

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung

Fakultät Maschinenbau

Masterarbeit

Entwicklung eines
Wasserprobennahmesystems
als wissenschaftliche Nutzlast eines
autonomen Tauchfahrzeugs

Eingereicht von:	Thorben Wulff
Eingereicht am:	26.05.2009
Betreuer:	Herr Prof. Dr. Gerhard Hiltcher
Zweitkorrektor:	Herr Dr. Michael Klages
Erstellt bei:	Alfred-Wegener-Institut 27570 Bremerhaven

Abstract

Die heutige Meeresforschung ist nur mit Hilfe moderner und hochentwickelter Geräte durchführbar. Insbesondere der Vorstoß in die Tiefsee ist ein komplexer technischer Vorgang. Die Forschung ist jedoch auf Erkenntnisse aus dieser schwer erreichbaren Region angewiesen, so dass es auf dem Gebiet der Tiefseetechnologie immer wieder zu Neuentwicklungen kam. Ein relativ neues Instrument, steht der Forschung in Gestalt autonomer Tauchfahrzeuge, sog. AUVs (Autonomous Underwater Vehicle), zur Verfügung. Ohne einen menschlichen „Piloten“ zu benötigen, sind sie in der Lage, zuvor programmierte Kurse abzufahren und dabei in Regionen vorzudringen, deren Zugang sonst nicht möglich wäre. Je nach Ausstattung können AUVs in diesen Regionen eine Vielzahl von Aufgaben übernehmen.

Das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven verfügt über eines dieser Tauchfahrzeuge. Die Entwicklung und der Bau eines Wasserprobennehmers als Teil der wissenschaftlichen Nutzlast dieses AUV sind Gegenstand dieser Arbeit. Hierzu werden zu Beginn der Arbeit zunächst die grundlegenden Anforderungen beschrieben, die ein wissenschaftlicher Einsatz in der Tiefsee nach sich zieht. Darauf aufbauend wird ein Konzept des Wasserprobennehmers entworfen und dieses letztendlich konstruktiv umgesetzt. Innerhalb des Konzeptes werden u.a. die Funktionsprinzipien (z.B. Entnahmetechnik) des Wasserprobennehmers festgelegt. Die präzise Ausarbeitung des Konzeptes während der Konstruktionsphase führte zur Entwicklung neuartiger Techniken, die eingehend erläutert werden. Abschließend wird der Zusammenbau und Einbau des Wasserprobennehmers beschrieben, sowie die Ergebnisse der wichtigsten Funktionstests vorgestellt.

Danksagung

Zu Beginn möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr. Gerhard Hiltcher und Herrn Dr. Michael Klages für ihre Unterstützung und Betreuung im Verlauf dieser Arbeit danken.

Mein besonderer Dank gilt zudem meiner Familie, meiner Mutter Elvira, meinem Vater Uwe und meinem Bruder Steffen, ohne die ich nicht da wäre, wo ich jetzt bin. Danke, dass ihr mir so oft den Rücken frei gehalten habt!

Ich möchte außerdem meiner Freundin Franziska danken, dass sie mir, obwohl sie häufig verzichten musste, in den zurückliegenden anstrengenden Monaten alle Freiheiten zur Anfertigung dieser Arbeit ließ.

Für meine Eltern

Jeder Tritt in den Hintern ist ein Schritt nach vorn!

(Anonym)

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	ii
Danksagung.....	iii
1 Einleitung	1
1.1 Das Alfred-Wegener-Institut.....	1
1.2 Wozu Meeres- und Polarforschung?	2
1.3 Die Tiefsee	3
1.4 Autonomous Underwater Vehicle (AUV).....	5
2 Anforderungsprofil	8
3 Konstruktive Grundlagen.....	10
3.1 Einsatzbedingungen	10
3.2 Druckkörper	11
3.3 Gewicht	13
3.4 Korrosion und Korrosionsschutz.....	14
3.5 Materialauswahl aufgrund von Reinheit	16
4 Konzeption	19
4.1 Einbauraum im AUV	19
4.2 Art der Probenbehälter und Probennahme	21
4.3 Entnahme mehrerer Proben	26
4.4 Verschluss der Probenröhren	30
4.5 Geometrie der Probenröhren	35
4.6 Probenanzahl	38
4.7 Anpressdruck an Schleifplatten.....	41
4.8 Antrieb.....	42
4.9 Zuleitungsverlauf	45
4.10 Übersicht Gesamtkonzept	47
5 Konstruktion.....	49
5.1 Probenröhren	49
5.1.1 Allgemeine Bauweise.....	49
5.1.2 Prinzip der Probennahme	50
5.1.3 Verschluss	51
5.1.4 Auslösemechanismus	56
5.1.5 Einlass-, Auslassseite der Röhre	58
5.1.6 Röhrenkörper und Probenvolumen	62

5.1.7	Federauslegung.....	63
5.1.8	Dichtungsprinzip an der Einlassseite	69
5.1.9	Fixierung im Wasserprobennehmer	70
5.1.10	Gesamtüberblick Probenröhre.....	72
5.2	Trommelmagazin	73
5.3	Antrieb.....	76
5.3.1	Antriebsstrang	76
5.3.2	Motor- und Getriebeauslegung.....	77
5.4	Antriebsdruckkörper.....	82
5.4.1	Allgemeine Bauweise.....	82
5.4.2	Lagerung der Antriebswelle	83
5.4.3	Abdichtung der Welle	86
5.4.4	Innerer Aufbau des Druckkörpers	87
5.4.5	Druckkörper	89
5.4.6	Gesamtüberblick.....	91
5.5	Steuerungsdruckkörper.....	92
5.6	Rahmen.....	93
5.6.1	Basisstruktur	93
5.6.2	Versteifungen	95
5.6.3	Motoraufnahme und Lagerung.....	96
5.6.4	Aufnahme Steuerungsdruckkörper.....	98
5.6.5	Halterung im AUV	99
5.7	Schleifbauteile und Rohranschluss.....	101
5.8	Rohrleitung.....	103
5.8.1	Zuleitung	104
5.8.2	Ableitung.....	106
5.9	Gesamtüberblick.....	107
6	Integration.....	109
6.1	Probenröhren	109
6.2	Antriebsdruckkörper.....	112
6.3	Rohranschluss.....	116
6.4	Wasserprobennehmer	117
6.5	Wasserprobennehmer im AUV	120
6.6	Gesamtüberblick.....	123
7	Tests.....	124
7.1	Abdichtung der Röhrenstirnseite.....	124
7.2	Entlüftung der Probenröhren	126
7.3	Drucktest des Antriebsdruckkörpers	128

8	Abschlussbetrachtung	132
8.1	Zusammenfassung.....	132
8.2	Optimierungsbedarf.....	133
8.2.1	Befüllung der Röhren.....	133
8.2.2	Ausbau der Röhren.....	133
8.3	Fazit.....	135
9	Abkürzungsverzeichnis	136
10	Tabellenverzeichnis	137
11	Abbildungsverzeichnis	138
12	Literaturverzeichnis	142
13	Eidesstattliche Erklärung	144

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit wurde am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven angefertigt. Sie beschreibt die Entwicklung und den Bau eines Wasserprobennehmers für den Tiefseeinsatz und dessen Integration in ein autonomes Tauchfahrzeug (AUV).

Im folgenden, einleitenden Kapitel soll zunächst ein Einblick in die Arbeitsgebiete des Instituts, sowie eine kurze Erläuterung zu dem Trägerfahrzeug „AUV“ gegeben werden.

1.1 Das Alfred-Wegener-Institut

Das Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) wurde 1980 gegründet und ist nach dem deutschen Polar- und Geowissenschaftler Alfred Wegener benannt. Neben dem Hauptsitz in Bremerhaven (Abbildung 1.1-1) werden weitere Forschungsstellen in Potsdam, auf Helgoland sowie auf Sylt unterhalten. Insgesamt sind über 780 Menschen beschäftigt.



Abbildung 1.1-1: Hauptsitz des Instituts in Bremerhaven, Quelle: AWI

Das Institut ist als Großforschungszentrum Teil der Helmholtz-Gemeinschaft. Die besonderen Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der polaren Bio-, Geo- und Meereswissenschaften. Zusätzliche Arbeitsgebiete sind die Nordseeforschung, die Meerestechnik sowie Dienstleistungen, wie beispielsweise die Beratung der Bundesregierung.

Um die Forschungsarbeiten zu ermöglichen, unterhält das Alfred-Wegener-Institut mehrere Forschungsschiffe, Polarflugzeuge und Forschungsstationen. Es ist die einzige deutsche Forschungseinrichtung, die über Zugangsmöglichkeiten zu arktischen und antarktischen Gebieten verfügt. Als herausragende Einrichtungen sind hierbei insbesondere der Betrieb des größten deutschen Forschungsschiffes *Polarstern* und der antarktischen Forschungsstationen *Georg von Neumayer I – III* zu nennen (Abbildung 1.1-2).



Abbildung 1.1-2: Polarstern (links), Georg von Neumayer Station (rechts), Quelle: AWI

Der Forschungseisbrecher *Polarstern* dient sowohl als Versorgungsschiff für die deutschen Polarstationen, als auch als mobile Forschungsplattform. Das Schiff bietet Arbeitsmöglichkeiten für 50 Wissenschaftler und hat seit seiner Indienststellung 1982 über 7600 Wissenschaftlern aus 36 Nationen den Zugang zu den Polargebieten ermöglicht (Stand: 2007)

Die neueste *Georg von Neumayer Station* ist bereits die dritte deutsche Forschungsstation in der Antarktis. Der reguläre Betrieb in dieser Station wurde erst Anfang dieses Jahres aufgenommen. Der Grund für den Wechsel der Stationen ist ihr Standort. Alle Stationen wurden auf dem Ekström-Schelfeis errichtet und stehen daher auf sich bewegendem Grund. Die jetzige Station *Neumayer III* driftet mit dem Schelfeis ca. 200 m pro Jahr in Richtung offene See. Trotzdem ist die Station auf eine Betriebsdauer von 25 – 30 Jahren ausgelegt.

Die Finanzierung des Instituts und seiner Einrichtungen erfolgt zum größten Teil (90 %) aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Weitere Mittel werden durch das Land Bremen, Schleswig-Holstein und Brandenburg bereitgestellt.

1.2 Wozu Meeres- und Polarforschung?

Die Geschichte der Meeres- und Polarforschung reicht bereits mehrere Hundert Jahre in die Vergangenheit zurück. Angefangen bei den ersten belegbaren Versuchen der Tiefenbestimmung durch Ferdinand Magellan im Jahr 1521, bei denen ein Senkblei an einer 700 m langen Schnur auf den Grund des Meeres herabgelassen werden sollte (es erreichte den Grund nicht, woraus gefolgert wurde, das Meer müsse unendlich tief sein), über die großen Entdeckungsfahrten des 19. Jahrhunderts, die bereits in die Polarregionen führten, bis hin zur heutigen Hightechforschung. Sowohl das Bild des Meeres, als auch das der kalten Regionen dieser Erde, hat in dieser Zeit einen stetigen Wandel erfahren. Wurden die Meere in früheren Zeiten als mysteriöser und in größeren Tiefen lebloser Ort angesehen, so gilt das Meer heute als weitläufigster und vielschichtigster Lebensraum der Erde. Die Polarregionen galten in früheren Zeiten bestenfalls als Lieferant für Rohstoffe wie Walfleisch oder Robbenfelle. Der Wert der Lebensräume Meer und Arktis, bzw. Antarktis war damals noch vollkommen unbekannt. Mit der fortschreitenden Erforschung dieser Lebensräume wird immer deutlicher, wie wichtig diese Regionen für den Menschen sind und wie stark sie bereits heute durch ihn bedroht werden.

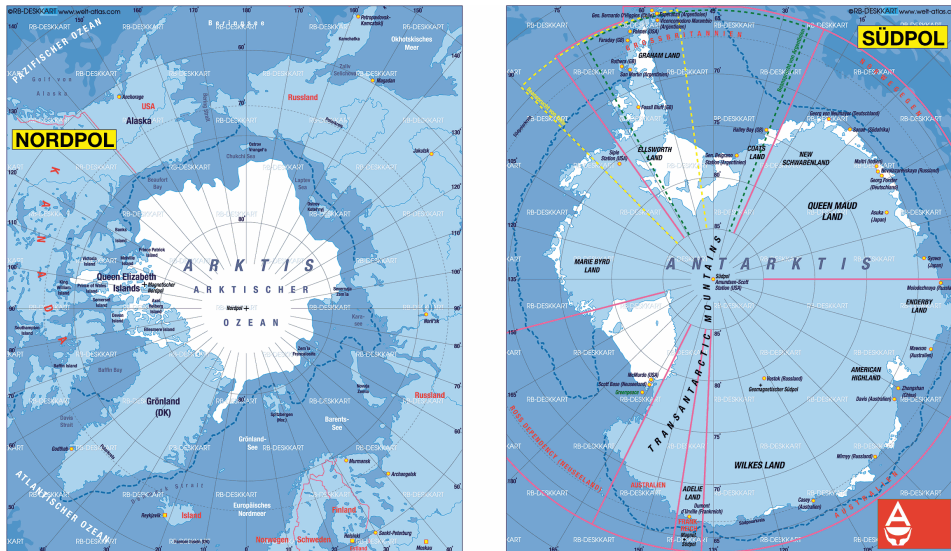


Abbildung 1.2-1: Arktis und Antarktis

Zusätzlich gewinnt in den letzten Jahren ein Thema zunehmend an Gewicht: Die Klimaänderung. Durch den massenhaften Ausstoß von Treibhausgasen hat der Mensch eine Entwicklung in Gang gesetzt, deren Auswirkungen heute beispielsweise in steigenden Durchschnittstemperaturen beobachtet werden können. Es sind ca. 70 % der Erdoberfläche von Meerwasser bedeckt. Der Einfluss dieser Wassermassen auf das Klima ist gewaltig. Das Meer wirkt entweder wie ein Wärmespeicher oder wie ein Kühlmittel. Gleichzeitig sorgen die Meeresströmungen für einen Energieaustausch zwischen den verschiedenen Klimazonen. So sind auch die (aus menschlicher Sicht) abgelegenen Polregionen durch Wasser- und Luftströmungen unmittelbar an das globale Wettergeschehen gekoppelt und beeinflussen direkt das Leben in den bewohnten gemäßigten Zonen. Die genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge ist unabdingbar bei der Entwicklung von Klimamodellen, womit wiederum Aussagen zur weiteren Entwicklung des Klimas gewonnen werden können. Daran, dass sich staatliche Schutzmaßnahmen, wie z.B. die Höhe der Küstendeiche, um zukünftigen Sturmfluten zu widerstehen, an den Aussagen dieser Modelle orientieren, zeigt sich, wie wichtig die Meeres- und Polarforschung in Klimafragen ist.

1.3 Die Tiefsee

Als Tiefsee werden alle Bereiche des Meeres unterhalb 1000 m Wassertiefe bezeichnet. Da ca. 88% des Meeresbodens diese Tiefe unterschreiten, ist die Tiefsee damit der flächenmäßig größte Lebensraum der Erde. Die durchschnittliche Tiefe der Weltmeere liegt bei 3729 m [2]. Geologisch ist der Lebensraum Tiefsee dabei keineswegs einheitlich, sondern durch Tiefenunterschiede in verschiedene Großformen gegliedert. Der größte Anteil der Tiefsee besteht aus ebenen Tiefseebecken. Derzeit sind 80 größere (ab 110 km²) Tiefseebecken auf der Erde bekannt [1]. Das größte Becken ist das sog. Enderbybecken zwischen der Südspitze Afrikas und der Antarktis mit einer Fläche von 3.700.000 km² (vgl. Indien: 3.200.000 km²). Über das Niveau dieser Becken erheben sich die mittelozeanischen Rücken. Diese untermeerischen Gebirgszüge kennzeichnen tektonische Plattengrenzen und sind vulkanischen Ursprungs. Die mittelozeanischen Rücken bilden zusammen ein Netzwerk von 60.000 km Länge und sind damit das längste zusammenhängende Gebirgssystem der Erde. Insgesamt bedecken die mittelozeanischen Rücken eine Fläche, die annähernd der Größe aller

Kontinente entspricht [2]. Sie erheben sich meist mehrere tausend Meter über das sie umgebende Beckenniveau und können in Einzelfällen sogar die Oberfläche des Meeres in Form von Inseln durchbrechen. Ebenfalls tektonischen Ursprungs sind die Tiefseegräben. Sie kennzeichnen den Ort, an dem eine ozeanische unter eine kontinentale Platte abtaucht. Die Gräben zeichnen sich durch ein starkes Gefälle und extreme Tiefen von bis zu 11.000 m aus. Die weltweit größte Tiefe ist die Witjastiefe im pazifischen Marianengraben mit 11.034 m. Verglichen mit der Gesamtfläche der Ozeane machen diese extremen Tiefen zwar nur einen relativ kleinen Anteil aus (nur 0,25 % des Meeresbodens liegt tiefer als 6000 m, [2]), doch sind sie umso interessanter für die Forschung, da auch unter diesen Bedingungen noch Leben beobachtet wurde.

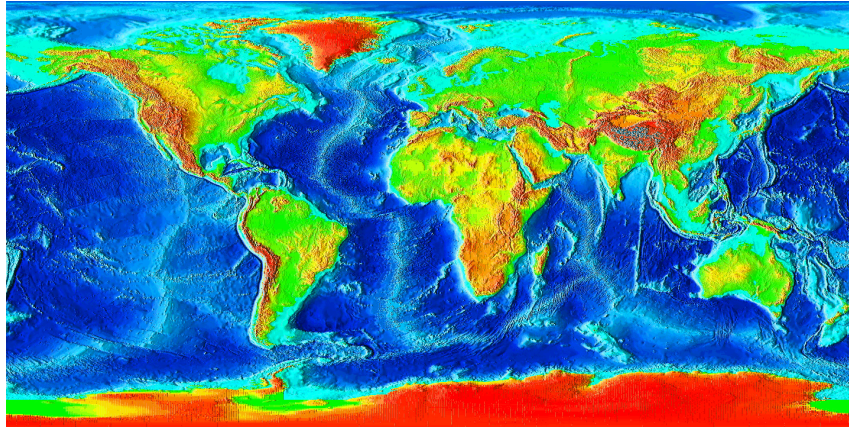


Abbildung 1.3-1: Topographie der Erde, blau: Tiefsee, Quelle: NOAA

Die Lebensbedingungen und die Biologie der Tiefsee sind geprägt von Extremen: Die Temperaturen liegen, unabhängig von der geografischen Breite, gleichbleibend zwischen -1°C und $+4^{\circ}\text{C}$. Jahreszeitliche Schwankungen sind nahezu gänzlich unbekannt. Der Wasserdruck kann je nach Tiefe bis zu mehrere Hundert bar erreichen. Ein weiterer Faktor, der auf die Entwicklung der hier lebenden Fauna Einfluss hatte, ist die Nahrungsknappheit. Die Tiefsee ist eine sog. tropholytische Zone, d.h. die Menge der erzeugten Biomasse liegt deutlich unter der Menge der verbrauchten Biomasse. Eine Primärproduktion (z.B. Pflanzenwuchs) findet aufgrund der Abwesenheit von Licht überhaupt nicht, oder nur im engen Umfeld bestimmter heißer Quellen, den sog. „Black Smokern“, statt. Die Lebewesen der Tiefsee sind auf von der Oberfläche herabsinkende Pflanzenreste und Tierkadaver als Nahrungsgrundlage angewiesen (Abbildung 1.3-2). Die Organismen zählen daher mehrheitlich zu den „Verwertern“, den sog. Destruenten.

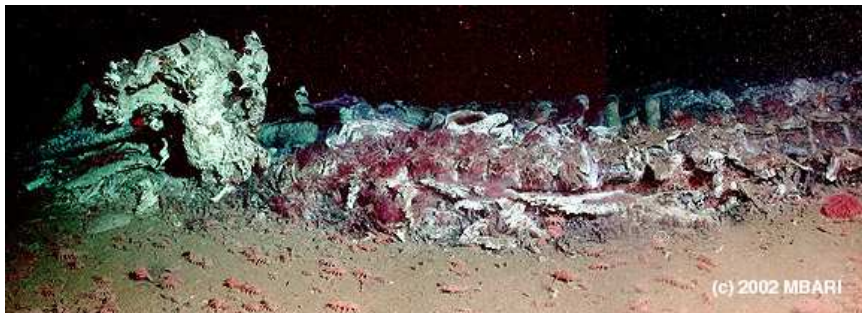


Abbildung 1.3-2: Walskelett am Grund der Tiefsee, Quelle: MBARI

Trotz dieser Lebensbedingungen hat sich in der Tiefsee eine beachtliche Artenvielfalt entwickelt. Die Anzahl größerer Tiere ist jedoch relativ gering, so dass der Meeresgrund in dieser Tiefe in weiten Teilen einer Wüste ähnelt.

Tiere haben sich in vielfältiger Weise an die besonderen Lebensbedingungen angepasst: Viele größere Tiere besitzen große Augen um auch das schwächste Licht verwerten zu können. Einige Arten besitzen sogar die Fähigkeit der Biolumineszenz und setzen ihr selbsterzeugtes Licht beispielsweise zur Jagd ein. Wird Beute gemacht, verfügen viele Tiere über extrem dehnbare Mägen, um auch große Beutetiere nutzen und längere Phasen ohne Nahrung überstehen zu können.



Abbildung 1.3-3: Drachenfisch mit Leuchtorgan, Quelle: Wissenschaft aktuell

Die Komplexität dieses Lebensraums ist durch den Menschen bisher noch kaum erforscht. Der Grund hierfür liegt in der relativen Unerreichbarkeit der Tiefsee. Die hohen technischen Anforderungen bei der Erkundung sind mit einem enormen Kostenaufwand verbunden, so dass nur wenige Institutionen überhaupt zu einer Erforschung in der Lage sind.

1.4 Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein autonomes Tauchfahrzeug (engl.: Autonomous Underwater Vehicle, AUV) als Trägersystem für den entwickelten Wasserprobennehmer verwendet. Die Entwicklung dieser Unterwasserfahrzeuge begann in den frühen achtziger Jahren in den USA [15]. Ziel war der Bau von Fahrzeugen, die im Gegensatz zu ferngesteuerten Tauchrobotern, sog. ROVs (Remotely Operated Vehicle), ohne Kabelverbindung zu einem Mutterschiff operieren konnten. Der damalige Hintergrund der Entwicklung war rein militärisch und wurde durch die amerikanische Marine forciert. Ähnlich wie unbemannte Drohnen in der Luftwaffe, boten auch AUVs die Möglichkeit gefahrloser Aufklärungs- oder Kampfeinsätze. Auch heute ist der mit Abstand größte Anwender autonomer Unterwasserfahrzeuge die amerikanische Marine, die die Fahrzeuge als Teil der Sicherungskräfte für Flottenverbände einsetzt.

Neben dieser militärischen Anwendung werden autonome Unterwasserfahrzeuge seit einigen Jahren auch wissenschaftlich genutzt. Sie bieten hierbei, vor allem bei zeitintensiven Aufgaben, wie z.B. dem großflächigen Kartieren von Unterwassergebieten, Vorteile. Zusätzlich sind einige Forschungsgebiete nahezu ausschließlich mit einem AUV erreichbar. Regionen unterhalb geschlossener Eisflächen, wie z.B. unterhalb des antarktischen Schelfeises, sind durch ferngesteuerte Tauchroboter kaum zu erforschen, da diese ein Kabel

mit unter das Eis ziehen müssten. Die Länge und das Gewicht des Kabels setzen der Beweglichkeit enge Grenzen. Der Einsatz von bemannten Tauchbooten unterhalb einer Eisfläche wäre extrem gefährlich. Ein AUV kann dagegen auf zuvor bestimmten Kursen kilometerweit unter das Eis tauchen und dort, je nach Ausstattung, die verschiedensten Aufgaben erfüllen.

Das AUV des Alfred-Wegener-Instituts wurde im Jahr 2003 angeschafft und stammt von dem amerikanischen Hersteller Bluefin Robotics. Abbildung 1.4-1 zeigt das AUV während der Bergung nach Beendigung einer Testfahrt (Oktober 2008).



Abbildung 1.4-1: AUV des Alfred-Wegener-Instituts

Der Aufbau des AUV ist in einzelne Segmente unterteilt. Jedes dieser Segmente besitzt innerhalb des Fahrzeugs eine spezifische Aufgabe. Die einzelnen Segmente zeigt Abbildung 1.4-2.

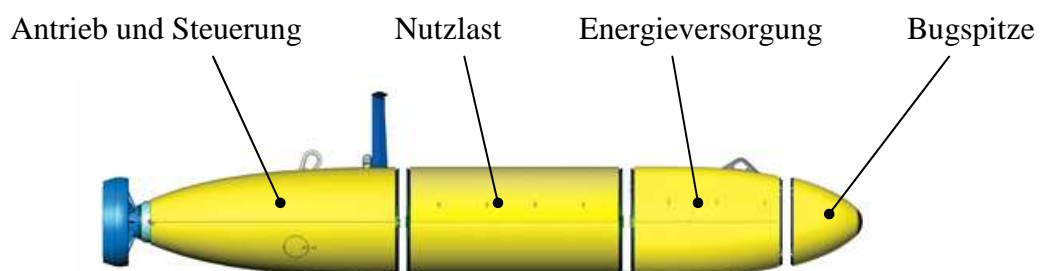


Abbildung 1.4-2: Segmentbauweise des AUV, Quelle: Bluefin Robotics

- **Bugspitze**
In der Bugspitze des AUV ist ein Sonarsystem eingebaut, das der Hinderniserkennung dient. Neben natürlichen Unterwasserhindernissen wie Geländeerhebungen ist es in der Lage, auch frei im Wasser schwebende Hindernisse, wie z.B. verlorene Fischereinetze, zu erkennen.
- **Energieversorgung**
Die Energieversorgung des AUV wird durch mehrere Lithium-Ionen Akkus gebildet. Vollständig geladene Akkus ermöglichen dem Fahrzeug eine Fahrtstrecke von bis zu 50 km und eine dauerhafte Reisegeschwindigkeit von 5-6 km/h. Die typische Dauer eines Tauchgangs liegt daher bei ca. 8 bis 10 Stunden.
- **Nutzlast**
Die Nutzlastsektion bietet die Möglichkeit, wissenschaftliche Geräte in das AUV einzubauen. Diese Sektion ist daher von Herstellerwegen leer. Es befinden sich lediglich mehrere Querstreben in der Sektion, die der Halterung von Geräten dienen können.
- **Antrieb und Steuerung**
Der Antrieb des AUV besteht aus einem Elektromotor, dessen Drehung an eine dreiblättrige Schraube übertragen wird. Die Schraube ist von einem Ring eingefasst, der als Ruder dient (sog. Kortdüse). Sowohl Schraube, als auch der einfassende Ring sind beweglich, wodurch der Schub der Schraube in jede beliebige Richtung gelenkt werden kann.
Die Steuerung und Orientierung des Fahrzeugs erfolgt an der Oberfläche durch GPS. Da das GPS Signal unter Wasser nicht mehr empfangen werden kann, kommt im getauchten Zustand ein Trägheitsnavigationssystem zum Einsatz. Die Genauigkeit dieses Systems liegt bei ca. 1 m pro gefahrenem Kilometer.

In der in Abbildung 1.4-2 dargestellten Konfiguration mit vier Segmenten beträgt die Länge des AUV ca. vier Meter. Bei sehr umfangreichen Nutzlasten kann im Bedarfsfall noch ein zweites Nutzlastsegment eingefügt werden, womit die Gesamtlänge auf ca. fünf Meter ansteigt.

Die maximale operationelle Tauchtiefe des AUV liegt bei 3000 m. Während des Tauchgangs ist das Innere des AUV geflutet. Alle im AUV eingebauten Komponenten sind daher ebenfalls den Bedingungen der Tiefsee ausgesetzt und müssen dementsprechend ausgelegt sein. Die elektronische Steuerung des Fahrzeugs ist beispielsweise in einer druckfesten Glaskugel eingebaut.

Das Abtauchen des AUV verläuft dynamisch mit Hilfe des Vortriebs und des Ruders. Tauchtanks, die eine Änderung des spezifischen Gewichtes und damit das statische Abtauchen ermöglichen würden, sind nicht vorhanden. Um trotzdem nahezu einen Schwebезustand einnehmen zu können, muss das AUV über einen in jeder Tiefe konstanten Auftrieb verfügen. Freiräume innerhalb des AUV sind daher mit speziellen, druckfesten Auftriebskörpern ausgefüllt. Damit das Fahrzeug auch im Fall einer Fehlfunktion an die Oberfläche gelangt, ist es stets mit einem leicht positiven Auftrieb austariert. Als zusätzliche Sicherheitsmaßnahme ist in der Spitze ein sog. „Drop Weight“ eingebaut, das notfalls abgeworfen werden kann.

2 Anforderungsprofil

Die Grundlage des Entwicklungsprozesses bei neuartigen Geräten wie dem Wasserprobennehmer ist das zu Beginn der Entwicklung festgelegte Anforderungsprofil. Dieses Profil stand zu Beginn dieser Arbeit noch nicht fest. Es wurde daher in enger Abstimmung mit Wissenschaftlern aus den verschiedenen Forschungsbereichen des Alfred-Wegener-Instituts erarbeitet. Um eine möglichst umfassende Einsatzmöglichkeit des Wasserprobennehmers zu erreichen, wurden Wissenschaftler aus den Forschungsbereichen Biologie, Chemie und der Geowissenschaften in der Festlegung des Anforderungsprofils einbezogen.

- Nachweise: Chlorophyll
Gelöster Kohlenstoff
Nährsalze
Barium
Sauerstoff
Spurenmetalle
- Reinheit: aufgrund des Nachweises von
Spurenmetallen hohe
Reinheitsanforderungen
- Probenvolumen: je Probe ca. 200 ml
- Probenanzahl: min. 10
- Empfindlichkeit der Proben: für alle genannten Nachweise unkritisch,
jedoch sichere Entnahmemöglichkeit aus
der Röhre gefordert
- Aufrechterhaltung Entnahmedruck: nein
- Entnahmedauer: maximal im niedrigen Sekundenbereich

Nachweise:

Der Wasserprobennehmer selbst ist kein Analysegerät. Er dient lediglich der Sammlung von Probenmaterial und dessen Rückführung an die Oberfläche. Während der Erarbeitung des Anforderungsprofils wurde eine Reihe von Nachweismethoden definiert, deren Durchführung mit Hilfe der Proben möglich sein muss. Jeder dieser Nachweise hat spezifische Anforderungen an Reinheit und Probengröße.

Reinheit:

Insbesondere aufgrund des Nachweises von Spurenmetallen sind die Reinheitsanforderungen an den Wasserprobennehmer sehr hoch. Dies bezieht sich insbesondere auf die Materialauswahl, die hierdurch erheblich eingeschränkt wird. Des Weiteren ist von Bedeutung, dass bereits der Kontakt mit der Außenhülle des AUV's als mögliche

Kontamination gilt. Die Wasserproben müssen daher in einiger Entfernung zum AUV entnommen werden.

Probenvolumen:

Jeder der Nachweise benötigt eine bestimmte Mindestmenge an Probenvolumen, damit sichere Ergebnisse geliefert werden können. Diese Mindestmenge bewegt sich üblicherweise im Bereich zwischen 15 ml (Bariumnachweis) und 100 ml (Chlorophyllnachweis). Um Referenzexperimente zu ermöglichen, oder um mehrere Nachweise durch eine Probe bedienen zu können, wurde das Probenvolumen auf 200 ml festgelegt.

Probenanzahl:

Die Probenanzahl ist entscheidend für das örtliche Auflösungsvermögen des Wasserprobennehmers. Bei einer maximalen Fahrtstrecke des AUV von ca. 50 km, entspricht eine Probenanzahl von zehn Proben einem Raster mit einer fünf Kilometer Auflösung. Dies gilt zwar als ausreichend, sollte aber nach Möglichkeit gesteigert werden.

Empfindlichkeit der Proben:

Die Empfindlichkeit der Proben ist insofern ein Thema, als dass deren Inhaltsstoffe an der Oberfläche mit vollkommen anderen Bedingungen in Berührung kommen, als in der Tiefsee. Beispielsweise könnten Luftsauerstoff und UV-Strahlung chemische Reaktionen anstoßen, die die ursprüngliche Zusammensetzung der Probe verändern. Für die genannten Nachweise ist dies zwar nicht der Fall, jedoch wurde ein sicherer und schnell zu öffnender Entnahmemechanismus gefordert.

Aufrechterhaltung Entnahmedruck:

Für einige Tiere der Tiefsee ist der hohe Wasserdruck lebenswichtig. Da derartige Forschungen (Einfangen von Tieren) mit diesem Wasserprobennehmer jedoch nicht geplant sind, ist die Aufrechterhaltung des Entnahmedrucks nicht nötig.

Entnahmedauer:

Das AUV, in dem sich der Wasserprobennehmer befindet, bewegt sich während der Tauchgänge mit ca. 1,5 m/s vorwärts. Um die entnommenen Proben bestimmten Positionen und nicht kompletten Streckenabschnitten zuordnen zu können, ist es daher nötig, die Probe innerhalb einer kurzen Zeitspanne entnehmen zu können. Wichtig wird diese Anforderung beispielsweise, falls ein Behälter mit Hilfe von Pumpen befüllt werden müsste.

3 Konstruktive Grundlagen

Die grundlegenden Anforderungen an eine tiefseetaugliche Konstruktion werden immer durch die dort herrschenden extremen Bedingungen diktiert. Hierzu zählen der hohe Druck, eine niedrige Temperatur und die Aggressivität des umgebenden Mediums Salzwasser. Zusätzlich muss der Einsatz in polaren Regionen und die damit verbundene Kälte in Betracht gezogen werden. Um einen Einsatz unter diesen Bedingungen überhaupt zu ermöglichen, ist insbesondere die Materialauswahl ein kritischer Punkt.

Im folgenden Kapitel werden grundlegende Theorien und Überlegungen dargestellt, die in die Konstruktion Eingang fanden.

3.1 Einsatzbedingungen

Der Wasserprobennehmer soll in seiner Bauform speziell an das AUV des Alfred-Wegener-Instituts angepasst werden. Mit Hilfe dieses AUV sollen Regionen erkundet werden, die dem Menschen nur sehr schwer zugänglich sind. Es ist hierzu geplant das AUV an Bord des deutschen Forschungsschiffes *Polarstern* in sein Einsatzgebiet zu überführen und von dort auszusetzen.

Das oberflächennahe Wasser des Polarmeeres kann Temperaturen von ca. $-1,8^{\circ}\text{C}$ erreichen. Sehr viel problematischer sind allerdings die Bedingungen außerhalb des Wassers. Während der Expeditionen kann es zu längeren Standzeiten an Deck kommen, in denen sowohl das AUV als auch der Wasserprobennehmer sehr viel geringeren Temperaturen ausgesetzt sein könnten. Die Spezifikationen der *Polarstern* sehen vor, dass alle wissenschaftlichen Forschungsarbeiten bis zu einer Außentemperatur von -30°C möglich sein müssen [9]. Um größtmögliche Einsetzbarkeit zu gewährleisten, muss daher auch der Wasserprobennehmer diesen Spezifikationen gerecht werden. Konstruktiv zieht diese Anforderung die Verwendung kälteresistenter Werkstoffe und die besondere Beachtung der thermischen Ausdehnung, bzw. Schwindung nach sich.

Neben der Kälte spielt der hohe Wasserdruck bei einem Tiefseeinsatz eine entscheidende Rolle. Um tiefseetaugliche Geräte hinsichtlich ihrer Tauchtiefe zu charakterisieren, werden drei verschiedene Druckangaben verwendet:

1. Nenndruck

Der Nenndruck ergibt sich aus der Tauchtiefe, bis zu der der Hersteller die einwandfreie technische Funktion seines Gerätes garantiert. Im Fall des AUV liegt diese Tauchtiefe bei 3000 m. Der Nenndruck liegt daher bei 300 bar.

2. Prüfdruck

Der Prüfdruck gibt den Druck an, bei dem das Gerät zwar noch funktioniert, sich jedoch bereits außerhalb der Herstellerspezifikation befindet. Alle Komponenten des AUV sind testweise mit einem Prüfdruck von 10% über Nenndruck belastet worden [10]. Dies entspricht einem Prüfdruck von 330 bar oder einer Tauchtiefe von 3300 m.

3. Zerstörungsdruck

Der Zerstörungsdruck kennzeichnet den Moment des physikalischen Versagens des Gerätes. Durch zu hohen Druck kommt es zu plastischen Verformungen im Material oder schlimmstenfalls zu Rissen oder Brüchen.

Die Einsatzbedingungen des Wasserprobennehmers richten sich nach den Spezifikationen seiner Trägerplattform, des AUV. Die oben genannten Druckbedingungen müssen demnach auch durch den Wasserprobennehmer erfüllt werden

3.2 Druckkörper

Es ist häufig der Fall, dass Geräte der Tiefseetechnik über ein abgeschlossenes Volumen mit atmosphärischen Druckbedingungen und Trockenheit verfügen müssen. Der Grund hierfür ist, dass viele der verwendeten Komponenten für einen Einsatz an Land und Luft konzipiert wurden. Insbesondere elektrische Komponenten, wie beispielsweise Platinen mit ihren offen liegenden Kontaktstellen, würden bei dem direkten Kontakt mit Salzwasser schnell zerstört werden. Es bleibt daher nur die Möglichkeit, diese Komponenten in Druckkörpern gegen die äußeren Bedingungen der Tiefsee zu schützen.

Druckkörper zur Aufnahme technischer Komponenten können in zwei Gruppen eingeteilt werden:

1. Druckkompensierte Körper

Ein Druckkörper in druckkompensierter Ausführung verfügt in seinem Innern über eine Ölfüllung. Öl ist inkompressibel und zudem elektrisch nicht leitfähig. Elektrische Komponenten können daher ohne weitere Schutzmaßnahmen in der Ölfüllung betrieben werden. Auf äußeren Druck reagiert der Druckkörper mit einem gleichgroßen Innendruck, ohne dabei jedoch, aufgrund der Inkompressibilität der Ölfüllung, an Innenvolumen zu verlieren. Zwischen Außen und Innen herrscht kein Druckgefälle. Die Wandung kann entsprechend dünner ausgeführt werden, wodurch sich das Gewicht des Druckkörpers verringert. Gleichzeitig müssen Kabel- und Wellendurchführungen zwar die beiden Medien Salzwasser und Öl voneinander trennen, dabei jedoch keinen Druckunterschied aushalten. Sie können daher relativ einfach gestaltet werden.

Von Nachteil kann jedoch der Einsatz von Elektromotoren in druckkompensierten Behältern sein. Der schnell drehende Anker eines Elektromotors wirkt innerhalb der Ölfüllung wie ein „Mixer“, wodurch es zu Leistungseinbußen kommt („Planschverluste“).

2. Nicht-Druckkompensierte Körper

Nicht-druckkompensierte Druckkörper sind die „klassische“ Variante des Druckkörpers. Hierbei wird durch einen entsprechend stark ausgelegten Druckkörper das Innenvolumen gegen die äußere Umwelt hermetisch abgeschlossen. Die Bedingungen im Innern des Druckkörpers bleiben somit konstant. Aufgrund des Druckgefälles muss die Wandung dieser Druckkörper entsprechend stark dimensioniert werden. Durchführungen durch die Druckkörperwand sind relativ komplex, da diese eine Schwachstelle im Druckkörper darstellen und durch den Druckunterschied stark belastet werden.

Nicht druckkompensierte Druckkörper sind jedoch sehr viel leichter zu handhaben, als Ölgefüllte. Zudem gibt es beim Einsatz von Elektromotoren keine Leistungsverluste und die Komponenten arbeiten innerhalb des Druckkörpers unter Bedingungen, für die sie ursprünglich ausgelegt wurden.

Die Festigkeit und Widerstandsfähigkeit eines Druckkörpers wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Den größten Einfluss besitzen allerdings seine äußere Form und der verwendete Werkstoff.

Die idealste Form für einen Druckkörper, der durch äußeren Überdruck belastet wird, ist dessen Ausführung in Kugelgestalt. Hierzu finden sich ausreichend Beispiele in der Literatur [11], sowie in der praktischen Anwendung (s. Abbildung 3.2-1). Nachteil der kugeligen Gestalt, ist, abgesehen von der Fertigung, die Schwierigkeit den Innenraum effektiv auszunutzen. Große Druckkörper, wie beispielsweise bei militärischen U-Booten, besitzen daher eine zylindrische Gestalt mit halbkugeligen, domförmigen Abschlüssen. Konstruktiv nach Möglichkeit zu vermeiden sind scharfe Kanten und Ecken, da es an diesen Stellen durch mehrachsige Spannungszustände zu Belastungsspitzen kommen kann, die ein Versagen des Druckkörpers nach sich ziehen können.



Abbildung 3.2-1: Bathyskaph Trieste mit kugeligem Druckkörper an der Unterseite

Im Gegensatz zu Druckkörpern, die unter Innendruck belastet werden, ist der Begriff des „Versagens“ bei Druckkörpern unter äußerem Überdruck schwieriger zu definieren. Eine gewisse Verformung des Druckkörpers kann unter Last durchaus toleriert werden. In beiden Fällen ist allerdings die Belastungsgrenze des Materials erreicht, wenn es zu plastischer Verformung des Materials kommt. Ein Druckkörper unter innerem Überdruck zeigt dabei stets das gleiche Verhalten: Aufgrund der Zugkräfte in der Wandung kommt es zu einem Aufblähen des Behälters und zu einem anschließenden Reißen entlang der Längsachse. Mit Hilfe der Kesselformel kann dieser Fall relativ einfach beschrieben werden.

In der Wandung eines Druckkörpers unter äußerem Überdruck kommt es hingegen nicht nur zu Zug- sondern auch zu Schubspannungen, die gemeinsam in Form von Vergleichsspannungen behandelt werden müssen. Je nach Geometrie zeigt der Druckkörper zudem unterschiedliche Versagensphänomene. Nach Literaturangaben [13] muss bei zylindrischen, unversteiften Druckkörpern zwischen folgenden Phänomenen unterschieden werden:

1. **Symmetrisches Beulen** (auch „Ringbeulen“ oder „mehrwelliges Beulen“)

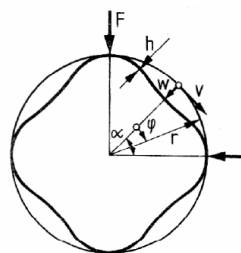


Abbildung 3.2-2: Symmetrisches Beulen, Quelle: [13]

2. Asymmetrisches Beulen (auch „Wellenbeulen“ oder „einwelliges Beulen“)

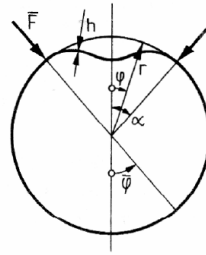


Abbildung 3.2-3: Asymmetrisches Beulen, Quelle: [13]

Um die Gefahr eines derartigen Versagens auszuschließen, ist die Druckkörperwandung entsprechend zu dimensionieren. Eine Möglichkeit der rechnerischen Auslegung von Druckkörpern bieten die Vorschriften des Germanischen Lloyds [12].

Hiernach sind für einen unversteiften, zylindrischen Druckkörper die folgenden relevanten Nachweise zu führen:

1. Sicherheit gegen Spannungsüberschreitung in der zylindrischen Schale
2. Sicherheit gegen asymmetrisches Beulen
3. Sicherheit gegen symmetrisches Beulen

3.3 Gewicht

Wie in Kapitel 1.4 beschrieben, verfügt das AUV im einsatzbereiten Zustand über einen leicht positiven Auftrieb, um auch bei Ausfall des Antriebs an die Oberfläche zurückzukehren. Während der Tauchfahrt arbeitet das AUV mit Hilfe seines Antriebs gegen diese Auftriebskraft und taucht dynamisch. Das AUV ist an sich schwerer als Wasser. Der Auftrieb muss daher durch spezielle Auftriebskörper erzeugt werden, die im Innern des AUV befestigt sind. Abbildung 3.3-1 zeigt dazu die CAD Darstellung eines typgleichen AUV.

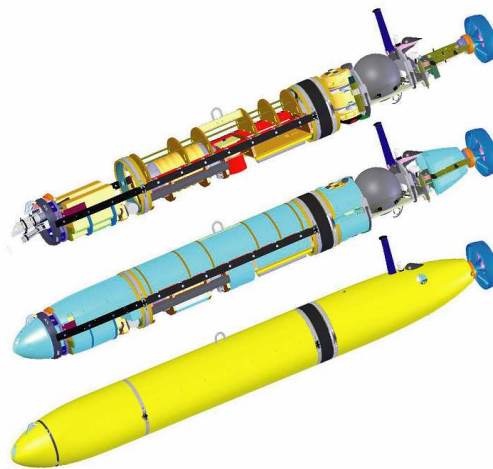


Abbildung 3.3-1: AUV (hier „Mapping Vehicle“) des MBARI, Quelle: MBARI

Die obere Darstellung zeigt die im AUV eingebauten Geräte (inkl. Antrieb, wiss. Nutzlast, etc.). In der mittleren Darstellung sind die Auftriebskörper enthalten und türkis eingefärbt. Es ist zu erkennen, dass so gut wie jeder mögliche Freiraum ausgenutzt ist und sich die Form der Auftriebskörper an die Kontur der Geräte und des AUV anlegt. Grund hierfür ist die Notwendigkeit so viel Auftriebsvolumen wie möglich unterzubringen, da die verwendeten Auftriebskörper nach Herstellerangaben [8] mit einer Dichte von $0,5 - 0,75 \text{ kg/m}^3$ nur relativ geringe Auftriebswerte in Wasser erreichen. Die vergleichsweise hohe Dichte ist eine Folge der Inkompressibilität, über die die Auftriebskörper verfügen müssen, um auch in großen Tiefen über einen konstanten Auftrieb zu verfügen. Aufgeschäumte Kunststoffe wie Styropor sind aufgrund des hohen Drucks nicht einsetzbar. Sie gewinnen ihren Auftrieb aus eingelagerten Luftblasen und verhalten sich daher kompressibel. Die Auftriebskörper bestehen stattdessen aus in duroplastischem Kunstharz gebundenen Mikroglasballons (Abbildung 3.3-2).

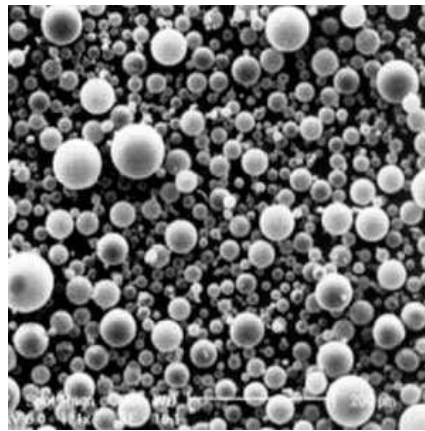


Abbildung 3.3-2: Mikroglasballons in tiefseetauglichem Auftriebskörper, Quelle: BMTI

Eine Austarierung des AUV ist demnach nur möglich, wenn das eingebaute Gerät leicht und klein genug ist, um sein Gewicht durch Auftriebskörper auszugleichen. Konstruktiv zwingen diese Eigenschaften also zu einem platzsparenden und kompakten Leichtbau.

3.4 Korrosion und Korrosionsschutz

Korrosion kennzeichnet die zumeist ungewollte Veränderung einer Werkstoffoberfläche aufgrund eines chemischen oder elektrochemischen Angriffs. Insbesondere in einem marinen Umfeld sind technische Gegenstände einer starken Korrosionsgefahr ausgesetzt. Hauptgrund hierfür sind die im Meerwasser gelösten Salze, wobei insbesondere die Chloridionen des gelösten Kochsalzes für die Korrosivität verantwortlich sind. Aufgrund dieser Zusammensetzung ist Meerwasser außerordentlich aggressiv und kann auch üblicherweise als korrosionsresistent geltende Stähle angreifen. Auch Aluminium, das aufgrund seiner Oxidschicht als gemeinhin als korrosionsbeständig gilt, wird von Meerwasser bei längerem Kontakt angegriffen und leidet, nach Literaturangaben [4] an Lochfraßkorrosion (engl. Pitting corrosion). Wie vom Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. veröffentlicht [5] nutzen daher der Germanische Lloyd, sowie die DIN 81249-1 den Ausdruck „seewassergeeignet“. Dieser Begriff impliziert keine dauerhafte Beständigkeit des Werkstoffs, sondern dass „das werkstoffgerecht hergestellte Bauteil beim Einsatz im Meerwasser keinen Korrosionsschaden

innerhalb der geplanten Nutzungsdauer erwarten lässt.“ Die Eigenschaft „seewassergeeignet“ schließt damit das Auftreten von Korrosion nicht aus.

Jedes Metall besitzt ein charakteristisches elektrochemisches Potential. Zwischen zwei verschiedenen Metallen besteht daher ein Potentialunterschied, der bei direktem Kontakt durch einen Stromfluss ausgeglichen werden kann. Sind beide Metalle von einem korrosiven Medium umgeben, kommt es zur Bildung eines Lokalelements, in dem das unedlere der beiden Metalle als Anode fungiert und durch in Lösung übergehende Ionen beständig an Material verliert. Konstruktiv lässt sich Korrosion daher eindämmen, indem der Einsatz unterschiedlicher Metalle, oder zumindest deren direkter Kontakt, so weit wie möglich vermieden wird.

Werden Metalle eingesetzt, so müssen diese gegen die Wirkung des Seewassers geschützt werden. Es gibt hierzu mehrere Möglichkeiten, wie z.B. dem Schutz durch Lacke oder dem Anschluss einer Opferanode. Ein Schutz durch aufzubringende Lacke kann jedoch unzuverlässig sein. Opferanoden würden ein zusätzliches Gewicht für das AUV bedeuten.

Eine zuverlässige Methode Werkstücke vor Korrosion zu schützen, besteht in der sog. Passivierung ihrer Oberflächen.

Die Passivierung besteht in der Ausbildung einer reaktionsträgen Deckschicht, beispielsweise einer Oxidschicht, auf der Oberfläche des Materials. Aluminium ist hierfür das bekannteste Beispiel. Wie in den in [4] veröffentlichten Untersuchungen kann jedoch die Anwesenheit von Halogenidionen, zu denen auch die Chloridionen zählen, zu einem stellenweisen Versagen dieser Schutzschicht führen. Die Oxidionen werden dabei aus der Schutzschicht verdrängt. Verbesserter Schutz wird daher durch eine größere Deckschichtdicke, oder durch ein schnelles „Ausheilen“ der verletzten Stelle, der sog. Repassivierung, erreicht. Ein Material, das diesbezüglich untersucht wurde und das zusätzlich aufgrund seiner geringen Dichte als Konstruktionswerkstoff interessant ist, ist Titan. Wie in der Literatur beschrieben [6], konkurrieren chemische Reaktionen, sobald die Schutzschicht eines Materials verletzt wird. Das Material wird dabei entweder immer weiter zersetzt, oder es gelingt durch Repassivierung schnell genug, erneut eine Deckschicht aufzubauen. Nach Ergebnissen der Forschung ist bei Titan eine Repassivierung im Millisekundenbereich abgeschlossen. Eine weitere Korrosion wird dadurch vorerst verhindert. Titan weist daher ein hervorragendes Korrosionsverhalten gegenüber Meerwasser auf.

Neben Metallen wie Aluminium und Titan, wird ein Großteil der Bauteile im Maschinenbau aus rostfreien Edelstählen gefertigt. Auch diese rostfreien Stähle weisen jedoch höchst unterschiedliche Korrosionsverhalten gegenüber Meerwasser auf. Ein speziell für den Einsatz in chloridhaltigen Medien entwickelter Stahl ist der V4A Edelstahl 1.4571. Ein Chrom-Nickel Stahl mit Zugaben von Molybdän und Titan (X6CrNiMoTi17-12-2).

Grundlage aller rostfreien Stähle ist das Element Chrom, das diesen Stählen zu mindestens 12% zugegeben wird. Durch den hohen Chromgehalt bildet sich auf der Oberfläche des Stahls eine Chromoxidschicht, die die Oberfläche passiviert. Jedoch kann es nach Forschungsergebnissen [7] aufgrund des Kohlenstoffgehalts des Stahls entlang der Korngrenzen des Metalls zur Bildung von Chromkarbiden und damit zu einer Chromverarmung in dieser Zone kommen. Die Folge ist interkristalline Korrosion und die Schädigung des Werkstücks. Um dieser Chromverarmung entgegenzuwirken müssen dem Stahl Elemente beigegeben werden, die eine höhere Neigung zur Bildung von Karbiden besitzen als Chrom. Die Elemente Titan und Niob erfüllen diese Forderung. Nach Zugabe eines dieser Elemente (hier Titan) verbleibt Chrom in der Matrix.

Die Beimengung von Molybdän sorgt für eine hohe Resistenz des Stahls speziell in chloridhaltigen Medien, da Molybdän der Durchdringung der schützenden Oxidschicht durch Chloridionen entgegenwirkt.

Im Gegensatz zu Metallen sind gängige Kunststoffsorten wie PE oder PVC generell unkritisch. Der Vorgang der Korrosion in Meerwasser ist immer mit einem Elektronenübergang verbunden. Hierbei werden Ionen gebildet, die anschließend im Meerwasser in Lösung gehen. Um Ionen bilden zu können, müssen sich Ladungsträger im Material frei bewegen können. In einem metallischen Gitter ist dies möglich. Kunststoffe hingegen bestehen aus Polymerketten die durch Elektronenpaarbindung zusammengehalten werden. Eine Ionisierung ist hier nicht möglich. Der Einsatz von Kunststoffen ist daher dem Einsatz von Metallen generell vorzuziehen.

Zusammenfassend ist aufgrund von Korrosion die Verwendung der nachfolgend aufgeführten Werkstoffe möglich:

- Kunststoffe
- Titan
- V4A-Stähle (speziell 1.4571)

3.5 Materialauswahl aufgrund von Reinheit

Wie in Kapitel 2 beschrieben, handelt es sich im vorliegenden Fall um einen Wasserprobennehmer, der hohen Reinheitsanforderungen genügen muss. Ausschlaggebend für die Erfüllung dieser Forderungen sind neben einer angepassten Konstruktionsweise die verwendeten Werkstoffe. Bereits vor der eigentlichen Konstruktionsarbeit wurde die Auswahl verwendbarer Werkstoffe durch dieses Kriterium erheblich eingeschränkt. Zudem sollte aufgrund der Gewichtsbeschränkungen und aus Korrosionsgründen hauptsächlich Kunststoff zum Einsatz kommen.

Die meisten Kunststoffe sind gegen Meerwasser beständig. Korrosion wie bei Metallen ist nicht möglich. Die ursprüngliche Zusammensetzung einer Wasserprobe könnte jedoch durch aus dem Kunststoff austretende Stoffe gestört werden. Hierzu zählen in erster Linie Weichmacher oder andere Additive. Jedoch kann auch der hohe Wasserdruck zur Freisetzung bestimmter Stoffe beitragen. PVC beispielsweise beginnt unter Druck, Salzsäure abzugeben. Für einen direkten Kontakt mit der Probe ist es somit untauglich. Zudem besitzen viele Kunststoffe auch nach einer Bearbeitung eine „raue“ Oberfläche. Die mikroskopischen Vertiefungen machen eine Reinigung des Bauteils schwierig und können die Ansammlung von Bakterien („Biofilmbildung“) oder Probenrückständen begünstigen. Die hohen Anforderungen machen die Verwendung moderner Hochleistungskunststoffe erforderlich. Vorreiter und einer der ältesten Hochleistungskunststoffe ist Polytetrafluorethylen (PTFE), das heutzutage eher unter seinem Handelsnamen Teflon bekannt ist. Seit der Entwicklung von PTFE sind mehrere „teflonartige“ Kunststoffe entwickelt worden, denen alle eine hohe chemische Beständigkeit gemein ist. Bei der Umsetzung hoher Reinheitsanforderungen werden diese Kunststoffe daher als Konstruktionswerkstoffe interessant.

Aufgrund der Vielzahl verschiedener Kunststoffe soll hier lediglich auf drei teflonartige Kunststoffe eingegangen werden. Es sind dies:

- PTFE („Teflon“)
- PFA
- PVDF

Die Monomere der Kunststoffe sind zueinander sehr ähnlich (Abbildung 3.5-1). Allen Kunststoffen gemein sind die angelagerten Fluoratome.

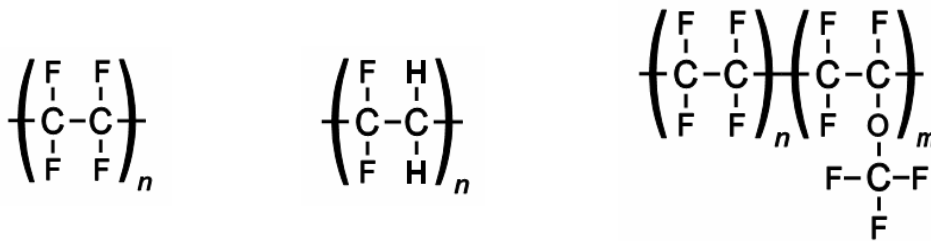


Abbildung 3.5-1: Monomer von PTFE (links), PVDF (Mitte) und PFA (rechts)

Die hohe Elektronegativität der angelagerten Fluoratome verleiht den Kunststoffen eine außerordentliche chemische Beständigkeit. Gegenüber Meerwasser verhalten sie sich vollständig inert. Keiner der Kunststoffe würde daher die Reinheitsanforderungen verletzen. Neben der chemischen Beständigkeit verfügen die Kunststoffe über weitere spezielle Eigenschaften, die ihren Einsatz entweder einschränken oder erweitern. So zeichnet sich beispielsweise PTFE durch einen niedrigen Reibungskoeffizienten und das Fehlen jeglicher Haftneigung aus. Gleichzeitig ist es jedoch auch weder schweiß- noch klebbar. Ein Nachteil den PFA und PFDV nicht besitzen.

Um einen geeigneten Kunststoff für den großflächigen Kontakt mit der Probe zu bestimmen, kann auf Erfahrungen eines anderen Fachgebietes mit ähnlich hohen Reinheitsanforderungen zurückgegriffen werden: Der Medizintechnik. Im Hinblick auf diese Arbeit soll hierbei speziell auf den Kunststoff PVDF eingegangen werden.

Wie in der Literatur beschrieben [3] zeichnet sich der Kunststoff Polyvinylidenfluorid (PVDF) durch physiologische Unbedenklichkeit, außerordentlich geringes Auswaschverhalten und hohe Oberflächengüte aus. Tabelle 3.5.1 zeigt das Auswaschverhalten bestimmter chemischer Elemente von PVDF im Vergleich zu Edelstahl 316 L (1.4404).

Tab. 2 Leach-out-Vergleich von Setz u.a., 1996		
Testbedingungen: ASTM D 4327		
▪ 7 Tage bei konstanter Temperatur		
Element	PVDF [ppb]	Edelstahl 316 L [ppb]
_ Pb, Ag, Hg, Cu, Co	0,66	0,64
_ Ca, Mg	3,94	122,83
_ Fe, Na, Cr, Mn, Ni, Zn, Mo	2,64	89,19
Total	7,24	212,66

Tabelle 3.5.1: Auswaschverhalten von PVDF, Quelle: [3]

Wie zu erkennen ist, ist die Menge der ausgewaschenen Stoffe bei PVDF um ein vielfaches geringer als bei Edelstahl. Auch sehr empfindliche Untersuchungen, wie der Nachweis von Spurenelementen würden somit nicht beeinträchtigt werden. Die Oberfläche erreicht Rauigkeitswerte von $R_a \leq 0,20 \mu\text{m}$ und ist somit hervorragend zu reinigen.

Neben der Erfüllung der Reinheitsanforderungen bietet PVDF den Vorteil schweißbar zu sein. Da es nur bedingt klebfähig ist, bietet sich somit eine Alternative, um Bauteile gasdicht fügen zu können. Es kommt daher auch beim Aufbau von Rohrleitungssystemen zum Einsatz.

Neben der Verwendung von Kunststoffen, kann die Verwendung von Metallen stellenweise unvermeidlich sein. Trotz der Ergebnisse des Auswaschtests (s. Tabelle 3.5.1), bewegt sich die Verunreinigung einer Wasserprobe durch den Kontakt mit Edelstählen in einem tolerierbaren Maß, wenn hochlegierte V4A Stähle in kleinem Umfang zum Einsatz kommen. Der Einsatz hochlegierter Stähle ist zudem, wie in Kapitel 3.4 beschrieben, aufgrund der Aggressivität des Salzwassers zwingend erforderlich, um Korrosion zu vermeiden.

Zusammenfassend ist aufgrund der Reinheitsanforderungen die Verwendung folgender Werkstoffe möglich:

- PTFE
- PFA
- PVDF
- V4A-Stähle

4 Konzeption

Der eigentlichen Konstruktionsphase vorgelagert ist die Konzeptionsphase. Auf Basis des Anforderungsprofils, sowie einer ersten, noch groben Übersicht über verfügbare Bauteile, werden die Funktionsprinzipien festgelegt und ein konzeptioneller Entwurf des Wasserprobennehmers erarbeitet. Im Zentrum der Entwicklung muss dabei die Hauptaufgabe des Systems stehen. In diesem Fall also die Gewinnung von Probenmaterial. Es war daher zweckmäßig, das System „um die Probe herum“ zu entwickeln.

Stellenweise wurden für einige Anforderungen mehrere Lösungskonzepte entworfen. Um aus diesen Lösungskonzepten das voraussichtlich aussichtsreichste auswählen zu können, fand an diesen Stellen eine Bewertung statt.

Bei den Bewertungen muss zwischen der **Anforderungsskala** und der **Gewichtungsskala** unterschieden werden. Die Anforderungsskala gibt an, wie vollständig das Konzept die jeweilige Anforderung erfüllt. Die Punkteskala reicht dabei von **0 bis 5** Punkte. Eine Punktzahl von 5 Punkten entspricht der optimalen Lösung.

Da jedoch nicht alle Anforderungen die gleiche Bedeutung für die Funktion des Wasserprobennehmers besitzen, wurden alle Anforderungen mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Die Gewichtungsskala reicht von **1 bis 3** und kennzeichnen die Priorität der jeweiligen Anforderung (1 = niedrig, 3 = hoch).

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Bewertungen wird abschließend ein Gesamtkonzept des Wasserprobennehmers entworfen.

4.1 Einbauraum im AUV

Vor der konzeptionellen Auslegung des Wasserprobennehmers sind zunächst die Randbedingungen und Größenbeschränkungen aufgrund des Einbaus in das AUV zu definieren.

Wie bereits in Kapitel 1.4 beschrieben, ist der grundsätzliche Aufbau des AUV in verschiedene Segmente gegliedert. Für den Einbau von Nutzlasten steht das mittlere Segment als Nutzlastsegment zur Verfügung.

In diesem Bereich des AUV besitzt der Rumpf eine zylindrische Form mit einem Außendurchmesser von 21“, was ca. 53 cm entspricht. Entlang der horizontalen Teilungsebene sind vier Querstreben angebracht, die der Befestigung von Nutzlasten dienen können (Abbildung 4.1-1).



Abbildung 4.1-1: Nutzlastsegment (untere Hälfte)

Der Wasserprobennehmer wird in diesem mittleren Segment des AUV untergebracht. Die Größenbeschränkungen ergeben sich daher aus den Abmessungen des Nutzlastsegmentes, der Position und Größe bereits eingebauter Geräte, sowie den Erfordernissen der Schwerpunktlage, um die Stabilität des AUV nicht zu gefährden.

Es sind daher folgende Randbedingungen vorgegeben:

- **Hauptabmessungen des Wasserprobennehmers:**

Diese werden durch die Abmessungen des Nutzlastsegments vorgegeben. Zudem sind bereits weitere Geräte im Nutzlastsegment eingebaut, so dass Länge und Position des Wasserprobennehmers festgelegt sind. Von der Gesamtlänge des Nutzlastsegments von ca. 1015 mm verbleiben daher noch ca. 650 mm für den Einbau des Wasserprobennehmers (Abbildung 4.1-2).

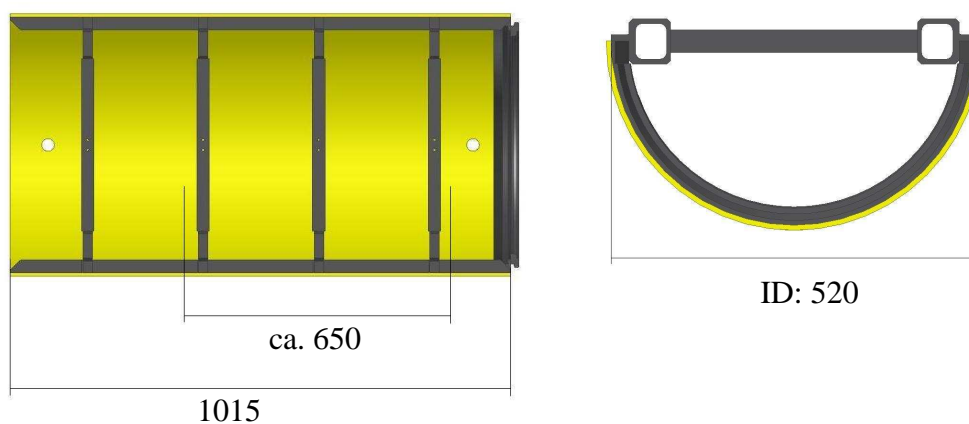


Abbildung 4.1-2: Hauptabmessungen des Wasserprobennehmers

- **Position des Wasserprobennehmers:**

Die Materialien zum Bau des Wasserprobennehmers weisen eine höhere Dichte als Wasser auf. Der Wasserprobennehmer wird somit voraussichtlich ebenfalls schwerer als Wasser sein. Um daher die Stabilität des AUV in seiner Rollachse nicht zu gefährden, muss der Schwerpunkt des Wasserprobennehmers unterhalb der horizontalen Teilungsebene liegen. Abbildung 4.1-3 stellt hierzu einen Querschnitt durch das Nutzlastsegment dar.

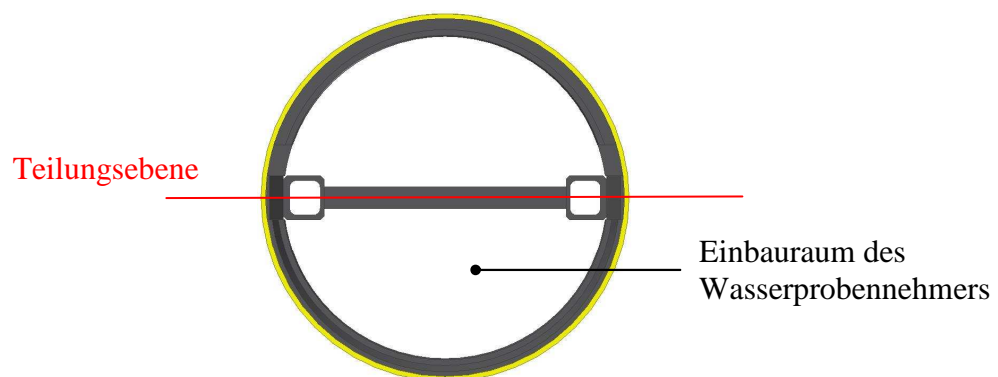


Abbildung 4.1-3: Querschnitt durch Nutzlastsegment

- **Erreichbarkeit des Gerätes:**

Aufgrund des Einbaus des Wasserprobennehmers unterhalb der horizontalen Teilungsebene des AUV ist der Wasserprobennehmer nur von oben her zugänglich (Abbildung 4.1-4). Die Konstruktion muss dementsprechende Freiräume vorsehen.

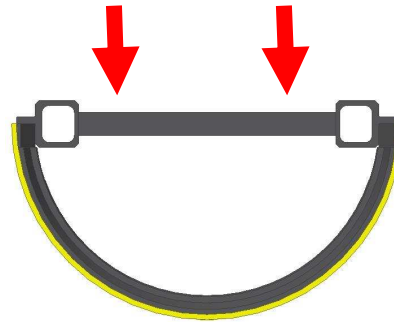


Abbildung 4.1-4: Erreichbarkeit des Wasserprobennehmers

Die weitere Auslegung des Wasserprobennehmers richtet sich nach den beschriebenen Randbedingungen.

4.2 Art der Probenbehälter und Probennahme

Entnahme und Transport der Probe müssen in einem Behälter erfolgen, der ausreichend Volumen für die benötigte Probenmenge, die erforderliche Reinheit und den zuverlässigen Schutz der Probe bietet. Da die Proben zudem für Laboruntersuchungen zur Verfügung stehen müssen, ist auch die Handhabung und die Reinigung der Behälter von Bedeutung. Entscheidend sind hierbei das Behältnis an sich, dessen Verschluss, sowie die Entnahmetechnik. Diese Aspekte sind konstruktiv eng miteinander verknüpft und können nicht isoliert voneinander betrachtet werden.

Während der Auslegung des Probenbehälters und der Probennahme wurden vier verschiedene Konzepte bewertet. Das Funktionsprinzip dieser Konzepte wurde bereits in anderen Projekten umgesetzt. Die Abbildungen sollen der Verdeutlichung des jeweiligen Prinzips dienen.

- **A: Probenbeutel, befüllt durch Pumpe** (Abbildung 4.2-1)

Konzept A sieht vor, die Probennahme durch flexible Kunststoffbeutel zu realisieren. Diese wären zu Beginn des Tauchgangs leer. Zu ihrer Befüllung wäre eine Pumpe nötig. Abbildung 4.2-1 zeigt ein solches Probennahmesystem an Bord des französischen ROV Victor 6000.



Abbildung 4.2-1: Probennahmesystem an Bord von Victor 6000, Quelle: Ifremer

- **B: Starrer Behälter, befüllt durch Pumpe** (Abbildung 4.2-2)

Konzept B beinhaltet eine Anzahl formstabiler Behälter, die die Proben aufnehmen. Zur Befüllung dieser Behälter wäre wiederum eine Pumpe nötig. Beispielhaft für dieses Konzept ist auf Abbildung 4.2-2 der Probennehmer PEPITO zu sehen.

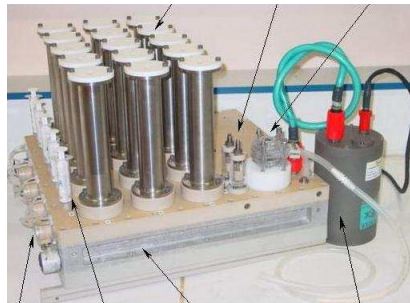


Abbildung 4.2-2: Probennahmesystem PEPITO, Quelle: Ifremer

- **C: Zylinder, Kolben durch Federkraft bewegt** (Abbildung 4.2-3)

In Konzept C erfolgt die Probennahme durch einen zylindrischen Behälter mit einem durch Federkraft bewegten Kolben, dessen Bewegung die Probe einströmen lässt. Abbildung 4.2-3 zeigt den Wasserprobennehmer GULPER des MBARI.



Abbildung 4.2-3: Probennahmesystem GULPER, Quelle: MBARI

- **D: Durchströmte Röhre (Abbildung 4.2-4)**

Konzept D sieht die Probennahme mit Hilfe einer durchströmten Röhre vor. Die Röhre hat an beiden Enden einen Verschluss. Ein ähnliches Prinzip liegt der Arbeitsweise der sog. Niskin-Flaschen auf Abbildung 4.2-4 zu Grunde.

Da der Wasserprobennehmer in einem sich ständig bewegenden AUV eingesetzt wird, kann zur Durchströmung der Röhren die Eigenbewegung des Fahrzeugs ausgenutzt werden. Eine Pumpe wird somit unnötig.



Abbildung 4.2-4: Niskin-Flasche, Quelle: KC Denmark

Jedes der vier genannten Konzepte wurde nach den folgenden Anforderungen bewertet:

- **Sicherheit der Probe:** Gewichtungsfaktor: 3
Die Unversehrtheit der Probe ist insbesondere bei unzureichendem Verschluss oder bei dem Ausbau der Probenbehälter nach einem Tauchgang in Gefahr. Der Behälter und der Verschluss müssen daher die Probe, auch bei Ausbau aus dem AUV, sicher abschließen.
- **Komplexität der Befüllung:** Gewichtungsfaktor: 2
Wird für die Befüllung des Behälters beispielsweise eine Pumpe o.ä. benötigt, so erhöht dies die Gefahr des technischen Versagens. Nach Möglichkeit ist daher ein einfaches Befüllungsprinzip ohne zusätzliche bewegliche Bauteile anzustreben.
- **Komplexität des Verschlusses:** Gewichtungsfaktor: 2
Wie im Fall der Befüllung, erhöht ein komplex aufgebauter Verschluss die Anzahl möglicher Fehlerquellen. Zu empfindliche Verschlüsse könnten zudem von größeren Schwebekörpern, die in den Wasserprobennehmer gelangen könnten, blockiert werden. Um derartige Verschlüsse zu schützen, wären demnach Filter in der Zuleitung nötig.
- **Verfügbarkeit des Materials:** Gewichtungsfaktor: 3
Die Verfügbarkeit von Materialien und Halbzeugen, die den Reinheitsanforderungen entsprechen, ist ein wesentlicher Punkt bei der konzeptionellen Auslegung, da die Auswahl verwendbarer Materialien bereits stark eingeschränkt ist (s. Kapitel 3.5).

- **Handhabung:** Gewichtungsfaktor: 2
Um die Laborarbeit, die Entnahme der Behälter aus dem AUV, aber auch die Vorbereitung des Probennehmers für einen Tauchgang zu erleichtern, sollte die Handhabung der Behälter einfach und verständlich sein. Eine simple Handhabung erhöht zudem die Sicherheit der Probe, da Bedienungsfehler vermieden werden können.
- **Platzbedarf:** Gewichtungsfaktor: 3
Der Platzbedarf der verschiedenen Konzepte ist entscheidend für die Anzahl der Proben, die zurückgeführt werden können. Um eine möglichst genaue Untersuchung mit möglichst vielen Proben zu ermöglichen, ist, insbesondere in einem AUV, eine kompakte Bauweise aller Komponenten anzustreben.
- **Reinigung:** Gewichtungsfaktor: 2
Damit Rückstände früherer Proben nicht das Messergebnis verfälschen, ist eine Reinigung der Probenbehälter unerlässlich. Eine erfolgreiche Reinigung kann beispielsweise durch Hinterschnitte, Toträume oder einen unzureichenden Zugang zum Behälterinneren erschwert werden.

Die Ergebnisse der Bewertung sind in Tabelle 4.2.1 dargestellt.

Anforderung	Gew.- Faktor GF	Konzept A: Beutel + Pumpe		Konzept B: Behälter + Pumpe		Konzept C: Zylinder + Feder		Konzept D: durchstr. Röhre	
		ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF
Sicherheit der Probe	3	3	9	5	15	5	15	5	15
Komplexität der Befüllung	2	3	6	2	4	4	8	5	10
Komplexität des Verschlusses	2	3	6	3	6	3	6	4	8
Verfügbarkeit des Materials	3	3	9	4	12	4	12	4	12
Handhabung	2	2	4	5	10	5	10	5	10
Platzbedarf	3	4	12	3	9	3	9	4	12
Reinigung	2	2	4	5	10	5	10	5	10
Erreichbar:	85	Summe: 50		Summe: 66		Summe: 70		Summe: 77	

Tabelle 4.2.1: Bewertungstabelle Probenbehälter und Probennahme

Bei der Bewertung der **Sicherheit der Probe** fällt bei Konzept A vor allem die empfindliche Hülle des Probenbehälters (Beutel) ins Gewicht. Scharfe Gegenstände könnten die Hülle verletzen und die Probe unbrauchbar machen. Alle anderen Konzepte beinhalten einen festen Probenbehälter, der insbesondere während der Laborarbeit (an Bord eines Forschungsschiffes!) eine wesentlich höhere Sicherheit gewährleistet.

Die **Komplexität der Befüllung** wird insbesondere durch die Verwendung einer Pumpe erheblich gesteigert. Aufgrund dessen erhalten die Konzepte A und B an dieser Stelle Abzüge. Im Fall von Konzept B ist zusätzlich der starre Probenbehälter von Bedeutung. Da in dem Behälter bereits ein Volumen eingeschlossen ist, muss dieser Inhalt während des Befüllens entweichen können. Dieses Problem stellt sich im Fall der Beutel von Konzept A nicht. Die Konzepte C und D kommen ohne Pumpe aus. Jedoch verfügt auch der Zylinder aus Konzept C über bewegliche Bauteile, die einzig dem Befüllen dienen. Die durchströmte Röhre aus Konzept D benötigt dagegen keine zusätzlichen beweglichen Teile.

Die **Komplexität des Verschlusses** wurde bei den Konzepten A, B und C als relativ hoch bewertet, da alle Konzepte eine Art Ventil benötigen. Diese Ventile bilden eine eventuelle Fehlerquelle. Der Verschluss von Konzept D ähnelt dem einer Niskin-Flasche und ist wesentlich einfacher aufgebaut. Die Röhre verfügt an beiden Enden über Konen, die der Aufnahme kegelförmiger Verschlusskörper dienen. Die Verschlusskörper werden durch eine Zugfeder im Inneren der Röhre zusammengezogen und nach dem Auslösen- in die Konen gepresst. Konzept D erhielt aufgrund dieser Einfachheit die meisten Punkte.

Grundlage für die Bewertung der **Verfügbarkeit der Materialien** bildete eine erste, noch relativ grobe Marktübersicht. Für jedes der vier Konzepte sind entsprechende Materialien verfügbar und teilweise sogar Halbzeuge zu beziehen. Eine Schwierigkeit bildeten hierbei die Beutel aus Konzept A. Kunststoffbeutel aus einem derartigen Material, noch dazu mit einem Schlauchanschluss, sind nur relativ schwer erhältlich.

Die **Handhabung** der jeweiligen Konzepte wird durch die Verwendung starrer Probenbehälter vereinfacht. Wie bei der Sicherheit der Probe wurden auch hier die Beutel (Konzept A) mit der geringsten Punktzahl bewertet.

Der **Platzbedarf** wurde bei keinem der Konzepte als optimal bewertet. Konzepte A und B benötigen jeweils eine Pumpe, die den Platzbedarf steigert. Der Platzbedarf des beweglichen Zylinders aus Konzept C ist, wie in Abbildung 4.2-3 zu erkennen, erheblich. Formstabile Probenbehälter sind in diesem Fall von Nachteil, da sie permanent ein gewisses Volumen einnehmen. Hier bietet sich die Verwendung von Beuteln wie in Konzept A an. Letztendlich wurden Konzept B und C an dieser Stelle am schlechtesten bewertet, da sie sowohl über einen starren Probenbehälter verfügen, als auch Raum für eine Pumpe / Kolbenstange einnehmen.

Zur Durchführung einer erfolgreichen **Reinigung** des Probenbehälters ist ein ausreichender Zugang zum Behälterinneren nötig. Von Vorteil ist zudem eine feste Behälterwandung. Die Beutel aus Konzept A sind daher als relativ schwierig zu reinigen bewertet worden. Im Gegensatz dazu bieten alle anderen Konzepte die Möglichkeit der einfachen Reinigung und vor allem der einfachen Spülung, um auch die Reste des Reinigungsmittels (meistens Säuren) restlos entfernen zu können.

Das Konzept der **durchströmten Röhre (D)** wurde als das aussichtsreichste bewertet. Während der Bewertung erhielt es 77 von 85 möglichen Punkten (91 %)

4.3 Entnahme mehrerer Proben

Um genaue Kenntnisse der Umweltbedingungen zu erlangen, ist eine Vielzahl von Proben nötig. Da jeder Tauchgang mit einem hohen Aufwand verbunden ist, muss es möglich sein, bei jedem Tauchgang möglichst viele Proben entnehmen zu können. Die zuvor als Probenbehälter ausgewählten Röhren müssen daher entsprechend angeordnet und in eine Mechanik integriert werden, die ihre Befüllung ermöglicht. Zur Realisierung dieser Anforderung wurden zwei Konzepte entwickelt und anschließend bewertet.

- **A: unbewegte Röhren an Verteiler** (Abbildung 4.3-1)

In Konzept A sollen die Röhren an einen Verteiler angeschlossen werden, wie er in ähnlicher Weise in der Hydraulik verwendet wird (Abbildung 4.3-1). Je nach dem welche Röhre befüllt werden sollte, müsste der Verteiler durch eine elektrische Steuerung entsprechend geschaltet werden. Die Röhren selbst müssten bei diesem Verfahren nicht bewegt werden. Ihre Anordnung wäre daher frei wählbar.



Abbildung 4.3-1: Hydraulikverteiler, Quelle: Moser Entgratungs AG

Der Verteiler bietet jedoch noch keinen dauerhaften Abschluss der Röhre. Bei entsprechender Schaltung verhindert er zwar die weitere Durchströmung, sobald jedoch die Röhren aus dem AUV entnommen und daher vom Verteiler getrennt werden sollen, benötigen die Röhren einen unabhängigen Verschluss. Die Verteilermechanik müsste daher mit einer Auslösemechanik für einen derartigen Verschluss gekoppelt werden.

- **B: bewegte Röhren in Trommelmagazin** (Abbildung 4.3-2)

Konzept B sah die Anordnung der Röhren in Form eines Trommelmagazins vor. Die Röhren wären auf einer drehbaren Trommel angeordnet. Wie bei einem Revolver, bei dem sich nur jeweils eine Kammer vor dem Lauf befindet, wäre auch hier nur jeweils eine Röhre vor der Zuleitung und würde durchströmt werden.

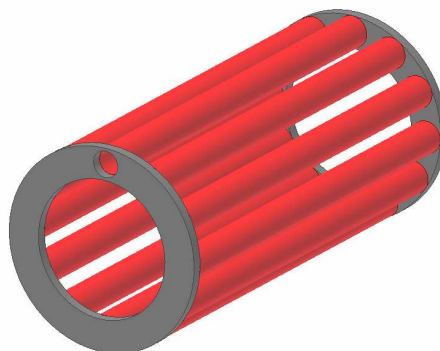


Abbildung 4.3-2: Trommelmagazin (B)

Stirnseitig abgeschlossen sind die Röhren durch Schleifplatten. Da die Schleifplatten, wie im Fall des Verteilers, nicht für einen dauerhaften Abschluss der Röhre sorgen können, müsste auch hier ein unabhängiger Verschluss der Röhren und eine Auslösemechanik integriert werden

Die beiden entwickelten Konzepte wurden nach folgenden Anforderungskriterien bewertet:

- **Zu erwartende Druckverluste:** Gewichtungsfaktor: 3
Die Druckverluste sind stark abhängig von dem verwendeten Funktionsprinzip. Bei einem Verteiler kann beispielsweise von hohen Strömungswiderständen und folglich von relativ großen Druckverlusten ausgegangen werden. Da, wie in Kapitel 4.2, Konzept D festgelegt, die Durchströmung der Röhren ohne Pumpe erfolgen soll, müssten Druckverluste beispielsweise durch Einlauftrichter ausgeglichen werden, die ihrerseits einen höheren Strömungswiderstand für das AUV bedeuten und damit dessen Aktionsradius verkleinern könnten.
- **Toträume:** Gewichtungsfaktor: 3
Toträume in den Zuleitungen und dem Verteilungsmechanismus können zu einer Kontamination der Probe führen. Das enthaltene Wasser kann in diesen Räumen zeitweilig festgehalten werden, um sich dann sehr plötzlich zu lösen und von der Strömung weggetragen zu werden. Hierdurch könnten an sich probenfremde Stoffe in die Probe gelangen und Messergebnisse verfälschen. Toträume sind daher möglichst zu vermeiden.
- **Komplexität der Kinematik:** Gewichtungsfaktor: 3
Da jeder Freiheitsgrad zur Steuerung eines Verteilungsmechanismus eine potentielle Fehlerquelle darstellt, ist die Kinematik so einfach wie möglich zu gestalten.
- **Abdichtung während des Befüllens:** Gewichtungsfaktor: 3
Zur Gewährleistung der Reinheit der Probe ist eine sichere Abdichtung während des Befüllvorgangs unerlässlich. Es ist zu beachten, dass das Innere des AUV geflutet ist. Dieses Wasser umgibt die Röhren und muss, aufgrund seines Kontakts zum AUV, als kontaminiert gelten. Als Probenmaterial kommt es nicht in Frage. Die Abdichtung der Röhren bezieht sich daher hauptsächlich auf die sichere Abdichtung gegenüber dem Inneren des AUV.
- **Benötigte Motorleistung:** Gewichtungsfaktor: 2
Da die Ressourcen des AUV begrenzt sind, ist eine Lösung mit geringer Motorleistung anzustreben. Zudem steigt mit der Motorleistung auch die Größe eines Motors, so dass auch der Druckkörper größer dimensioniert werden muss. Da ein Motor jedoch bei beiden Konzepten nur kurzzeitig arbeiten müsste, wurde der Gewichtungsfaktor reduziert.
- **Funktionssicherheit:** Gewichtungsfaktor: 3
Der Einsatz des Wasserprobennehmers in einem autarken Roboter, sowie die eingeschränkten Instandsetzungsmöglichkeiten an Bord eines Forschungsschiffes, ziehen hohe Anforderungen an die Funktionssicherheit des Gerätes nach sich. Möglich ist z.B. der Eintritt von größeren Fremdkörpern in die Zuleitungen. Hierdurch könnte die Bewegung des Verteilers (Konzept A), aber auch des Trommelmagazins (Konzept B) blockiert und der Wasserprobennehmer beschädigt werden.

Die Bewertung der Konzepte ergab folgende Ergebnisse:

Anforderung	Gew.- Faktor GF	Konzept A: Verteiler		Konzept B: Trommelmagazin	
		ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF
Druckverlust	3	2	6	4	12
Toträume	3	3	9	4	12
Komplexität der Kinematik	3	4	12	4	12
Abdichtung während des Befüllens	3	5	15	3	9
benötigte Motorleistung	2	5	10	4	8
Funktionssicherheit	3	4	12	4	12
Erreichbar:		Summe:		Summe:	
85		64		65	

Tabelle 4.3.1: Bewertungstabelle Mehrfachproben

Der zu erwartende **Druckverlust** wurde bei keinem der beiden Konzepte optimal bewertet. Jedoch wurden für einen Verteiler wie in Konzept A höhere Werte erwartet und dieser daher mit nur 2 Punkten bewertet.

Ebenfalls schlechter bewertet als Konzept B wurde der Verteiler aus Konzept A im Hinblick auf die zu erwartenden **Toträume**. Höchstwahrscheinlich lassen sich diese bei keinem der beiden Konzepte vollkommen ausschließen, doch ist der innere Aufbau eines Verteilers komplizierter und daher schwieriger an strömungstechnische Bedürfnisse anzupassen.

Die **Komplexität der Kinematik** kann bei beiden Konzepten als gleich angesehen werden, da das Trommelmagazin lediglich in einer Achse rotiert und auch bei Verteilern wie in Konzept A die Steuerung über lediglich eine drehbare Achse möglich ist.

Bei der **Abdichtung während des Befüllens** ist Konzept A als optimal zu bewerten. Da die Röhren nicht bewegt werden, können sie über Rohrleitungen fest mit dem Verteiler verbunden werden. Die Abdichtung während des Befüllens kann daher problemlos

sichergestellt werden. Die Abdichtung durch Schleifringe wie in Konzept B ist dagegen problematisch, da die Dichtung eine Relativbewegung ausgleichen muss.

Die **benötigte Motorleistung** zur Steuerung der Probennahme muss für Konzept A besser als für Konzept B bewertet werden. In einem Verteiler wäre lediglich ein Steuerventil zu betätigen. Selbst mit den nötigen Rotationsdichtungen ist eher unwahrscheinlich, dass diese Bewegung das gleiche Drehmoment benötigt, wie die Drehung eines kompletten Trommelmagazins. Der Motor könnte daher kleiner ausfallen. Jedoch kann bei Konzept B mit Hilfe von PTFE, dessen Verwendung aufgrund der Reinheitsbedingungen ohnehin nötig ist, die Reibung stark gesenkt werden.

Die **Funktionssicherheit** wurde für beide Konzepte gleich bewertet. Beide Konzepte verfügen über bewegliche Teile und eindringende Fremdkörper könnten zu einem Blockieren führen. Trotzdem wurden beide Konzepte mit vier Punkten relativ hoch bewertet, da die Sicherstellung der Funktionssicherheit durch konstruktive Maßnahmen möglich erschien.

Auf Basis der Bewertung wurde das Konzept des **Trommelmagazins (B)** gewählt. Während der Bewertung erhielt es 65 von 85 möglichen Punkten (76 %)

4.4 Verschluss der Probenröhren

Entsprechend dem zu Beginn der Auslegung gewählten Konzept der durchströmten Röhren, ähneln die Probenröhren den sog. Niskin-Flaschen. Niskin-Flaschen bestehen im Wesentlichen aus einem Kunststoffrohr, das an seinen Enden Aufnahmen für kegelförmige Verschlusskörper besitzt. Durch eine in dem Kunststoffrohr verlaufende Zugfeder werden die Verschlusskörper in ihre Aufnahmen gepresst und verschließen so die Röhre. Abbildung 4.4-1 zeigt eine Niskin-Flasche in geöffnetem Zustand. Die Verschlusskörper werden seitlich weggeklappt und in dieser Stellung durch einen Auslösemechanismus blockiert.

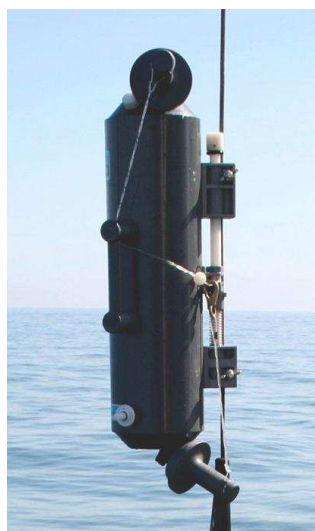


Abbildung 4.4-1: Niskin-Flasche in geöffnetem Zustand

Der konzeptionelle Aufbau der Probenröhren des Wasserprobenehmers sieht einen ähnlichen Verschlussmechanismus vor. Abbildung 4.4-2 zeigt das Verschlussprinzip in der Schnittansicht. An den beiden Enden der Röhre sind die konusförmig zulaufenden Aufnahmen für die Verschlusskörper zu erkennen.

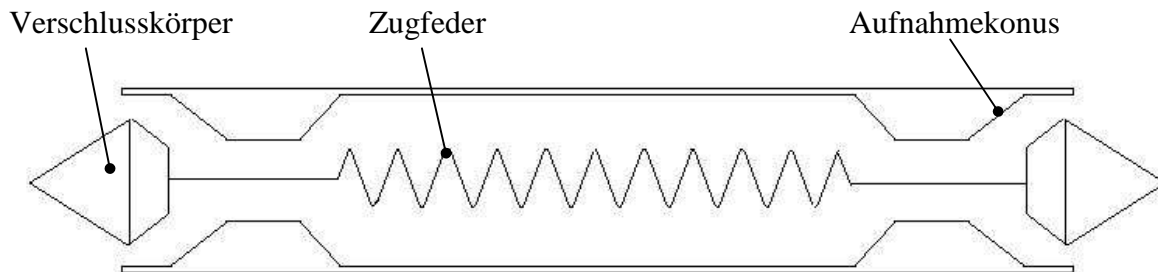


Abbildung 4.4-2: Verschluss der Probenröhren, schematisch

Hauptunterschied zwischen einer Niskin-Flasche und den Probenröhren ist die Position des Verschlusskörpers (im Weiteren „Verschlusskegel“ genannt), wenn der Behälter geöffnet ist. Im Fall der Niskin-Flasche wird der Verschlusskegel seitlich weggeklappt und behindert nicht die Befüllung (Abbildung 4.4-1). Da die Stirnseiten der Probenröhren jedoch durch Schleifplatten begrenzt werden, besteht hier nicht die Möglichkeit des seitlichen Wegklappens. Die Verschlusskegel verbleiben daher, wie in Abbildung 4.4-2 zu sehen, in der Strombahn und sind von außerhalb der Röhre nicht zu erreichen. Ein Auslösemechanismus muss daher entweder bereits ebenfalls innerhalb der Strombahn integriert sein oder von außerhalb der Röhre wirken, ohne die Abdichtung der Röhre zu gefährden.

Es wurden drei Konzepte für einen möglichen Auslösemechanismus entworfen:

- **A: Auslösemechanismus mechanisch mit Auslösehebel** (Abbildung 4.4-3)

Konzept A sah vor, den Verschlusskegel an einer Halterung innerhalb der Probenröhre einzuhängen. Die Röhre wäre nun geöffnet. Im Zuleitungskanal des Trommelmagazins befindet sich ein Auslösehaken, der in ein Widerlager im Verschlusskegel eingreift und den Kegel somit von seiner Halterung herunterzieht. Die Zugfeder zieht den Kegel anschließend in die konische Aufnahme.

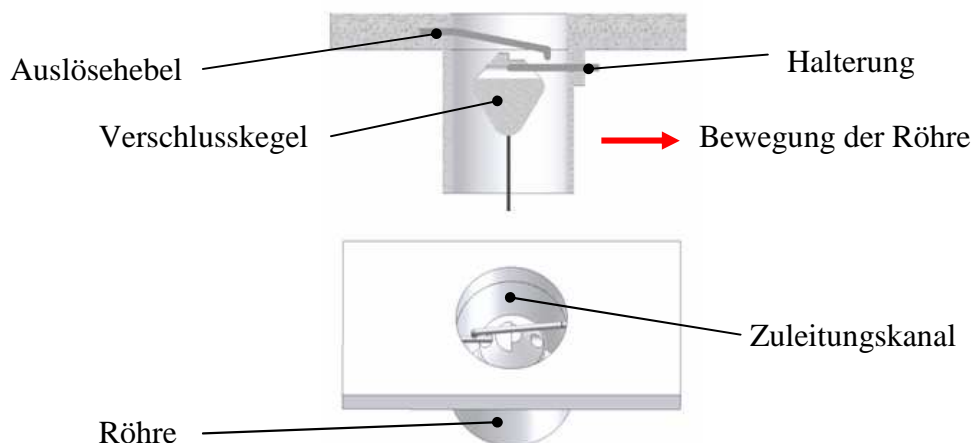


Abbildung 4.4-3: Auslösemechanismus mit Haken (A)

- **B: Auslösemechanismus mechanisch mit Drehhebel** (Abbildung 4.4-4)

Konzept B verwendet einen drehbaren Haken an dem der Verschlusskegel eingehängt wird. Die Drehachse des Hakens ist mit einem Hebel verbunden, der sich außerhalb der Probenröhre befindet. Bei der Bewegung des Trommelmagazins bleibt dieser Hebel an einem Widerlager hängen, wodurch der Haken gedreht wird und den Verschlusskegel freigibt. Da die Drehachse durch die Röhrenwand hindurchgeführt werden muss, ist an dieser Stelle eine Dichtung nötig, um die Reinheit der Probe sicherzustellen.

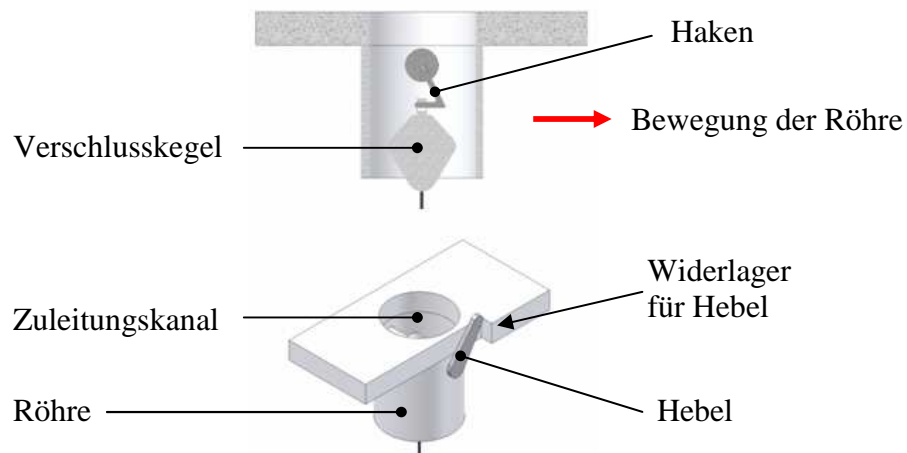


Abbildung 4.4-4: Auslösemechanismus mit Drehhebel (B)

- **C: Auslösemechanismus berührungslos mit Magnet** (Abbildung 4.4-5)

In Konzept C wird der Verschlusskegel in eine Halterung, ähnlich der in Konzept A, eingehängt. Sowohl der Verschlusskegel, als auch die Schleifplatte besitzen eingearbeitete Magnete. Werden diese durch die Bewegung der Röhre aneinander vorbeigeführt, wird der Verschlusskegel durch die Anziehungskraft von seiner Halterung gelöst.

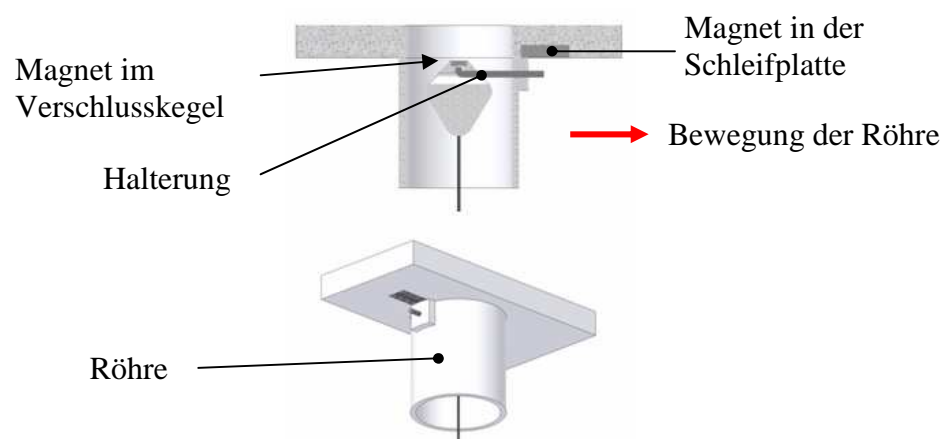


Abbildung 4.4-5: Auslösemechanismus mit Magnet (C)

Die Konzepte wurden nach folgenden Kriterien bewertet:

- **Sicherheit der Auslösung:** Gewichtungsfaktor: 3
Während des Tauchgangs ist keine Kontrolle des Röhrenverschlusses möglich. Eine Fehlfunktion des Auslösemechanismus könnte nur nach Beendigung des Tauchgangs festgestellt werden. Da derartige Missionen nur sehr schwer zu wiederholen sind, ist eine zuverlässige Funktion des Auslösemechanismus erforderlich.
- **Sicherheit gegen ungewollte Auslösung:** Gewichtungsfaktor: 3
Allen Konzepten ist gemein, dass der Verschlusskegel in eine Halterung eingehängt und wird. Insbesondere beim Aussetzen des AUV von Bord der *Polarstern* aus, könnten die auftretenden Erschütterungen die Verschlusskegel von ihren Halterungen rutschen lassen. Die Entnahme einer Probe wäre dann nicht möglich.
- **Abdichtung:** Gewichtungsfaktor: 3
Die Abdichtung der Röhren gegen das Innere des AUV ist ein zentraler Punkt bei der Sicherstellung der Reinheit der Probe. Unterbrechungen in der Außenhaut der Röhren sind demnach möglichst zu vermeiden oder entsprechend abzudichten.
- **Blockieren des Trommelmagazins:** Gewichtungsfaktor: 2
Alle mechanischen Auslösemechanismen bergen die Gefahr des Blockierens in sich, da verschiedene Bauteile ineinander greifen. Es besteht zudem keine Möglichkeit, den Antrieb während des Tauchgangs zu überwachen (z.B. hohe Stromaufnahme eines Elektromotors als Indiz für eine Blockade). Ein Blockieren des Trommelmagazins kann daher zur Beschädigung des ganzen Wasserprobennehmers führen.
- **Strömungswiderstand:** Gewichtungsfaktor: 2
Alle Konzepte besitzen Bauteile die in den Zuleitungskanal hineinragen. Diese Bauteile bilden ein Hindernis in der Strömung und sorgen so für die Entstehung von Druckverlusten.

Die Bewertung der Konzepte ergab folgende Ergebnisse:

Anforderung	Gew.- Faktor GF	Konzept A: Auslöshebel		Konzept B: Hebel		Konzept C: Magnet	
		ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF
Sicherheit der Auslösung	3	5	15	5	15	2	6
Sicherheit gegen ungewollte Auslösung	3	4	12	4	12	4	12
Abdichtung	3	5	15	2	6	5	15
Gefahr des Blockierens	2	3	6	3	6	5	10
Strömungswiderstand	2	3	6	2	4	4	8
Erreichbar:		Summe:		Summe:		Summe:	
65		54		43		51	

Tabelle 4.4.1: Bewertungstabelle Auslösemechanismus

Die **Sicherheit der Auslösung** ist bei den Konzepten A und B (mechanisch) höher zu bewerten, als im Fall von Konzept C (magnetisch). Mechanische Auslösemechanismen arbeiten mit Hilfe eines Formschlusses, wohingegen eine magnetische Auslösung auf einen unsichereren Kraftschluss zurückgreift. Zudem sinkt die magnetische Anziehungskraft mit zunehmender Entfernung der Magnete schnell ab. Um eine zuverlässige Auslösung zu gewährleisten, müsste sich der Abstand zwischen den beiden Magneten daher in engen und eventuell schwierig einzuhaltenden Grenzen bewegen.

Die **Sicherheit gegen ungewollte Auslösung** wurde bei allen Konzepten gleich bewertet. Jedes der Konzepte arbeitet mit einem „Herunterschieben“ des Verschlusskegels von einer Halterung. Die Sicherheit gegen ein verfrühtes Abrutschen des Verschlusskegels ist daher von der Ausführung dieser Halterung abhängig. Hier sind konstruktiv nur wenige Grenzen gesetzt, so dass jedes Konzept hoch bewertet werden konnte.

Im Fall der **Abdichtung** ist Konzept B niedrig bewertet worden, da die Drehachse einen Durchbruch durch die Röhrenwand darstellt. Um ein Eindringen von Verunreinigungen zu verhindern, ist an dieser Stelle eine Dichtung nötig. Aufgrund der Bewegung der Achse ist diese Stelle jedoch in ihrer Abdichtung komplex und bleibt eine Schwachstelle. Bei den Konzepten A und B sind dagegen keine beweglichen Teile aus der Röhre hinauszuführen. Die

nötigen Bauteile können eingepresst werden, was eine ausreichende Dichtwirkung gewährleistet.

Durch den Formschluss bei den mechanischen Auslösemechanismen besteht bei einer Fehlfunktion die **Gefahr des Blockierens**. Die mechanischen Konzepte A und B wurden daher niedriger bewertet als das berührungslose Konzept C.

Der **Strömungswiderstand** der verschiedenen Konzepte ist je nach Bauteilgröße unterschiedlich. Am niedrigsten wurde hier Konzept B bewertet, da neben einer Halterung für den Verschlusskegel auch ein drehbarer Haken in der Strombahn positioniert ist. Hier wird daher der höchste Strömungswiderstand erwartet. Am höchsten wurde Konzept C bewertet, da neben der Halterung für den Verschlusskegel keine weiteren Bauteile in den Zuleitungskanal hineinragen.

Nach Abschluss der Bewertung legte der konzeptionelle Entwurf für den Verschluss der Röhren kegelförmige Verschlusskörper fest, die nach dem Prinzip der Niskin-Flaschen die Röhren abschließen. Die Auslösung der Verschlusskegel soll über einen **mechanischen Auslösemechanismus mit einem Auslösehebel (Konzept A)** realisiert werden. Dieses Konzept erhielt in der Bewertung 54 von 65 möglichen Punkten (83 %).

4.5 Geometrie der Probenröhren

Die Geometrie der Probenröhren hat entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der entnehmbaren Proben. Um möglichst viele Proben gewinnen zu können, ist eine kompakte Bauweise der Röhren anzustreben. Maßgebend für die Größe der Röhren ist dabei das Probenvolumen. Zudem wurde für die Fertigung der Probenröhren die Verwendung von standardisierten Rohrgrößen angestrebt. Die Fertigung von „Zwischengrößen“ ist entweder mit der Abnahme großer Mindestmengen oder dem Ausbohren von zylindrischen Halbzeugen verbunden. Beide Verfahren hätten die Fertigung der Röhren extrem teuer gemacht.

Aufgrund der Reinheitsanforderungen kamen zudem nur wenige Werkstoffe in Frage (vgl. Kapitel 3.5). Grundlage der konzeptionellen Auslegung der Probenröhren musste daher, neben den Anforderungen der Wissenschaftler und den Rahmenbedingungen durch das AUV, auch eine Marktübersicht über verfügbare Rohrdurchmesser sein.

Das Probenvolumen soll pro Röhre bei ca. 200 ml liegen. Über das Volumen hängen Länge und Durchmesser der Probenröhren unmittelbar voneinander ab. Der Einbauraum des Wasserprobennehmers ist durch die Abmessungen des Nutzlastsegments im AUV bereits vorgegeben (vgl. Kapitel 4.1). Die maximale Länge des Wasserprobennehmers liegt demnach bei ca. 650 mm. Da neben den Probenröhren auch Rahmenbauteile, Druckkörper, etc. innerhalb dieser Länge untergebracht werden müssen, wurde die geschätzte Länge der Röhren auf maximal 2/3 des Einbauraumes, also ca. 430 mm, begrenzt. Es ist jedoch zu beachten, dass die Röhren an beiden Enden über einen Verschluss verfügen müssen (vgl. Kap. 4.4 Verschluss der Probenröhren). Es ergibt sich somit ein dreigliedriger Aufbau der Probenröhren (Abbildung 4.5-1):

Verschluss - Mittelsegment - Verschluss

Der geschätzte Platzbedarf dieser beidseitigen Verschlüsse muss ebenfalls von den 400 mm abgezogen werden. Für den Verschlussmechanismus wurde beidseitig eine Länge von jeweils ca. 100 mm angenommen, so dass das Mittelsegment über eine Länge von 200 mm verfügt.

Um die Fertigung zu vereinfachen, wurde für den Bau des Mittelsegments die Verwendung eines Kunststoffrohrs mit handelsüblichen Abmaßen geplant.

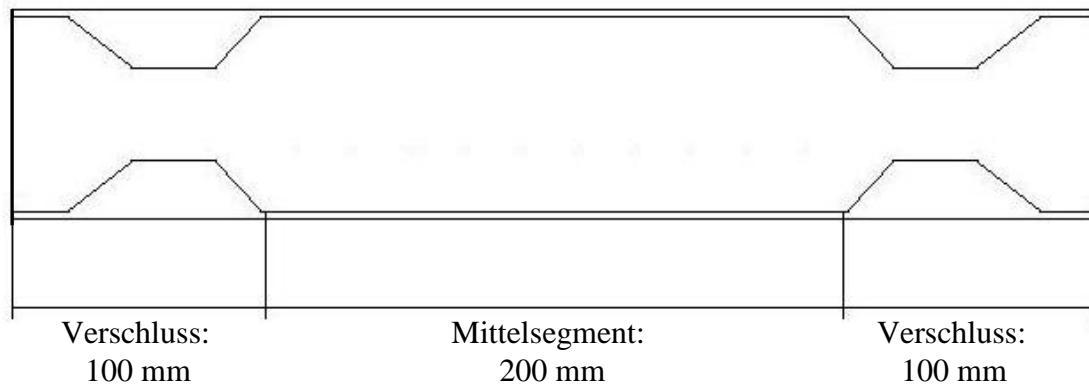


Abbildung 4.5-1: Gegliederter Aufbau der Probenröhren und Längenverteilung

- Probenvolumen: 200 ml
- Max. Länge der Röhren: 400 mm (= ca. 2/3 des Einbauraumes)
- Max. Länge des Mittelsegments: 200 mm (= ca. 50 % der Röhrenlänge)

Da das Probenvolumen bekannt ist und die Verschlüsse nur relativ wenig zum Innenvolumen der Probenröhre beitragen, können der benötigte Innendurchmesser und die Länge des Mittelsegments über Gl. 4.5-1 miteinander in Beziehung gesetzt werden:

$$l = \frac{V}{\pi \cdot r^2} \qquad \text{Gleichung 4.5-1}$$

Für einen realistischen Bereich (ab 20 mm Innendurchmesser) ergibt sich für ein gegebenes Volumen somit folgende Korrelation (Abbildung 4.5-2).

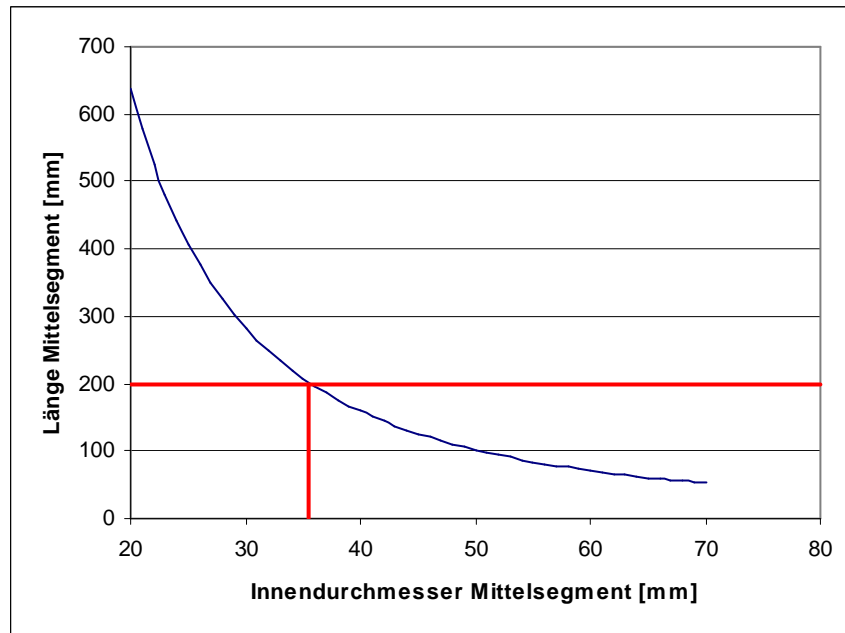


Abbildung 4.5-2: Korrelation zwischen Länge und Durchmesser bei gegebenem Volumen

Die horizontale Markierung stellt die maximale Länge des Mittelsegments von 200 mm dar. Es ist zu erkennen, dass der benötigte Innendurchmesser des Rohres demnach bei über 35 mm liegen muss, was ein entscheidendes Kriterium bei der weiteren Bauteilauswahl ist.

Um möglichst viele Röhren in dem Trommelmagazin anordnen zu können, muss der Außendurchmesser der Röhren klein sein. Zusätzlich durften aufgrund der Reinheitsanforderungen nur die Kunststoffe PTFE, PFA oder PVDF zum Einsatz kommen. Eine Marktübersicht über verfügbare Rohre mit den folgenden Kriterien

- Werkstoff PTFE, PFA oder PVDF
- Innendurchmesser größer oder gleich 35 mm
- Möglichst kleiner Außendurchmesser

ergab folgende Ergebnisse (Tabelle 4.5.1):

Material	Innendurchmesser	Außendurchmesser	Wandstärke
PTFE	35	45	5
PFA	nicht verfügbar		
PVDF	35,2	40	2,4

Tabelle 4.5.1: Übersicht über handelsübliche Rohrgrößen

Die kompakteste Bauweise ist demnach bei Verwendung eines PVDF-Rohrs mit einem Außendurchmesser von 40 mm zu erreichen.

Der Kunststoff PVDF besitzt gegenüber PTFE zudem den entscheidenden Vorteil, schweißbar zu sein.

Geometrie und Material der Röhren sind demnach wie folgt festgelegt:

- Max. Gesamtlänge: 400 mm
- Außendurchmesser: 40 mm
- Innendurchmesser: 35,2 mm
- Material: PVDF

4.6 Probenanzahl

Die Probenanzahl stellt das „Auflösungsvermögen“ des Wasserprobennehmers dar. Um eine große Anzahl von Proben gewinnen zu können, ist es nötig, die Abmessungen des Trommelmagazins möglichst optimal an den Einbauraum des AUV anzupassen und diesen effektiv auszunutzen. Nach Abschluss dieser Optimierung ist es möglich, die Probenanzahl festzulegen.

Im Zentrum eines Trommelmagazins befindet sich ein ungenutztes Volumen (Abbildung 4.6-1). Eine Möglichkeit dieses ungenutzte Volumen zu minimieren, liegt in der Verkleinerung des Magazins. Hierdurch wird zwar das ungenutzte Volumen verkleinert, gleichzeitig sinkt jedoch auch die Anzahl der Röhren, die befestigt werden können.

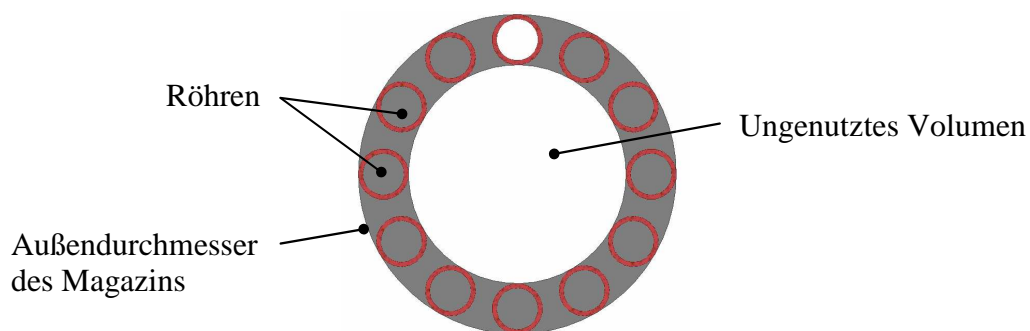


Abbildung 4.6-1: Trommelmagazin im Querschnitt

Eine Möglichkeit die Anzahl der Proben im AUV zu erhöhen und dabei gleichzeitig das ungenutzte Volumen zu minimieren, besteht im Einsatz mehrerer kleiner Trommelmagazine, statt eines großen Magazins. Das Rumpfvolumen kann hierdurch wesentlich effektiver ausgenutzt werden. Abbildung 4.6-2 zeigt die Raumausnutzung im Rumpf des AUV durch verschiedene Trommelmagazine. Die abgebildeten Magazine sind, begrenzt durch die Rumpfform, maximal groß dimensioniert. Die enthaltenen Röhren haben einen beispielhaften Außendurchmesser von 30 mm.

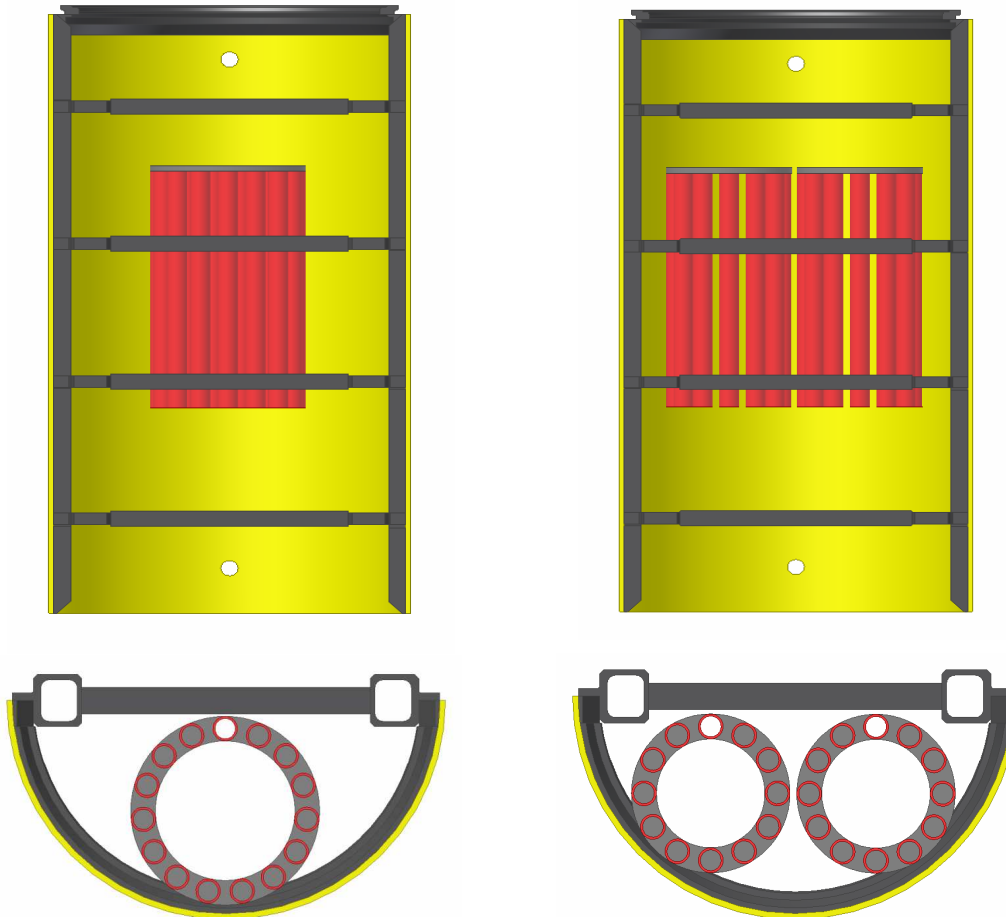


Abbildung 4.6-2: Rausnutzung durch ein oder zwei Trommelmagazine

Anzahl der Probenröhren: 15
Durchmesser Magazin: 235

Anzahl der Probenröhren: 24
Durchmesser Magazin: 195

Es ist zu erkennen, dass die Raumausnutzung durch zwei Magazine wesentlich verbessert wird. Die Anzahl der Probenröhren steigt von 15 bei einem Magazin auf 24 beim Einsatz zweier Magazine. Gleichzeitig sinkt der Außendurchmesser von 235 mm auf 195 mm. Zusätzlich bietet die Verwendung zweier unabhängiger Magazine den Vorteil der Redundanz. Bei einem Ausfall könnte trotzdem eine Anzahl Proben gewonnen werden.

Da jedoch die Komplexität des Wasserprobennehmers mit zunehmender Anzahl von Magazinen steigt und die Verwendung von mehr als zwei Magazinen keinen signifikanten Vorteil bei der Anzahl der Probenröhren mehr erbringt, wurde ihre Zahl auf zwei begrenzt. Abbildung 4.6-3 zeigt eine mögliche Konfiguration bei der Verwendung von drei Magazinen.

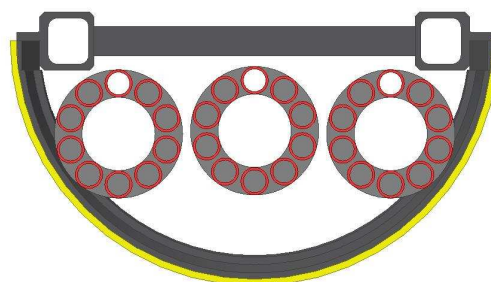


Abbildung 4.6-3: Raumausnutzung durch drei Magazine

Anzahl der Probenröhren: 30

Die Gesamtanzahl der Proben würde sich zwar auf 30 erhöhen, jedoch würde der Anstieg von 24 (bei zwei Magazinen) auf 30 Röhren mit einem erheblichen und nicht zu vertretenden Mehraufwand bei der Steuerung und der Zuleitung verbunden sein.

Bei der Verwendung von zwei Trommelmagazinen beträgt deren maximaler Außendurchmesser jeweils 195 mm. Aufgrund geometrischer Zusammenhänge kann daher die Zahl der Probenröhren festgelegt werden. Abbildung 4.6-4 zeigt hierzu eine schematische Querschnittsdarstellung des Magazins. Die Querschnittsfläche der Röhren ist rot eingefärbt.

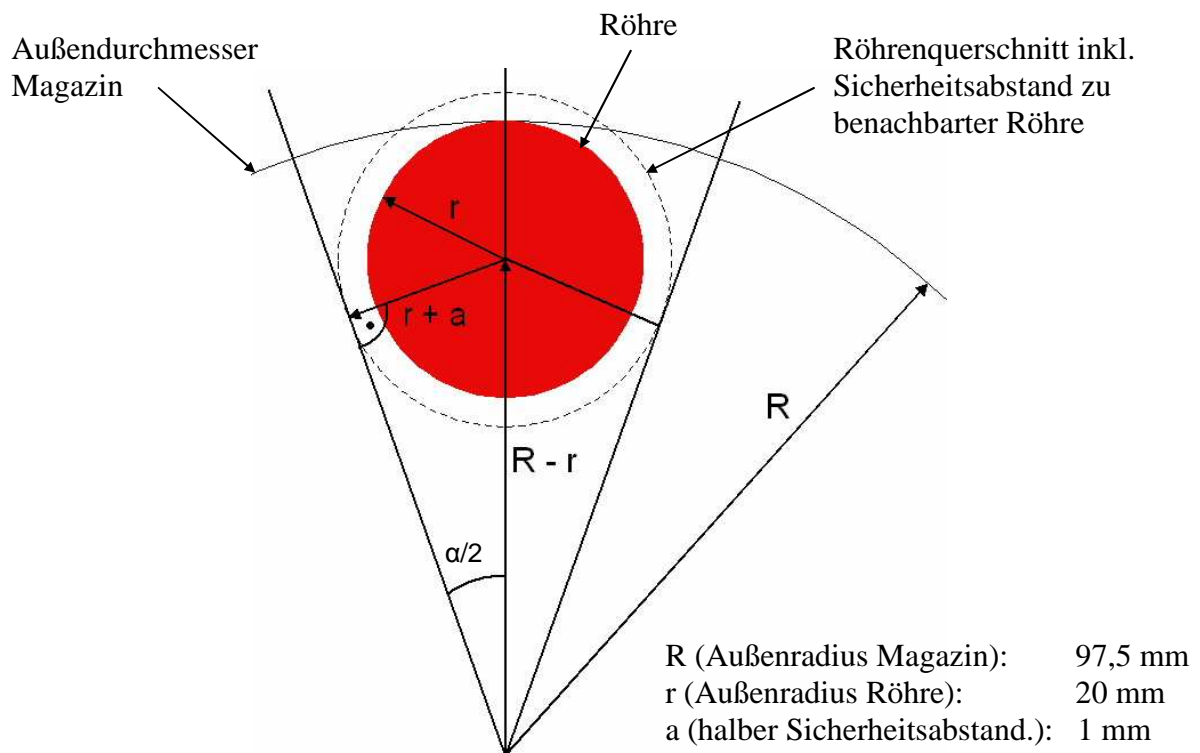


Abbildung 4.6-4: geometrische Zusammenhänge zur Berechnung der Probenanzahl

Jede der Röhren nimmt ein Kreissegment ein, dessen Winkelbreite (α) vom Außendurchmesser der Röhre (40 mm) abhängig ist. Zusätzlich wurde ein „Sicherheitsabstand“ ($2a$) von ca. 2 mm Breite zwischen den Röhren als Minimum erachtet.

Es folgt somit:

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{r + a}{R - r}\right) \quad \text{Gleichung 4.6-1}$$

Hieraus ergibt sich die Anzahl der Röhren (N) aus:

$$N = \frac{360^\circ}{\alpha} \quad \text{Gleichung 4.6-2}$$

Aufgrund der Abmaße der Röhren ergibt sich nach Gleichung 4.6-1 eine Winkelbreite α von $31,4^\circ$.

Die maximale Anzahl von Röhren in einem Trommelmagazin liegt demnach bei **11 Röhren**.

4.7 Anpressdruck an Schleifplatten

Die vorangegangenen Bewertungen legen den Einsatz der Röhren in Trommelmagazinen und deren stirnseitige Abdichtung durch Schleifplatten fest (vgl. Kapitel 4.3). Um jedoch den sicheren Kontakt der Stirnseite zur Schleifplatte zu gewährleisten, müssen die Röhren über einen gewissen Anpressdruck an die Schleifplatten verfügen. Eine Möglichkeit, diese Anforderung konstruktiv umzusetzen, besteht im Einbau von Druckfedern in die Röhren. Abbildung 4.7-1 zeigt eine schematische Darstellung des Prinzips.

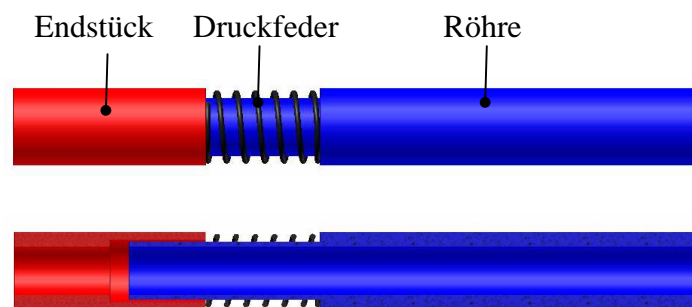


Abbildung 4.7-1: Längenflexible Röhre mit Druckfeder

Wird die Druckfeder gestaucht, übt sie eine entsprechende Gegenkraft auf Endstück und Röhre aus. Diese Kraft kann genutzt werden, um die Enden der Röhre an die Schleifplatten anzulegen. Eine permanente Stauchung der Druckfeder kann durch eine entsprechende Dimensionierung des Schleifplattenabstands realisiert werden.

Ein weiterer positiver Effekt dieser Bauweise ist die Möglichkeit, Abweichungen ausgleichen zu können. Es ist zu bedenken, dass der Wasserprobennehmer in einem Rahmen fixiert werden muss, der aus Gewichtsgründen aus Kunststoff gefertigt werden muss. Hier kann es einerseits zu Abweichungen in der Fertigung kommen, andererseits verfügen insbesondere Kunststoffe über relativ große thermische Ausdehnungskoeffizienten. Ein Einsatz in kaltem Meerwasser wird daher zwangsläufig Maßänderungen im Bereich des Rahmens nach sich ziehen. Hiervon ist somit auch der Abstand der Schleifplatten betroffen. Jede Röhre muss derartige Maßänderungen ausgleichen können und in ihrer Länge flexibel sein.

4.8 Antrieb

Für die Drehung der beiden Trommelmagazine ist die Integration zweier elektrischer Antriebe in den Wasserprobennehmer nötig. Zur Ausführung dieses Antriebs, sowie des gesamten Antriebsstranges, wurden zwei Konzepte entwickelt und auf ihre Tauglichkeit geprüft.

- **A: DC-Motor und Schneckengetriebe**

In Konzept A soll ein DC-Elektromotor, versehen mit einem Impulsgeber zu exakten Steuerung, die Antriebsachse antreiben. Die nötige Untersetzung soll durch mehrere Getriebestufen, wovon mindestens eine Stufe durch ein Schneckengetriebe gebildet werden wird, erreicht werden. Die Anordnung des Antriebs verdeutlicht Abbildung 4.8-1

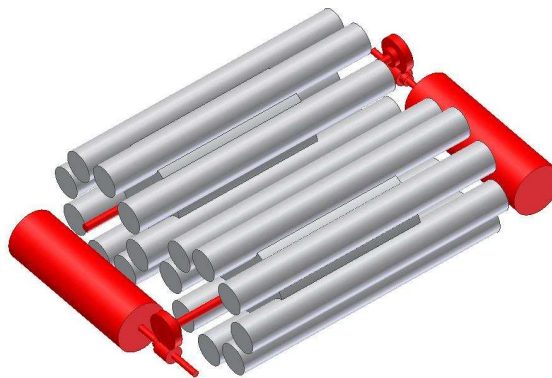


Abbildung 4.8-1: Schematische Übersicht des Antriebs nach Konzept A

- **B: Hohlwellen Schrittmotor**

Konzept B sieht den Einsatz eines Hohlwellen Schrittmotors innerhalb eines zylindrischen Druckkörpers vor. Abbildung 4.8-2 und Abbildung 4.8-3 zeigen eine Übersicht über das Konzept, sowie geeignete Schrittmotoren der Firma Nanotec. Der Schrittmotor wäre an einer feststehenden Achse befestigt, wodurch das Gehäuse des Schrittmotors in Drehung versetzt werden würde. Durch eine entsprechende Befestigung des Schrittmotorgehäuses im Druckkörper wird diese Drehbewegung weitergegeben und dient so der Drehung des gesamten Trommelmagazins.

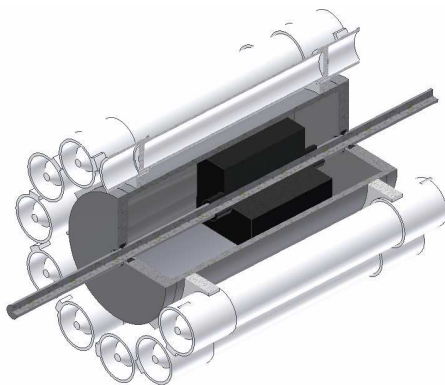


Abbildung 4.8-2: Antrieb mit Hohlwellen Schrittmotor



Abbildung 4.8-3: Hohlwellen Schrittmotoren;
Quelle: Nanotec

Die Konzepte wurden hinsichtlich folgender Kriterien bewertet:

- **Stromverbrauch:** Gewichtungsfaktor: 2
Um den Wasserprobennehmer energiesparend betreiben zu können, ist ein Antrieb mit möglichst niedrigem Stromverbrauch anzustreben. Da der Antrieb bei beiden Konzepten jedoch nur jeweils kurzzeitig arbeiten muss, kann der Gewichtungsfaktor reduziert werden.
- **Drehmoment:** Gewichtungsfaktor: 3
Im Wasserprobennehmer liegen die Stirnseiten der Probenröhren an Schleifplatten an. Je nach Material und Reibungskoeffizient können daher Reibungskräfte auftreten, die eventuell hohe Reibmomente nach sich ziehen. Der Antrieb muss in der Lage sein, diese Reibmomente zu überwinden.
- **Raumausnutzung:** Gewichtungsfaktor: 2
Da der Einbauraum im Nutzlastsegment des AUV begrenzt ist, ist eine kompakte Bauweise unter möglichst vollständiger Ausnutzung von Totvolumina anzustreben.
- **Komplexität der Abdichtung:** Gewichtungsfaktor: 3
Die Abdichtung einer drehenden Welle, über die beide Antriebe verfügen, zählt zu den am schwierigsten umzusetzenden Dichtungstechniken. Derartige Bauteile stellen eine mögliche Fehlerquelle dar und sollten daher nach Möglichkeit vermieden werden. Zudem verursachen Hochdruck-Rotationsdichtungen hohe Reibmomente, die den Antrieb zusätzlich belasten.
- **Kabelführung:** Gewichtungsfaktor: 3
Die Kabelführung ist normalerweise relativ unkritisch, muss in diesem Fall aber in die Bewertung aufgenommen werden, da in Konzept B das Gehäuse des Schrittmotors rotiert und ein Verbindungskabel dieser Bewegung folgen müsste.
- **Variabilität:** Gewichtungsfaktor: 2
Der Begriff der Variabilität bezieht sich in diesem Fall hauptsächlich auf die Verfügbarkeit verschiedener Bauteile, um beispielsweise das verfügbare Drehmoment auch nachträglich noch durch die Verwendung eines anderen Getriebes steigern zu können. Da es sich bei dem Wasserprobennehmer um eine Neuentwicklung handelt, sollten derartige „Sicherheitsreserven“ eingeplant werden.

Die Bewertung der Konzepte ergab folgende Ergebnisse:

Anforderung	Gew.- Faktor GF	Konzept A: DC-Motor + Schnecke		Konzept B: Hohlwellen Schrittmotor	
		ohne GF	mit GF	ohne GF	mit GF
Stromverbrauch	2	4	8	3	6
Drehmoment	3	5	15	3	9
Raumausnutzung	2	3	6	5	10
Komplexität der Abdichtung	3	4	12	3	9
Kabelführung	3	5	15	2	6
Variabilität	2	4	8	3	6
Erreichbar:		Summe:		Summe:	
75		64		46	

Tabelle 4.8.1: Bewertungstabelle Antrieb

Der **Stromverbrauch** liegt bei vergleichbarer mechanischer Abgabeleistung bei Schrittmotoren üblicherweise höher als bei DC-Motoren. Konzept B wurde daher geringer bewertet.

Das **Drehmoment** ist insbesondere bei DC-Motoren von der verwendeten Untersetzung abhängig. Bei gleicher Leistungsaufnahme erzeugen DC-Motoren jedoch üblicherweise höhere Drehmomente als Schrittmotoren. Ein zusätzlicher Vorteil von DC-Motoren ist das stark erhöhte Anlaufmoment („Losbrechmoment“), das bis zu 2,5 fach größer als das Nenndrehmoment sein kann. Es ist somit möglich, Haftreibungskräfte zu überwinden.

Der Hohlwellen Schrittmotor muss im Kriterium **Raumausnutzung** höher bewertet werden. Es nutzt das in Konzept A ungenutzte Volumen im Zentrum des Trommelmagazins optimal aus. In Konzept A wird hingegen die Gesamtlänge des Wasserprobennehmers durch die Anordnung der Antriebe (hinter und vor den Magazinen) vergrößert. Die Raumausnutzung ist daher geringer bewertet.

Die **Komplexität der Abdichtung** ist im Fall von Konzept A geringer als bei Konzept B. Der Hohlwellen Schrittmotor arbeitet mit einer feststehenden, durchgängigen Achse durch den Druckkörper (s. Abbildung 4.8-3). Durch diese Anordnung sind zwei Rotationsdichtungen nötig. Der Druckkörper des DC-Motors aus Konzept A verfügt dagegen nur über einen Wellenausgang und dementsprechend nur über eine Rotationsdichtung.

Speziell im Fall von Konzept B ist die **Kabelführung** sehr kompliziert. Dadurch, dass die Achse feststeht, aber der Druckkörper und das Gehäuse des Schrittmotors bewegt sind, muss ein Anschlusskabel dieser Rotation folgen. Dies macht entweder ein flexibles Kabel (was in dieser Form eine Sonderanfertigung wäre) oder Schleifkontakte nötig. An dieser Stelle muss Konzept B daher niedrig bewertet werden.

Für DC-Motoren ist eine Vielzahl von Bauteilen, wie Encoder oder Getriebe erhältlich. Die **Variabilität** ist daher höher als bei Schrittmotoren aus Konzept B. Die Verwendung von DC-Motoren schließt somit die Möglichkeit ein, den Antrieb des Wasserprobennehmers auch nachträglich optimieren zu können.

Nach Abschluss der Bewertung wurde das Antriebskonzept der **DC-Motoren mit Schneckengetriebe (A)** mit 64 von 75 möglichen Punkten (85 %) als das aussichtsreichere bewertet.

4.9 Zuleitungsverlauf

Aufgrund der empfindlichen Analyseverfahren wird Wasser bereits nach dem Kontakt mit der Außenhülle des AUV als möglicherweise durch Fremdstoffe kontaminiert angesehen (s. Kapitel 2). Als Probenmaterial eignet es sich daher nicht mehr. Wasser, das den Probenröhren zugeleitet wird, muss somit aus „ungefährdeten“ Bereichen, idealerweise also vor dem Bug des AUV, entnommen werden. Aufgrund des inneren Aufbaus des AUV ergeben sich somit zwingende Randbedingungen für den Zuleitungsverlauf.

Das Nutzlastsegment liegt in der Mitte des AUV. Um am Bug des AUV auszutreten, muss die Zuleitung daher alle davor liegenden Segmente durchqueren. Abbildung 4.9-1 zeigt den Aufbau des AUV und schematisch einige fest installierte Komponenten.

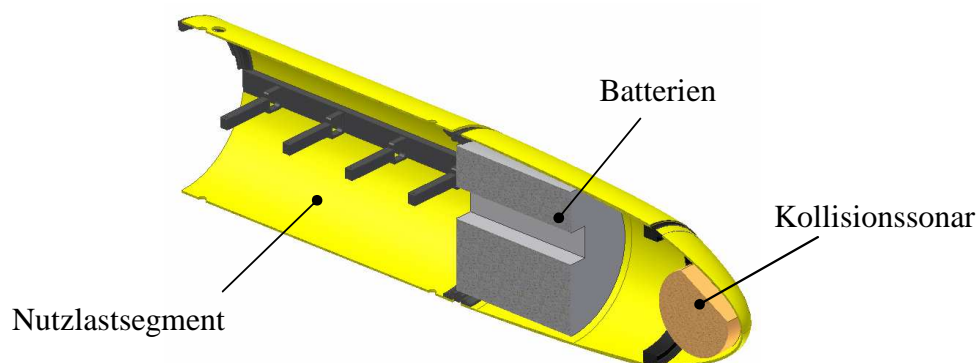


Abbildung 4.9-1: vorderer Teil des AUV

Die Komponenten mit Einfluss auf den Zuleitungsverlauf sind die Batterien und das direkt im Bug eingebaute Kollisionssonar.

Zwischen den Batterien bietet ein Kanal die Möglichkeit eine Rohrleitung hindurchzuführen. Die Breite dieses Kanals begrenzt somit auch den Durchmesser der Zuleitung. Da jedoch zwei Magazine mit zwei voneinander unabhängigen Zuleitungen versorgt werden sollen, müssen folglich auch zwei parallele Rohrleitungen durch diesen Kanal geführt werden.

Das Kollisionssonar befindet sich in zentraler Position im Bug. Eine Rohrleitung kann daher nicht zentral aus dem Bug hinausgeführt werden. Aufgrund dieser Randbedingungen ergibt sich ein konzeptioneller Verlauf der Zuleitungen des Wasserprobennehmers (Abbildung 4.9-2).

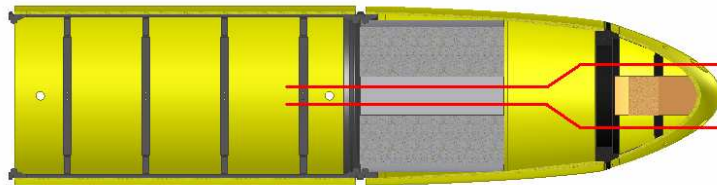


Abbildung 4.9-2: Zuleitungsverlauf im AUV von oben

Die Notwendigkeit einer Zuleitung zieht Umbaumaßnahmen am AUV nach sich. Einerseits muss die Rohrleitung im AUV geführt und gehalten werden. Im Bereich des Bugs sollen hierfür die Halterungen des Kollisionssonars verwendet und entsprechend umgebaut werden. Andererseits ist es nötig, zwei Durchgangsbohrungen in den Bug des AUV einzubringen.

4.10 Übersicht Gesamtkonzept

Nach Abschluss der Bewertungen stellt sich das Gesamtkonzept wie folgt dar:

Gesamtsystem:

- Zwei unabhängige Trommelmagazine
- 2 x 11 Proben
- Antrieb über zwei unabhängige DC-Motoren
- Zwei getrennte Zuleitungen durch den Bug des AUV

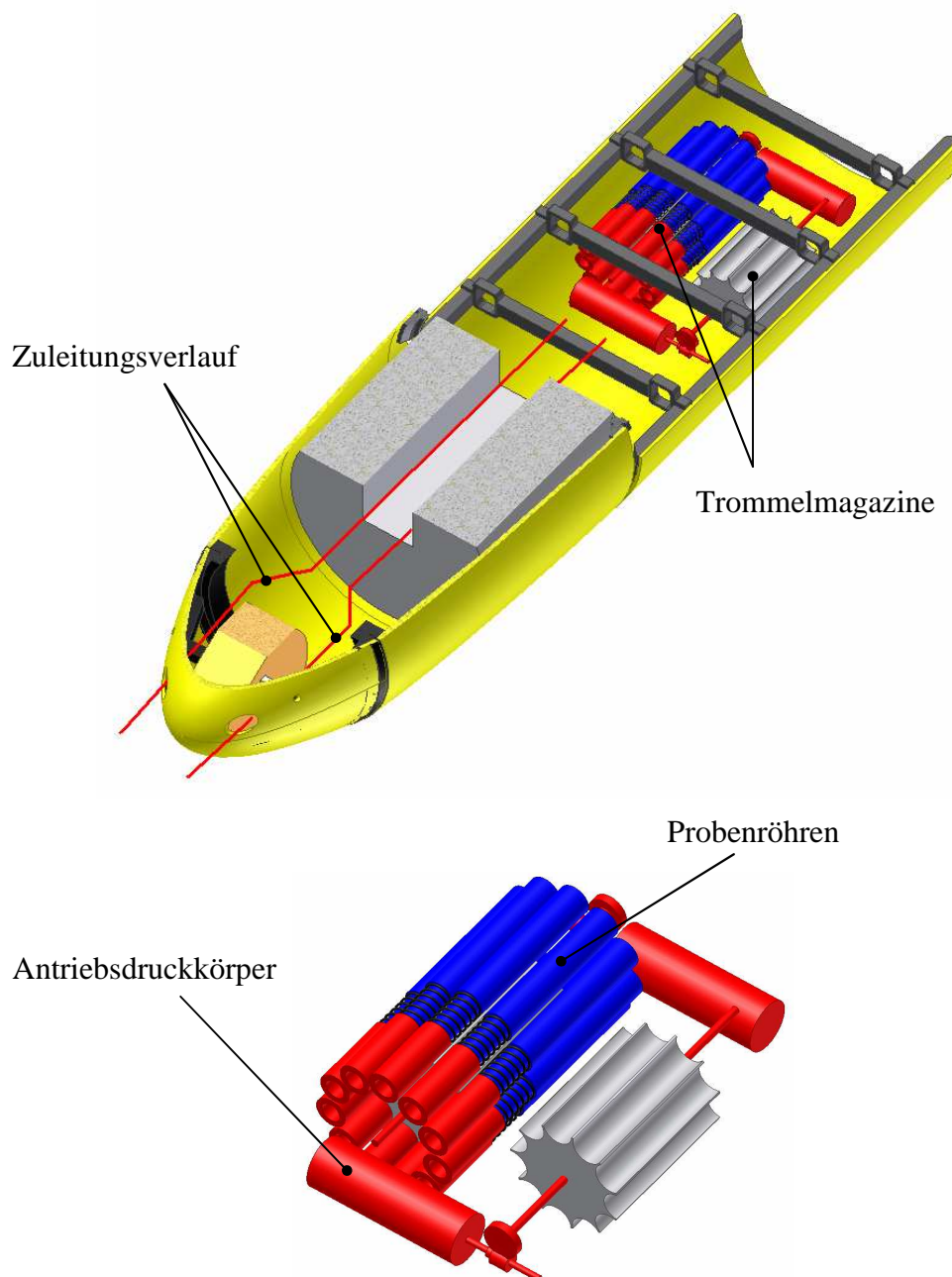


Abbildung 4.10-1: Konzeptioneller Entwurf des Gesamtsystems

Probenbehälter:

- Röhrenförmig
- Herstellung aus PVDF
- Volumen ca. 200 ml
- Max. Länge ca. 430 mm
- Außendurchmesser 40 mm
- Verschluss mit Hilfe von Verschlusskegeln und Zugfedern
- Auslösen des Verschlusses über Auslösehebel
- Längenflexibel mit integrierter Druckfeder

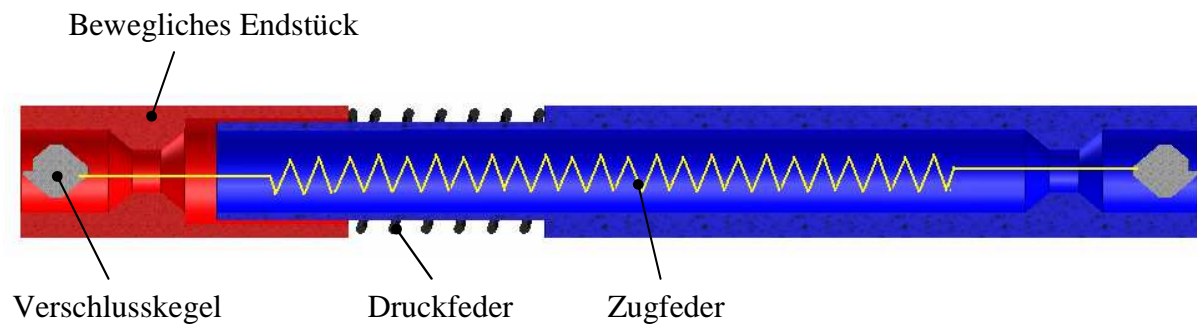


Abbildung 4.10-2: Konzeptioneller Entwurf der Probenröhren

5 Konstruktion

Die Konstruktionsphase des Projektes beinhaltet die präzise technische Ausarbeitung des erarbeiteten Gesamtkonzeptes, also die Auswahl geeigneter Bauteile und Lieferanten, sowie die Konstruktion von Spezialanfertigungen.

Die verwendeten Bauteile beeinflussen sich hinsichtlich ihrer Form und Funktion gegenseitig auf vielfältige Art und Weise. Es ist daher nicht möglich, einzelne Bauteile isoliert von dem Gesamtaufbau des Wasserprobennehmers zu betrachten. Bei der nachfolgenden Beschreibung der Bauteile mussten daher häufig Querverweise auf andere Komponenten eingefügt und teilweise auch auf nachfolgende Unterkapitel „vorgegriffen“ werden.

Bei der Auswahl geeigneter Komponenten stand neben der Funktion stets die Reinheit der Probe im Vordergrund. Nur wenige Komponenten konnten als standardisierte Kaufteile bezogen werden. Es waren daher häufig Neukonstruktionen erforderlich, die ebenfalls den Reinheitsanforderungen unterlagen und daher aus geeigneten Materialien gefertigt werden mussten.

Im folgenden Kapitel ist der Wasserprobennehmer in Unterbaugruppen gegliedert. Abschließend wird ein Gesamtüberblick über die Konstruktion des Gerätes gegeben.

5.1 Probenröhren

Wie bereits in der Konzeptionsphase erwähnt, ist es sinnvoll, den Probennehmer „um die Probe herum“ zu entwickeln. Der erste Abschnitt des Kapitels „Konstruktion“ beschreibt daher den Aufbau der Probenröhren.

Die Röhren sind der zentrale Bestandteil des Wasserprobennehmers. Ihr Aufbau entscheidet über die zuverlässige Gewinnung der Proben und ihre anschließende Verwertbarkeit. Konzeptionell wurde der Aufbau der Röhren bereits in Kapitel 4 festgelegt.

Neben der eigentlichen Probennahme ist die Konstruktion der Röhren auch ein Kriterium bei der sicheren Handhabung der Proben im Labor. Selbst wenn eine Probe wie geplant zur Wasseroberfläche gebracht wird, so ist sie doch in der relativ kurzen Zeitspanne zwischen dem Ausbau der Röhre aus dem AUV und dem Eintreffen im Labor am stärksten gefährdet. Eine sichere und einfache Handhabung hilft, diese Gefahr zu minimieren.

5.1.1 Allgemeine Bauweise

Die Grundgestalt der Röhre sieht ein röhrenförmiges Mittelsegment vor, das an beiden Enden durch einen Verschlusssegment begrenzt wird (Abbildung 5.1-1).

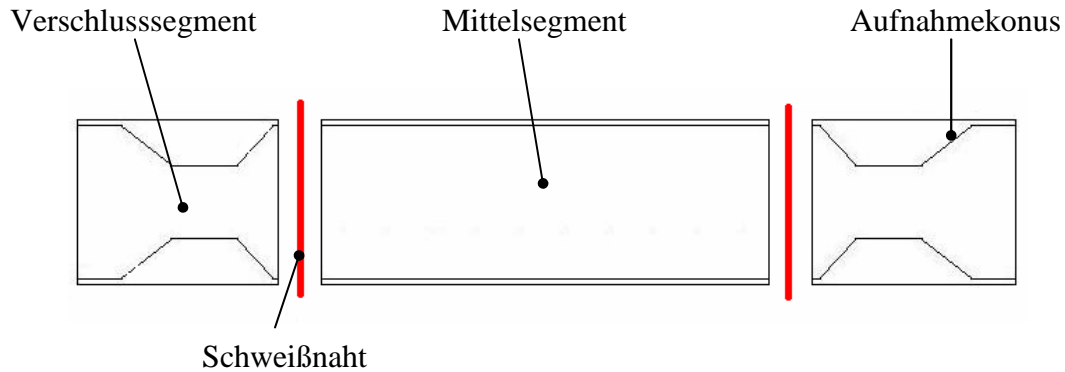


Abbildung 5.1-1: Segmente der Probenröhren und Verbindungsstellen

Das röhrenförmige Mittelsegment wurde bereits in Kap. 4.5 auf eine handelsübliche Rohrgröße festgelegt. Die gewählte standardisierte Rohrgröße hat folgende Abmaße:

- Außendurchmesser: 40,0 mm
- Innendurchmesser: 35,2 mm

Eine derartige Röhre ist aufgrund der Hinterschnitte nicht aus einem Stück zu fertigen. Der Entwurf sieht daher eine Röhre aus drei einzelnen Segmenten vor, die nachträglich durch Kunststoffschweißen gefügt werden. Die Konstruktion der Verschlusssegmente orientiert sich daher an den standardisierten Abmaßen des Mittelsegments.

Als Werkstoff ist der Kunststoff PVDF vorgesehen. Dieser Kunststoff entspricht den Reinheitsanforderungen und ist schweißbar. Er bietet somit eine Möglichkeit, Bauteile gasdicht und ohne die Verwendung von Klebstoffen zu verbinden. Verschluss- und Mittelsegment der Röhre können über eine Stumpfschweißung miteinander verbunden werden. Da die Bauteile erst nachträglich gefügt werden, ist die Fertigung der Verschlusssegmente unkritisch und nahezu jeder Steigungswinkel des Aufnahmekegels realisierbar.

Die Schweißbarkeit von PVDF bietet zudem die Möglichkeit, nötige Anbauteile (z.B. Halterungen) an der Außenhaut der Röhre zu befestigen.

5.1.2 Prinzip der Probennahme

Entsprechend der konzeptionellen Auslegung erfolgt die Probennahme mit Hilfe von Probenröhren, die innerhalb eines Trommelmagazins angeordnet sind (Abbildung 5.1-2). Über eine Zuleitung wird dem Magazin Wasser zugeführt. Die vor der Zuleitung positionierte Röhre wird durchströmt.

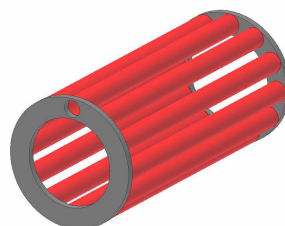


Abbildung 5.1-2: Prinzip der Probennahme

Zur Entnahme einer Probe wird das Trommelmagazin um eine Röhre weitergedreht. Während dieses Bewegungsvorgangs wird eine „neue“ Röhre vor die Zuleitung gebracht und zugleich der Verschluss der zuvor durchströmten Röhre ausgelöst. Das sich zu diesem Moment in der Röhre befindliche Wasser wird dadurch eingeschlossen.

5.1.3 Verschluss

Die Röhre wird zunächst durchströmt und anschließend mit Hilfe von Verschlusskegeln beidseitig verschlossen. Die Verschlusskegel werden über eine Zugfeder in die Aufnahmekonen eingezogen. Der Verschluss besteht folglich aus mehreren Teilen:

- Verschlusskegel
- Aufnahmekonus
- Zugfeder

Zentrale Anforderung an diese Bauteile ist der sichere Einschluss der Probe. Insbesondere an den Verschlusskegel wird jedoch eine Reihe weiterer Anforderungen gestellt, deren konstruktive Umsetzung in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

Grundprinzip einer Dichtung mit Hilfe eines Kegels und eines Aufnahmekonus ist die Keilwirkung des Kegels, mit deren Hilfe die Flächenpressung zwischen den Bauteilen erhöht werden kann. Abbildung 5.1-3 verdeutlicht dieses Prinzip und seine Umsetzung im Fall des Verschlusskegels.

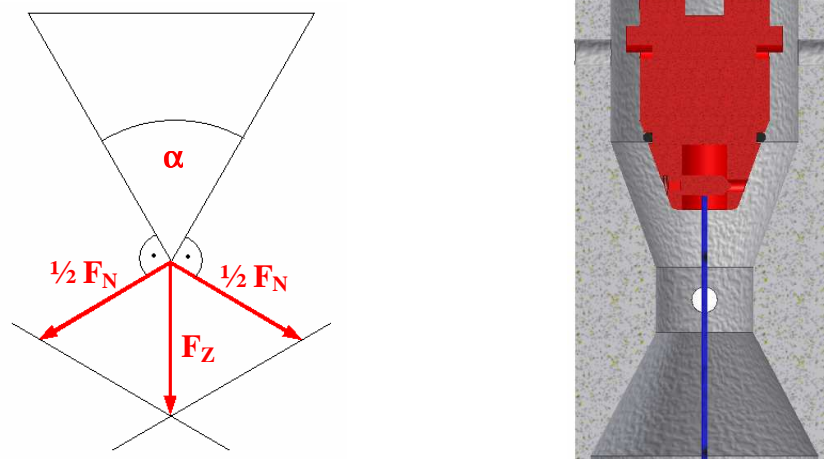


Abbildung 5.1-3: Prinzip der Keilwirkung und Verschluss im Querschnitt

Der Öffnungswinkel α und die am Kegel angreifende Zugkraft F_Z bestimmen die auf die Kontaktfläche einwirkende Normalkraft F_N (im Weiteren: „Anpresskraft“). Den Zusammenhang zwischen dem Öffnungswinkel α und der Anpresskraft F_N verdeutlicht Abbildung 5.1-4. Hierin ist auf der Ordinatenachse der Vergrößerungsfaktor f aufgetragen, um den die Anpresskraft größer als die Zugkraft ist.

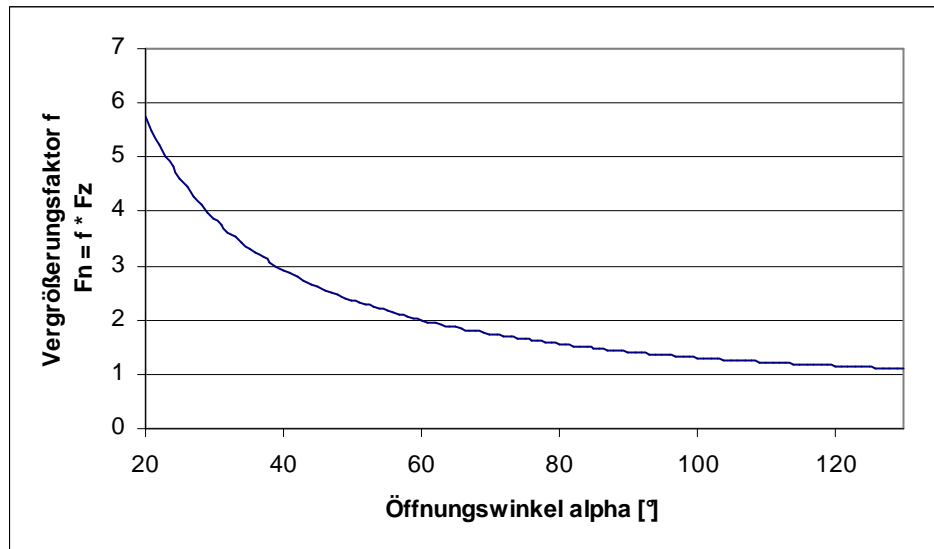


Abbildung 5.1-4: Abhängigkeit zwischen Anpresskraft und Steigungswinkel

Die sichere Abdichtung zwischen Verschlusskegel und Aufnahmekonus wird über einen O-Ring im Verschlusskegel gewährleistet. Je nach Anpresskraft wird dieser Ring verschieden stark verformt und sorgt somit für eine zuverlässige Abdichtung. Um mit möglichst geringen Anpresskräften auskommen zu können, wurde als Dichtung ein O-Ring mit geringer Schnurdicke angestrebt. Geringe Schnurdicken ermöglichen bereits bei relativ geringen Anpresskräften hohe Verformungsgrade und somit eine hohe Dichtwirkung.

Die Konstruktion des Röhrenverschlusses stellt somit ein Zusammenspiel der folgenden Kriterien dar:

Die **Anpresskraft** des Verschlusskegels an die Wandung des Aufnahmekonus ist entscheidend für eine ausreichende Verformung des dichtenden O-Rings. Beeinflusst wird die Anpresskraft durch den Öffnungswinkel und die Zugkraft der Feder.

Die **Zugkraft** der Feder muss zwar stark genug sein, um eine sichere Abdichtung zu gewährleisten, jedoch auch gleichzeitig so schwach, dass eine einfache Handhabung des Verschlusses möglich ist. (Da der Einfluss der Zugfeder mit anderen, bisher nicht genannten Federkräften korreliert, erfolgt die genaue Auslegung der Zugfeder in einem eigenen, nachfolgenden Kapitel).

Die **Einbaulänge** des gesamten Verschlusses hängt insbesondere von den gewählten Öffnungswinkeln ab. Da der Einbauraum insgesamt begrenzt ist (s. Kapitel 4.1), muss eine Verlängerung der Verschlusssegmente zwangsläufig zu Lasten des Mittelsegmentes der Röhren fallen. Da das Mittelsegment jedoch den eigentlichen „Vorratsraum“ der Röhre für die Probe bildet, ist eine kurze Einbaulänge anzustreben.

Auf Grundlage der genannten Anforderungen wurden die Abmaße des Verschlusses folgendermaßen festgelegt (Abbildung 5.1-5):

Verschlusskegel:

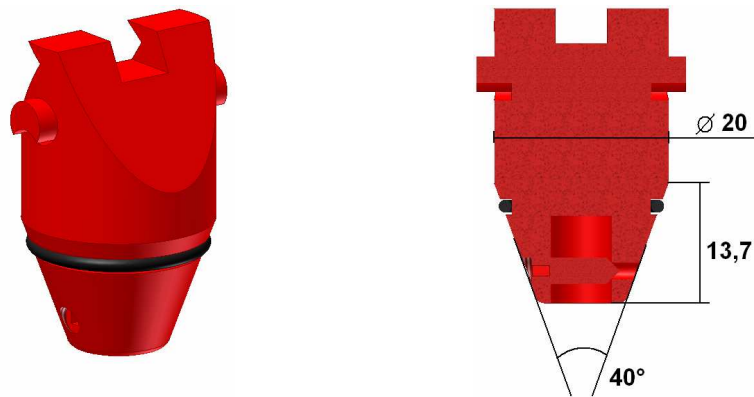


Abbildung 5.1-5: Bemaßung des Verschlusskegels

Aufnahmekonus:

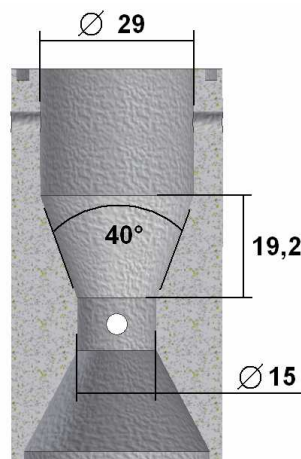


Abbildung 5.1-6: Bemaßung des Aufnahmekonus

Ein Öffnungswinkel von 40° führt zu einem Vergrößerungsfaktor zwischen Zug- und Anpresskraft von ca. 2,9. Die Zugkraft der Feder wird aufgrund der Keilwirkung somit nahezu verdreifacht.

Gleichzeitig ist ein Öffnungswinkel von 40° steil genug um die Einbaulänge der Bauteile ausreichend zu begrenzen und dem durchströmenden Wasser keinen zu hohen Formwiderstand in Folge einer zu starken Umlenkung entgegenzusetzen.

Da der Verschlusskegel unmittelbar mit der Probe in Berührung kommt, wird er, wie die Röhre, aus PVDF gefertigt. In den Verschlusskegel ist eine Nut eingearbeitet, die der Aufnahme eines O-Rings dient. Wie bereits beschrieben, wurde hierfür ein O-Ring mit geringer Schnurdicke gewählt, um auch bei relativ geringen Anpresskräften hohe Verformungsgrade erzielen zu können. Der Ring hat einen Schnurdurchmesser von 1,5 mm und besteht aus dem säurefesten Kautschukderivat EPDM.

Zur Befestigung der Zugfeder besitzt der Verschlusskegel an der Unterseite eine Bohrung, in die von der Seite ein Gewindestift eingeschraubt werden kann. Die Zugfeder wird an dieser Stelle eingehängt (Abbildung 5.1-7)

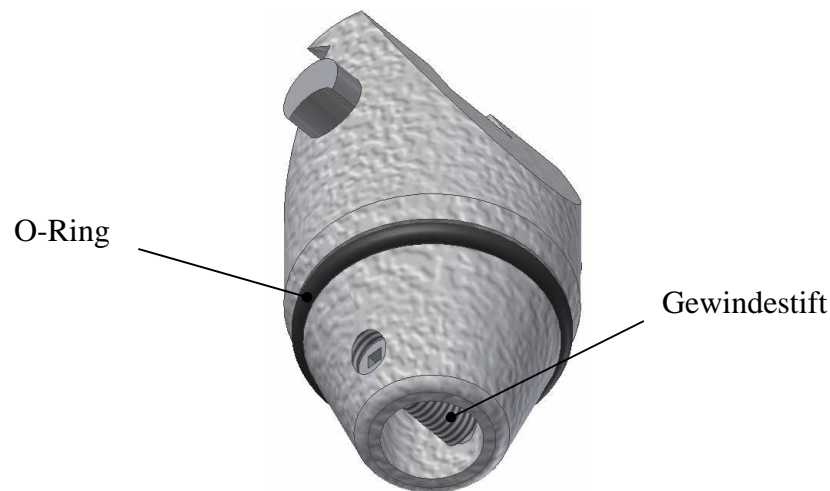


Abbildung 5.1-7: Gewindestift und O-Ring am Verschlusskegel

Abbildung 5.1-8 zeigt den Verschluss in geöffneter und geschlossener Stellung. Aufgrund der gewählten Bauteilmaße liegt die Überdeckung der Dichtflächen bei ca. 7 mm.

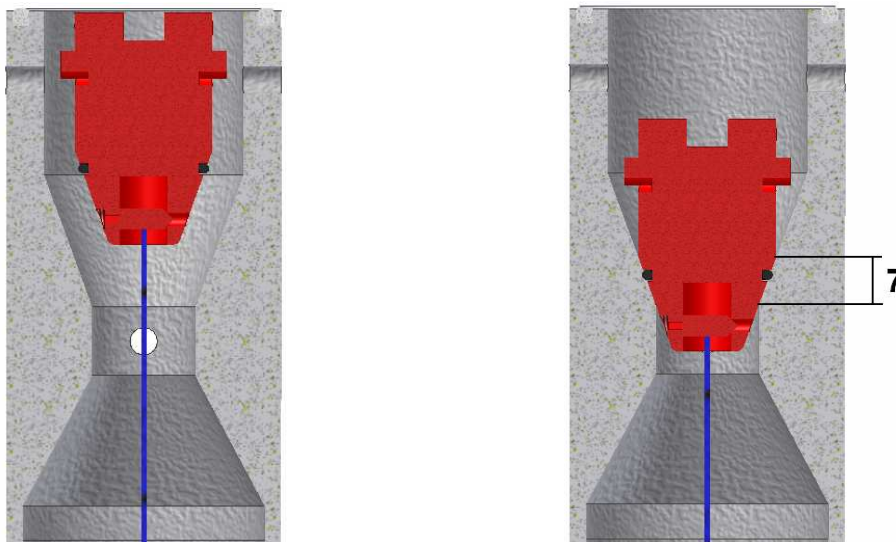


Abbildung 5.1-8: Verschluss geöffnet (links) und geschlossen (rechts)

Neben dem zeitlich exakten Schließen sind die Bauteile des Verschlusses auch verantwortlich für das Offenhalten der Röhre. Wie in Abbildung 5.1-8 zu erkennen, ist die Röhre geöffnet, wenn sich der Verschlusskegel oberhalb des Verschlusskonus befindet. In dieser Stellung muss der Verschlusskegel einerseits zwar durch eine Halterung sicher fixiert (um die Röhre nicht ungewollt zu verschließen), jedoch gleichzeitig auch relativ leicht wieder aus dieser Halterung zu lösen sein. Nur so ist es möglich, das Schließen der Röhre ohne großen Kraftaufwand auszulösen.

Um den Verschlusskegel zu fixieren, wurde daher folgende Halterung entwickelt (Abbildung 5.1-9).

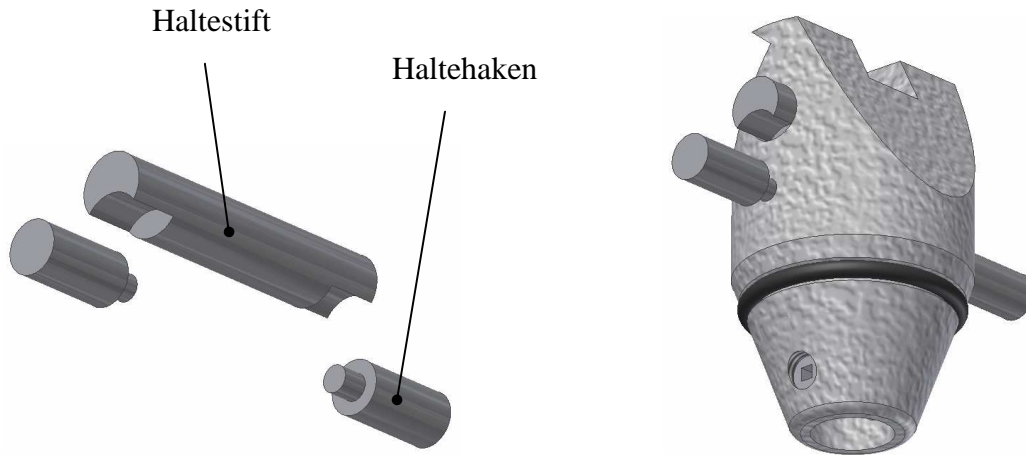


Abbildung 5.1-9: Bauteile der Halterung (links), Halterung am Verschlusskegel (rechts)

Die Halterung besteht aus den Haltehaken, die in die Wandung der Röhre eingepresst werden und dem Haltestift, der in den Verschlusskegel eingepresst wird. Über den Haltestift liegt der Verschlusskegel auf den Haltehaken auf. Zur besseren Übersicht ist in der Abbildung der Verschlusskegel nach oben verschoben.

Wie zu erkennen ist, besitzt der Haltestift an halbkreisförmige Ausfräsungen. Diese verhindern das ungewollte Abrutschen des Verschlusskegels von den Haltehaken.. Ein ungewolltes Auslösen des Verschlusses könnte beispielsweise aufgrund der Erschütterungen beim Zuwasserlassen des AUV auftreten.

Die Halterungsbauteile bestehen aufgrund von Korrosions- und Reinheitsgründen aus V4A-Stahl (1.4571). Um die Reinheit der Probe nicht durch Klebstoffe zu gefährden (alle Bauteile haben Kontakt zur Probe), werden alle Stahlteile mit Hilfe entsprechender Passungen in die Kunststoffbauteile (Röhre, Verschlusskegel) eingepresst.

Die Auslösung des Verschlusses erfolgt, indem der Verschlusskegel von den Haltestiften „hinuntergeschoben“ wird. Die Zugfeder zieht den Verschlusskegel anschließend in den darunterliegenden Aufnahmekonus (genaue Beschreibung in Kapitel 5.1.4).

Im Zusammenbau der Röhre ergibt sich im geöffneten Zustand somit folgendes Bild (Abbildung 5.1-10):

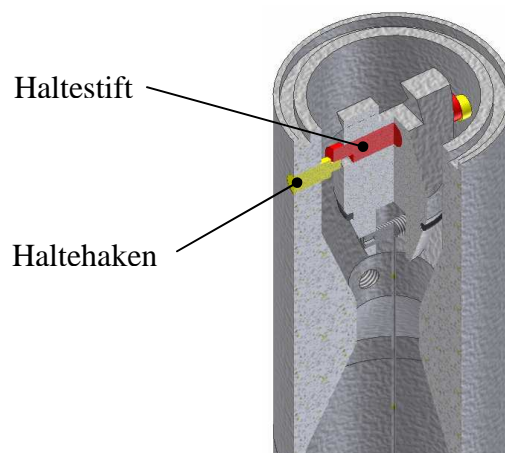


Abbildung 5.1-10: Halterung des Verschlusskegels in der Röhre

5.1.4 Auslösemechanismus

Um den Verschluss der Probenröhren auszulösen, muss der Verschlusskegel von seiner Halterung hinuntergeschoben werden. In der konzeptionellen Auslegung wurde das Arbeitsprinzip dieses Auslösemechanismus auf einen mechanisch angreifenden Auslösehebel festgelegt (Abbildung 5.1-11). Dieser Hebel greift am Verschlusskegel an. Wird das Trommelmagazin bewegt, kann der Verschlusskegel der Bewegung der Röhre nicht weiter folgen und verliert den Kontakt zu den Haltehaken.

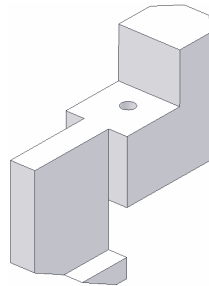


Abbildung 5.1-11: Auslösehebel

Problematisch ist, dass der Verschlusskegel nicht aus der Röhre herausragt, sondern nahezu bündig mit der Stirnseite abschließt (Abbildung 5.1-12). Der Auslösehebel muss daher in die Röhre hineinragen, wobei er jedoch nicht die Bewegung der Röhre behindern oder gar blockieren darf. Der Auslösehebel muss somit beweglich ausgeführt sein.

Um ein sicheres Auslösen zu gewährleisten, besitzt der Verschlusskegel an der Oberseite eine hakenförmige Struktur, in die der Auslösehebel eingreifen kann (Abbildung 5.1-12).



Abbildung 5.1-12: Verschlusskegel in der Röhre (links) und hakenförmige Struktur

Der Auslösehebel ist innerhalb eines speziellen Bauteils beweglich an einer Führungsstange angebracht. Eine Druckfeder sorgt dafür, dass der Hebel über die Schleifebene herausragt. Bei entsprechendem Gegendruck kann er jedoch hinter die Schleifebene eingezogen werden (Abbildung 5.1-13).

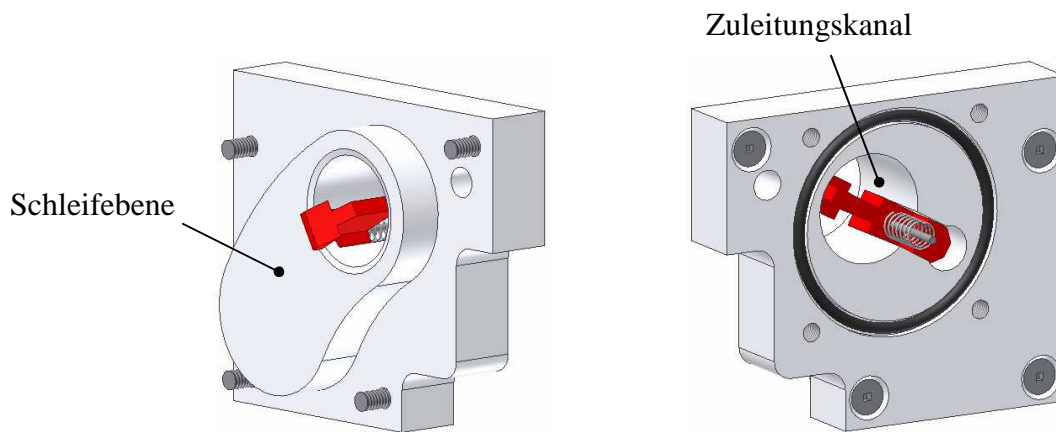
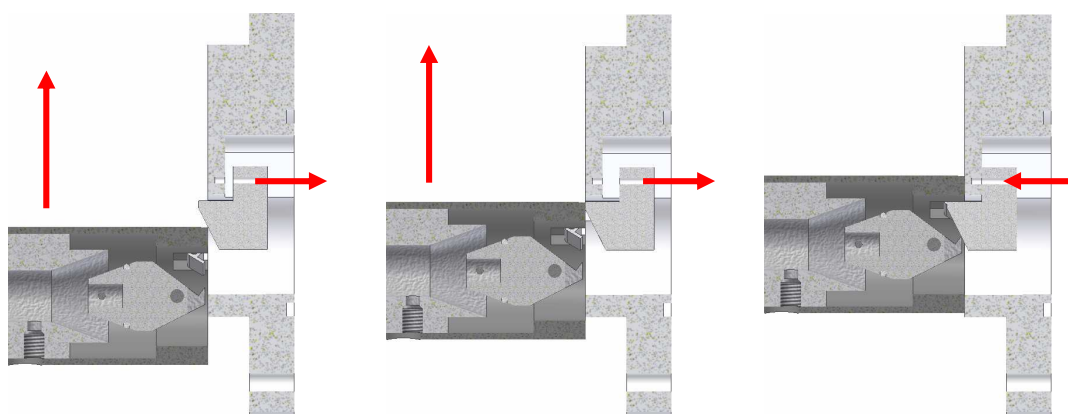


Abbildung 5.1-13: Auslösemechanismus Frontansicht (links), Rückansicht (rechts)

Um die Röhre zu verschließen sobald das Magazin bewegt wird, muss der Auslösehebel innerhalb der Zuleitung zur Röhre sitzen. Alle Bauteile des Auslösemechanismus kommen daher mit potentiellm Probenmaterial in Berührung. Sie unterliegen folglich den Materialeinschränkungen aufgrund der Reinheitsbedingungen.

Abbildung 5.1-14 verdeutlicht die Arbeitsweise des Auslösemechanismus:



Trommelmagazin wird gedreht, Auslösehebel weicht der Bewegung der Röhre aus

Auslösehebel ist komplett zurückgezogen, Röhre gleitet vorbei

Röhre ist vor Zuleitung positioniert und wird durchströmt, Druckfeder hat Auslösehebel in die Röhre eingeschoben

Abbildung 5.1-14: Arbeitsweise des Auslösemechanismus

Ist die Röhre vor der Zuleitung positioniert, steht der Auslösehebel direkt vor dem Haken des Verschlusskegels. Wird das Magazin weiter gedreht, sorgt der Auslösemechanismus automatisch für den Einschluss der Probe.

Abbildung 5.1-15 zeigt die gegenseitige Position des Auslösehebels und des Verschlusskegels wenn die Röhre vor der Zuleitung positioniert ist. (Die Sichtbarkeit einiger Bauteile wurde für diese Abbildung unterdrückt)

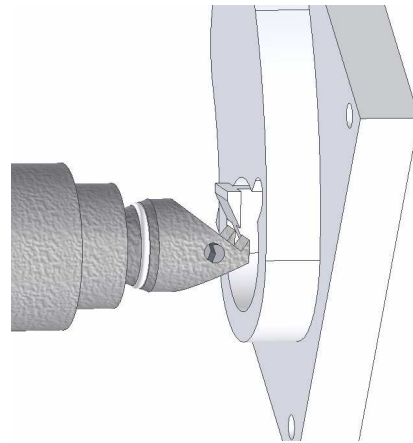


Abbildung 5.1-15: Position von Auslösehebel und Verschlusskegel

5.1.5 Einlass-, Auslassseite der Röhre

Einlass- und Auslassseite der Röhren unterscheiden sich stark voneinander. Hauptgrund hierfür ist die geforderte Längenflexibilität, die bereits in der Konzeptphase als nötig festgelegt wurde (s. Kapitel 4.7). Jede der Röhren muss in ihrer Länge flexibel sein, um stets sicheren Kontakt zu den Schleifplatten des Wasserprobennehmers zu haben.

Die Längenflexibilität kann über ein Endstück erreicht werden, das entlang der Röhrenlängsachse beweglich ist (Abbildung 5.1-16)

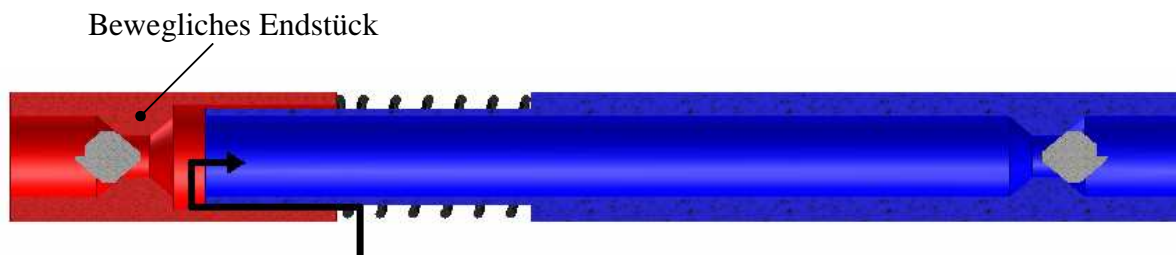


Abbildung 5.1-16: Längenflexible Röhre nach konzeptioneller Auslegung

Zentrale Anforderung während der Entwicklung war die Reinheit der eingeschlossenen Probe. Die während der konzeptionellen Auslegung entwickelte Röhre (Abbildung 5.1-16) entspricht nicht dieser Anforderung, da auch im verschlossenen Zustand zwischen dem beweglichen Endstück (rot) und der eigentlichen Röhre (blau) ein Spalt bestehen bleibt, über den Wasser in die Röhre eindringen könnte (schwarzer Pfeil). Eine zweckmäßigere und für die Probe sicherere Aufteilung zeigt dagegen Abbildung 5.1-17:



Abbildung 5.1-17: Längenflexible Röhre in überarbeiteter Ausführung

Die Abbildung zeigt die Röhre im verschlossenen Zustand, d.h. der Verschlusskegel sitzt im Aufnahmekonus. Der linke Aufnahmekonus ist nicht mehr im beweglichen Endstück integriert, sondern Bestandteil des blau eingefärbten Röhrenkörpers. Es ist zu erkennen, dass hierdurch ein zusammenhängendes und abgeschlossenes Volumen gebildet wird. Ein Eindringen von Wasser ist nun nicht mehr möglich. Als weiterer Vorteil ist die Druckfeder durch das bewegliche Endstück abgedeckt, was die Handhabung der Röhre erleichtert.

Eine weitere Vereinfachung kann dadurch erreicht werden, dass an dieser Stelle Einlass- und Auslassseite für die Durchströmung der Röhre definiert werden. Es ist dabei zweckmäßig, das Ende der Röhre mit dem beweglichen Endstück als Auslassseite festzulegen, da alle auslassseitigen Bauteile nicht den Reinheitsanforderungen entsprechen müssen.

Es ergibt sich somit folgende Aufteilung (Abbildung 5.1-18):

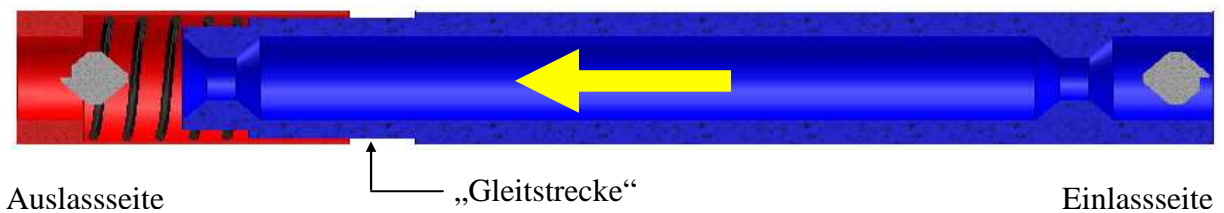


Abbildung 5.1-18: Festlegung der Ein- und Auslassseite

Wie zu erkennen ist, ist die Einlassseite einfacher aufgebaut als die Auslassseite. Bewegliche Bauteile sind einlassseitig nicht vorhanden, was die Sicherheit der Probe gegen Verunreinigung wesentlich erhöht.

An der Auslassseite der Röhre musste neben dem Aufnahmekonus des Verschlusses noch eine Gleitstrecke (Abbildung 5.1-18) für das bewegliche Endstück, sowie Raum für die Integration der Druckfeder vorgesehen sein. Einlass- und Auslassseite unterscheiden sich daher grundlegend voneinander.

5.1.5.1 Einlassseite

Den Aufbau des einlassseitigen Verschlusssegments zeigt Abbildung 5.1-19.

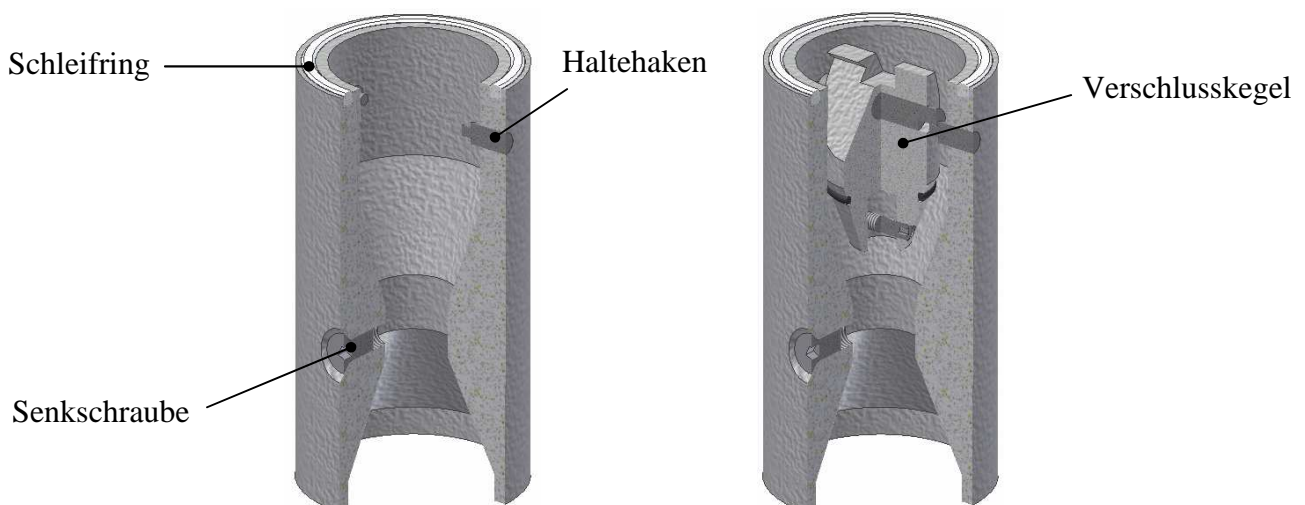


Abbildung 5.1-19: Einlassseite ohne (links) und mit Verschlusskegel (rechts)

Der Großteil des abgebildeten Röhrenbauteils besteht aufgrund der Reinheitsanforderungen aus PVDF. In diesen PVDF Körper sind die Haltehaken für den Verschlusskegel, sowie eine Senkschraube zur Entnahme der Probe eingebaut. Da sich im Bereich des Aufnahmekonus die größte Materialstärke befindet, besteht nur an dieser Stelle die Möglichkeit ein Gewinde einzuschneiden.

Stirnseitig ist ein Schleifring aus PTFE eingepresst, der der Reibungsminimierung dient.

5.1.5.2 Auslasseite

Die einzelnen Bauteile der Auslasseite zeigt Abbildung 5.1-20.

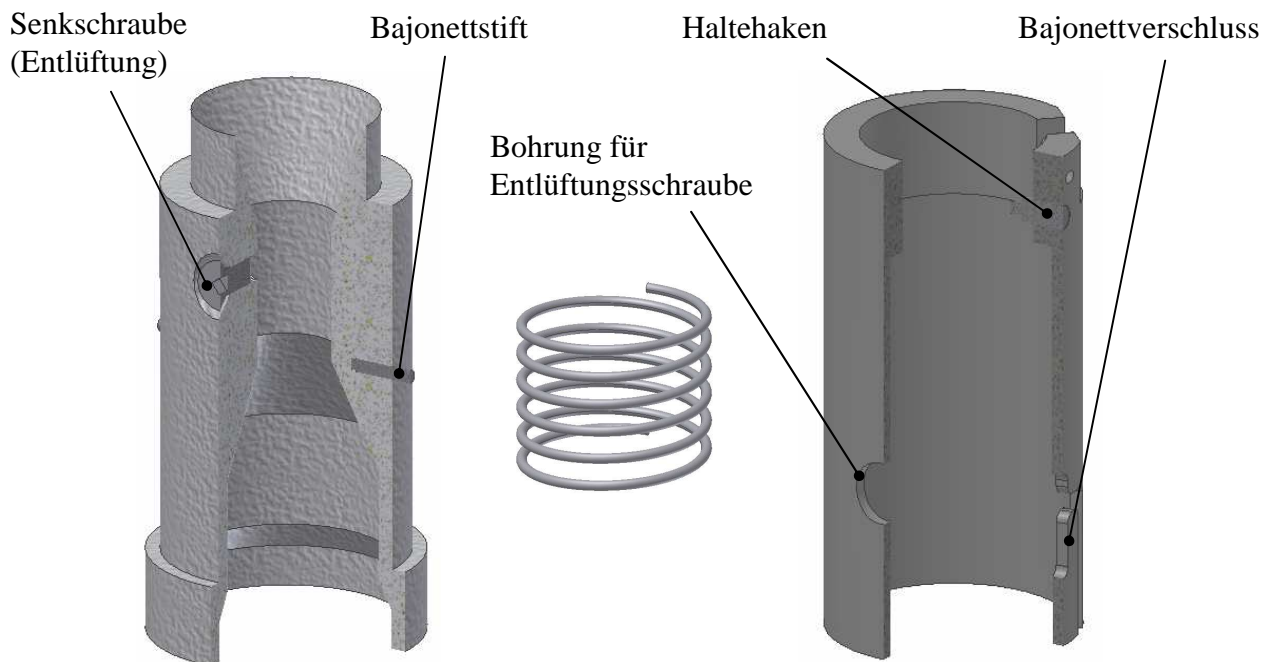


Abbildung 5.1-20: Einzelteile d. Auslasseite: v.l.n.r. Verschlusssegment, Druckfeder, Endstück

Wie in der Einlasseite ist auslassseitig ebenfalls eine Senkschraube eingebaut. Bei der Entnahme der Probe aus der Röhre dient diese Schraube der Entlüftung. Um die Schraube auch bei aufgesetztem Endstück öffnen zu können, ist im Endstück eine Bohrung enthalten. Die eingepressten Stifte sind Teil eines Bajonettverschlusses. Mit Hilfe dieses Bajonettverschlusses sind das Endstück und die eigentliche Röhre verdrehsicher und trotzdem beweglich miteinander verbunden.

Um die Röhre offen zu halten, muss der Verschlusskegel oberhalb des Aufnahmekonus fixiert werden. Die hierzu nötigen Haltehaken sind im Endstück eingepresst.

Die Druckfeder sorgt unterhalb des Endstückes für den nötigen Anpressdruck der Röhre an die Schleifplatten.

Im Zusammenbau ergibt sich somit folgendes Bild (Abbildung 5.1-21):

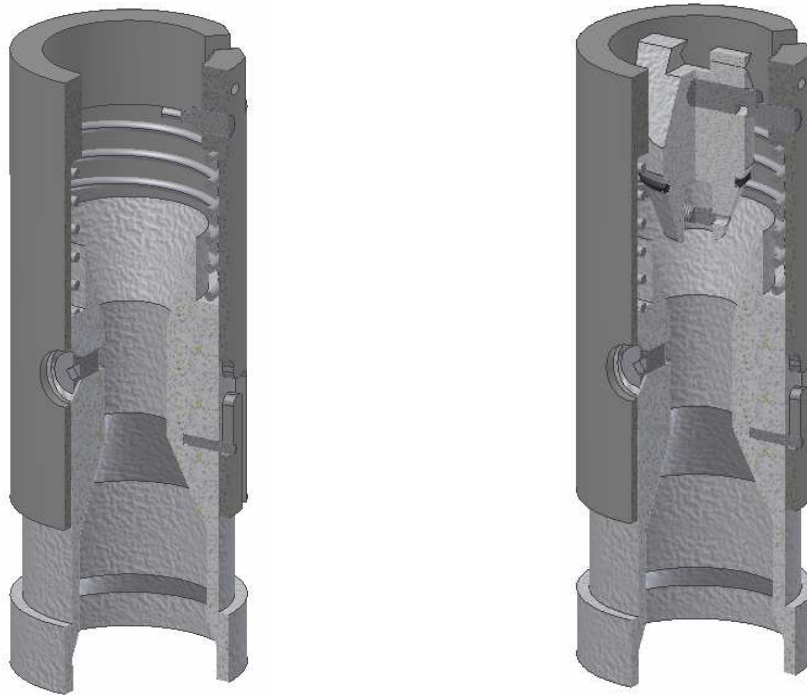


Abbildung 5.1-21: Auslassseite ohne (links) und mit Verschlusskegel (rechts)

Die Bewegung des Endstücks wird mit Hilfe eines Bajonettverschlusses in einer definierten Bahn gehalten. Der Bajonettverschluss besteht aus einem im Endstück eingefrästen Schlitz und den in der Röhre eingepressten Bajonettstiften. Er ermöglicht die folgenden Stellungen des Endstücks (Abbildung 5.1-22):

- Position gelb
Zum Ein- und Ausbau der Röhren in den Wasserprobennehmer wird der Bajonettverschluss in der gelb markierten Position fixiert.
- Position blau:
Wird die Röhre aus dem Wasserprobennehmer ausgebaut, nimmt der Bajonettverschluss die blau markierte Position ein. In dieser Position erfolgt die Entnahme der Probe aus der Röhre.
- Position rot:
Während des Einsatzes der Röhren im Wasserprobennehmer befinden sich die Bajonettstifte im rot umrandeten Bereich. Es besteht somit die Möglichkeit, die Gesamtlänge der Röhre sowohl zu verlängern, als auch zu verkürzen (von der Mitte des rot umrandeten Bereichs ca. +/- 5 mm).

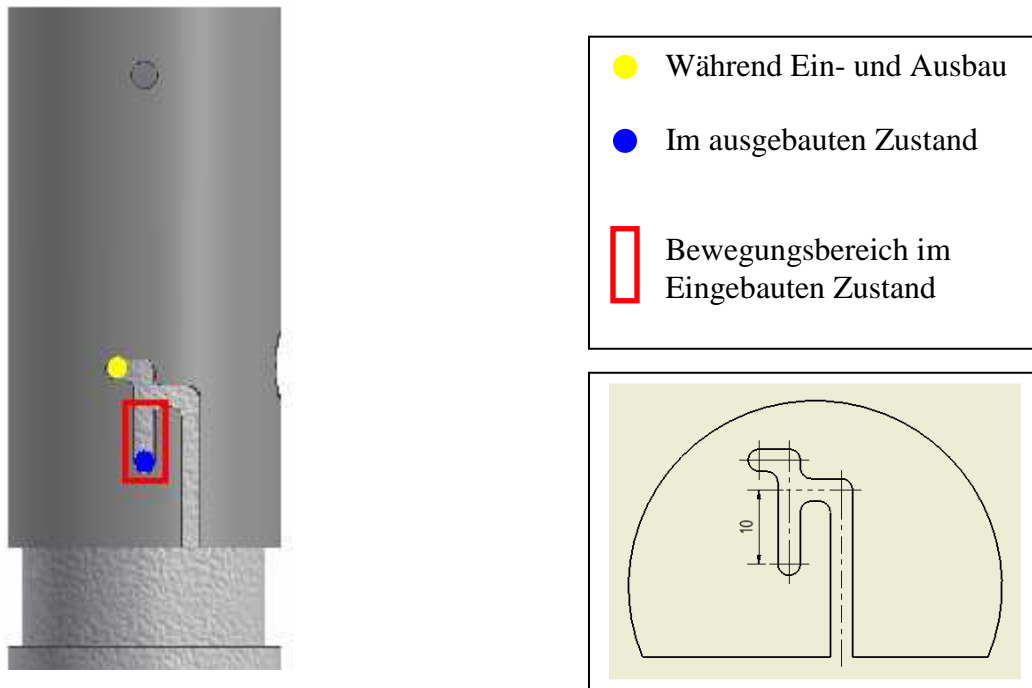


Abbildung 5.1-22: Bajonettverschluss

5.1.6 Röhrenkörper und Probenvolumen

Die Bauteile des Verschlusses tragen relativ wenig zum Innenvolumen der Probenröhre bei. Entsprechend des Aufbaus jeder Röhre aus den drei miteinander verschweißten Segmenten

Verschlusssegment – Mittelsegment – Verschlusssegment

wird der Großteil des Innenvolumens durch das röhrenförmige Mittelsegment gebildet (s. Abbildung 4.5-1).

In der konzeptionellen Auslegung der Röhre wurde bereits festgelegt, dass das Mittelsegment aus einem standardisierten PVDF Rohrstück bestehen soll. Da der Innendurchmesser mit 35,2 mm bereits definiert ist, kann die Variation des Innenvolumens nur noch über die Länge dieses Rohrstücks erfolgen. In der konzeptionellen Auslegung wurde zudem die maximale Länge einer kompletten Röhre (inkl. Endstück) auf 430 mm begrenzt und das anzustrebende Volumen auf ca. 200 ml festgelegt. Aufgrund dieser Vorgaben ergibt sich somit die Länge der einzelnen Segmente (Abbildung 5.1-23), sowie der kompletten Röhre (Abbildung 5.1-24):

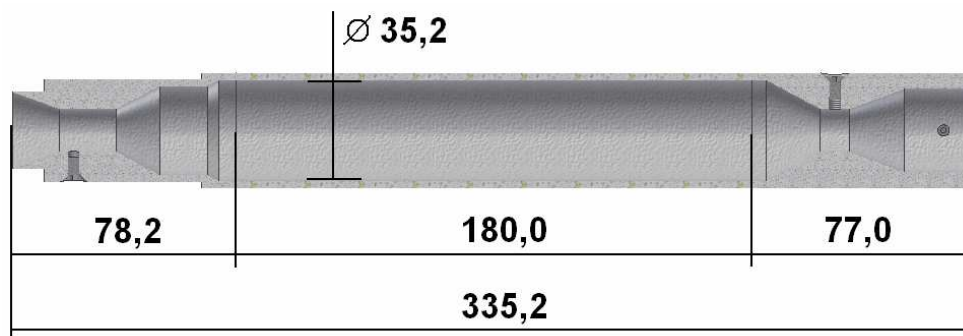


Abbildung 5.1-23: Länge der einzelnen Röhrensegmente



Abbildung 5.1-24: Länge der kompletten Röhre

Das für den Einschluss der Probe nutzbare Innenvolumen der Röhre setzt sich daher wie folgt zusammen (Tabelle 5.1.1):

Probenvolumen	
Bauteil	Volumen [ml]
Verschlusssegment auslassseitig	28,3
Verschlusssegment einlassseitig	14,7
Mittelsegment	175,2
Summe:	218,2

Tabelle 5.1.1: Verteilung des Röhreninnenvolumens nach Segmenten

5.1.7 Federauslegung

Innerhalb der Röhren sind jeweils eine Zug- sowie eine Druckfeder eingebaut. Diese Federn sind für die Funktion der Röhren von entscheidender Bedeutung, wobei sich ihre Kräfte teilweise gegenseitig beeinflussen. Die Auslegung dieser Federn hat daher großen Einfluss auf den weiteren Konstruktionsverlauf des gesamten Wasserprobennehmers.

Mit Hilfe der Zugfeder werden die beiden Verschlusskegel in die Aufnahmekonen gezogen. Die Druckfeder presst das Endstück der Röhre gegen die Schleifplatte. In Abbildung 5.1-25 sind beide Federn rot eingefärbt.

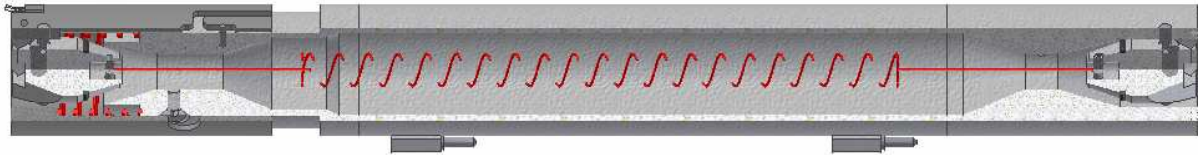


Abbildung 5.1-25: Federn innerhalb der Röhren

Wie zu erkennen ist, wird der auslassseitige Verschlusskegel am beweglichen Endstück eingehängt. In diesem Zustand arbeitet daher die Kraft der Zugfeder gegen die der Druckfeder. Ist die Röhre dagegen geschlossen, d.h. sitzen die Verschlusskegel in den Aufnahmekonen, wirkt die komplette Kraft der Druckfeder auf das Endstück. An dieser Stelle war daher eine genaue Abstimmung der Federeigenschaften nötig.

Grundlage dieser Abstimmung war neben der sicheren Funktion der Röhren auch ihre Bedienfreundlichkeit. Die Auslegung der Federn erfolgte daher nach dem Grundsatz „so stark wie nötig, so schwach wie möglich“.

Für die Federauslegung von Bedeutung sind die verschiedenen Zustände die die Röhren annehmen können und in denen jeweils unterschiedliche Federkräfte wirken. Die folgenden Abbildungen zeigen die verschiedenen Zustände einer Röhre, die im Verlauf eines Tauchgangs in dieser Reihenfolge durchlaufen werden:

1. Röhre in geöffnetem Zustand, Vor Einbau in den Wasserprobennehmer (Bajonettverschluss: Position blau)



- Stauchung der Druckfeder: minimal
- Längung der Zugfeder: maximal
- Zugfeder wirkt gegen Druckfeder: ja

2. Röhre in geöffnetem Zustand, Während des Einbaus in Wasserprobennehmer (Bajonettverschluss: Position gelb)



- Stauchung der Druckfeder: maximal
- Längung der Zugfeder: mittel
- Zugfeder wirkt gegen Druckfeder: ja

3. Röhre in geöffnetem Zustand, Im Wasserprobennehmer eingebaut
(Bajonettverschluss: Position rot)



- Stauchung der Druckfeder: mittel
- Längung der Zugfeder: mittel
- Zugfeder wirkt gegen Druckfeder: ja

4. Röhre in geschlossenem Zustand, Im Wasserprobennehmer eingebaut
(Bajonettverschluss: Position rot)



- Stauchung der Druckfeder: mittel
- Längung der Zugfeder: minimal
- Zugfeder wirkt gegen Druckfeder: nein

5. Röhre in geschlossenem Zustand, Während des Ausbaus aus Wasserprobennehmer
(Bajonettverschluss: Position gelb)



- Stauchung der Druckfeder: maximal
- Längung der Zugfeder: minimal
- Zugfeder wirkt gegen Druckfeder: nein

6. Röhre in geschlossenem Zustand, Nach Ausbau aus dem Wasserprobennehmer
(Bajonettverschluss: Position blau)



- Stauchung der Druckfeder: minimal
- Längung der Zugfeder: minimal
- Zugfeder wirkt gegen Druckfeder: nein

Innerhalb der beschriebenen Zustände sind mehrere Grenzfälle zu identifizieren, anhand derer die Federeigenschaften definiert werden können. Es sind dies:

Zustand 1

In Zustand 1 ist die Röhre geöffnet. Die Kraft der Zugfeder wirkt somit der Druckfeder entgegen. Der Bajonettverschluss befindet sich jedoch in Stellung blau. Die Stauchung der Druckfeder und damit ihre Druckkraft ist minimal, während die Längung der Zugfeder und damit ihre Zugkraft gleichzeitig maximal ist. Die Druckfeder ist dementsprechend stärker als die Zugfeder auszulegen.

Zustand 4:

Nach dem Einschluss der Probe sitzen die Verschlusskegel in den Aufnahmekonen. Die Längung der Zugfeder und damit ihre Zugkraft ist daher minimal. Die Zugkraft muss jedoch ausreichen, um den nötigen Anpressdruck zur sicheren Abdichtung der Röhren zu gewährleisten.

In diesem Zustand wirkt zudem die Kraft der Druckfeder komplett auf das Endstück. Der Anpressdruck der Röhrenstirnseiten an die Schleifplatten und damit die Reibkraft ist demnach maximal. Je kleiner diese Reibkräfte sind, desto kleiner kann auch der Antrieb des Trommelmagazins dimensioniert werden.

Zustand 5:

Zum Ausbau der Röhren muss der Bajonettverschluss des Endstücks in Position gelb gebracht werden. Die Stauchung der Druckfeder wird hierbei maximal. Da zudem die Zugfeder nicht mehr gegen die Druckfeder arbeitet (Verschlusskegel sitzen im Aufnahmekonus), wirkt in diesem Zustand die maximale Druckkraft. Trotzdem muss es möglich sein, das Endstück von Hand gegen die Kraft der Druckfeder zu bewegen.

Die Grenzwerte der Federkräfte wurden experimentell bestimmt. Entscheidende Kriterien bei der Festlegung dieser Grenzen war die Dichtheit des Röhrenverschlusses und die Handhabung der Röhren.

Zugfeder:

Abbildung 5.1-26 zeigt die Federwege der Zugfeder:

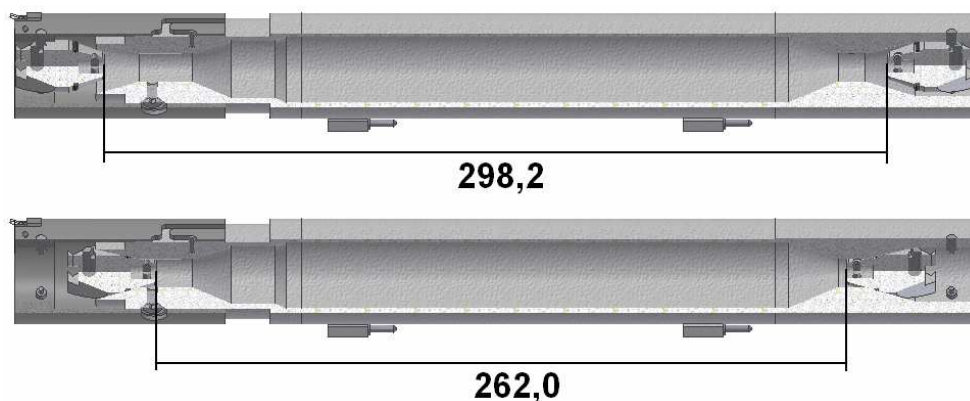


Abbildung 5.1-26: Auslenkung der Zugfeder

Aufgrund experimenteller Untersuchungen zur Dichtheit von O-Ringen wurde die angestrebte Anpresskraft zwischen Verschlusskegel und Aufnahmekonus auf ca. 24 N festgelegt. Die Keilwirkung bei einem Öffnungswinkel des Aufnahmekonus von 40° zieht einen Verstärkungsfaktor von 2,9 nach sich (s. Abbildung 5.1-4). In ihrer minimalen Auslenkung von 262,0 mm (Röhre geschlossen) muss die Zugfeder demnach mindestens 8,3 N Zugkraft aufbringen können.

Sind vor dem Schließen der Röhre die Verschlusskegel in ihren Halterungen eingehängt, so vergrößert sich die Auslenkung der Zugfeder auf 298,2 mm. Um hierbei keine unnötig großen Kräfte aufzubauen, ist es zweckmäßig, eine Zugfeder mit möglichst geringer Federkonstante zu wählen.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine Zugfeder der Firma Gutekunst gewählt. Da die Feder mit der Probe in Berührung kommt, muss sie den Reinheitsanforderungen entsprechen und deshalb aus V4A Stahl (1.4571) gefertigt sein. Die Federkonstante liegt bei lediglich 0,065 N/mm.

Im geschlossenen Zustand, d.h. bei einer Auslenkung von 262,0 mm wird eine Zugkraft von 10,0 N erreicht. Die Anpresskraft am Umfang des Verschlusskegels beträgt somit ca. 29 N. Im Fall der größeren Auslenkung von 298,2 mm steigt die Zugkraft auf 12,4 N an.

Druckfeder:

Abbildung 5.1-27 zeigt die Federwege der Druckfeder:

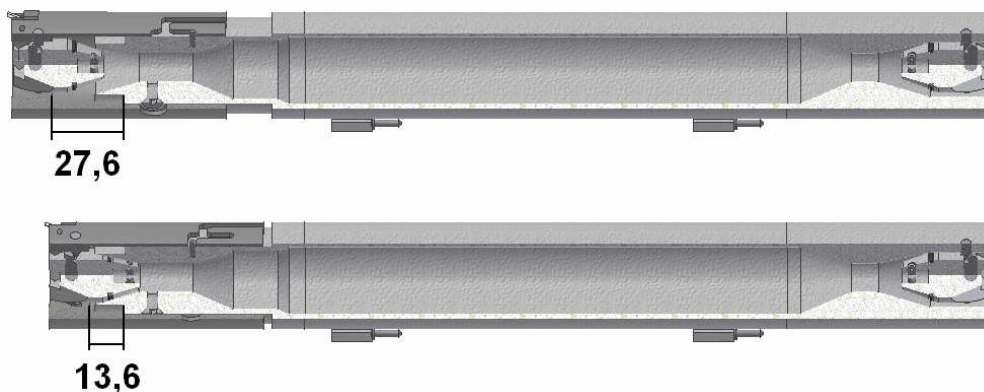


Abbildung 5.1-27: Auslenkung der Druckfeder

Um die Druckfeder zu stauchen, muss das Endstück von außen umfasst und gegen die Kraft der Feder bewegt werden. Experimentelle Untersuchungen mit Probanden zeigten, dass bei der Umfassung eines glatten Kunststoffrohres (PVC) eine Kraft von ca. 35 N ohne Schwierigkeiten aufzubringen ist. Dieser Wert kennzeichnet daher die maximale Federkraft, die die Druckfeder bei maximaler Stauchung auf 13,6 mm Länge entwickeln darf.

Die minimale Auslenkung der Druckfeder beträgt hingegen 27,6 mm. Die Druckkraft lässt somit nach. Sind die Verschlusskegel eingehängt, erreicht jedoch die Zugfeder, deren Kraft entgegenwirkt, in dieser Stellung ihre Maximalkraft von 12,4 N (s. Zustand 1). Auch bei einer Auslenkung von 27,6 mm muss daher noch eine ausreichend hohe Restfederkraft von mehr als 12,4 N zur Verfügung stehen.

Die gewählte Feder wurde ebenfalls durch die Firma Gutekunst hergestellt. Obwohl diese Feder nicht mit der Probe in Berührung kommt, wurde sie aus Korrosionsschutzgründen ebenfalls aus V4A-Stahl (1.4571) gefertigt. Die Federkonstante liegt bei 0,891 N/mm.

Bei einer Stauchung auf 13,6 mm Länge entwickelt diese Feder eine Kraft von 34,2 N. Bei einer Länge von 27,6 mm liegt die Druckkraft dagegen bei 23,5 N
 Zusammenfassend ergibt sich die in Tabelle 5.1.2 gezeigte Aufstellung der wichtigsten Federeigenschaften:
 (Aus Umfangsgründen soll hier auf die Angabe von Daten wie Drahtstärke, Klemmlänge, etc. verzichtet werden)

	Auslenkung		Federkonstante
	Minimum	Maximum	
Zugfeder	10,0 N (Auslenkung: 262,0)	12,4 N (Auslenkung: 298,2)	0,065 N/mm
Druckfeder	21,7 N (Auslenkung: 27,6)	34,2 N (Auslenkung: 13,6)	0,891 N/mm

Tabelle 5.1.2: Aufstellung der Federeigenschaften



Abbildung 5.1-28: Druckfeder und Endstück

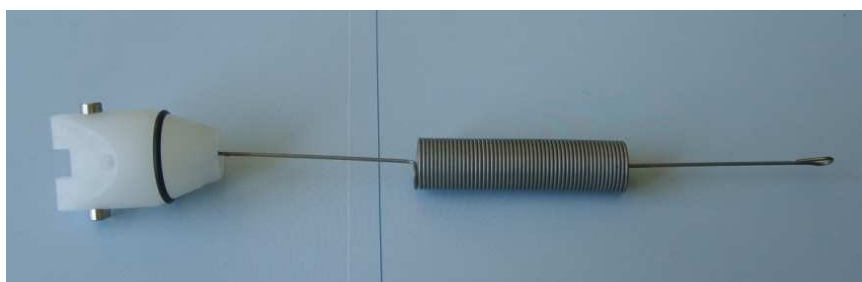


Abbildung 5.1-29: Zugfeder und Verschlusskegel

Mit den gewählten Federn ist es den Röhren möglich, jeden der beschriebenen Zustände anzunehmen. Die Funktion der Röhren ist somit sichergestellt.

5.1.8 Dichtungsprinzip an der Einlassseite

Um die Reinheit der Probe zu gewährleisten, darf, insbesondere während der Durchströmung der Röhre, keine Undichtheit zwischen der Stirnseite der Röhre und der Schleifplatte bestehen. Über eine Undichtheit an der Stirnseite könnte Wasser aus dem Inneren des AUV in die Röhre eindringen und die Probe kontaminieren.

Das bewegliche Endstück stellt den ständigen Kontakt der Röhrenstirnseiten mit den Schleifplatten des Wasserprobennehmers sicher. Gestaltabweichungen 1. Ordnung, wie z.B. eine leichte Biegung der Schleifplatte, können somit ausgeglichen werden. An der Stirnseite der Röhre (einlassseitig) befindet sich zur Minimierung der Reibung ein Schleifring aus PTFE. Dieser Kunststoff ist jedoch nur wenig elastisch. Kratzer oder Riefen in den Schleifplatten, Gestaltabweichungen höherer Ordnung, führen daher zwangsläufig zu Undichtheiten.

Da für derartige Dichtungsprobleme technische Lösungen nur schwer realisierbar sind, kommt an dieser Stelle ein physikalisches Dichtungsprinzip zum Einsatz.

Hauptbauteil dieses Dichtungsprinzips ist der (einlassseitige) Verschlusskegel. Obere und untere Hälfte des Verschlusskegels unterscheiden sich stark voneinander. Die untere Hälfte läuft konisch zusammen und ist Teil des Verschlusses. Die obere Hälfte besitzt einen „Haken“, der Teil des Auslösemechanismus ist. Die Oberseite dieses Hakens ist flächig ausgeführt. Ist die Röhre geöffnet, d.h. ist der Verschlusskegel in seiner Halterung eingehängt, schließt diese Fläche nahezu bündig mit der Stirnseite der Röhre ab (Abbildung 5.1-30). Die Fläche (im Weiteren „Prallfläche“ genannt) steht senkrecht zur Strömungsrichtung.



Abbildung 5.1-30: Prallfläche am Verschlusskegel (links), Position in der Röhre (rechts)

Die Prallfläche bietet dem vorbeifließenden Wasser einen verhältnismäßig großen Widerstand. Die Folge dieses Widerstandes ist der Aufbau eines Staudrucks. Der Druckverlauf ähnelt dabei dem Verlauf an einer sog. Normblende, die in der Strömungstechnik zur Durchflussmessung eingesetzt wird (Abbildung 5.1-31).

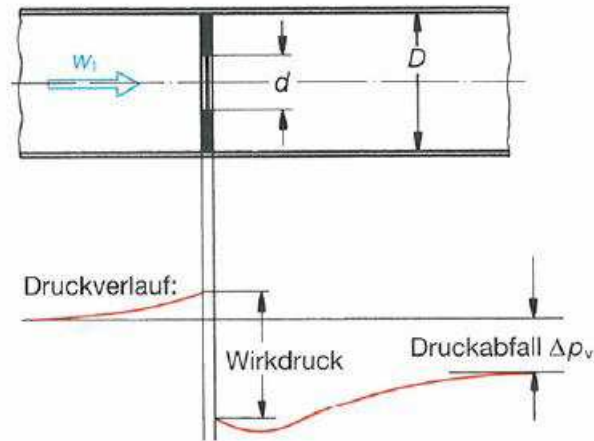


Abbildung 5.1-31: Druckverlauf an einer Normblende, Quelle: [16]

Es ist zu erkennen, dass der Druck vor der Normblende ansteigt. Im Fall der Röhren sorgt die Prallfläche daher für einen Anstieg des Innendrucks im Bereich der Röhrenstirnseite (Abbildung 5.1-32)



Abbildung 5.1-32: Druckverlauf am Röhreneinlass

Der Innendruck der Röhre steigt dabei über den Druck des sie umgebenden Wassers. Aufgrund dieses Effekts kann während der Durchströmung kein Wasser von Außen in die Röhre eindringen. Unebenheiten wie Kratzer können somit zwar zu Undichtheiten im Bereich der Stirnfläche führen, aufgrund des Dichtungsprinzips ist die Reinheit der Probe jedoch trotzdem gewährleistet.

Der experimentelle Nachweis dieses Dichtungsprinzips wird in Kapitel 7.1 beschrieben.

5.1.9 Fixierung im Wasserprobennehmer

Die Bewegung der Röhren erfolgt in einem Trommelmagazin. Die Befestigung der Röhren in diesem Magazin muss einerseits sicher, andererseits jedoch auch leicht lösbar sein. Zudem war die thermische Ausdehnung von Kunststoffen zu beachten. Die Halterung muss der Röhre daher einen gewissen Bewegungsspielraum einräumen.

Zum Zweck der Fixierung sind an der Außenseite der Röhren Halterungen angeschweißt (Abbildung 5.1-33).

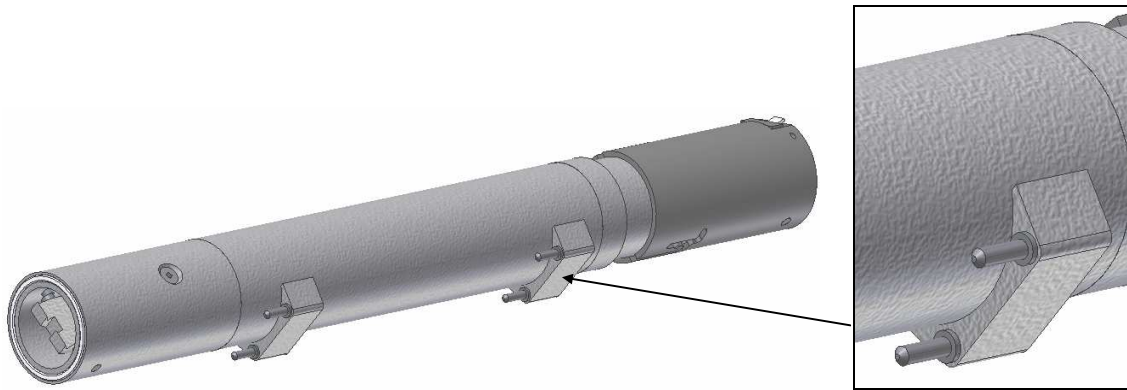


Abbildung 5.1-33: Halterungen an der Röhre

Die Halterungen bestehen aus zwei Kunststoffteilen aus PVDF („Halteklotz“), die an die Außenhaut der Röhren angeschweißt wurden. In jedes dieser Kunststoffteile sind je zwei Stahlstifte eingeschraubt, die die eigentliche Halterung bilden. Im Trommelmagazin sind entsprechende Aufnahmebohrungen für diese Stifte enthalten (s. Kapitel 5.2).

5.1.10 Gesamtüberblick Probenröhre

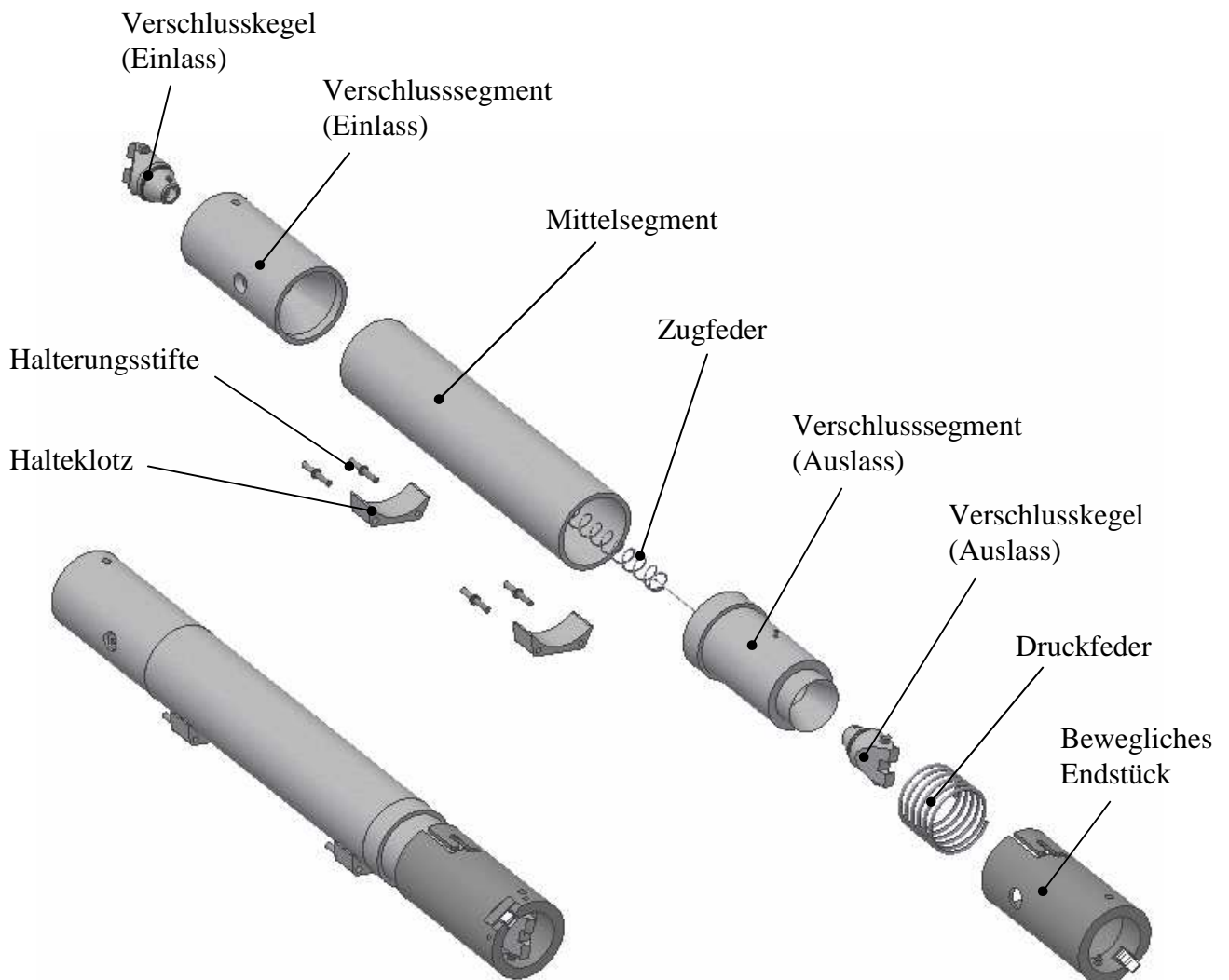


Abbildung 5.1-34: Zusammenbau- und Explosionsdarstellung der Röhren

5.2 Trommelmagazin

Um mehrere Proben entnehmen zu können, sind im Wasserprobennehmer in zwei Trommelmagazinen jeweils elf Röhren untergebracht. Mit Hilfe dieser Magazine werden die Röhren nacheinander vor der Zuleitung positioniert.

Das Trommelmagazin ist dreiteilig aufgebaut und besteht aus dem zentralen Trommelkörper und zwei Naben (Abbildung 5.2-1).

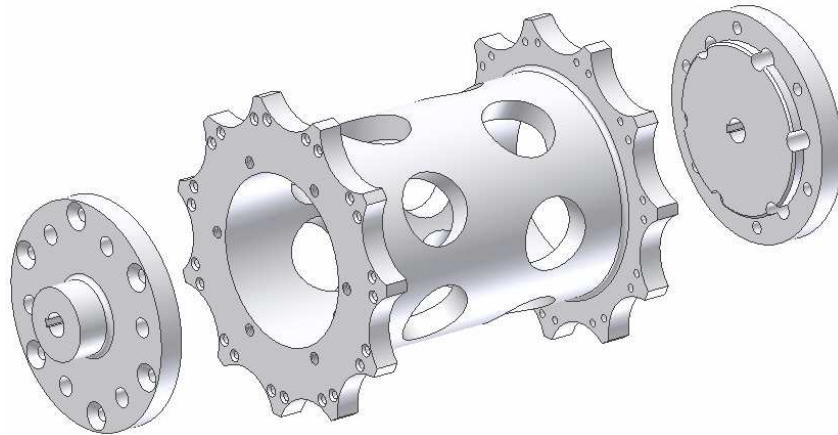


Abbildung 5.2-1: Aufbau des Trommelmagazins

In dem Trommelkörper sind die Aufnahmebohrungen für die Halterung der Röhren eingebracht. Die Vertiefungen entlang des Umfangs dienen dem präzisen Einlegen der Röhren. Trommelkörper und Naben werden stirnseitig miteinander verschraubt. Damit hierbei kein abgeschlossener Raum entsteht, sind Entlüftungsbohrungen enthalten. Abbildung 5.2-2 zeigt dazu ein teilweise bestücktes Trommelmagazin.

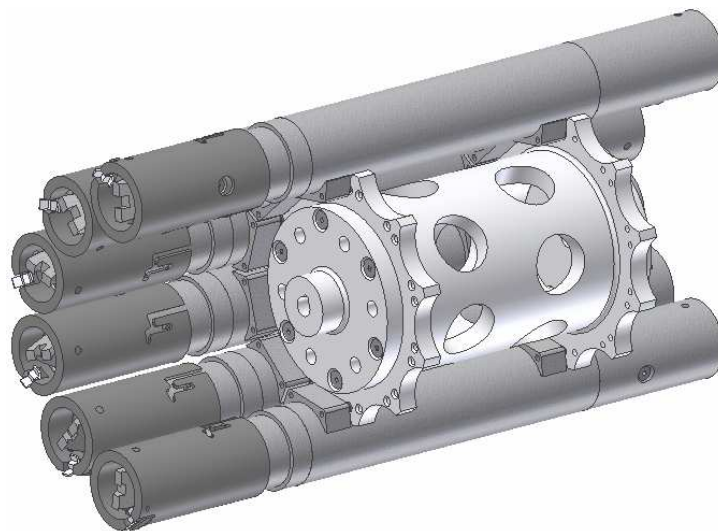


Abbildung 5.2-2: Teilweise bestücktes Trommelmagazin

Die Fixierung der Röhren in diesem Magazin erfolgt über Stahlstifte die an der Außenseite der Röhren angebracht sind. Der Trommelkörper verfügt über entsprechende Aufnahmebohrungen zur Halterung dieser Stifte (Abbildung 5.2-3)

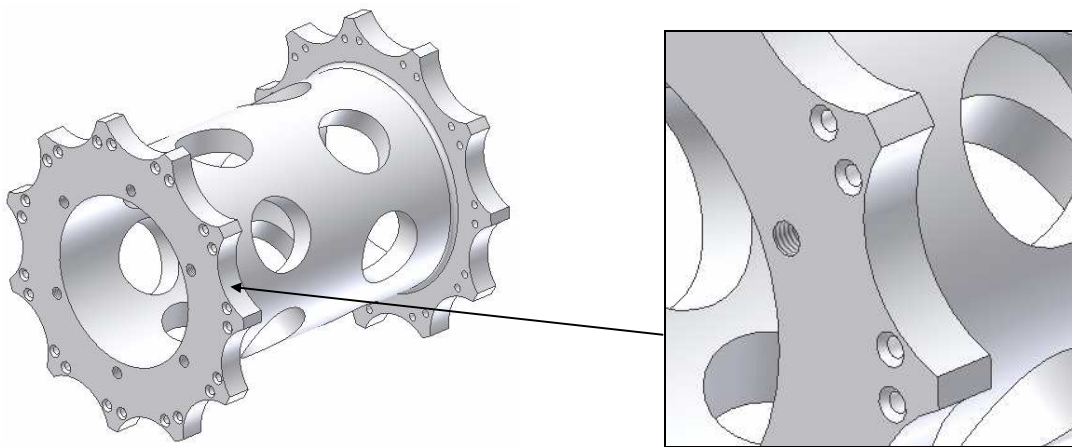


Abbildung 5.2-3: Aufnahmebohrungen im Trommelmagazin

Zur Fixierung der Röhren werden die Stahlstifte in die Aufnahmebohrungen eingeführt. Die Stifte sorgen so zwar für eine sichere Befestigung der Röhren im Magazin, sie unterbinden jedoch nicht ihre Bewegung in Richtung der Längsachse. Somit wird der Aufbau mechanischer Spannungen infolge von Temperaturänderungen verhindert. Zusätzlich ist so auch der einfache Ein / Ausbau der Röhren aus dem Wasserprobennehmer möglich.

Zum Einbau einer Röhre wird der Bajonettverschluss in Position gelb gebracht. Die Länge der Röhre verkürzt sich dabei derart, dass sie zwischen die Schleifplatten eingelegt werden kann (Abbildung 5.2-4).

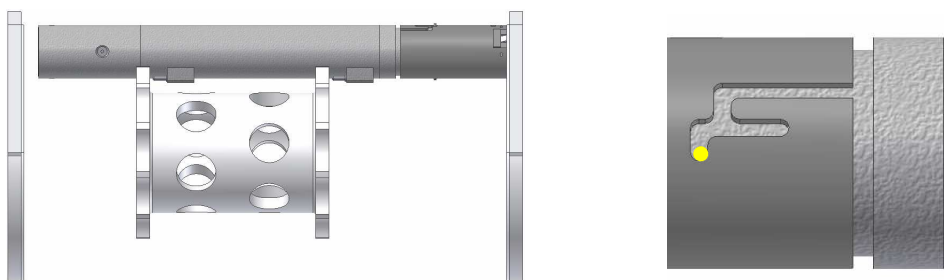


Abbildung 5.2-4: Bajonettverschluss in Position gelb, Einlegen der Röhre

Ist die Röhre eingelegt, wird der Bajonettverschluss entriegelt. Die Länge der Röhre vergrößert sich, bis beide Röhrenenden an den Schleifplatten anliegen. Die Stahlstifte der Halterung werden dabei in die Aufnahmebohrungen im Trommelkörper geschoben (Abbildung 5.2-5).

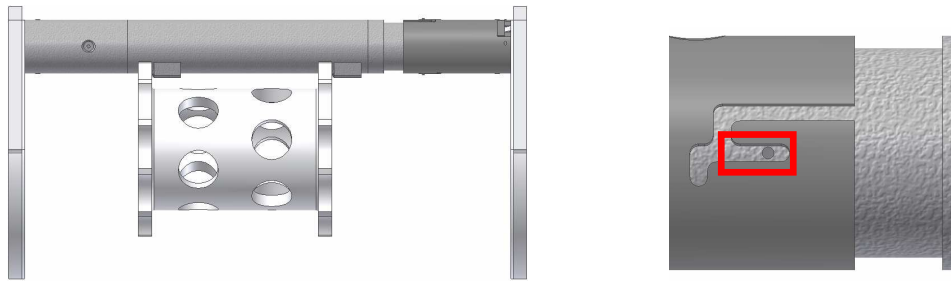


Abbildung 5.2-5: Bajonettverschluss in Position rot, Röhrenden liegen an

Da der Abstand der beiden Schleifplatten kleiner ist, als die durch den Bajonettverschluss zugelassene maximale Röhrenlänge (Bajonettverschluss: Position rot), presst die Druckfeder die Röhrenden an die Schleifplatten an. Ein „Herausrutschen“ der Röhre ist somit ausgeschlossen.

Der Ausbau der Röhren erfolgt in gleicher Weise, jedoch in umgekehrter Reihenfolge.

Die Lagerung des Magazins auf der Antriebswelle, sowie die Momenteinleitung erfolgen über die Naben. Mit Hilfe von Passfedern sind Antriebswelle und Naben formschlüssig miteinander verbunden.

Im Wasserprobennehmer ist das Trommelmagazin mit Sicherungsringen aus Kunststoff gegen ein Verrutschen auf der Antriebswelle gesichert. Der Antrieb erfolgt über einen Elektromotor, der in einem Druckkörper („Antriebsdruckkörper“) untergebracht ist und im folgenden Kapitel erläutert wird (Abbildung 5.2-6).

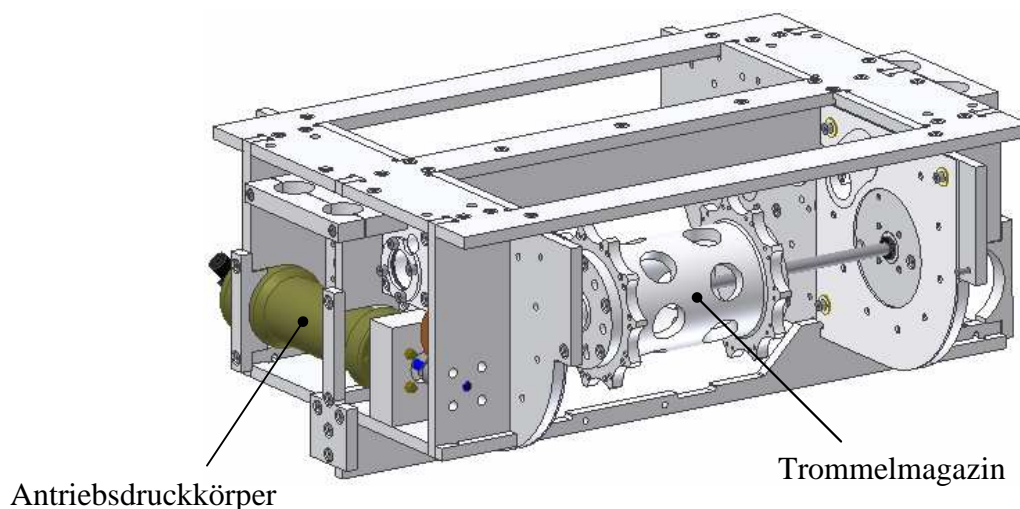


Abbildung 5.2-6: Leeres Trommelmagazin im Wasserprobennehmer

Da es sich um relativ große Bauteile handelt, die nicht den Reinheitsanforderungen genügen müssen, besteht das Trommelmagazin aus PE. Aufgrund der geringen Dichte von PE (ca. $0,92 \text{ g/cm}^3$) kann so über die Bauteile des Wasserprobennehmers Auftrieb erzeugt werden.

5.3 Antrieb

Der Antrieb des Wasserprobennehmers sorgt für die präzise Drehung des Trommelmagazins. Die „Kraftquelle“ bildet ein DC-Motor. Da das Innere des AUV geflutet ist, muss dieser Motor durch einen Druckkörper geschützt sein. Dies macht die Konstruktion eines speziellen Antriebsdruckkörpers nötig. Zudem müssen Drehmoment und Drehzahl des Motors mit Hilfe einer geeigneten Getriebekombination an den Einsatz im Wasserprobennehmer angepasst werden.

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die Auslegung dieser Komponenten.

5.3.1 Antriebsstrang

Für die Bewegung des Trommelmagazins sind ein tiefseetauglicher Antrieb, sowie ein geeigneter Antriebsstrang nötig. Besondere Anforderungen an den Antriebsstrang entstehen insbesondere dadurch, dass der Wasserprobennehmer von Menschen bedient wird und die Probenröhren häufig ein- und ausgebaut werden müssen. Hierbei können Kräfte auftreten, die eine „robustere“ Konstruktion erforderlich machen.

Der Antriebsstrang ist verantwortlich für die Kraftübertragung vom Motor bis an das Trommelmagazin. Teil dieses Antriebstranges sind Getriebe, Kupplungen, Achsen, etc.

Im Rahmen der konzeptionellen Auslegung wurden die wichtigsten Bauteile bereits festgelegt. Demnach ist in den Antriebstrang ein Getriebe in Form eines Schneckengetriebes integriert (Abbildung 5.3-1).

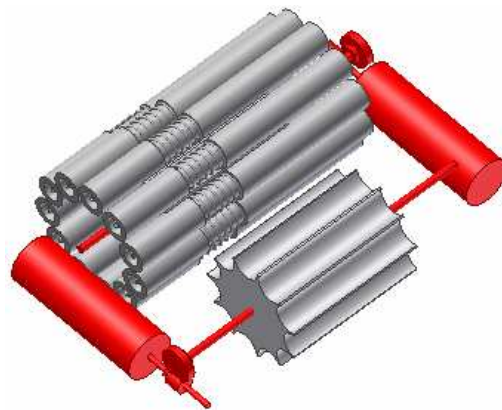


Abbildung 5.3-1: Antriebsstrang der beiden Trommelmagazine nach Konzept

Der Grund für die Integration eines Schneckengetriebes liegt in dessen besonderer Eigenschaft der Selbsthemmung. Ein Drehmoment kann zwar von der Schnecke an das Schneckenrad übertragen werden, in umgekehrter Richtung blockiert das Getriebe jedoch. Bei entsprechender Anordnung von Schnecke und Schneckenrad kann daher erreicht werden, dass zwar der Antrieb das Trommelmagazin drehen kann, eine umgekehrt auf das Trommelmagazin einwirkende Kraft jedoch vor Erreichen des Antriebs von der Selbsthemmung aufgefangen wird.

Dies hat folgenden Vorteil:

Während des Ein- und Ausbaus der Röhren können durch den Bediener Kräfte auf das Trommelmagazin ausgeübt werden, die den Antrieb beschädigen könnten. Diese Kräfte

werden durch die Selbsthemmung im Schneckengetriebe aufgefangen. Zudem ist ein feststehendes Magazin bei Ein- und Ausbau der Probenröhren für den Bediener deutlich angenehmer.

Problematisch ist jedoch die Übersetzung mit Hilfe von Schneckengetrieben. DC-Motoren verfügen über hohe Drehzahlen, die über Getriebe abgesenkt werden müssen. Schneckengetriebe weisen hierfür üblicherweise zu geringe Übersetzungsverhältnisse auf, da mit zunehmender Übersetzung die Leistungsverluste innerhalb eines Schneckengetriebes stark ansteigen. Neben einem Schneckengetriebe ist daher zusätzlich ein mehrstufiges Stirnradgetriebe nötig.

Mit Hilfe einer entsprechenden „Anordnung“ der Bauteile des Antriebsstranges lassen sich die Leistungsverluste minimieren. Abbildung 5.3-2 zeigt die schematische Darstellung des Antriebsstranges:

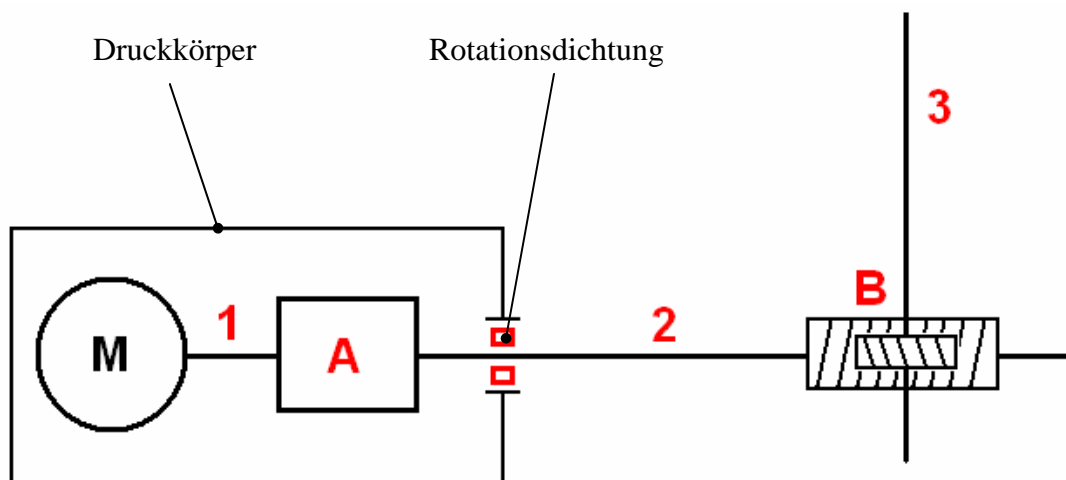


Abbildung 5.3-2: Antriebsstrang schematisch

Die erste Getriebestufe (A) wird durch ein Stirnradgetriebe gebildet. Dieses Stirnradgetriebe ist zusammen mit dem Motor (M) in einem Druckkörper untergebracht und sorgt für den größten Teil der Übersetzung. Hintergrund dieser Anordnung ist die Notwendigkeit hohe Drehzahlen von der Rotationsdichtung des Druckkörpers fern zu halten. Da Rotationsdichtungen eng um die drehende Welle liegen müssen und somit zwangsläufig Reibung entsteht, ist bei hohen Drehzahlen mit großen Leistungsverlusten zu rechnen. Zudem wird eine derartige Dichtung durch hohe Drehzahlen stark belastet.

Die zweite Getriebestufe (B) wird durch das Schneckengetriebe gebildet. Um die beschriebene Selbsthemmung auszunutzen, ist die Schnecke auf der motorseitigen Welle angebracht. Da die Drehzahlen an diesem Getriebe klein sein werden, kann es frei im Wasser laufen. Die Unterbringung in einem Druckkörper ist nicht nötig. Nach dem Schneckengetriebe bildet Welle 3 die Antriebswelle für das Trommelmagazin.

5.3.2 Motor- und Getriebeauslegung

Innerhalb des Wasserprobennehmers bildet ein DC-Motor den eigentlichen Antrieb des Trommelmagazins. Für die Kraftübertragung und insbesondere die Übersetzung der Drehzahlen sind Getriebe erforderlich, die entsprechend ihres Einsatzes ausgelegt sein müssen.

Aufgrund der konstruktiven Rahmenbedingungen und den Gegebenheiten im AUV ergaben sich, insbesondere für den Motor, folgende Anforderungen:

- Ausreichendes Drehmoment
- Hohe Drehzahl
- Kompakte Abmaße (für alle Bauteile innerhalb des Druckkörpers)
- Eingangsspannung 12 V
- Nach Möglichkeit bereits ab Werk mit Getriebe und Inkrementalgeber ausgestattet

Die Bestimmung des nötigen Drehmoments erfolgte über die Berechnung der im Wasserprobennehmer vorhandenen Reibmomente.

Der Hauptwiderstand, der der Bewegung des Trommelmagazins entgegengesetzt wird, besteht in der Reibung, die zwischen den Schleifplatten und den Stirnseiten der Röhren auftritt. Um die Reibung zu minimieren, bestehen die Schleifplatten des Wasserprobennehmers aus PTFE. Einlassseitig besitzen die Röhren zudem einen Schleifring aus PTFE. Das auslassseitig angebrachte Endstück besteht aus PVC.

Die resultierenden Materialpaarung und Reibungskoeffizienten (Tabelle 5.3.1):

	Materialpaarung	Reibungskoeffizient μ
Einlass	PTFE - PTFE	0,04 - 0,1
Auslass	PTFE - PVC	0,1

Tabelle 5.3.1: Materialpaarung und Reibungskoeffizienten

Die Anpresskraft wird im Fall der Röhren durch die Kraft der Druckfeder unter dem beweglichen Endstück bestimmt. Sie ist daher abhängig von der Auslenkung der Druckfeder und dem Zustand der Röhre. Ihren Höchstwert erreicht die Anpresskraft, wenn die Röhre geschlossen ist (s. Kapitel 5.1.7: Zustand 4).

Der Abstand der Schleifplatten und damit der Röhrenenden beträgt 364 mm. Im Wasserprobennehmer wird die Druckfeder somit auf eine Länge von 24,6 mm gestaucht und entwickelt dabei eine Kraft von 24,4 N (Abbildung 5.3-3).

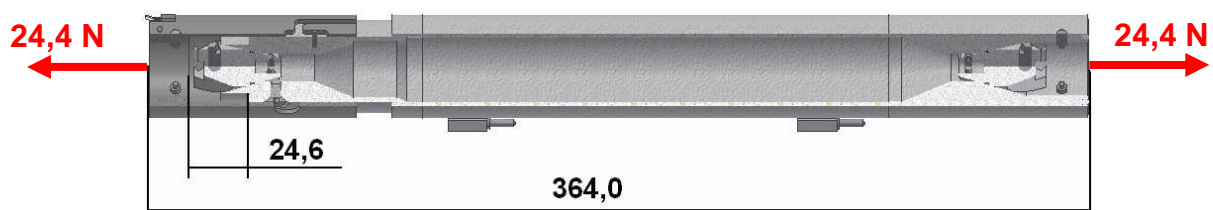


Abbildung 5.3-3: Anpresskräfte der Röhrenenden im Wasserprobennehmer

Da die Reibungskoeffizienten und Anpresskräfte bekannt sind, ergibt sich die Reibkraft aus:

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

Zur Sicherheit wird die Reibkraft mit einem Reibungskoeffizienten von 0,1 berechnet.

Bei 11 Röhren (also 22 Röhrendenden) beträgt die Reibkraft des gesamten Magazins demnach:

$$\begin{aligned} F_{R_{ges}} &= 22 \cdot 0,1 \cdot 24,4 \text{ N} \\ &= 53,68 \text{ N} \end{aligned}$$

Aus der Reibkraft und den Abmaßen des Magazins kann das Reibmoment bestimmt werden.

$$M_{R_{ges}} = F_{R_{ges}} \cdot a$$

Das Maß a kennzeichnet die Länge des Hebelarms im Trommelmagazin (Abbildung 5.3-4).

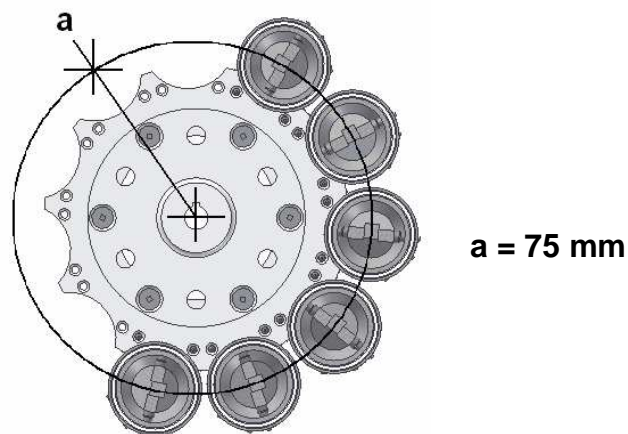


Abbildung 5.3-4: Hebelarm im Trommelmagazin

Es ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} M_{R_{ges}} &= 53,68 \text{ N} \cdot 0,075 \text{ m} \\ &= 4,03 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Es ist zu beachten, dass diese Angabe nur die Reibmomente aufgrund der Röhren darstellt. Die Reibungsverluste in der Rotationsdichtung waren unbekannt. Der Antrieb wurde daher mit entsprechenden Sicherheiten ausgelegt.

Die auf Grundlage des Anforderungsprofils und des berechneten Reibmoments gewählten Antriebskomponenten sind Produkte der Firma Faulhaber.

Der Motor ist bereits ab Werk mit einem Planetengetriebe und einem magnetischen Encoder als Inkrementalgeber ausgestattet (Abbildung 5.3-5)

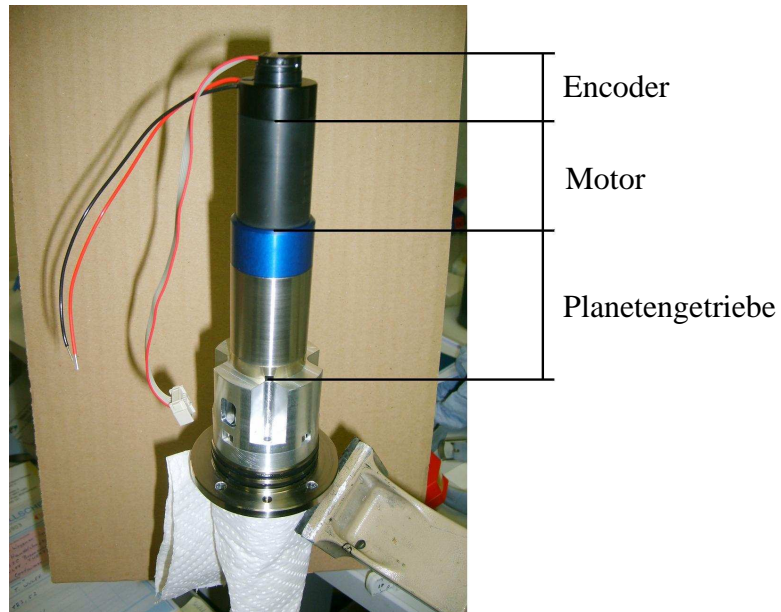


Abbildung 5.3-5: Antriebskomponenten während der Montage

Das Schneckenradgetriebe stammt von der Firma Mädler. Für die weitere Konstruktion von besonderer Bedeutung ist das Maß der Durchgangsbohrung durch die Schnecke ($\varnothing 8 \text{ H6}$). Da die Schnecke auf der Welle befestigt ist, die aus dem Druckkörper herausführt, legt dieses Maß deren kleinstmöglichen Außendurchmesser fest (Abbildung 5.3-6).

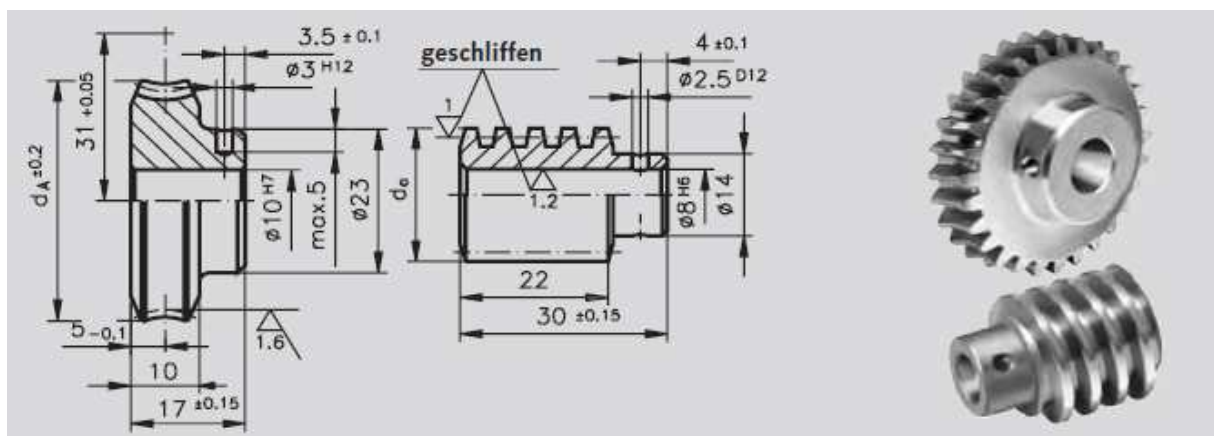
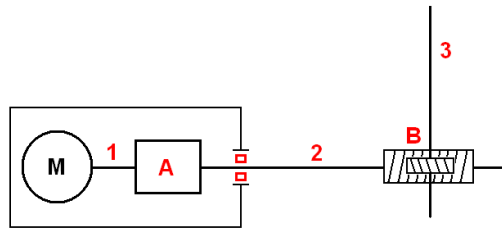


Abbildung 5.3-6: Schneckenradsatz der Firma Mädler, Quelle Mädler

Nach Auswahl der Komponenten, stellt sich der Antrieb des Wasserprobennehmers wie folgt dar (Tabelle 5.3.2, Quelle: Faulhaber, Mädler):



Komponente	i	n max	M max	μ
Motor	---	6400 1/min	0,028 Nm	---
Planeten- getr. (A)	415 : 1	4000 1/min (Eingang)	4 Nm (Ausgang)	55%
Schnecken- getr. (B)	4,28 : 1	2800 1/min (Eingang)	9 Nm (Ausgang)	70%

Tabelle 5.3.2: Eigenschaften der Antriebskomponenten

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade gilt somit:

Drehmomente:

- $M_3 = 4,03$ Nm (Reibmoment im Trommelmagazin)
- $M_2 = 1,35$ Nm (max. Ausgangsdrehmoment Planetengetriebe: 4 Nm)
- $M_1 = 0,0059$ Nm (max. Drehmoment Motor: 0,028 Nm)

Drehzahlen:

- $n_1 = 4000$ 1/min (max. Eingangsdrehzahl des Planetengetriebes)
- $n_2 = 9,64$ 1/min (max. Eingangsdrehzahl des Schneckengetriebes: 2800 1/min)
- $n_3 = 2,25$ 1/min

Aus der Drehzahl n_3 ergibt sich die Zeitdauer, die benötigt wird, um das Trommelmagazin eine Röhre weiter zu drehen:

- $t_{\text{Röhrenwechsel}} = 2,42$ s

Da während des Drehens des Trommelmagazins sowohl eine „neue“ Röhre vor der Zuleitung positioniert, als auch die „alte“ Röhre verschlossen wird, kennzeichnet diese Zeitperiode die Ungenauigkeit bei der Probennahme. Der genaue Zeitpunkt, wann der Verschluss der Röhre innerhalb dieser 2,42 Sekunden ausgelöst wurde, kann nicht rekonstruiert werden. Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit des AUV von ca. 5 – 6 km/h beträgt die während dieser Zeit zurückgelegte Fahrtstrecke ca. 4 m. Diese Fahrtstrecke entspricht der räumlichen Ungenauigkeit bei der Probennahme.

5.4 Antriebsdruckkörper

Einige der Antriebskomponenten müssen in einem Druckkörper untergebracht sein, um gegen die äußeren Bedingungen der Tiefsee geschützt zu sein. Druckkörper sind verhältnismäßig teure und komplexe Bauteile. Das geschützte Volumen wird daher stets so klein wie möglich gehalten. Es werden demnach nur die nötigsten Bauteile innerhalb eines Druckkörpers untergebracht.

Da im Innern des Druckkörpers normaler Atmosphärendruck herrscht, müssen die durch den äußeren Wasserdruck aufgebauten Kräfte durch die Wandung aufgefangen werden. In diesem Fall besteht zudem die besondere Schwierigkeit eine drehende Welle durch die Wandung des Druckkörpers hindurchführen zu müssen.

Die nötige Druckfestigkeit wird durch die Einsatztauchtiefe bestimmt. Der Wasserprobennehmer soll bis zu einer Wassertiefe von 3000 m eingesetzt werden, womit der äußere Überdruck bei ca. 300 bar liegt. Zusätzlich ist eine Sicherheitsreserve von 10 % einzuplanen.

Neben der Wandung müssen auch einige andere Bauteile, die teilweise auch im Innern des Druckkörpers liegen, für diesen Außendruck ausgelegt werden.

5.4.1 Allgemeine Bauweise

Die Druckfestigkeit von Körpern unter äußerem Überdruck kann durch die Wahl einer geeigneten Geometrie stark beeinflusst werden. Von Vorteil sind runde Strukturen. Die ideale Form eines Druckkörpers ist demnach eine Kugel. Die Fertigung einer Hohlkugel sowie die effektive Ausnutzung ihres Innenraums ist jedoch schwierig. Um trotzdem die Vorteile runder Strukturen ausnutzen zu können, werden häufig zylindrische Druckkörper eingesetzt. Im Fall des Wasserprobennehmers bietet sich zudem ein zylindrischer Druckkörper an, da die einzubauenden Komponenten ebenfalls eine zylindrische Form aufweisen.

Die einfachste Bauweise eines zylindrischen Druckkörpers besteht aus einem Rohr, das stirnseitig mit zwei Deckeln verschlossen wird. Diese Bauweise bietet zudem Vorteile bei der Befestigung der innenliegenden Komponenten. Abbildung 5.4-1 zeigt den schematischen Aufbau des Antriebsdruckkörpers.

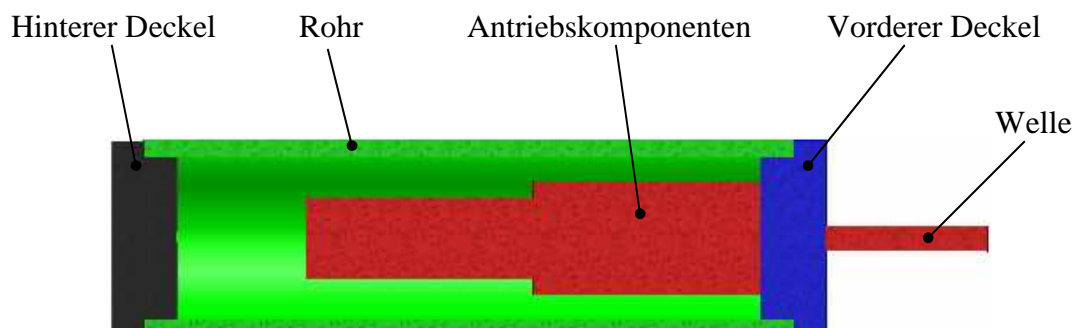


Abbildung 5.4-1: Aufbau des Antriebsdruckkörpers, schematisch

Die Befestigung aller Komponenten (Motor, Getriebe, etc...) sowie die Durchführung der Welle erfolgen am vorderen Deckel. Zum Schließen des Druckkörpers werden das Rohr und

der hintere Deckel lediglich über diesen Aufbau „gestülpt“. Alle Kräfte des Antriebs wirken somit nur auf einen relativ kleinen Teil des Druckkörpers ein. Insbesondere das Rohr, das Bauteil, das am stärksten durch den äußeren Überdruck belastet wird, ist von allen Kräften, die durch die Halterung des Antriebs auftreten könnten, entlastet.

5.4.2 Lagerung der Antriebswelle

Die Antriebswelle ragt aus dem Druckkörper heraus und ist daher dem äußeren Wasserdruck ausgesetzt. In den vorhergehenden schematischen Darstellungen des Antriebsstranges (Abbildung 5.4-2) ist diese Welle mit einer „2“ gekennzeichnet. Der Wasserdruck hat zur Folge, dass auf der Welle eine Kraft lastet, die diese in den Druckkörper hineinschieben würde. Diese Kraft ist abhängig von der Querschnittsfläche der Welle. Neben der radialen Lagerung ist daher zusätzlich eine axiale Lagerung erforderlich.

Um die axiale Kraft möglichst gering zu halten, ist es nötig den Durchmesser der Welle so klein wie möglich zu halten. Auf der Welle wird später die Schnecke als Teil der zweiten Getriebestufe sitzen. Aufgrund der Abmaße der Schnecke beträgt der kleinstmögliche Außendurchmesser der Antriebswelle 8 mm (s. Kapitel 5.3.2, Abbildung 5.3-6).

Bei einem Außendurchmesser der Welle von 8 mm und einem Wasserdruck von 300 bar ergibt sich somit folgender Wert der axialen Kraft:

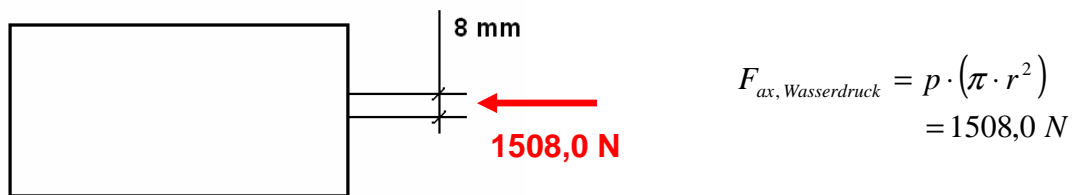


Abbildung 5.4-2: Axialkraft aufgrund des Wasserdrucks

Diese Kraft wirkt immer in Richtung des Druckkörperinneren und ist abhängig von der Tauchtiefe. Der berechnete Wert entspricht der Kraft in der maximalen Einsatztauchtiefe.

Zusätzlich zu dieser Kraft aufgrund des Wasserdrucks wird eine weitere Axialkraft durch das Schneckengetriebe in die Welle eingeleitet (Abbildung 5.4-3). Um die Reibmomente des Trommelmagazins überwinden zu können, muss am Schneckenrad ein Moment von ca. 4 Nm angreifen. Der Hebelarm zur Einleitung dieses Moments ist der Teilkreisradius des Schneckenrads. Im Fall des Wasserprobennehmers liegt der Teilkreisradius des Schneckenrads bei 37,5 mm, der Teilkreisradius somit bei 18,75 mm. Um das erforderliche Moment in das Schneckenrad einzuleiten ist daher eine Kraft von 213,3 N nötig.

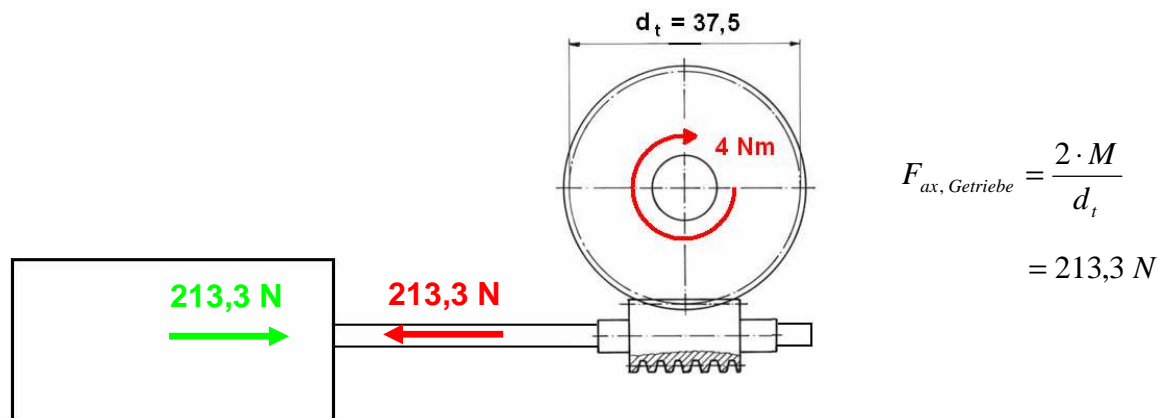


Abbildung 5.4-3: Axialkraft aufgrund des Schneckengetriebes

Der in Abbildung 5.4-3 am Schneckenrad eingezeichnete Drehsinn ist die vorherrschende Bewegungsrichtung des Trommelmagazins. Die benötigte Kraft (rot) führt zu einer Reaktionskraft in der Welle (grün). Um die Welle zu fixieren, muss die Lagerung folglich die grün eingezeichnete Reaktionskraft abfangen. Die Wirkrichtung dieser Kraft ist der zuvor berechneten Druckkraft genau entgegengesetzt. Die Welle muss daher in beiden Richtungen axial gelagert werden.

Die kompakteste Möglichkeit sowohl eine axiale, als auch radiale Lagerung zu erreichen, besteht im Einsatz kombinierter Axial- / Radiallager. Die radiale Lagerlast spielt in diesem Fall eine untergeordnete Rolle, so dass die Auswahl aufgrund der Axiallast getroffen wurde. Für die weitere Unterscheidung gilt:

- Lager A: Lager zum Abfangen des Wasserdrucks
- Lager B: Lager zum Abfangen der Getriebekräfte

Abbildung 5.4-4 zeigt die gewählten Lager des Herstellers FAG / INA.

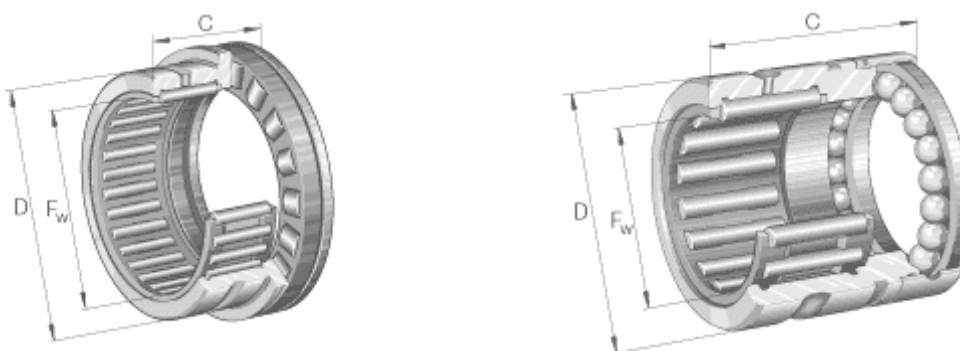


Abbildung 5.4-4: Lager A (links) und Lager B (rechts)

Die Drehgeschwindigkeit der Welle und die radiale Belastung sind gering. Den einzig kritischen Wert bildet daher die axiale Belastung auf die Lager. Für die beiden Lager gelten dabei folgende Belastungsgrenzen (Tabelle 5.4.1, Quelle: FAG / INA):

Lager	Ermüdungsgrenzbelastung axial	Maximale Axiallast	Sicherheit
A	4000 N	1508 N	2,7
B	320 N	213 N	1,5

Tabelle 5.4.1: Axiale Belastungsfähigkeit der Antriebswellenlager

Zu Abbildung 5.4-5:

Zur axialen Fixierung, d.h. um sich auf den Axialteilen der beiden Lager abzustützen, besitzt die Antriebswelle einen „Kranz“. Von diesem Kranz aus werden die axialen Kräfte in die Lager eingeleitet. Die Lager selbst wiederum stützen sich durch einen Sprengring (bei Lager B) oder einen speziellen Haltering (bei Lager A) im Druckkörper ab. Die rote und grüne Pfeillinie geben den Kraftfluss der axialen Kräfte von der Welle bis in den Druckkörper wider.

Die Radialteile der beiden Lager sind voneinander abgewandt. Hierdurch wird die Stützweite zwischen den Lagern vergrößert.

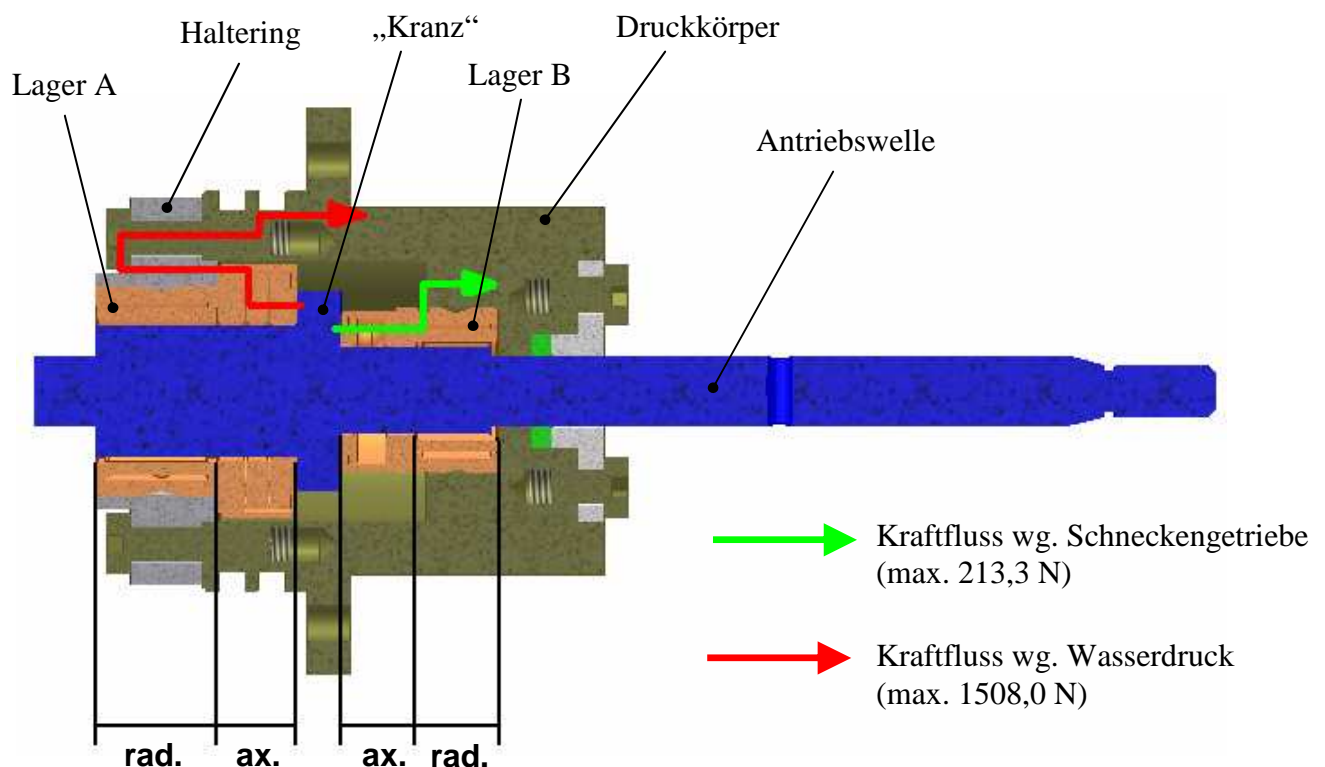


Abbildung 5.4-5: Lagerung der Antriebswelle im Druckkörper

In der 3D-Ansicht ist der Haltering zu erkennen, der Lager A abstützt (Abbildung 5.4-6)

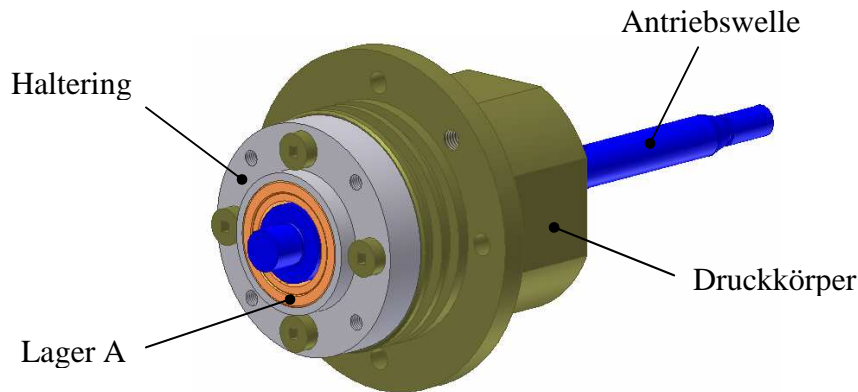
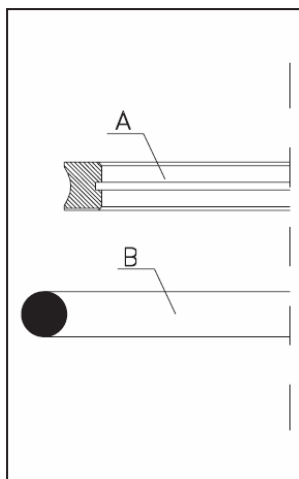


Abbildung 5.4-6: Haltering zur axialen Lagerung der Antriebswelle

5.4.3 Abdichtung der Welle

Die Abdichtung von drehenden Wellen zählt zu einer der schwierigsten Aufgaben der Dichtungstechnik. Dies gilt speziell im Fall des Druckkörpers, da hier gegen einen maximalen Druckunterschied von ca. 300 bar abgedichtet werden muss. Insbesondere in der Hydrauliktechnik ist dieser Anwendungsfall jedoch trotz allem weit verbreitet. Es steht daher eine breite Palette standardisierter Rotationsdichtungen zur Verfügung, die für diesen Zweck aus der Hydrauliktechnik zweckentfremdet werden können. Üblicherweise können derartige Dichtungen bis zu einem Druck von 400 bar eingesetzt werden.

Die in der Hydrauliktechnik verwendeten Rotationsdichtungen sind zweiteilig aufgebaut:



Bauteil A ist ein Kunststoffring aus PTFE. Dieser Ring bildet die eigentliche Rotationsdichtung, da er direkten Kontakt zur drehenden Welle hat. Je nach Einsatzmedium kann es erforderlich sein, dem PTFE verschiedene Zusätze, wie Kohle- oder Glasfasern beizumengen.

Bauteil B ist ein O-Ring aus Gummi, der den PTFE Ring von außen umschließt. Dieses Bauteil hat keinen Kontakt zur Welle, sondern sorgt mit seiner Elastizität für den nötigen Anpressdruck des PTFE Rings an die Welle.

Abbildung 5.4-7 zeigt eine zusammengesetzte Rotationsdichtung und eine Dichtung im Einbauzustand:

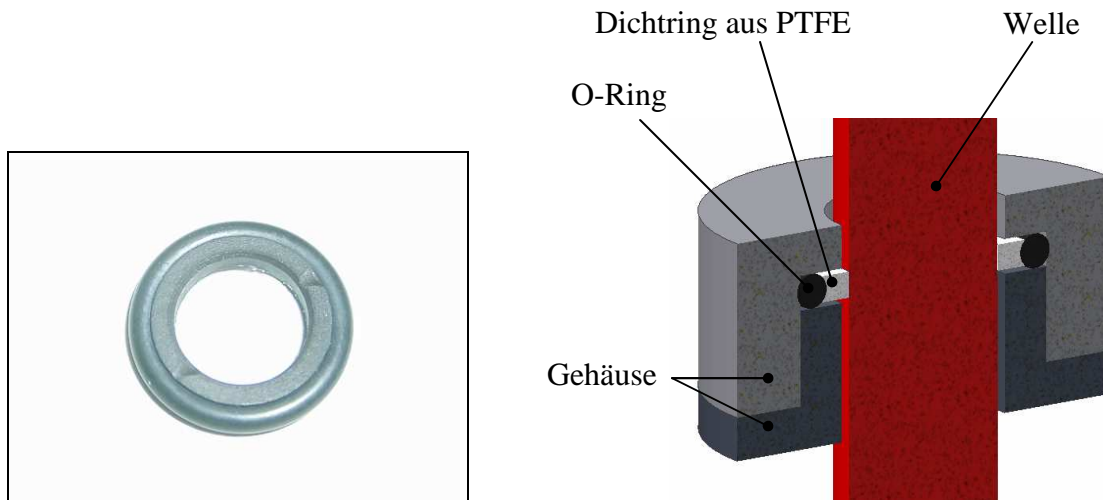


Abbildung 5.4-7: Einbauzustand der Rotationsdichtung

Im Druckkörper ist die Dichtung in einer geteilten Nut eingebaut. Diese Nut wird durch eine Schutzkappe aus Kunststoff geschlossen.

Um der Rotationsdichtung eine möglichst große Stützfläche zu bieten, wird der Zwischenraum zwischen Welle und Druckkörper klein gehalten. In diesem Fall beträgt das Durchmesserspiel zwischen Welle und Durchgangsbohrung durch den Druckkörper lediglich 0,1 mm.

5.4.4 Innerer Aufbau des Druckkörpers

Innerhalb des Druckkörpers verläuft der Antriebsstrang von der Welle weiter zum Planetengetriebe und dem eigentlichen Motor. Diese und andere Bauteile müssen im Druckkörper fixiert werden. Entsprechend der zuvor erläuterten allgemeinen Bauweise (s. Kapitel 5.4.1) werden alle innerhalb des Druckkörpers liegenden Bauteile am vorderen Deckel befestigt.

Die Antriebskomponenten Motor, Planetengetriebe und Inkrementalgeber sind bereits ab Werk miteinander verbunden. An der Stirnseite des Planetengetriebes sind Gewindebohrungen vorhanden, mit deren Hilfe die komplette Baugruppe befestigt werden kann.

Die Kraftübertragung zwischen der Abtriebswelle des Planetengetriebes und der aus dem Druckkörper herausragenden Antriebswelle erfolgt über eine Klauenkupplung (Abbildung 5.4-8)



Abbildung 5.4-8: Klauenkupplung, Quelle: R + W

Die Klauenkupplung ist nötig, da sie axialen Achsversatz ausgleichen kann. Im Fall des Druckkörpers ist es wichtig axialen Versatz zuzulassen und somit Planetengetriebe und Antriebswelle voneinander zu entkoppeln. Aufgrund des hohen Wasserdrucks und möglicher Elastizitäten in den Lagern könnte die Antriebswelle in den Druckkörper bewegt werden. Dies würde zur Einleitung hoher axialer Kräfte in den Antriebsstrang führen, welche unmittelbar auf das Planetengetriebe einwirken würden und es so auf Dauer schädigen könnten.

Um die Klauenkupplung zwischen Antriebswelle und Planetengetriebe einbauen zu können, wird das Planetengetriebe auf einem speziellen Träger („Motorträger“) befestigt, dessen Inneres genug Raum für die Klauenkupplung bietet (Abbildung 5.4-9)



Abbildung 5.4-9: Motorträger von oben (links) und von unten (rechts)

Der innere Aufbau des Druckkörpers stellt sich demnach wie folgt dar (Abbildung 5.4-10):

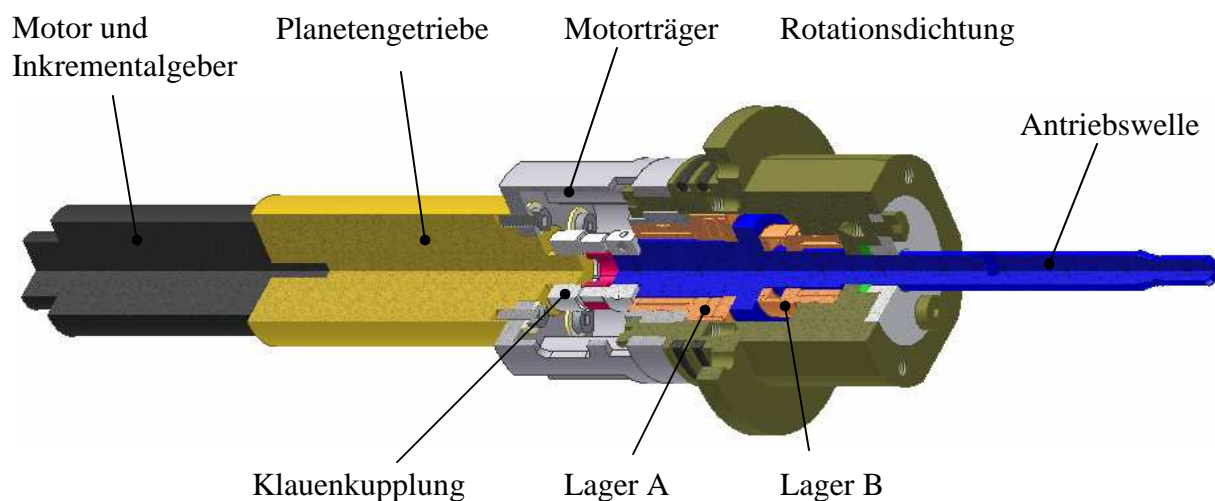


Abbildung 5.4-10: Innerer Aufbau des Druckkörpers

5.4.5 Druckkörper

Druckkörper im Tiefseeinsatz werden durch hohe Druckkräfte und die korrosive Umgebung stark beansprucht. Dies gilt in besonderem Maße für nicht-druckkompensierte Körper, bei denen der Unterschied zwischen Innen- und Außendruck zu erheblichen Spannungen in der Wandung führen kann. Um ein Versagen des Druckkörpers zu verhindern, ist daher die Auslegung der Wandstärke ein entscheidendes Kriterium der Konstruktion. Die nötige Wandstärke wird durch das verwendete Material und die Form des Druckkörpers bestimmt.

Der Druckkörper besitzt eine zylindrische Grundform. Um das eingeschlossene Volumen so klein wie möglich zu halten, werden Durchmesser und Länge dieses Zylinders eng an die im Innern verbauten Komponenten angepasst.

Der Innendurchmesser des Druckkörpers wird dabei durch den Durchmesser des Halterings, zur Abstützung von Lager A, bestimmt. Die Länge des Druckkörperinnenraums ergibt sich aus den Längen der verbauten Komponenten (Abbildung 5.4-11):

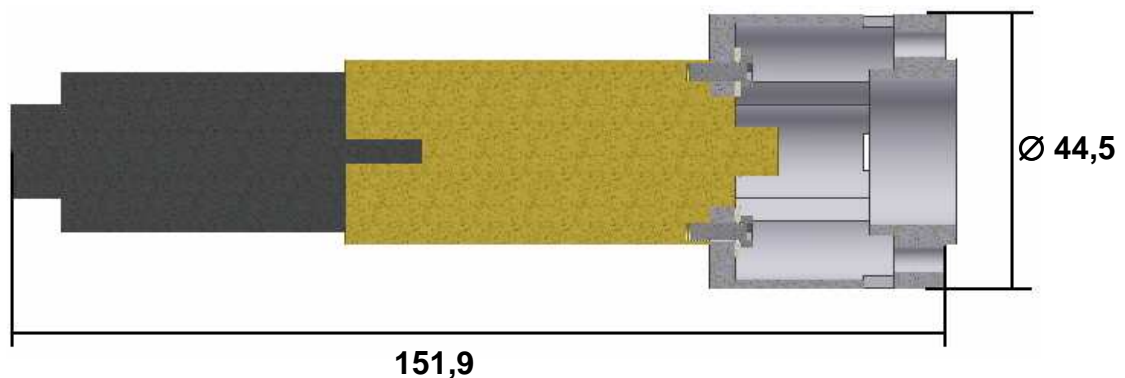


Abbildung 5.4-11: Abmaße der Komponenten im Druckkörper

Die inneren Abmaße des Druckkörpers wurden daher wie folgt festgelegt (Abbildung 5.4-12):

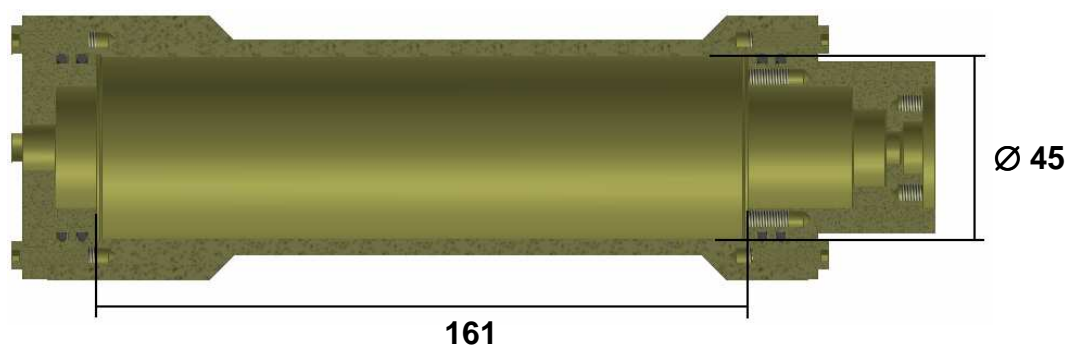


Abbildung 5.4-12: Innere Abmaße des Druckkörpers

Der Druckkörper besteht aus einem zentralen Rohrstück, das mit zwei stirnseitigen Deckeln verschlossen ist. Aus Korrosions- und Gewichtsgründen sind alle Bauteile des Druckkörpers aus Titan (3.7165) gefertigt.

Im vorderen Deckel (Abbildung 5.4-13) befinden sich die Lagerung der Antriebswelle und die Rotationsdichtung. Zudem werden alle Komponenten, die innerhalb des Druckkörpers eingeschlossen sind, an der Rückseite dieses Deckels befestigt.

An der Stirnseite verfügt der vordere Deckel über Gewindebohrungen, die später der Halterung des Druckkörpers im Wasserprobennehmer dienen.



Abbildung 5.4-13: Vorderer Deckel , Front- und Rückansicht

Das Rohr (Abbildung 5.4-14) bildet den größten Teil des Druckkörpers und ist gleichzeitig dessen „schwächstes Glied“. Die Auslegung der nötigen Wandstärke orientiert sich daher an diesem Bauteil. Außer im Bereich der Rohrstirnseite beträgt die Wandstärke durchgehend 4 mm.

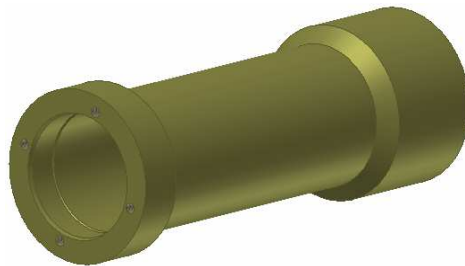


Abbildung 5.4-14: Druckkörper Rohr

In den hinteren Deckel (Abbildung 5.4-15) ist eine Durchgangsbohrung eingebracht, die der elektrischen Zuleitung dient. Für die elektrische Zuleitung werden druckfeste Steckverbindungen der Fa. Subconn verwendet.



Abbildung 5.4-15: Hinterer Deckel, Front- und Rückansicht

Die Einzelteile des Druckkörpers werden über Schrauben miteinander verbunden. Hierzu sind in die Stirnseiten des Rohres Gewindebohrungen eingebracht. Zur Aufnahme der Gewindebohrungen ist in diesem Bereich die Wandstärke des Rohres vergrößert.

Die Deckel werden in das Rohr eingeschoben. Zur Abdichtung besitzen beide Deckel eine doppelt ausgeführte O-Ring Nut.

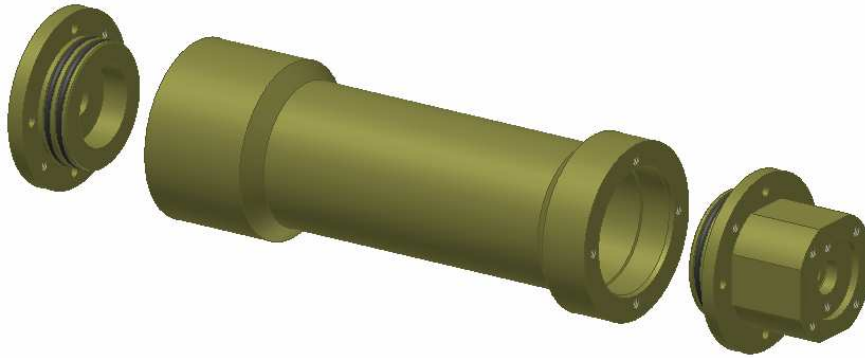


Abbildung 5.4-16: Einzelteile des Druckkörpers

5.4.6 Gesamtüberblick

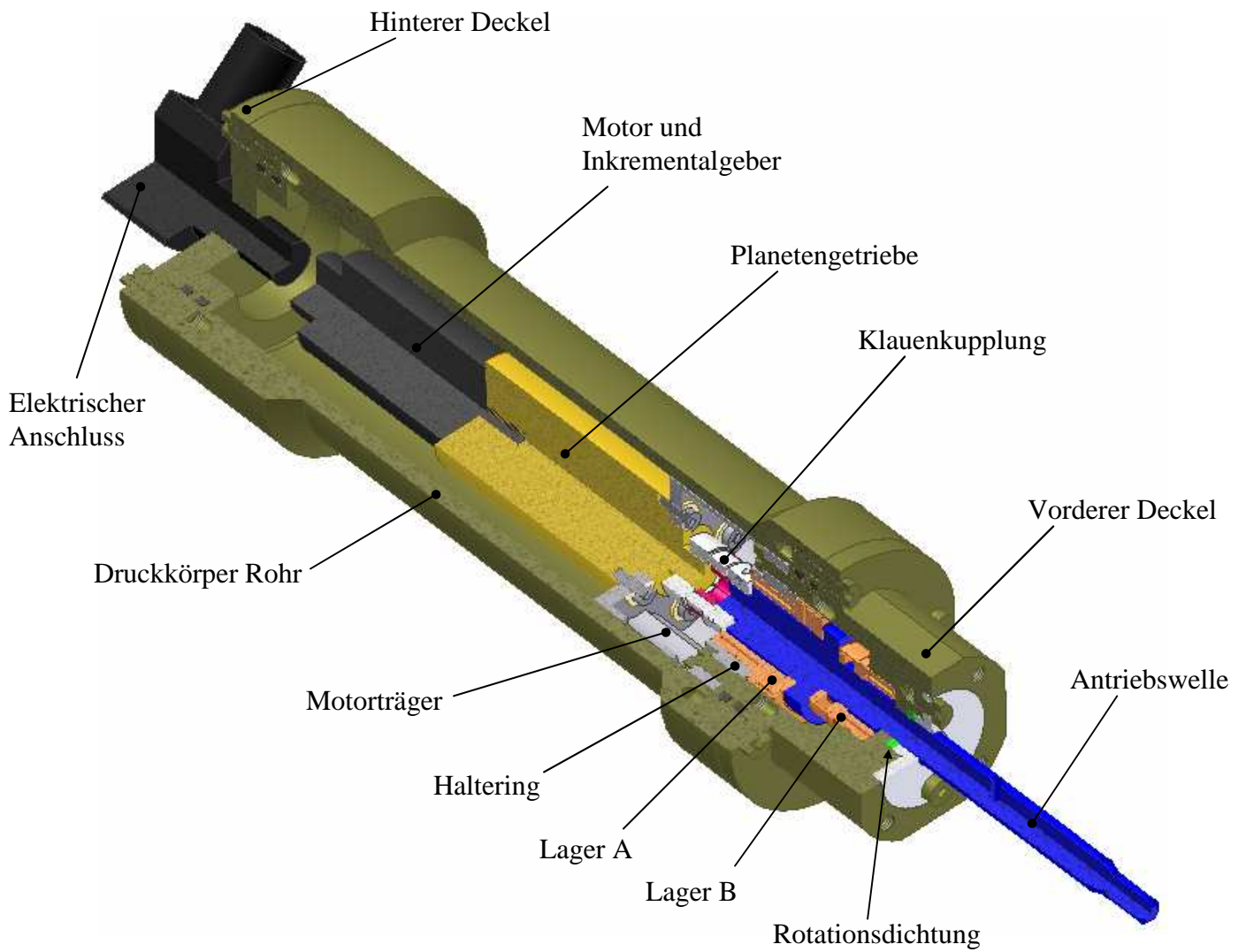


Abbildung 5.4-17: Gesamtüberblick über Antriebsdruckkörper

5.5 Steuerungsdruckkörper

Um eine genaue Positionierung der einzelnen Röhren zu erreichen, muss das Trommelmagazin zu einer gesteuerten Bewegung in der Lage sein. Die Umdrehungen des Antriebsmotors werden daher über einen Inkrementalgeber erfasst. Zur Verarbeitung dieser Signale wird jedoch eine separate Steuerelektronik benötigt, die ebenfalls in einem Druckkörper untergebracht werden muss.

Die Auslegung der Steuerung und des Steuerungsdruckkörpers waren nur sehr bedingt Gegenstand dieser Arbeit. Es soll daher nur relativ kurz darauf eingegangen werden.

Grundlage der Auslegung war der Anschlussplan des Wasserprobennehmers (Abbildung 5.5-1):



Abbildung 5.5-1: Anschlussplan des Wasserprobennehmers

Da der Wasserprobennehmer über zwei unabhängige Trommelmagazine mit einem jeweils eigenen Antrieb verfügt, muss der Steuerungsdruckkörper für jeden der Antriebe einen separaten Anschluss bieten. Die Stromversorgung des Systems wird über eine Verbindung mit dem AUV realisiert. Die Gesamtzahl der Durchführungen durch die Wandung des Druckkörpers beläuft sich daher auf drei.

Wie im Fall des Antriebsdruckkörpers ist die Grundform des Druckkörpers zylindrisch. Ein zentrales Rohr wird stirnseitig mit flachen Deckeln verschlossen. Um Gewicht einzusparen und die Gefahr von Korrosion auszuschließen, bestehen die Bauteile dieses Druckkörpers ebenfalls aus Titan (3.7165). Die Durchführung der elektrischen Verbindungen erfolgt durch die Deckel des Druckkörpers mit Hilfe von Steckverbindungen der Firma Subconn (Abbildung 5.5-2).



Abbildung 5.5-2: wasserdichte Steckverbindungen, Quelle: Subconn

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen und der Größe der Platine ergibt sich somit das Aussehen des Druckkörpers wie folgt (Abbildung 5.5-3)

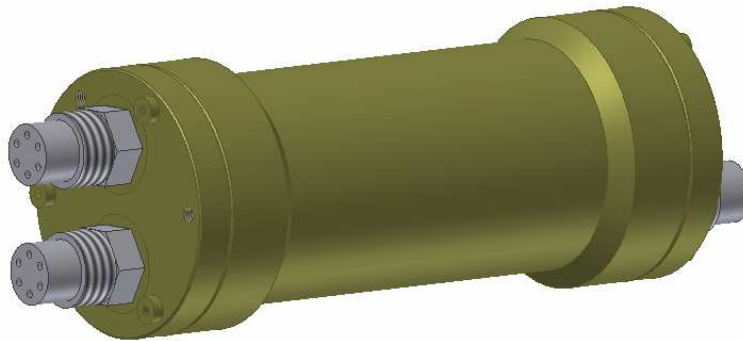


Abbildung 5.5-3: Steuerungsdruckkörper

Von Bedeutung für die Konstruktion des Wasserprobennehmers ist der Steuerungsdruckkörper insoweit, als dass er möglichst platzsparend im Gerät integriert werden musste. Während der Konstruktion des Rahmens (Kapitel 5.6, speziell 5.6.4) mussten daher die äußeren Abmaße des Steuerungsdruckkörpers beachtet werden.

5.6 Rahmen

Als tragende Struktur und zum Einbau in das AUV benötigt der Wasserprobennehmer einen Rahmen. Dieser Rahmen muss den Tiefseebedingungen gegenüber unempfindlich, belastbar und möglichst leicht ausgeführt sein, da jedes zusätzliche Gewicht die Austarierung des AUV erschwert. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde für alle Rahmenbauteile grundsätzlich der Kunststoff PE verwendet. Dieser Kunststoff ist unempfindlich und besitzt eine geringere Dichte als Wasser ($0,92 \text{ g/cm}^3$). Der Rahmen des Wasserprobennehmers trägt somit zum Gesamtauftrieb des AUV bei.

5.6.1 Basisstruktur

Die Basisstruktur des Rahmens besteht aus drei Bauteilen, die aus 10 mm starkem PE-Plattenmaterial gefertigt wurden. Alle Bauteile können über entsprechende Aussparungen ineinander gesteckt werden. Die meisten Schrauben dienen lediglich der Sicherung dieser Steckverbindungen.

Die Basisstruktur und ihre Bauteile (Abbildung 5.6-1 bis Abbildung 5.6-4):

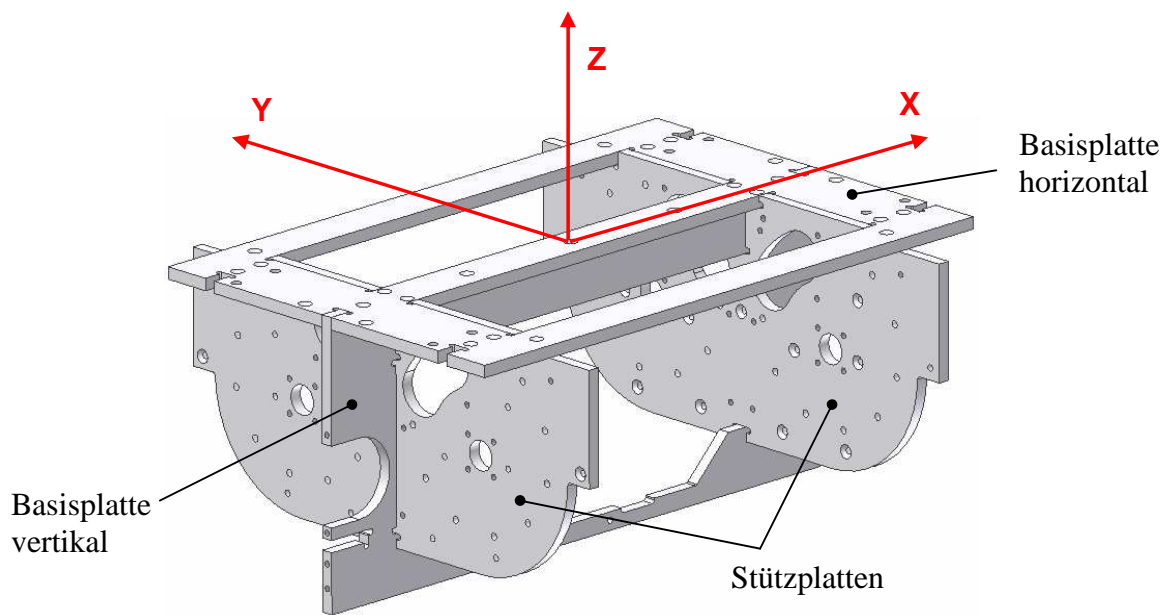


Abbildung 5.6-1: Basisstruktur des Rahmens

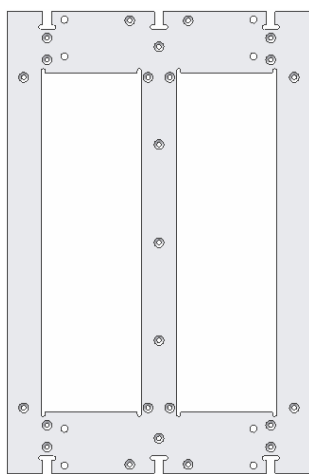


Abbildung 5.6-2: Basisplatte horizontal

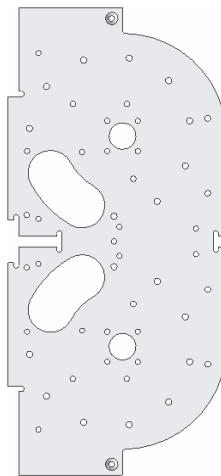


Abbildung 5.6-3: Stützplatte

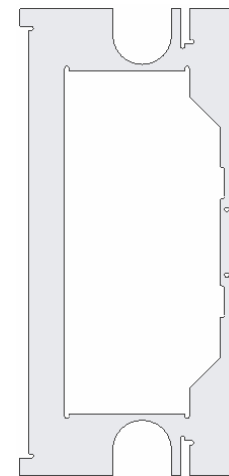


Abbildung 5.6-4: Basisplatte vertikal

Die **horizontale Basisplatte** bildet den oberen Abschluss des Wasserprobennehmers. Sie versteift den Rahmen gegen Biegemomente um die Z-Achse.

Über die beiden großen Öffnungen in der Platte sind die Röhren im Wasserprobennehmer erreichbar.

Die **Stützplatten** bilden den Unterbau der Schleifplatten. Da die Schleifplatten selbst keine Kräfte aufnehmen können, wird der Anpressdruck, den die Röhren mit Hilfe der Druckfeder auf die Schleifplatten ausüben, unmittelbar an die Stützplatten übertragen. Da es bei einer

Bestückung von 22 Röhren dabei zu erheblichen Kräften kommen kann, muss speziell diese Platte gegen ein Durchbiegen versteift werden.

Die nierenförmigen Öffnungen sind die Durchgänge der Wasserzuleitungen zum jeweiligen Trommelmagazin. Die kleineren, kreisrunden Öffnungen dienen der Aufnahme der Drehachsen der Magazine.

Die **vertikale Basisplatte** versteift den Rahmen gegen Biegemomente um die Y-Achse. Wichtig für die Steifigkeit des Rahmens ist vor allem der untere Steg der Platte. Dieser Steg wirkt wie ein Zugstab, der die Kräfte der Röhren auf die Schleif- und Stützplatte abfängt.

5.6.2 Versteifungen

Die Basisstruktur selbst ist von sich aus noch nicht steif genug, um ein Durchbiegen der Stützplatten zu verhindern. Aus diesem Grund mussten weitere versteifende Bauteile in den Rahmen integriert werden (Abbildung 5.6-5 , Abbildung 5.6-6, Abbildung 5.6-7).

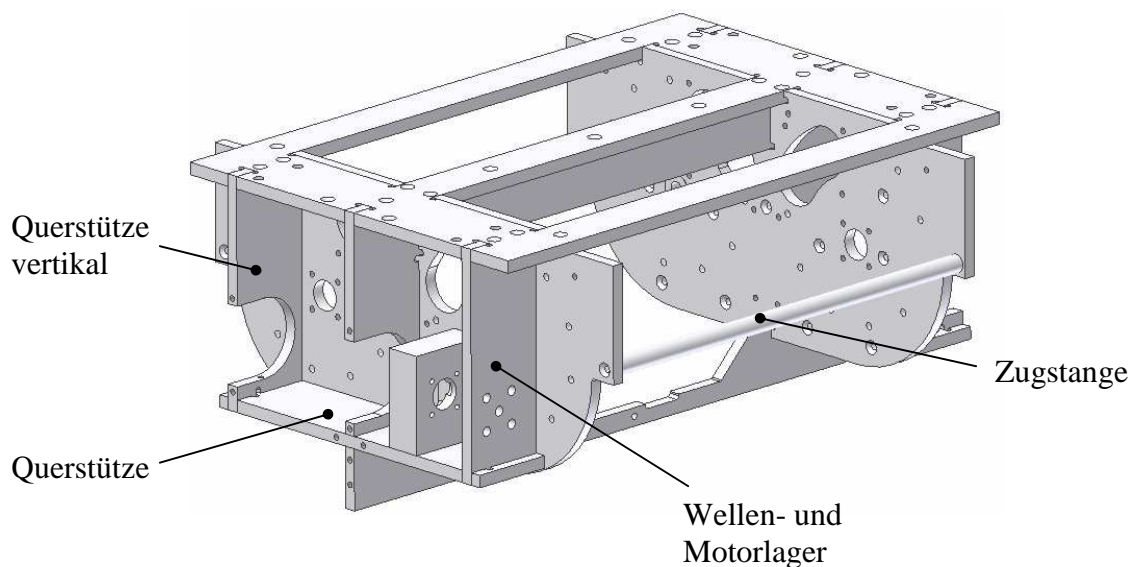


Abbildung 5.6-5: Rahmen mit versteifenden Bauteilen



Abbildung 5.6-6: Querstütze

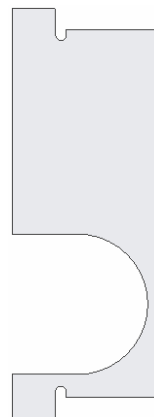


Abbildung 5.6-7: Querstütze vertikal

Die **Querstütze**, sowie die **vertikale Querstütze**, sind an der Rückseite der Stützplatte angebracht. Bei einer Biegung der Stützplatten um die Z- oder Y-Achse werden beide Bauteile in der Wirkrichtung ihres größten Flächenträgheitsmoments belastet. Sie bilden dadurch den biegesteifen Unterbau der Stützplatten.

Die halbrunde Ausfräsung in der vertikalen Querstütze dient später der Aufnahme des Antriebsdruckkörpers.

Zwei **Zugstangen** an den Seiten des Rahmens dienen dazu, den Abstand zwischen den Stützplatten konstant zu halten. Die Struktur wird hierdurch weiter versteift.

Eine besondere Stellung innerhalb des Rahmens nimmt das **Wellen- und Motorlager** ein. Dieses Bauteil kombiniert mehrere Funktionen und dient der Versteifung des Rahmens, der Halterung des Antriebsdruckkörpers sowie der Lagerung des Schneckengetriebes. Der Versteifung des Rahmens dient dabei lediglich der in Abbildung 5.6-8 markierte „plattenförmige“ Teil.

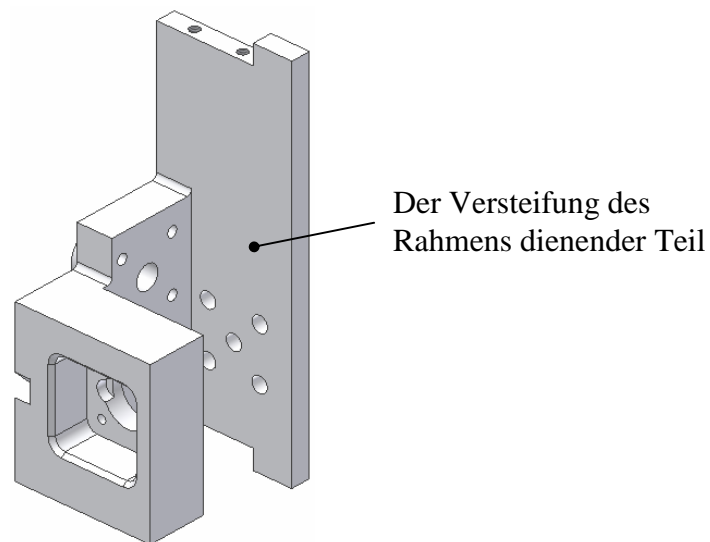


Abbildung 5.6-8: Wellen- und Motorlager

5.6.3 Motoraufnahme und Lagerung

Die Aufnahme des Antriebs, sowie die Lagerung des Schneckengetriebes und des Trommelmagazins erfolgen im zuvor beschriebenen Wellen- und Motorlager (Abbildung 5.6-8). Zur Aufnahme des Antriebsdruckkörpers besitzt es eine quadratische Ausfräsung, in die der vordere Deckel des Druckkörpers eingesetzt werden kann. (Abbildung 5.6-9).

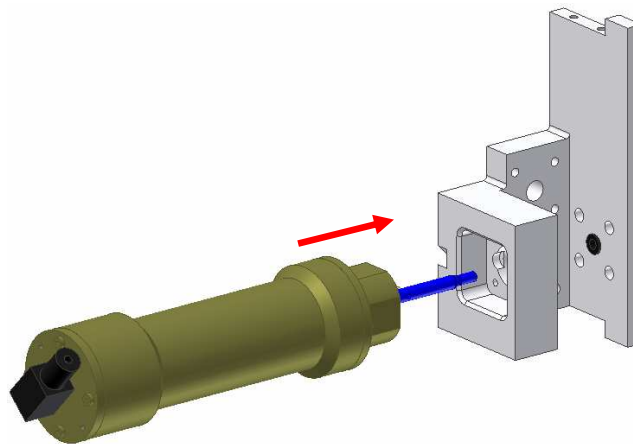


Abbildung 5.6-9: Aufnahme des Antriebsdruckkörpers

Innerhalb des Wellen- und Motorlagers befindet sich das Schneckengetriebe. Dies ist auch der Grund für die, verglichen mit anderen Rahmenbauteilen, verhältnismäßig komplexe Geometrie. Um Schnecke und Schneckenrad möglichst exakt zueinander zu positionieren und die Lagerung des Getriebes insgesamt steif auszuführen, musste das Bauteil aus einem Stück gefertigt werden.

An das Schneckengetriebe schließt sich die eigentliche Antriebswelle des Trommelmagazins an. Die Lagerung dieser Welle erfolgt auf der einen Seite des Rahmens durch das Wellen- und Motorlager, auf der anderen Seite durch einen Lagerbock, der an der Rückseite der Stützplatte befestigt wird. In beiden Lagerstellen läuft die Welle in Gleitlagern, die speziell für langsam drehende Unterwasseranwendungen konzipiert sind.

Zur besseren Darstellung der Bauteile des Antriebsstrangs ist die Sichtbarkeit von Teilen des Rahmens in Abbildung 5.6-10 unterdrückt.

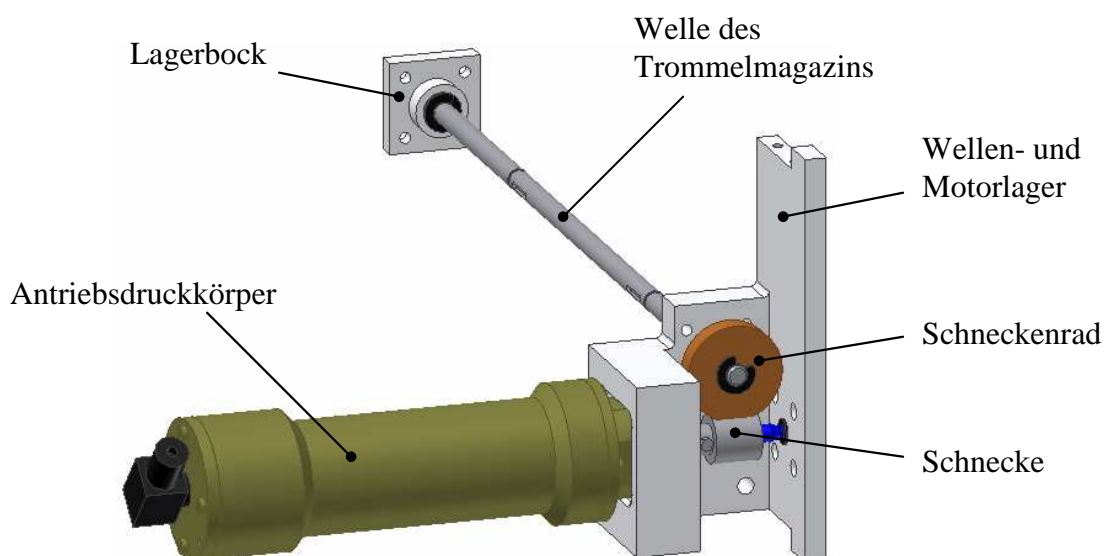


Abbildung 5.6-10: Antriebsstrang im Wasserprobennehmer

Neben der Halterung im Wellen- und Motorlager wird der hintere Teil des Druckkörpers durch Klemmung im Rahmen fixiert. Zusätzlich zur Fixierung des Antriebsdruckkörpers dienen die für die Klemmung nötigen Bauteile der weiteren Versteifung des Rahmens.

Es ergibt sich somit folgendes Bild des Rahmens (Abbildung 5.6-11):

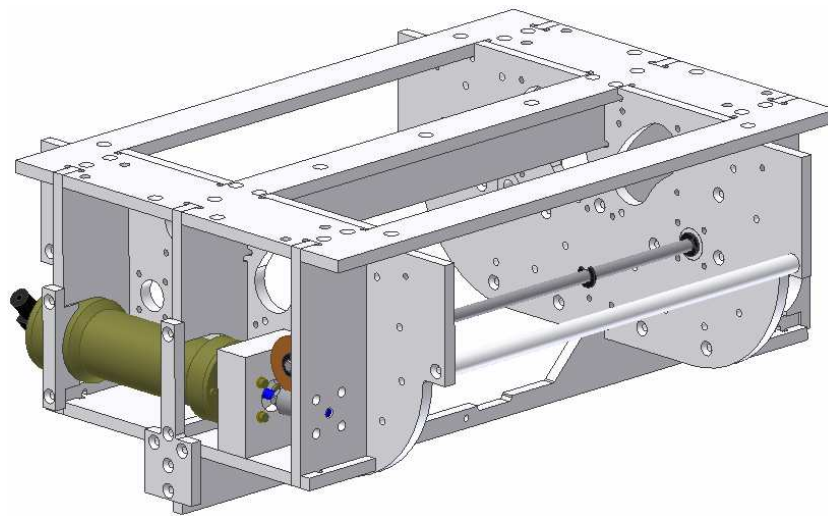


Abbildung 5.6-11: Rahmen mit Antriebsstrang

5.6.4 Aufnahme Steuerungsdruckkörper

Da keine Momente wirken, ist die Befestigung des Steuerungsdruckkörpers wesentlich einfacher, als die des Antriebsdruckkörpers. Hauptanforderung ist jedoch die platzsparende Unterbringung im Wasserprobennehmer. Zweckmäßig ist daher die Unterbringung des Druckkörpers in einem bereits bestehenden Totraum.

Ein solcher Totraum besteht zwischen den Trommelmagazinen (Abbildung 5.6-12).

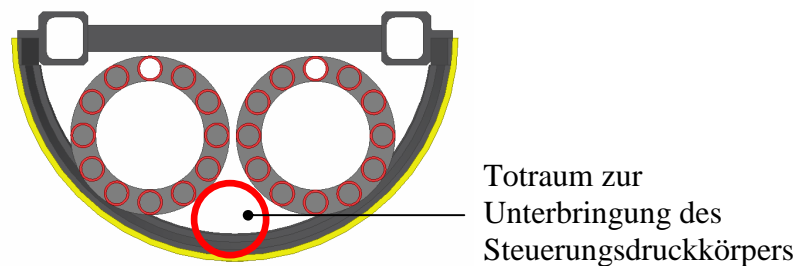


Abbildung 5.6-12: Totraum zwischen den Trommelmagazinen

Um diesen Totraum zwischen den Magazinen ausnutzen zu können, muss der Steuerungsdruckkörper am unteren Steg der vertikalen Basisplatte befestigt werden. Zur Fixierung wird der Druckkörper mit Hilfe von Kunststoffschellen in eine Halterung gepresst (Abbildung 5.6-13).

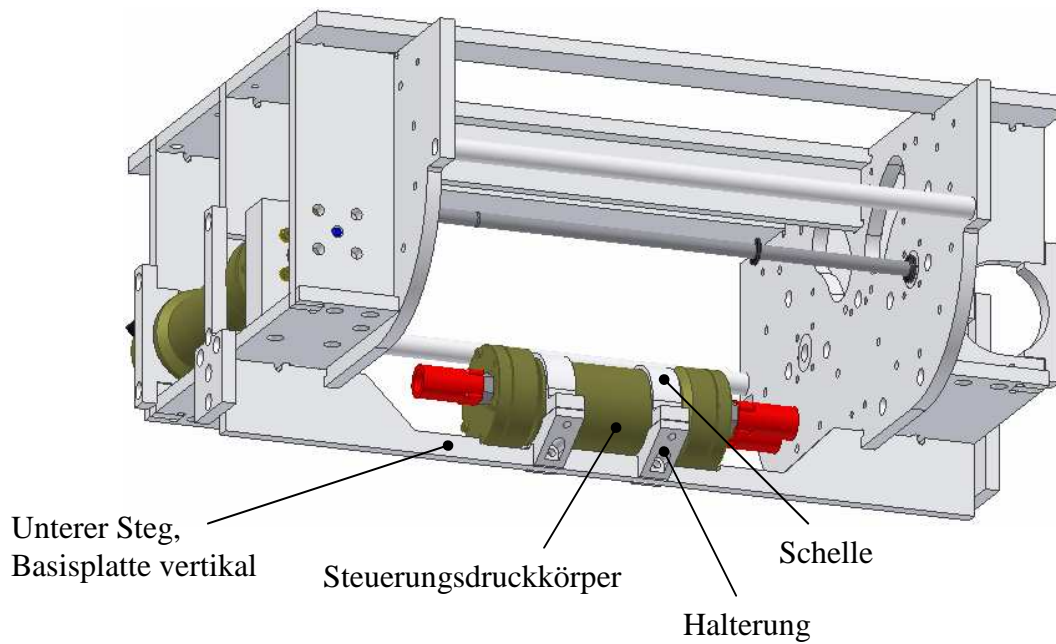


Abbildung 5.6-13: Rahmen mit Steuerungsdruckkörper

5.6.5 Halterung im AUV

Zur Halterung wissenschaftlicher Nutzlasten stehen im Nutzlastsegment des AUV vier Querstreben zur Verfügung.

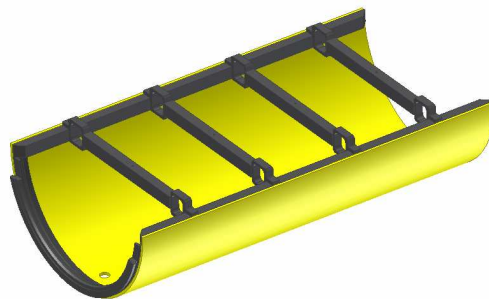


Abbildung 5.6-14: Querstreben im Nutzlastsegment des AUV

Aufgrund der Einbaubedingungen (s. Kapitel 4.1) muss der Wasserprobennehmer unterhalb dieser Querstreben „hängen“. Hierzu sind an der Oberseite des Rahmens bogenförmige Halterungen angebracht, die an zwei der vier Streben angreifen. Um das Gewicht des Rahmens nicht auf ein Kunststoffgewinde zu konzentrieren, sind die Halterungen mit Stahlplatten („Gegendruckplatte“) verschraubt. Diese befinden sich unterhalb der horizontalen Basisplatte (Abbildung 5.6-15).

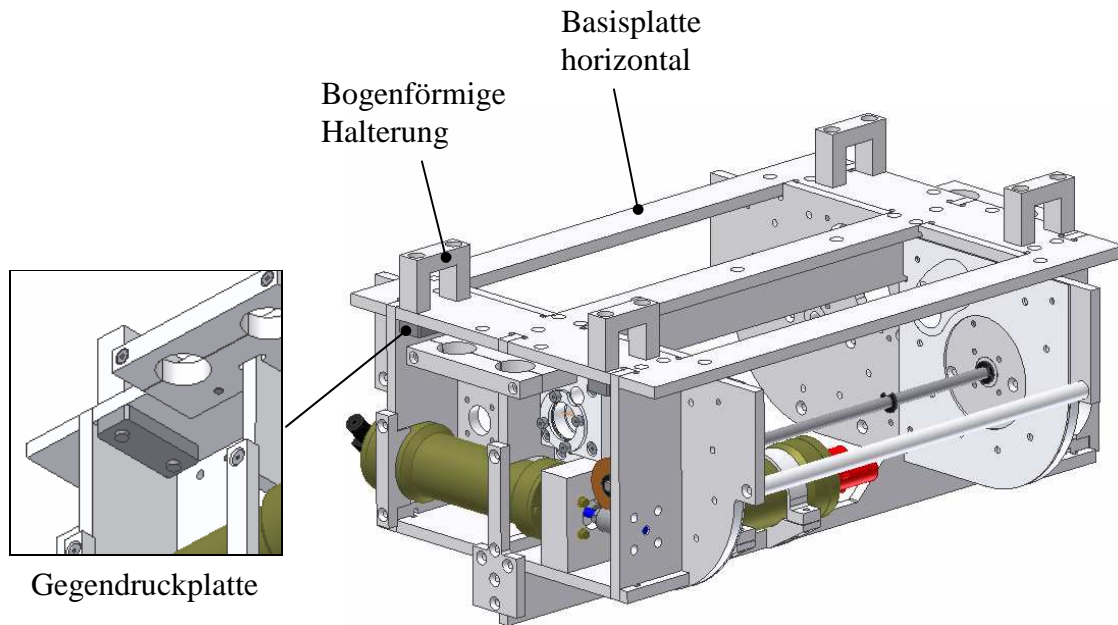


Abbildung 5.6-15: Rahmen mit Halterungen für Einbau in AUV

Bei Einbau des Wasserprobennehmers in die Nutzlastbucht des AUV ergibt sich somit folgendes Bild (Abbildung 5.6-16):

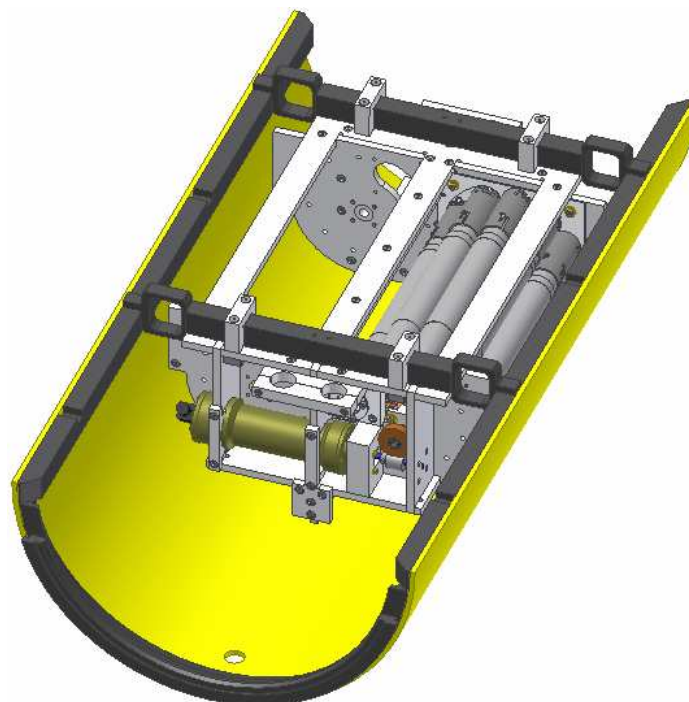


Abbildung 5.6-16: Wasserprobennehmer in Nutzlastbucht des AUV

Die Querstreben lassen sich leicht aus der Nutzlastbucht entfernen und sind für die Strukturstabilität des AUV unerheblich. In Abbildung 5.6-16 sind daher nur die beiden zur Halterung des Wasserprobennehmers nötigen Querstreben eingebaut.

5.7 Schleifbauteile und Rohranschluss

Aufgrund des Arbeitsprinzips des Wasserprobennehmers ist der Einbau spezieller Schleifbauteile erforderlich. Diese Bauteile dienen in erster Linie dazu, die Reibungskräfte während der Bewegung des Trommelmagazins zu minimieren. Alle Schleifbauteile bestehen daher aus PTFE.

Die größten Schleifbauteile sind die Schleifplatten, die auf den Stützplatten befestigt sind. Sie decken den größten Teil des Bewegungsbereichs des Trommelmagazins ab.

(Abbildung 5.7-1).

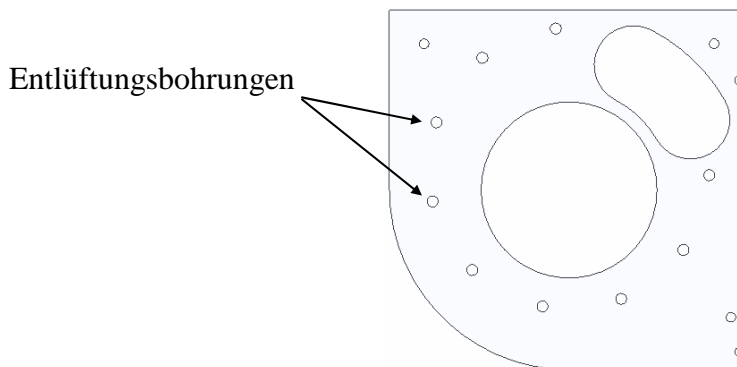


Abbildung 5.7-1: Schleifplatte aus PTFE

Der Lochkreis in den Platten dient der Entlüftung der Röhren zu Beginn des Tauchgangs. Die Durchgangsbohrungen setzen sich durch die Stützplatten hindurch fort.

Nachteilig bei der Verwendung von PTFE ist seine hohe Dichte, die mit ca. $2,17 \text{ g/cm}^3$ um mehr als das Doppelte über der von Wasser liegt. Die Verwendung von PTFE war daher möglichst einzuschränken. Hierin liegt auch der Grund für die Verwendung eines Systems aus Stütz- und Schleifplatten. Dadurch, dass alle Kräfte durch die Stützplatten aufgefangen werden, können die Schleifplatten sehr dünn dimensioniert werden. Im Fall des Wasserprobennehmers liegt deren Dicke bei lediglich 2 mm.

Eine besondere Stellung nimmt der Rohranschluss ein. Dieser dient sowohl als Schleifbauteil, als auch der Zuführung von Wasser zu den Röhren. Dem Wasserprobennehmer wird über zwei Rohrleitungen Wasser aus dem Bugbereich des AUV zugeführt. Um die Röhren erreichen zu können, muss dieser Wasserstrom durch Stütz- und Schleifplatten hindurchgeführt werden. Zudem muss innerhalb der Zuleitung der Auslösemechanismus integriert sein (Kapitel 5.1.4).

In der Explosions- und Zusammenbaudarstellung wird der aus diesen Anforderungen resultierende mehrteilige Aufbau des Anschlusses deutlich (Abbildung 5.7-2 und Abbildung 5.7-3):

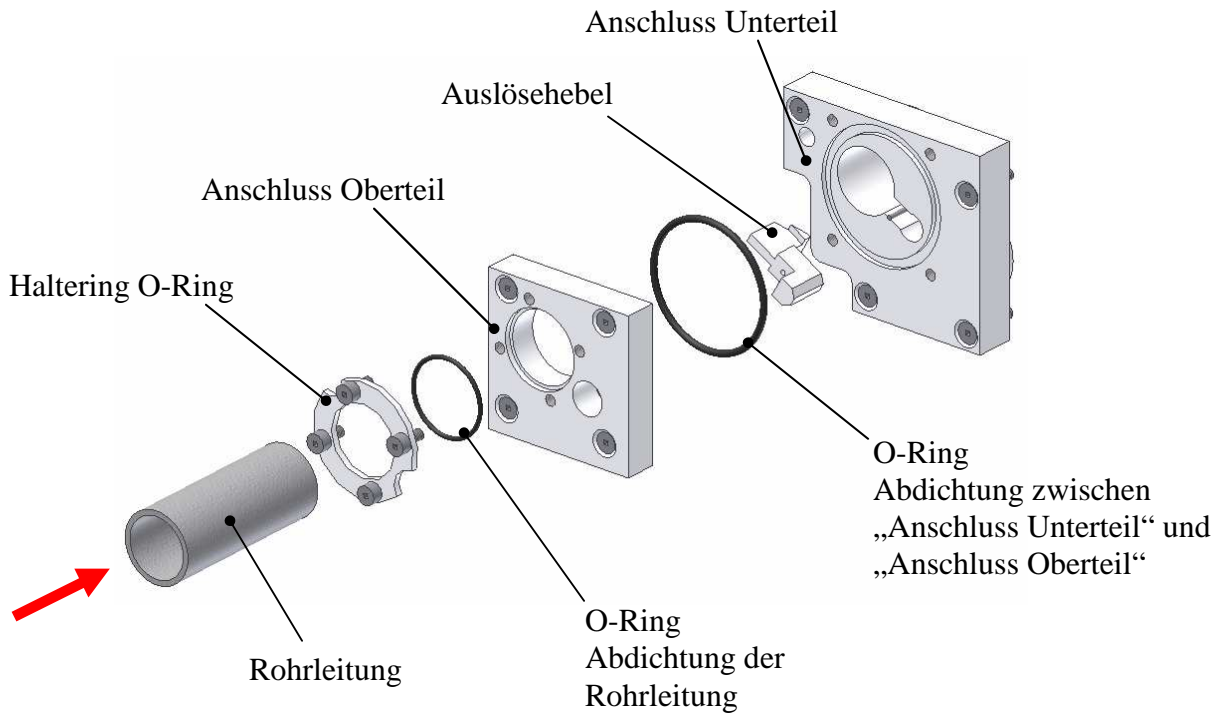


Abbildung 5.7-2: Explosionsdarstellung des Anschlusses

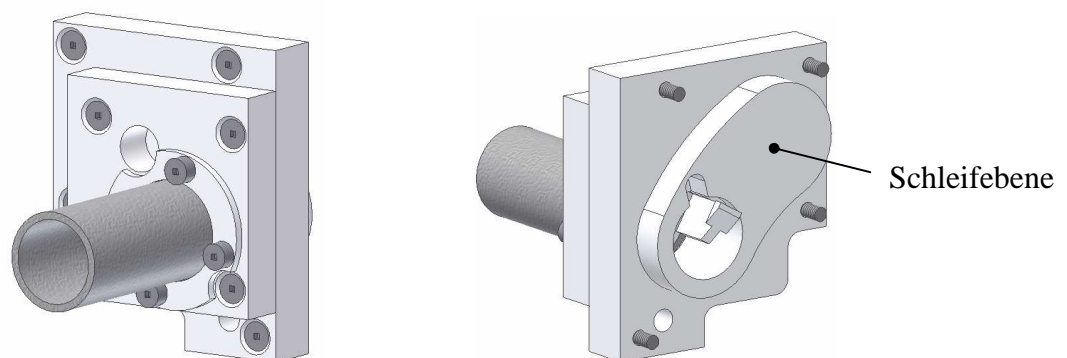


Abbildung 5.7-3: Anschluss, Zusammenbau, Front- und Rückansicht

Da alle Bauteile, die Teil des Anschlusses sind, unmittelbar mit der Probe in Berührung kommen, mussten sie die Reinheitsanforderungen erfüllen. Alle Kunststoffbauteile bestehen daher aus PTFE. Dies ist insbesondere im Fall des Unterteils des Anschlusses zwingend nötig, da es, wie die Schleifplatten, ein Teil der gesamten Schleifebene ist.

Das Unterteil der Zuleitung ist das Gegenstück zu den nierenförmigen Öffnungen in Stütz- und Schleifplatten. Im Wasserprobennehmer wird der Anschluss an der Rückseite der Stützplatte befestigt. Werden Schleifplatte und Anschluss an der Stützplatte befestigt, ergibt sich eine zusammenhängende Schleifebene (Abbildung 5.7-4).

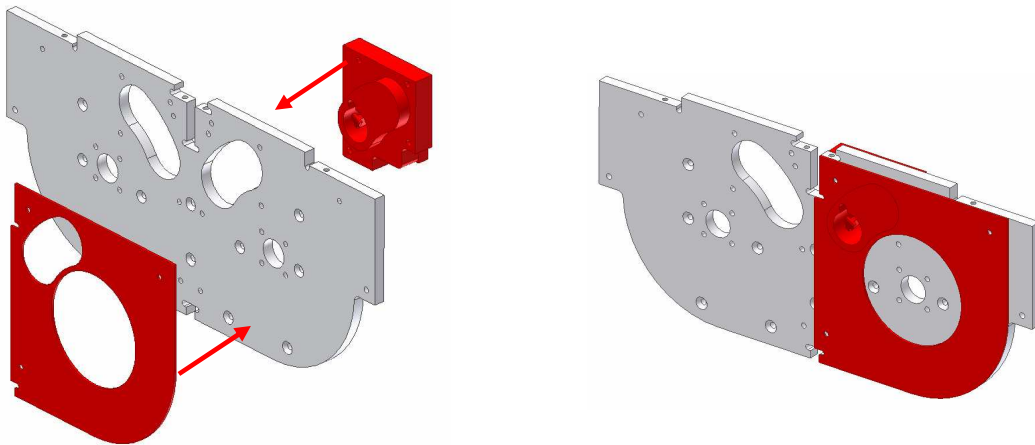


Abbildung 5.7-4: Bildung der Schleifebene

Somit lässt sich eine durchgehende Leitung vom Bug des AUV, bis zu den Röhren realisieren, innerhalb derer das (Proben-)Wasser nur mit Materialien in Berührung kommt, die die Reinheitsanforderungen erfüllen.

5.8 Rohrleitung

Den Trommelmagazinen des Wasserprobennehmers wird über eine jeweils eigene Rohrleitung Wasser aus dem Bugbereich des AUV zugeführt. Um eine Durchströmung der Röhren zu erreichen, muss jedoch auch ein Abfluss des Wassers möglich sein. Die hierzu nötigen Rohrleitungen unterliegen, zumindest auf der Seite des Zuflusses, den Reinheitsbedingungen. Aus diesem Grund ist die Materialauswahl und somit auch die Anzahl verwendbarer Rohrsysteme stark eingeschränkt. Zudem ist durch die Reinheitsbedingungen der Verlauf der Rohrleitung vorgegeben (s. Kapitel 4.9).

Ein geeignetes Rohrsystem wird durch die Firma Frank angeboten. Es handelt sich dabei um ein Rohrsystem aus PVDF, das normalerweise in der Chipherstellung zum Transport von Reinstwasser verwendet wird (Abbildung 5.8-1). Die Schweißbarkeit von PVDF ermöglicht die nahezu beliebige Auslegung von Rohrleitungssystemen.



Abbildung 5.8-1: PVDF Rohrnetz: Quelle: Frank GmbH

5.8.1 Zuleitung

Die Reinheitsanforderungen machen die Entnahme des Wassers vor der Bugspitze des AUV erforderlich. Entsprechend der konzeptionellen Auslegung muss die Zuleitung daher vom Wasserprobennehmer in der Nutzlastbucht bis in die Bugspitze des AUV verlegt werden. Da sich im Bug des AUV jedoch ein Kollisionssonar befindet, ist der Einbauraum hier stark eingeschränkt (Abbildung 5.8-2).

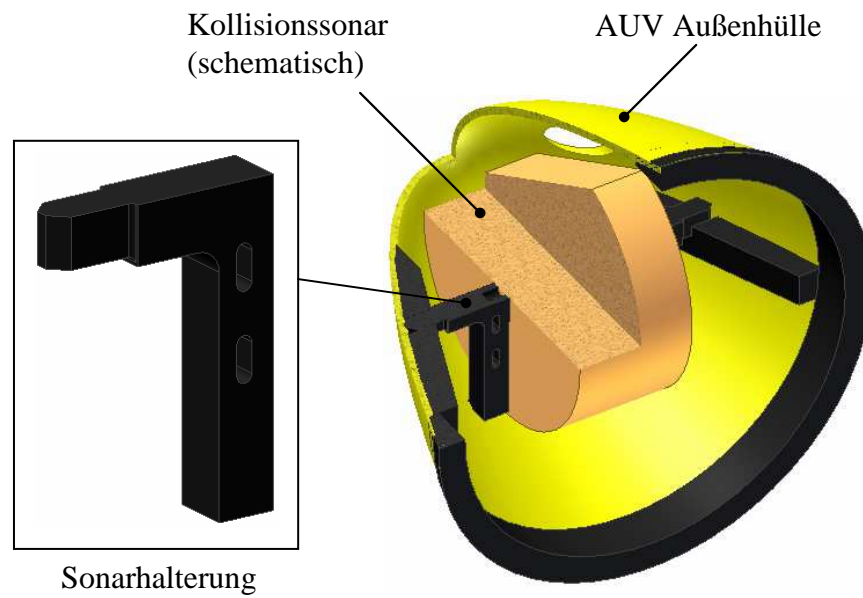


Abbildung 5.8-2: Innerer Aufbau des AUV-Bugs

Die Zuleitungen müssen beidseitig um das Kollisionssonar herumgeführt werden. Um sie in dieser Position zu fixieren, sind spezielle Rohrhalterungen nötig. Als einziges Bauteil im Bug bietet die abgebildete Sonarhalterung die Möglichkeit, weitere Bauteile, wie eine Rohrhalterung, daran zu befestigen.

Die Rohrhalterung und ihre Position im Bug sind in Abbildung 5.8-3 dargestellt (zur besseren Darstellung ist die Sichtbarkeit der Außenhülle des AUV unterdrückt):

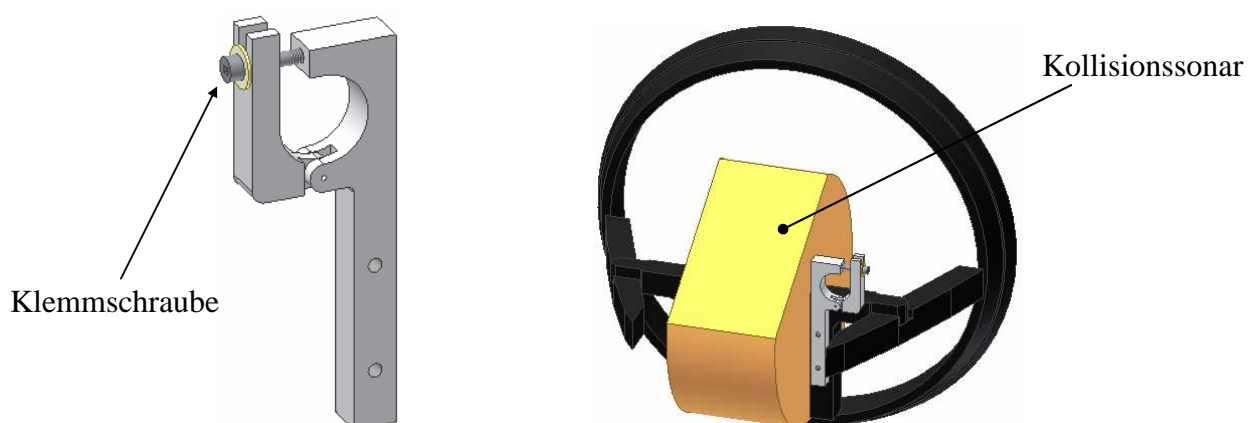


Abbildung 5.8-3: Rohrhalterung, Einzelansicht und Einbauzustand

Es stehen somit Anfangs- und Endpunkt der Zuleitung fest.

- Anfang: Rohrhalterung im Bug
- Ende: Rohranschluss im Wasserprobennehmer

Die Geometrie der Röhre ergibt sich dementsprechend und ist in Abbildung 5.8-4 dargestellt:



Abbildung 5.8-4: Zuleitung

Die Außenhülle des AUV verfügt über entsprechende Bohrungen im Bugbereich, um die Durchführung der Zuleitung zu ermöglichen. Abbildung 5.8-5 zeigt die Zuleitung eines der beiden Trommelmagazine im Einbauzustand innerhalb des AUV.

Neben der Halterung im Bug, sowie der Fixierung durch den Rohranschluss im Wasserprobennehmer, ist hier eine weitere Befestigung der Zuleitung auf einer der Querstreben zu erkennen („Zuleitungshalterung Querstrebe“)

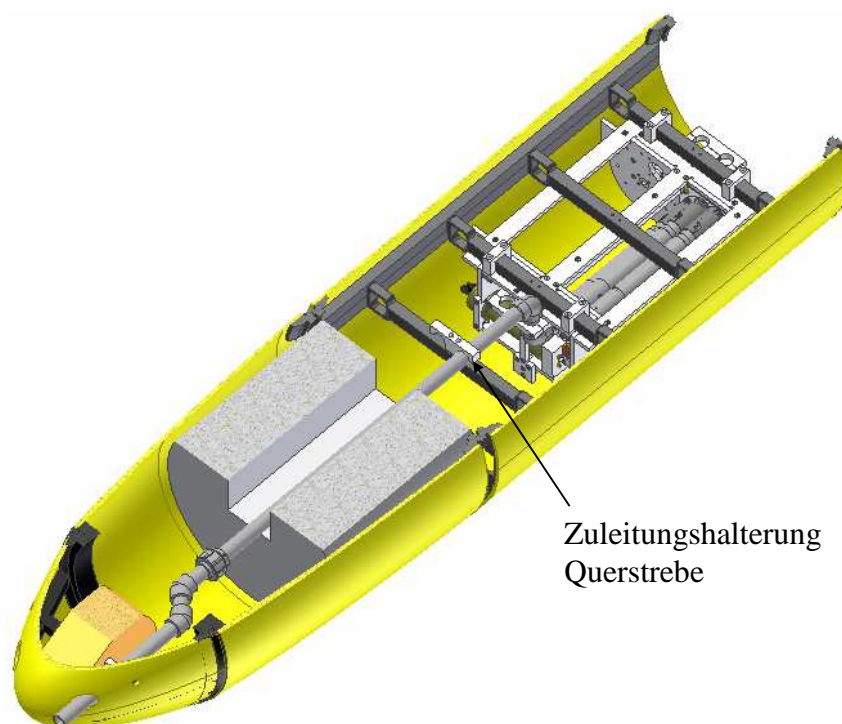


Abbildung 5.8-5: Zuleitungsverlauf im AUV

Zur Erhöhung des Durchflusses, können wahlweise Einlasstrichter auf die Zuleitungsöffnung aufgesetzt werden.

Durch die weit nach vorne verlagerte Einlassöffnung der Zuleitung ist die Entnahme von Wasser garantiert, das zuvor nicht mit anderen Teilen des AUV in Berührung kam.

5.8.2 Ableitung

Ein Durchfluss durch die Röhren kann nur erreicht werden, wenn der Wasserprobennehmer über eine Ableitung verfügt. Da es unbedeutend ist, an welcher Stelle das Wasser wieder das AUV verlässt, kann die Geometrie der Ableitung einfacher gewählt werden, als im Fall der Zuleitung. Die einfachste Möglichkeit ist hierbei den Wasserstrom nach oben abzuführen. Die Ableitung ist daher geformt wie ein Schnorchel (Abbildung 5.8-6).



Abbildung 5.8-6: Ableitung

Eine zusätzliche Abstützung im AUV ist wegen der Kürze der Rohrleitung nicht nötig. Für die Befestigung sind die am Wasserprobennehmer angebauten Halterungen ausreichend. Den Verlauf der Ableitung im AUV stellt Abbildung 5.8-7 dar.

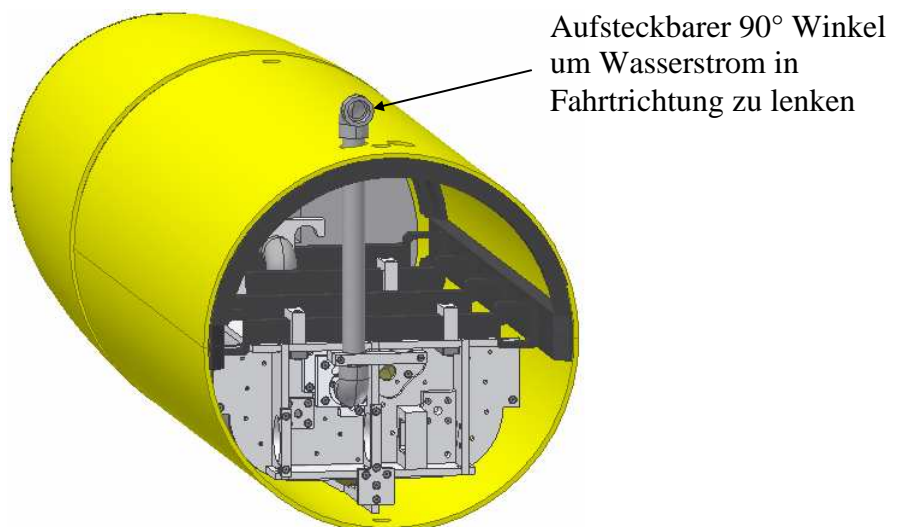


Abbildung 5.8-7: Ableitungsverlauf im AUV

5.9 Gesamtüberblick

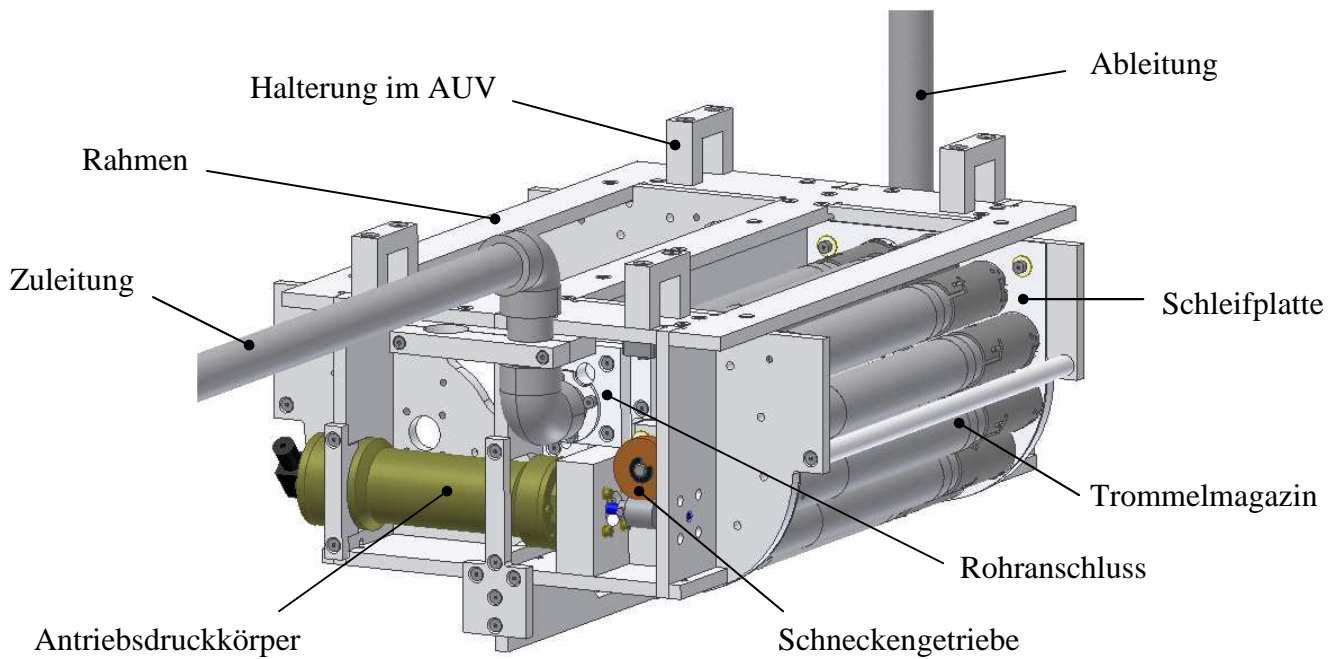


Abbildung 5.9-1: Wasserprobennehmer, von oben

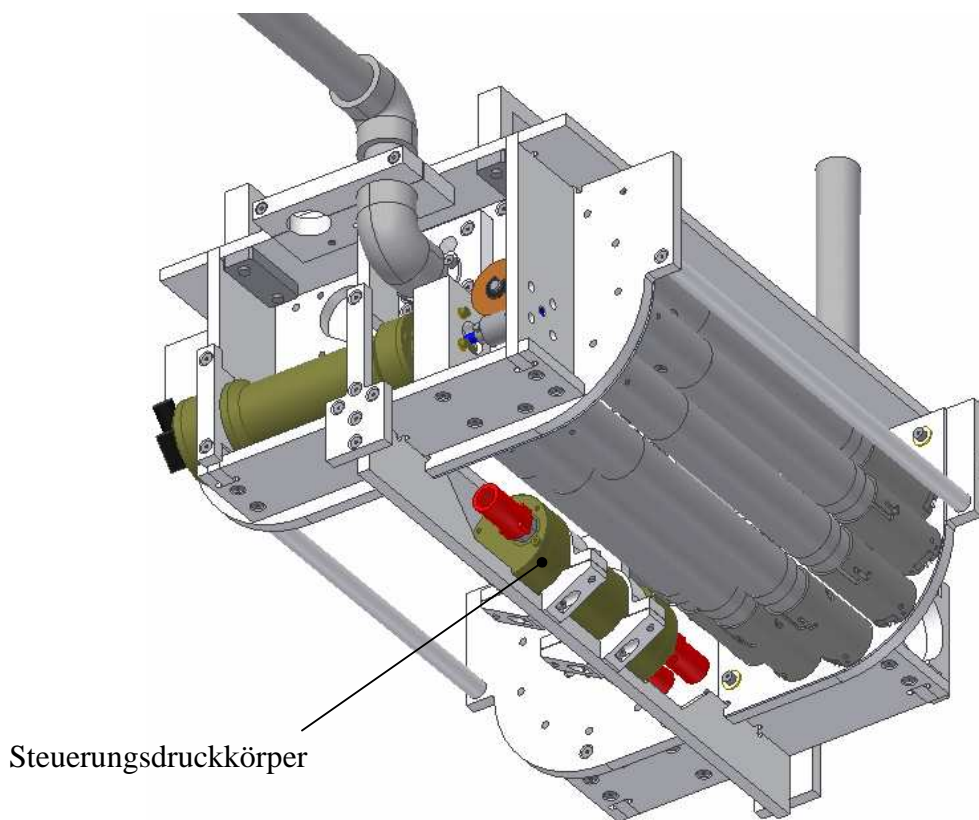


Abbildung 5.9-2: Wasserprobennehmer, von unten

Die wichtigsten Daten im Überblick (für zwei Trommelmagazine):

		Einheit	Größe
Dimensionen ohne Rohrleitung	Länge:	[mm]	617
	Breite:	[mm]	437
	Höhe:	[mm]	285
Anzahl der Probenröhren		[]	22
Probenvolumen / Röhre		[ml]	220
Probenvolumen gesamt		[ml]	4840
Gewicht (Luft)		[kg]	25,1
Gewicht (Wasser)		[kg]	10,8

6 Integration

Die Integration bildete den abschließenden Arbeitsschritt im Entstehungsprozess des Wasserprobennehmers. Im folgenden Kapitel sind die einzelnen Arbeitsschritte der Integration dargestellt und erläutert.

Es ist zu beachten, dass der Wasserprobennehmer konstruktiv zwar auf die Aufnahme von zwei Trommelmagazinen ausgelegt ist, zu Testzwecken jedoch zunächst nur der Einbau eines der Magazine erfolgte.

6.1 Probenröhren

Die Einzelteile der Probenröhren sind nahezu ausschließlich Sonderanfertigungen. Aufgrund der verschiedenen Materialien und Funktionen der einzelnen Teile, wurden diese von unterschiedlichen Herstellern, teilweise auch von eigenen Werkstätten des Alfred-Wegener-Instituts, bezogen.

Im Anlieferungszustand bestand die Röhre aus dem weißlichen PVDF Röhrenkörper. In diesen Röhrenkörper wurden verschiedene Bauteile eingeschraubt, bzw. eingepresst. Es sind dies (Abbildung 6.1-1):

- **Halterungstifte** (Halierung der Röhre im Trommelmagazin)
- **Bajonettstifte**
- **Entlüftungsschraube** (Entnahme der Probe aus der Röhre)
- **Schleifring**
- **Haltehaken**



Abbildung 6.1-1: Röhrenkörper mit Anbauteilen

Die Entlüftungsschraube, sowie die Halterungstifte, wurden in den Röhrenkörper eingeschraubt. Hierzu sind entsprechende Gewindebohrungen enthalten.

Der Schleifring, die Bajonettstifte und die Haltehaken wurden hingegen eingepresst. Die Aufnahmebohrungen, bzw. die Aufnahmenut sind daher „zu klein“ dimensioniert, womit bei den Bauteilen eine Presspassung aufgebaut wird.

Im nachfolgenden Arbeitsschritt wurde das Innere der Röhre gereinigt. Um diesen gereinigten Zustand zu konservieren, wurde anschließend der Verschluss der Röhren eingebaut. Die Bauteile des Röhrenverschlusses sind in Abbildung 6.1-2 dargestellt:

- **O-Ring**
- **Verschlusskegel**
- **Zugfeder**

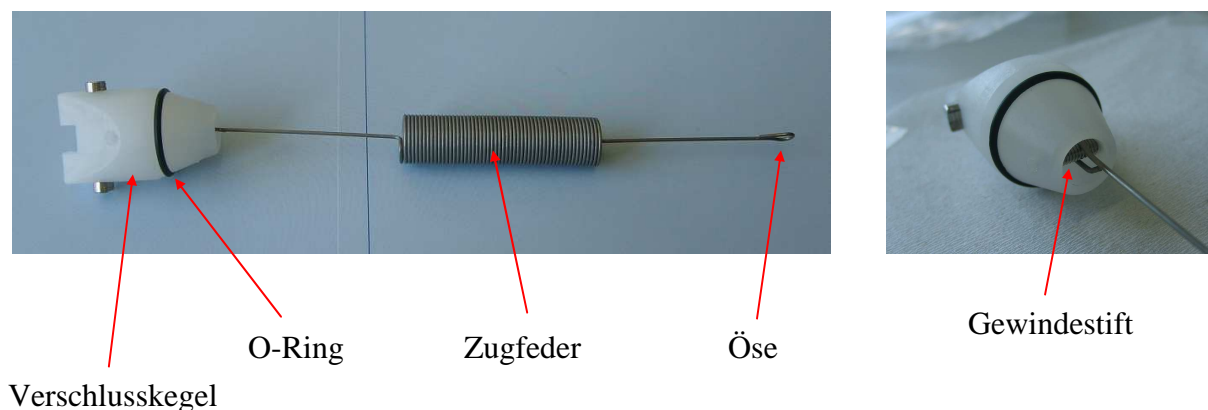


Abbildung 6.1-2: Verschlussbauteile

Um Zugfeder und Verschlusskegel miteinander verbinden, aber auch leicht trennen zu können, sind die Enden der Zugfeder zu einer Öse geformt. Im Verschlusskegel ist ein Gewindestift enthalten, der in diese Öse hineingreift.

Zur Integration des Verschlusses wurde an einem Ende der Zugfeder ein Verschlusskegel angebracht. Das freie Ende der Feder wurde in die Röhre eingeführt und mit einem Haken herausgezogen. An diesem Ende konnte anschließend ebenfalls ein Verschlusskegel angebracht werden.

Die Integration der Probenröhre wurde durch das Anbringen des beweglichen Endstücks abgeschlossen. Hier mussten zunächst die Haltehaken zur Befestigung des Verschlusskegels eingepresst werden (Abbildung 6.1-3)

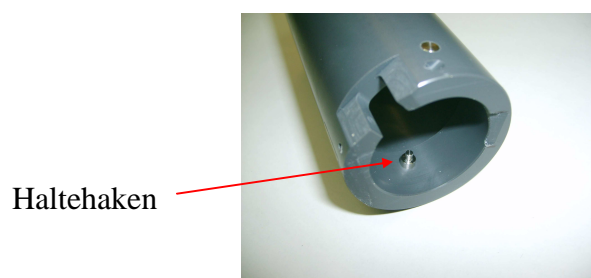


Abbildung 6.1-3: Haltehaken im beweglichen Endstück

Anschließend wurden Endstück und Druckfeder auf den Röhrenkörper aufgeschoben und der Bajonettverschluss eingehakt (Abbildung 6.1-4).



Abbildung 6.1-4: Anbringen des beweglichen Endstücks

Nach Anbringen der Bedruckung, die die Identifikation der Röhre ermöglicht und die richtige Einbaurichtung kennzeichnet, ergibt sich somit folgendes Bild einer fertigen Probenröhre (Abbildung 6.1-5):



Abbildung 6.1-5: Probenröhre

Für den Einsatz auf Expeditionen stehen insgesamt 14 baugleiche Röhren zur Verfügung (Abbildung 6.1-6). Da der Wasserprobennehmer nur mit einem Trommelmagazin ausgerüstet ist, können maximal elf Röhren zugleich eingesetzt werden. Es ergibt sich somit eine Reserve von drei Röhren.



Abbildung 6.1-6: Gesamtzahl der Probenröhren

6.2 Antriebsdruckkörper

Der Antriebsdruckkörper stellt eine komplette Neukonstruktion dar. Der Einsatz ist ausschließlich für den Wasserprobennehmer geplant. Die meisten Teile sind Sonderanfertigungen und in dieser Form bisher nicht getestet worden. Zudem werden im Druckkörper Dichtungen eingesetzt, für deren Funktion die Sauberkeit während der Integration von entscheidender Bedeutung ist.

Wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben, verfügt der Antriebsdruckkörper über einen gegliederten Aufbau, bei dem alle innenliegenden Komponenten am vorderen Deckel des Druckkörpers befestigt sind. Aus diesem Grund beginnt die Integration des Antriebsdruckkörpers mit den „vordersten“ Teilen: der Wellenlagerung.

Die Welle des Antriebsdruckkörpers ist doppelt axial und radial gelagert. Für die Integration der Bauteile werden die Lager auf die Antriebswelle aufgeschoben und Welle und Lager anschließend in den vorderen Deckel des Druckkörpers eingebracht. Um die Wellenlagerung zu fixieren, wird oberhalb des Lagers A der Haltering mit dem vorderen Deckel des Druckkörpers verschraubt. (Abbildung 6.2-1).

Während der Integration war besonders auf die Oberflächenbeschaffenheit der Antriebswelle zu achten. Da die Oberfläche der Welle gleichzeitig die Lauffläche der Rotationsdichtung darstellt, könnten Beschädigungen während der Integration (z.B. Kratzer) zu Undichtheiten führen.

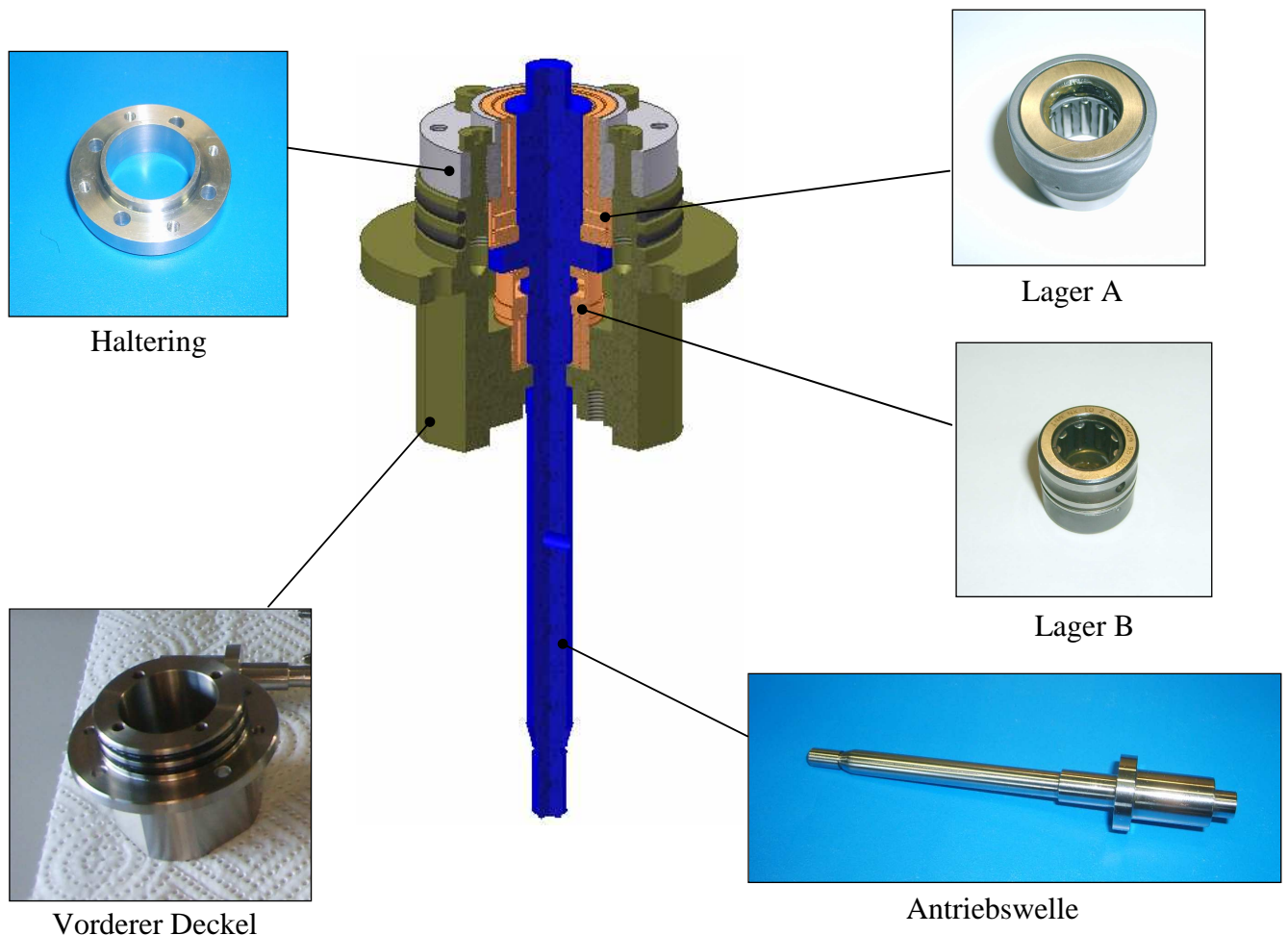


Abbildung 6.2-1: Bauteile der Wellenlagerung

Abbildung 6.2-2 zeigt die Wellenlagerung nach Abschluss der Integration:



Abbildung 6.2-2: Wellenlagerung

Im nächsten Arbeitsschritt wurde die Rotationsdichtung in den vorderen Deckel eingebaut. Hierzu wurden zunächst die Einzelteile der Dichtung (PTFE-Ring + O-Ring) zusammengesetzt (Abbildung 6.2-3).

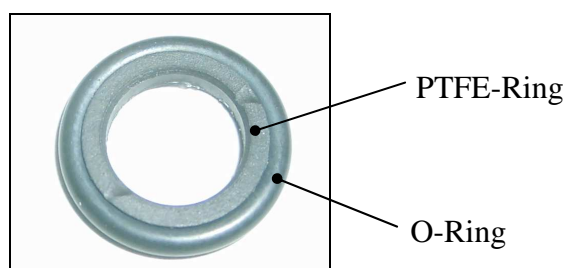


Abbildung 6.2-3: Rotationsdichtung

Zum Aufschieben der Dichtung wurde die Antriebswelle mit Silikonfett geschmiert. Die Dichtung wurde mit Hilfe eines Kunststoffrohrs in ihren Sitz im Druckkörper eingepresst. Nach dem Einbau wurde die Nut durch einen Kunststoffring geschlossen (Abbildung 6.2-4).



Abbildung 6.2-4: Dichtungsnut der Rotationsdichtung offen (links), geschlossen (rechts)

Die weitere Integration des Antriebsdruckkörpers beinhaltete den Einbau des Motors mit dem Planetengetriebe und dem Inkrementalgeber. Motor, Getriebe und Inkrementalgeber sind bereits ab Werk miteinander verbunden und bilden eine Einheit („Motoreinheit“). Um die

Motoreinheit mit dem Deckel des Druckkörpers verbinden zu können, muss zunächst die Klauenkupplung geteilt werden. Jeweils eine Hälfte der Kupplung wird an der Antriebswelle und an der Welle des Planetengetriebe befestigt (Abbildung 6.2-5). Da sich die Hälften der Kupplung zusammenschieben lassen, können Antriebs- und Getriebewelle somit nachträglich leicht verbunden werden.

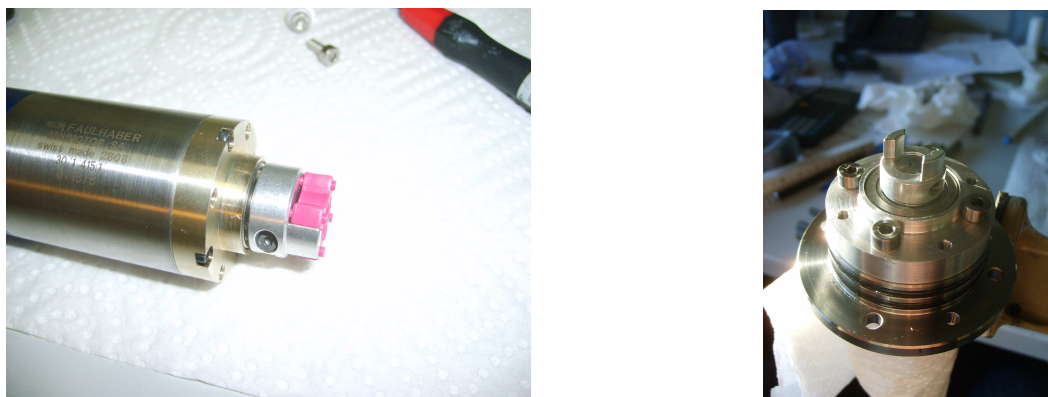


Abbildung 6.2-5: Klauenkupplung an Getriebewelle (links) und Antriebswelle (rechts)

Um die Motoreinheit mit dem Deckel des Druckkörpers verbinden zu können, muss der Motorträger an das Planetengetriebe angeschraubt werden. Anschließend werden Motorträger und Haltering miteinander verschraubt. Die beiden Kupplungshälften werden dabei ineinander geschoben und verbinden so Antriebs- und Getriebewelle (Abbildung 6.2-6).

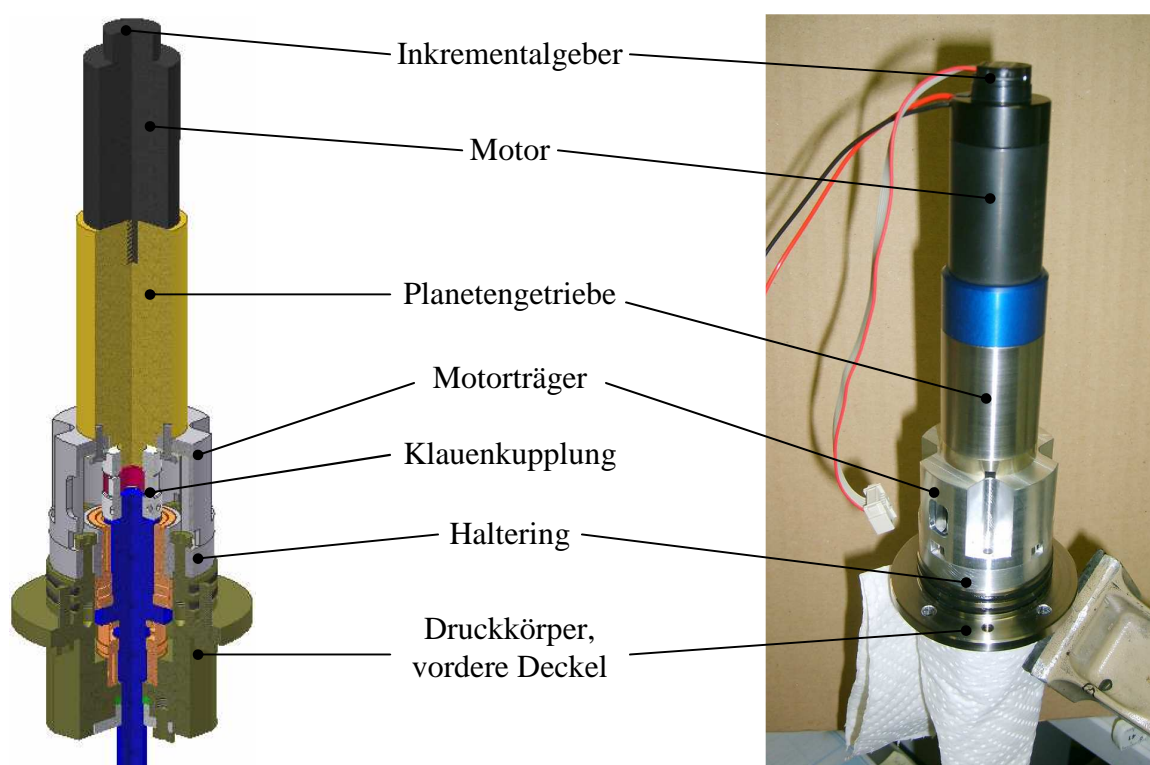


Abbildung 6.2-6: Integration der Motoreinheit

Nachdem der innere Aufbau des Antriebsdruckkörpers abgeschlossen ist, wird der Druckkörper geschlossen. Hierzu werden die im vorderen Deckel eingelassenen O-Ringe mit

Silikonfett benetzt und das Rohr des Druckkörpers über die Motoreinheit „gestülpt“. Es kann nun mit dem vorderen Deckel verschraubt werden.

Nachdem der wasserdichte Stecker für die elektrische Zuleitung am hinteren Deckel befestigt wurde (Abbildung 6.2-7), kann er ebenfalls mit dem Rohr verschraubt werden. Der Druckkörper ist somit geschlossen (Abbildung 6.2-8).



Abbildung 6.2-7: Wasserdichte elektrische Zuleitung zum Antriebsdruckkörper



Abbildung 6.2-8: Antriebsdruckkörper

6.3 Rohranschluss

Der Rohranschluss besteht aus mehreren PTFE Bauteilen und beinhaltet den Auslösehebel zum Verschluss der Probenröhren. Der detaillierte Aufbau des Rohranschlusses ist in Abbildung 5.7-2 dargestellt.

In das Unterteil des Anschlusses muss zunächst der Auslösemechanismus eingesetzt werden. Dieser besteht aus (Abbildung 6.3-1)

- **Auslösehebel**
- **Bewegungsachse**
- **Druckfeder**

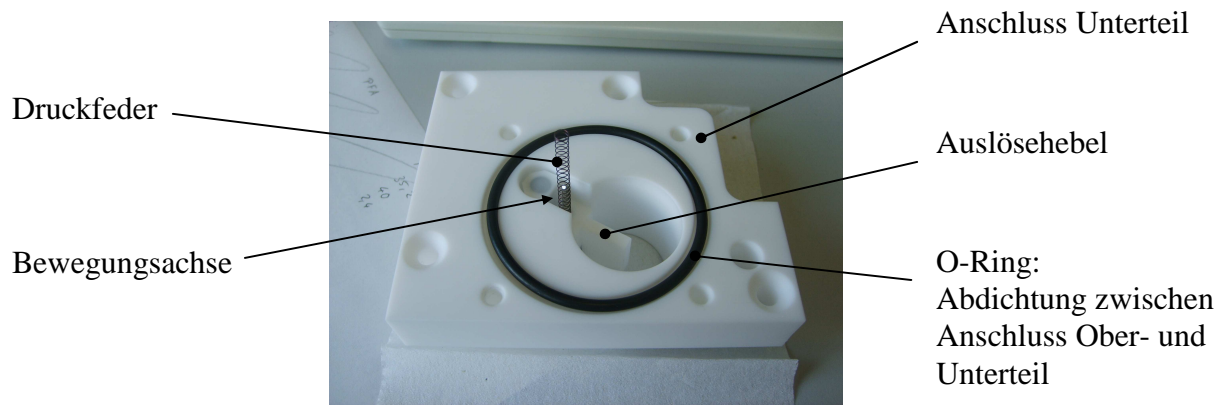


Abbildung 6.3-1: Auslösemechanismus im Rohranschluss

Nach dem Einlegen des O-Rings, kann das Oberteil des Anschlusses auf das Unterteil aufgesetzt werden.

Der gesamte Rohranschluss und Auslösemechanismus bilden somit eine zusammenhängende Baugruppe die als ganzes am Wasserprobennehmer angebaut werden kann (Abbildung 6.3-2).

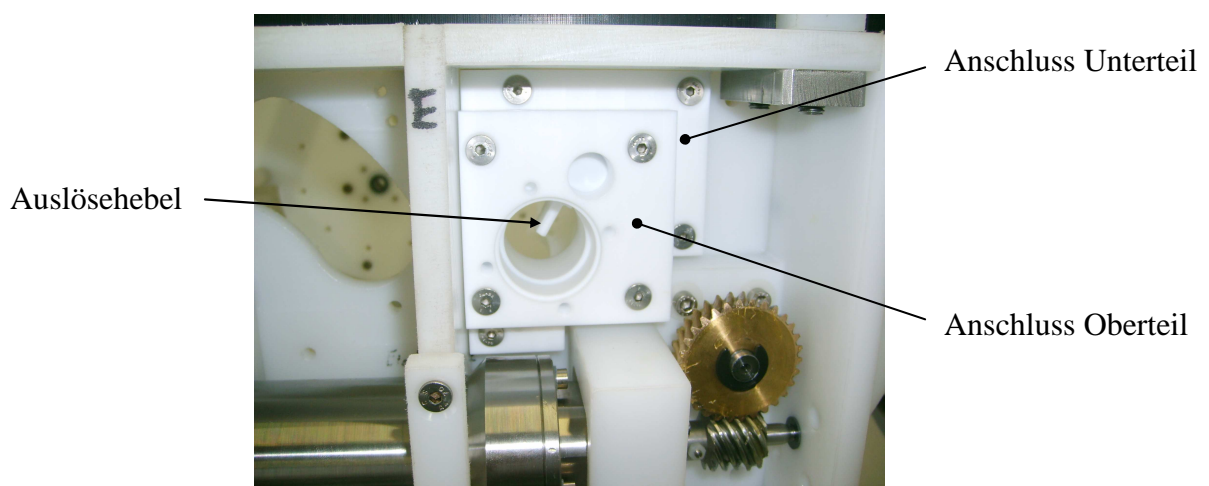


Abbildung 6.3-2: Rohranschluss im Wasserprobennehmer

6.4 Wasserprobennehmer

Die Integration des Gesamtsystems „Wasserprobennehmer“ beinhaltet den Zusammenbau des Rahmens und den Einbau aller beweglichen Teile (Antriebsbauteile, Trommelmagazin, etc...). Aus Umfangsgründen wird im folgenden Kapitel nur auf die größten, bzw. wichtigsten Bauteile eingegangen.

Der Rahmen des Wasserprobennehmers besteht zum größten Teil aus PE-Kunststoffplatten. Innerhalb dieser Platten sind während der Konstruktion Ausfräsungen vorgesehen worden, mit deren Hilfe ein Großteil der Bauteile durch Ineinanderstecken gefügt werden kann. Die im Anschluss eingesetzten Schrauben dienen hauptsächlich der Sicherung. Um Reparaturen, insbesondere an Bord von Forschungsschiffen, zu vereinfachen, ist der Aufbau des Rahmens mit nur zwei Schraubensorten möglich.

Die Struktur des Rahmens bei gesteckten Bauteilen (Abbildung 6.4-1):

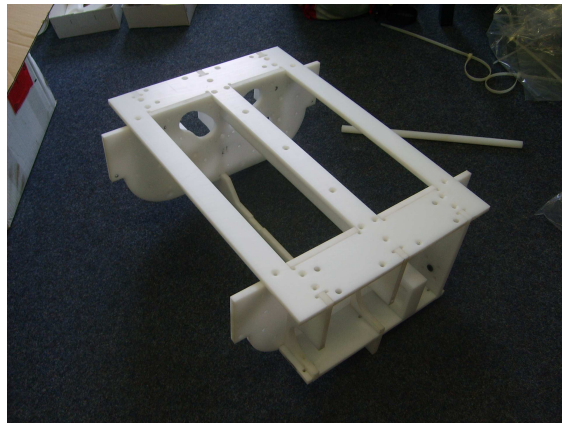


Abbildung 6.4-1: Rahmen, Bauteile gesteckt

Nach der Sicherung der Rahmenbauteile mit Hilfe von Schrauben, beinhalten die nächsten Arbeitsschritte den Einbau des kompletten Antriebsstranges. Hierzu musste zunächst das Trommelmagazin eingebaut werden (Abbildung 6.4-2). Die Antriebswelle des Magazins wurde in ihre Aufnahmen im Rahmen eingeführt und gleichzeitig die Bauteile des Magazins auf die Welle aufgeschoben. Der Zusammenbau des Magazins erfolgte auf der Welle.

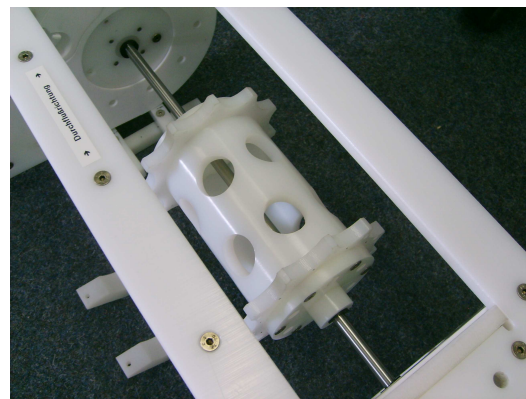
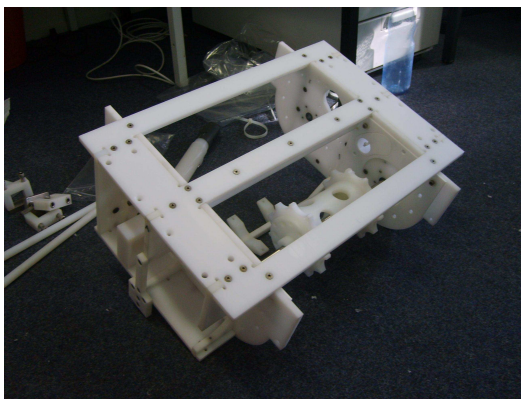


Abbildung 6.4-2: Trommelmagazin im Wasserprobennehmer

Nach dem Einbau des Trommelmagazins konnte der Antriebsdruckkörper und das Schneckengetriebe installiert werden (Abbildung 6.4-3). Hierzu musste der vordere Deckel des Antriebsdruckkörpers in seine quadratische Aufnahme im Wellen- und Motorlager eingesetzt werden. Während des Einsetzens musste die Schnecke auf die Antriebswelle aufgeschoben werden. In ihrer endgültigen Position wurde sie mit Hilfe eines Stiftes verdrehsicher mit der Welle verbunden.

Die Befestigung des Antriebsdruckkörpers in der Rahmenstruktur erfolgt mit vier stirnseitig eingedrehten Schrauben. Da der Druckkörper aus Titan besteht, sind zur Schonung des Gewindes diese Halteschrauben ebenfalls aus Titan gefertigt.

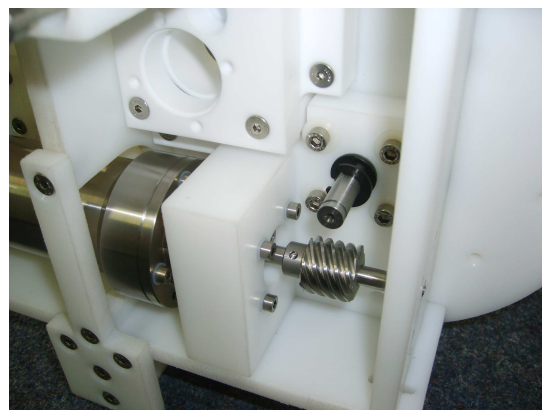
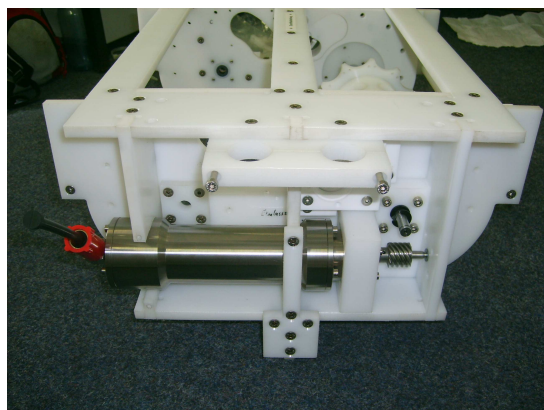


Abbildung 6.4-3: Antriebsdruckkörper im Wasserprobennehmer

Das in Abbildung 6.4-3 oberhalb der Schnecke erkennbare Wellenstück ist Teil der Antriebswelle des Trommelmagazins. Um den Aufbau des Antriebs abzuschließen, muss an dieser Stelle das Schneckenrad aufgeschoben werden. Die Momentübertragung von Schneckenrad auf die Welle erfolgt über eine Passfeder. In axialer Richtung wird das Schneckenrad mit Hilfe von Kunststoffringen gesichert (Abbildung 6.4-4).

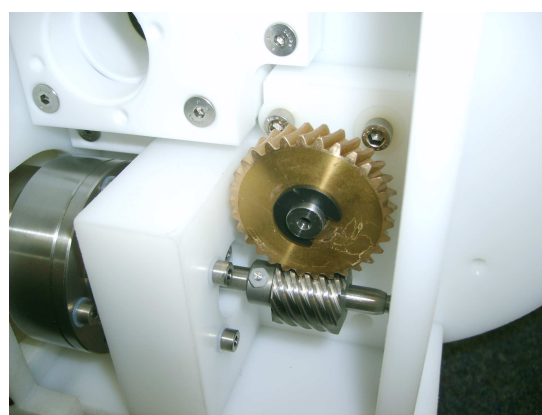
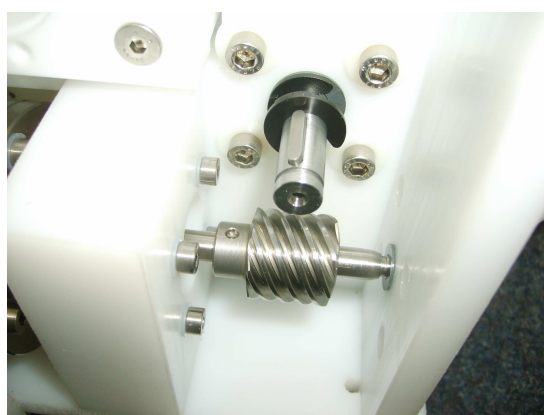


Abbildung 6.4-4: Aufbau des Schneckengetriebes

Im letzten Arbeitsschritt werden am Wasserprobennehmer die Halterungen zur Befestigung des Geräts im AUV angebracht. Die Halterungen bestehen aus bogenförmigen Halterungen, die um die in der Nutzlastbucht des AUV sitzenden Querstreben herumgreifen. Abbildung 6.4-5 zeigt eine Halterung vor dem Einbau und im Detail am Wasserprobennehmer.

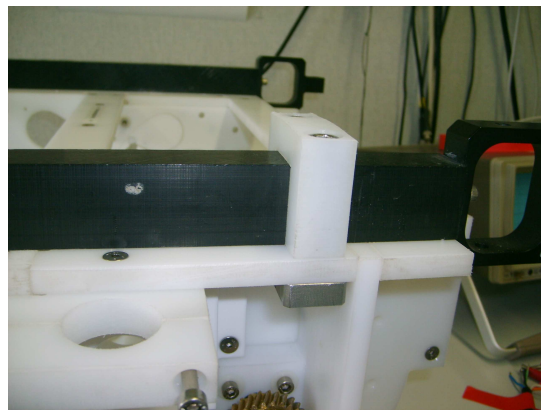
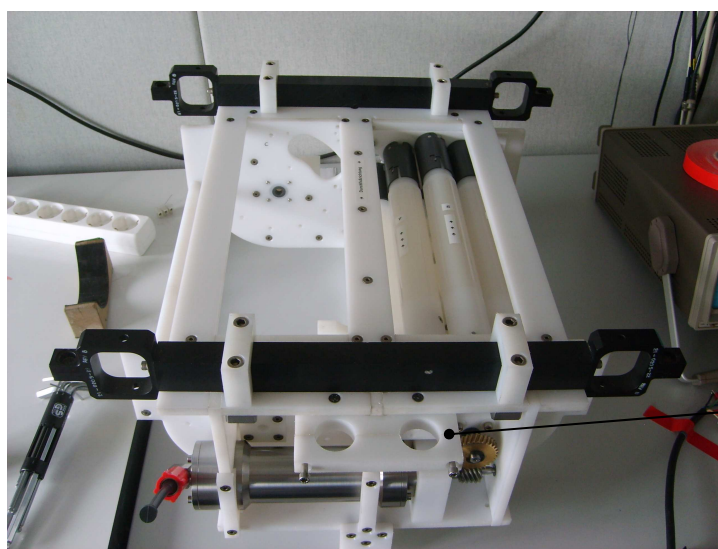


Abbildung 6.4-5: Halterung des Wasserprobennehmers im AUV

Die Querstreben sind in der Nutzlastbucht des AUV lediglich eingelegt. Sie können daher sehr leicht zusammen mit dem Wasserprobennehmer entnommen, bzw. eingesetzt werden. Sie verbleiben dauerhaft am Wasserprobennehmer.

Nach Abschluss der Integration konnte das Trommelmagazin zu Testzwecken mit Proberöhren bestückt werden. Abbildung 6.4-6 zeigt den Wasserprobennehmer nach Abschluss der Integration mit voll bestücktem Trommelmagazin.



Rohrleitungshalterung

Abbildung 6.4-6: Wasserprobennehmer

6.5 Wasserprobennehmer im AUV

Innerhalb des AUV wird der Wasserprobennehmer über Rohrleitungen mit Wasser versorgt. Der Einbau des Wasserprobennehmers in das AUV ist daher mit dem Einbau dieser Rohrleitungen verbunden. Die Rohrleitungen werden unterschieden in die Zuleitung und die Ableitung.

Die Ableitung besteht nur aus einem verhältnismäßig kurzen Rohrstück. Außer der Halterung durch den Wasserprobennehmer (Abbildung 6.4-6) wird daher keine weitere Fixierung innerhalb des AUV benötigt. Der Einbau ist somit unproblematisch.

Im Gegensatz dazu benötigt die Zuleitung aufgrund ihrer Länge zusätzliche Halterungen und Stützen im AUV. Die Zuleitung wird im AUV an vier Stellen gehalten:

- Rohralterung im Bug
- Halterung an einer Querstrebe
- Rohralterung am Wasserprobennehmer
- Fixierung am Wasserprobennehmer durch Rohranschluss

Insbesondere im Bereich der Bugspitze sind Vorarbeiten nötig:

Zum Einbau der Zuleitung muss die Rohralterung in der Bugspitze befestigt werden. Die Rohralterung wird dazu mit der Sonarhalterung verschraubt. Abbildung 6.5-1 zeigt dazu den Blick in das Innere der Bugspitze. Zur Verdeutlichung der Einbausituation ist ein Teil der Zuleitung in die Rohralterung eingesetzt (während des eigentlichen Einbaus der Zuleitung ist dies nicht der Fall). Zudem ist das Kollisionssonar aus der Bugspitze ausgebaut.

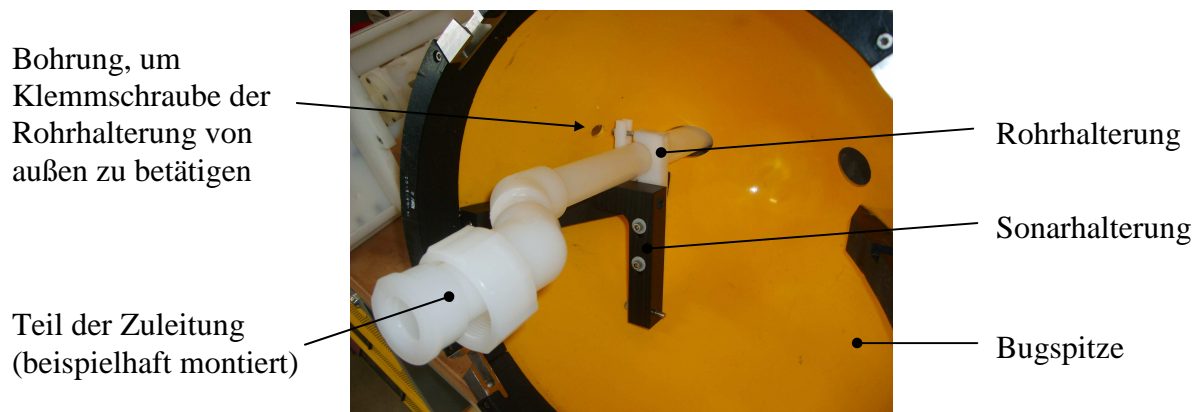


Abbildung 6.5-1: Rohralterung in der Bugspitze des AUV

Die Rohralterung verfügt über eine Schraube, mit deren Hilfe die Klemmung der Zuleitung erfolgt. Durch eine Bohrung in der Außenhülle des AUV kann diese Klemmschraube von außen betätigt werden.

Nach den Vorarbeiten im Bereich der Bugspitze wird der Wasserprobennehmer in die Nutzlastbucht des AUV eingesetzt. Die Ableitung kann direkt in den Rohranschluss am Wasserprobennehmer eingeführt und mit den Rohralterungen fixiert werden. Weitere Arbeiten an der Ableitung sind nicht nötig.

Die Zuleitung muss dagegen zunächst durch den Batterieschacht des AUV geführt werden (Abbildung 6.5-2)

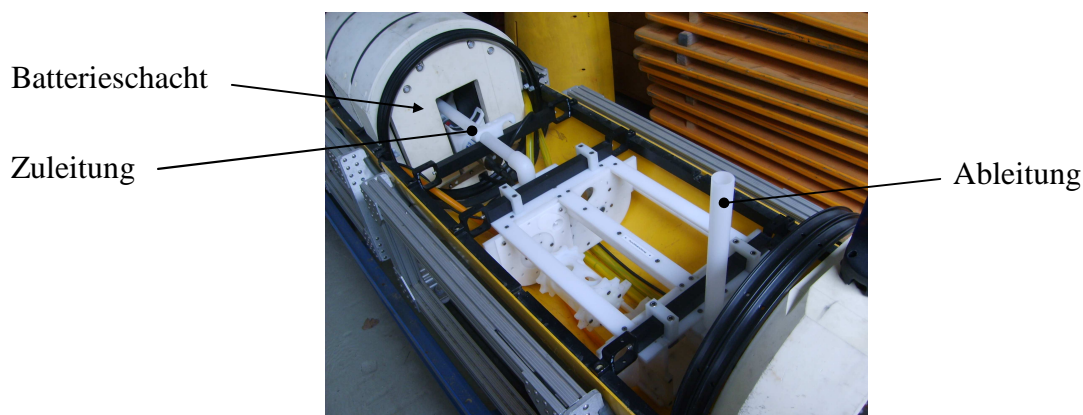
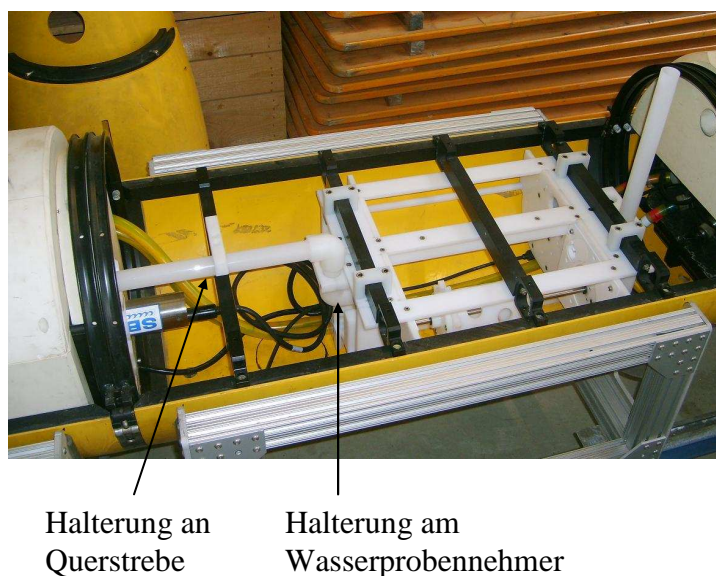


Abbildung 6.5-2: Wasserprobennehmer, Einbau in AUV

In dieser Stellung kann die Zuleitung in den Rohranschluss im Wasserprobennehmer eingeführt werden. Im Bereich der Nutzlastbucht erfolgt die Fixierung über die Halterung an einer Querstrebe, sowie über die Rohrhalterung am Wasserprobennehmer (Abbildung 6.5-3). Ein Herausrutschen der Zuleitung aus dem Rohranschluss ist somit unmöglich.



Halterung an
Querstrebe

Halterung am
Wasserprobennehmer

Abbildung 6.5-3: Halterung der Zuleitung im Bereich der Nutzlastbucht

Nach der Fixierung der Zuleitung in der Nutzlastbucht kann im folgenden Arbeitsschritt die Bugspitze des AUV montiert werden. Hierzu wird während des Aufsetzens der Bugspitze der vordere Teil der Zuleitung durch die Rohrhalterung (in der Bugspitze) geschoben. Ist die Bugspitze sicher mit dem AUV verbunden (Schraubverschluss), wird die Klemmschraube der Rohrhalterung angezogen. Der vordere Teil der Zuleitung ist somit im Bug fixiert (Abbildung 6.5-4).

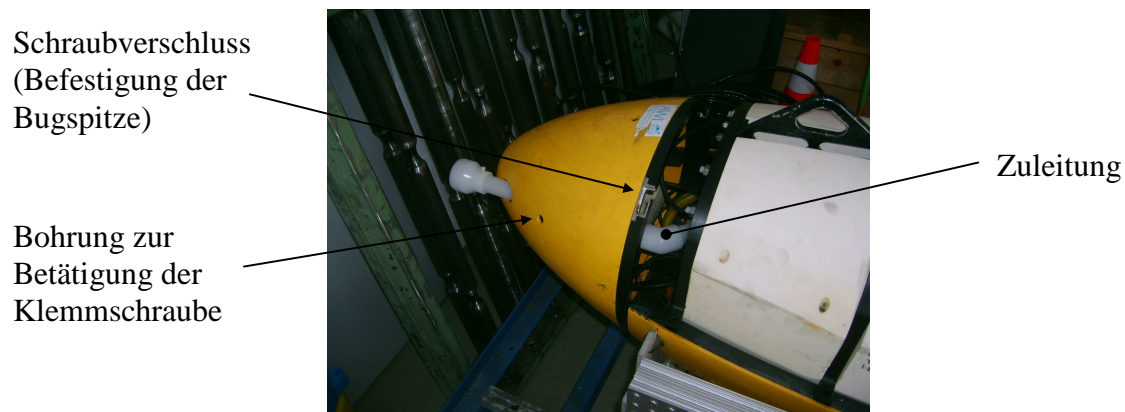


Abbildung 6.5-4: Zuleitung im Bugbereich

Ist die Außenhülle des AUV geschlossen, sind außerhalb des AUV lediglich die Einlassöffnung der Zuleitung, sowie die Auslassöffnung der Ableitung zu erkennen. (Abbildung 6.5-5).



Abbildung 6.5-5: Einlass- und Auslassöffnung des Wasserprobennehmers

In Abbildung 6.5-5 ist die Einlassöffnung mit einem Einlasstrichter versehen. Dieser Trichter wird auf die Zuleitung aufgeschoben und mittels einer seitlich eingedrehten Schraube gesichert.

6.6 Gesamtüberblick

Nach Abschluss der Integration bietet Abbildung 6.6-1 einen Überblick über den Wasserprobennehmer im AUV. In dieser Abbildung ist das Trommelmagazin voll bestückt. Die Darstellung zeigt daher gut die Erreichbarkeit der Probenröhren bei späteren Tauchexpeditionen.



Abbildung 6.6-1: Wasserprobennehmer im AUV

7 Tests

Der Wasserprobennehmer ist eine komplette Neuentwicklung. Eine Reihe von Bauteilen und Techniken ist speziell für den Einsatz in diesem Gerät entwickelt worden und daher nicht erprobt. Neben den wissenschaftlichen Anforderungen, denen der Wasserprobennehmer genügen muss, sind es insbesondere die harten Einsatzbedingungen in der Tiefsee, die eine Erprobung des Gerätes in einer gesonderten Testkampagne nötig machen.

In diesem Kapitel wird die Erprobung der folgenden, als besonders kritisch definierten Punkte erläutert:

- Abdichtung der Röhrenstirnseite
- Befüllung der Probenröhren
- Drucktest des Antriebsdruckkörpers

7.1 Abdichtung der Röhrenstirnseite

Da das Innere des AUV geflutet ist, sind die Röhren von Wasser umgeben, das aufgrund seines Kontakts zum AUV, als verunreinigt gelten muss. Zumindest während der Durchströmung der Röhre darf dieses Wasser daher nicht in die Röhre gelangen. Im Fall des Einlasses der Probenröhren ist daher die Abdichtung der Stirnseite kritisch.

Wie im Kapitel 5.1.8 beschrieben, arbeitet das Dichtungsprinzip mit einem, im Bereich des Einlasses, gesteigerten Innendruck. Zur Erzeugung dieses Innendrucks verfügt der Verschlusskegel über eine Prallfläche.

Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit dieses Dichtungssystems erfolgte auf experimenteller Basis. Hierzu wurde ein durchsichtiges Modell des Einlasses und des Verschlusskegels im Maßstab 1:1 angefertigt (Abbildung 7.1-1).



Abbildung 7.1-1: Modell von Einlass und Verschlusskegel

Um extrem große Undichtheiten zu simulieren, wurden in die Stirnseite des Einlasses Kerben eingefeilt (Abbildung 7.1-2). Die hierdurch erreichten Undichtheiten sind um ein Vielfaches größer als die an dieser Stelle im Einsatz zu erwartenden Fehlstellen.

Der Verschlusskegel wird an den Haltehaken im Einlass eingehängt. Es ergibt sich somit eine originalgetreue Nachbildung des Röhreneinlasses im geöffneten Zustand.

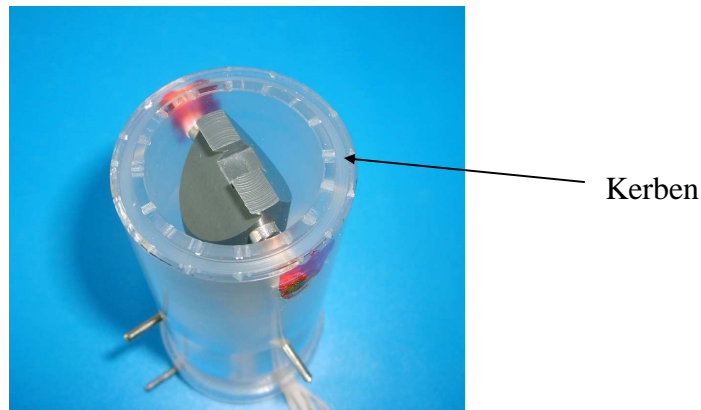


Abbildung 7.1-2: Einlassmodell mit Einkerbungen und Verschlusskegel

Für den experimentellen Nachweis wurde das Einlassmodell über einen Ausflussbehälter mit rot eingefärbtem Wasser durchströmt. Über die Höhe des Füllstandes im Behälter ließ sich die Ausflussgeschwindigkeit einstellen. In diesem Fall lag sie im Mittel bei ca. 0,8 m/s, was ein realistischer Wert für spätere Einsatzfahrten darstellt. Das Ergebnis der Tests verdeutlicht Abbildung 7.1-3.

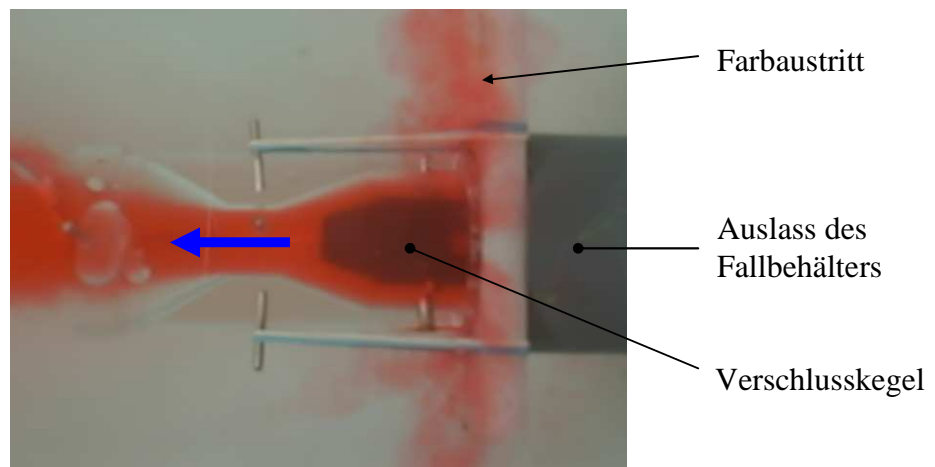


Abbildung 7.1-3: Farbaustritt an der Röhrenstirnseite

Deutlich ist der starke Farbaustritt des rot gefärbten Wassers an der Stirnseite des Einlasses zu erkennen. Der Druck im Innern der Röhre liegt daher folglich über dem umgebenden Wasserdruck. Wird die Röhre durchströmt, kann aufgrund dieses Druckunterschieds somit, trotz evtl. vorhandener Undichtheiten, von Außen kein Wasser über die Stirnseite in die Röhre eindringen.

Zur Reibungsminderung sind in der Stirnseite der Röhren (Einlass) Schleifringe aus PTFE eingesetzt. Ebenso bestehen die Platten, an denen die Stirnseiten der Röhren anliegen, aus PTFE. Dieses Material ist wenig elastisch und wäre daher nicht in der Lage Kratzer oder Riefen abzudichten. Aufgrund des Dichtungsprinzips gefährden derartige Undichtheiten jedoch in keiner Weise die Reinheit der Probe.

7.2 Entlüftung der Probenröhren

Im Wasserprobennehmer sind die Probenröhren in einer waagerechten Position fixiert. Der innere Aufbau der Röhren und die waagerechte Lage führen zur Bildung von Totvolumen, die nicht durch einfaches „Fluten“ der Röhren mit Wasser gefüllt werden können (Abbildung 7.2-1).



Abbildung 7.2-1: Totvolumen in der Probenröhre

Durch den Verschluss verfügt die Röhre an beiden Enden über einen engeren Querschnitt als in ihrer Mitte. Wird die Röhre in waagerechter Lage befüllt, bildet sich daher im rot umrandeten Teil der Röhre zwangsläufig eine Luftblase. Diese Luftblase nimmt einen erheblichen Anteil des Innenvolumens der Probenröhre in Anspruch. Zudem könnte eine derartige Blase die Stabilität der Röhren gefährden.

Wird beispielsweise eine erste Probe in einer Tiefe von 50 m entnommen, steht die im Inneren der Röhre eingeschlossene Luft unter einem Überdruck von 5 bar. Werden nun größere Tauchtiefen erreicht, steigt der äußere Druck, während er im Inneren der Röhre konstant bleibt. Ein Druckausgleich ist nicht möglich, da sich die Verschlusskegel immer stärker in ihre Aufnahmekonen einpressen und die Röhre somit immer „besser“ abdichten. Durch die Kompressibilität der Luftblase wird die Röhrenwand nicht abgestützt und kollabiert letztendlich.

Eine unzureichende Befüllung der Röhren hätte somit Einfluss auf die gesamte Missionsplanung. Proben müssten beispielsweise von der größten Tiefe ausgehend aufsteigend entnommen werden.

Im Rahmen der Tests sollte das Verhalten der Luftblase während der Durchströmung der Röhre untersucht werden. Im Idealfall würde die Luftblase durch die Bewegung des Wassers aus der Röhre gedrückt werden.

Um das Strömungsverhalten im Inneren der Röhre untersuchen zu können, wurde ein Modell aus Acrylglas im Maßstab 1:1 gefertigt (Abbildung 7.2-2).



Abbildung 7.2-2: Modell der Röhre

Um den Strömungszustand in der Röhre möglichst realitätsnah nachbilden zu können, verfügt das Modell an der Einlassseite über Haltehaken zur Befestigung eines Verschlusskegels. Die Röhre wurde in waagerechter Haltung unter Wasser getaucht, um so eine möglichst große Luftblase in ihrem Inneren zu erzeugen (Abbildung 7.2-3). Die Durchströmung der Röhre wurde wiederum mit Hilfe eines Ausflussbehälters realisiert. Die Strömungsgeschwindigkeit lag bei ca. 0,8 m/s.

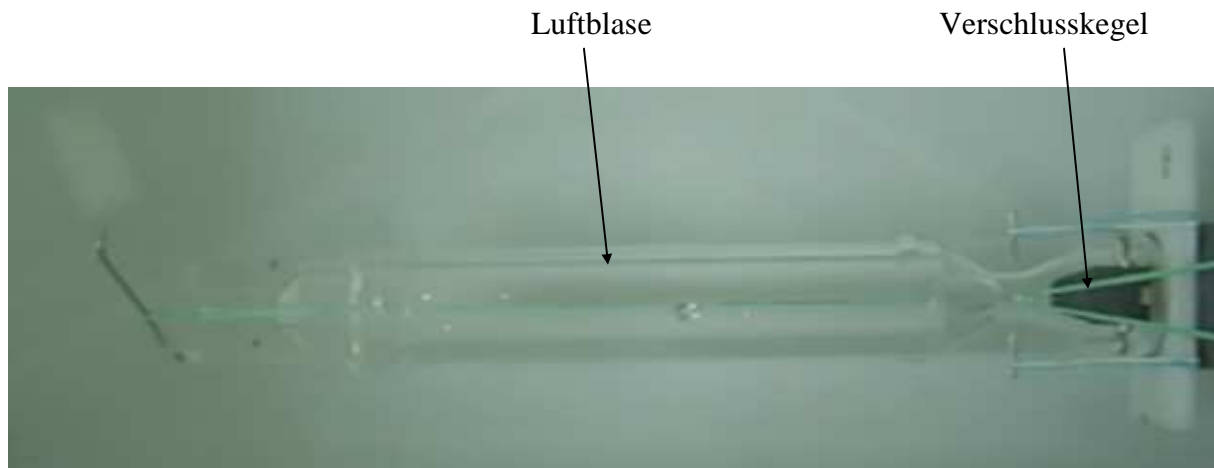


Abbildung 7.2-3: Luftblase im Röhreninneren

Die Versuche zeigten, dass die Luftblase von der Wasserströmung aus der Röhre gedrückt wird. In einigen Fällen blieben jedoch Reste der Luftblase innerhalb der Röhre zurück. Abbildung 7.2-4 zeigt die Röhre nach der Durchströmung.



Abbildung 7.2-4: Reste der Luftblase nach Durchströmung

Wie zu erkennen ist, verbleibt ein Rest der Luftblase direkt hinter dem einlassseitigen Aufnahmekonus. An dieser Stelle öffnet sich der Innenraum der Röhre. Der Öffnungswinkel ist zu groß, als dass sich die Strömung an der Innenwand der Röhre halten könnte. Es kommt daher an dieser Stelle zu Strömungsablösungen und zur Ausbildung eines Totwassergebietes, in dem sich Luftblasen halten können.

Es ist jedoch zu beachten, dass in Abbildung 7.2-4 das schlechteste Ergebnis, das während der Versuche auftrat, dargestellt ist. In der überwiegenden Mehrzahl der Versuche wurde die Luftblase restlos aus der Röhre gedrückt oder es blieben nur sehr kleine Luftvolumen zurück (Abbildung 7.2-5).



Abbildung 7.2-5: Verbleibende Luftmenge im Regelfall

Zudem ist aus den folgenden Gründen nicht damit zu rechnen, dass es zum Verbleib größerer Mengen von Luft in den Röhren bleibt.

- Bei einem Taucheinsatz wird die Röhre für mehrere Minuten durchströmt. Während der Experimente war diese Zeitspanne durch die Größe des Ausflussbehälters auf lediglich vier Sekunden beschränkt.
- Die anfängliche Größe der Luftblase setzt ein genau waagrechtes Einsetzen der Röhre in das Wasser voraus. Das AUV richtet seine Bugspitze jedoch zum Abtauchen nach unten. Die Röhren werden somit schräg gestellt. Da die Rahmenbauteile über Entlüftungsbohrungen verfügen, kann hierbei zumindest der größte Teil der Luft aus dem Innern der Röhren entweichen.

Das zusammenfassende Ergebnis der Versuche ist daher, dass es während der Durchströmung zwar zur Ausbildung eines Totwassergebietes in der Röhre kommt, hier jedoch kaum mit dem Verbleib von Luft zu rechnen ist.

Falls es zum Einschluss von Luft kommt, sind es lediglich kleine Mengen, die die Struktur der Röhren nicht gefährden. Aufgrund der Elastizität von PVDF ist die Röhre in der Lage, die Kompressibilität des eingeschlossenen Luftvolumens auszugleichen.

7.3 Drucktest des Antriebsdruckkörpers

Der Antriebsdruckkörper ist als sog. „nicht-druckkompensierter“ Körper ausgelegt. Wandung und Dichtungen des Druckkörpers werden daher stark durch den äußeren Überdruck belastet. Besonders kritisch ist die Rotationsdichtung zur Abdichtung der Welle.

Ziel der Erprobung des Antriebsdruckkörpers war daher speziell der Nachweis der zuverlässigen Wellendichtung.

Während der Erprobung des Antriebsdruckkörpers wurden mehrere Tests durchgeführt, von denen im folgenden Kapitel jedoch nur ein besonders aussagekräftiger Test näher erläutert werden soll.

Zur Durchführung von Drucktests steht am Alfred-Wegener-Institut ein Drucktank zur Verfügung, in dem Bauteile einer Belastung von bis zu 600 bar ausgesetzt werden können (Abbildung 7.3-1).



Abbildung 7.3-1: Drucktank

Der Drucktank verfügt über elektrische Durchführungen, um beispielsweise Sensoren oder einen Motor unter Druck betreiben zu können. Während der Tests konnte daher auch das Verhalten des Antriebsdruckkörpers bei rotierender Antriebswelle erprobt werden.

Um die Dichtheit des Antriebsdruckkörpers zu überwachen, wurden im Innern zwei gegeneinander isolierte Elektroden angebracht. Während der Tests wurde der elektrische Widerstand zwischen diesen Elektroden mit einem Leitfähigkeitsmessgerät erfasst. Eingedrungenes Wasser würde zu einem merklichen Abfall des Widerstands führen.

Neben dem elektrischen Widerstand wurde zusätzlich die Aufrechterhaltung des Drucks als Indikator für die Dichtheit des Druckkörpers gewertet. In den Druckkörper eindringendes Wasser würde eine Druckentlastung im Tank nach sich ziehen.

Innerhalb des Drucktanks wurde der Antriebsdruckkörper durch ein Kunststoffgestell fixiert (Abbildung 7.3-2).



Abbildung 7.3-2: Antriebsdruckkörper im Drucktank

Die Drucktests wurden möglichst einsatznah gestaltet. Dies bezieht sich insbesondere auf die folgenden Punkte:

- Die maximale Tauchtiefe des AUV liegt bei 3000 m. Hinzu kommt eine Sicherheitsreserve von 10 %. Alle Komponenten im AUV, also auch der Antriebsdruckkörper, müssen daher bis zu einer Wassertiefe von 3300 m, bzw. einem Wasserdruck von 330 bar belastbar sein.
- Die Dauer eines Tauchgangs liegt zwischen 8 – 10 Stunden. Je nach Programmierung ändert das AUV in dieser Zeit seine Tauchtiefe. Der Antriebsdruckkörper ist daher wechselnden Druckbelastungen ausgesetzt.
- Das Trommelmagazin muss nur um jeweils eine Röhre weiterbewegt werden. Der Antrieb muss daher stets nur kurzzeitig arbeiten. Durch die geringe Zahl der Umdrehungen ist es nicht möglich, dass sich Rotationsdichtung und Antriebswelle durch „Einschleifen“ einander anpassen. Dies darf die Dichtwirkung jedoch nicht beeinträchtigen.

Im Rahmen eines Drucktests wurde ein Tauchgang unter den genannten Einsatzbedingungen simuliert. Abbildung 7.3-3 verdeutlicht dessen Verlauf. Hierin sind die Druckwerte in Tiefenwerte umgerechnet. Die blauen Markierungen stellen Zeitpunkte dar, an denen der Motor jeweils kurzzeitig (5 s) in Betrieb gesetzt wurde.

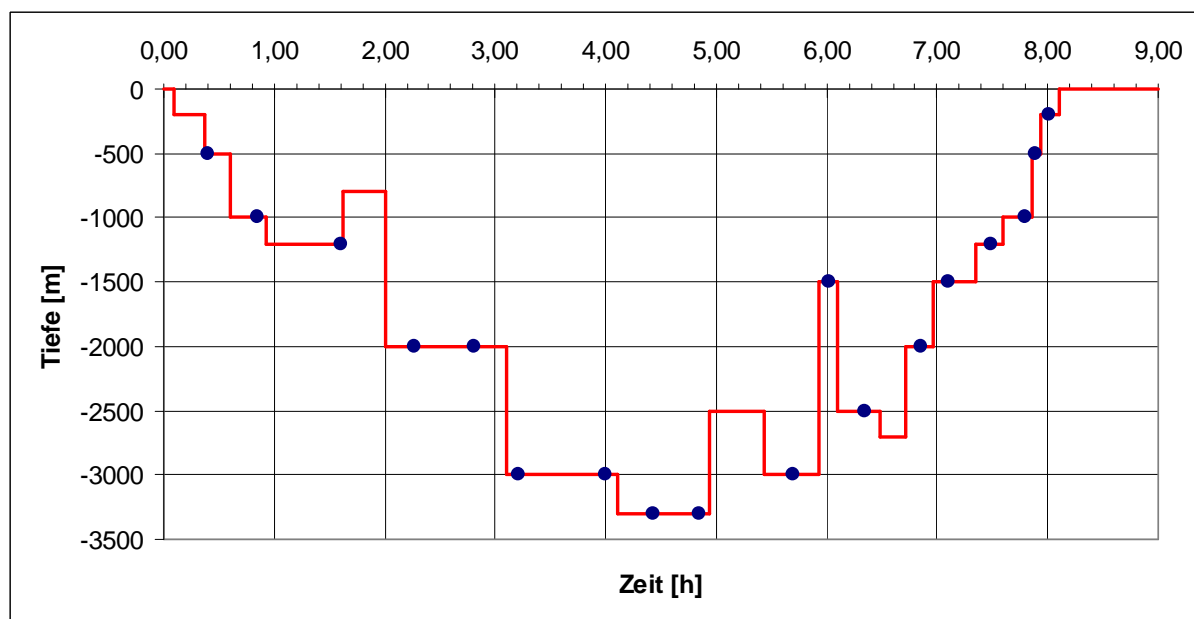


Abbildung 7.3-3: Verlauf der Tauchgangsimulation

Wie zu erkennen ist, wurden während des Tests eine Vielzahl von Tiefenstufen durchlaufen und der Antriebsdruckkörper durch häufige Lastwechsel beansprucht. Der Verlauf des Tests stellt ein mögliches Tauchprofil des AUV dar. Der maximale Prüfdruck von 330 bar, entsprechend einer Wassertiefe von 3300 m, wurde für nahezu eine Stunde gehalten, womit eine länger anhaltende Fehlfunktion der Tiefensteuerung simuliert werden sollte.

Auf nahezu jeder Tiefenstufe wurde der Motor in Betrieb gesetzt. Teilweise geschah dies nach abrupten Lastwechseln, wie z.B. im Bereich von 6 Stunden Testdauer..

Während des Tests ergaben die Überwachung des Innendrucks im Tank, sowie die Überwachung des Elektrodenwiderstandes, keine Anzeichen für eine Undichtheit des Druckkörpers.

Um auch kleine Mengen Wasser im Druckkörper feststellen zu können, wurde dieser nach Abschluss der Tests zerlegt und auf Spuren von Feuchtigkeit hin überprüft. Hierbei wurden ebenfalls keinerlei Hinweise auf eine Undichtheit festgestellt.

Dieser Test, bei dem ein kompletter Tauchgang simuliert wurde, war der letzte in einer Reihe von Entwicklungstests, die aus Umfangsgründen hier nicht in ihrer Gesamtheit beschrieben werden.

Nach Abschluss dieses Tests wurde der Zustand des Antriebsdruckkörpers als „einsatzklar“ bewertet.

8 Abschlussbetrachtung

8.1 Zusammenfassung

Im Verlauf dieser Arbeit wurde ein System zur Wasserprobennahme entwickelt und gebaut. Der Wasserprobennehmer wurde speziell an den Einsatz im AUV des Alfred-Wegener-Instituts angepasst und wird zukünftig ein Teil der wissenschaftlichen Nutzlast darstellen. Aufgrund seiner Auslegung ist das Gerät in der Lage, den kompletten Einsatzbereich des AUV abzudecken und daher bis in Wassertiefen von 3000 m vorzustößen. Das Ziel, das letztendlich mit derartigen Einsätzen verfolgt wird, ist die Gewinnung von Proben aus schwer zugänglichen Bereichen des Meeres und deren Rückführung an die Oberfläche.

Angefangen bei der Erarbeitung des Anforderungsprofils bis zu Detailfragen, wie z.B. dem Material einiger O-Ringe, fanden Auslegung und Entwicklung des Systems in enger Abstimmung mit den Wissenschaftlern des Alfred-Wegener-Instituts statt. Das Resultat ist ein System, in dem sowohl eine neuartige Entnahmetechnik, wie auch neuartige Materialien zum Einsatz kommen.

Die Entnahme der Proben erfolgt über Röhren, die in einem Trommelmagazin angeordnet sind und über eine Zuleitung aus dem Bugbereich des AUV beständig mit Wasser durchströmt werden. Die Drehung des Trommelmagazins besitzt dabei doppelte Wirkung: Einerseits wird hierdurch der Verschluss einer Röhre ausgelöst, d.h. Wasser darin eingeschlossen und eine Probe entnommen, andererseits eine neue, „frische“ Röhre für die nächste Probe in Position gebracht. Die Röhren selbst sorgen mit Hilfe einer Druckfeder für den sicheren Anschluss an die Zuleitung. Um die Schnittstelle zwischen Röhre und Zuleitung zuverlässig abzudichten, wird in der Röhre ein Überdruck erzeugt, der das Eindringen von Wasser verhindert.

Des Weiteren wird die Reinheit der Probe durch die Verwendung spezieller Materialien sichergestellt. Hierbei ist speziell der Einsatz des Kunststoffes PVDF zu nennen. Dieser Kunststoff ist gegenüber seiner Umgebung extrem stabil und weist eine leicht zu reinigende Oberfläche auf. PVDF kommt daher auch in der Medizintechnik zum Einsatz. Im Wasserprobennehmer kommt die Probe nahezu ausschließlich mit diesem Kunststoff in Berührung. Durch die Verwendung von PVDF konnten sogar die hohen Reinheitsanforderungen, die der Nachweis von Spurenelementen erfordert, erfüllt werden.

Die Erprobung des Wasserprobennehmers wurde gegen Ende der Arbeit so vollständig wie möglich durchgeführt. Die Tests beinhalteten die Erprobung der Positioniergenauigkeit des Trommelmagazins, Verschlusstests der Röhren, Belastungstests der Druckkörper, etc... Die in der Tiefsee herrschenden Umweltbedingungen lassen sich jedoch nur unter hohem Aufwand simulieren. Insbesondere der Aufbau hoher Wasserdrücke in großen Versuchskammern ist komplex umzusetzen. Aus diesem Grund konnte der Wasserprobennehmer nicht als ganzes, sondern lediglich einzelne Komponenten unter Druck getestet werden. Auch wenn bei keinem der durchgeführten Tests Anzeichen für einen grundlegenden Konstruktionsfehler auftraten, so ist doch die Funktion des Gesamtsystems bisher nicht unter Tiefseebedingungen erprobt worden.

8.2 Optimierungsbedarf

Auch wenn bereits während der Vorauslegung und Konstruktion eine Vielzahl von Aspekten beachtet wurde, so handelt es sich im Fall des Wasserprobennehmers doch um eine experimentelle Neuentwicklung, deren genaues Verhalten nicht immer zweifelsfrei vorhergesagt oder berechnet werden kann. In ersten Experimenten und praktischen Versuchsreihen an Modellen, wurde daher an zwei Stellen Optimierungsbedarf festgestellt. Dies betrifft zum einen die Befüllung der Röhren und zum anderen ihren Ausbau aus dem Wasserprobennehmer.

8.2.1 Befüllung der Röhren

Während der Befüllung bildet sich in den Röhren ein Totwassergebiet. Wie die Versuche zur Befüllung und Durchströmung der Röhren zeigten, kann bei der Flutung der Röhren Luft darin eingeschlossen bleiben. Diese Luftblase wird normalerweise bei der Durchströmung aus der Röhre hinausgepresst. In den Totwassergebietes können jedoch Luftblasen verbleiben. Der Grund für diese Totwassergebietes ist der Öffnungswinkel hinter dem einlassseitigen Aufnahmekonus (Abbildung 8.2-1).

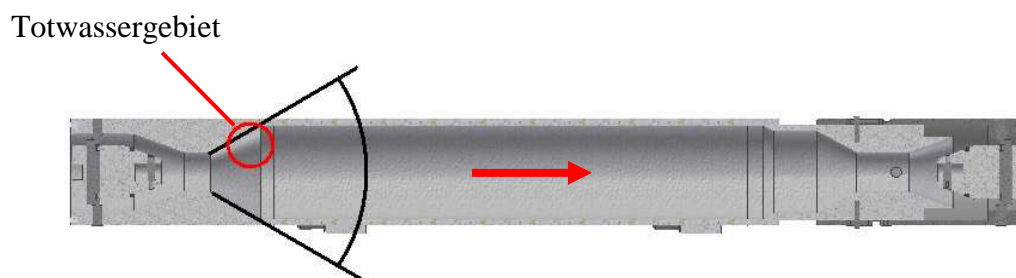


Abbildung 8.2-1: Öffnungswinkel und resultierendes Totwassergebiet in der Röhre

Dieser Öffnungswinkel ist zu groß ausgelegt. Die Strömung löst sich daher von der Innenwand der Röhre. Eine Verminderung dieses Öffnungswinkels ist nicht unproblematisch, da das Innenvolumen der Röhre durch eine solche Maßnahme verkleinert werden würde. Es bleiben die Ergebnisse der ersten Testfahrten abzuwarten, um den genauen Einfluss des Totwassergebietes abschätzen zu können.

8.2.2 Ausbau der Röhren

Der Ein- und Ausbau der Röhren aus dem Wasserprobennehmer ist durch das bewegliche Endstück und den Bajonettverschluss möglichst einfach gestaltet. Zum Ausbau einer Röhre muss lediglich die Druckfeder unter dem beweglichen Endstück so weit gestaucht werden, bis die Halterungsstifte vollständig aus ihren Aufnahmen im Magazin herausgelöst sind (Abbildung 8.2-2).

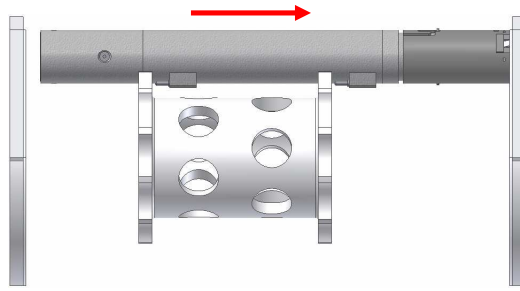


Abbildung 8.2-2: Zum Ausbau der Röhre nötige Bewegung

Wie sich jedoch herausstellte, gestaltet sich der Ausbau der ersten Röhre schwierig. Da die Außenhaut der Röhren glatt ist, fehlt ein Angriffspunkt an dem die Röhre sicher gegriffen und gegen die Kraft der Druckfeder bewegt werden kann. In einem voll bestückten Magazin sind die Röhren zudem eng aneinander angeordnet. (Abbildung 8.2-3)

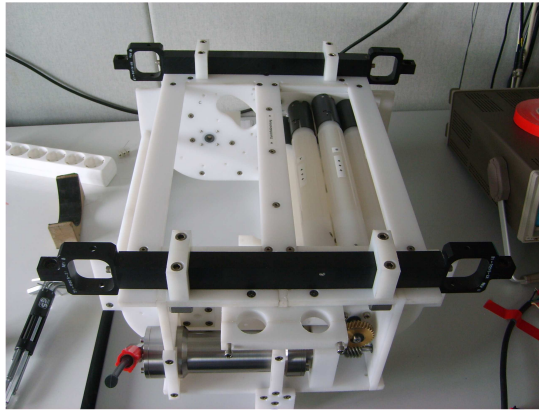


Abbildung 8.2-3: Röhren im Trommelmagazin

Es besteht daher auch nicht die Möglichkeit um die Röhre herumzugreifen. An dieser Stelle wäre die Anbringung eines Griffes oder auch nur die stellenweise Aufrauung der Röhrenaußenhaut nötig gewesen.

8.3 Fazit

Wie beschrieben, steht ein Test des Gesamtsystems unter Tiefseebedingungen zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch aus. Der erste Einsatz an Bord des AUV wird daher zugleich auch den ersten Test des Gesamtsystems darstellen. Nach derzeitigem Stand (Mai 2009) ist dieser erste Einsatz in der Framstraße (zwischen Grönland und Spitzbergen) im Rahmen der Arktisexpedition ARK XXIV für Juli 2009 geplant. Auch wenn daher der Test des Gesamtsystems noch mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist, ergab die Erprobung der einzelnen Komponenten keinen Hinweis auf einen schwerwiegenden Konstruktionsfehler, der die Funktion des Gerätes entscheidend beeinträchtigen könnte. Die Druck- und Funktionstests des Antriebsdruckkörpers verliefen ausnahmslos positiv, das Trommelmagazin lässt sich zuverlässig positionieren und der Verschluss der Röhren wird zuverlässig ausgelöst. Der bisher festgestellte Optimierungsbedarf ist gering und stellt in keiner Weise die grundlegenden Mechanismen des Wasserprobennehmers in Frage.

Einem ersten Einsatz im Eis der Arktis steht daher nichts im Wege.



9 Abkürzungsverzeichnis

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
AWI	Alfred-Wegener-Institut
BMTI	BMTI Composite Materials / Buoyancy
MBARI	Monterey Bay Aquarium Research Institute
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PE	Polyethylen
PTFE	Polytetrafluorethylen (“Teflon”)
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.5.1: Auswaschverhalten von PVDF, Quelle: [3].....	17
Tabelle 4.2.1: Bewertungstabelle Probenbehälter und Probennahme.....	25
Tabelle 4.3.1: Bewertungstabelle Mehrfachproben	29
Tabelle 4.4.1: Bewertungstabelle Auslösemechanismus	34
Tabelle 4.5.1: Übersicht über handelsübliche Rohrgrößen	37
Tabelle 4.8.1: Bewertungstabelle Antrieb.....	44
Tabelle 5.1.1: Verteilung des Röhreninnenvolumens nach Segmenten.....	63
Tabelle 5.1.2: Aufstellung der Federeigenschaften.....	68
Tabelle 5.3.1: Materialpaarung und Reibungskoeffizienten	78
Tabelle 5.3.2: Eigenschaften der Antriebskomponenten	81
Tabelle 5.4.1: Axiale Belastungsfähigkeit der Antriebswellenlager.....	85

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1-1: Hauptsitz des Instituts in Bremerhaven, Quelle: AWI	1
Abbildung 1.1-2: Polarstern (links), Georg von Neumayer Station (rechts), Quelle: AWI.....	2
Abbildung 1.2-1: Arktis und Antarktis	3
Abbildung 1.3-1: Topographie der Erde, blau: Tiefsee, Quelle: NOAA	4
Abbildung 1.3-2: Walskelett am Grund der Tiefsee, Quelle: MBARI	4
Abbildung 1.3-3: Drachenfisch mit Leuchtorgan, Quelle: Wissenschaft aktuell	5
Abbildung 1.4-1: AUV des Alfred-Wegener-Instituts	6
Abbildung 1.4-2: Segmentbauweise des AUV, Quelle: Bluefin Robotics	6
Abbildung 3.2-1: Bathyskaph Trieste mit kugeligem Druckkörper an der Unterseite	12
Abbildung 3.2-2: Symmetrisches Beulen, Quelle: [13]	12
Abbildung 3.2-3: Asymmetrisches Beulen, Quelle: [13]	13
Abbildung 3.3-1: AUV (hier „Mapping Vehicle“) des MBARI, Quelle: MBARI	13
Abbildung 3.3-2: Mikroglassballons in tiefseetauglichem Auftriebskörper, Quelle: BMTI...	14
Abbildung 3.5-1: Monomer von PTFE (links), PVDF (Mitte) und PFA (rechts).....	17
Abbildung 4.1-1: Nutzlastsegment (untere Hälfte)	19
Abbildung 4.1-2: Hauptabmessungen des Wasserprobennehmers	20
Abbildung 4.1-3: Querschnitt durch Nutzlastsegment	20
Abbildung 4.1-4: Erreichbarkeit des Wasserprobennehmers	21
Abbildung 4.2-1: Probennahmesystem an Bord von Victor 6000, Quelle: Ifremer.....	22
Abbildung 4.2-2: Probennahmesystem PEPITO, Quelle: Ifremer	22
Abbildung 4.2-3: Probennahmesystem GULPER, Quelle: MBARI.....	22
Abbildung 4.2-4: Niskin-Flasche, Quelle: KC Denmark	23
Abbildung 4.3-1: Hydraulikverteiler, Quelle: Moser Entgratungs AG.....	27
Abbildung 4.3-2: Trommelmagazin (B).....	27
Abbildung 4.4-1: Niskin-Flasche in geöffnetem Zustand	30
Abbildung 4.4-2: Verschluss der Probenröhren, schematisch	31
Abbildung 4.4-3: Auslösemechanismus mit Haken (A)	31
Abbildung 4.4-4: Auslösemechanismus mit Drehhebel (B)	32
Abbildung 4.4-5: Auslösemechanismus mit Magnet (C).....	32
Abbildung 4.5-1: Gegliederter Aufbau der Probenröhren und Längenverteilung	36
Abbildung 4.5-2: Korrelation zwischen Länge und Durchmesser bei gegebenem Volumen	37
Abbildung 4.6-1: Trommelmagazin im Querschnitt	38
Abbildung 4.6-2: Rausnutzung durch ein oder zwei Trommelmagazine.....	39
Abbildung 4.6-3: Raumausnutzung durch drei Magazine	39
Abbildung 4.6-4: geometrische Zusammenhänge zur Berechnung der Probenanzahl	40
Abbildung 4.7-1: Längenflexible Röhre mit Druckfeder	41
Abbildung 4.8-1: Schematische Übersicht des Antriebs nach Konzept A.....	42
Abbildung 4.8-2: Antrieb mit Hohlwellen-Schrittmotor.....	42
Abbildung 4.8-3: Hohlwellen-Schrittmotoren, Quelle: Nanotec.....	42
Abbildung 4.9-1: vorderer Teil des AUV	45
Abbildung 4.9-2: Zuleitungsverlauf im AUV von oben	46
Abbildung 4.10-1: Konzeptioneller Entwurf des Gesamtsystems	47
Abbildung 4.10-2: Konzeptioneller Entwurf der Probenröhren.....	48
Abbildung 5.1-1: Segmente der Probenröhren und Verbindungsstellen.....	50
Abbildung 5.1-2: Prinzip der Probennahme	50
Abbildung 5.1-3: Prinzip der Keilwirkung und Verschluss im Querschnitt	51
Abbildung 5.1-4: Abhängigkeit zwischen Anpresskraft und Steigungswinkel	52
Abbildung 5.1-5: Bemaßung des Verschlusskegels	53

Abbildung 5.1-6: Bemaßung des Aufnahmekonus	53
Abbildung 5.1-7: Gewindestift und O-Ring am Verschlusskegel.....	54
Abbildung 5.1-8: Verschluss geöffnet (links) und geschlossen (rechts).....	54
Abbildung 5.1-9: Bauteile der Halterung (links), Halterung am Verschlusskegel (rechts) ...	55
Abbildung 5.1-10: Halterung des Verschlusskegels in der Röhre	55
Abbildung 5.1-11: Auslösehebel.....	56
Abbildung 5.1-12: Verschlusskegel in der Röhre (links) und hakenförmige Struktur	56
Abbildung 5.1-13: Auslösemechanismus Frontansicht (links), Rückansicht (rechts)	57
Abbildung 5.1-14: Arbeitsweise des Auslösemechanismus	57
Abbildung 5.1-15: Position von Auslösehebel und Verschlusskegel	58
Abbildung 5.1-16: Längenflexible Röhre nach konzeptioneller Auslegung.....	58
Abbildung 5.1-17: Längenflexible Röhre in überarbeiteter Ausführung.....	58
Abbildung 5.1-18: Festlegung der Ein- und Auslassseite	59
Abbildung 5.1-19: Einlassseite ohne (links) und mit Verschlusskegel (rechts)	59
Abbildung 5.1-20: Einzelteile d. Auslassseite: v.l.n.r. Verschlusssegment, Druckfeder, Endstück.....	60
Abbildung 5.1-21: Auslassseite ohne (links) und mit Verschlusskegel (rechts).....	61
Abbildung 5.1-22: Bajonettverschluss	62
Abbildung 5.1-23: Länge der einzelnen Röhrensegmente	63
Abbildung 5.1-24: Länge der kompletten Röhre.....	63
Abbildung 5.1-25: Federn innerhalb der Röhren	64
Abbildung 5.1-26: Auslenkung der Zugfeder	66
Abbildung 5.1-27: Auslenkung der Druckfeder.....	67
Abbildung 5.1-28: Druckfeder und Endstück	68
Abbildung 5.1-29: Zugfeder und Verschlusskegel	68
Abbildung 5.1-30: Prallfläche am Verschlusskegel (links), Position in der Röhre (rechts) ..	69
Abbildung 5.1-31: Druckverlauf an einer Normblende, Quelle: [16].....	70
Abbildung 5.1-32: Druckverlauf am Röhreneinlass	70
Abbildung 5.1-33: Halterungen an der Röhre	71
Abbildung 5.1-34: Zusammenbau- und Explosionsdarstellung der Röhren	72
Abbildung 5.2-1: Aufbau des Trommelmagazins	73
Abbildung 5.2-2: Teilweise bestücktes Trommelmagazin.....	73
Abbildung 5.2-3: Aufnahmebohrungen im Trommelmagazin.....	74
Abbildung 5.2-4: Bajonettverschluss in Position gelb, Einlegen der Röhre	74
Abbildung 5.2-5: Bajonettverschluss in Position rot, Röhrenenden liegen an.....	75
Abbildung 5.2-6: Leeres Trommelmagazin im Wasserprobennehmer	75
Abbildung 5.3-1: Antriebsstrang der beiden Trommelmagazine nach Konzept.....	76
Abbildung 5.3-2: Antriebsstrang schematisch	77
Abbildung 5.3-3: Anpresskräfte der Röhrenenden im Wasserprobennehmer	78
Abbildung 5.3-4: Hebelarm im Trommelmagazin.....	79
Abbildung 5.3-5: Antriebskomponenten während der Montage.....	80
Abbildung 5.3-6: Schneckenradsatz der Firma Mädler, Quelle Mädler	80
Abbildung 5.4-1: Aufbau des Antriebsdruckkörpers, schematisch.....	82
Abbildung 5.4-2: Axialkraft aufgrund des Wasserdrucks.....	83
Abbildung 5.4-3: Axialkraft aufgrund des Schneckengetriebes	84
Abbildung 5.4-4: Lager A (links) und Lager B (rechts).....	84
Abbildung 5.4-5: Lagerung der Antriebswelle im Druckkörper.....	85
Abbildung 5.4-6: Haltering zur axialen Lagerung der Antriebswelle.....	86
Abbildung 5.4-7: Einbauzustand der Rotationsdichtung	87
Abbildung 5.4-8: Klauenkupplung, Quelle: R + W	88
Abbildung 5.4-9: Motorträger von oben (links) und von unten (rechts).....	88

Abbildung 5.4-10: Innerer Aufbau des Druckkörpers	88
Abbildung 5.4-11: Abmaße der Komponenten im Druckkörper	89
Abbildung 5.4-12: Innere Abmaße des Druckkörpers	89
Abbildung 5.4-13: Vorderer Deckel , Front- und Rückansicht.....	90
Abbildung 5.4-14: Druckkörper Rohr	90
Abbildung 5.4-15: Hinterer Deckel, Front- und Rückansicht.....	90
Abbildung 5.4-16: Einzelteile des Druckkörpers	91
Abbildung 5.4-17: Gesamtüberblick über Antriebsdruckkörper.....	91
Abbildung 5.5-1: Anschlussplan des Wasserprobennehmers	92
Abbildung 5.5-2: wasserdichte Steckverbindungen, Quelle: Subconn	92
Abbildung 5.5-3: Steuerungsdruckkörper	93
Abbildung 5.6-1: Basisstruktur des Rahmens	94
Abbildung 5.6-2: Basisplatte horizontal.....	94
Abbildung 5.6-3: Stützplatte	94
Abbildung 5.6-4: Basisplatte vertikal.....	94
Abbildung 5.6-5: Rahmen mit versteifenden Bauteilen.....	95
Abbildung 5.6-6: Querstütze	95
Abbildung 5.6-7: Querstütze vertikal.....	95
Abbildung 5.6-8: Wellen- und Motorlager	96
Abbildung 5.6-9: Aufnahme des Antriebsdruckkörpers	97
Abbildung 5.6-10: Antriebsstrang im Wasserprobennehmer.....	97
Abbildung 5.6-11: Rahmen mit Antriebsstrang	98
Abbildung 5.6-12: Totraum zwischen den Trommelmagazinen.....	98
Abbildung 5.6-13: Rahmen mit Steuerungsdruckkörper	99
Abbildung 5.6-14: Querstreben im Nutzlastsegment des AUV	99
Abbildung 5.6-15: Rahmen mit Halterungen für Einbau in AUV	100
Abbildung 5.6-16: Wasserprobennehmer in Nutzlastbucht des AUV	100
Abbildung 5.7-1: Schleifplatte aus PTFE	101
Abbildung 5.7-2: Explosionsdarstellung des Anschlusses.....	102
Abbildung 5.7-3: Anschluss, Zusammenbau, Front- und Rückansicht.....	102
Abbildung 5.7-4: Bildung der Schleifebene.....	103
Abbildung 5.8-1: PVDF Rohrnetz: Quelle: Frank GmbH	103
Abbildung 5.8-2: Innerer Aufbau des AUV-Bugs	104
Abbildung 5.8-3: Rohrhalterung, Einzelansicht und Einbauzustand	104
Abbildung 5.8-4: Zuleitung.....	105
Abbildung 5.8-5: Zuleitungsverlauf im AUV	105
Abbildung 5.8-6: Ableitung	106
Abbildung 5.8-7: Ableitungsverlauf im AUV.....	106
Abbildung 5.9-1: Wasserprobennehmer, von oben.....	107
Abbildung 5.9-2: Wasserprobennehmer, von unten.....	107
Abbildung 6.1-1: Röhrenkörper mit Anbauteilen	109
Abbildung 6.1-2: Verschlussbauteile	110
Abbildung 6.1-3: Haltehaken im beweglichen Endstück.....	110
Abbildung 6.1-4: Anbringen des beweglichen Endstücks	111
Abbildung 6.1-5: Probenröhre.....	111
Abbildung 6.1-6: Gesamtzahl der Probenröhren.....	111
Abbildung 6.2-1: Bauteile der Wellenlagerung	112
Abbildung 6.2-2: Wellenlagerung.....	113
Abbildung 6.2-3: Rotationsdichtung	113
Abbildung 6.2-4: Dichtungsnut der Rotationsdichtung offen (links), geschlossen (rechts) 113	
Abbildung 6.2-5: Klauenkupplung an Getriebewelle (links) und Antriebswelle (rechts) ...	114

Abbildung 6.2-6:	Integration der Motoreinheit.....	114
Abbildung 6.2-7:	Wasserdichte elektrische Zuleitung zum Antriebsdruckkörper.....	115
Abbildung 6.2-8:	Antriebsdruckkörper	115
Abbildung 6.3-1:	Auslösemechanismus im Rohranschluss	116
Abbildung 6.3-2:	Rohranschluss im Wasserprobennehmer	116
Abbildung 6.4-1:	Rahmen, Bauteile gesteckt.....	117
Abbildung 6.4-2:	Trommelmagazin im Wasserprobennehmer	117
Abbildung 6.4-3:	Antriebsdruckkörper im Wasserprobennehmer	118
Abbildung 6.4-4:	Aufbau des Schneckengetriebes	118
Abbildung 6.4-5:	Halterung des Wasserprobennehmers im AUV.....	119
Abbildung 6.4-6:	Wasserprobennehmer	119
Abbildung 6.5-1:	Rohrhalterung in der Bugspitze des AUV	120
Abbildung 6.5-2:	Wasserprobennehmer, Einbau in AUV	121
Abbildung 6.5-3:	Halterung der Zuleitung im Bereich der Nutzlastbucht.....	121
Abbildung 6.5-4:	Zuleitung im Bugbereich	122
Abbildung 6.5-5:	Einlass- und Auslassöffnung des Wasserprobennehmers.....	122
Abbildung 6.6-1:	Wasserprobennehmer im AUV.....	123
Abbildung 7.1-1:	Modell von Einlass und Verschlusskegel	124
Abbildung 7.1-2:	Einlassmodell mit Einkerbungen und Verschlusskegel.....	125
Abbildung 7.1-3:	Farbaustritt an der Röhrenstirnseite.....	125
Abbildung 7.2-1:	Totvolumen in der Probenröhre	126
Abbildung 7.2-2:	Modell der Röhre	126
Abbildung 7.2-3:	Luftblase im Röhreninneren	127
Abbildung 7.2-4:	Reste der Luftblase nach Durchströmung.....	127
Abbildung 7.2-5:	Verbleibende Luftmenge im Regelfall	128
Abbildung 7.3-1:	Drucktank	129
Abbildung 7.3-2:	Antriebsdruckkörper im Drucktank.....	129
Abbildung 7.3-3:	Verlauf der Tauchgangsimulation	130
Abbildung 8.2-1:	Öffnungswinkel und resultierendes Totwassergebiet in der Röhre	133
Abbildung 8.2-2:	Zum Ausbau der Röhre nötige Bewegung.....	134
Abbildung 8.2-3:	Röhren im Trommelmagazin	134

12 Literaturverzeichnis

- [1] WEAVER, P.P.E. ; THOMSON, J: *Geology and Geochemistry of Abyssal Plains*. Volume 1, Blackwell Scientific Publications Oxford London Edinburgh Boston Palo Alto Melbourne, 1987 - ISBN 0-632-01744-9
- [2] DIETRICH, Günter ; KALLE, Kurt ; KRAUSS, Wolfgang ; SIEDLER, Gerold: *Allgemeine Meereskunde – Eine Einführung in die Ozeanographie*. 3. Auflage, Gebrüder Borntraeger Berlin Stuttgart, S. 6, S. 11, S. 46, 1975 - ISBN 3-443-01016-4
- [3] Georg Fischer GmbH: *PVDF – Ein Werkstoff für Dialysewasser*. In: Sonderdruck Dialyse aktuell 7/2004, Karl Demeter Verlag Stuttgart, 2005
- [4] BRETT, Ana Maria Oliviera ; BRETT, Christopher M. A.: *Electrochemistry – Principles, Methods and Applications*. Reprinted Volume, Oxford University Press Oxford New York Tokyo, S. 363, 2005 - ISBN 0-19-855355-9
- [5] MADER, Werner ;: *Meerwasserbeständigkeit von Aluminiumknetlegierungen*. GDA - Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., Arbeitskreis Korrosionschemie, Stand: Januar 2005
- [6] BRAUER, Elfriede ; SCHURICH, Bernd ; DÖRR, Ralf ; SCHNEIDER, Helmut: *Korrosionsuntersuchungen an Werkstoffen für die Meerwasserentsalzung*. Bundesministerium für Forschung und Technologie, Forschungsbericht M79-07, S. 15f, S. 20, Dezember 1979
- [7] VAN BENNEKOM, A ; WILKE, F: *Vergleich der physikalischen, mechanischen und korrosiven Eigenschaften von stabilisierten (1.4571) und niedrig kohlenstoffhaltigen (1.4404) austenitischen rostfreien Stählen*. ThyssenKrupp Steel, Qualitätslenkung Entwicklung und Anwendungstechnik, Bericht 2001-1, 2001
- [8] BMTI Composite Materials, Syntactic Foams
<http://www.bmti-sa.com/buoyancy/products/custom-materials/syntactic-foams/syntactic-foams/syntactic-foams.html>
Stand: 05.02.2009
- [9] FÜTTERER, Dieter Karl ; FAHRBACH, Eberhard: *Polarstern – 25 Jahre Forschung in Arktis und Antarktis*. 1. Auflage, Delius Klasing Verlag Bielefeld, S. 22, 2008 - ISBN 978-3-7688-2433-0
- [10] Bluefin Robotics Corporation: *Alfred Wegener Institute – Science AUV Student Guide*. Version 1.0, Cambridge (Massachusetts USA), 2007
- [11] BURCHER, Roy ; RYDILL, Louis: *Concepts in Submarine Design*. Volume 1, Cambridge University Press, 1994 - ISBN 0-521-41681-7
- [12] Germanischer Lloyd AG: *Bauvorschriften & Richtlinien 2008*. Kapitel I-5-2, Anhang A: *Berechnung von Druckkörpern unter äußerem Überdruck*. Fassung 01.06.1998, Germanischer Lloyd AG Hamburg, 2008

- [13] GLÄSER, Hans: *Zur Stabilität starr ummantelter Ringe und Kreiszyinderschalen unter radialem Außendruck*. Technische Mechanik 7 (1986), Heft 3, 1986`
- [14] BOYER, Rodney ; WELSCH, Gerhard ; COLLINGS, E.W.: *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. Volume 1, ASM International, S. 493, 1994 - ISBN 0-87170-481-1
- [15] GRIFFITHS, Gwyn: *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. Volume 1, Taylor & Francis Group London and New York, 2003 - ISBN 0-415-30154-8
- [16] BOHL, Willi ; ELMENDORF, Wolfgang: *Technische Strömungslehre*. 13. Auflage, Vogel Buchverlag Würzburg, S. 214, 2005 - ISBN 978-3-8343-3029-1

13 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in dieser oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mannheim im Mai 2009

Thorben Wulff