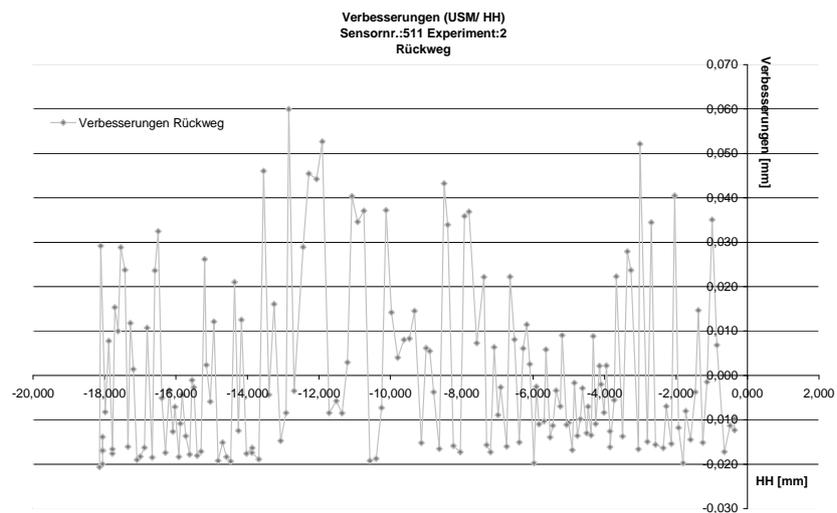


Abbildung B.8: Verbesserungen des Sensors 511, Rückweg, Experiment 2

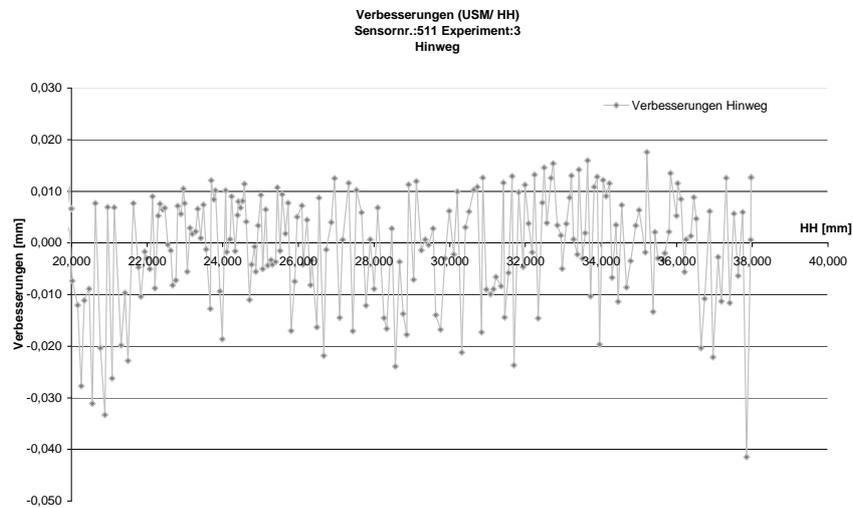


Abbildung B.9: Verbesserungen des Sensors 511, Hinweg, Experiment 3

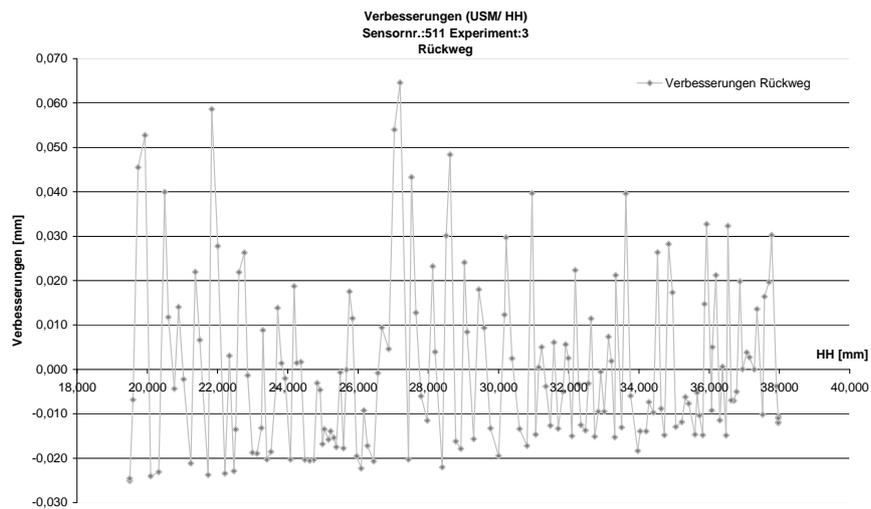


Abbildung B.10: Verbesserungen des Sensors 511, Rückweg, Experiment 3

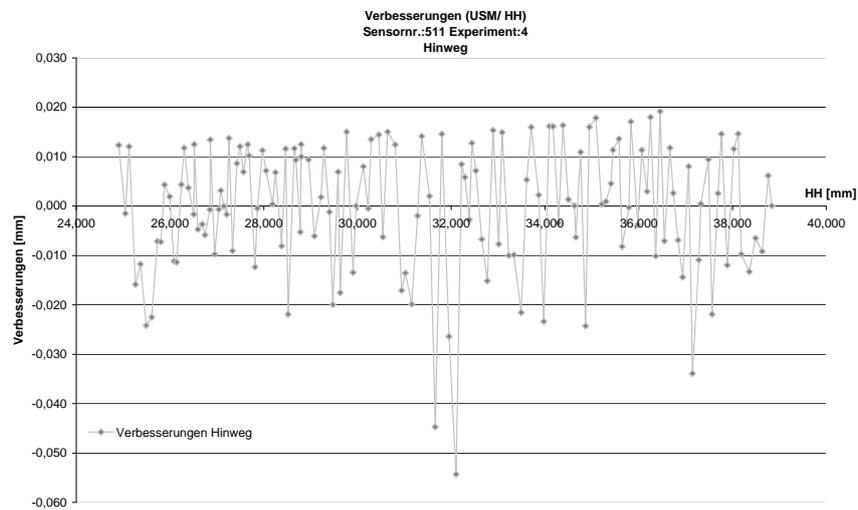


Abbildung B.11: Verbesserungen des Sensors 511, Hinweg, Experiment 4

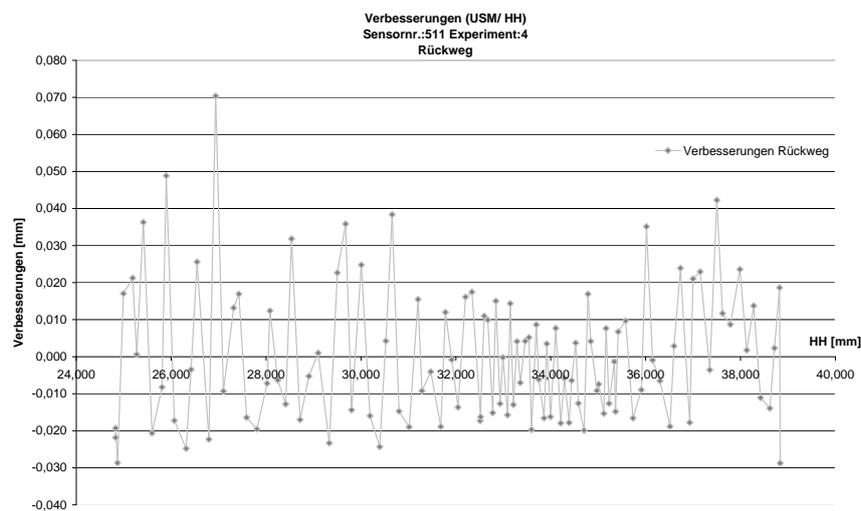


Abbildung B.12: Verbesserungen des Sensors 511, Rückweg, Experiment 4

B.3 Temperaturabhängigkeit des Sensors

Die Diagramme zeigen die Streckenänderungen gegenüber der Temperaturänderung für jedes Experiment. Auf einer Seite befinden sich die Experimente jeweils eines Sensors.

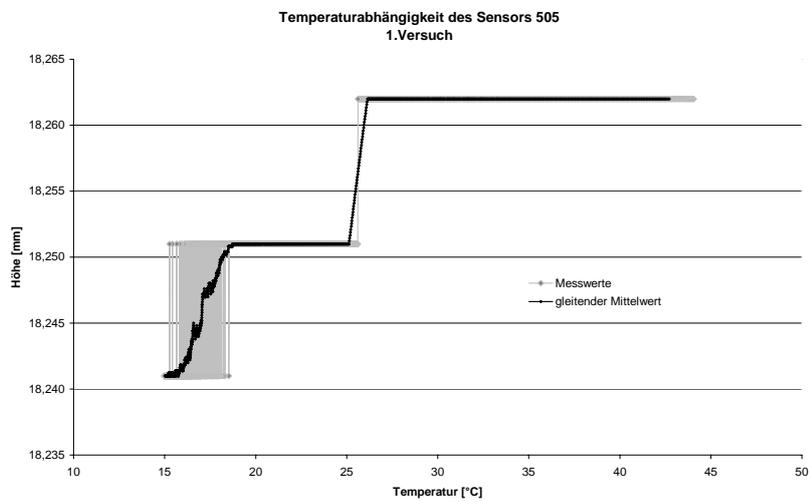


Abbildung B.13: Untersuchung zur Temperaturabhängigkeit des Sensors 505 1. Experiment

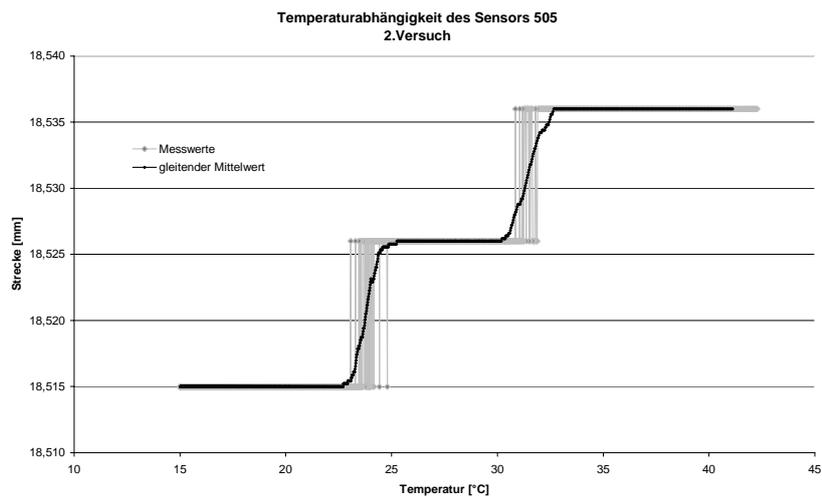


Abbildung B.14: Untersuchung zur Temperaturabhängigkeit des Sensors 505 2. Experiment

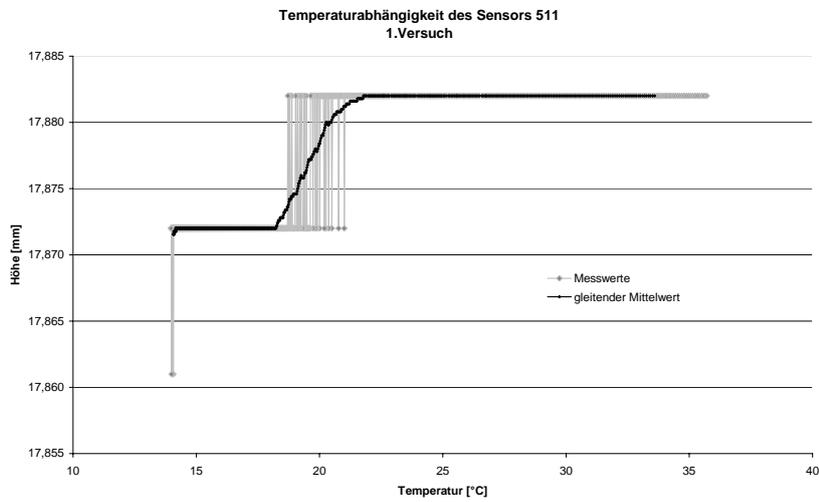


Abbildung B.15: Untersuchung zur Temperaturabhängigkeit des Sensors 511 1. Experiment

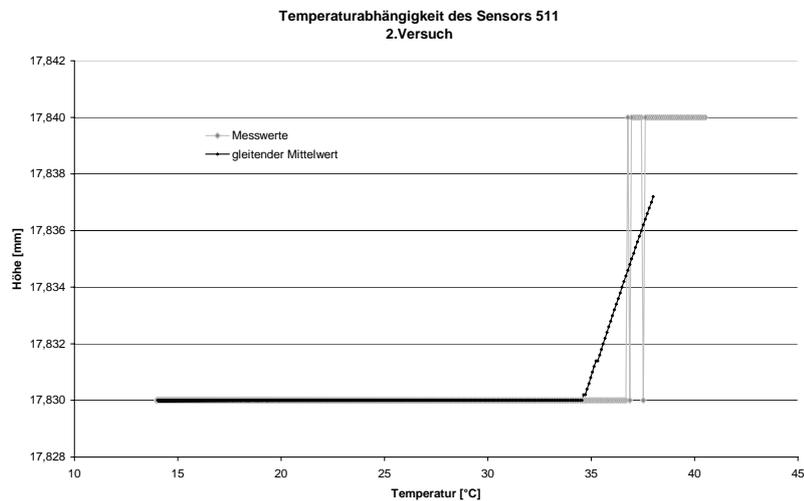


Abbildung B.16: Untersuchung zur Temperaturabhängigkeit des Sensors 511 2. Experiment

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die mir die Fertigung dieser Arbeit ermöglicht haben.

Mein Dank gilt:

Herrn Professor Willfried Schwarz, der die Arbeit begleitete und mir immer mit Ideen und Vorschlägen zur Seite stand sowie Herrn Professor Lothar Gründig, der mir vor allem bei der Auswertung der Untersuchungen sehr behilflich war.

Ausdrücklich möchte ich mich bei Herrn Dipl.- Ing. Steve Seyler für die Unterstützung während der Ausarbeitung, bei Herrn Dipl.- Ing. Jörg Albert für die vielen sachdienlichen Informationen, bei Herrn Dipl.- Ing. Christof Knauer bei der Durchführungen der Experimente und bei Herrn Dipl.- Ing. Thomas Grigutsch für die gemeinsamen Überlegungen zur Problematik des Sprungeffekts bedanken.

Herrn Michael Spreer bin ich für die materielle Unterstützung bei den Experimenten und den Ideen ihrer Verwirklichung zu Dank verpflichtet. Herr Spreer sowie die Versuchstechnische Einrichtung (VTE) der Bauhaus- Universität Weimar halfen mir bei der Realisierung der Experimente.

Frau Eva- Maria Holzberg half mir umsichtig bei der Bewältigung bürokratischen Formalitäten.

Durch ihre Hilfe haben die Mitarbeiter der Professur Vermessung und Photogrammetrie der Bauhaus- Universität Weimar dazu beigetragen, den Aufenthalt in Weimar und die Stadt in guter Erinnerung zu behalten.

Ich möchte mich auch bei Herrn Dipl.- Ing. (FH) Hans- Joachim Warm von der Firma AgfaNDT (Krautkrämer) bedanken, der durch sein Wissen und seine Erfahrungen meiner Arbeit sehr positive Impulse gegeben hat.

Last but not least gilt meinen Eltern für ihre Anteilnahme und materielle Unterstützung Dank, da sie mir erst das Studium ermöglichten und mir in jeder Weise behilflich waren.

Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

Berlin, den