DOI: https://doi.org/10.34657/23169
Handle: https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/24152

Teil II: eingehende Darstellung
Schlussbericht zum Teilvorhaben „Akustische Messmethodik und Impedanzanpassung für HiFU-Schallwandler“

im Verbundprojekt „MR-gestützte Behandlung des Pankreaskarzinoms mit hochintensivem fokussiertem Ultraschall (MR-HiFU – Pankreas)“

Ausführende Stelle; Soluxx GmbH

FKZ 13GW0364B, 01.12.2019 – 31.05.2025

Inhaltliche Beschreibung der Arbeiten im Projekt

Das Verbundprojekt befasste sich mit der Erforschung einer nicht-invasiven, bildgesteuerten Therapie basierend auf hochintensivem fokussierten Ultraschall (HiFU) zur Behandlung inoperabler Pankreastumore. Der zentrale Baustein dieses Behandlungsverfahrens ist ein HiFU Schallwandler.

Soluxx behandelte im Projekt technische Aspekte, wie z.B. die Etablierung und Optimierung von Messtechnik zur dreidimensionalen Charakterisierung der akustischen Eigenschaften des HiFU Schallfeldes und der Schall-Leistung sowie elektronische Entwicklungen für das sog. „matching board“.

AP 1: Patientenlagerung

Das Patientenlagerungssystem dient dazu, Organe so zu verschieben, dass sie möglichst nicht im akustischen Weg zwischen der HiFU Quelle und dem Pankreas liegen. Dort könnten sie unbeabsichtigt beschädigt werden, wenn Energie entlang des akustischen Weges der HiFU-Quelle absorbiert wird. Zusätzlich wird der akustische Weg zum Pankreas so möglichst freigemacht, damit dort die maximale Energie deponiert werden kann. Hierzu wird ein Gelpad-Abstandhalter verwendet. In enger Zusammenarbeit mit UKK (Uniklinik Köln) und Profound hat Soluxx in 2020 verschiedene 3D-gedruckte Formen gefertigt, die als Modell für einen Formungsprozess dienten, der anschließend an der UKK durchgeführt wurde. Die so erzeugten Gelpad-Abstandhalter wurden in in vivo Versuchen der UKK evaluiert und eine geeignete Form ausgewählt (basierend auf medizinisch zugelassenen Gelkissen der Firma Parker Labs). Zur Hautkühlung wurde auch eine halbstarre Membran benutzt, die die standardmäßige Hautkontaktmembran ersetzt und das vorhandene Kühlgerät des Sonalleve-Tisches verwendet. Im Projektverlauf haben Profound und UKK diese Konzepte zu einem funktionsfähigen Prototypen weiterentwickelt (siehe deren Berichte), der nun für Forschungszwecke im Einsatz ist.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket wurden erfolgreich abgeschlossen.

AP 2: Messaufbauten zur Schallfeldmessung

Dieses Arbeitspaket umfasst drei verschiedenen Methoden zur Messung der akustischen Eigenschaften des HIFU-Wandlers. Die mechanischen und elektronischen Komponenten der Messaufbauten sowie die Programmierung einer grafischen Benutzeroberfläche (GUI) für Messung und Datenerfassung, wurden von Soluxx in enger Zusammenarbeit mit der UKK realisiert. Die anschließenden Messungen mit diesen Systemen wurden hauptsächlich durch die UKK durchgeführt.

Die drei in diesem Arbeitspaket realisierten akustischen Messsysteme sind:

2a) Schlieren-Aufbau
2b) Hydrofon-Aufbau
2c) Auftriebswaage

Die Entwicklung dieser Systeme im Laufe des Projekts wird im Folgenden beschrieben.

AP 2a: Schlieren-Aufbau

Der Schlieren-Aufbau dient zur Visualisierung der räumlichen Druckverteilungen in Pseudoprojektionen orthogonal zur Richtung des Schallstrahls. Dieses Prinzip ist in Abb. 1 dargestellt. Der HiFU-Wandler, der ein hochintensives Ultraschallfeld aussendet, ist im HiFU-Tisch positioniert. Die Energie des HiFU-Wandlers (roter Pfeil) wird durch die Schallfenster (blau) in ein Becken oder in einen Absorber geleitet. Hier erzeugt die eingebrachte Leistung des HiFU-Wandlers Druckwellen im Absorber und/oder sogar Kavitationen (Blasen/Löcher), die optisch beobachtet werden können.

Orthogonal zur Richtung des HiFU-Strahls befindet sich eine optische Schiene. Die optischen Komponenten auf dieser Schiene sind von links nach rechts i) eine LED-Lichtquelle, ii) eine Kollimatorlinse, iii) der Absorber/das Becken, iv) die Schlierenlinse, v) eine Klinge, vi) eine (Hochgeschwindigkeits-)Kamera.

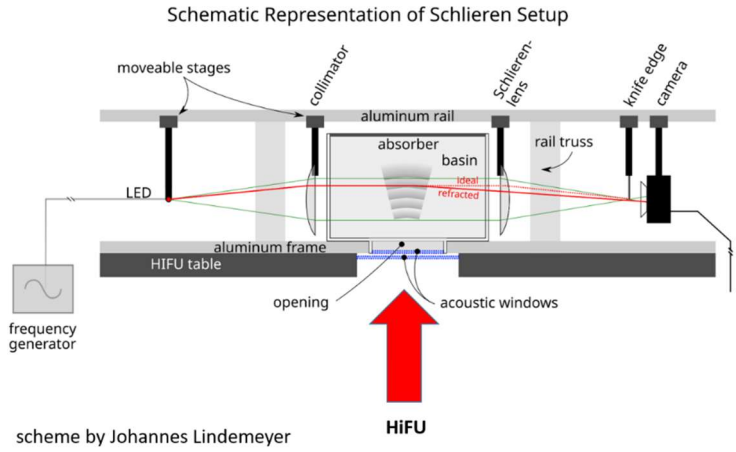

Abb. 1: schematische Darstellung des Schlieren Aufbaus.

Abb. 2: Reiter mit Lichtquelle & Kollimator.

2021

Das Schlieren-Setup wurde in enger Zusammenarbeit mit dem UKK geplant und hergestellt. Der Aufbau besteht aus einer Aluminium-Schienenstruktur, die auf den Sonalleve-Tisch mit darauf befindlichem Wasserbecken aufgesetzt werden kann. Die optischen Komponenten des Systems sind auf Reitern montiert, die an einer Traverse (1500 mm lang) befestigt sind, die parallel zur Längsachse des Tisches ausgerichtet ist. Dieser Aufbau ist in Abb. 2 gezeigt und besteht aus einer LED-Lichtquelle, einer Kollimatorlinse, dem mit Wasser gefüllten Wasserbecken über dem HIFU-Fenster, einer Schlierenlinse, einer Klingenkante und einer Kamera, die alle in einer Achse ausgerichtet sind. Die Abstände zwischen den mechanischen Komponenten sind für die Durchführung der Experimente variabel einstellbar (in x, y, und z-Richtung). Abb. 2 zeigt einen in x, y und z-Richtung einstellbaren Reiters mit angebrachter Lichtquelle und Kollimatorlinse.

Mittels einer Handschraube können die Wagen in einer Position auf der Längsachse fixiert werden. Die Position kann auf der angebrachten Skala abgelesen werden und ist in dieser Dimension ausreichend reproduzierbar und genau. Für die Positionierung in der Querebene wird eine manuelle Verschiebeplattform mit einer Genauigkeit von 0,01 mm verwendet. Sie ist mit einem 90°-Winkel am Reiter befestigt. Die einzelnen Komponenten werden mit Hilfe verschiedener 3D-gedruckter Vorrichtungen und Aluminiumstangen an den manuellen Verschiebeplattformen befestigt. Es wurden hauptsächlich nicht-magnetische Materialien verwendet, da dieser Aufbau in Zukunft im MRT eingesetzt werden soll. Im Jahr 2021 bestanden noch einige Teile (z. B. die meisten Schrauben) aus Stahl, die später im Projekt so weit wie möglich durch nichtmagnetische ersetzt wurden.

Die ersten Experimente mit diesem Aufbau wurden mit einem kontinuierlichen HIFU-Feld durchgeführt. Die damit erzielten Ergebnisse sind in den Berichten der Uniklinik Köln UKK beschrieben.

2022

Im Jahr 2022 wurde der Schlieren-Setup weiter verbessert. Magnetisches Material im Gantry-Reiter wurde durch nichtmagnetische Materialien ersetzt. Abb. 3 zeigt alle ausgetauschten Teile aus einem einzigen Gantry-Reiter. Jedes Rad des Reiters enthielt zuvor zwei Edelstahl Kugellager. Diese wurden durch Gegenstücke ersetzt, bei denen Innenring, Außenring und Käfig aus Kunststoff bestehen, während die Wälzkörper aus Glas gefertigt sind. Abb. 4 zeigt die verbesserten Reiter.

Abb 3: Bauteile, die durch nicht-magnetische Teile ersetzt wurden.

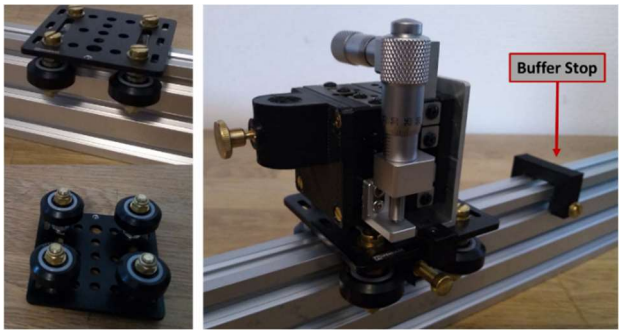

Figure 4: Reiter mit nicht-magnetischen Teilen (links). Reiter mit xy-vertellbarem Halter und 3D-gedrucktem Stopper (rechts).

Darüber hinaus wurde ein Anschlag konzipiert, der an bestimmten Positionen der Schlierenachse (außerhalb der NMR-Bohrung) sicher befestigt werden kann. Dieser dient als eine Art Notstopp für die Reiter, falls sie sich mechanisch auf der Traverse lösen und verhindert, dass sie in die MRT-Bohrung gezogen werden. Die zu diesem Zeitpunkt noch verbliebenen magnetischen Teile ließen sich nur schwer austauschen, ohne die Flexibilität des Systems im Einsatz zu beeinträchtigen.

2023

Da das verbleibende magnetische Material (vor allem im Mikro-xy-Tisch) in unmittelbarer Nähe des Magnetfeldes immer noch ein Problem darstellte, mussten in 2023 für Messungen im Magnetfeld die xy-Stufen für die Schlieren-Linsen entfernt werden, wodurch ein Freiheitsgrad (horizontal, senkrecht zur Schlierenachse) verloren ging. Außerdem wurde die Justierung grober. Da die anderen (weiter vom Magnetfeld entfernten) Bauteile aber weiterhin präzise justierbar bleiben, kann dies durch deren Verstellung in Bezug zu den Linsen kompensiert werden. Für Messungen außerhalb des Magnetfeldes können die ursprünglichen Komponenten weiter genutzt werden.

Die in den Aluminiumrahmen eingearbeiteten Stahlschrauben und -muttern wurden durch Kunststoff- und Messingersatzteile ersetzt. Da deren Anzugsdrehmoment jedoch naturgemäß deutlich geringer ist als das der vorherigen Stahlteile, führt dieser Austausch zu einem gewissen Stabilitätsverlust.

Ebenfalls im Jahr 2023 wurde die Traverse mit ihren Anbauteilen (die die Hauptschlierenachse des Aufbaus darstellt) verlängert. Es ist nun möglich, die optische Bank auf etwa 3600 mm zu verlängern. Da die Handhabung einer Traverse dieser Länge praktisch unmöglich ist, wurde sie als Mittelteil von 2000mm Länge (direkt am Rahmen montiert) konzipiert, das auf jeder Seite durch kürzere 800mm lange Teile verlängert werden kann (mit Gewindestangen aus Messing am Mittelstück montiert).

2024

In 2024 wurden letzte Anpassungen und Verbesserungen vorgenommen, während die UKK bereits routinemäßig mit der Anlage arbeitete. Für den Betrieb innerhalb des Magnetfeldes benötigt der Aufbau Stopper, die verhindern, dass Bauteile, die noch magnetisierbare Komponenten enthalten, in den Magneten rutschen. Diese wurden für den Aufbau entwickelt und angefertigt. Die vertikalen

Stangen des Aufbaus und auch die Seitenwände des Aquariums wurden gekürzt, so dass der Messaufbau nun in die MRT-Bohrung passt.

Ersatzteile und Listen mit deren Spezifikationen/Lieferantenangaben für die Befestigung der optischen Schiene und der Traverse wurden zusammengestellt und dem Projektpartner UKK übergeben. Ebenfalls wurde die Dokumentation der CAD/Konstruktionsdateien der Aufbauten/Teile übergeben, damit der Aufbau auch langfristig genutzt werden kann und Ersatzteile für UKK zur Verfügung stehen.

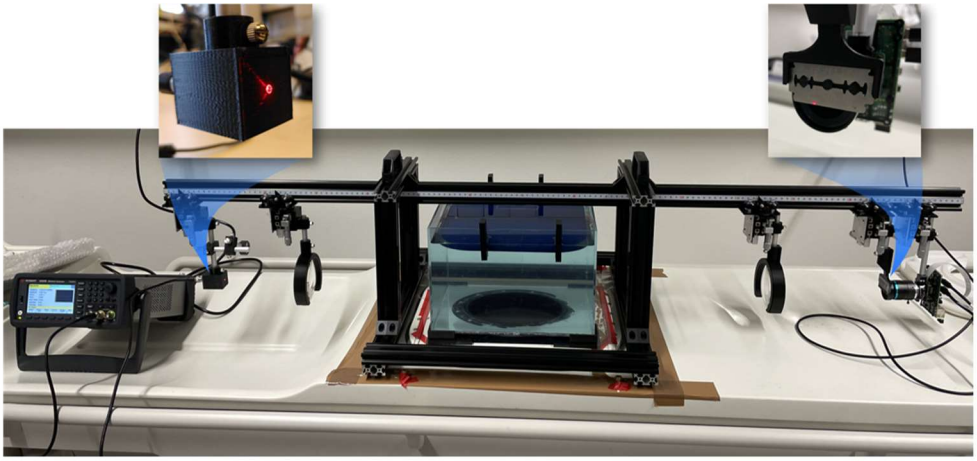

Abb. 5: Schlieren Aufbau und Wassertank, montiert und angepasst auf dem Sonalleve V2 HiFU-Tisch.

Zusammenfassung 2a: Der Schlierenaufbau, der die in enger Zusammenarbeit mit der UKK entwickelt wurde, ist voll funktionsfähig ist und ein langfristiger Einsatz an der UKK ist gewährleistet, indem die Druckvorlagen für verschleißende 3D-gedruckte Teile an die UKK übergeben wurden. Das System besteht größtenteils aus nicht-magnetischen Teilen. Dies ermöglicht durch austauschbare Komponenten die Kompatibilität mit dem Magnetfeld im MRT. Abb. 5 zeigt den aktuellen Schlierenaufbau auf einem Sonalleve (V2) HiFU-Tisch.

Die Entwicklung des optischen/mechanischen Aufbaus wurde von Soluxx durchgeführt, während die Messelektronik und die Durchführung der Experimente von der UKK übernommen wurden.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket sind damit erfolgreich abgeschlossen.

WP 2b Hydrophon-Aufbau

Der Hydrophon-Aufbau dient zur Messung der lokalen Druckverteilung von Schallfeldern. Er besteht aus einem präzisen, von Schrittmotoren angetriebenen Positionierungssystem, das über einen Mikrocontroller von einem externen PC aus gesteuert wird, einer Signalverarbeitungselektronik, bestehend aus einem sehr empfindlichen Vorverstärker, der kleine Drucksignale verstärken kann und einer Elektronik zur Extraktion der Gleichstromkomponente (Amplitude) aus der Druckkurve.

Die Abmessungen des Messaufbaus müssen in die MRT-Bohrung passen und der Aufbau muss aus nichtmagnetischen Materialien bestehen. Weiterhin muss eine bestimmte Region-of-Interest (ROI) mit Hilfe einer 3D-Verfahrbarkeit für das Hydrophon zugänglich sein und ein guter akustischer Kontakt zum HIFU-Fenster bestehen (hier über einen geeigneten Wassertank).

2020

Die erste Version des Aufbaus im Jahr 2020 bestand aus einem 3D-Positionier-System für die 3D-Messung von Schallfeldern direkt auf einem Sonalleve-MR-Tisch. Einige Komponenten enthielten noch Stahl, es wurde ein Standard-Schrittmotor verwendet und die y-Achse war nur an einer Stelle befestigt,

um die Materialmenge im HiFU-Bereich so gering wie möglich zu halten. Da bei der Bewegung Schwingungen auftraten, wurde die y-Achse an zwei Positionen befestigt und es wurden zwei synchron angetriebene Schrittmotoren für die Bewegung in x-Richtung benötigt. Somit waren für eine 3-dimensionale Bewegung vier statt drei Motoren erforderlich. Es wurde auch eine „normale“ z-Achse montiert, was zu einem höheren Raumbedarf in z-Richtung führte. Am Ende dieser z-Achse ist das Hydrophon befestigt. Aufgrund der großen Höhe passte der Aufbau so nicht in die MRT-Öffnung.

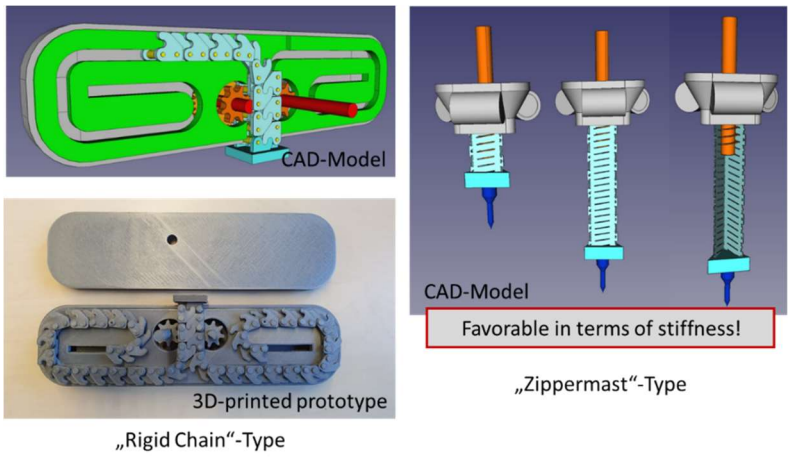

Abb. 6: links: CAD-Modell und 3D-gedruckter Prototyp des “rigid-chain”-Aktuators. Rechts: CAD-Modell des “Zippermast”-Aktuators.

Daher wurde daran gearbeitet, die z-Achse durch einen formverändernden Aktuator zu ersetzen. In Abb. 6 sind zwei mögliche Arten von formverändernden Aktuatoren dargestellt. Links in Abb. 6 sind ein CAD-Modell und ein 3D-gedruckter Prototyp eines Aktuators des Typs "rigid chain" dargestellt. Diese Art von mechanischem Linearantrieb besteht aus Kette und Ritzel und bildet im Betrieb eine Teleskopstruktur, die zie-hen und schieben kann. Der Antrieb erfolgt über ein Zahnrad, das mit einem Motor verbunden ist und eine Drehung im oder gegen den Uhrzeigersinn ermöglicht. Bei Nichtgebrauch verschwinden die Ketten in zwei Teilen im Gehäuse, so dass der Antrieb in Z-Richtung wenig Raumbedarf in z-Richtung benötigt.

Leider stellte sich heraus, dass der Prototyp aufgrund der Spaltmaße zwischen den einzelnen Elementen der Ketten nicht steif genug war. Die rechte Seite von Abb. 6 zeigt ein CAD-Modell eines Z-Aktuators, der das "Zippermast"-Prinzip nutzt. Er besteht aus drei einzelnen flexiblen Bändern, die so angeordnet sind, dass sie sich ineinander verhaken, wenn sie zusammengeführt werden. Das Prinzip entspricht einem herkömmlicher Reißverschluss, wobei jedoch durch die Verwendung von drei anstelle von zwei Elementen eine höhere Steifigkeit erreicht wird. Der Antrieb erfolgt über eine zentrale Spindel, die die drei Elemente mit einem geeigneten Gewinde bewegt. Ähnlich wie bei der starren Kette verschwinden die Bänder in einzelnen Fächern, wenn sie nicht gebraucht werden. Allerdings war auch hier die mechanische Steifigkeit nicht ausreichend.

In 2020 wurde ein Mikrocontroller vom Typ Arduino Uno zusammen mit einem CNC-Shield (Abb. 7) als Schnittstelle zur Verbindung des Messgeräts mit dem EDV-System verwendet. Diese Kombination ist auch bei vielen kommerziellen 3D-Druckern bewährt und hat sich als robust und zuverlässig erwiesen.

Nach den ersten SCPI-basierten (Standard Commands for Programmable Instruments) Tests der Grundfunktionalitäten bezüglich der 3D-Bewegung des Hydrophons (Motoransteuerung, Sicherheitsendschalter) wurde die Interface- und GUI-Programmierung durchgeführt, um das genaue Messverfahren zur Charakterisierung des akustischen Feldes zu realisieren. Prinzipiell kann zwischen einem Stop-and-Go und einem kontinuierlichen Prozess unterschieden werden. Ein Stop-and-Go-Verfahren bedeutet, dass das Bewegen und das Messen nacheinander durchgeführt werden. Es wäre keine Zeitkontrolle erforderlich und der Prozess wäre für jede Art von Messung anwendbar. Der Prozess wäre jedoch langsam, und das gesamte System würde aufgrund der vielen Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge stark mechanisch belastet und es könnten Vibrationen im Messaufbau auftreten. Besser wäre daher ein kontinuierlicher Prozess. Dabei kann es sich um eine

halbkontinuierliche Messung handeln, wie z. B. eine zeilenweise Messung, oder um eine vollständig kontinuierliche Messung während der Bewegung. In jedem Fall muss die eigentliche Messung des akustischen Drucks an einer bestimmten Stelle von der Schnittstellenlogik zum richtigen Zeitpunkt ausgelöst werden und zwischen zwei Schritten der Schrittmotoren beendet sein.

In 2020 wurde der Wassertank entworfen, der den akustischen Kontakt zwischen Messsystem und dem HiFU-Wandler im Inneren des MR-Tisches herstellt. Er soll mit Adaptern auf dem HiFU-Fenster des MR-Tisches befestigt werden und wird mit entgastem Wasser gefüllt. Der Boden des Tanks enthält eine runde Vorrichtung, in der die Membran (Durchmesser ca. 200 mm) für den akustischen Kontakt befestigt wird. Der Wassertank besteht aus Acrylglas und 3D-gedruckten Teilen (Abb. 8) und hat eine Grundfläche von ca. 300 mm x 300 mm und eine Höhe von etwa 200 mm. Dieser Wassertank kann ebenfalls für den unter 2.a beschriebenen Schlieren-Aufbau verwendet werden. Die optischen Eigenschaften von Acrylglas entsprechen gem. den Angaben der UKK den benötigten Anforderungen.

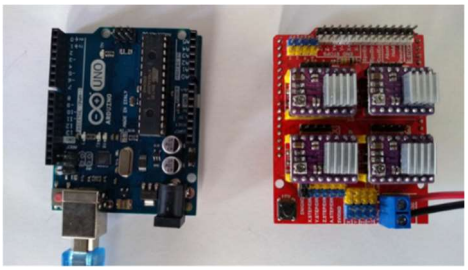

Abb 7: Arduino Uno (links) und CNC-Shield V3 (rechts) als Interface zw. Messaufbau und EDP.

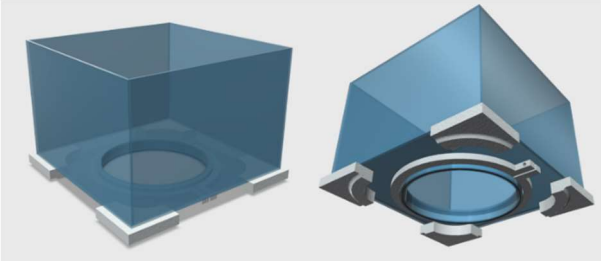

Abb 8: CAD-Modell des Wassertanks. Membrane für akustischen Kontakt zum HIFU Fenster an der Unterseite.

2021

In 2021 wurde dieses Wasserbecken hergestellt und hinsichtlich des Designs weiter optimiert. Abb. 9 zeigt eine CAD-Zeichnung (links) und ein Foto (rechts) der 3D-gedruckten und anschließend montierten Einzelteile zur wasserdichten Befestigung der akustischen Membran. Es handelt sich um einen Adapterring mit M5-Gewindeeinsätzen, der auf den Boden des Wasserbeckens (aus Acrylglas) geklebt wird. So kann die Membran bei Bedarf ausgetauscht werden. Der Membranring besteht aus zwei miteinander verklebten Teilen, in die die Akustikmembran eingesetzt ist, und wird mittels eines O-Rings abgedichtet. Zusätzlich werden alle Zwischenräume mit Silikon abgedichtet.

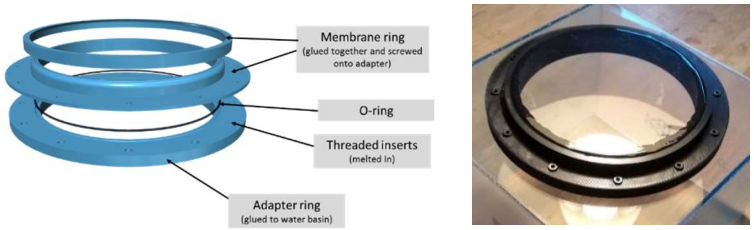

Abb 9: CAD-Modell (links) und Foto (rechts) der Baugruppe mit der Membran, die den akustischen Kontakt zwischen Wassertank und HIFU-Fenster bildet.

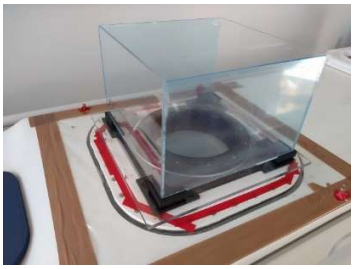

Abb. 10: Wassertankt mit Adapterplatte & Abstandhaltern auf Sonalleve-Tisch.

Abb.g 10 zeigt das Wasserbecken auf dem Sonalleve-Tisch. Es wird auf einer Adapterplatte gehaltert, die mit Hilfe von 3D-gedruckten und geklebten Vorrichtungen auf dem HIFU-Fenster positioniert wird. Für den unwahrscheinlichen Fall einer Leckage ist der Sonalleve-Tisch zusätzlich mit Folie abgedichtet, die mit Klebestreifen (rot und braun) befestigt ist, um die darunterliegende Elektronik gegen unbeabsichtigten Wasseraustritt zu schützen. Es traten bislang jedoch keine Leckagen auf. Dieser Wassertank kann auch für Experimente mit dem Schlieren-Aufbau verwendet werden. Für die Messung der Schall-Leistung (siehe 2.c) wird ein anderer Wassertank verwendet.

Der mechanische Aufbau für das Hydrophon wurde in 2021 weiter optimiert. Abb. 11 (rechts) zeigt die

verbesserte Hydrophon-Halterung. Diese neue Halterung weist eine schräge, dachähnliche Struktur zum Schallwandler hin auf, um die reflektierten Schallwellen nach außen zu leiten, wo sie mit geeigneten Absorbern absorbiert werden können. Zur Optimierung wurde eine Reihe von Hydrophonhalterungen mit verschiedenen Winkeln (stumpf bis spitz) hergestellt (Abb. 12).

Um die Messdaten mit der erforderlichen Genauigkeit zu erhalten, werden spezielle HIFU-Absorber an den Seitenwänden des Wasserbeckens (zur Absorption der reflektierten Schallwellen) und über dem Hydrophon (zur Absorption der Schallwellen, die vom Schallkopfes Richtung Wasseroberfläche zielen, zu verhindern) benötigt. Der im Schlieren-Aufbau verwendete Absorber, der auf der Wasseroberfläche schwimmt, ist aufgrund der Bewegung, die der Hydrophon Aufbau durchführt, nicht geeignet. Es ist geplant, einen relativ kleinen kreisförmigen Absorber etwas oberhalb der Hydrophonhalterung zu montieren, was den Bewegungsbereich des 3D-Systems geringfügig einschränkt.

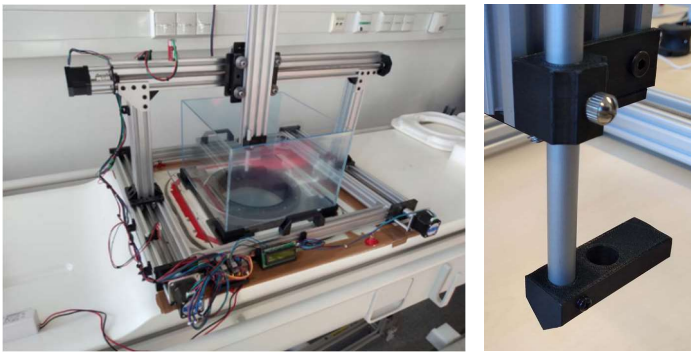

Abb. 11: Hydrophone Aufbau auf dem Sonalleve-Tisch mit Wassertank (links) und Nahaufnahme der Hydrophonhalterung (rechts).

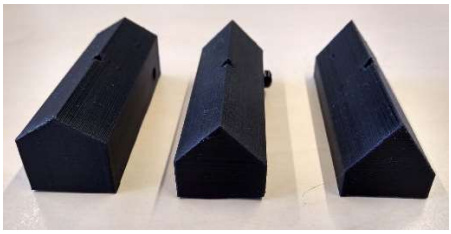

Abb. 12: Hydrophonhalterungen mit verschiedenen Winkeln (stumpf bis spitz) .

Ursprünglich war geplant, dass neben der Kommunikation zur 3D-Bewegung auch das Signal des Hydrophons über die Arduino-Schnittstelle an die Software weitergegeben wird. Aus Gründen der Modularität und der Geschwindigkeit wurde dies jedoch so geändert, dass der Arduino allein für die 3D-Bewegung zuständig ist und lediglich ein TTL-Trigger-Signal liefert, wenn eine Hydrophon-Einzelmessung ansteht. Die Arduino-Schnittstelle (einschließlich einer Statusanzeige) ist mit Hilfe von 3D-gedruckten Halterungen an der Messbrücke befestigt (Abb. 13).

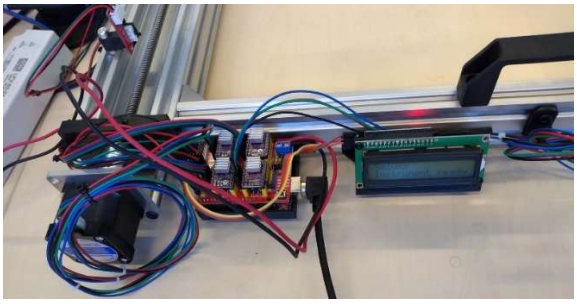

Abb. 13: Arduino mit angeschlossenem CNC-shield und Display an der Aluminium-Schiene des Hydrophon-Aufbaus.

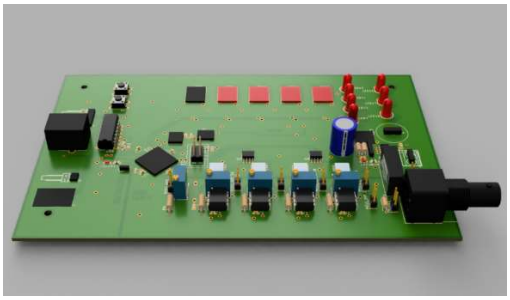

Abb. 14: CAD Modell des entwickelten PCB für die Hydrophon Messungen.

Um eine höhere Messgeschwindigkeit gegenüber dem anfänglichen SCPI zu erreichen, wurde zusätzlich die Messung des Schalldrucks mit dem Oszilloskop etabliert und dafür eine eigene Messelektronik grundlegend neu entwickelt. Abb. 14 zeigt ein CAD-Modell des neuen Platinendesigns. Das Messprinzip unserer neuen Schaltung funktioniert folgendermaßen: Das Hydrophon liefert ein Wechselstromsignal mit einem Gleichstrom-Offset. Der Wechselstromanteil wird verstärkt, während der Gleichstromanteil für die Messung nicht relevant ist und mit einem Hochpassfilter entfernt wird. Die Schaltung verfügt über vier Vorverstärker, von denen automatisch der jeweils am besten geeignete ausgewählt wird. Anschließend wird das Signal gleichgerichtet und mit einem Tiefpassfilter geglättet. Schließlich wird der eingehende Gleichstrompegel intern von einer weiteren Verstärkerstufe verarbeitet und anschließend über einen AD-Wandler digitalisiert. Dieser Prozess findet kontinuierlich

statt und kann problemlos eine Sampling-Rate von 1 kHz erreichen. Mehrere Messungen werden kombiniert, um das Rauschen zu reduzieren und die Auflösung der Messung zu verbessern. Bei einer signifikanten Änderung des Signals werden die Messverstärker automatisch nachgeregelt. Wird das Signal abgefragt (z.B. durch Senden eines Triggers), sendet der Prozessor den letzten Wert aus dem Puffer über UART an den Empfänger.

2022

In 2022 wurde der Arduino UNO-Mikrocontroller durch einen Arduino MEGA ersetzt, da mehr IO-Kanäle erforderlich waren. Außerdem bietet der MEGA mehr Programmspeicher und RAM. Darüber hinaus wurden Upgrades bei der PC-Schnittstellen-Software und der GUI-Software vorgenommen.

Es wurde ebenfalls weiter an der neuen Messelektronik des Hydrophons. Abb. 15 zeigt den Zusammenhang der Komponenten zur Messung des akustischen Feldes. Die zentrale Einheit des Messsystems ist der Arduino-Mikrocontroller, der als Schnittstelle zwischen PC und Messsystem fungiert. Das Messsystem besteht aus 3D Positionierung und der für die Hydrophonsignalverarbeitung zuständigen Controllerplatine. Alle Parameter für die eigentliche Messaufgabe, werden in der GUI festgelegt und dann an den Arduino weitergegeben, der die Befehle für die Bewegung des Hydrophons sendet. Der zu untersuchende Bereich ist in der Regel ein Würfel, dessen Voxel nacheinander abgetastet werden. An jedem Voxel muss eine Hydrophonmessung durchgeführt werden, die dann vom Arduino über das Controllerboard ausgelöst wird.

Bei der Messung des akustischen Feldes gibt es zwei verschiedene Fälle. Wenn das HiFU-Feld eine kontinuierliche Welle ist, wird nur ein Trigger benötigt, der die Steuerplatine veranlasst, eine Messung mit dem Hydrophon vorzunehmen. Da das HiFU-Feld nur für einen Zeitraum von etwa einer Minute eingeschaltet werden sollte, um eine Erwärmung zu verhindern, dauert eine 3D-Messung je nach dem zuvor definierten Volumen und der gewünschten Genauigkeit, d.h. der Schrittweite zwischen den Messpositionen, sehr lange. Allerdings kann die HiFU-Quelle in einem gepulsten Modus betrieben werden, d.h. sie kann durch einen Trigger nur zu den Zeiten eingeschaltet werden, zu denen sie für eine Messung benötigt wird. Unsere Messelektronik bietet daher die Möglichkeit, einen Trigger an das HiFU-Instrument zu senden und dann einen leicht verzögerten Trigger, sobald das akustische Feld aufgebaut ist und bis die Hydrophonsignalverarbeitung abgeschlossen ist. Die Dauer dieser Verzögerung wird empirisch ermittelt.

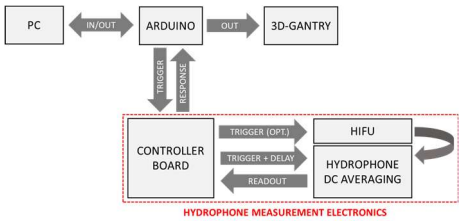

Abb. 15: Kommunikationsschema der Komponenten des Hydrophon-Aufbaus.

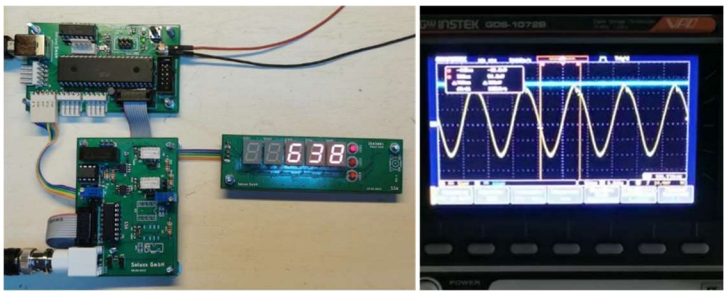

Abb. 16: Mess-Elektronik am Hydrophone (links); Probemessung/ proof-of-concept (DC output der AC Amplitude des Hydrophonsignals) (rechts) .

Abb. 16 zeigt auf der linken Seite ein Foto der Messschaltung. Zur Validierung des Konzepts wurde das Hydrophon in einem Wasserbad mit einem eingetauchten Piezokristall als Schallquelle betrieben. Aus Gründen der Modularität besteht die Messelektronik aus drei Unterplatinen: der Logikplatine, der Verstärkerplatine und der Anzeigeplatine. Rechts in Abb. 16 ist das gemessene stabile Hydrophonsignal. Nach dem Aufbau des Mess-Systems auf dem Sonalleve-Tisch stellte sich jedoch heraus, dass das Hydrophonsignal durch die im Sonalleve Tisch erzeugten elektromagnetischen Störungen überlagert wird. Als Grund hierfür wurde das Kabel identifiziert, mit dem das Mess-Signal

des Hydrophons an die Messelektronik weitergeleitet wird. Daher war eine neue Iteration der Messelektronik erforderlich, d.h. es musste eine Verstärkerstufe entwickelt werden, die direkt am Hydrophon selbst angebracht ist. Infolgedessen muss die neue Platine wasserdicht sein, da sie sich zusammen mit dem Hydrophon durch das Wasserbecken bewegen wird.

Abb. 17 (links) zeigt CAD-Modelle der neuen Vorverstärkerplatine, die direkt am Hydrophon angebracht wird. Mit ihr wird das Wechselstromsignal des Hydrophons so stark verstärkt, dass es per Kabel an die Messplatine (rechts) übertragen werden kann, ohne durch die elektromagnetischen Störungen auf dem Sonalleve-Tisch überlagert zu werden. Wie zuvor ist die Messplatine für die Umwandlung des Wechselstromsignals in ein Gleichstromsignal zuständig, das Messprinzip wird also nicht verändert. Abb. 18 zeigt die fertige Vorverstärkerplatine vor dem Zusammenbau neben einer 1-Cent-Münze als Maßstab. Sie wird zum Schutz vor Wasser in eine Gel-Box eingekapselt.

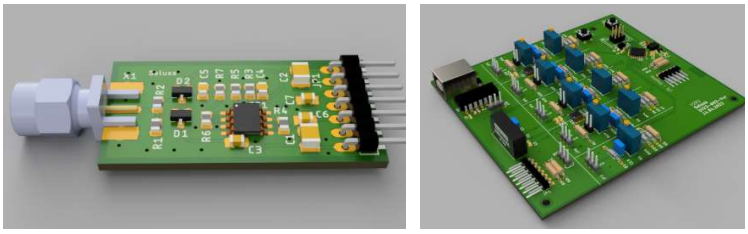

Abb. 17: CAD-Modelle der Vorverstärker Platine, die am Hydrophon befestigt ist (links) und der Mess-Platine mit verschiedenen Verstärkerstufen (rechts). .

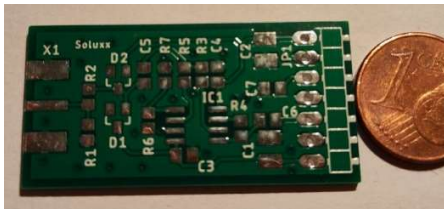

Abb. 18: fertige Vorverstärker-Platine, die direkt am Hydrophon angebracht wird (mit 1-Cent Münze als Maßstab).

2023

In 2023 zeigten die Testmessungen, dass die Reaktionszeit des HIFU-Schallkopfes viel schneller ist als die der Hydrophonmessung und das das System auf sehr kurze Triggersignale reagiert. Somit treten keine Probleme bei getrig-gerten Messungen auf und lang anhaltende 3D Messungen des akustischen Feldes sind mit unserem System möglich. Abb. 19 zeigt die elektronischen Komponenten des Systems. Die Vorverstärkerschaltung wurde gelgekapselt und ist direkt mit dem Hydrophon an der z-Achse verbunden (grauer Kasten). Die Messplatine wird über das Arduino-MEGA-Board gesteuert, das auch die 3D-Positionierung und die Kommunikation mit der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) auf dem Computer steuert.

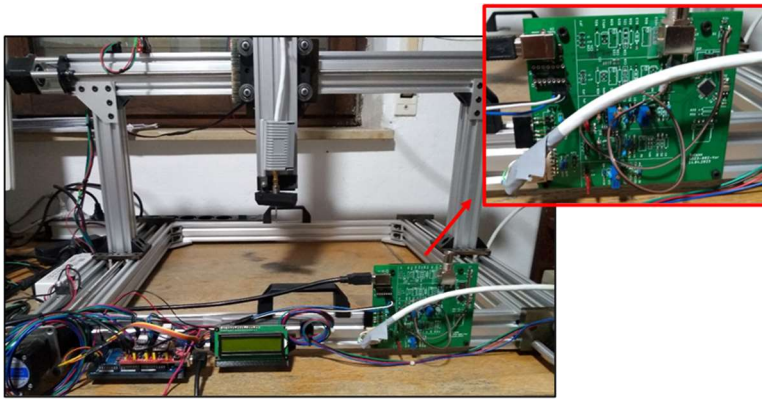

Abb. 19: 3D Hydrophon Aufbau mit allen elektronischen Komponenten. Die Vorverstärker Platine befindet sich gel-gekapselt in der grauen Box an der z-Achse. Das rot umrahmte Bild zeigt die neu entwickelte Mess-Platine.

Die GUI wurde in LabView programmiert, einer weit verbreiteten grafischen Programmierumgebung. Diese macht zwar die Kommunikation mit einer Vielzahl von Geräten relativ einfach, hat aber Nachteile in Bezug auf die Ausführungsgeschwindigkeit und den Ressourcenbedarf.

Abb. 20 zeigt einen Screenshot der LabView-Benutzeroberfläche. Das Programm besteht aus zwei Arbeitsbereichen, der "Measure"-Seite und der "Setup"-Seite. Details finden sich in den Jahresberichten. Zur Messung wird intern eine Liste von Befehlen vorbereitet, die nacheinander an das Messsystem weitergeleitet werden, das die Messwerte des Hydrophons erfasst. Das Ergebnis ist ein 3D-Datensatz mit Werten, die proportional zum Schalldruck an der entsprechenden Messposition sind.

Durch die manuelle Auswahl einer Schnittebene wird ein Ausschnitt dieses Datensatzes als Konturplot entsteht, der die Verteilung des akustischen Feldes in der ausgewählten Ebene darstellt.

Mit diesem System wurden mit den Projektpartnern UKK und Profound mehrere Tests durchgeführt. Abb. 21 zeigt eine dieser Messungen. Hierbei wurde wurde ein "Point-and-Shoot"-Verfahren verwendet, d.h. das System fährt zu einem bestimmten Punkt, hält an, misst und fährt wieder weiter. Allerdings war die Messgeschwindigkeit trotzdem noch zu gering, um größere Volumina zu messen. Um dies zu beschleunigen, waren Änderungen am System notwendig, um quasi Zeile für Zeile zu scannen und den HiFU-Trigger im richtigen Moment zu senden. Dies führt zu einer gleichmäßigeren und schnelleren Bewegung des Hydrophons und schließlich zu einer Verkürzung der Messzeit.

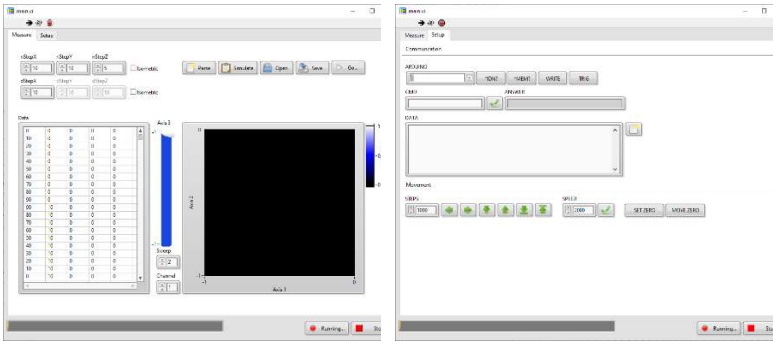

Abb. 20: Screenshot der Labview Benutzeroberfläche (GUI) für die 3D Messung des Schallfeldes. links: "Measure"-, rechts: "Setup"-Seite..

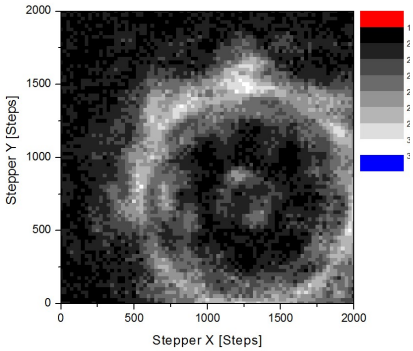

Abb. 21: Schnittebene aus der 3D Test-Messung des Schallfeldes.

Diese Tests zeigten außerdem, dass das Signal-Rausch-Verhältnis immer noch zu niedrig war, so dass die Vorverstärker- und Messplatine nochmal verbessert werden mussten.

Daher wurde ein neuer Vorverstärker entwickelt, um präziser und mit einem höheren Verstärkungsfaktor zu messen und so das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Abb. 22 zeigt die daraufhin überarbeitete Messplatine (A), die Verstärkerstufenplatine (B) und die Vorverstärkerplatine (C) in einem teilweise bestückten Zustand.

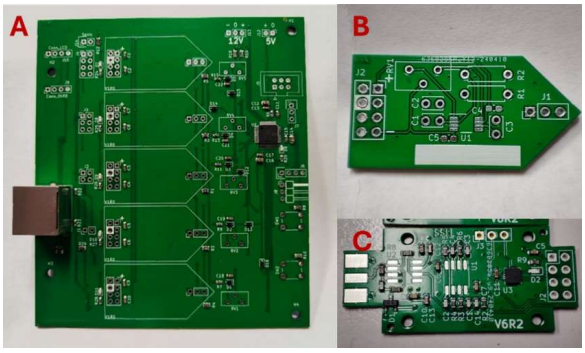

Abb. 22: Fotos der teilweise bestückten Mess-Platine (A) und einer Verstärkerstufe (B) und des Vorverstärkers (C).

Die Signalverarbeitung in der Vorverstärkerplatine (Abb. 22, C) direkt am Hydrophon erfolgt in drei Stufen. Anschließend durchläuft das verstärkte Hydrophonsignal einen Impedanzwandler, die Verstärkungs-/Filterstufe und die Signalpegelüberwachung (mit Hilfe eines Mikrocontrollers, der auch Kalibrierungsdaten für den Filter speichert). Dann empfängt die Messplatine (Abb. 22, A) das Signal mit einer Impedanz von 150Ω. Diese Platine kann mit bis zu fünf verschiedenen Verstärker-/Filterstufen ausgestattet werden, die durch die auf dem Foto sichtbaren pfeilartigen Formen angedeutet sind. Jede dieser Stufen kann in Bezug auf die elektronischen Komponenten für die Verstärkung und die Filterung individuell gestaltet werden, je nach den tatsächlichen Anforderungen unter Verwendung einer austauschbaren Leiterplatte (Abb. 22, B). Das System wählt automatisch eine geeignete Stufe aus, wandelt den Analogwert in 12-Bit-Digitaldaten um und sendet sie über UART an den Arduino MEGA.

2024

In 2024 wurden die neuen Verstärker zusammengebaut und getestet. Abb. 23 zeigt die überarbeitete

Messplatine und den versiegelten Vorverstärker am Hydrophon, der nun eine bis zu 200-fache Verstärkung leisten kann. Der HiFU-Trigger ist implementiert. Es sind vier Verstärkerstufen möglich.

Abb. 24 zeigt das Verhalten der neuen Messplatine, wenn ein simuliertes Sinussignal mit einer Amplitude von 5,00 mV (Spitze-Spitze) in die Verstärkerschaltung eingespeist wird. Sowohl die Vorverstärkungsplatine (direkt am Hydrophon angebracht) als auch die erste Verstärkungsstufe verändern die Form des Signals nicht, was zu einer sauberen Verstärkung des schwachen Hydrophonsignals führt. Dadurch wird das verstärkte Signal unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen aus dem Sonalleve-Tisch und die Länge des Kabels bei der Übertragung des Signals ist nun kein Problem mehr.

Abb. 23: überarbeitet Mess-Platine und versiegelter verbesserter Vorverstärker mit Hydrophon.

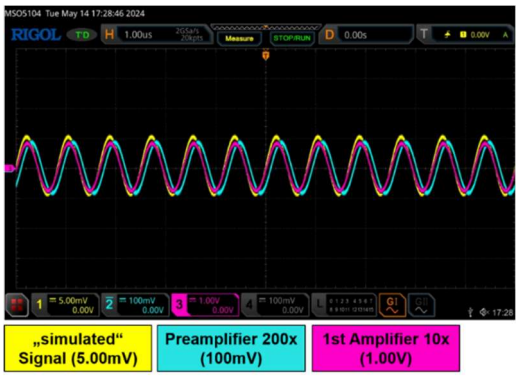

Abb. 24: Screenshot der Test-Messung mit der neuen Messplatine.

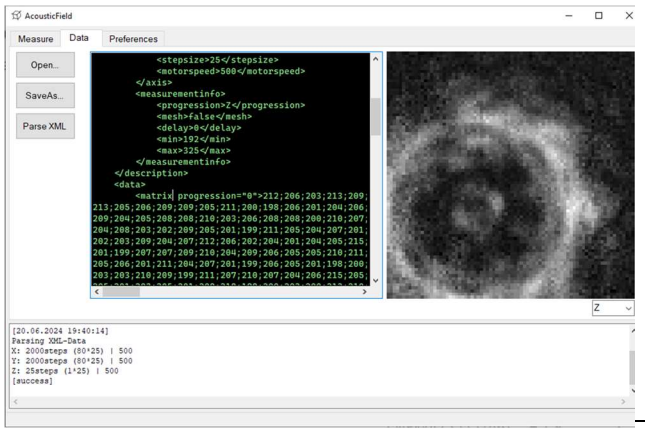

Abb. 25: Screenshot der neuen auf Visual Studio 2022 basierenden GUI (programmiert in C#) während einer Messung.

Die GUI wurde ursprünglich in LabView programmiert, mit den bereits für 2023. beschriebenen Vor- und Nachteilen. Trotz der Möglichkeit, LabView-Programme in lauffähige EXE-Dateien zu kompilieren, muss die Entwicklungsumgebung teuer erworben werden, um später Änderungen vornehmen zu können. Daher einigten sich die Projektpartner darauf, auf eine andere IDE (integrierte Entwicklungsumgebung) umzusteigen. Die Wahl fiel auf Visual Studio Community, da es für den privaten und professionellen Einsatz in kleinen Unternehmen und Institutionen kostenlos ist. Das C#-Programm wurde im Jahr 2024 entwickelt. Abb. 25 zeigt auf der rechten Seite einen Screenshot der neuen, auf Visual Studio 2022 basierenden grafischen Benutzeroberfläche in der Programmier-sprache C#. Das neue Programm erzeugt Standard-XML-Dateien zur Datenspeicherung.

Zusammenfassung 2b: Der mechanische und elektronische Aufbau für die 3D-Messung des durch den HIFU-Schallkopf induzierten Schallfeldes wurde im Rahmen dieses Projektes in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erfolgreich entwickelt und realisiert. Der Hydrophon-Aufbau besteht aus

- einem mikrocontrollergesteuerten 3D-Positionierungssystem,
- einer Signalverarbeitungselektronik mit einem speziell entwickelten empfindlichen Vorverstärker, der direkt mit dem Hydrophon verbunden ist, und einer Messelektronik zur Extraktion der DC-Komponente (Amplitude) aus der Druckkurve,
- einer Messelektronik, die die Möglichkeit bietet, den ON/OFF-Zustand des HIFU-Signals zu

triggern, um eine Überhitzung des Schallkopfes zu verhindern,

- einer speziell programmierten GUI für die Bedienung und Datenerfassung, womit
- länger andauernde 3-dimensionale Messungen des akustischen Feldes möglich sin.

Die elektronischen und mechanischen Entwicklungsarbeiten wurden hauptsächlich von Soluxx durchgeführt, während die Durchführung der Experimente vom UKK übernommen wurde.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket sind damit erfolgreich abgeschlossen.

AP 2c Auftriebswaage

Das dritte Projektthema unter den akustischen Charakterisierungsmethoden in diesem AP betrifft die Entwicklung eines Messsystems, mit dem die vom Ultraschallwandler abgegebene Gesamtenergie bestimmt wird. Hierfür wird die akustische Kraft mit dem Prinzip der Auftriebswaage gemessen.

2021

In 2021 wurde mit der CAD-Konstruktion des Messaufbaus begonnen. Der Aufbau basiert auf der Methode der Strahlungskraftbilanz (RFB), die eine direkte Messung der Schallleistung ermöglicht. Nach Prüfung verschiedener Entwürfe einigten sich die Projektpartner auf einen von der UKK bereitgestellten Entwurf. Dieser basiert auf dem von Adam Shaw veröffentlichten Prinzip (Ultrasound in medicine and biology, Volume 34, ISSUE 8, P1327-1342, August 01, 2008). Dabei wird ein schwimmendes Phantom in einem Wassertank verwendet, das an einer Wägeeinheit befestigt ist. Abb. 26 zeigt ein CAD-Modell des geplanten Designs

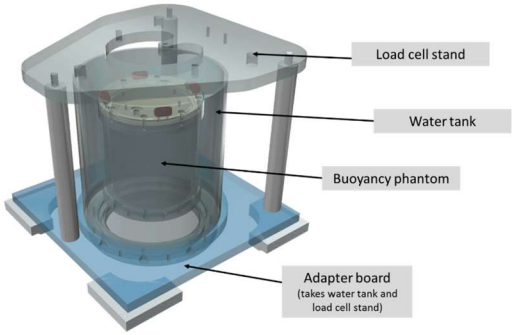

Abb. 26: Auftriebs-System für die Messung der vom Ultraschallwandler abgegebenen Gesamtenergie.

Die Messung der Schallleistung erfolgt durch Auslesen der Wägeeinheit, während das Phantom den Ultraschallwellen des HIFU-Wandlers ausgesetzt wird. Das Phantom ist mit Rizinusöl gefüllt. Die Verwendung von magnetischen Komponenten wird auf ein Minimum reduziert (größtenteils Verwendung von Acrylglas- und Kunststoffteilen), um das Auftriebssystem MR-kompatibel zu machen. Bei Verwendung des neuen Array-Schallkopfes muss die Adapterplatte für das HiFU-Fenster ausgetauscht werden.

2022

In 2022 wurde mit dem Bau des Aufbaus begonnen. Abb. 27 zeigt den damaligen Status. Der Aufbau besteht aus dem Auftriebsphantom (Vordergrund), dem Gestell mit angebrachter Wägezelle, dem zylindrischen Wasserbecken sowie dem elektronischen Messaufbau. Abb.g 28 zeigt die der Komponenten des elektronischen Messaufbaus.

In Abstimmung mit dem Projektpartner UKK wird eine Tedea Huntleigh Modell 1004 als Wägezelle verwendet. Die maximale Last für diese Zelle beträgt 300g, was eine erwartete Genauigkeit/Rauschen von 5-10mg bedingt. Die Auftriebsänderung bei einer Schallleistung von 100 W wird auf etwa 350 mg geschätzt. Das Signal der Wägezelle stammt von Dehnungsmessstreifen in einer Wheatstone-Brücken-Konfiguration, die mit einem HX711-Chip ausgelesen werden, einem 24-Bit-Analog-Digital-Wandler, der speziell für Waagen entwickelt wurde. Das gesamte System wird von einem Arduino Nano Mikrocontroller mit einem Drehgeber als Eingang und einem 20x4-Display als Ausgabegerät gesteuert.

Die Software erlaubt es, dass die Anlage sowohl standalone als auch remote betrieben werden kann. Zu den Funktionen gehören Tara-Abgleich und One-Shot-Messung mit einstellbarer Mittelwertbildung, eine Live-Messung mit Mittelwertbildung von fünf Messwerten, der Remote-Modus, bei dem das System über einen Host-PC gesteuert wird, und serielles Polling über USB, was bedeutet, dass die Messwerte in einem bestimmten einstellbaren Intervall gesendet werden und mit einem seriellen Monitor oder einem anderen geeigneten Programm ausgelesen werden können.

Testmessungen ergaben, dass schwere Lasten eine allmähliche Verformung der Wägeeinheit bewirken können, so dass der Nullwert nicht wieder erreicht wird. Daher ist es notwendig, dass die Anfangslast so gering wie möglich gehalten wird. In diesem Aufbau wird dies erreicht, indem das HiFU-Phantom in Wasser getaucht wird und seine Gesamtdichte etwas höher als die Wasserdichte gehalten wird. Die geschätzte Genauigkeit bzw. das geschätzte Rauschen belief sich auf etwa 10 mg, was den Erwartungen entsprach.

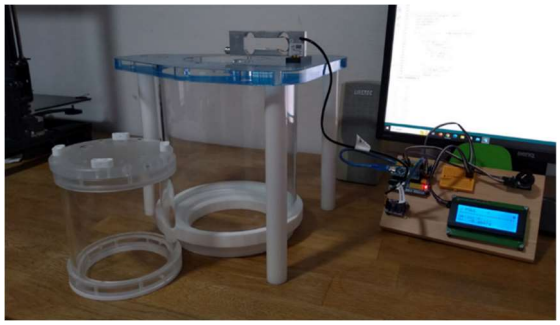

Abb. 22: Komponenten der Auftriebswaage. Wägeeinheit mit Wassertank, Auftriebsphantom (Vordergrund) und Messelektronik.

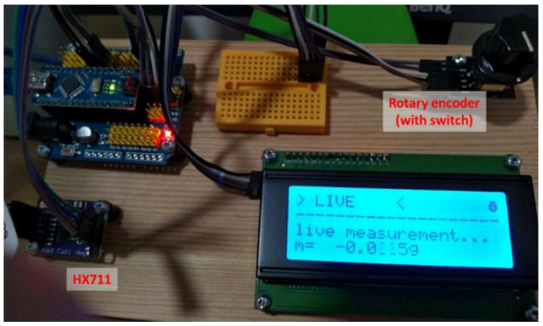

Abb. 23: Messelektronik für die Auftriebswaage: Arduino Nano, HX711 Verstärker, Drehwinkelgeber für Benutzerinteraktion, Anzeige.

2023

In 2023 wurde ein Gehäuse für die elektronischen Komponenten der Auftriebswaage entworfen und hergestellt. Es besteht aus vier Teilen (Abb. 29), enthält alle elektronischen Komponenten und bietet Anschlüsse für USB, Strom und die Wägezelle (DIN-Stecker). Die Frontplatte enthält das Display und den Drehgeber mit Schalter als Bedienelement. Abb. 30 zeigt Fotos des Gehäuses aus verschiedenen Perspektiven, wobei die elektronischen Komponenten und Anschlüsse zu sehen sind.

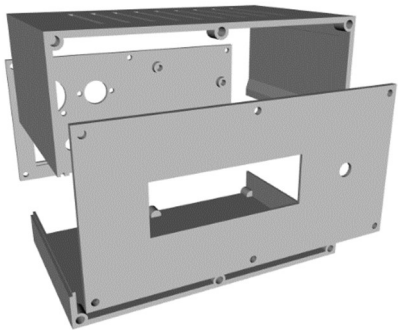

Abb. 29: CAD-Modell des Gehäuses für die Elektronik der Auftriebswaage.

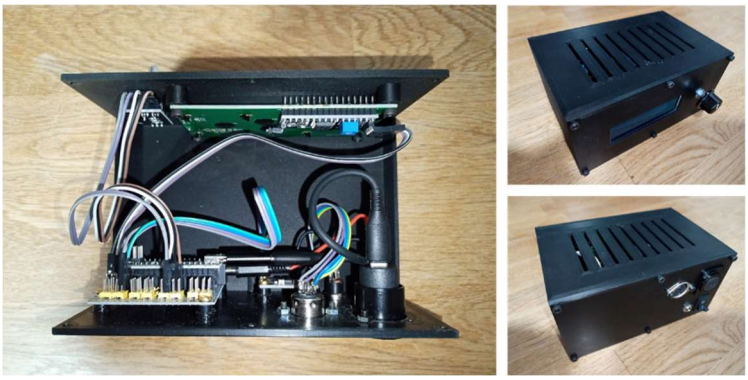

Abb. 30: 3D-gedrucktes fertiges Gehäuse mit der Elektronik der Auftriebswaage aus verschiedenen Perspektiven..

Abb. 31 zeigt den fertigen Auftriebswaggen-Messplatzes im Akustiklabor. In diesem Zustand ist das System für stand-alone Messungen geeignet. Es besteht aus der Adapterplatte, die auf das HiFU-Fenster aufgesetzt wird, dem Wassertank, dem Stativ mit aufgesetzter Wägezelle, dem an der Wägezelle befestigten HiFU-Target und dem Gehäuse mit den elektronischen Komponenten. Das HiFU-Target wird mit Rizinusöl gefüllt und anschließend versiegelt. Abb. 32 zeigt einen Screenshot der GUI

mit den gemessenen Daten einer Kalibrierungsprüfung des Systems mit verschiedenen Kalibrierungsgewichten.

Mit der Programmierung des geplanten GUI-Programms wurde in 2023 begonnen. Das Programm ermöglicht grundlegende Messungen und Daten-Ein- und Ausgabe sowie die Anzeige von Daten. Es wurde mit Visual Studio Community 2022 als IDE und C# als Programmiersprache programmiert. Tabelle 1 zeigt eine Liste der Befehle für die Kommunikation.

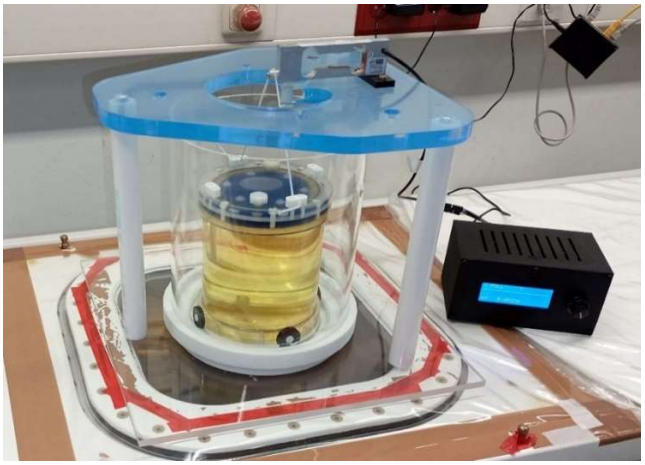

Abb. 31: fertiggestellte Auftriebswaage auf dem HiFU Fenster des Sonalleve-Tisches im Acoustic Lab der UKK.

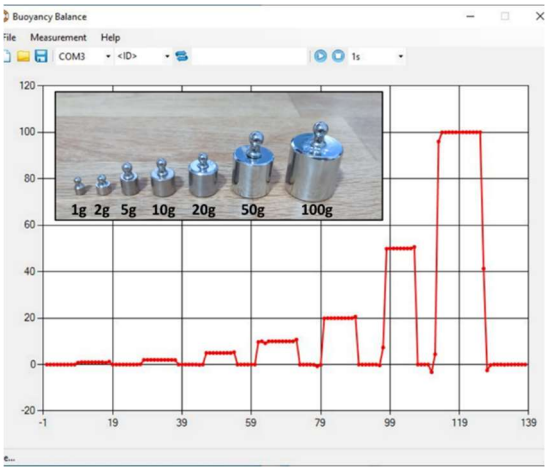

Abb. 32: Screenshot der GUI, die eine Mess-Serie mit verschiedenen Kalibrierungsgewichten zeigt.

Table 1: Befehle für die Kommunikation zwischen GUI und dem Auftriebswaagen-Messsystem.

Command	Explanation	Answer
<ID>	Get System ID	BBSystem #.# Soluxx ####
<T>	Tare the system	ok
<M>	One shot measure	measured value #.####
<SV# value>	Set Value (value is integer) # = 1: averaging count for live mode # = 2: averaging count for measurement (<M>) # = 3: time interval for serial polling	ok
<GV#>	Get value, #: same as set value	ok

Wie in Abb. 32 zu sehen ist, stimmen die gemessenen Massen nahezu perfekt mit den angewendeten Gewichten zwischen 1g und 100g überein und das Messsignal ist sehr stabil. Abb. 33 zeigt eine Testmessung mit dem HiFU-Quelle im Sonalleve Tisch bei steigender HiFU-Leistung. Die zunehmenden HiFU-Impulse "heben" das Auftriebsphantom im Wassertank an und verringern so sein Gewicht.

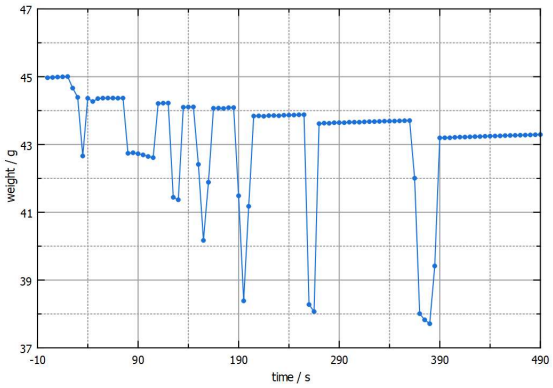

Abb. 33: Testmessung des Gewichts über der Zeit mit ansteigender Leistung .des HIFU-Schallwandlers.

Die Testmessung in Abb. 33 zeigt das ausgemessene Gewicht der Auftriebswaage während die Leistung des HiFU Schallwandlers bei jedem Puls ansteigt. Die Messung zeigt eine Drift in der Basislinie. Nach jeder Bestrahlung scheint das HiFU-Target "leichter" zu werden. Außerdem zeigt die Basislinie eine leicht positive Steigung, was darauf hindeutet, dass das das Gewicht nach dem Abschalten des HiFU-Wandlers "schwerer" wird. Eine plausible Erklärung für dieses Verhalten ist die Akkumulation von Wärme im Rizinusöl aufgrund der Strahlung und eine anschließende

Volumenvergrößerung. Dies ist möglich, da die Membran des HiFU-Targets nicht steif ist und sich bis zu einem gewissen Grad ausdehnen kann, was dann zu mehr Auftrieb führt. In der Literatur ist dieser Effekt gut dokumentiert (*Shaw, Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 34, No. 8, pp. 1327-1342, 2008*).

2024

In 2024 wurde die Steuereinheit für den Versuchsaufbau mit weiteren Upgrades für eine bessere Bedienung versehen und an die Projektpartner übergeben. Die Steuereinheit ist mit der Auftriebswaage und dem Computer verbunden und dient hauptsächlich zum Tarieren der Waage und zur Kommunikation zwischen Waage und Computer. Sie wurde so geeicht, dass die Messwerte direkt in [g] ausgegeben werden. Die Software (kommentierter Code) wurde weiter optimiert. Auch die Dokumentation für die Treiber (z.B. .dll...) des Gerätes und die Dokumentation der CAD/Konstruktionsdateien wurden erstellt und den Projektpartnern zur weiteren Bearbeitung übergeben.

Zusammenfassung 2c: Der mechanische und elektronische Aufbau sowie die Programmierung der Software und der Treiber für das Auftriebswägesystem zur Messung der akustischen Kraft von HIFU-Schallköpfen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern erfolgreich abgeschlossen. Der Aufbau besteht aus

- der Adapterplatte, die das System auf dem HIFU-Fenster haltert,
- dem angepassten Wasserbad,
- dem Stativ mit der angebrachten Wäge-Einheit,
- dem HiFU-Target (mit Rizinusöl gefüllt und versiegelt), das an der Wägezelle befestigt ist,
- dems Gehäuse, das die elektronischen Komponenten enthält,
- der Software und den Treibern.
- Das System besteht aus nichtmagnetischen Komponenten und ist daher potenziell MRT-kompatibel.

Die elektronische und mechanische Konstruktion wurde von Soluxx realisiert, während die Durchführung der Experimente von der UKK übernommen wurde.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket sind damit erfolgreich abgeschlossen.

WP 3: Schallwandler und Elektronik

Für den Betrieb eines HIFU-Schallkopfes sind verschiedene elektronische Komponenten erforderlich. Abb. 34 zeigt schematisch einen solchen Schallkopfe und den elektrischen Signalweg. Eine Ultraschallfrequenz wird verstärkt und dann über eine so genanntes Matching Board an ein piezoelektrisches Element als Schallquelle weitergeleitet. Das Matching Board sorgt für die Impedanz-anpassung zwischen der elektrischen Stromquelle und der piezoelektrischen Ultras-challquelle und ermöglicht so eine effiziente Leistungsübertragung. Jedes Element des HIFU-Schallkopfs (256 für den zu Beginn des Projekts verwendeten Schallkopf) muss einzeln an seine jeweilige Stromquelle angepasst werden.

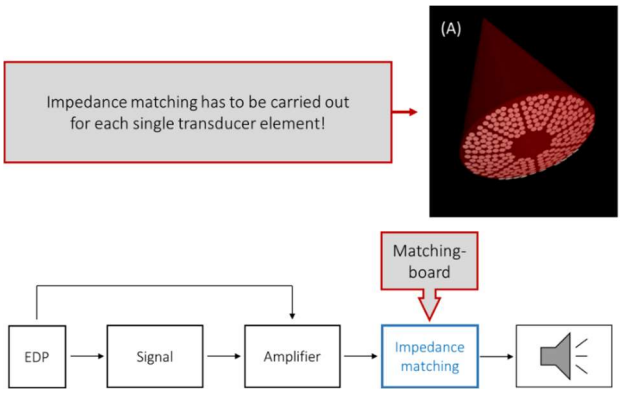

Abb. 34: Elektrischer Signalweg zum HIFU Schallkopf.

2020

In 2020 wurde eine Impedanzanpassungsplatine entworfen und hergestellt, die mechanisch und elektrisch mit dem bestehenden Matching-Board im Inneren des MR-Tisches kompatibel ist, aber mehr Vielseitigkeit bietet. Abb. 35 zeigt ein CAD-Modell der neu entwickelten Matching-Board (Version 2.2). Das neue Konzept besteht darin, die Filterteile, die die für die Impedanzanpassung verantwortlichen LC-Schaltungen enthalten, von der Hauptplatine zu trennen, die die digitalen und HF-Signalpfade enthält. In diesem Design enthält jede Filter-Subplatine (rote gestrichelte Linie) 16 LC-Schaltungen mit einer geeigneten Luftspule und Kondensatoren. Bei 16 vorgesehenen Steckplätzen können 256 Kanäle (einzelne Wandlerelemente) angesprochen werden. Dennoch können die Filterplatinen leicht ausgetauscht werden, so dass unterschiedliche Frequenzeinstellungen oder der Betrieb eines anderen Wandlers möglich sind. Da die IO-Anschlüsse und Montagebohrungen kompatibel zur alten Platine sind, kann der neue Aufbau in den ursprünglich vorhandenen Sonalleve-Tisch nachgerüstet werden. Durch die Trennung der Filterelemente kann die Hauptplatine kleiner und weniger komplex gestaltet werden, was zu einem Leiterplattendesign führt, das aus nur 6 Lagen besteht, von denen 2 nur Abschirmungslagen sind. Auch die notwendigen PCD-Spuren für eine (mögliche) automatische Impedanzanpassung und ein IO-Port für die entsprechende Logik sind bereits enthalten.

Abb. 36 zeigt die fertig bestückte Hauptplatine des neuen Matching Boards. Die elektrischen Komponenten wurden entsprechend den Anforderungen der MR-Kompatibilität ausgewählt.

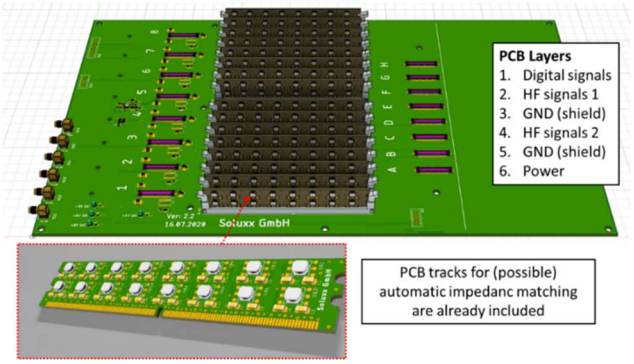

Abb. 35: CAD-Modell des neuen Matching Board und aufsteckbarer Filter-Leiterplatte (rot gepunktete Linie).

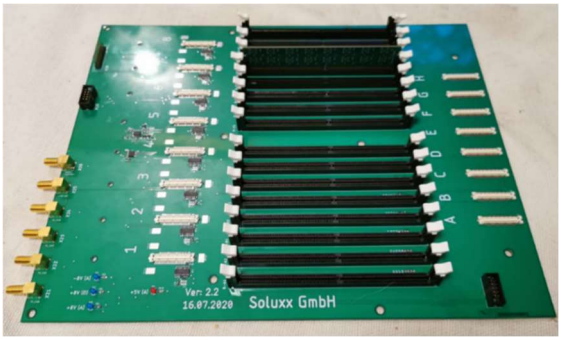

Abb. 36: Fertig bestücktes neues Matching Board.

Abb. 37 zeigt ein CAD-Modell des neu entwickelten Kalibriersystems für die Impedanzanpassungs-schaltung. Es kann entweder an die voll ausgestattete Matching Board selbst oder an eine einzelne steckbare Filterplatine angeschlossen werden. Dieses System wurde entwickelt, um einerseits eine Stromquelle und andererseits ein Wandlerelement mit seiner individuellen Impedanz zu simulieren. Anhand dieser Messungen können die elektrischen Komponenten der Filterplatinen, insbesondere die Induktivität der Luftspulen, ausgewählt und feinabgestimmt werden. Elektrisch kann dieses System verschiedene Wellenformen bis zu 20 MHz mit einer Leistung von bis zu 10 W erzeugen, um die Energiequelle ("Input") zu simulieren, die zum Antrieb der Wandlerelemente erforderlich ist. Außerdem kann das System verschiedene Impedanzwerte simulieren, die den für die Elemente eines HIFU-Schallkopfes üblichen Werten nahe kommen ("Ausgang"). Das Signal am Ausgang kann mit einem 8-Bit-AD-Wandler gemessen werden, der eine Datenrate von 10MS/s für jeden Strom und jede Spannung liefert. Anhand dieser Informationen kann der Mikrocontroller die Phase des komplexen Stroms und der Spannung berechnen, was Aufschluss über die Qualität des Filterelements gibt.

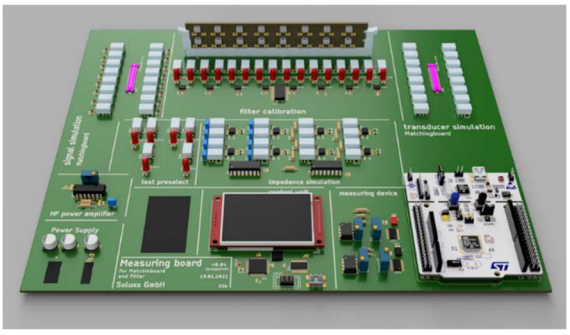

Abb 37: CAD-Modell der Kalibrierungsplatine für die Impedanzanpassungsschaltungen.

Abb. 38: Kalibrierungsplatine (1 Kanal) für die Impedanzanpassungsschaltung.

2021, 2022

In 2021 wurde eine Version der Kalibrierungsplatine mit einer Teilplatine gebaut und in Betrieb genommen (siehe Abb. 38). Die Teilplatinen enthalten die Luftspulen, die speziell angepasst werden müssen und für die Impedanzanpassung entscheidend sind. Die Messung beruht auf folgendem Prinzip: Ein Frequenzgenerator erzeugt eine Sinuswelle mit einer programmierbaren Frequenz. Dieses Signal wird in einen Filter und anschließend in eine programmierbare Impedanz eingespeist, die das Impedanzverhalten des Aufnehmers simulieren soll. Das Signal an der Impedanz wird von Hochgeschwindigkeits-AD-Wandlern sowohl als Strom als auch als Spannung erfasst und von einem ARM-Prozessor (effizienter Befehlssatz, hohe Ausführungsgeschwindigkeit) in Echtzeit verarbeitet. Eine schnelle Sinusanpassung ermöglicht die Bestimmung der Phasenabweichung und damit die Berechnung der Güte des Filters.

Insgesamt verzögerte sich dieses Arbeitspaket durch das Warten auf die Lieferung des Schallwandlers von einem externen Zulieferer. Im Laufe des Projekts einigten sich die Partner dann darauf, stattdessen das neue Array-Schallwandlerdesign zu verwenden, das von Profound entwickelt wurde. Infolgedessen wurde die weitere Entwicklung des Matching Boards für den neuen Wandler beim Projektpartner Profound fortgesetzt.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket sind damit erfolgreich abgeschlossen.

AP 4: Alternative Methoden zur Impedanzanpassung

Leiterbahnen und IO-Ports für die Impedanzanpassung wurden bereits beim Entwurf des Matching Boards (AP3) vorgesehen. Ein Neudesign der entwickelten Leiterplatte konnte daher entfallen.

Im Laufe des Projekts einigten sich die Partner auf die Verwendung des neuen Array-SChallwandler-Designs, das von Profound entwickelt wurde. Daher wurde dieses Arbeitspaket zur Impedanzanpassung beim Projektpartner Profound fortgesetzt.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket sind damit erfolgreich abgeschlossen.

AP 5: MR-HIFU am Kleintier

2020, 2021

Zunächst wurden 3D-CAD-Modelle der aktuellen Kleintierspule (Abb. 39, oben) und des Tierbetts (Abb. 39, unten) erstellt, um die notwendigen Optimierungen zu visualisieren und zu planen.

Zunächst wurde anhand der von Profound zur Verfügung gestellten Spezifikationen geprüft, ob die Öffnung der Kleintierspule an der Unterseite für den Betrieb mit dem neuen Wandler ausreicht. Erste

Abschätzungen deuten darauf hin, dass dies kompatibel ist und keine größeren mechanischen Änderungen an der Kleintierspule erforderlich sind. Am Tierbett werden jedoch einige Änderungen notwendig. Nach Angaben des Projektpartners UKK sollte es länger sein und statt der bisherigen Stufe am Übergang zur Öffnung zum HiFU-Fenster sollte eher eine flache Rampe sein, um das Tier besser platzieren zu können. Um die Kleintierspule auf dem neuen Schallkopf zu platzieren, ist ein Adapter erforderlich, der konstruiert wird, sobald die endgültigen Abmessungen feststehen.

2022

Hauptsächlich wird das Tierbett von der Änderung der Wandlertechnologie betroffen sein sowie die mechanische Schnittstelle der Kleintierspule. Daher verständigte sich das Konsortium darauf, die Kleintierspule am UKK in Betrieb zu lassen und eine zweite Kleintierspule zu entwickeln, die an die neue Wandlergeometrie angepasst wird. Abb. 40 zeigt die vorhandene Kleintierspule am UKK. Während die Herstellung mechanischen Teile unproblematisch sein dürfte, wird für das blaue Teil (siehe CAD-Modell in Abb. 39 links), das die Spulendrähte enthält, Unterstützung von Profound benötigt. Dieses Teil wird in einem Gussverfahren hergestellt. Profound hat einige Unterlagen zur Verfügung gestellt, so dass die Herstellung in Zusammenarbeit mit Profound erfolgen kann. Profound wird auch Unterstützung bei der Elektronik in den "Flügeln" des Gerätes und der Schnittstelle zum MRT-Gerät leisten, da in gewissem Umfang urheberrechtlich geschützte Teile benötigt werden.

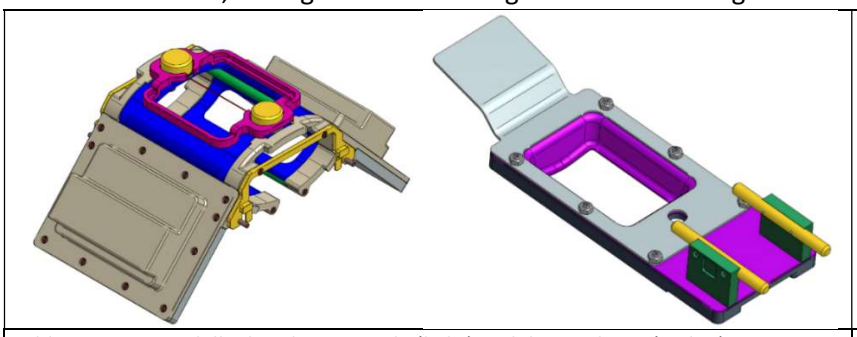

Abb. 39: CAD-Modelle der Kleintierspule (links) und des Tierbetts (rechts).

Abb. 40: Kleintierspule der UKK.

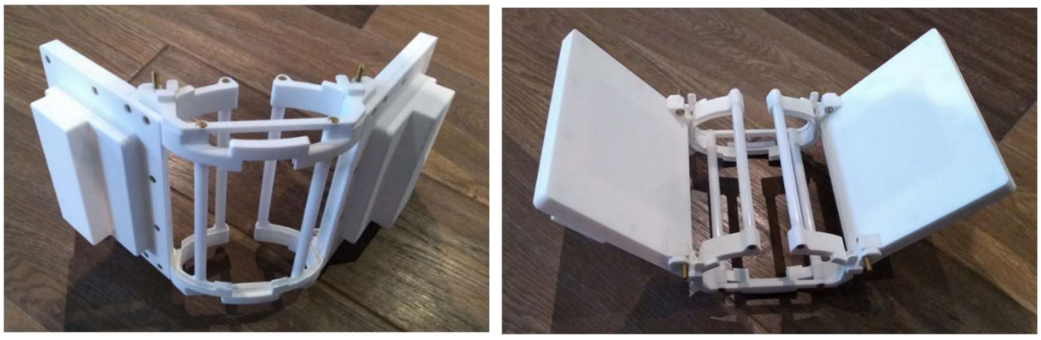

Abb. 41: Neue nachgebaute Teile der Kleintierspule von unten (links) und von oben (rechts).

Bereits fertig gestellte Teile der mechanischen Konstruktion sind in Abb. 41 dargestellt. Die neue (umgebaute) Kleintierspule ist links in der Ansicht von unten und rechts in der Ansicht von oben abgebildet. Sie besteht ausschließlich aus nichtmagnetischen Materialien. Die Teile wurden durch konventionelle Bearbeitung und 3D-Laser-Sintern hergestellt. Alle Schrauben und NIeten sind aus Messing gefertigt.

Die Elektronik in den "Flügeln" und der Abformungsprozess wurden geplant. Die von Soluxx entwickelten Pläne und Komponenten für den Bau einer Kleintier-MRT-Spule sowie die CAD- bzw. Designdateien für Gehäuse oder Elektronik wurden dokumentiert und dem Projektpartner UKK für die weitere Arbeit im Projekt übergeben.

Die technischen Aufgaben von Soluxx in diesem Arbeitspaket sind damit erfolgreich abgeschlossen.

Schlussbemerkung:

Seit dem 30. Juni 2024 sind alle Projektaufgaben von Soluxx erfolgreich abgeschlossen. Es werden keine weiteren Arbeiten von Soluxx im Projekt notwendig sein. Wir sind jedoch sehr an den weiteren Ergebnissen der klinischen Studie interessiert und werden den Projektpartnern UKK und Profound gerne mit Unterstützung, Beratung und für Fragen zur Verfügung stehen.

Weitere Angaben

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wesentlichen Posten des zahlenmäßigen Nachweises sind Personalkosten, Materialkosten und Abschreibungen. Der größte Teil der Projektmittel wurde für die Deckung der Personalkosten benötigt.

	entstandene Kosten insgesamt	**Gesamtvorkalkulation aus 2019**
Material	13.365	21.500
Personal	534.612	504.400
Reise	0	6.000
Abschreibungen	2.615	10.800
gesamt	**550.593**	**542.700**

Die Gesamtkosten im Projekt betrugen 551 TEUR und entsprechen somit recht gut der Vorkalkulation in 2019 von 543 TEUR.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt benötigte Messtechnik war zwar im Prinzip literaturbekannt, jedoch gab es keine Anbieter auf dem Markt, die diese Geräte in genau der benötigten Form anbieten. Insbesondere die Möglichkeit, solche Geräte innerhalb eines Magnetfeldes zu nutzen, war nicht verfügbar. Die Konstruktion der notwendigen Geräte aus weitgehend nicht-magnetischen Materialien bzw. die Auftrennung des Aufbaus in einen nicht-magnetischen Teil, der im MRT betrieben werden kann und einen wenig magnetischen Teil, der außerhalb des Magnetfeldes positioniert wird erforderte die Neukonstruktion und Neuentwicklung der betreffenden und im Projekt benötigen Messtechnik. Dies betraf sowohl den mechanischen als auch den elektronischen Teil der Geräte. Da es sich um Geräteneuentwicklungen handelte, war auch die Entwicklung der entsprechenden Software und Treiber für Bedienung, Ansteuerung und Datenerfassung notwendig. Für die Durchführung des Projektes waren diese Arbeiten von Soluxx daher zwingend notwendig.

Die Projektmittel wurden verwendet für Personal (Planung, Konstruktion, Schaltungsdesign, Programmierung, feinmechanische und elektronische Fertigung, etc.), für feinmechanische und elektronische Bauteile sowie für die Fertigung von PCBs (printed circuit boards).

Soluxx als sehr kleinem Unternehmen standen nicht die finanziellen Mittel zur Verfügung, um die beantragten Arbeiten ohne öffentliche Zuschüsse durchführen zu können. Daher war die beantragte Förderung zur Durchführung dieses Projektes absolut notwendig.

voraussichtlicher Nutzen (insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans)

Für die Soluxx GmbH als Kleinstunternehmen eröffnete die Durchführung dieses Projektes die Möglichkeit, die Kompetenz der Firma in den medizintechnischen Bereich zu erweitern. Darüber hinaus führten die Arbeiten im Projekt dazu, die Kompetenzen im Bereich der Entwicklung hochkomplexer elektronischer Schaltungen, im 3D-Druck, bei der Verarbeitung nicht-magnetischer Materialien und der Programmierung von Treibern und Graphic User Interfaces (GUI) in Labview und Visual Studio Community 2022 (C#) zu entwickeln und auszubauen.

Diese durch das Projekt gewonnenen und erweiterten Kenntnisse der Mitarbeiter ermöglichen es Soluxx bereits jetzt aber auch für die nähere Zukunft, anspruchsvollere und umfangreichere Aufträge im Bereich der Spezialgeräteentwicklung für den wissenschaftlichen Bereich durchzuführen. Dies gilt für Aufträge aus dem medizintechnischen Bereich aber auch für andere wissenschaftliche Bereiche. Der Nutzen des Projektes für die weitere Geschäftstätigkeit von Soluxx ist damit schon jetzt sehr hoch.

Darüber hinaus wird angestrebt, mit dem Projektpartner UKK weiter an der Verbesserung der im AP2 entwickelten Messapparaturen zu arbeiten und diese weiter zu entwickeln. Ob eine Verwertung der Projektergebnisse in Form einer kommerziellen Fertigung der im Projekt entwickelten Messgeräte für einen breiteren Anwenderkreis wirtschaftlich aussichtsreich ist, wird derzeit geprüft.

Die Verwertung der Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 3 und 4 erfolgt beim Projektpartner Profound.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Luisa Brecht, Florian Steinmeyer, **Jörg-Bernd Bonekamp**, Ari Partanen, Holger Grüll, und Johannes Lindemeyer. „A Custom-Built Piezo-Optical System for Visualization and Characterization of High Intensity Focused Ultrasound“. Current Directions in Biomedical Engineering 10, Nr. 4 (1. December 2024): 115–18. https://doi.org/10.1515/cdbme-2024-2028.

Konferenzbeiträge:
Schlieren-optical Characterization of Ultrasound Waves – Towards an MRI- compatible Setup, ISTU 2022 Toronto, 21st Annual International Symposium on Therapeutic Ultrasound, J. Lindemeyer, L. Brecht, **J.-B. Bonekamp**, F. Steinmeyer and H. Grüll.

Characterization of Histotripsy Pulses with a Schlieren-Optical System , ISTU 2023, 22nd Annual International Symposium on Therapeutic Ultrasound, Lyon, L. Brecht, F. Steinmeyer, **J.-B. Bonekamp**, H. Grüll and J. Lindemeyer.