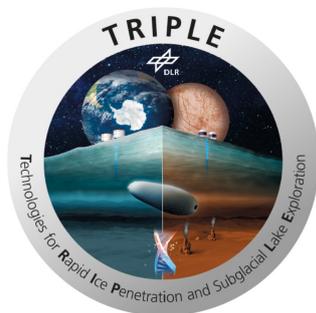


BACHELORARBEIT

Entwicklung eines Wissenschaftsmoduls zur Integration in eine Schmelzsonde



Autor: László Heeder

Matr.Nr.: 39010

12. Juni 2025

Erstprüfer: Prof. Dr. Axel Bochert

E-Mail: abochert@hs-bremerhaven.de

Zweitprüfer: Malte Pallentin, M.Sc.

E-Mail: malte.pallentin@awi.de

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Alle Passagen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder Vorträgen anderer entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde weder in Teilen noch als Ganzes bereits einer anderen Prüfungsbehörde oder einem anderen Fachbereich der Hochschule Bremerhaven vorgelegt.

12.06.25

Datum

Carls

Unterschrift

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meines Bachelorstudiums, während meines Praktikums am AWI und während meiner Bachelorarbeit unterstützt haben.

Ich danke der Arbeitsgruppe Tiefseeökologie und -Technologie und dem Institut dafür, dass sie mir die Umsetzung meines Projekts im Rahmen dieser Arbeit ermöglicht haben.

Malte Pallentin danke ich dafür, dass er mich bereits während meines Praktikums am AWI begleitet und auch im weiteren Verlauf der Arbeit engagiert betreut hat. Besonders dankbar bin ich ihm für das Korrekturlesen, das stetige und konstruktive Feedback sowie die Begutachtung dieser Arbeit.

Mein Dank gilt außerdem Professor Dr. Axel Bochert, nicht nur für die Betreuung dieser Arbeit, sondern auch für seine Unterstützung während meines gesamten Studiums.

Abstract

As part of this work, a science module was developed for integration into a melting probe. It is designed for use in extreme environmental conditions such as subglacial lakes or under ice shelves. The aim was to construct a compact, pressure-resistant and saltwater-resistant system that uses integrated sensors to provide information on the biogeochemical properties of the environment and potential biological activity.

The science module was designed to be both mechanically and electronically compatible with the melting probe. The work included the development of a structural frame, pressure-resistant housing and device mounts, as well as the integration of an electronics unit for data acquisition and transmission. System compatibility and functionality were successfully demonstrated in an initial functional test. This has created the basis for a planned integration test and for later field tests in the Antarctic. The developed science module represents a central contribution to the TRIPLE project and opens up new possibilities for research into subglacial waters.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Wissenschaftsmodul zur Integration in eine Schmelzsonde entwickelt. Es ist für den Einsatz in extremen Umweltbedingungen wie subglazialen Seen oder unter Schelfeis konzipiert. Ziel war die Konstruktion eines kompakten, druckfesten und salzwasserbeständigen Systems, das mithilfe integrierter Sensorik Hinweise auf biogeochemische Eigenschaften der Umgebung und potenzielle biologische Aktivität liefert.

Das Wissenschaftsmodul wurde so ausgelegt, dass es sowohl mechanisch als auch elektronisch mit der Schmelzsonde kompatibel ist. Die Arbeit umfasste die Entwicklung eines strukturellen Rahmens, druckfester Gehäuse und Gerätehalterungen sowie die Integration einer Elektronikeinheit zur Datenerfassung und -übertragung. Die Systemkompatibilität und Funktionstüchtigkeit konnten im Rahmen eines ersten Funktionstests erfolgreich nachgewiesen werden. Damit ist die Grundlage für einen geplanten Integrationstest sowie für spätere Feldtests in der Antarktis geschaffen. Das entwickelte Wissenschaftsmodul stellt einen zentralen Beitrag zum TRIPLE-Projekt dar und eröffnet neue Möglichkeiten zur Erforschung subglazialer Gewässer.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel der Arbeit	4
2	Stand der Technik	5
2.1	Aufbau und Funktionsweise der Schmelzsonde	5
2.2	Demonstator des Wissenschaftsmoduls	8
3	Aufbau des Wissenschaftsmoduls	11
4	Theoretische Grundlagen	15
4.1	Spannungsermittlung bei Hohlzylindern unter Außendruck	15
4.2	Mechanische Werkstoffprüfungen	19
4.2.1	Zugversuch	19
4.2.2	3-Punkt-Biegeversuch	21
4.2.3	Kerbschlagbiegeversuch	22
5	Druckgehäuse	24
5.1	Testgehäuse	24
5.2	Theoretische Belastungsanalyse nach SH und GEH	26
5.3	Numerische Belastungsanalyse mittels FEM-Simulation	27
5.3.1	Durchführung	28
5.3.2	Ergebnisse	28
5.4	Belastungstests im Drucktank	30
5.4.1	Durchführung	30
5.4.2	Ergebnisse	32
5.5	Auswertung	33
5.6	Belastungsanalyse der bestehenden Druckgehäuse	34
5.7	Entwurf der 600-bar-Druckgehäuse	35
6	Gerätehalterungen	38
6.1	Vorauswahl von Kunststoffen für mechanische Werkstoffprüfungen	39
6.2	Fertigung der Proben und Auslagerung	39
6.3	Zugversuch	40
6.3.1	Durchführung	40
6.3.2	Relevante Kennwerte	41

6.3.3	Ergebnisse	42
6.4	3-Punkt-Biegeversuch	45
6.4.1	Durchführung	45
6.4.2	Ergebnisse	46
6.5	Kerbschlagbiegeversuch	47
6.5.1	Durchführung	47
6.5.2	Ergebnisse	48
6.6	Auswertung	49
6.7	Entwurf und Fertigstellung	50
7	Elektronikeinheit	52
7.1	Aufbau und Elektronische Komponenten	52
7.2	Sensordatenmanagement	55
8	Funktionstest des Wissenschaftsmoduls	57
8.1	Versuchsaufbau	57
8.2	Durchführung	58
8.3	Auswertung	58
9	Fazit	60
10	Ausblick	63
	References	64
	Anhang	68
A	Graphen	68
B	Tabellen	69
C	Technische Zeichnungen	70
D	Datenblätter	86
E	Programmcode	90
F	Sonstiges	94

1 Einleitung

Unter den kilometerdicken Eismassen der Arktis und Antarktis verbergen sich Landschaften, die bislang kaum erforscht sind. Zu den bedeutendsten Entdeckungen der letzten Jahrzehnte zählen die sogenannten subglazialen Seen, flüssige Wasserkörper, die sich unter kilometerdicken Eisschichten befinden. Ihr Vorkommen wirft grundlegende Fragen zur Dynamik von Eisschilden und sogar zur Möglichkeit von Leben in extremen Habitaten auf.

Sie entstehen durch zwei physikalische Phänomene: Zum einen senkt sich durch den hohen Druck der überlagernden Eismassen der sogenannte Druckschmelzpunkt auf mehrere Grad unter 0°C . Zum anderen steigt die Temperatur mit zunehmender Tiefe aufgrund der geothermischen Wärme an, was im Zusammenspiel zum Schmelzen des Eises führt [1].

Ein Großteil der subglazialen Seen befindet sich in der Antarktis, wo bereits mehrere hundert dieser Wasserkörper identifiziert wurden (eine Übersichtskarte findet sich in Abb. 1). Zu den bekanntesten zählt der Wostoksee. Schätzungen zufolge könnten alle subglazialen Seen der Antarktis zusammen eine Fläche von mindestens 40.000 km^2 einnehmen und erhebliche Mengen flüssigen Wassers enthalten [2].

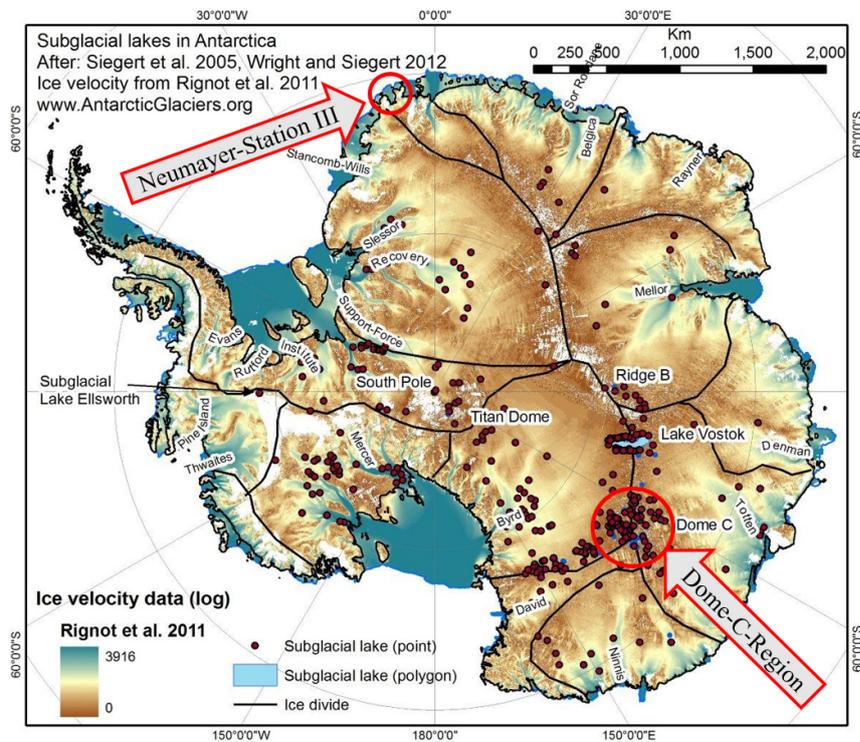


Abbildung 1: Subglaziale Seen in der Antarktis und geplante Feldtests des TRIPLE-Projektes [3]

Diese Seen sind seit Millionen von Jahren von der Außenwelt isoliert und bieten daher einzigartige Einblicke in die Entwicklung von Leben unter extremen Bedingungen. Die Entdeckung und Analyse potenzieller Lebensformen in extremen Habitaten ermöglichen Rückschlüsse auf evolutionäre Prozesse auf der Erde und bilden zugleich eine wissenschaftliche Grundlage für die Suche nach außerirdischem Leben. Raumfahrtmissionen wie Cassini-Huygens und Beobachtungen des Hubble-Teleskops belegen große Wasservorkommen unter der Eisdecke des Saturnmondes Enceladus sowie des Jupitermondes Europa [4, 5].

Darüber hinaus sind subglaziale Seen von großem Interesse für die Klimaforschung. Ihre Existenz beeinflusst die Gletscherbewegungen und damit auch den Ozean. Physikalische Parameter wie die Wassertemperatur, der Salzgehalt und der Wasserdruck spielen eine wichtige Rolle bei der Beurteilung dieser Einflüsse. Durch die Messung dieser Parameter können Rückschlüsse auf die Dynamik von Eismassen und damit auf Veränderungen des Meeresspiegels gezogen werden [2]. Ihre Nähe zu Eisscheiden und Eisströmen lässt vermuten, dass sie einen erheblichen Einfluss auf die großräumige Strömungsdynamik des Eisschildes und damit auch auf den Eistransport und die Massenbilanz des antarktischen Eisschildes haben.

Die Beprobung subglazialer Seen stellt die Forschung jedoch vor zwei wesentliche Herausforderungen: Erstens muss die teils mehrere Kilometer dicke Eisschicht durchdrungen werden. Zweitens darf es dabei zu keiner Verunreinigung dieser empfindlichen Habitate kommen. Klassische Bohrmethoden bergen hohe Risiken der Kontamination, wie frühere Versuche am Wostok-See gezeigt haben [6]. Hier setzt das TRIPLE-Projekt (Technologies for Rapid Ice Penetration and Subglacial Lake Exploration) [7] an. Ziel ist es, einen möglichst kontaminationsfreien Zugang zu subglazialen Gewässern mithilfe einer speziellen Schmelzsonde zu ermöglichen (siehe Abb. 2). Das Projekt wurde vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) initiiert und verfolgt langfristig das Ziel, Technologien zu entwickeln, um subglaziale Gewässer auf anderen Himmelskörpern zu erforschen. Die TRIPLE-Schmelzsonde ist dafür konzipiert, das Eis zu durchdringen und anschließend vor Ort mithilfe eines integrierten Wissenschaftsmoduls Messdaten zu erfassen. Zudem soll ein kleines autonomes Unterwasserfahrzeug (nanoAUV: Autonomous Underwater Vehicle) die Umgebung der Schmelzsonde erkunden und beispielsweise Wasserproben entnehmen.

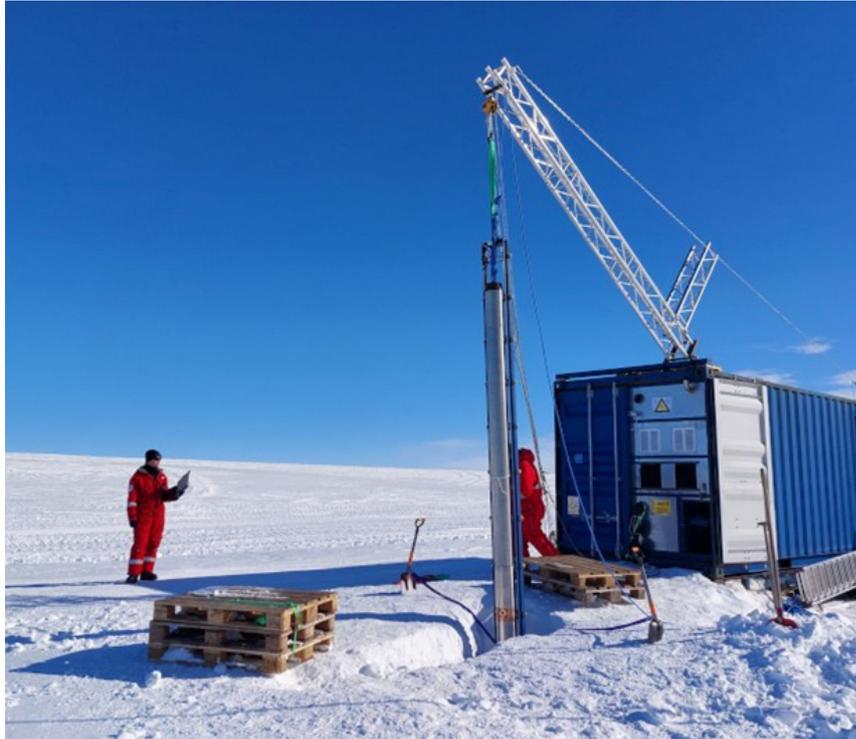


Abbildung 2: Erster Funktionstest der Schmelzsonde bei der Neumayer Station III [8]

An dem Projekt sind 13 Partner aus Forschung und Industrie beteiligt [7], darunter das Alfred-Wegener-Institut – Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), das mit seiner Arbeitsgruppe für Tiefsee-Ökologie und -Technologie vertreten ist, das MARUM – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen, die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen), die Gesellschaft für Systementwicklung und Instrumentierung mbH (GSI) und die Bergische Universität Wuppertal (BUW).

Neben der Untersuchung subglazialer Seen könnte die Schmelzsonde auch für Forschungen unter Schelfeis eingesetzt werden. Der Zugang zu diesen Gebieten ist stark eingeschränkt. Der Einsatz herkömmlicher Unterwasserfahrzeuge ist daher mit erheblichen technischen Risiken verbunden. Ihre Reichweite ist begrenzt, und das Verlustrisiko ist sehr hoch, da sie im Notfall nicht auftauchen können und somit weder geortet noch geborgen werden können [9]. Die Schmelzsonde stellt hier eine vielversprechende Alternative dar, um subglaziale Gewässer zu untersuchen. Die durch die Sonde erhobenen Daten könnten wichtige Informationen über biogeochemische Prozesse sowie Strömungsverhältnisse liefern und damit eine bislang lückenhafte Datenbasis über biologische, chemische und physikalische Vorgänge unter dem Schelfeis erweitern [10].

Für Ende Juni 2025 ist ein erster Integrationstest am AWI vorgesehen, bei dem die Kompatibilität aller Module sowie die Funktionstüchtigkeit des Gesamtsystems überprüft werden sollen. Ein erster Feldtest der gesamten Schmelzsonde ist Ende 2026 in der Antarktis an der Neumayer-Station III (NM-III) des AWI vorgesehen (siehe Abb.1), wo eine 200 m dicke Eisschicht des Ekström-Schelfs durchschmolzen und das darunter liegende Wasser erkundet werden soll. Langfristig ist ein Einsatz in der Dome-C-Region geplant, um dort einen subglazialen See in etwa 4000 m Tiefe zu untersuchen [11].

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Wissenschaftsmoduls zur Integration in die TRIPLE-Schmelzsonde. Es soll in der Lage sein, die Wassertemperatur, den Umgebungsdruck, die Trübung sowie den Salzgehalt, den Sauerstoffgehalt und den Chlorophyll-a-Gehalt des Wassers zu erfassen. Diese Parameter ermöglichen Rückschlüsse auf physikalische und biogeochemische Prozesse in subglazialen Gewässern und liefern damit wertvolle Hinweise auf potenzielle biologische Aktivität und Umweltbedingungen unter dem Eis. Zudem dienen die Sensoren der Validierung neuentwickelter Sensorik des nanAUVs.

Die erfassten Daten werden intern gespeichert und parallel an die an der Oberfläche befindliche Basisstation übertragen. Das Modul muss mechanisch und elektronisch vollständig kompatibel mit der Schmelzsonde sein und sich in das Gesamtdesign einfügen. Zudem soll es möglichst kompakt und leicht sein, um die Größe und Masse der Schmelzsonde gering zu halten. Für den geplanten NM-III-Test ist eine Druckfestigkeit von bis zu 60 bar für die Schmelzsonde und somit für alle Komponenten des Wissenschaftsmoduls vorgesehen. Langfristig wird jedoch eine Belastbarkeit von 600 bar angestrebt. Neben der Druckfestigkeit wird auch eine Salzwasserbeständigkeit gefordert, um Langzeiteinsätze sowohl in subglazialen Seen als auch in Salzwasser zu ermöglichen.

Die Hauptaufgaben dieser Arbeit umfassten die Entwicklung einer mechanisch kompatiblen Struktur für das Wissenschaftsmodul, die Dimensionierung und Konstruktion von Druckgehäusen, die Auslegung von druck- und salzwasserbeständigen Gerätehalterungen sowie die Integration einer elektronisch kompatiblen Elektronikeinheit für das Sensordatenmanagement.

Mit der Entwicklung des Wissenschaftsmoduls als zentralem Element der Schmelzsonde leistet diese Arbeit einen wichtigen Beitrag zum TRIPLE-Projekt.

2 Stand der Technik

2.1 Aufbau und Funktionsweise der Schmelzsonde

Der geplante Aufbau der Schmelzsonde ist in Abb. 3 dargestellt. Sie zeigt die wesentlichen Komponenten und deren Anordnung im Gesamtsystem.

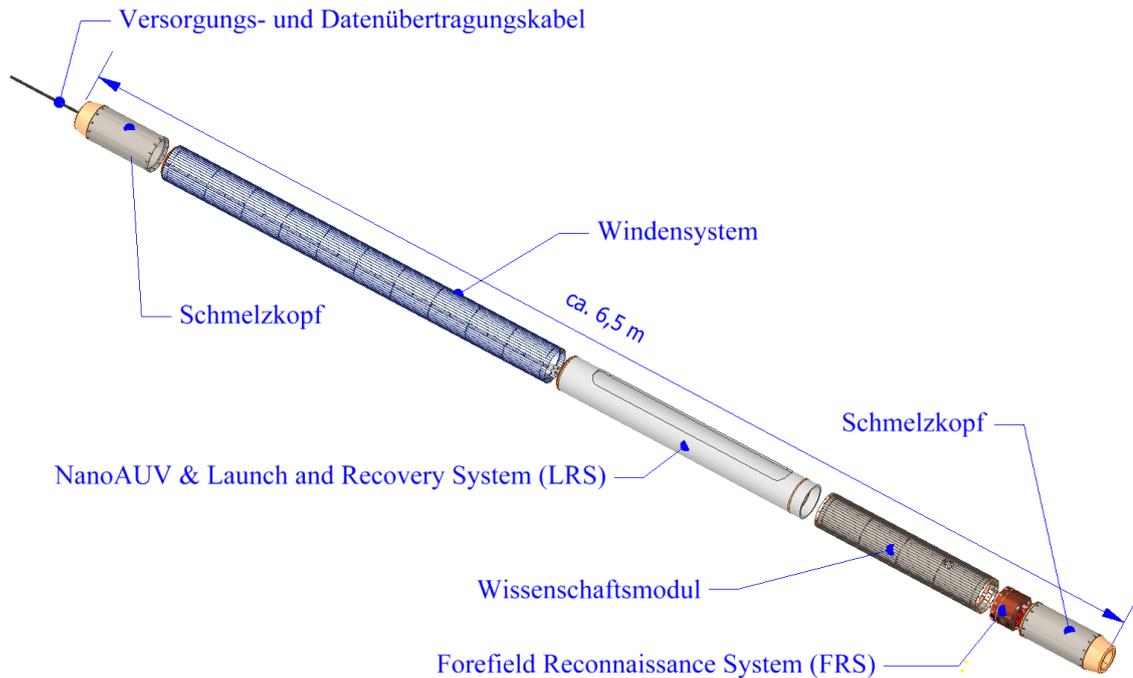


Abbildung 3: Geplanter Aufbau der TRIPLE-Schmelzsonde

Die TRIPLE-Schmelzsonde besteht aus mehreren Modulen, die das autarke Schmelzen durch das Eis, die Durchführung wissenschaftlicher Messungen sowie das Aussetzen und Einholen des nanoAUVs ermöglichen. Zu den zentralen Komponenten gehören die Schmelzköpfe an beiden Enden der Schmelzsonde, das Windensystem mit dem intern aufgespulten Versorgungs- und Datenkabel, das Wissenschaftsmodul, das nanoAUV mit Aussetz- und Bergesystem (LRS: Launch and Recovery System) sowie ein Vorerkundungssystem (FRS: Forefield Reconnaissance System).

Mit Ausnahme der Schmelzköpfe sind alle Module druckneutral ausgelegt und füllen sich beim Eintauchen vollständig mit Wasser. In den Schmelzköpfen sind elektrische Heizstäbe verbaut, die das Metall erhitzen und dadurch das umgebende Eis schmelzen. An der Oberfläche wird die Schmelzsonde zunächst vertikal an ein Kabel über das Eis gehängt (sie-

he Abb. 4). Anschließend wird das Kabel durch das Windensystem abgespult. Während die Schmelzsonde sich durch das Eis schmilzt, bleibt der darüberliegende Schmelzkanal zunächst offen. Ab einer gewissen Tiefe friert dieser wieder zu, sodass die Schmelzsonde vollständig von Eis eingeschlossen ist. Durch das integrierte Windensystem bleibt sie allerdings mobil. Aktuell erreicht sie eine Schmelzgeschwindigkeit von etwa 3-5 m/h.

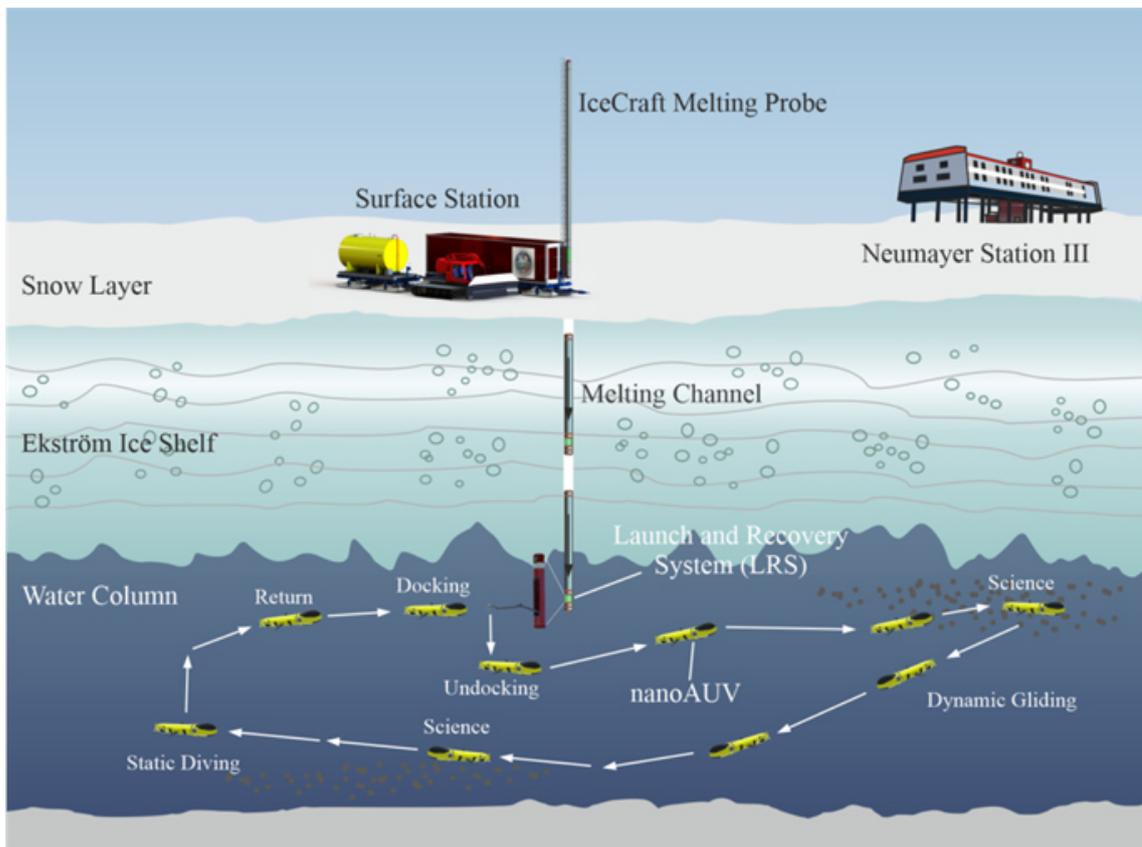


Abbildung 4: Schematisch dargestellter Einsatz des TRIPLE-Systems an der NM-III [11]

Über das Kabel erfolgt sowohl die Spannungsversorgung aller Module als auch die Kommunikation zwischen Schmelzsonde und Basisstation. Während des Schmelzvorgangs scannt das FRS den Bereich unter der Schmelzsonde, um Hindernisse oder andere Anomalien im Vorfeld der Schmelzsonde zu detektieren und ein Ausweichmanöver zu ermöglichen [12].

Die gesamte Schmelzsonde ist mit vergossenen Heizmatten bzw. Heizstäben ausgestattet, welche auf der Innenseite der Außenwände verteilt sind. Diese regeln die Temperatur der Außenseiten der Schmelzsonde auf einige Grad über 0 °C, um ein seitliches Festfrieren am Eis zu verhindern.

Da keine direkte Verbindung zur Oberfläche besteht, gelangt im Idealfall nur das unmittel-

telbar zuvor geschmolzene Eis in das zu beprobende Wasser. Dadurch wird eine kontaminationsfreie Erforschung subglazialer Gewässer ermöglicht.

Sobald die Schmelzsonde das Gewässer erreicht, wird das nanoAUV vom LRS freigesetzt. Dieses fährt eine vorprogrammierte Route ab und kann dabei selbstständig wissenschaftlich relevante Regionen detektieren (siehe Abb. 4). An diesen Stellen werden gezielt Wasserproben über einen pumpengesteuerten Probennehmer entnommen. Nach Abschluss seiner Fahrt kehrt das nanoAUV zur Schmelzsonde zurück, wo es durch das LRS wieder aufgenommen und gesichert wird. Währenddessen erfasst das Wissenschaftsmodul die Wassertemperatur, den Umgebungsdruck, die Trübung sowie den Salzgehalt, den Sauerstoffgehalt und den Chlorophyll-a-Gehalt des Wassers. Diese Daten werden in Echtzeit über eine Netzwerkverbindung an die Basisstation gesendet.

Nach Abschluss der Messungen aktiviert die Schmelzsonde ihren oberen Schmelzkopf, um sich durch das Eis zurück zur Oberfläche zu schmelzen. Durch den oberen Schmelzkopf wird der obere Eisbereich geschmolzen, wobei das Windensystem die Schmelzsonde nach oben zieht und das Kabel wieder auf die Spule wickelt.

Das Windensystem und die Schmelzköpfe werden von der GSI und der RWTH Aachen entwickelt. Erste Tests mit einem Prototypen haben gezeigt, dass die vergossenen Heizmatten aufgrund von Undichtigkeiten überarbeitet werden müssen.

Die Schmelzköpfe befinden sich derzeit in der Entwicklung, existieren als Prototyp und sollen im Rahmen des Integrationstests geprüft werden.

Das FRS wird von der BUW entwickelt und existiert als Prototyp. Für seine Entwicklung wurde ein eigener Schmelzkopf entwickelt, in welchen das FRS integriert wurde. Diese ist allerdings nicht mit der TRIPLE-Schmelzsonde kompatibel.

Das LRS und das nanoAUV werden vom MARUM entwickelt. Das LRS existiert als rudimentärer Prototyp um ein mechanisches Verbinden sowie die Datenübertragung und Versorgung während des Integrationstests zu ermöglichen. Das NanoAUV ist in der finalen Fertigung, erste Tests sind für August 2025 geplant.

Der Entwicklungsstand des Wissenschaftsmoduls wird im Laufe dieser Arbeit beschrieben.

2.2 Demonstator des Wissenschaftsmoduls

Im Rahmen eines Studienprojekts an der Hochschule Bremerhaven wurde in Kooperation mit dem AWI ein erster Demonstrator für das geplante Wissenschaftsmodul entwickelt (siehe Abb. 5).

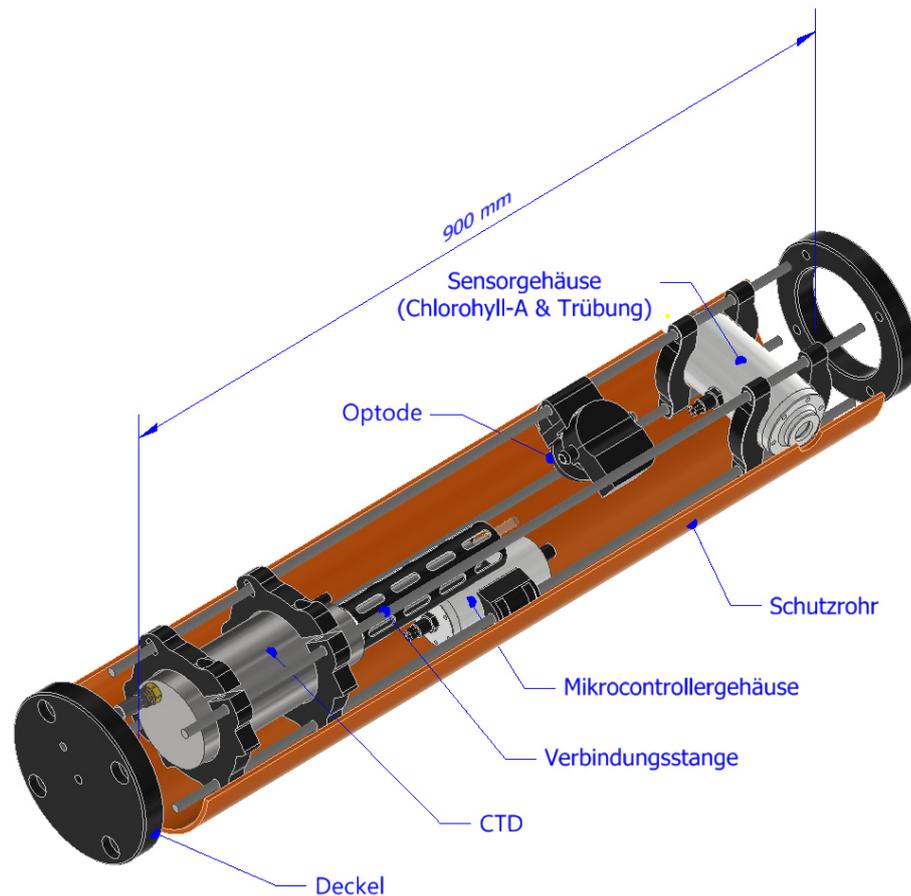


Abbildung 5: Aufbau des Demonstrators

Im Rahmen der Entwicklung des Demonstrators wurden bereits die zu verwendenden Messgeräte und Sensoren für das Wissenschaftsmodul ausgewählt. Es wurden handelsübliche „Commercial off-the-Shelf“ (COTS)-Produkte verwendet, die relativ kostengünstig, gut verfügbar und bereits langzeiterprobt sind.

Die CTD (Conductivity, Temperature, Depth) misst die Leitfähigkeit, die Wassertemperatur und den Umgebungsdruck, aus denen der Salzgehalt berechnet wird. Sie ist gemeinsam mit einer Optode zur Messung des Sauerstoffgehalts in ein Pumpsystem integriert. Die CTD fördert mittels einer internen Pumpe Wasser von außerhalb des Moduls über eine Öffnung im Schutzrohr in das System. Das Wasser strömt durch einen Schlauch zunächst

zur CTD, anschließend weiter zur Optode und verlässt das System über einen weiteren Schlauch (die Schläuche sind in Abb. 5 nicht dargestellt). Das Pumpsystem stellt sicher, dass die Sensoren ausschließlich Wasser von außerhalb des Wissenschaftsmoduls analysieren. Dadurch werden potenzielle Messfehler minimiert, etwa durch eine Erwärmung des Wassers im Inneren durch elektronische Komponenten.

Für die CTD wurde das Modell SBE 52-MP und für die Optode das Modell SBE 63 von Sea-Bird Electronics, Inc. ausgewählt (siehe Abb. D.1 und D.2 im Anhang). Für die Messung von Chlorophyll a und Trübung wurden Sensoren des Typs Hyperion von Teledyne Valeport Ltd eingesetzt (siehe Abb. D.3 und D.4 im Anhang). Um eine flexiblere Integration zu ermöglichen, wurden von diesen Messgeräten lediglich die Sensorköpfe ohne die herstellerseitigen Druckgehäuse beschafft. Dafür wurde ein separates Sensorgehäuse entwickelt. Die Sensorköpfe sind in gegenüberliegenden Deckeln montiert und arbeiten nach einem optischen Messprinzip. Damit die Sensoren ein freies Sichtfeld haben, befinden sich sogenannte Sensorfenster in Form von Bohrungen im Schutzrohr.

Für die einheitliche Darstellung werden im Folgenden sämtliche Messgeräte und Sensoren als „Sensoren“ bezeichnet.

Im Mikrocontrollergehäuse befindet sich die Elektronikeinheit, die aus dem Mikrocontroller als zentralem Steuerelement sowie weiteren elektronischen Komponenten wie Spannungs- und Pegelwandlern besteht. Sie stellt die Spannungsversorgung für die Sensoren und den Mikrocontroller bereit und ermöglicht die Erfassung, Verarbeitung und Speicherung der Sensordaten. Ein Kabel mit drei Abgängen verbindet das Mikrocontrollergehäuse mit den angeschlossenen Sensoren und stellt sowohl die Spannungsversorgung als auch die serielle Kommunikation sicher (das Kabel ist in Abb. 5 nicht dargestellt).

Für die einheitliche Darstellung werden im Folgenden die Sensorgehäuse und das Mikrocontrollergehäuse zusammenfassend als „Druckgehäuse“ bezeichnet.

Der Demonstrator diente als Grundlage für die Auswahl geeigneter Sensoren sowie die Konzeption einer möglichen Anordnung und Integration. Die Abmessungen orientierten sich weitgehend an der final vorgesehenen Version des Wissenschaftsmoduls und wurden bewusst kompakt gehalten. Auch die Entwicklung erster Konzepte zur Datenerfassung und -speicherung wurde realisiert und die ersten Versionen für die Druckgehäuse wurden entworfen, gefertigt und so für die weitere Entwicklung übernommen.

Im Hinblick auf die Integration in die TRIPLE-Schmelzsonde sowie die Anforderungen der finalen Version des Wissenschaftsmoduls bestand jedoch noch erheblicher Optimierungsbedarf. Der Demonstrator verfügte weder über mechanische noch über elektronische Schnittstellen, um kompatibel mit dem System der Schmelzsonde zu sein. Eine erforderliche Netzwerkübertragung der Sensordaten war zum damaligen Zeitpunkt noch nicht implementiert. Zudem kam es wiederholt zu unvollständigen Sensordaten. Die verwendeten Gerätehalterungen erwiesen sich als ungeeignet für den Einsatz in Meerwasser, da sie nach einem ersten Test in Salzwasser brachen. Auch die Druckgehäuse erfüllten nicht die langfristig geforderte Druckfestigkeit von 600 bar. Der Demonstrator musste hinsichtlich dieser technischen Einschränkungen grundlegend überarbeitet werden. Die erforderlichen Anpassungen und Optimierungen für die finale Version des Wissenschaftsmoduls werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben.

3 Aufbau des Wissenschaftsmoduls

Abb. 6 zeigt den Aufbau des Wissenschaftsmoduls, das aus den in dieser Arbeit entwickelten Komponenten besteht. Dazu gehören der strukturelle Rahmen, die Druckgehäuse, die Gerätehalterungen und die Elektronikeinheit.

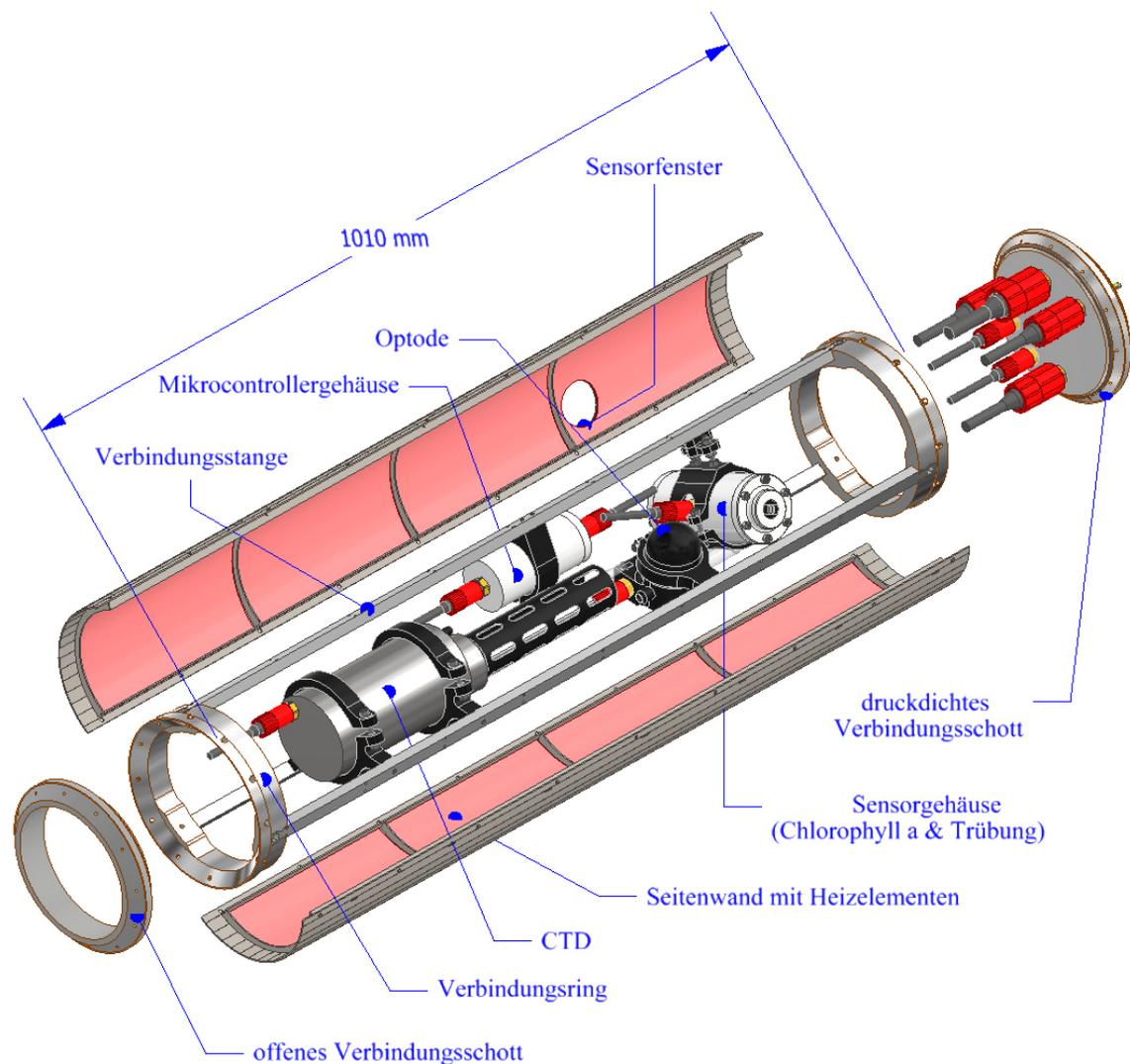


Abbildung 6: Aufbau des Wissenschaftsmoduls

Der strukturelle Rahmen setzt sich aus drei Verbindungsstangen und zwei Verbindungsringen zusammen. Die Verbindungsstangen werden formschlüssig in die Verbindungsringe gesteckt und anschließend mit entsprechenden Zylinderkopfschrauben verschraubt.

An jedem der beiden Verbindungsringe ist ein Verbindungsschott mit mehreren Zylinderkopfschrauben befestigt. Die Ausführung des Verbindungsschotts hängt davon ab, ob das

benachbarte Modul druckneutral oder druckfest ausgelegt ist. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 6 beide Ausführungen der Verbindungsschotts dargestellt. Da das Wissenschaftsmodul sowie die benachbarten Module LRS und FRS mit Wasser geflutet werden und druckneutral ausgelegt sind, kommen in der aktuellen Konfiguration zwei offene Verbindungsschotts zum Einsatz. Dadurch werden die Module miteinander verbunden, und die Versorgungs- sowie Datenkabel können zwischen den Modulen hindurchgeführt werden. Zur flexiblen Anordnung der Module, beispielsweise bei Austausch eines Moduls, können alternativ druckdichte Verbindungsschotts verwendet werden. Diese kommen dann zum Einsatz, wenn an das Wissenschaftsmodul ein druckfestes Modul anschließt.

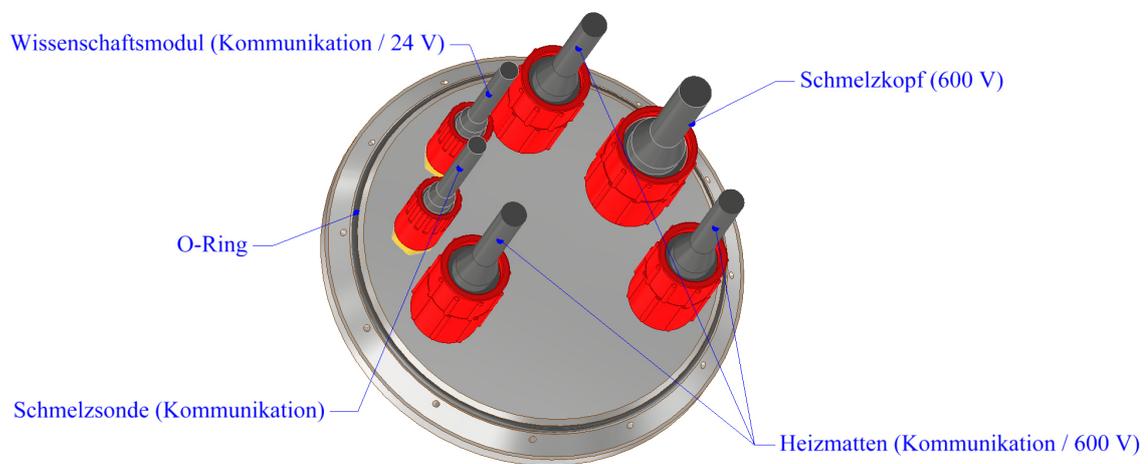


Abbildung 7: Druckdichtes Verbindungsschott mit Einbausteckern

Abb. 3 zeigt ein druckdichtes Verbindungsschott. Diese besitzen einen identischen mechanischen Anschluss wie die offenen Verbindungsschotts, nur dass für die Druckdichtigkeit zusätzlich ein O-Ring zwischen den Kontaktflächen vorgesehen ist. Das gezeigte Verbindungsschott ist für die Montage auf der Unterseite des Wissenschaftsmoduls, also in Richtung des unteren Schmelzkopfes, vorgesehen. Es ist mit druckdichten Einbausteckern der Firma SubConn Inc. ausgestattet, die den Anschluss der Versorgungs- und Datenkabel des Wissenschaftsmoduls [13], der Heizelemente in den Seitenwänden [14], der Schmelzsonde [13] sowie des unteren Schmelzkopfes [15] ermöglichen. Die Kabel für die Schmelzsonde und den Schmelzkopf verlaufen durch das Wissenschaftsmodul und führen auf der Oberseite wieder raus. Falls sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite druckfeste Module angeschlossen werden und somit zwei druckdichte Verbindungsschotts mit Anschlüssen erforderlich sind, wurde bei der Konstruktion des Rahmens ausreichend Platz im Innenraum

vorgesehen, um Kollisionen mit den innenliegenden Komponenten zu vermeiden.

Der Rahmen wird von drei Seitenwänden umschlossen, die an den Verbindungsstangen angeschraubt werden. Auf den Innenseiten der Seitenwände befinden sich Heizelemente (in Abb. 6 in rot dargestellt). Hierbei handelt es sich um in Silikon gegossene Heizmatten, die ein Anfrieren der Seitenwände während des Schmelzvorgangs der Schmelzsonde verhindern.

Die Seitenwände sowie die Verbindungsschotts wurden von der GSI entwickelt und werden dort ebenfalls gefertigt. Die mechanische Schnittstelle zwischen den Modulen durch die Ausführung der Verbindungsschotts war durch die GSI vorgegeben und musste beim Entwurf der Verbindungsringe berücksichtigt werden. Auch das Konstruktionsprinzip mit drei Verbindungsstangen zur Befestigung der Seitenwände wurde von der GSI übernommen.

Die Verbindungsringe wurden so entworfen, dass sie passgenau auf die vorgegebenen Verbindungsschotts passen und sich an diesen montieren lassen. Die Verbindungsstangen wurden auf die für das Wissenschaftsmodul erforderliche Länge angepasst. Zudem erhielten sie die entsprechenden Bohrungen zur Fixierung der Seitenwände. Sowohl die Verbindungsringe als auch die Verbindungsstangen wurden aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083 gefertigt, da diese über eine hohe Beständigkeit gegenüber Salzwasser verfügt [16]. Die entsprechenden technischen Zeichnungen sind in Abb. C.2 und C.1 im Anhang zu finden.

Im Wissenschaftsmodul befinden sich die Sensoren, welche bereits für den Demonstrator ausgewählt wurden. Diese befinden sich ebenfalls in ähnlicher Anordnung wie beim Demonstrator. Die CTD und die Optode sind auch hier in ein Pumpsystem integriert und die Sensoren für Chlorophyll a und Trübung befinden sich in einem gemeinsamen Sensorgehäuse und messen durch Sensorfenster, welche sich in den Seitenwänden befinden.

Sensorgehäuse und Mikrocontrollergehäuse wurden in der vorliegenden Version zunächst aus dem Demonstrator übernommen. Diese bestehen aus Polyoxymethylen (POM) und sind für den ersten Test des Gesamtsystems der Schmelzsonde bei der NM-III ausgelegt, bei dem eine Auslegungstiefe von 200 m vorgesehen ist. Da die finale Version der Schmelzsonde jedoch eine Druckfestigkeit von bis zu 600 bar vorsieht, wurden für beide Gehäuse zusätzlich entsprechend druckfeste Versionen entwickelt. Die Dimensionierung sowie die Konstruktionsentwürfe dieser 600-bar-Druckgehäuse sind in Kap. 5 dargestellt.

Die Gerätehalterungen werden an die Verbindungsstangen geschraubt. So können die Messgeräte und die Druckgehäuse im Wissenschaftsmodul positioniert und fixiert werden. Die

Gerätehalterungen bestehen aus Kunststoff und wurden im 3D-Druck hergestellt. Die Auswahl eines geeigneten Materials und die Konstruktion der Gerätehalterungen werden in Kap. 6 beschrieben.

Die Elektronikeinheit für Sensordatenmanagement und Spannungsversorgung befindet sich im Mikrocontrollergehäuse. Der Aufbau der Elektronikeinheit und das Sensordatenmanagement wird in Kap. 7 gezeigt.

4 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden wird die Spannungsberechnung bei Hohlzylindern unter Außendruck als eine mögliche Methode der Belastungsanalyse vorgestellt, die später durch Tests validiert wird. Anschließend werden verschiedene 3D-druckbare Kunststoffe mechanisch geprüft, um ein geeignetes Material für die Gerätehalterungen auszuwählen.

4.1 Spannungsermittlung bei Hohlzylindern unter Außendruck

Um die Druckgehäuse des Wissenschaftsmoduls korrekt auszulegen, muss die maximal zu erwartende mechanische Spannung ermittelt werden. Auf dieser Grundlage lässt sich abschätzen, welchem Außendruck das Gehäuse standhalten kann, bevor es zu plastischen Verformungen und infolgedessen zum strukturellen Versagen kommt. Dazu wurden verschiedene Belastungsanalysen herangezogen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit durch Belastungstests validiert werden.

Zu den Belastungsanalysen gehört unter anderem die theoretische Spannungsermittlung von Hohlzylindern unter Außendruck. Dieses Verfahren wurde gewählt, da die vorgesehenen Druckgehäuse eben diese Geometrie aufweisen. Die hier dargestellten theoretischen Grundlagen sowie die Herleitung der folgenden Gleichungen basieren im Wesentlichen auf den Ausführungen von Laepple [17]. Dabei wird zwischen dünnwandigen und dickwandigen Hohlzylindern unterschieden. Ein Hohlzylinder gilt als dickwandig, wenn das Verhältnis von Außendurchmesser d_a zu Innendurchmesser d_i folgende Bedingung erfüllt:

$$\frac{d_a}{d_i} > 1,2 \tag{1}$$

Liegt das Verhältnis darunter, wird der Hohlzylinder als dünnwandig eingestuft. Bei der Spannungsermittlung von dünnwandigen Hohlzylindern können bestimmte Vereinfachungen vorgenommen werden. Die Berechnung für dickwandige Hohlzylinder hingegen verzichtet auf solche Vereinfachungen und liefert entsprechend genauere Ergebnisse. Da im Verlauf der Entwicklung sowohl dünn- als auch dickwandige Varianten betrachtet wurden, wurde aus Gründen der Konsistenz und Genauigkeit durchgehend die Berechnungsmethode für dickwandige Hohlzylinder angewandt.

Bei der Spannungsermittlung von dickwandigen Hohlzylindern wird eine ungleichmäßige Spannungsverteilung über der Wanddicke berücksichtigt. Durch den äußeren Druck, der

auf den Hohlzylinder wirkt, treten verschiedene Spannungen in der Hohlzylinderwand auf: Die Radialspannung σ_r , die Tangentialspannung σ_t und die Axialspannung σ_a . Zur Ermittlung dieser Spannungen wird ein Segment aus der Behälterwand herausgeschnitten und das Gleichgewicht der Kräfte betrachtet (siehe Abb. 8). Auf das ausgeschnittene Segment wirken die Schnittspannungen σ_t , σ_r und $\sigma_r + d\sigma_r$. Die Radialspannung σ_r wirkt in radialer Richtung und ändert sich entlang des Radius r um eine Differenz $d\sigma_r$. Die Tangentialspannung σ_t wirkt in tangentialer Richtung.

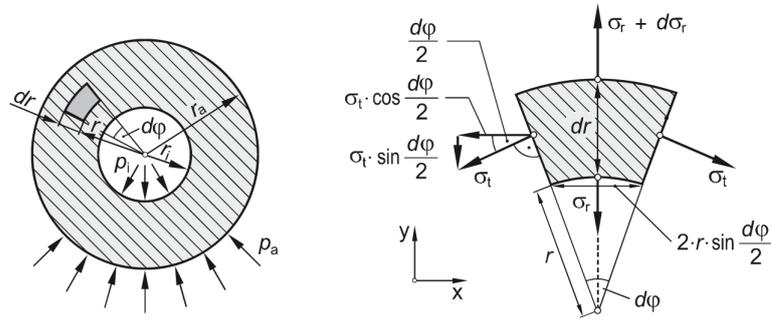


Abbildung 8: Freischnitt und Kräftegleichgewicht an einem Segment der dickwandigen Hohlzylinderwand unter Innen- und Außendruck [17]

Über die Zerlegung dieser Kräfte und das Kräftegleichgewicht kommt man zu den folgenden Gleichungen, mit denen sich die Schnittspannungen in Abhängigkeit von der Ortskoordinate r , dem Innendurchmesser r_i , dem Außendurchmesser r_a und den äußeren Belastungen durch den Innendruck p_i und den Außendruck p_a berechnen lassen:

$$\sigma_r = -p_i \cdot \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{r_a^2}{r^2} - 1 \right) - p_a \cdot \frac{r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_t = p_i \cdot \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \left(\frac{r_a^2}{r^2} + 1 \right) - p_a \cdot \frac{r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

Sind die Enden des Hohlzylinders geschlossen, wie es bei den Druckgehäusen der Fall ist, tritt neben Tangential- und Radialspannung auch eine Axialspannung σ_a auf (siehe Abb. 9).

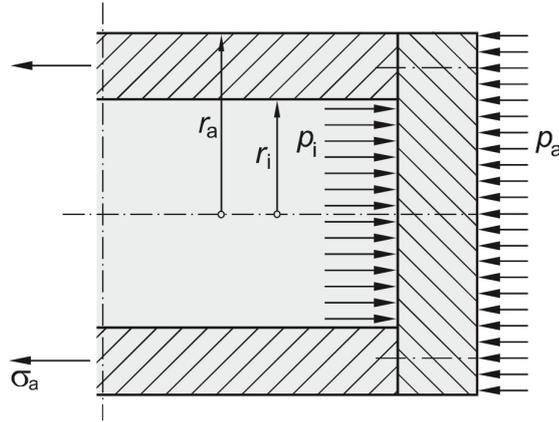


Abbildung 9: Querschnitt eines geschlossenen, dickwandigen Hohlzylinders unter Innen- und Außendruck sowie die daraus resultierende Axialspannung σ_a [17]

Die Axialspannung in der Hohlzylinderwand bleibt konstant und wird nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A} = \frac{\pi r_i^2 p_i - \pi r_a^2 p_a}{\pi(r_a^2 - r_i^2)} \iff \sigma_a = \frac{p_i r_i^2 - p_a r_a^2}{r_a^2 - r_i^2} \quad (4)$$

Um einen endgültigen Festigkeitsnachweis führen zu können, ist die Berechnung einer Vergleichsspannung σ_V auf der Grundlage einer geeigneten Festigkeitshypothese erforderlich.

Für $p_i < p_a$ gilt die Indizierungsregel für Hauptnormalspannungen:

$$\begin{aligned} \sigma_r &\equiv \sigma_1 \\ \sigma_a &\equiv \sigma_2 \\ \sigma_t &\equiv \sigma_3 \end{aligned} \quad (5)$$

Zur Auswahl einer Festigkeitshypothese stehen die Normalspannungshypothese (NH), die Schubspannungshypothese (SH) – auch bekannt als Tresca-Kriterium – und die Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) – auch bekannt als von-Mises-Kriterium. Die NH kann ausgeschlossen werden, da sie nur für spröde Werkstoffe geeignet ist, während die für das Druckgehäuse relevanten Werkstoffe duktil sind (siehe Kapitel 5). Die SH liefert konservative Ergebnisse für duktile Werkstoffe und definiert die Vergleichsspannung als:

$$\sigma_{VSH} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (6)$$

Neben der SH kann die zu weniger konservativen Ergebnissen führende GEH herangezogen werden:

$$\sigma_{VGEH} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (7)$$

Wie in Abb. 10 zu sehen ist, tritt die maximale Spannung bei einwirkendem Außendruck stets auf der Innenseite des Hohlzylinders auf.

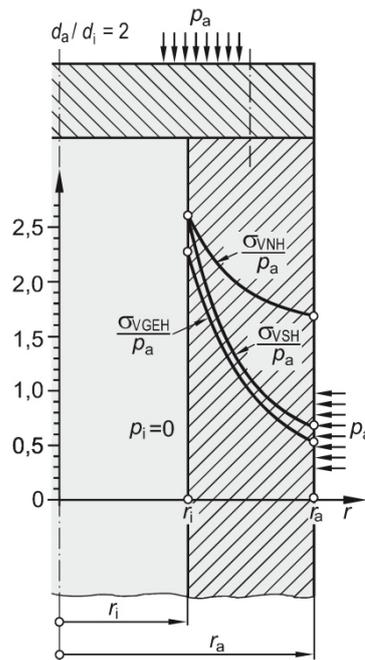


Abbildung 10: Verlauf der Vergleichsspannungen σ_{VNH} , σ_{VSH} und σ_{VGEH} in Abhängigkeit vom Radius r eines geschlossenen, dickwandigen Hohlzylinders unter Außendruck [17]

Um eine bleibende plastische Verformung zu vermeiden, darf die Vergleichsspannung die maximale Streck-/ bzw. Dehngrenze des Werkstoffs nicht überschreiten:

$$\sigma_V < R_e \text{ bzw. } R_{p0,2} \quad (8)$$

Möchte man die Festigkeitsberechnung mit einer bestimmten Sicherheit versehen, muss ein Sicherheitsfaktor S bei der Berechnung berücksichtigt werden:

$$\sigma_{zul} < \frac{R_e}{S} \text{ bzw. } \frac{R_{p0,2}}{S} \quad (9)$$

4.2 Mechanische Werkstoffprüfungen

Im Wissenschaftsmodul sollen 3D-gedruckte Gerätehalterungen aus Kunststoff entwickelt und gefertigt werden. Zur Auswahl eines geeigneten Materials werden verschiedene Kunststoffe hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften sowie ihrer Beständigkeit gegenüber Salzwasser und hydrostatischem Druck untersucht. Dafür werden verschiedene mechanische Werkstoffprüfungen herangezogen, darunter der Zugversuch, der 3-Punkt-Biegeversuch und der Kerbschlagbiegeversuch. Die Methodik dieser Prüfverfahren sowie die zugrunde liegenden theoretischen Grundlagen werden im Folgenden erläutert.

4.2.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes Prüfverfahren zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens unter Zugbeanspruchung. Dabei werden mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit ermittelt. Dazu werden Prüfkörper in eine Zugprüfmaschine (siehe Abb. 11) eingespannt und mit einer definierten Kraft in Längsrichtung bis zum Bruch belastet.

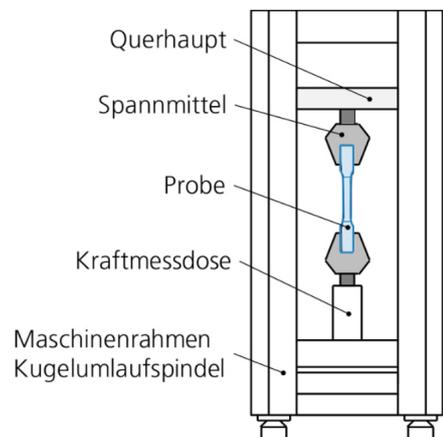


Abbildung 11: Aufbau einer Zugprüfmaschine [18]

Vor dem Prüfvorgang werden Höhe und Breite des Prüfquerschnitts im mittleren Bereich der Probe gemessen. Diese Werte werden in das System der Prüfmaschine eingegeben. Auf Grundlage des Prüfungsquerschnittes A und der einwirkenden Zugkraft F wird die Zugspannung gemäß der folgenden Beziehung bestimmt:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Die Dehnung ε beschreibt die prozentuale Längenänderung des Prüfkörpers und ergibt sich aus der Ausgangslänge L_0 und der Längenänderung ΔL :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (11)$$

Während des Prüfvorgangs wird ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt (siehe Abb. 12), das Aufschluss über die mechanischen Kennwerte des Werkstoffs gibt.

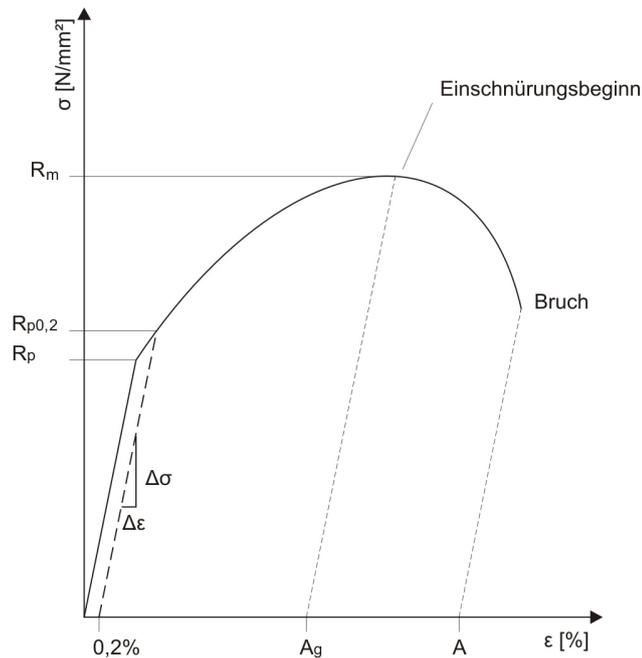


Abbildung 12: Beispielhafte Spannungs-Dehnungs-Kurve eines Kunststoffes im Zugversuch [19]

Dabei lässt sich der Verlauf in zwei Hauptbereiche unterteilen: Den elastischen Bereich, in dem die Verformung vollständig reversibel ist, sowie den plastischen Bereich, in dem die Belastung zu einer bleibenden Verformung führt. Im linear-elastischen Bereich steigt die Spannung proportional zur Dehnung. Dieser Zusammenhang wird durch die sogenannte Hookesche Gerade beschrieben und endet an der Proportionalitätsgrenze R_p . Bei Kunststoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze wird zur Beschreibung des Übergangs in den plastischen Bereich häufig die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ herangezogen. Sie wird grafisch als Schnittpunkt einer zur Hookeschen Geraden parallel verschobenen Linie mit der Spannungs-Dehnungs-Kurve bestimmt.

Die Zugfestigkeit R_m beschreibt die maximal zulässige Zugspannung eines Werkstoffs, bevor es zum Versagen in Form eines Bruchs kommt. Nach Erreichen der Zugfestigkeit beginnt

eine Einschnürung des Prüfkörpers, was eine Verringerung der Querschnittsfläche zur Folge hat. Die durch die Einschnürung bedingte lokale Spannungsüberhöhung führt zum Bruch des Prüfkörpers.

Das E-Modul beschreibt die Steifigkeit eines Werkstoffs. Es beschreibt, welche Spannung erforderlich ist, um im linear-elastischen Bereich eine bestimmte Dehnung zu erzeugen. Es ergibt sich aus der Steigung der Hookeschen Gerade. Je steiler diese Gerade verläuft, desto höher ist das E-Modul und desto steifer ist der Werkstoff.

Die Zähigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Werkstoffs, Energie bis zum Bruch aufzunehmen, und lässt sich durch die Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve charakterisieren. Da die Zähigkeit in dieser Arbeit jedoch gesondert durch den Kerbschlagbiegeversuch untersucht wird (siehe Kap. 4.2.3), erfolgt hier keine Bestimmung anhand des Zugversuchs.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Zugversuche sind insbesondere die Zugfestigkeit sowie der Elastizitätsmodul von Relevanz. Die Auswahl und Begründung dieser Kennwerte erfolgt in Kap. 6 Gerätehalterungen.

4.2.2 3-Punkt-Biegeversuch

Der 3-Punkt-Biegeversuch ist ein genormtes Prüfverfahren zur Bestimmung des Werkstoffverhaltens unter Biegebelastung. Analog zum Zugversuch können auch hier mechanische Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit bestimmt werden. Bei dem Versuch wird die genormte Probe auf zwei parallel angeordneten Widerlagern positioniert und in der Mitte mit einer Finne bis zum Bruch belastet (Siehe Abb. 13).

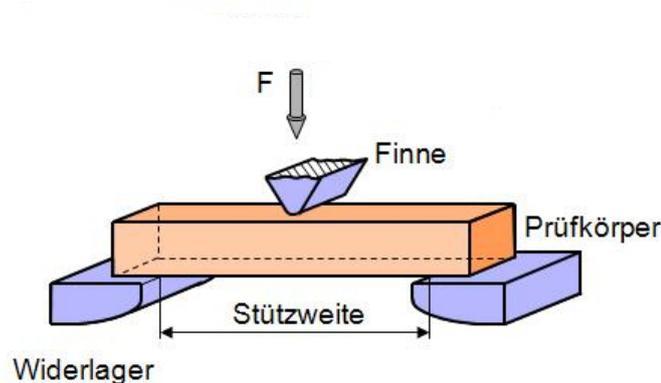


Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines Drei-Punkt-Biegeversuchs [20]

Entscheidend für die Beurteilung der mechanischen Eigenschaften ist die Biegespannung σ_b .

Diese ist abhängig von der Biegekraft F , der Stützweite L , der Höhe h und Breite b der Probe:

$$\sigma_b = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (12)$$

Die prozentuale Dehnung ε ist abhängig von der Durchbiegung s , der Höhe der Probe und der Stützweite:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (13)$$

Ähnlich wie beim Zugversuch erhält man durch den 3-Punkt-Biegeversuch ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm, das verschiedene Kennwerte des Materials liefert. Dabei werden während der durchgeführten Versuche die Biegefestigkeit und das Biegemodul betrachtet. Die Biegefestigkeit entspricht analog zur Zugfestigkeit der maximalen Biegespannung, die ein Werkstoff aufnehmen kann, bevor er versagt. Das Biegemodul beschreibt die Steifigkeit des Materials unter Biegebelastung. Je höher das Biegemodul, desto größer ist die Steifigkeit des Werkstoffs.

4.2.3 Kerbschlagbiegeversuch

Um das Bruchverhalten eines Werkstoffs zu analysieren, wird der Kerbschlagbiegeversuch herangezogen. Für den Versuch wird ein Schlag mit definierter Energie auf eine Probe aufgebracht. Das am häufigsten eingesetzte Verfahren ist der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy.

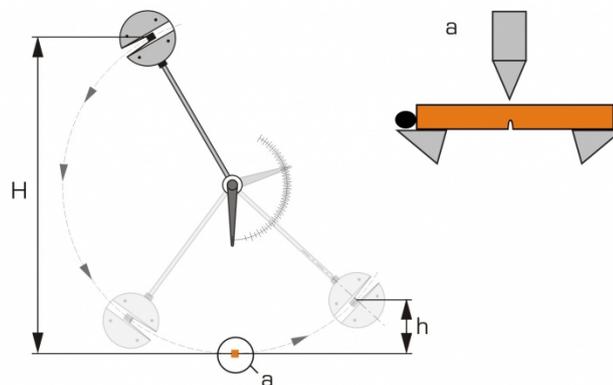


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des Kerbschlagbiegeversuchs [21]

Dabei wird ein genormter Prüfkörper gegen zwei Widerlager gelegt und durch einen herunterschwingenden Pendelhammer in der Mitte durchschlagen (siehe Abb. 14).

Die Kerbschlagarbeit K ergibt sich aus der Masse m des Pendelhammers, der Gravitationskonstante g und der Differenz von Starthöhe H und Ausgangshöhe h :

$$K = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad (14)$$

Der in diesem Versuch ermittelte Werkstoffkennwert ist die Schlagzähigkeit a_K . Sie ist definiert als die Kerbschlagarbeit bezogen auf die Querschnittsfläche A des Prüfkörpers:

$$a_K = \frac{K}{A} \quad (15)$$

Die Schlagzähigkeit ist ein Maß für die Widerstandsfähigkeit gegenüber Schlag- und Stoßbelastungen.

5 Druckgehäuse

Das bestehende Mikrocontroller- sowie das Sensorgehäuse für den Chlorophyll-a- und den Trübungssensor wurden während der Entwicklung des Demonstrators für eine Druckfestigkeit von bis zu 60 bar konzipiert. Der Entwurf dieser aus POM gefertigten Druckgehäuse orientierte sich an bestehenden Modellen mit ähnlichen Abmessungen und demselben Material, die zuvor für 60bar dimensioniert und in dieser Form zunächst übernommen wurden. Da die Druckfestigkeit dabei nur grob abgeschätzt wurde, war eine erneute und detaillierte Bewertung notwendig. Für die finale Version des Wissenschaftsmoduls sind zudem Druckgehäuse mit einer Druckfestigkeit von bis zu 600 bar erforderlich.

Um die Belastung durch den hydrostatischen Druck zu beurteilen und die Gehäuse entsprechend zu dimensionieren, wurden zwei Belastungsanalysen herangezogen: Zum einen die theoretische Belastungsanalyse (siehe Kap. 4.1) und zum anderen die numerische Belastungsanalyse mittels Finite-Elemente-Methode (FEM), welche im folgenden Kap. 5.3 beschrieben wird. Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit dieser Belastungsanalysen wurde eine Untersuchung durchgeführt, bei der Testgehäuse in einem Drucktank bis zum Versagen belastet wurden. Anschließend wurden die Vorhersagen der Belastungsanalysen bezüglich des Versagensdrucks mit den Ergebnissen dieser Tests verglichen und bewertet. Basierend auf den Erkenntnissen aus diesem Vergleich wurden die bestehenden Druckgehäuse hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit neu bewertet und die 600-bar-Druckgehäuse dimensioniert und konstruiert.

5.1 Testgehäuse

Als Vorlage für die Testgehäuse dienten die bereits bestehenden Druckgehäuse aus POM. Dies ermöglicht eine praxisnahe Untersuchung und zudem konnten die bereits gefertigten Gehäusedeckel für die Tests verwendet werden. Lediglich die Hohlzylinder aus POM wurden zusätzlich gefertigt. Dabei wurde die Wandstärke der Gehäuse so angepasst, dass sie je nach Belastungsanalyse bei einem definierten Außendruck kollabieren.

Beim Versagen der Testgehäuse kann es zu einer Implosion kommen, die einen hohen Druck erzeugt. Um Schäden am Drucktank zu verhindern, wurde festgelegt, die Testgehäuse für eine maximale Belastung von etwa 100 bar auszulegen.

Die Wandstärke des Testgehäuses für den Mikrocontroller (siehe Abb. 15) von 3,2mm wurde auf Basis der theoretischen Belastungsanalyse festgelegt. Für die Berechnung wurde

die GEH aus den Festigkeitshypothesen herangezogen, da sie im Vergleich zur SH niedrigere Vergleichsspannungen prognostiziert (siehe Abb. 10). Der daraus resultierende maximale Außendruck $p_{a,max}$, bei dem das Gehäuse plastisch versagt, fällt dadurch systematisch höher aus. Dies reduziert das Risiko, dass das festgelegte Limit von 100 bar überschritten wird.

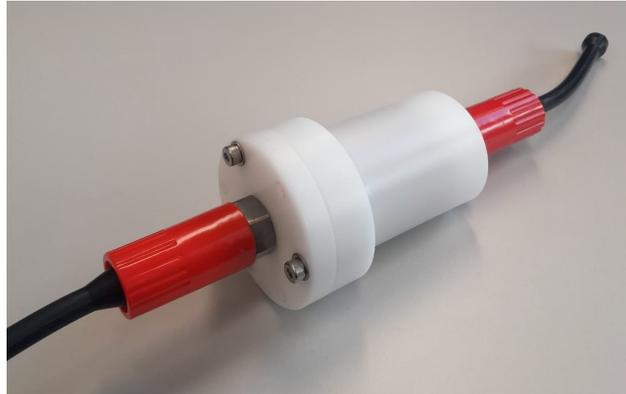


Abbildung 15: Fertig montiertes Mikrocontroller-Testgehäuse für Drucktest

Beim Entwurf des Sensor-Testgehäuses (siehe Abb. 16) wurde eine Wandstärke von 5 mm festgelegt, da eine geringere Wandstärke fertigungstechnisch nur schwer umsetzbar ist. Damit liegen die Berechnungen für den maximalen Druck je nach Belastungsanalyse und Wahl der Festigkeitshypothese zwar etwas über 100 bar, was aber unter Berücksichtigung der Umstände und der geringen Überschreitung zulässig ist. Die technischen Zeichnungen für die Zylinder und die Deckel der Testgehäuse sind in Abb. C.3 - C.7 im Anhang zu finden.



Abbildung 16: Fertig montiertes Sensor-Testgehäuse für Drucktest

Nach der Fertigung der Zylinder der Testgehäuse wurden die Wandstärken mit einem elektronischen Messschieber überprüft. Die Wandstärke des Mikrocontroller-Testgehäuses beträgt 3,23 mm und die des Sensor-Testgehäuses 5,01 mm.

5.2 Theoretische Belastungsanalyse nach SH und GEH

Die theoretische Belastungsanalyse von Druckgehäusen liefert bei vorgegebenem Innen- und Außendruck sowie den Innen- und Außenradien entsprechende Schnittspannungen, die radial, tangential und axial in der Gehäusewand wirken (siehe Gl. (2), (3) und (4)). Diese Schnittspannungen können sowohl nach der SH (siehe Gl.(6)) als auch nach der GEH (siehe Gl. (7)) zu einer Vergleichsspannung σ_V zusammengefasst werden. Um eine plastische Verformung des Gehäuses zu vermeiden, darf diese Vergleichsspannung die Streckgrenze R_e des Werkstoffs nicht überschreiten (siehe Gl. (8)). Die Streckgrenze von POM, das für die Fertigung der Testgehäuse verwendet wurde, beträgt 67 MPa [22]. Dieser Wert wird als maximale zulässige Vergleichsspannung σ_{zul} festgelegt. Der gesuchte Wert ist der maximal zulässige Außendruck $p_{a,max}$.

Für Berechnung von $p_{a,max}$ nach der SH wurden die Gleichungen für die Radial- und Tangentialspannung (siehe Gl. (2) und (3)) nach der Indizierungsregel (siehe Gl. 5) in die Gleichung für die Vergleichsspannung nach der Schubspannungshypothese (siehe Gl. (6)) eingesetzt und nach $p_{a,max}$ umgestellt. Die sich ergebende Gleichung lautet:

$$p_{a,max} = p_i + \frac{\sigma_{zul} (r_a^2 - r_i^2)}{2r_a^2} \quad (16)$$

Bei der komplexeren GEH ist eine analytische Umstellung zur Berechnung von $p_{a,max}$ nicht praktikabel. Das Einsetzen der Schnittspannungen in Gl. (7) führt zu einem komplexen Ausdruck, der $p_{a,max}$ in höheren Potenzen enthält. Deshalb wird $p_{a,max}$ für die GEH numerisch mit der Berechnungssoftware MATLAB der Firma The MathWorks, Inc. [23] ermittelt, die sich gut für das Lösen komplexer, nichtlinearer Gleichungen eignet. Der entsprechende Code befindet sich in Abb. E.1 im Anhang.

Da die Gewindebohrung zur Befestigung des Einbausteckers beim Sensor-Testgehäuse (siehe Abb. 16 und C.3) in der theoretischen Belastungsanalyse nicht berücksichtigt werden kann, wird für das Sensor-Testgehäuse ein idealer Hohlzylinder angenommen. Dies liegt daran, dass die Berechnungsgrundlage von einem idealen Hohlzylinder ausgeht, dem die seitliche Gewindebohrung widersprechen würde.

Für den maximalen zulässigen Außendruck $p_{a,\max}$ der beiden Testgehäuse wurden folgende Ergebnisse ermittelt:

$p_{a,\max}$	Sensor-Testgehäuse	Mikrocontroller-Testgehäuse
nach SH [bar]	103,4	87,7
nach GEH [bar]	119,2	101,1

Tabelle 1: Maximal zulässiger Außendruck $p_{a,\max}$ der Testgehäuse gemäß SH und GEH

5.3 Numerische Belastungsanalyse mittels FEM-Simulation

Die integrierte Belastungsanalyse der Konstruktionssoftware Inventor Professional 2025 der Firma Autodesk GmbH [24] ermöglicht es, einzelne Bauteile oder komplette Baugruppen direkt innerhalb der Konstruktionsumgebung auf ihre mechanische Belastbarkeit zu prüfen. Dabei können verschiedene Kräfte, wie beispielsweise Druck-, Zug- oder Biegebelastungen, auf das Bauteil aufgebracht werden. Zur Durchführung der Analyse kommt die FEM zum Einsatz.

Vor der Analyse müssen dem Modell die physikalischen Eigenschaften des verwendeten Materials zugewiesen werden. Dazu gehören unter anderem die Streckgrenze, der E-Modul und die Querkontraktionszahl, die Aufschluss über die Verformung eines Materials quer zur Belastungsrichtung gibt. Anschließend wird das entworfene 3D-Modell in ein sogenanntes Finite-Elemente-Modell überführt. Dies geschieht durch das Erzeugen eines Netzes, das sich über die gesamte Geometrie des Bauteils spannt. Dabei wird das Modell in viele kleine, voneinander getrennte Elemente unterteilt. Dieses Netz bildet die Grundlage für die spätere Berechnung.

Nach der Definition von Randbedingungen (z.B. Fixierungen oder Lagerungen) und Belastungen (z.B. Kräfte oder Druckflächen), erfolgt die Spannungsanalyse innerhalb der einzelnen Elemente. Die Software berechnet dabei die resultierenden Spannungen und Deformationen für jedes Element. Die Ergebnisse werden dann zu einem Gesamtbild des Bauteilverhaltens zusammengesetzt [25]. Der entscheidende Vorteil der FEM liegt darin, auch komplexe Geometrien und Belastungsszenarien erfassen zu können. Für die numerische Belastungsanalyse sind somit keine idealisierenden Vereinfachungen notwendig. So kann bei der FEM-Simulation des Sensor-Testgehäuses im Gegensatz zur theoretischen Belastungsanalyse auch die seitliche Gewindebohrung berücksichtigt werden.

5.3.1 Durchführung

Die konstruierten 3D-Modelle der Testgehäuse wurden in der Konstruktionsumgebung von Inventor realitätsgetreu modelliert. Für die Belastungsanalyse der Testgehäuse wurde in der Simulationsumgebung jeweils ein Deckel fixiert und sämtliche außenliegenden Flächen mit einer Druckbelastung versehen. Da sich keine direkte Angabe einer maximal zulässigen Spannung machen lässt, aus der der entsprechende Maximaldruck berechnet wird, wurde der Druckwert iterativ angepasst, bis die zulässige maximal zulässige Spannung erreicht wurde. Im Fall der Belastungsanalyse der Testgehäuse entspricht diese der Streckgrenze des Werkstoffs POM mit $R_e = 67 \text{ MPa}$.

Für die erste Belastungsanalyse wurde das Netz mit den Standardeinstellungen von Autodesk Inventor erstellt (siehe Abb. F.1). Diese Voranalyse liefert eine erste Näherung bezüglich Ort und Höhe der maximal auftretenden Spannung im Gehäuse. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die Bereiche mit der höchsten Spannung identifiziert, um dort lokal ein feineres Netz zu verwenden. Dies dient der Erhöhung der Genauigkeit, ohne den Rechenaufwand übermäßig zu steigern [25].

5.3.2 Ergebnisse

Abb. 17 und 18 zeigen die Ergebnisse der Belastungsanalysen der beiden Testgehäuse. In beiden Fällen treten die höchsten Spannungen an der Innenseite des zylindrischen Gehäuses auf. Daher wurde in diesen Bereichen ein möglichst feinmaschiges Netz erstellt, wobei ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeit berücksichtigt wurde. Die FEM-Analysen zeigten zudem, dass die Spannungen in den Deckeln sowie im Gehäuseboden des Mikrocontroller-Testgehäuses vergleichsweise gering ausfielen. Aus diesem Grund wurden diese Bauteile sowohl in der FEM- als auch in der theoretischen Belastungsanalyse nicht weiter betrachtet.

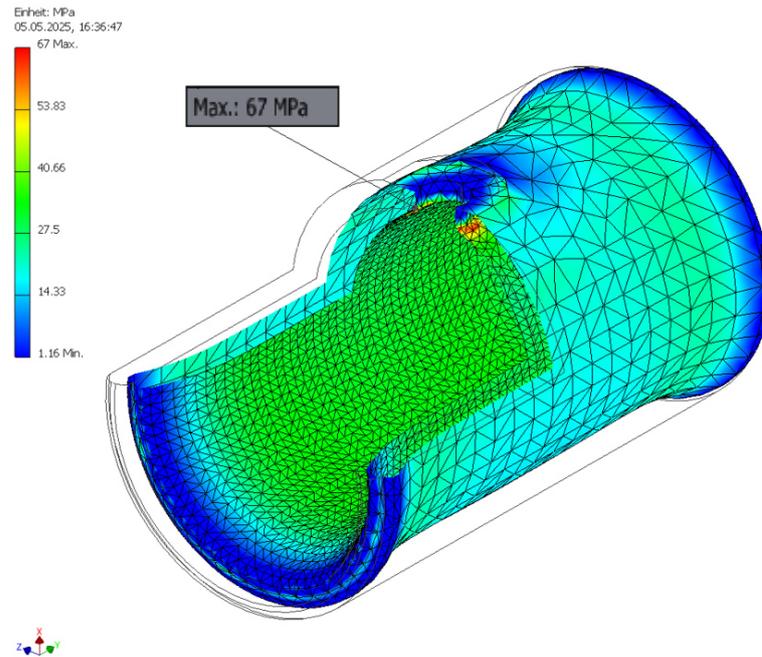


Abbildung 17: Sensor-Testgehäuse in der FEM-Simulation (Deckel in dieser Ansicht ausgeblendet)

Beim Sensor-Testgehäuse konzentriert sich die maximale Spannung auf den Bereich der Gewindebohrung. Sie liegt deutlich über den übrigen Spannungswerten entlang der Zylinderinnenseite und markiert damit eine konstruktiv bedingte Schwachstelle, an der mit einem vorzeitigen Materialversagen zu rechnen ist. Die FEM-Simulation weist somit auf eine erhebliche Schwächung des Gehäuses infolge der Gewindebohrung hin.

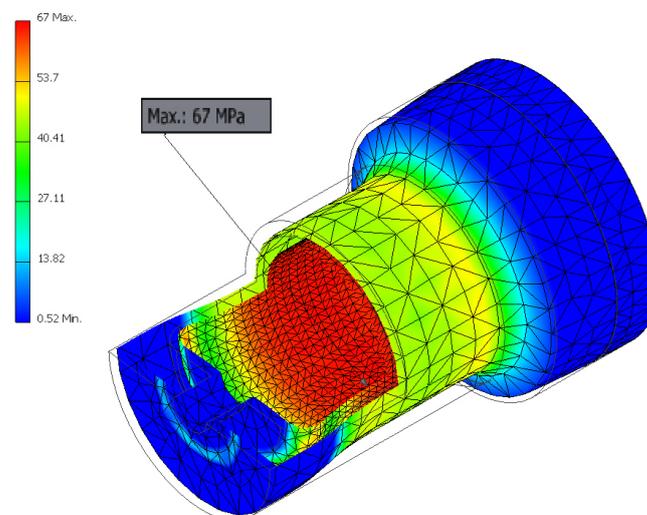


Abbildung 18: Mikrocontroller-Testgehäuse in der FEM-Simulation

Beim Mikrocontroller-Testgehäuse ist die Spannung relativ gleichmäßig entlang der Zylinderinnenseite verteilt, ohne lokale Spannungsspitzen. Die maximale Spannung tritt dabei in Längsrichtung etwa mittig auf.

Der aus den FEM-Simulationen resultierende maximal zulässige Druck beträgt für das Sensor-Testgehäuse 66,8 bar und für das Mikrocontroller-Testgehäuse 91,2 bar. Während der Wert für das Mikrocontroller-Testgehäuse zwischen den beiden Ergebnissen der theoretischen Belastungsanalyse liegt (87,7 bar und 101,1 bar), fällt der Wert des Sensor-Testgehäuses deutlich geringer aus als die entsprechenden theoretischen Vergleichswerte (103,4 bar und 119,2 bar).

5.4 Belastungstests im Drucktank

Die folgenden Kapitel zeigen die Durchführung und Ergebnisse der Drucktests für das Sensor-Testgehäuse und das Mikrocontroller-Testgehäuse.

5.4.1 Durchführung

Als Vorbereitung der Belastungstests im Drucktank wurden die Testgehäuse mit Papier ausgefüllt, um einen möglichen Wassereintrich bei nicht vollständigem Kollaps des Gehäuses feststellen zu können. Zusätzlich wurden in das Sensor-Testgehäuse Sechskantmuttern gelegt, um das Luftvolumen und somit die Energie der zu erwartenden Implosion im Drucktank zu verringern. Beim Mikrocontrollergehäuse konnte auf diese Maßnahme verzichtet werden, da das Luftvolumen hier bereits sehr gering war.

Anschließend wurden die Gehäuse mit den vorhandenen Deckeln verschlossen. In den entsprechenden Nuten jedes Deckels befinden sich zwei O-Ringe, die die Druckfestigkeit zwischen Deckel und Zylinder gewährleisten. Analog zum originalen Mikrocontrollergehäuse wurde auch bei dem Testgehäuse an beiden Enden jeweils SubConn-Einbaustecker vom Typ Micro Circular [13] montiert (siehe Abb. 15). Beim Sensor-Testgehäuse wurde wie beim Original der Einbaustecker in die seitliche Gewindebohrung des Hohlzylinders eingeschraubt (siehe Abb. 16). Um Beschädigungen der Sensorköpfe und der zugehörigen Elektronik beim Kollaps zu vermeiden, wurden diese durch Dummies aus POM ersetzt. Die Sensorköpfe sind im Original in den Deckeln verbaut und tragen zur Druckfestigkeit des Gehäuses bei. Deshalb befindet sich auch bei den Dummies jeweils ein O-Ring in der dafür vorgesehenen Nut. Die Deckel wurden mit drei Gewindestangen und Sechskantmuttern fixiert.

Die Testgehäuse wurden anschließend an einem Seil befestigt und in den mit Wasser gefüllten Drucktank abgesenkt (siehe Abb. 19). Die Drucktests fanden für jedes Testgehäuse einzeln und nacheinander statt. Nach dem Verschließen des Tanks wurde dieser über eine Pumpe mit Wasser aufgefüllt, wodurch die verbleibende Luft über ein Ablassventil entweichen konnte. Nach dem Schließen des Ventils wurde der Druck mithilfe der Pumpe kontinuierlich um etwa 15 bar/min erhöht. Der aktuelle Druckwert konnte über ein analoges Manometer abgelesen werden, dessen grobe Skalierung jedoch nur eine Genauigkeit von etwa ± 2 bar erlaubte.



Abbildung 19: Offener Drucktank mit Mikrocontroller-Testgehäuse

Der Zeitpunkt des Kollapses des Gehäuses konnte durch ein plötzlich auftretendes, knackendes Geräusch sowie einen schlagartigen Druckabfall (> 5 bar) eindeutig identifiziert werden. Dieser ist auf die mit dem Kollaps verbundene Ausdehnung des Wassers zurückzuführen.

5.4.2 Ergebnisse

Beim Sensor-Testgehäuse trat ein Materialversagen bei etwa 110 bar auf. Nach dem Herausholen zeigte sich eine plastische Verformung in Form einer Einwölbung, die sich am Umfang des Zylinders gegenüber dem Einbaustecker befand (siehe Abb. 20). Im Inneren des Gehäuses wurden die Sechskantmuttern zusammengedrückt und gegen die Gehäusewand gepresst, wodurch sichtbare Kerben entstanden. Ohne die Unterstützung der Sechskantmuttern hätte es vermutlich stärkere Verformungen oder einen vollständigen Kollaps gegeben. So hielt die Dichtung durch die O-Ringe und es drang kein Wasser in das Gehäuseinnere.

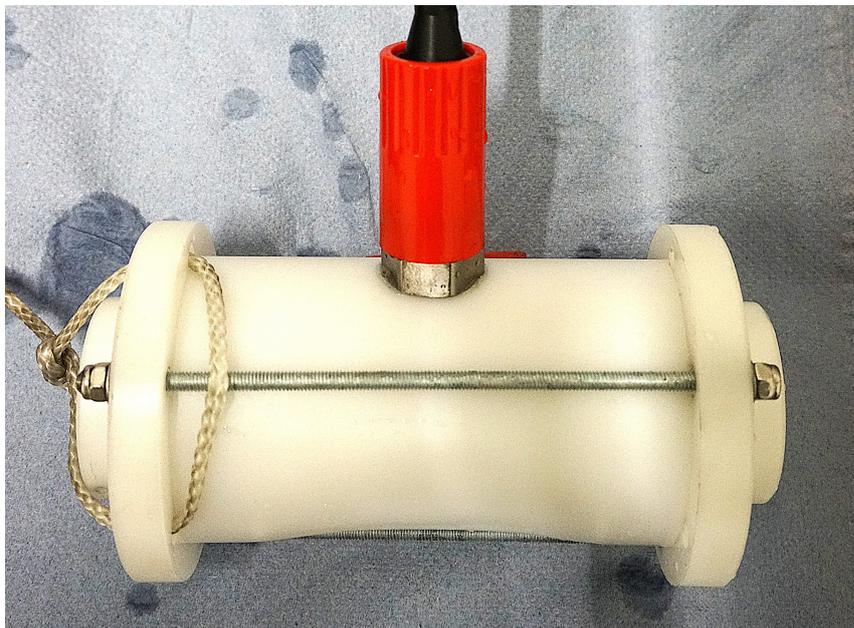


Abbildung 20: Kollabiertes Sensor-Testgehäuse

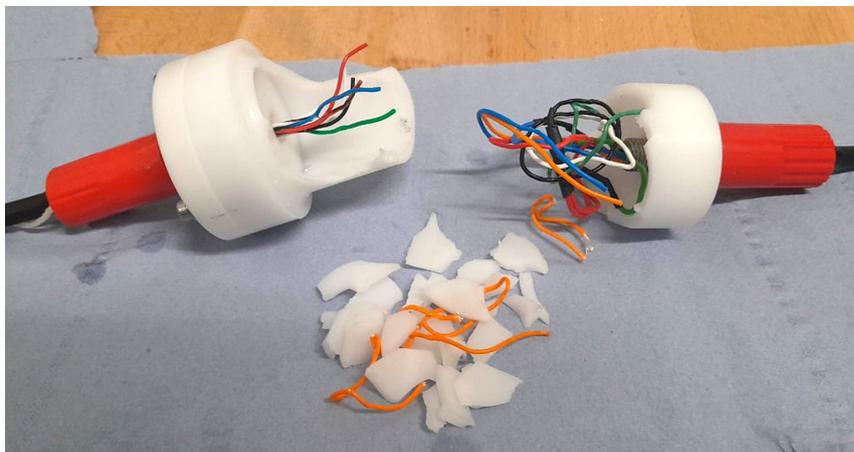


Abbildung 21: Kollabiertes Mikrocontroller-Testgehäuse

Das Mikrocontrollergehäuse kollabierte bei etwa 95 bar. Dabei zerbrach der mittlere Teil des Gehäuses in mehrere Einzelteile, wobei sogar die innenliegenden Kabel der Stecker teilweise abgerissen wurden (siehe Abb. 21). Die genaue Schwachstelle ließ sich nicht eindeutig lokalisieren, lag jedoch eindeutig im Umfangsbereich des Hohlzylinders. Die Gehäusewand wurde dort eingedrückt und brach entlang der Übergänge zum Gehäuseboden und zur Öffnung.

5.5 Auswertung

Tab. 2 zeigt die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Belastungsanalysen sowie der Testergebnisse:

$p_{a,max}$	Sensor-Testgehäuse	Mikrocontroller-Testgehäuse
nach SH [bar]	103	88
nach GEH [bar]	119	101
nach FEM-Simulation [bar]	66	91
Testergebnisse	110 ± 2	95 ± 2

Tabelle 2: Maximal zulässiger Außendruck $p_{a,max}$ aus Belastungsanalysen im Vergleich zu Testergebnissen (alle Werte gerundet aufgrund von Messunsicherheiten und zur Vereinheitlichung der Nachkommastellen)

Für das Mikrocontroller-Testgehäuse, dessen Geometrie einem einfachen Hohlzylinder entsprach, stimmten alle drei Belastungsanalysen gut mit den experimentellen Testergebnissen überein. Die FEM-Simulation lieferte ein sehr präzises Ergebnis mit nur minimaler Abweichung vom gemessenen Versagensdruck. Die theoretische Belastungsanalyse mithilfe der SH sowie der GEH lieferte insgesamt zuverlässige und praxisnahe Abschätzungen des maximal zulässigen Außendrucks im Vergleich zu den Testergebnissen. Dabei tendiert die SH zu leicht konservativen, die GEH hingegen zu leicht optimistischen Werten.

Beim Sensor-Testgehäuse ergab sich hingegen ein deutlich anderes Bild. In der FEM-Simulation stellte sich die seitliche Gewindebohrung als klare Schwachstelle dar. Dies führte zu einem signifikant niedrigeren berechneten Versagensdruck als der experimentell ermittelte. Zudem zeigte die Betrachtung des kollabierten Testgehäuses, dass die Bruchstelle nicht wie erwartet in der Nähe der Gewindebohrung auftrat, sondern auf der gegenüberliegenden Gehäusesseite. Dies zeigt, dass die FEM-Simulation zwar geometrisch detailliert war, die resultierenden Schwachstellen jedoch falsch vorhergesagt wurden. Mögliche Ursachen

hierfür könnten in vereinfachten Annahmen bezüglich der konstruierten Bauteilgruppe, der Vernetzung oder der Randbedingungen liegen. Im Gegensatz dazu lieferten die vereinfachten Berechnungsansätze nach SH und GEH Werte, die näher an den realen Testergebnissen lagen, obwohl die Gewindebohrung unberücksichtigt blieb. Auch hier zeigte sich, dass die SH konservative und die GEH optimistische Werte lieferte. Insgesamt ließ sich daraus ableiten, dass die Gewindebohrung im Sensor-Testgehäuse keine konstruktive Schwächung verursachte.

Der Vergleich verdeutlicht, dass die theoretischen Belastungsanalysen insgesamt ausreichend genaue und verlässliche Ergebnisse liefern. Gleichzeitig zeigt der Fall des Sensor-Gehäuses, dass FEM-Simulationen zwar prinzipiell in der Lage sind, komplexe Geometrien zu berücksichtigen, jedoch nur dann zuverlässige Ergebnisse liefern, wenn sie sorgfältig modelliert und kritisch validiert werden. Andernfalls besteht die Gefahr übermäßig konservativer oder sogar fehlerhafter Prognosen. Für einfache Geometrien hingegen hat sich die FEM-Simulation als sehr präzise erwiesen.

Da je nur ein Testgehäuse getestet wurde, ist die statistische Aussagekraft der Messergebnisse begrenzt. Eine höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse wäre durch weitere Testläufe möglich, wäre jedoch mit erheblichem Material- und Zeitaufwand verbunden.

Für die erneute Bewertung der Druckfestigkeit der bestehenden Gehäuse und die Dimensionierung der 600-bar-Versionen dient im weiteren Verlauf die Belastungsanalyse nach der SH als Grundlage. Diese liefert ausreichend präzise Ergebnisse und tendiert systematisch zu konservativen Werten, was eine geeignete Grundlage für eine sichere Dimensionierung bietet.

5.6 Belastungsanalyse der bestehenden Druckgehäuse

Wie zu Beginn von Kap. 5 beschrieben, wurden die bestehenden Druckgehäuse aus POM bisher nur überschlägig hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit eingeschätzt. Daher werden diese für beide Gehäuse anhand der validierten Belastungsanalyse nach der SH erneut berechnet. Dabei wird ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor $S = 1,65$ gewählt, welcher hinsichtlich der Belastungsart und des potenziellen Risikos als angemessen gilt [26]. Die zulässige Spannung wird nach Gl. (9) unter Verwendung der Streckgrenze von POM ($R_e = 67 \text{ MPa}$) und des Sicherheitsfaktors ($S = 1,65$) berechnet.

Der maximal zulässige Außendruck wird nach Gl. (16) berechnet. Für beide Druckgehäuse erhalten wir $p_{a,\max} = 114$ bar. Dies ist auf das identische Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser beider Gehäuse zurückzuführen.

Damit liegen die Gehäuse weit über der ersten überschlägigen Einschätzung von 60 bar Druckfestigkeit.

5.7 Entwurf der 600-bar-Druckgehäuse

Die finale Version der Druckgehäuse sieht eine Druckfestigkeit von bis zu 600 bar vor. Die Innenabmessungen der Gehäuse bleiben dabei unverändert, da sie bereits auf die innenliegenden Komponenten abgestimmt sind. Lediglich die Wandstärken werden entsprechend angepasst.

Zur Ermittlung der erforderlichen Wandstärke ist zunächst ein geeignetes Material auszuwählen. Typische Werkstoffe für Druckgehäuse in der Meeresforschung sind Edelstahl, Aluminium und Titan [27]. Für Aluminium wird die Legierung EN AW-5083 [16], für Edelstahl V4A (1.4404) [28] und für Titan Ti-6Al-4V [29] herangezogen, da diese Werkstoffe sowohl über gute mechanische Kennwerte verfügen als auch eine hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber Meerwasser aufweisen. Für diese drei Materialien sowie für das bereits eingesetzte POM wird im Folgenden die jeweils erforderliche Wandstärke zur Erfüllung der Druckanforderung für beide Gehäuse berechnet. Auch hier wird ein Sicherheitsfaktor von $S = 1,65$ festgelegt. Die Streckgrenzen der ausgewählten Werkstoffe betragen $R_{e,\text{POM}} = 67$ MPa, $R_{e,\text{Alu}} = 125$ MPa, $R_{e,\text{Edelst}} = 210$ MPa und $R_{e,\text{Tit}} = 830$ MPa.

Um den Platzbedarf direkt einschätzen zu können, wird im Folgenden von Radius auf Durchmesser umgerechnet. Durch Umstellen von Gl. (16) nach r_a , eine Umrechnung von Radius auf Durchmesser und unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors nach Gl. (9) erhalten wir für die Berechnung nach der SH folgenden Ausdruck:

$$d_a = d_i \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_e}{S}}{\frac{R_e}{S} - 2(p_{a,\max} - p_i)}} \quad (17)$$

Für POM und Aluminium ergeben sich keine zulässigen Werte. Das liegt daran, dass bei einem zu kleinen Wert für R_e der Nenner negativ ist und es dadurch zu keinem reellen Wert kommt. Das bedeutet, dass selbst bei theoretisch beliebig großem Außendurchmesser die geforderte Sicherheit bei einer Druckbelastung von 600 bar nicht erfüllt wird.

Für Edelstahl ergibt sich ein Mindestaußendurchmesser von 206,3 mm für das Sensorgehäuse und 165,1 mm für das Mikrocontrollergehäuse. Diese Abmessungen würden den im Wissenschaftsmodul vorgesehenen Platz deutlich überschreiten, weshalb Edelstahl ebenfalls ausscheidet.

Für Titan ergeben sich Mindestaußendurchmesser von 57,3 mm für das Sensorgehäuse und 45,8 mm für das Mikrocontrollergehäuse und liegen damit unter den Außendurchmessern der derzeitigen Druckgehäuse aus POM. Titan ist damit der einzige Werkstoff, der für die 600-bar-Druckgehäuse in Betracht kommt.

Die Konstruktionsentwürfe der 600-bar-Druckgehäuse aus Titan sind in den Abb. 22 und 23 dargestellt. Die zugehörigen technischen Zeichnungen der Zylinder und Deckel befinden sich im Anhang (siehe Abb. C.8 - C.12). Um ausreichend Material für die Gewindebohrungen zur Befestigung der Deckel vorzusehen, wurden die Wandstärken leicht erhöht. Diese Anpassung ist jedoch aufgrund des verhältnismäßig geringen zusätzlichen Materialaufwands und des im Vergleich zu den bisherigen Druckgehäusen dennoch geringeren Platzbedarfs aus technischer Sicht vertretbar.

Ähnlich wie bei den Testgehäusen zeigten die 600-bar-Druckgehäuse in der FEM-Simulationen, dass die maximalen Spannungen eindeutig am Zylinder auftreten und nicht in den Deckeln bzw. im Gehäuseboden. Dies liegt daran, dass diese Bauteile aufgrund ihrer Funktion automatisch eine höhere Wandstärke aufweisen: Die Deckel des Sensorgehäuses müssen die Sensorköpfe aufnehmen, und der Deckel sowie der Gehäuseboden des Mikrocontrollergehäuses sind für die Aufnahme der Einbaustecker ausgelegt.

Da die maximalen Spannungen somit eindeutig nicht in den Deckeln oder im Gehäuseboden liegen, wurden diese als strukturelle Schwachstellen ausgeschlossen und in der Dimensionierung der 600-bar-Druckgehäuse nicht weiter berücksichtigt.

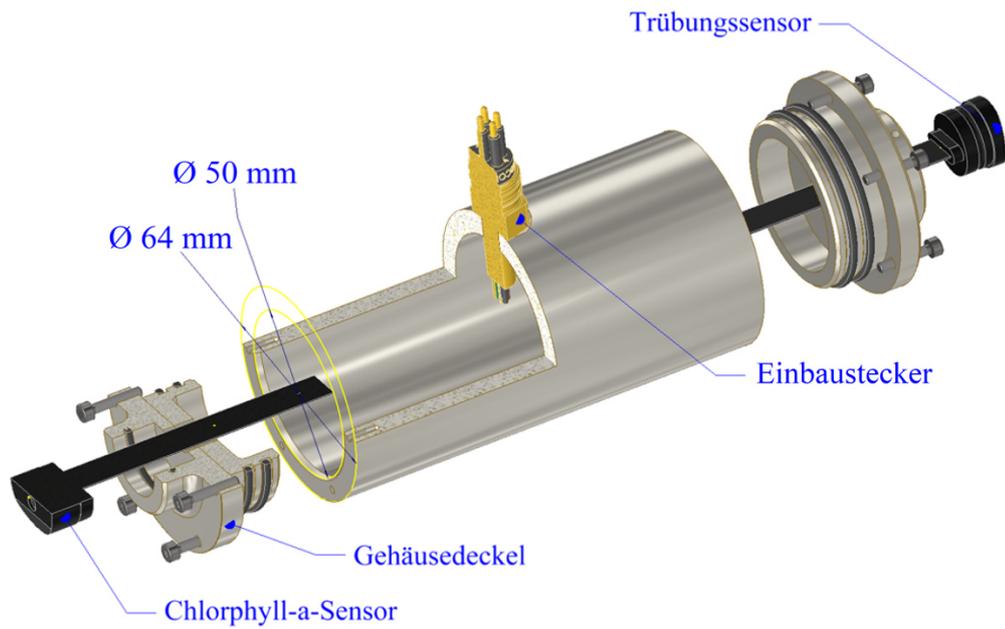


Abbildung 22: Entwurf der 600-bar-Version des Sensorgehäuses

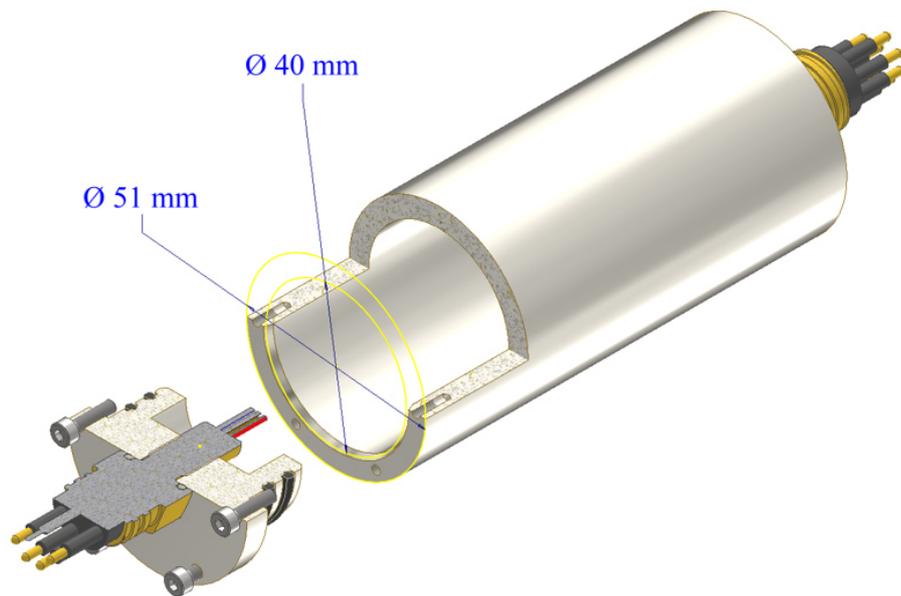


Abbildung 23: Entwurf der 600-bar-Version des Mikrocontrollergehäuses

6 Gerätehalterungen

Um die Sensoren und die Gehäuse im Wissenschaftsmodul sicher befestigen und positionieren zu können, werden speziell angepasste Halterungen benötigt. Als bevorzugtes Material kommt Kunststoff zum Einsatz, da es bei Kontakt unterschiedlicher Metalle im Wasser zur Bildung galvanischer Elemente kommt. Dabei fungiert das unedlere Metall als Anode und korrodiert deutlich schneller. Ein Beispiel hierfür ist die CTD, bei der das Titan-Gehäuse mit einer Metallschelle an einer Verbindungsstange aus Aluminium befestigt wird. Aufgrund des elektrochemischen Potentials der beiden Metalle würde diese Konstellation im Wasser zwangsläufig zu einer beschleunigten Korrosion führen. Durch die Verwendung von Kunststoff lässt sich dieses Risiko vermeiden, da galvanische Verbindungen unterbunden werden und somit die Korrosion minimiert wird. Darüber hinaus bieten Kunststoffhalterungen den Vorteil, dass sie deutlich leichter sind. Die Gesamtlast der Schmelzsonde liegt bereits nahe der Höchstgrenze des Windensystems, weshalb im Rahmen des Projekts die Vorgabe besteht, alle Module der Schmelzsonde möglichst gewichtsoptimiert zu gestalten. Ein weiterer Vorteil von Kunststoffhalterungen ist der geringere Fertigungsaufwand im Vergleich zu Metallhalterungen, die zusätzlich Schweißarbeiten erfordern würden. 3D-gedruckte Gerätehalterungen können flexibel und schnell konstruiert und präzise an die Maße des Wissenschaftsmoduls angepasst werden.

Wie in Kap. 2.2 erwähnt, traten bei dem Demonstrator Probleme bezüglich der Gerätehalterungen auf. Nach einem kurzen Test in Salzwasser in einer Tiefe von etwa 20 m, zeigten diese eine klare Verschlechterung ihrer mechanischen Eigenschaften und brachen bereits bei geringer Krafteinwirkung. Um dieses Problem in der finalen Version des Wissenschaftsmoduls zu vermeiden, wurden verschiedene 3D-druckbare Kunststoffe untersucht. Dabei wurden zwei Gruppen von Proben gedruckt, wobei eine Gruppe in einem mit Salzwasser gefüllten Drucktank ausgelagert wurde und die andere als unbehandelte Referenz diente. Anschließend erfolgten die in Kap. 4.2 beschriebenen mechanische Werkstoffprüfungen aller Proben, um ihre mechanischen Eigenschaften und vor allem ihre Beständigkeit gegenüber Salzwasser und hydrostatischem Druck zu bewerten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen, die daraus resultierende Materialauswahl und die Konstruktion der finalen Gerätehalterungen werden im Folgenden vorgestellt.

6.1 Vorauswahl von Kunststoffen für mechanische Werkstoffprüfungen

Untersucht werden die Materialien kohlefaserverstärktes Polylactid (PLA-CF [30]), kohlefaserverstärktes Polyethylenterephthalat (PETG-CF [31]) sowie Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS [32]). Diese im 3D-Druck etablierten Kunststoffe zeichnen sich durch hohe Festigkeit, Schlagzähigkeit und ein hohes E-Modul aus.

Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich die genannten Materialien besonders gut für mechanisch beanspruchte Bauteile wie Gerätehalterungen. Die hohe Festigkeit sorgt dafür, dass die Halterungen auch unter hoher Belastung strukturell stabil bleiben. Die gute Schlagzähigkeit erhöht die Widerstandsfähigkeit gegenüber stoßartigen Beanspruchungen, wie sie etwa beim Transport oder während eines Einsatzes auftreten können. Das hohe E-Modul, also die hohe Steifigkeit, gewährleistet, dass die Bauteile ihre Form beibehalten und nicht nachgeben, was für die exakte Positionierung der Sensoren und Gehäuse im Wissenschaftsmodul entscheidend ist.

6.2 Fertigung der Proben und Auslagerung

Zur Vorbereitung der Analyse der mechanischen Eigenschaften wurden für jedes Prüfverfahren Proben mit dem 3D-Drucker BambuLab X1 Carbon [33] der BambuLab GmbH gefertigt. Details zu den verwendeten Druckeinstellungen finden sich in Abb. F.2 im Anhang. Die Proben für den Zugversuch wurden gemäß der DIN EN ISO 527-2 gefertigt. Die entworfene Probe ist eine Flachzugprobe vom Typ 1A mit einem rechteckigen Prüfquerschnitt von $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ und sogenannten Köpfen zur Einspannung in die Zugprüfmaschine. Die Proben für den Biegeversuch wurden gemäß der DIN EN ISO 178 gefertigt. Für den Biegeversuch wird der mittlere Bereich der Zugprobe verwendet. Die entworfenen Proben besitzen somit ebenfalls einen rechteckigen Prüfquerschnitt von $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ mit einer Länge von 130 mm . Die Proben für den Kerbschlagbiegeversuch wurden gemäß der DIN EN ISO 179-1 gedruckt. Die entworfenen Proben besitzen somit ebenfalls einen rechteckigen Prüfquerschnitt von $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ mit einer Länge von 80 mm .

Zur Untersuchung des Einflusses von Salzwasser und hydrostatischem Druck wurden für jedes der drei Prüfverfahren und für jedes Material Proben zur Auslagerung sowie nicht auszulagernde Referenzproben hergestellt. Um den Effekt des Infills auf das Materialverhalten zu analysieren, wurden jeweils Ausführungen mit einem Infill von 50 % und 100 % gefertigt. Das Infill beschreibt den Füllgrad, also wie viel des inneren Volumens des Drucks mit Material gefüllt ist. Untersucht wurde, inwieweit sich das Infill auf die mechanischen

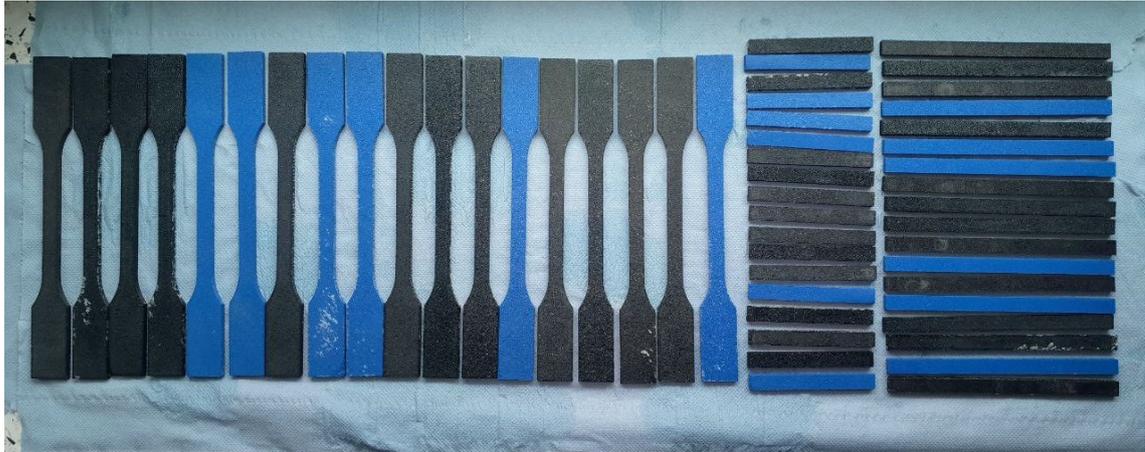


Abbildung 24: Proben für Zugversuch (links), Kerbschlagbiegeversuch (Mitte) und 3-Punkt-Biegeversuch (rechts) drei Tage nach der Auslagerung im Drucktank

Eigenschaften auswirkt und ob bereits bei einem reduzierten Infill von 50 % mechanische Eigenschaften erzielt werden können, die mit denen eines 100 %-Infills vergleichbar sind. Dies würde ermöglichen, sowohl Material als auch Fertigungszeit einzusparen. Zur Minimierung von Messunsicherheiten und Erstellung von aussagekräftigen Mittelwerten wurden von jeder Probenvariante jeweils drei identische Proben hergestellt.

Die Proben für die Auslagerung wurden in einem Drucktank bei einem hydrostatischen Druck von 300 bar in Salzwasser gelagert. Die Wassertemperatur betrug 15°C bei einem Salzgehalt von 33 PSU (practical salinity units), was in etwa den mittleren ozeanografischen Bedingungen entspricht. Um der vorgegebenen maximalen Druckfestigkeit des Wissenschaftsmoduls gerecht zu werden, wäre ein Prüfdruck von 600 bar ideal gewesen. Da der verfügbare Drucktank jedoch lediglich bis 300 bar zertifiziert ist, wurde dieser Wert als Versuchsgrenze festgelegt. Nach sechs Tagen im Drucktank wurden die Proben herausgeholt, mit einem Papier oberflächlich abgetrocknet und drei Tage lang bei Raumtemperatur getrocknet.

6.3 Zugversuch

Der Zugversuch diente der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Proben unter Zugbeanspruchung. Die Durchführung und die Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

6.3.1 Durchführung

Die Zugversuche werden an der Universalprüfmaschine Zwick 1485 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG durchgeführt [34]. Nach dem Vermessen des Prüfquerschnitts und der

Eingabe der Maße in das Programm der Prüfmaschine wird die Probe zwischen die Spannbacken gespannt und auf Zug belastet (siehe Abb. 25). Der Versuch endet automatisch, sobald die Probe bricht, ein Spannungsabfall von 80% auftritt oder eine Dehnung von 15% erreicht wird. Während des Versuchs werden der Verfahrweg und die Prüfkraft kontinuierlich aufgezeichnet. Auf Grundlage dieser Daten und des eingegebenen Probenquerschnitts erzeugt das System ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm und berechnet die entsprechenden Werkstoffkennwerte.

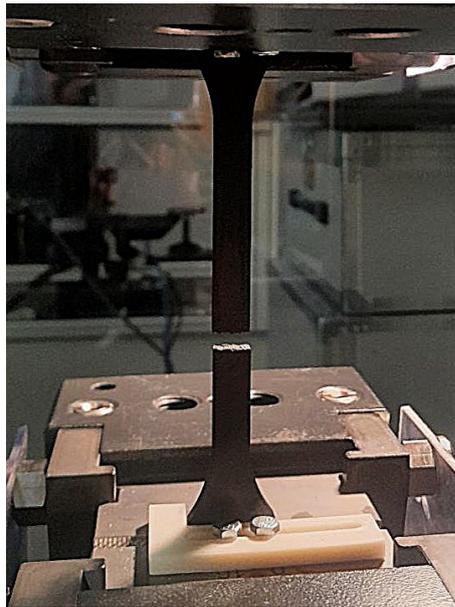


Abbildung 25: Bruchbild einer ABS-Probe nach dem Zugversuch

6.3.2 Relevante Kennwerte

Die Kennwerte, die in diesem Versuch entscheidend sind, sind die Zugfestigkeit und der E-Modul. Zur Bestimmung der Festigkeit bis zur plastischen Verformung des Materials wäre idealerweise die Streckgrenze zu bestimmen bzw. bei Werkstoffen ohne ausgeprägte Streckgrenze die Dehngrenze, wie es bei den 3D-gedruckten Proben der Fall ist. In der vorliegenden Versuchsreihe wurde die Dehnung jedoch ausschließlich über den Verfahrweg der Prüfmaschine bestimmt. Dadurch können zusätzliche Verformungen, etwa durch Klemmungsspiel oder Maschinennachgiebigkeit, die Messung beeinflussen und zu einer tendenziell höheren Dehnung führen, als tatsächlich an der Probe auftritt. Da die Dehnung zur Ermittlung der Dehngrenze benötigt wird, würde deren Genauigkeit dadurch beeinträchtigt werden. Für eine höhere Messgenauigkeit wäre der Einsatz eines mechanischen oder optischen Extensometers erforderlich, das die Dehnung direkt an der Probe erfasst. Aufgrund des damit verbundenen Aufwands wurde in dieser Versuchsreihe darauf verzichtet. Als Er-

satz zur Dehngrenze wird in diesem Versuch daher die Zugfestigkeit als Ersatzkennwert herangezogen, dessen Berechnung nur von der maximalen Zugkraft und dem Probenquerschnitt abhängt. Sie steht in der Regel in einem proportionalen Verhältnis zur Dehngrenze und erlaubt somit einen aussagekräftigen Vergleich der Festigkeitseigenschaften der untersuchten Materialien [35].

Auch Herstellerangaben von 3D-Druckbaren Kunststoffen beziehen sich bei Festigkeitsangaben meist auf die Zugfestigkeit [30, 31, 32], da diese erfahrungsgemäß reproduzierbarer und vergleichbarer sind als die Streck- bzw. Dehngrenze ist.

Der zweite zentrale Kennwert, der in diesem Versuch bestimmt wird, ist der E-Modul, der Rückschlüsse auf die Steifigkeit der untersuchten Kunststoffe ermöglicht. Die oben beschriebene ungenaue Dehnungsmessung wirkt sich allerdings auch auf diesen Kennwert aus. Eine systematisch überschätzte Dehnung führt rechnerisch zu einem zu niedrigen E-Modul. Trotz der beschriebenen systematischen Messabweichung ist ein Vergleich innerhalb dieser Versuchsreihe zulässig, da alle Proben unter identischen Versuchsbedingungen geprüft wurden. Die dadurch entstehenden relativen Unterschiede zwischen den Materialien bleiben aussagekräftig und ermöglichen im Rahmen dieser Untersuchung einen zuverlässigen Vergleich.

6.3.3 Ergebnisse

Abb. 26 zeigt das Spannungs-Dehnungsverhalten der untersuchten Kunststoffe in Abhängigkeit vom Infill (50 % bzw. 100 %) sowohl im Referenzzustand als auch nach der Auslagerung. Der Einfluss des Infills auf die mechanischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Proben ist deutlich erkennbar. Eine erste Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass die Proben mit 50 % Infill hinsichtlich Zugfestigkeit und E-Modul weniger als die Hälfte der Werte der vergleichbaren 100 %-Infill-Proben erreichen. Eine tabellarische Gegenüberstellung der Mittelwerte und der jeweiligen Standardabweichungen für Zugfestigkeit und E-Modul befindet sich in Tab. B.1 im Anhang. Dies ist bei allen getesteten Werkstoffen und unabhängig vom Auslagerungszustand zu beobachten. Ein möglicher Erklärungsansatz für die deutlich höheren Kennwerte des 100 %-Infill-Drucks gegenüber dem 50 %-Infill-Drucks ist, dass bei einem Infill von 100 % die Drucklinien in der horizontalen Ebene dicht aneinander liegen bzw. sich überlappen (siehe Abb. F.3), was zu einer deutlich größeren Anzahl an Kontakt- und Haftflächen zwischen den einzelnen Bahnen führt.

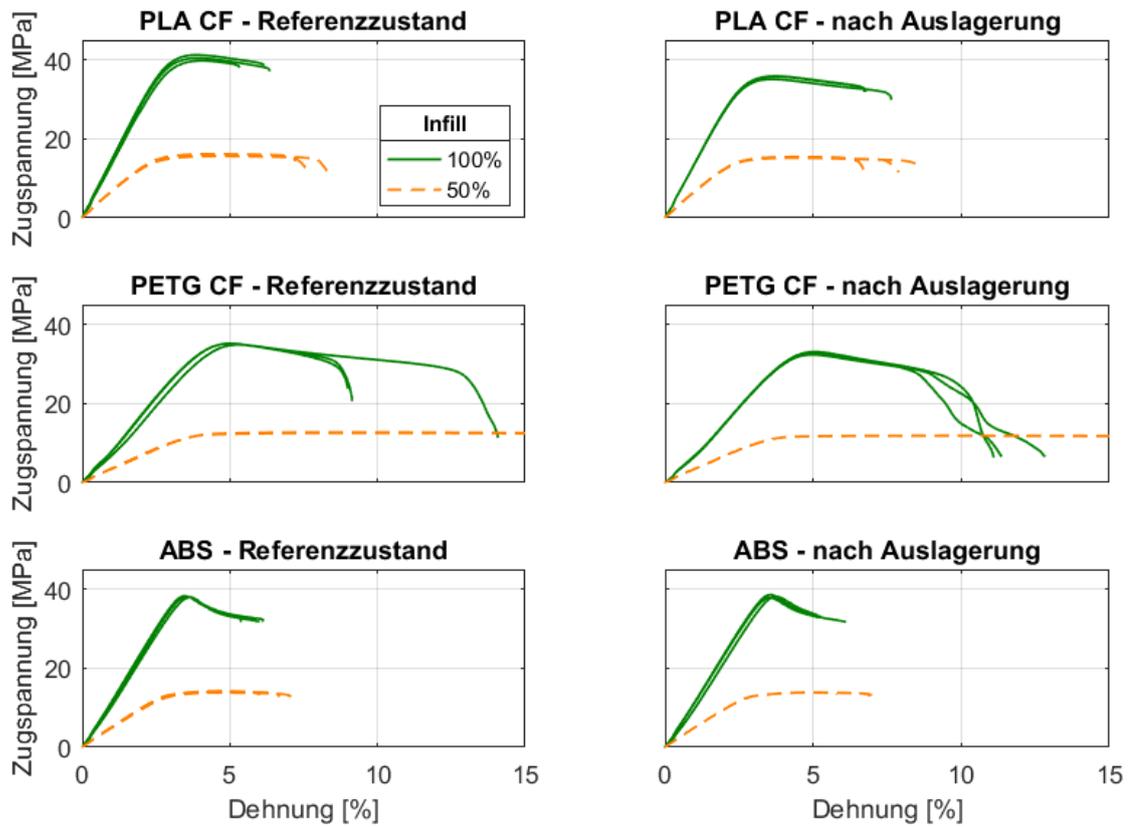


Abbildung 26: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugversuche der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 50 % und 100 % Infill

In der Folge entstehen insgesamt homogenere und stabilere Strukturen, die zu deutlich höheren Kennwerten führen. Die deutlich besseren mechanischen Eigenschaften eines 100%-Infills rechtfertigen den Mehraufwand an Material und Druckzeit. Entsprechend werden die 50%-Infill-Proben in der folgenden Analyse nicht weiter betrachtet.

Der Vergleich zwischen den Proben mit 100 % Infill im Referenzzustand und nach der Auslagerung zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Kunststoffe (siehe Abb.27 und Tab. 3).

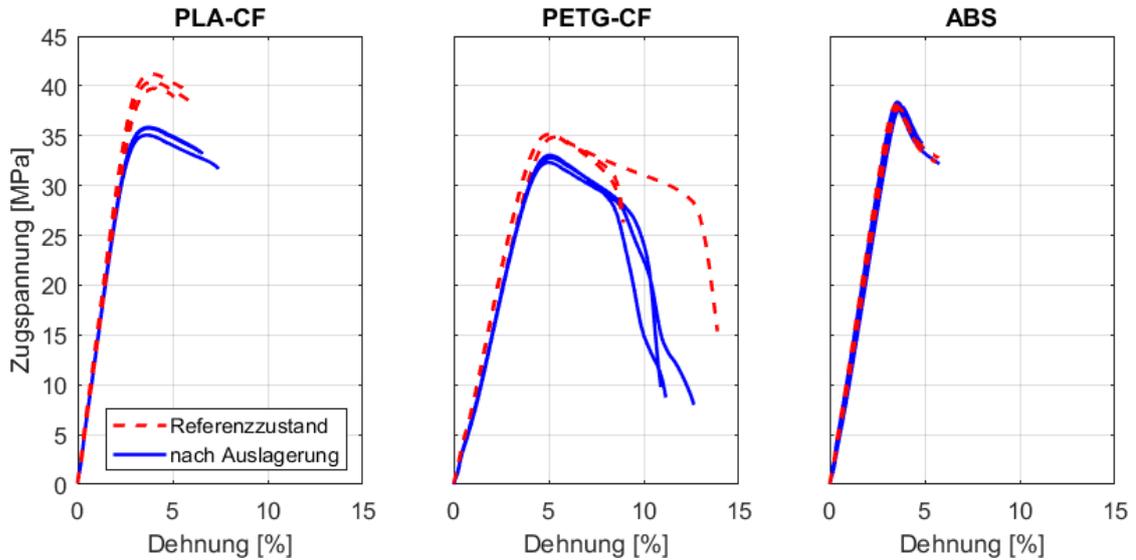


Abbildung 27: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Zugversuche der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 100% Infill

	PLA-CF	PETG-CF	ABS
<i>Referenzzustand</i>			
R_m [MPa]	$40,5 \pm 0,7$	$35,1 \pm 0,2$	$38,1 \pm 0,2$
E [MPa]	1230 ± 76	667 ± 71	943 ± 77
<i>nach Auslagerung</i>			
R_m [MPa]	$35,6 \pm 0,4$	$32,8 \pm 0,4$	$38,2 \pm 0,4$
E [MPa]	1167 ± 12	559 ± 14	882 ± 125
<i>relative Änderung</i>			
ΔR_m [%]	$-12,0 \pm 2,1$	$-6,6 \pm 1,2$	$+0,2 \pm 1,2$
ΔE [%]	$-5 \pm 6,1$	-16 ± 11	-7 ± 16

Tabelle 3: Zugfestigkeit R_m und E-Modul E der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 100% Infill sowie der jeweiligen relativen Änderung (Mittelwerte \pm Standardabweichung)

Im Referenzzustand weist PLA-CF die höchste Zugfestigkeit sowie den höchsten E-Modul auf. PETG-CF zeigt die geringsten Werte auf, während die Werte von ABS zwischen denen von PLA-CF und PETG-CF liegen. Nach der Auslagerung zeigt PLA-CF einen deutlichen Rückgang der Zugfestigkeit im Vergleich zu den Referenzproben, wobei die Zugfestigkeit sogar unter den Wert von ABS fällt. Bei PETG-CF ist ebenfalls eine leichte Abnahme der Zugfestigkeit festzustellen. Im Gegensatz dazu zeigt ABS nahezu keine messbaren Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften infolge der Auslagerung. Bei den ausgelagerten Proben lässt sich die Tendenz erkennen, dass bei allen Materialien die Steifigkeit abnimmt. Wie Tab. 3 zeigt, streuen die Werte des E-Moduls jedoch sehr stark, was als Ursache die zuvor beschriebene ungenaue Dehnungsmessung haben könnte. Aufgrund dieser hohen

Standardabweichungen sind die resultierenden relativen Änderungen nur eingeschränkt zu interpretieren und miteinander zu vergleichen. Ein zuverlässiger Vergleich der Materialien ist daher nur auf Grundlage der absoluten Werte möglich. PLA-CF weist auch nach der Auslagerung das höchste E-Modul auf, gefolgt mit deutlichem Abstand von ABS und PETG-CF.

6.4 3-Punkt-Biegeversuch

Der 3-Punkt-Biegeversuch diente der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der 3D-gedruckten Proben unter Biegebeanspruchung. Die Durchführung und die Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

6.4.1 Durchführung

Die 3-Punkt-Biegeversuche wurden ebenfalls an der Universalprüfmaschine Zwick 1485 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG durchgeführt [34]. Nach dem Vermessen des Prüfungsquerschnitts und der Eingabe der Maße in das Programm der Prüfmaschine wurde die Probe auf zwei Backen gelegt und anschließend mit einer Finne mittig belastet (siehe Abb. 28). Nach einer Dehnung von 10 % wurde der Versuch beendet und der Prüfstempel fuhr in seine Ausgangsposition zurück.

Analog zum Zugversuch, bei dem die Zugfestigkeit und das Elastizitätsmodul betrachtet wurden, wurden im Biegeversuch die Biegefestigkeit und das Biegemodul untersucht.

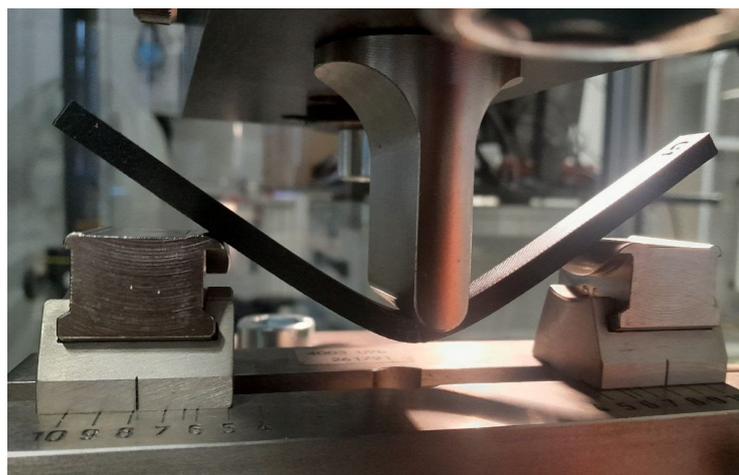


Abbildung 28: PETG-CF-Probe im 3-Punkt-Biegeversuch

6.4.2 Ergebnisse

Ähnlich den Ergebnissen des Zugversuchs zeigt der Vergleich der Proben mit unterschiedlichem Infill, dass die Proben mit 100 % Infill etwa doppelt so hohe Werte für Biegefestigkeit und Biegemodul aufweisen wie die Proben mit 50 % Infill (siehe Tab. B.2 im Anhang). Aufgrund dieser deutlichen Unterschiede werden auch bei diesem Versuch im Folgenden ausschließlich Proben mit 100 % Infill genauer betrachtet.

Abb. 29 und Tab. 4 zeigen den Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Kunststoffe:

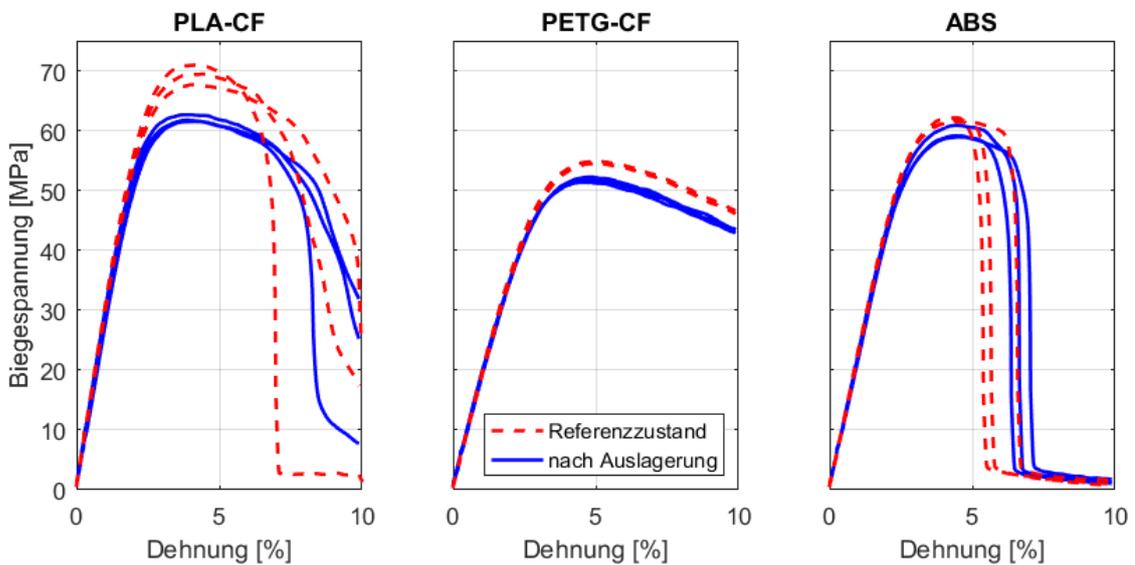


Abbildung 29: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der 3-Punkt-Biegeversuche der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 100 % Infill

	PLA-CF	PETG-CF	ABS
<i>Referenzzustand</i>			
σ_b [MPa]	$69,7 \pm 1,7$	$55,0 \pm 0,1$	$62,1 \pm 0,4$
E_b [MPa]	2860 ± 66	1827 ± 32	2113 ± 80
<i>nach Auslagerung</i>			
σ_b [MPa]	$62,3 \pm 0,6$	$52,1 \pm 0,5$	$59,9 \pm 1,1$
E_b [MPa]	2800 ± 157	1883 ± 35	2127 ± 51
<i>relative Änderung</i>			
$\Delta\sigma_b$ [%]	$-10,6 \pm 2,6$	$-5,2 \pm 0,9$	$-3,5 \pm 1,9$
ΔE_b [%]	$-2,1 \pm 6,1$	$+3,1 \pm 2,6$	$+0,6 \pm 4,5$

Tabelle 4: Biegefestigkeit σ_b und Biegemodul E_b der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 100 % Infill sowie der jeweiligen relativen Änderung (Mittelwerte \pm Standardabweichung)

Im Referenzzustand weist PLA-CF sowohl die höchste Biegefestigkeit als auch das höchste Biegemodul auf. PETG-CF zeigt die geringsten mechanischen Eigenschaften, während die Werte von ABS zwischen denen der beiden anderen Materialien liegen. Nach der Auslagerung ist bei allen Materialien ein Rückgang der Biegefestigkeit zu beobachten. Der stärkste Abfall tritt bei PLA-CF auf, während dieser bei PETG-CF und ABS deutlich geringer ist. Die Reihenfolge der Biegefestigkeitswerte bleibt dabei erhalten, wobei die Werte von PLA-CF nach der Auslagerung nur noch geringfügig über denen von ABS liegen. Der Einfluss der Auslagerung auf das Biegemodul ist ähnlich wie beim Zugversuch aufgrund der vergleichsweise hohen Standardabweichungen allerdings nur eingeschränkt zu interpretieren. Insgesamt bleibt PLA-CF auch nach der Auslagerung das Material mit der höchsten Steifigkeit, gefolgt von ABS und PETG-CF.

6.5 Kerbschlagbiegeversuch

Der Kerbschlagbiegeversuch diente der Ermittlung der Schlagzähigkeit der 3D-gedruckten Proben, also ihrer Widerstandsfähigkeit gegenüber schlagartiger mechanischer Belastung. Die Durchführung sowie die Auswertung der Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

6.5.1 Durchführung

Die Kerbschlagbiegeversuche wurden an einer Kerbschlagbiegemaschine für Kunststoffe der Firma Zwick durchgeführt (siehe Abb. 30).



Abbildung 30: Versuchsaufbau des Kerbschlagbiegeversuchs mit eingelegter ABS-Probe

Zunächst wurde der Probenquerschnitt vermessen und dokumentiert. Anschließend wurde die Probe zwischen zwei Widerlagern positioniert und anschließend mit einem Pendelhammer durchgeschlagen. Der verwendete Pendelhammer hatte eine definierte potenzielle Energie von 4 J, die sich aus Gewicht und Startposition ergab. Eine digitale Anzeige ermittelte die prozentuale Differenz zwischen Start- und Endhöhe, woraus bezogen auf die potenzielle Energie die Kerbschlagarbeit berechnet wurde (siehe Gl.(14)). Auf Grundlage der bestimmten Kerbschlagarbeit und des zuvor vermessenen Probenquerschnitts wurde gemäß Gl.(15) die Kerbschlagzähigkeit berechnet.

6.5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kerbschlagversuche weisen auch hier deutliche Unterschiede bezüglich der mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit vom Infill auf (siehe Abb. 31). Mit höherem Infill steigt die Schlagzähigkeit bei ABS auf ungefähr das Doppelte, bei PLA-CF und PETG-CF auf etwa das Dreifache. Daher werden auch in diesem Versuch die Ergebnisse der Proben mit 50 % Infill in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt.

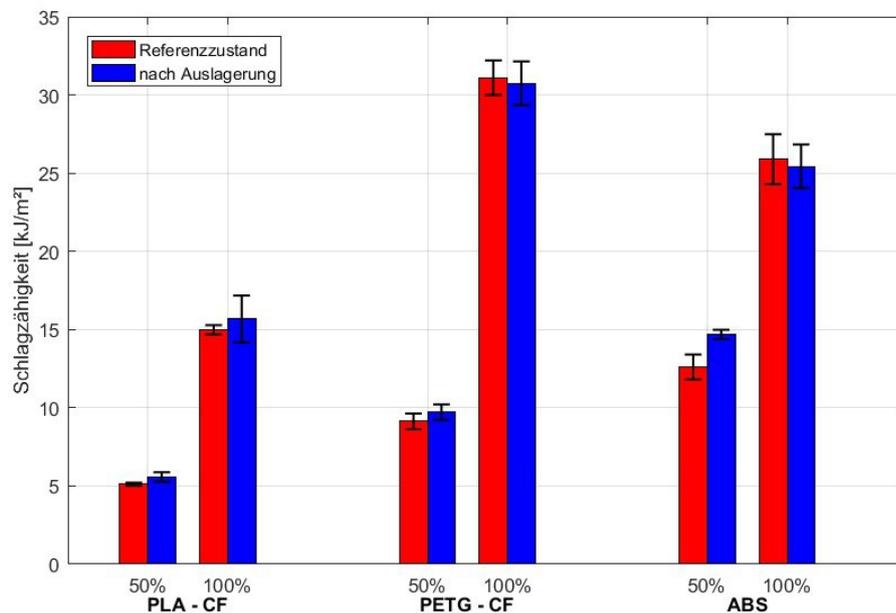


Abbildung 31: Ergebnisse des Kerbschlagbiegeversuch der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 50 % und 100 % Infill

Tab. 5 stellt die Schlagzähigkeitswerte der untersuchten Kunststoffe in den verschiedenen Zuständen gegenüber. PETG-CF weist dabei die höchsten Werte auf und zeigt somit die beste Schlagzähigkeit. ABS erreicht etwas niedrigere Werte, während PLA-CF deutlich

geringere Schlagzähigkeit aufweist und damit deutlich spröder ist. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass bei den untersuchten Kunststoffen mit 100 % Infill durch die Auslagerung im Drucktank keine signifikante Veränderung der Zähigkeitseigenschaften festgestellt werden konnte, da die beobachteten Unterschiede innerhalb der jeweiligen Standardabweichungen liegen.

	PLA-CF	PETG-CF	ABS
<i>Referenzzustand</i>			
α_K [KJ/m ²]	15,0 ± 0,3	31,1 ± 1,1	25,9 ± 1,6
<i>nach Auslagerung</i>			
α_K [KJ/m ²]	15,7 ± 1,5	30,7 ± 1,4	25,4 ± 1,0
<i>relative Änderung</i>			
$\Delta\alpha_K$ [%]	5 ± 10	-1,2 ± 5,8	-1,8 ± 7,3

Tabelle 5: Schlagzähigkeit α_K von PLA-CF, PETG-CF und ABS im Referenzzustand und nach Auslagerung mit Angabe der relativen Änderungen (Mittelwerte ± Standardabweichung)

6.6 Auswertung

Das Ziel der Untersuchung bestand darin, einen 3D-druckbaren Kunststoff für die Fertigung von Gerätehalterungen zu finden, der sich zudem für die möglichen Einsatzgebiete der Schmelzsonde eignet. Um eine mechanische Stabilität zu gewährleisten, muss das Material eine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Gleichzeitig ist eine gewisse Zähigkeit erforderlich, um stoßartigen Belastungen standzuhalten, ohne spröde zu versagen. Dabei ist die Langzeitstabilität der mechanischen Eigenschaften gegenüber Salzwasser und hohem hydrostatischen Druck von entscheidender Bedeutung. Die durchgeführten Versuche liefern eine fundierte Grundlage für die Bewertung der Eignung der untersuchten Kunststoffe.

Die Proben mit 50 % Infill wurden frühzeitig ausgeschlossen, da sie im Vergleich zu den Proben mit 100 % Infill durchweg deutlich schlechtere mechanische Eigenschaften zeigten. Die weitere Untersuchung konzentrierte sich daher ausschließlich auf Proben mit 100 % Infill.

PLA-CF erzielte im Referenzzustand die höchsten Werte in Bezug auf Festigkeit und Steifigkeit, zeigte jedoch nach der Auslagerung einen deutlichen Festigkeitsverlust. Zudem waren die Werte für die Schlagzähigkeit gegenüber den anderen Kunststoffen deutlich geringer. Aufgrund dieser Schwächen ist PLA-CF für Anwendungen in der Tiefsee als ungeeignet zu bewerten, insbesondere wenn mit stoßartigen Belastungen zu rechnen ist. PETG-CF

wies die höchste Schlagzähigkeit sowie eine gute Beständigkeit gegenüber der Auslagerung auf, zeigte jedoch die niedrigsten Festigkeitswerte und eine deutlich geringere Steifigkeit. Damit ist PETG-CF grundsätzlich für Tiefsee-Anwendungen geeignet, für Gerätehalterungen, die eine hohe Steifigkeit erfordern, jedoch nur eingeschränkt verwendbar. ABS zeigte insgesamt gute Werte bei Festigkeit, Steifigkeit und Schlagzähigkeit. Zudem zeigte es die größte Beständigkeit der mechanischen Eigenschaften, da außer einer leichten Abnahme der Biegefestigkeit kaum Auswirkungen durch die Auslagerung zu beobachten waren.

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchung wird ABS als der insgesamt am besten geeignete 3D-druckbare Kunststoff für die Gerätehalterungen des Wissenschaftsmoduls bewertet. Das Material überzeugt durch eine hohe mechanische Belastbarkeit und eine langfristige Stabilität gegenüber Salzwasser und hydrostatischem Druck.

6.7 Entwurf und Fertigstellung

Abb. 32 zeigt ein 3D-Modell aller Gerätehalterungen, die in das Wissenschaftsmodul integriert wurden.

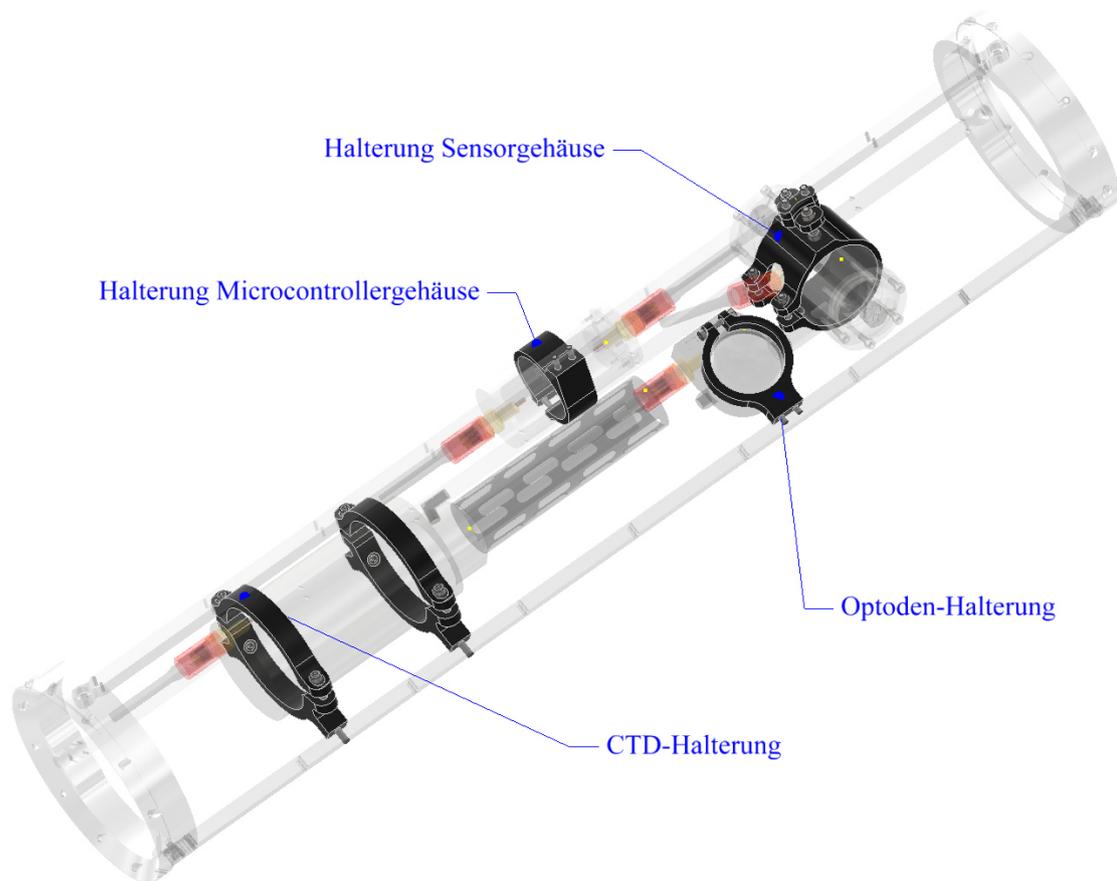


Abbildung 32: Im Wissenschaftsmodul verbaute Gerätehalterungen aus ABS

Diese dienen der Fixierung und Positionierung des Sensorgehäuses, des Mikrocontrollergehäuses, der CTD und der Optode. Die Gerätehalterungen wurden aus ABS gefertigt und mit denselben Druckeinstellungen hergestellt wie die Proben für die mechanischen Werkstoffprüfungen (siehe Abb. F.2 im Anhang).

Mithilfe der CAD-Software Inventor [24] konnten die Halterungen flexibel an den verfügbaren Bauraum angepasst und deren Integration in das Gesamtsystem geprüft werden. Die technischen Zeichnungen der Gerätehalterungen sind unter Abb. C.13 - C.16 im Anhang zu finden. Die für die Fertigung verwendete Slicing-Software der BambuLab GmbH [36] benötigt keine klassischen Fertigungszeichnungen mit Bemaßungen, sondern ausschließlich das 3D-Modell als Grundlage. Die wenigen enthaltenen Maße und Beschriftungen dienen daher lediglich der Veranschaulichung.

Die Halterungen werden mit Zylinderkopfschrauben an den Verbindungsstangen befestigt, in die die entsprechenden Innengewinde gebohrt wurden. Dabei befinden sich die Zylinderkopfschrauben in eingelassenen Senkungen innerhalb der Halterungen.

Die Fixierung der Geräte in den Halterungen erfolgt durch Zylinderkopfschrauben, die mit Sechskantmuttern gekontert werden, wodurch die Geräte sicher eingespannt werden.

Eine Besonderheit stellt die Halterung für das Sensorgehäuse dar (siehe Abb. C.14 im Anhang). Diese ist so konzipiert, dass sich das Sensorgehäuse präzise positionieren lässt. Ein Verdrehen wird durch radial angeordnete Langlöcher im Zwischenstück ermöglicht. Die Verstellung quer zur Längsachse des Wissenschaftsmoduls wird durch das Justieren von Sechskantmuttern ermöglicht, mit denen die Schrauben der Halterung im Zwischenstück fixiert werden.

7 Elektronikeinheit

Für das Sensordatenmanagement wird eine zentrale Elektronikeinheit benötigt. Wie bereits in Kap. 2.2 beschrieben, erfüllte die Elektronikeinheit des Demonstrators zwar die grundlegenden Anforderungen, jedoch gab es einige technische Einschränkungen. Zudem ergaben sich für die finale Version des Wissenschaftsmoduls zusätzliche Anforderungen hinsichtlich Langzeitstabilität und Schnittstellenkompatibilität. Aus diesen Gründen wurde die Elektronikeinheit vollständig überarbeitet und neu aufgebaut. Das folgende Kapitel beschreibt die eingesetzten elektronischen Komponenten sowie deren Aufbau und Anordnung innerhalb der Elektronikeinheit. Zusätzlich wird der entwickelte Programmcode für das Sensordatenmanagement vorgestellt.

7.1 Aufbau und Elektronische Komponenten

Abb. 33 zeigt den Schaltplan der Elektronikeinheit, welche sich vollständig im Mikrocontrollergehäuse befindet.

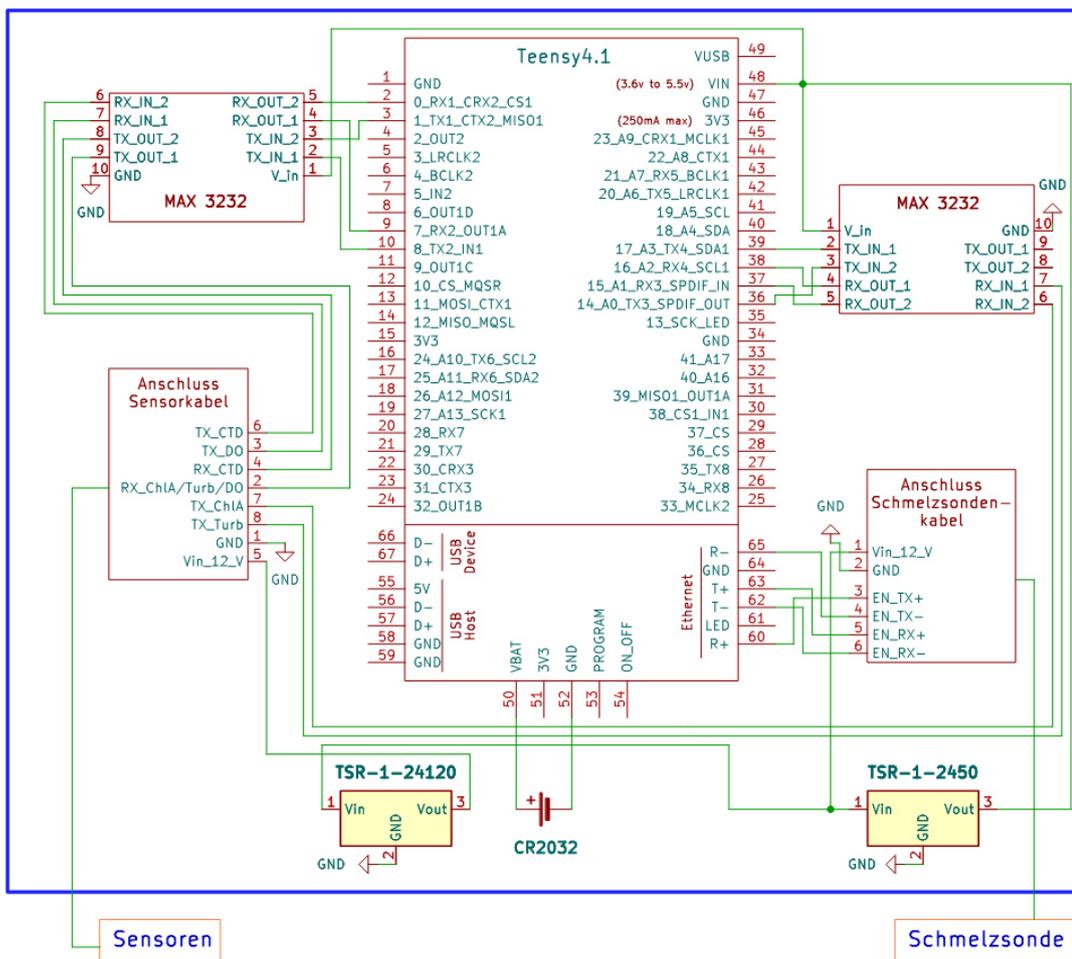


Abbildung 33: Schaltplan der Elektronikeinheit

Zentrale Komponente der Elektronikeinheit ist der Mikrocontroller Teensy 4.1 der Firma PJRC.COM, LLC [37]. Auf diesem läuft der Programmcode für das Sensordatenmanagement. Die Sensordaten werden auf einer SD-Karte gesichert, die sich im integrierten SD-Kartensteckplatz des Mikrocontrollers befindet. Parallel dazu erfolgt die Datenübertragung über eine Ethernetverbindung zur Basisstation. Diese Ethernetverbindung wird über ein extern bereitgestelltes Kabel von dem Gesamtsystem der Schmelzsonde realisiert (siehe Abb. 33 und 34). Über dasselbe Kabel erfolgt zudem die Spannungsversorgung der Elektronikeinheit. Es liegen 24 V an, welche zunächst auf die benötigten Betriebsspannungen transformiert werden. Für die Versorgung des Mikrocontrollers wird ein DC/DC-Wandler vom Typ TSR-1-2450 [38] eingesetzt, der die Eingangsspannung auf 5 V umwandelt. Für die angeschlossenen Sensoren, die eine Versorgungsspannung von 12 V benötigen, kommt ein TSR-1-24120 [39] zum Einsatz. Der Hersteller beider DC/DC-Wandler ist die Traco Electronic AG.

Die Verbindung zu den Sensoren erfolgt über das Sensorkabel, welches bereits für den Demonstrator entwickelt und unverändert übernommen werden konnte. Dieses stellt die Versorgung für die Sensoren bereit und ermöglicht die serielle Kommunikation zwischen Mikrocontroller und Sensoren. Da die Sensoren Daten im RS-232-Format senden (siehe Abb. D.1 - D.3 im Anhang), welches mit den TTL-Pegeln des Mikrocontrollers nicht kompatibel ist, werden zwei Pegelwandler des Typs MAX3232 der Firma ChipQuik Inc. [40] eingesetzt. Diese wandeln die RS-232-Signale in ein 3,3 V-TTL-Pegel für den Mikrocontroller und umgekehrt.

Eine interne Real-Time-Clock (RTC) des Mikrocontrollers stellt sicher, dass die erfassten Sensordaten mit einem korrekten Zeitstempel versehen werden. Vor dem Einsatz des Systems wird der Mikrocontroller einmalig über ein USB-Kabel mit einem Rechner verbunden, um die Uhrzeit der RTC zu setzen und das Programm zu starten. Verfügt der Mikrocontroller über eine konstante Versorgungsspannung, bleibt die Uhrzeiteinstellung erhalten, andernfalls geht sie verloren. Aus diesem Grund wurde in der finalen Version der Elektronikeinheit eine Knopfzelle des Typs CR2032 [41] integriert, die auch bei unterbrochener Spannungsversorgung die RTC weiterhin mit einer Spannung von 3 V versorgt und somit die Uhrzeit aufrechterhält.

Die Kabelverbindung zur Schmelzsonde bzw. zu den Sensoren erfolgt SubConn-Stecker [13]. Dabei wird ein 6-poliger Anschluss für das Schmelzsondenkabel und ein 8-poliger Anschluss für das Sensorkabel verwendet. Beide Kabel werden durch entsprechende druckdichte Ein-

baustecker in das Gehäuseinnere geführt (siehe Abb. 34). Diese Einbaustecker sind in den Gehäusedeckel bzw. die Unterseite des Gehäuses eingeschraubt und verbinden die Kabel mit den Anschlüssen der Elektronikeinheit.

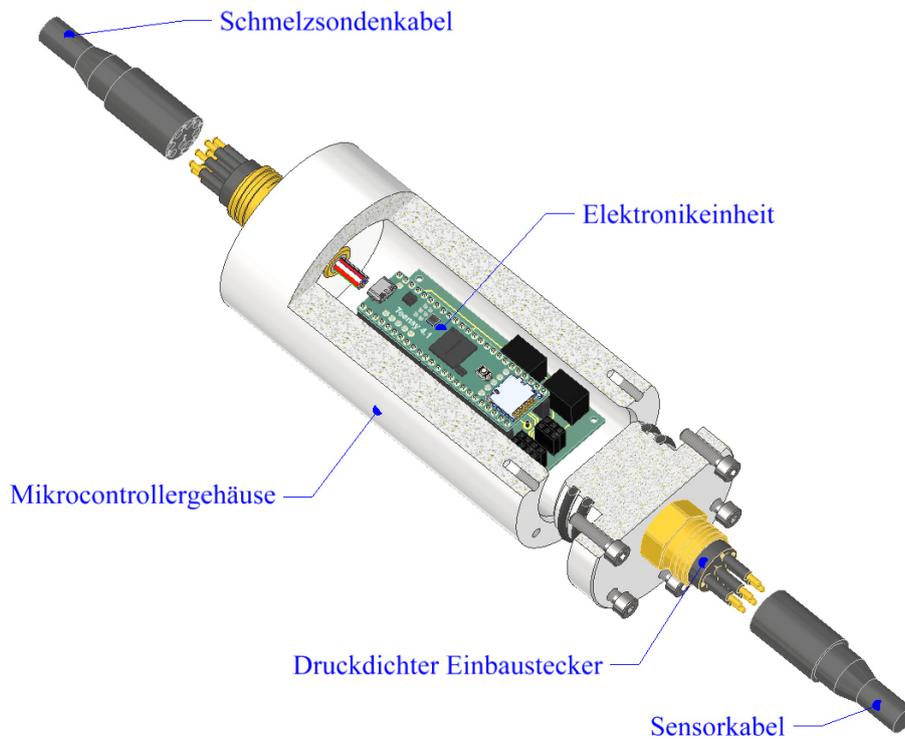


Abbildung 34: Mikrocontrollergehäuse mit eingebauter Elektronikeinheit

Zu Beginn der Entwicklung der Elektronikeinheit waren die einzelnen Komponenten noch lose miteinander verdrahtet. Dieser provisorische Aufbau wurde im weiteren Verlauf durch den Einsatz einer eigens entwickelten Leiterplatte deutlich optimiert (siehe Abb. 35). Dadurch wird das System kompakter und passt so in das Mikrocontrollergehäuse, da auf separate Kabelverbindungen verzichtet werden konnte. Zudem wird es robuster, da die feste Integration der Komponenten auf der Leiterplatte mechanische Belastungen reduziert und Kontaktprobleme minimiert.

Die Leiterplatte (siehe Abb. 35) wurde so konzipiert, dass sie die bisherige Verdrahtung vollständig ersetzt und alle elektronischen Komponenten integriert. Der Mikrocontroller, die DC/DC-Wandler und Buchsenleisten für die Anschlüsse wurden auf der Vorderseite der Leiterplatte gelötet. Für den Mikrocontroller wurden Buchsenleisten vorgesehen, sodass dieser gesteckt und im Bedarfsfall ausgetauscht werden kann. Auf der Rückseite befinden sich die Pegelwandler sowie die Knopfzelle mit Halterung.

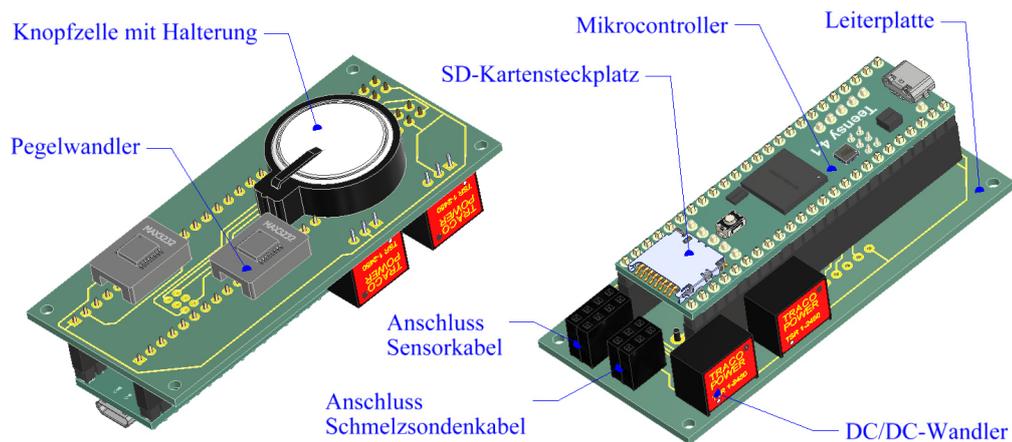


Abbildung 35: Elektronikeinheit auf Leiterplatte in Vorder- und Rückansicht

7.2 Sensordatenmanagement

Das Sensordatenmanagement umfasst die Erfassung, Verarbeitung und Speicherung der Sensordaten auf einer SD-Karte sowie deren Übertragung per Ethernet. Die Programmierung und Übertragung des Codes auf den Mikrocontroller erfolgte mit der Arduino-Entwicklungsumgebung (Arduino IDE, Version 2.3.6) [42]. Abb. 36 zeigt ein Flussdiagramm des entwickelten Programmcodes.

Vor dem Start des Hauptprogramms wird die `setup()`-Funktion durchlaufen. In dieser werden den angeschlossenen Sensoren die jeweiligen seriellen Schnittstellen zugewiesen. Anschließend wird geprüft, ob die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind: Eine eingelegte SD-Karte, eine bestehende Ethernet-Verbindung, eine erfolgreiche Synchronisation der Systemzeit über die RTC sowie die Möglichkeit, die Zielfeile auf der SD-Karte zu öffnen. In die Zielfeile wird zunächst ein einmaliger Header mit Bezeichnungen und Einheiten der Messgrößen geschrieben, der zusätzlich über Ethernet übertragen wird. Rückmeldungen zum Systemstatus erfolgen über den Serial-Port und das Netzwerk.

Alle Sensoren beginnen unmittelbar nach der Spannungsversorgung mit der Übertragung von Messwerten, mit Ausnahme der CTD, die erst nach dem Empfang eines Startbefehls mit den Messungen beginnt. Aus diesem Grund wird dieser Befehl zu Beginn des Programms übermittelt.

Im Hauptprogramm erfolgt die zyklische, sekundliche Abfrage der Sensordaten, deren Zu-

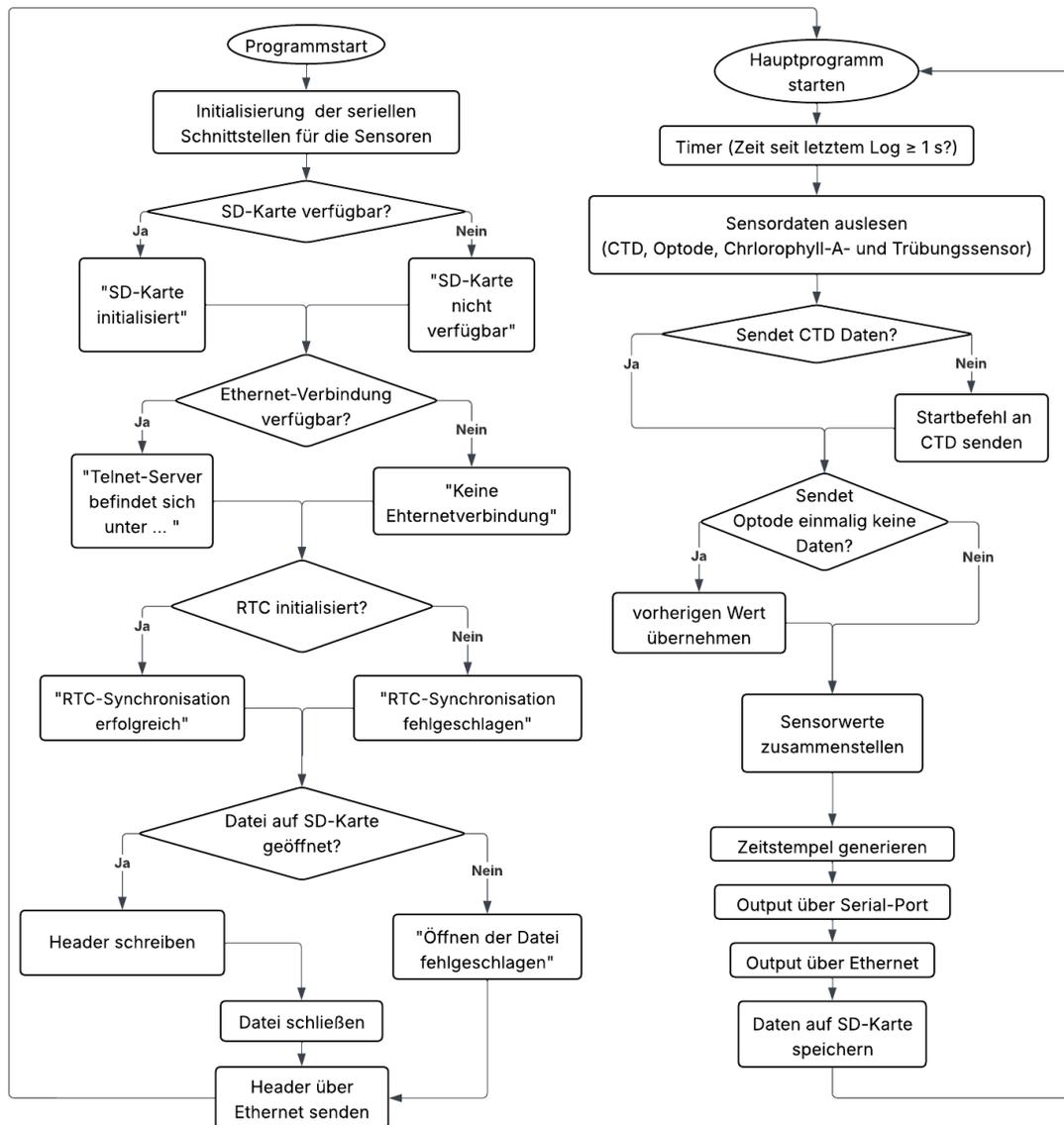


Abbildung 36: Flussdiagramm des Programmcodes zum Sensordatenmanagement

sammenführung mit einem Zeitstempel sowie die Übertragung über den Serial-Port, das Netzwerk und die parallele Speicherung auf der SD-Karte. Zur Kennzeichnung fehlender oder unvollständiger Messdaten werden sogenannte NaN-Werte (Not-a-Number) verwendet. Liefert die CTD keine Daten, wird erneut ein Startbefehl gesendet. Die Optode überträgt mit einer Frequenz von knapp unter 1 Hz, was regelmäßig zu Ausfällen bei der Datenübermittlung führt. In solchen Fällen wird der jeweils letzte gültige Wert übernommen. Erst bei zwei aufeinanderfolgenden Ausfällen werden NaN-Werte eingesetzt. Messtechnisch stellt dies kein Problem dar, da der SBE63-Sensor eine relativ träge Ansprechzeit besitzt (im Datenblatt in Abb. D.2 im Anhang als , 63 % Response: < 6 s bei 20 °C angegeben) und die 1 Hz-Werte somit ohnehin bereits Mittelungen des Sensors selbst sind.

8 Funktionstest des Wissenschaftsmoduls

Für einen ersten Funktionstest wurde das Wissenschaftsmodul vollständig zusammengebaut, wie in Kap. 3 beschrieben. Dazu wurde die die Spannungsversorgung sowie die Datenübertragung eingerichtet und das System anschließend durch einen Einsatz in einem Testbecken auf seine Funktionalität überprüft.

8.1 Versuchsaufbau

Der vollständige Versuchsaufbau ist in Abb. 37 dargestellt. An die Elektronikeinheit wurde an den Anschluss, der für das Schmelzsondenkabel vorgesehen ist, ein Kabel angeschlossen, das so konfiguriert war, wie es im tatsächlichen Einsatz in der Schmelzsonde vorgesehen ist. Über dieses Kabel erfolgten sowohl die 24 V-Spannungsversorgung als auch die Datenübertragung per Ethernet.

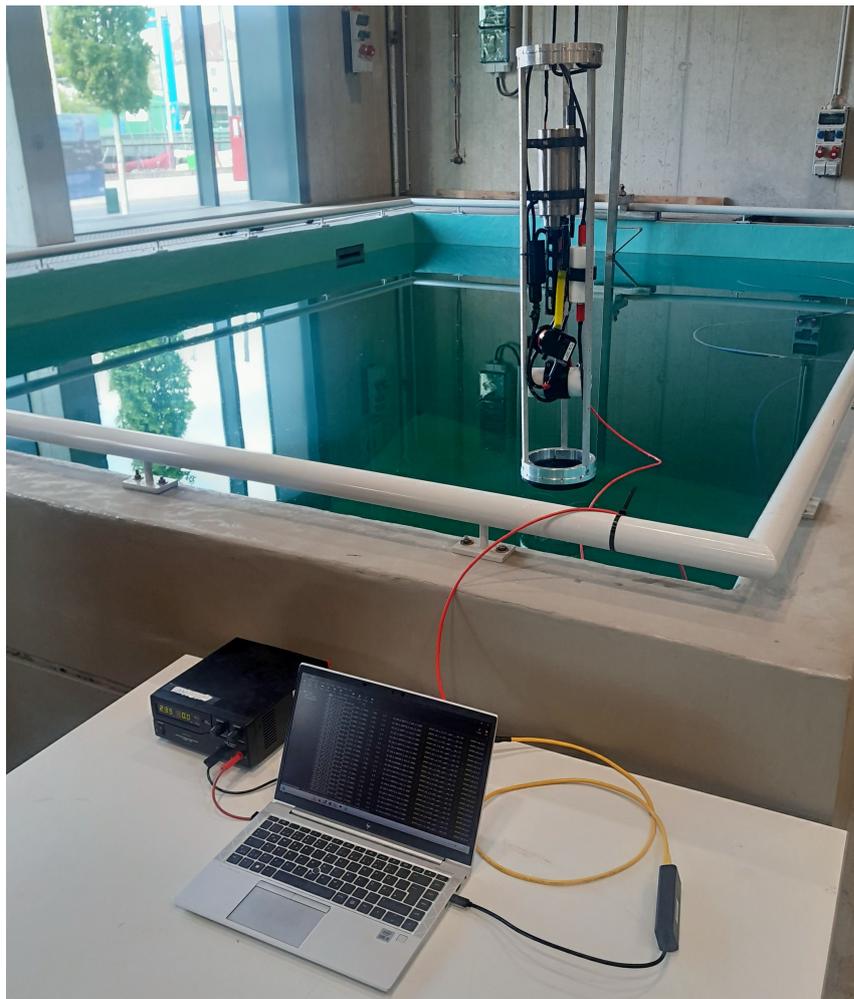


Abbildung 37: Versuchsaufbau des Funktionstests

Die Spannungsversorgung wurde über ein Labornetzgerät bereitgestellt und die Ethernet-Verbindung über einen Laptop eingerichtet. Über diesen sollten die Sensordaten ausgelesen und gespeichert werden. Zusätzlich wurde eine SD-Karte in den Mikrocontroller eingesteckt, um eine lokale Speicherung der Daten zu ermöglichen.

Für den vollständigen Zusammenbau des Wissenschaftsmoduls fehlten bei diesem Test die Seitenwände, da diese sich noch in Fertigung befanden.

Um es während des Versuchs kontrolliert absenken und anheben zu können, wurde das Wissenschaftsmodul mithilfe eines Krans über dem Testbecken aufgehängt.

8.2 Durchführung

Zunächst wurde eine Ethernet-Verbindung vom Wissenschaftsmodul zum Laptop mithilfe des Terminalprogramms MobaXterm der Firma Mobatek [43] hergestellt. Dazu musste die IP-Adresse des Mikrocontrollers (192, 168, 0, 218) eingegeben werden, welche im Programmcode definiert wurde. Anschließend wurde das Wissenschaftsmodul vollständig in Tiefe von 2 m ins Wasser abgesenkt. Die Spannungsversorgung wurde erst danach eingeschaltet, um die CTD-Pumpe vor dem Trockenlaufen zu schützen. Unmittelbar nach dem Einschalten wurde über MobaXterm ein Header mit den Sensordaten ausgegeben. Die Messwerte der CTD wurden stichprobenartig durch ein separates Messgerät auf Plausibilität überprüft. Dieses maß Temperatur und Salzgehalt des Wassers im Testbecken. Für die übrigen Sensoren konnten keine Vergleichsmessungen durchgeführt werden, da keine geeigneten Messgeräte zur Verfügung standen. Zur Überprüfung der Systemstabilität gegenüber Stromausfällen wurde das Labornetzgerät für etwa eine Minute abgeschaltet und anschließend wieder aktiviert. Auf die gleiche Weise wurde auch die Ethernet-Verbindung kurzzeitig unterbrochen und dann wiederhergestellt.

Das Wissenschaftsmodul verblieb für rund 18 Stunden im Wasser, um eine erste Einschätzung des Langzeitverhaltens des Systems zu ermöglichen. Beginn, Unterbrechung und Ende der Spannungsversorgung wurden notiert.

8.3 Auswertung

Der Funktionstest hat gezeigt, dass die grundlegenden Funktionen des Wissenschaftsmoduls erfüllt wurden. Alle getesteten Komponenten erwiesen sich dabei als grundsätzlich wasserdicht für die getestete Tiefe.

Die Spannungsversorgung von Mikrocontroller und Messgeräten funktionierte wie vorgesehen. Die Sensordaten wurden sowohl auf der SD-Karte gespeichert als auch per Ethernet übertragen. Das System reagierte robust auf eine simulierte Spannungsunterbrechung. Nach dem Wiedereinschalten der Spannungsversorgung lief das System stabil weiter. Zwar musste die Ethernet-Verbindung erneut manuell hergestellt werden, doch danach setzte die Datenübertragung nahtlos ein und begann jeweils mit der Übermittlung eines Headers. Die auf der SD-Karte gespeicherten Daten waren vollständig vorhanden und auch während der Unterbrechung der Ethernet-Verbindung wurden weiterhin Messwerte aufgezeichnet. Nach jeder Spannungsunterbrechung wurde ein neuer Header geschrieben. Die Zeitstempel stimmten mit den manuell notierten Zeitpunkten überein, was zeigt, dass die RTC durch die Pufferbatterie zuverlässig weiterlief. Ein Reset des Mikrocontrollers durch kurzzeitiges Trennen der Spannungsversorgung funktionierte ebenfalls wie geplant und ermöglicht so einen kontrollierten Systemneustart von der Basisstation aus.

Die Messwerte der CTD zeigten bei Temperatur und Salzgehalt grundsätzlich eine plausible Größenordnung zu den Vergleichsmessungen. Eine vollständige Validierung aller Sensoren wurde jedoch nicht durchgeführt, da bei diesem Test der Schwerpunkt auf der Überprüfung der Funktionalität des Systems lag. Zudem wurden die Sensoren vorkalibriert vom Hersteller geliefert.

Während des Tests zeigte sich, dass zunächst kein Wasser durch das Pumpensystem von CTD und Optode gefördert wurde. Als Ursache wurden Luftblasen in den Schläuchen vermutet, die sich aufgrund der nach unten gerichteten Einlassöffnung der CTD sammelten. Die Leistung der Pumpe reichte nicht aus, um diese Lufteinschlüsse zu überwinden. Erst durch ein manuelles Umdrehen des Wissenschaftsmoduls im Wasser konnten die Luftblasen entweichen, woraufhin das Pumpensystem funktionierte.

Da die Seitenwände beim Test noch fehlten, konnten einige Aspekte des endgültigen Aufbaus nicht überprüft werden. Dazu zählen die korrekte Ausrichtung des Sensorgehäuses, damit die Sensoren exakt durch die vorgesehenen Sensorfenster blicken, sowie die Fixierung des Einlassschlauchs der CTD an einer Seitenwand.

9 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Wissenschaftsmodul zur Integration in eine Schmelzsonde entworfen, konstruiert und einem ersten Funktionstest unterzogen. Ziel war die Entwicklung eines möglichst kompakten, druckfesten und salzwasserbeständigen Systems, das mechanisch und elektronisch kompatibel mit der Schmelzsonde ist und somit als integriertes Modul unter extremen Umweltbedingungen wie in subglazialen Seen oder der Tiefsee eingesetzt werden kann. Das Wissenschaftsmodul sollte mehrere Parameter erfassen: Wassertemperatur, Umgebungsdruck, Trübung sowie Salzgehalt, Sauerstoffgehalt und Chlorophyll-a-Gehalt des Wassers.

Für die Sensoren lag eine erste Auswahl, Anordnung und Integration bereits vor und wurde in einem zuvor entwickelten Demonstrator technisch umgesetzt und erprobt. Auch bereits bestehende Gehäusevarianten für Mikrocontroller und Sensoren dienten als Grundlage für die Weiterentwicklung.

Um die mechanische Kompatibilität mit der Schmelzsonde sicherzustellen, wurde der strukturelle Rahmen, bestehend aus Verbindungsringen und -stangen aus salzwasserbeständigem Aluminium, gefertigt. Dieser wurde entsprechend den vorgegebenen mechanischen Schnittstellen entworfen und gefertigt.

Für die finale Version des Wissenschaftsmoduls mit der geforderten Druckfestigkeit von bis zu 600 bar mussten entsprechende Druckgehäuse ausgelegt und dimensioniert werden. Dazu wurden Drucktests durchgeführt, bei denen Testgehäuse bis zum Versagen belastet wurden. Die so ermittelten experimentellen Versagensdrücke dienten der Validierung verschiedener Belastungsanalysen. Dazu wurden die Testergebnisse mit den Ergebnissen aus theoretischen Belastungsanalysen, basierend auf der Schubspannungshypothese und der Gestaltänderungshypothese, sowie mit einer FEM-Simulation verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Schubspannungsanalyse die Versagensdrücke vergleichsweise präzise vorhersagt und die berechneten Werte systematisch leicht unter den experimentell ermittelten liegen, was eine zusätzliche Sicherheit bietet. Für die weiteren Berechnungen wurde die theoretische Belastungsanalyse nach der Schubspannungshypothese als die am besten geeignete Methode zur Dimensionierung von Druckgehäusen ausgewählt. Eine Neuwertung der bestehenden Druckgehäuse zeigte, dass diese mit einer Druckfestigkeit von bis zu 114 bar für den NM-II-Test ausreichend sind. Für die final geforderten 600 bar wurden entsprechende Druckgehäuse dimensioniert und konstruiert. Titan erwies sich im Vergleich zu

POM, Aluminium und Edelstahl als einziges Material, das aufgrund seiner hohen Festigkeit für ein druckfestes und zugleich kompaktes Druckgehäuse geeignet ist.

Zur Befestigung der integrierten Messgeräte und Druckgehäuse wurden Gerätehalterungen aus 3D-druckbarem Kunststoff entwickelt und gefertigt. Entscheidend war die Auswahl eines Kunststoffs mit hoher mechanischer Belastbarkeit und Beständigkeit gegenüber Salzwasser und hydrostatischem Druck, um den Umgebungsbedingungen der möglichen Einsatzgebiete gerecht zu werden. Im Rahmen der Materialauswahl wurden Prüfkörper aus den Kunststoffen PLA-CF, PETG-CF und ABS gedruckt. Die Hälfte der Prüfkörper wurde in einem mit Salzwasser gefüllten Drucktank für sechs Tage ausgelagert. Anschließend wurden alle Prüfkörper verschiedenen Werkstoffprüfungen unterzogen: Zugversuch, 3-Punkt-Biegeversuch und Kerbschlagbiegeversuch. Mithilfe dieser Prüfungen konnten die relevanten Eigenschaften Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit der Materialien unter dem Einfluss von Salzwasser und hydrostatischem Druck bewertet werden. Es zeigte sich, dass ABS gute mechanische Eigenschaften aufweist und diese neben PLA-CF und PETG-CF am wenigsten durch die Auslagerungsbedingungen beeinträchtigt wurden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde ABS als bevorzugtes Material für die Gerätehalterungen ausgewählt und diese entsprechend gedruckt.

Für das Sensordatenmanagement und die Spannungsversorgung wurde eine robuste und kompakte Elektronikeinheit entwickelt, die in das bestehende Mikrocontrollergehäuse integriert wurde. Die zuvor lose Verkabelung wurde durch eine speziell entwickelte Leiterplatte ersetzt, auf der alle elektronischen Komponenten montiert sind. Dazu gehören der Mikrocontroller, Spannungswandler, Pegelwandler sowie eine externe Batterie für die RTC. Der Mikrocontroller bildet die zentrale Einheit des Datenmanagements und steuert die Erfassung, Verarbeitung, Speicherung sowie Übertragung der Sensordaten mittels eigens entwickeltem Programmcode. Die Elektronikeinheit wurde dabei so ausgelegt, dass sie mit dem Versorgungs- und Datenkabel, das von der Schmelzsonde bereitgestellt wird, kompatibel ist.

Der durchgeführte Funktionstest im Testbecken bestätigte die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit des entwickelten Wissenschaftsmoduls. Die Elektronikeinheit für die Spannungsversorgung und das Sensordatenmanagement erwies sich als stabil. Erfassung, Verarbeitung, lokale Speicherung und Netzwerkübertragung der Sensordaten funktionierten wie vorgesehen. Das System zeigte sich auch gegenüber Spannungsunterbrechungen zuverlässig und ließ sich von der Basisstation aus neu starten.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein druckfestes, salzwasserbeständiges und kompaktes Wissenschaftsmodul. Die wesentlichen Anforderungen an Mechanik, Elektronik, Materialauswahl, Systemintegration und Funktionalität konnten dabei erfolgreich erfüllt sowie durch Tests validiert bzw. vorvalidiert werden. Damit ist eine wichtige Grundlage für die vollständige Integration des Wissenschaftsmoduls als zentrales Element der TRIPLE-Schmelzsonde und dessen Einsatz unter extremen Umweltbedingungen geschaffen.

10 Ausblick

Der nächste entscheidende Schritt für das Wissenschaftsmodul ist die vollständige Integration in die Schmelzsonde. Erst beim finalen Zusammenbau kann die elektronische und mechanische Kompatibilität umfassend getestet werden. Dabei wird sich auch zeigen, ob die Seitenwände passgenau zum bestehenden Wissenschaftsmodul sind und die Funktionalität, insbesondere hinsichtlich des Innenaufbaus, der Ausrichtung des Sensorgehäuses und der Anbringung des Einlassschlauchs für das geplante Pumpsystem, wie vorgesehen erhalten bleibt.

Für einen wissenschaftlich belastbaren Einsatz ist eine vollständige Kalibrierung aller Sensoren vorgesehen. Des Weiteren muss die Anordnung der CTD und der Optode inklusive der zugehörigen Schläuche optimiert werden, um Lufteinschlüsse zu vermeiden und die zuverlässige Funktion des Pumpsystems sicherzustellen.

Hinsichtlich der Kommunikation über die Netzwerkverbindung sind weitere Verbesserungen geplant. Eine bidirektionale Verbindung soll es ermöglichen, Befehle von der Basisstation an den Mikrocontroller zu senden, beispielsweise um die RTC zu stellen. Zudem ist die Implementierung eines automatischen Verbindungsaufbaus nach Spannungsunterbrechungen vorgesehen. Für die Datenspeicherung, sowohl über Ethernet als auch auf der SD-Karte, soll während eines Einsatzes zukünftig täglich eine neue Datei erstellt werden, um die Datenorganisation zu verbessern.

Für den Einsatz in größeren Tiefen müssen die 600-bar-Versionen der Druckgehäuse aus Titan noch gefertigt und in das Wissenschaftsmodul integriert werden. Dies erfordert auch eine entsprechende Anpassung der jeweiligen Gerätehalterungen.

Literatur

- [1] M. J. Siegert, “Lakes Beneath the Ice Sheet: The Occurrence, Analysis, and Future Exploration of Lake Vostok and Other Antarctic Subglacial Lakes,” *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 33, no. 1, pp. 215–245, 2005. [Online]. Available: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.earth.33.092203.122725>
- [2] M. Richter, “Polarforschung 88-2: 065-088,” 2025, zugriff am 05. Juni 2025. [Online]. Available: https://epic.awi.de/id/eprint/50113/1/polarforschung_88-2_065-088_Richter.pdf
- [3] B. Davies. (2014) Subglacial lakes. AntarcticGlaciers.org. Accessed: 2025-06-11. [Online]. Available: <https://www.antarcticglaciers.org/glacier-processes/glacial-lakes/subglacial-lakes/>
- [4] K. K. Khurana, M. G. Kivelson, and C. T. Russell, “Searching for liquid water in europa by using surface observatories,” *Astrobiology*, vol. 2, no. 1, pp. 93–103, 2002. [Online]. Available: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/153110702753621376>
- [5] M. H. Burger, E. C. S. Jr., R. E. Johnson, H. T. Smith, O. J. Tucker, and V. I. Shematovich, “Understanding the escape of water from enceladus,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 112, no. A6, p. A06219, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/2006JA012086>
- [6] S. A. Bulat, “Microbiology of the subglacial lake vostok: first results of borehole-frozen lake water analysis and prospects for searching for lake inhabitants,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 374, no. 2059, p. 20140292, Jan 2016.
- [7] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (2024) Triple-explorationssystem – technologies for rapid ice penetration and subglacial lake exploration. Zugriff am: 5. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/ar/themen-missionen/raumfahrttechnologien/dlr-explorer-initiativen/triple-explorationssystem>
- [8] RWTH Innovation GmbH. (2024) World ip day 2024 – rwth innovation. Zugriff am: 5. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.rwth-innovation.de/de/aktuelles/alle-neuigkeiten/aktuelle-detailseiten/world-ip-day>
- [9] H. Noh, K. Kang, and J.-Y. Park, “Risk analysis of autonomous underwater vehicle operation in a polar environment based on fuzzy fault tree analysis,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 10, p. 1976, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/10/1976>
- [10] A. J. Dubnick, R. L. Spietz, B. D. Danielson, M. L. Skidmore, E. S. Boyd, D. Burgess, C. Dhoonmoon, and M. Sharp, “Biogeochemical evolution of ponded meltwater in a high arctic subglacial tunnel,” *The Cryosphere*, vol. 17, no. 10, pp. 2993–3012, 2023. [Online]. Available: <https://tc.copernicus.org/articles/17/2993/2023/>
- [11] TRIPLE-Projekt, “Triple – technologien für schnelles eisdurchdringen und erforschung subglazialer seen,” <https://triple-project.net/>, 2025, online; zuletzt aufgerufen am 05. Juni 2025.
- [12] D. Heinen. (2023) Triple-icecraft-expedition in die antarktis: Finale systemtests

- und abschluss der vorbereitungen für die bohrung – teil 4. Zugriff am 7. April 2025. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/de/blog/archiv/2023/triple-icecraft-expedition-in-die-antarktis-finale-systemtests-und-abschluss-der/-vorbereitungen-fur-die-bohrung-teil-4>
- [13] M. A/S. (2025) Subconn micro circular – 5, 6, 8 und 9 kontakte sowie g2 2, 3 und 4 kontakte. Zugriff am 6. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.macartney.com/connectivity/subconn/subconn-micro-circular-series/subconn-micro-circular-5-6-8-and-9-contacts-and-g2-2-3-and-4-contacts/>
- [14] —. (2025) Subconn circular – 2, 3, 4 und 5 kontakte. Zugriff am 6. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.macartney.com/connectivity/subconn/subconn-circular-series/subconn-circular-2-3-4-and-5-contacts/>
- [15] —. (2025) Subconn power battery – 2, 3 und 4 kontakte. Zugriff am 6. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.macartney.com/connectivity/subconn/subconn-power-series/subconn-power-battery-2-3-and-4-contacts/>
- [16] A. M.-S. GmbH, “Technisches datenblatt en aw-5083 (almg4,5mn),” https://amco-metall.de/fileadmin/downloads/Datenblaetter/Datenblatt__AMCO_5083.pdf, 2025, zugriff am 31. Mai 2025. [Online]. Available: https://amco-metall.de/fileadmin/downloads/Datenblaetter/Datenblatt__AMCO_5083.pdf
- [17] V. Läßle, *Einführung in die Festigkeitslehre: Lehr- und Übungsbuch*, 4th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [18] Schmitz-Metallographie GmbH, “Werkstoffprüfung,” <https://www.schmitz-metallographie.de/werkstofftechnik/werkstoffpruefung/>, 2025, [Online; Zugriff am 12. Juni 2025].
- [19] Wikipedia-Autoren. (2025) Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Wikipedia. Zugriff am 28. Mai 2025. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Spannungs-Dehnungs-Diagramm>
- [20] Polymer Service GmbH Merseburg. (n.d.) Schlagbiegeversuch – polymer service wiki. Zugriff am 12. Juni 2025. [Online]. Available: <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Schlagbiegeversuch>
- [21] GUNT Gerätebau GmbH, “Datenblatt – kerbschlagbiegeversuch WP-400 (25nm),” GUNT Gerätebau GmbH, Technisches Datenblatt, n.d., zugriff am: 12. Juni 2025. [Online]. Available: https://www.gunt.de/images/datasheet/1621/WP-400-Kerbschlagbiegeversuch-25Nm-gunt-1621-pdf_1_de-DE.pdf
- [22] Ensinger GmbH. (2025) Acetal - tecaform® ah natural. Zugriff am 29. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/acetalttecaformahnatural>
- [23] MathWorks Inc., “MATLAB R2025a,” 2025, software, Version R2025a. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>
- [24] Autodesk Inc., “Autodesk Inventor Professional 2025,” 2024, software, Version 2025. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>
- [25] B. Klein, *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode*,

- ser. Studium Technik. Vieweg+Teubner Verlag, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.de/books?id=h-v3BQAAQBAJ>
- [26] Projektträger Jülich (PTJ), “Technische Berichte / Standardtabellen 2023,” Online: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Standardtabellen TB-ST2023, https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/5304/live/lw_file/tb_st2023.pdf [Zugriff am 30. Mai 2025], p. 111, 2023.
- [27] X. Zhang, J. Zhang, J. Zhang, J. Ma, and Z. Sun, “Design and testing of deep-sea pressure housings using different materials: Titanium, stainless steel and aluminum alloys,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 58, pp. 33 777–33 787, 2020, zugriff am 7. April 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031992034742X>
- [28] J. GmbH, “Edelstahl 1.4404 datenblatt,” <https://www.jennerstahl.com/edelstahl-1-4404-datenblatt/>, 2025, zugriff am 31. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.jennerstahl.com/edelstahl-1-4404-datenblatt/>
- [29] M. GmbH, “Datenblatt: Titan-grade 5 (3.7164/65), r56400,” <https://www.metalcor.de/datenblatt/125/>, 2025, zugriff am 31. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.metalcor.de/datenblatt/125/>
- [30] Bambu Lab, “Bambu PLA-CF Technisches Datenblatt, Version 3,” https://store.bbldcn.eu/s8/default/aefa8303ad8d40248b0d86dfdada46518/Bambu_PLA-CF_Technical_Data_Sheet_V3.pdf, [Online; Zugriff am 11. Juni 2025].
- [31] —, “Bambu PETG-CF Technisches Datenblatt, Version 2,” https://store.bbldcn.eu/s8/default/7c4afe6d319b456d9f9c8db59647976e/Bambu_PETG-CF_Technical_Data_Sheet_V2.pdf, [Online; Zugriff am 11. Juni 2025].
- [32] —, “Bambu ABS Technisches Datenblatt, Version 3,” https://store.bbldcn.eu/s8/default/947a65d46f0c4722a875687bf72c1c58/Bambu_ABS_Technical_Data_Sheet_V3.pdf, [Online; Zugriff am 11. Juni 2025].
- [33] —, “Bambu Lab X1-Carbon 3D Printer,” <https://eu.store.bambulab.com/de/products/x1-carbon>, zugriff am 2. Juni 2025.
- [34] ZwickRoell GmbH & Co. KG. (2025) AllroundLine – Universalprüfmaschinen für statische Anwendungen. Zugriff am 2. Juni 2025. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/de/produkte/statische-material-pruefmaschinen/universalpruefmaschinen-fuer-statische-anwendungen/allroundline/>
- [35] D. D. I. für Normung e.V., *DIN-Taschenbuch 23 – Mechanische Werkstoffprüfung 1: Zug-, Druck- und Biegeversuch, Härteprüfung*. Springer Vieweg, 2011.
- [36] Bambu Lab GmbH. Bambu Studio (Download). [Online]. Available: <https://bambulab.com/de-de/download/studio>
- [37] PJRC. (2025) Teensy 4.1. [Accessed: 2025-06-03]. [Online]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>
- [38] TRACO Power. (2025) Tsr-1-2450. [Accessed: 2025-06-03]. [Online]. Available: <https://www.mouser.de/ProductDetail/TRACO-Power/TSR-1-2450?qs=ckJk83FOD0XFKqda0Mzkgw%3D%3D&srsrtid=AfmBOooCcoGZaYJF1BEZsrUv5tO8BsINxppv3isMS2KK4iBaiLA-maB>

- [39] ——. (2025) Tsr-1-2412. [Accessed: 2025-06-03]. [Online]. Available: <https://www.mouser.de/ProductDetail/TRACO-Power/TSR-1-2412?qs=ckJk83FOD0XFyuKFnkiJHw%3D%3D>
- [40] Chip Quik. (2025) Icb-max3232. [Accessed: 2025-06-03]. [Online]. Available: <https://www.mouser.de/ProductDetail/Chip-Quik/ICB-MAX3232>
- [41] Murata Electronics. (2025) Cr2032 lithium-knopfzelle. [Zugriff am: 03.06.2025]. [Online]. Available: <https://www.mouser.de/ProductDetail/Murata-Electronics/CR2032?qs=gTYE2QTfZfQ%2FQrgScp89FQ%3D%3D>
- [42] Arduino. (2025) Arduino ide – integrated development environment. [Zugriff am: 4. Juni 2025]. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/software/>
- [43] Mobatek. MobaXterm Home Edition. [Online]. Available: <https://mobaxterm.mobatek.net/>
- [44] Seabird Scientific. (2024) Sbe 52-mp moored profiler ctd and optional do sensor – product downloads. Zugriff am 29. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.seabird.com/sbe-52-mp-moored-profiler-ctd-and-optional-do-sensor/product-downloads?id=60762467706>
- [45] ——. (2025) Sbe 63 optical dissolved oxygen sensor – product downloads. Zugriff am 29. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.seabird.com/oxygen-sensors/sbe-63-optical-dissolved-oxygen-sensor/family-downloads?productCategoryId=54627869933>
- [46] Teledyne Valeport. (2022) Hyperion chlorophyll-a sensor – datasheet. Zugriff am 29. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.valeport.co.uk/content/uploads/2022/11/Teledyne-Valeport-Hyperion-Chlorophyll-a-Datasheet.pdf>
- [47] ——. (2021) Hyperion turbidity sensor – datasheet. Zugriff am 29. Mai 2025. [Online]. Available: <https://www.valeport.co.uk/content/uploads/2021/10/Teledyne-Valeport-Hyperion-Turbidity-Datasheet.pdf>

Anhang

A Graphen

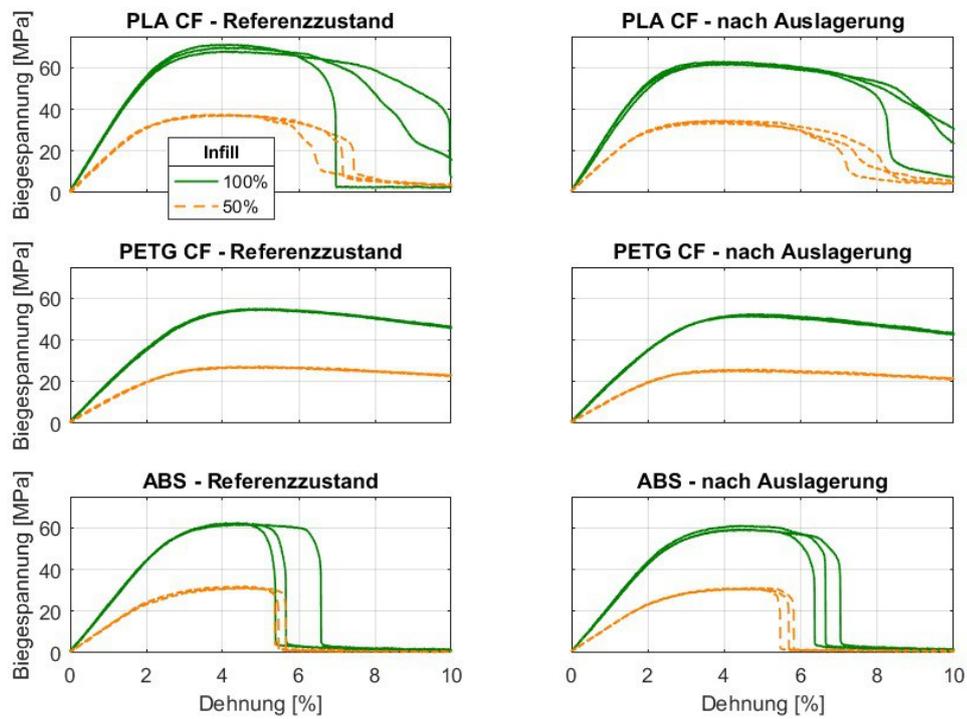


Abbildung A.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der 3-Punkt-Biegeversuche der untersuchten Kunststoffe im Referenzzustand sowie nach der Auslagerung bei 50 % und 100 % Infill

B Tabellen

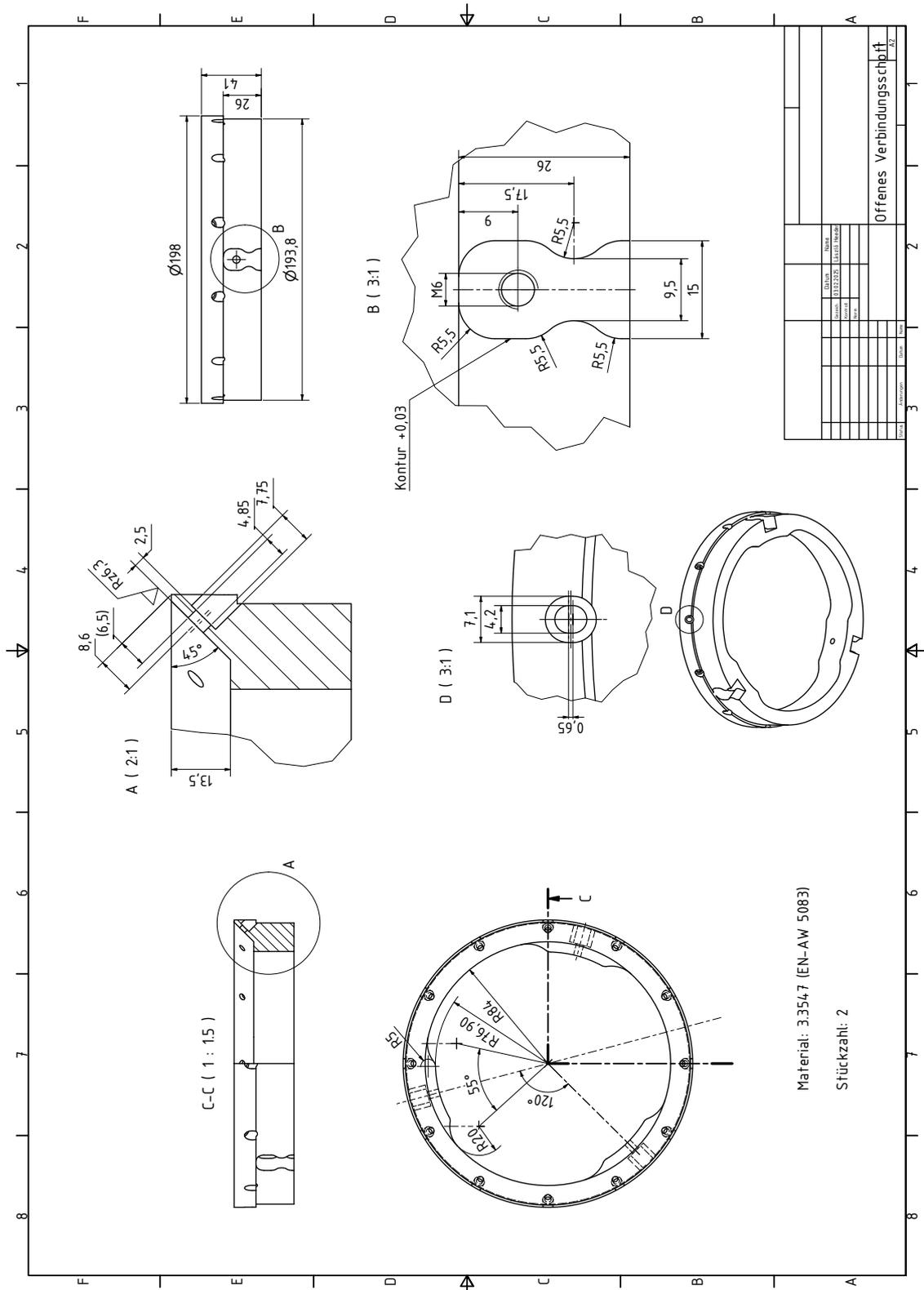
Werkstoff	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]
<i>Referenzzustand</i>		
PLA-CF 100 %	1230 ± 75,5	40,47 ± 0,7
PLA-CF 50 %	644,33 ± 8,62	15,8 ± 0,26
PETG-CF 100 %	666,33 ± 70,61	35,07 ± 0,15
PETG-CF 50 %	329 ± 11,79	12,6 ± 0,1
ABS 100 %	943,33 ± 76,74	38,1 ± 0,17
ABS 50 %	476,67 ± 9,02	14 ± 0,2
<i>nach Auslagerung</i>		
PLA-CF 100 %	1166,67 ± 11,55	35,6 ± 0,44
PLA-CF 50 %	628,67 ± 9,02	15,33 ± 0,15
PETG-CF 100 %	558,67 ± 13,5	32,77 ± 0,35
PETG-CF 50 %	316 ± 3,61	11,83 ± 0,06
ABS 100 %	882 ± 124,96	38,17 ± 0,4
ABS 50 %	461 ± 2,65	13,87 ± 0,06

Tabelle B.1: Ergebnisse des Zugversuchs der untersuchten Kunststoffe in Abhängigkeit vom Infill (50 % bzw. 100 %) sowie vom Zustand der Proben (Referenzzustand bzw. nach Auslagerung) (Mittelwert ± Standardabweichung)

Werkstoff	E _b [MPa]	Biegefestigkeit [MPa]
<i>Referenzzustand</i>		
PLA-CF 100 %	2860,0 ± 65,6	69,7 ± 1,7
PLA-CF 50 %	1713,3 ± 49,3	37,4 ± 0,1
PETG-CF 100 %	1826,7 ± 32,2	55,0 ± 0,1
PETG-CF 50 %	1136,7 ± 60,3	27,3 ± 0,2
ABS 100 %	2113,3 ± 80,2	62,1 ± 0,4
ABS 50 %	1186,7 ± 89,6	31,6 ± 0,5
<i>nach Auslagerung</i>		
PLA-CF 100 %	2800,0 ± 157,2	62,3 ± 0,6
PLA-CF 50 %	1600,0 ± 0,0	34,2 ± 0,6
PETG-CF 100 %	1883,3 ± 35,1	52,1 ± 0,5
PETG-CF 50 %	1005,3 ± 56,2	25,8 ± 0,3
ABS 100 %	2126,7 ± 51,3	59,9 ± 1,1
ABS 50 %	1220,0 ± 79,4	31,1 ± 0,3

Tabelle B.2: Ergebnisse des Biegeversuchs der untersuchten Kunststoffe in Abhängigkeit vom Infill (50 % bzw. 100 %) sowie vom Zustand der Proben (Referenzzustand bzw. nach Auslagerung) (Mittelwert ± Standardabweichung)

C Technische Zeichnungen



Offenes Verbindungsschiff	
Pos. /	Bezeichnung
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	
79	
80	
81	
82	
83	
84	
85	
86	
87	
88	
89	
90	
91	
92	
93	
94	
95	
96	
97	
98	
99	
100	

Abbildung C.1: Verbindungsring

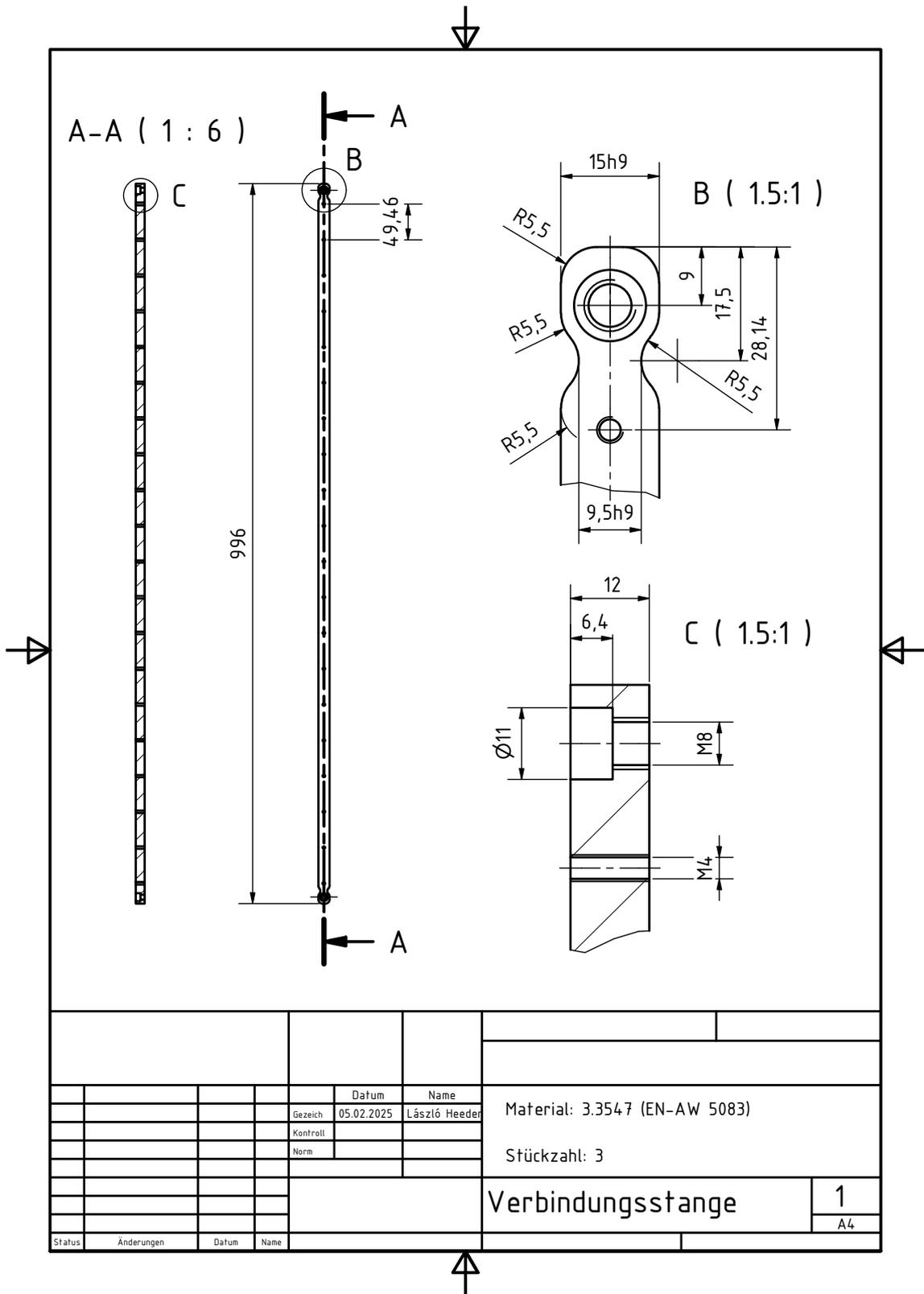


Abbildung C.2: Verbindungsstange

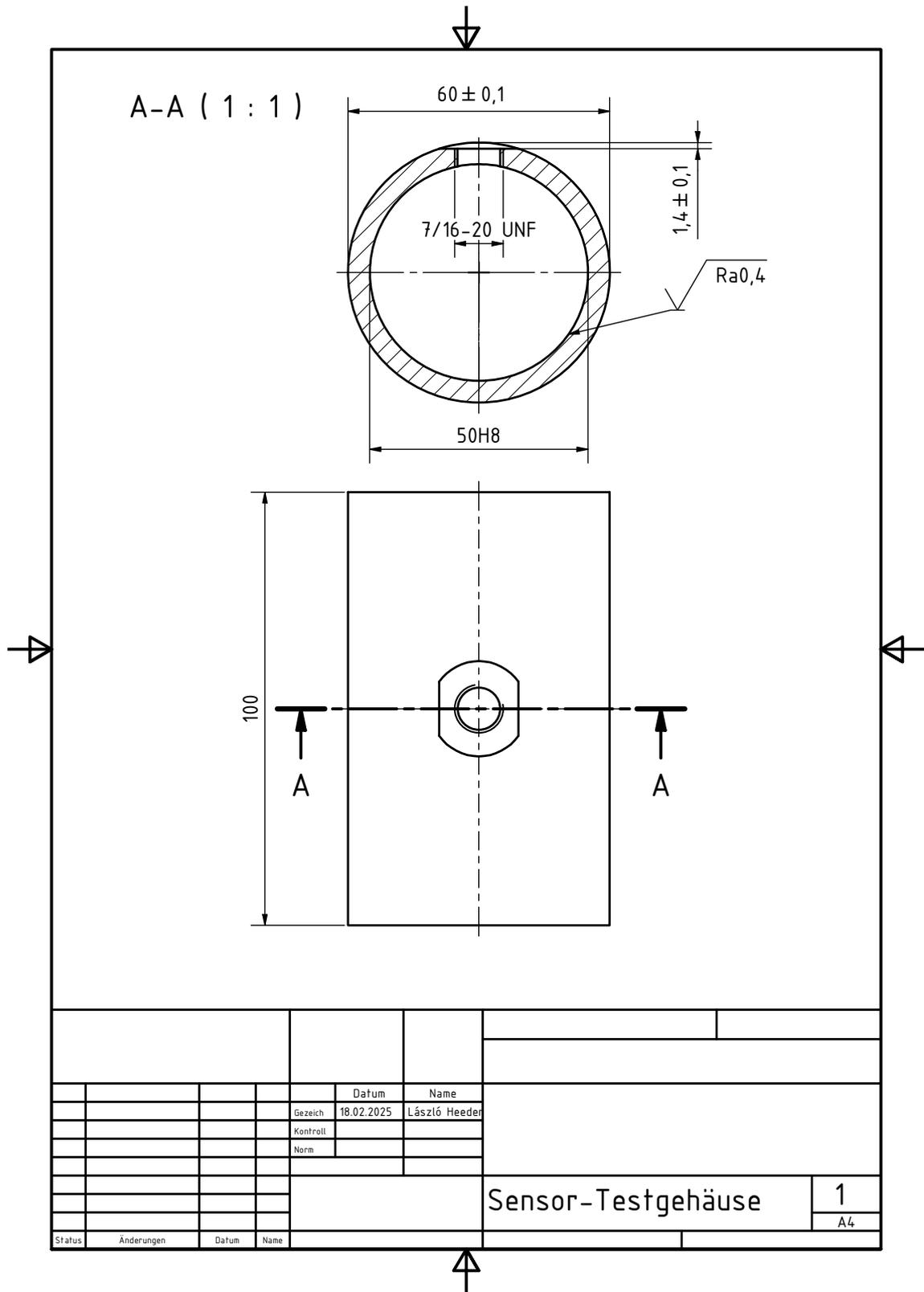


Abbildung C.3: Zylinder des Sensor-Testgehäuses

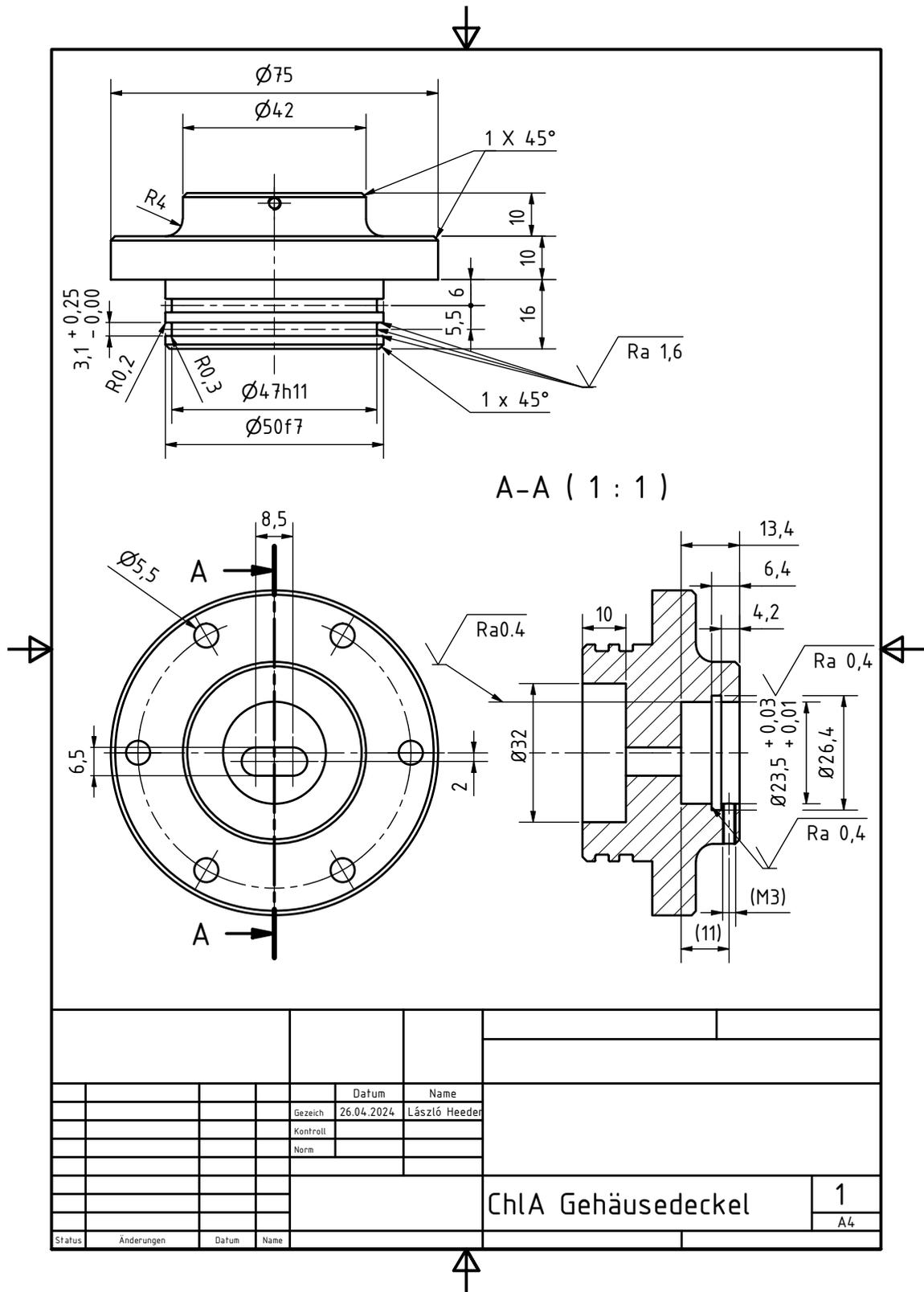


Abbildung C.5: Gehäusedeckel (Chl-a-Sensor) des bestehenden Sensorgehäuses

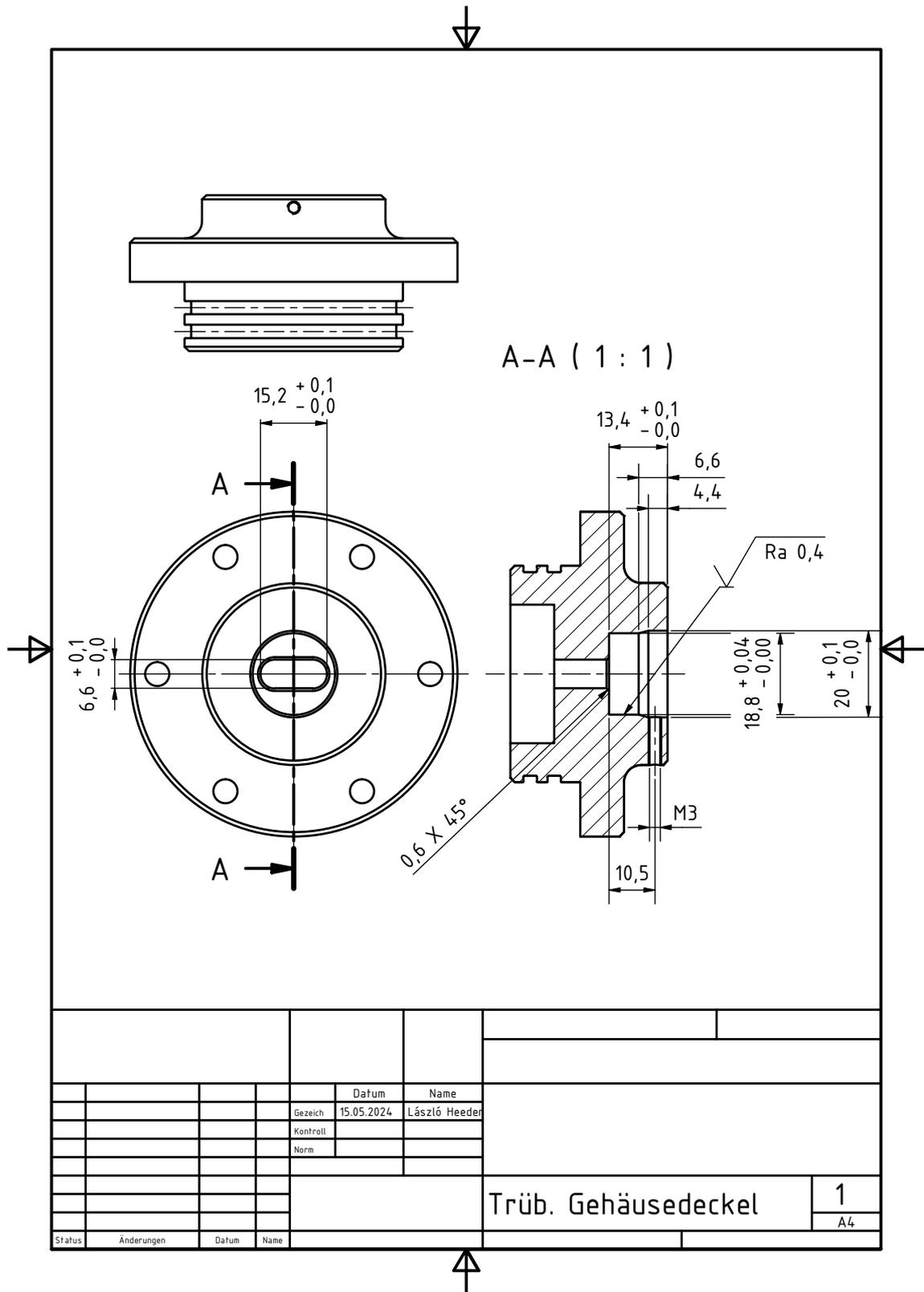


Abbildung C.6: Gehäusedeckel (Trübungssensor) des bestehenden Sensorgehäuse

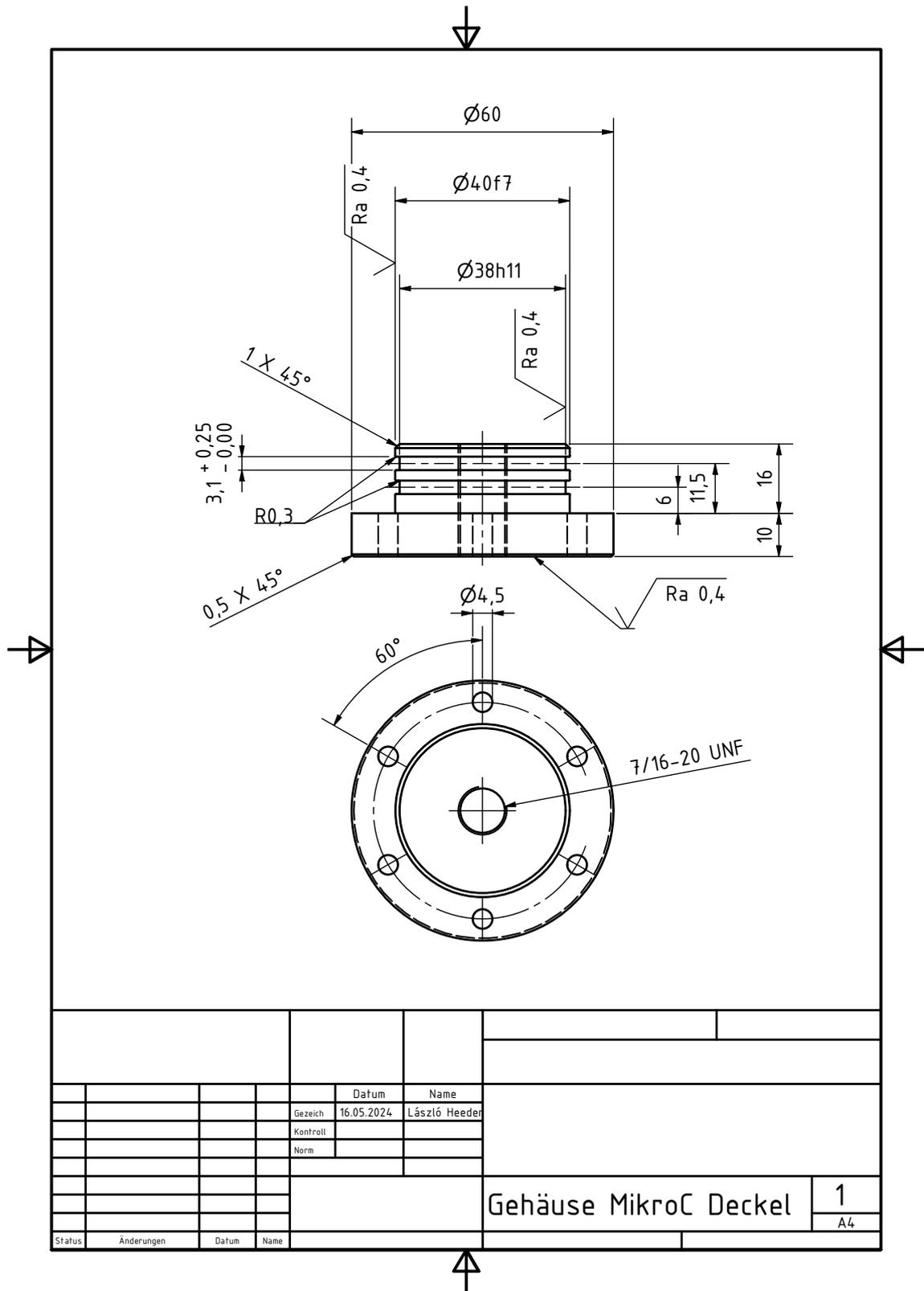


Abbildung C.7: Gehäusedeckel des bestehenden Mikrocontrollergehäuses

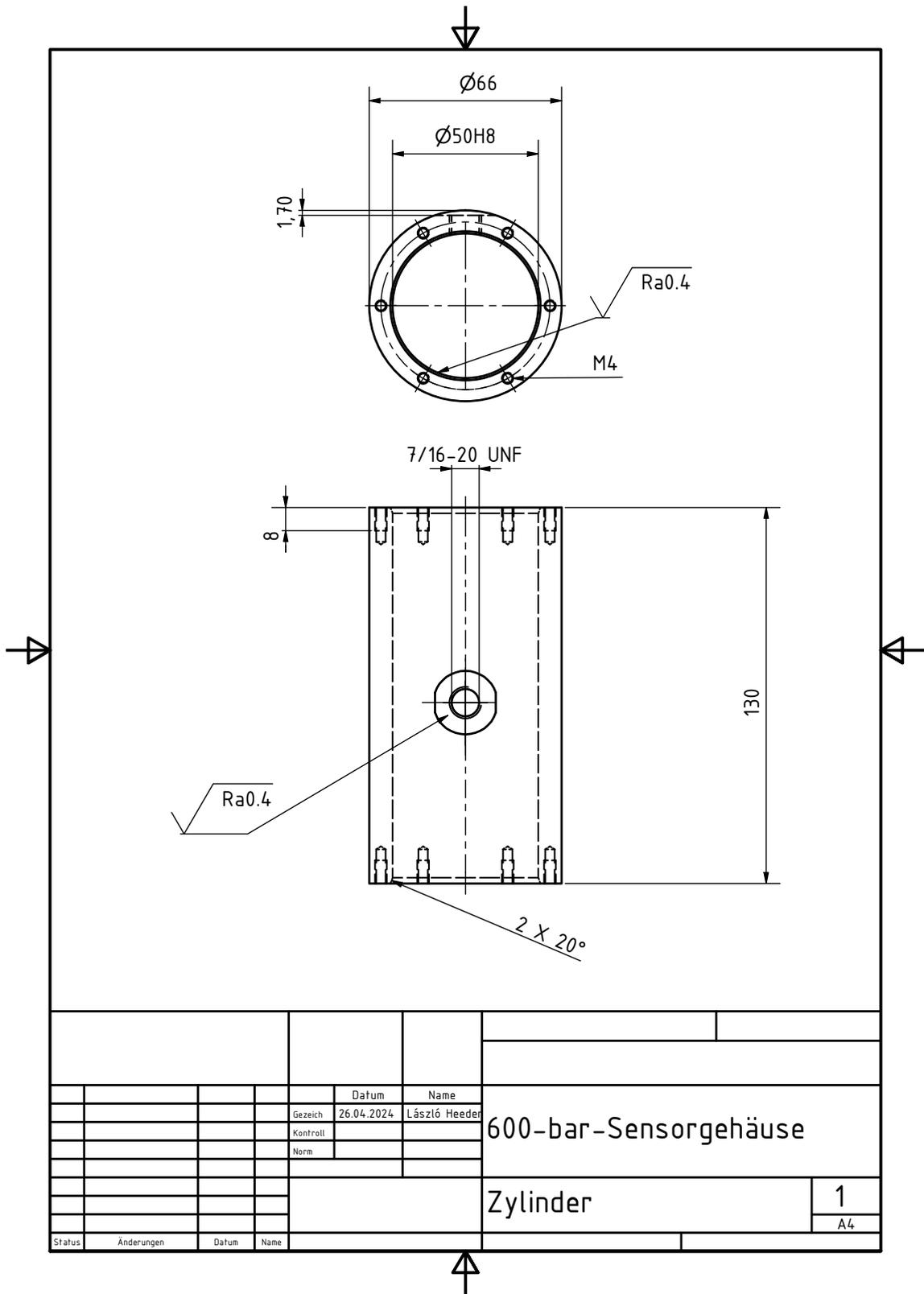


Abbildung C.8: Zylinder des 600-bar-Sensorgehäuse

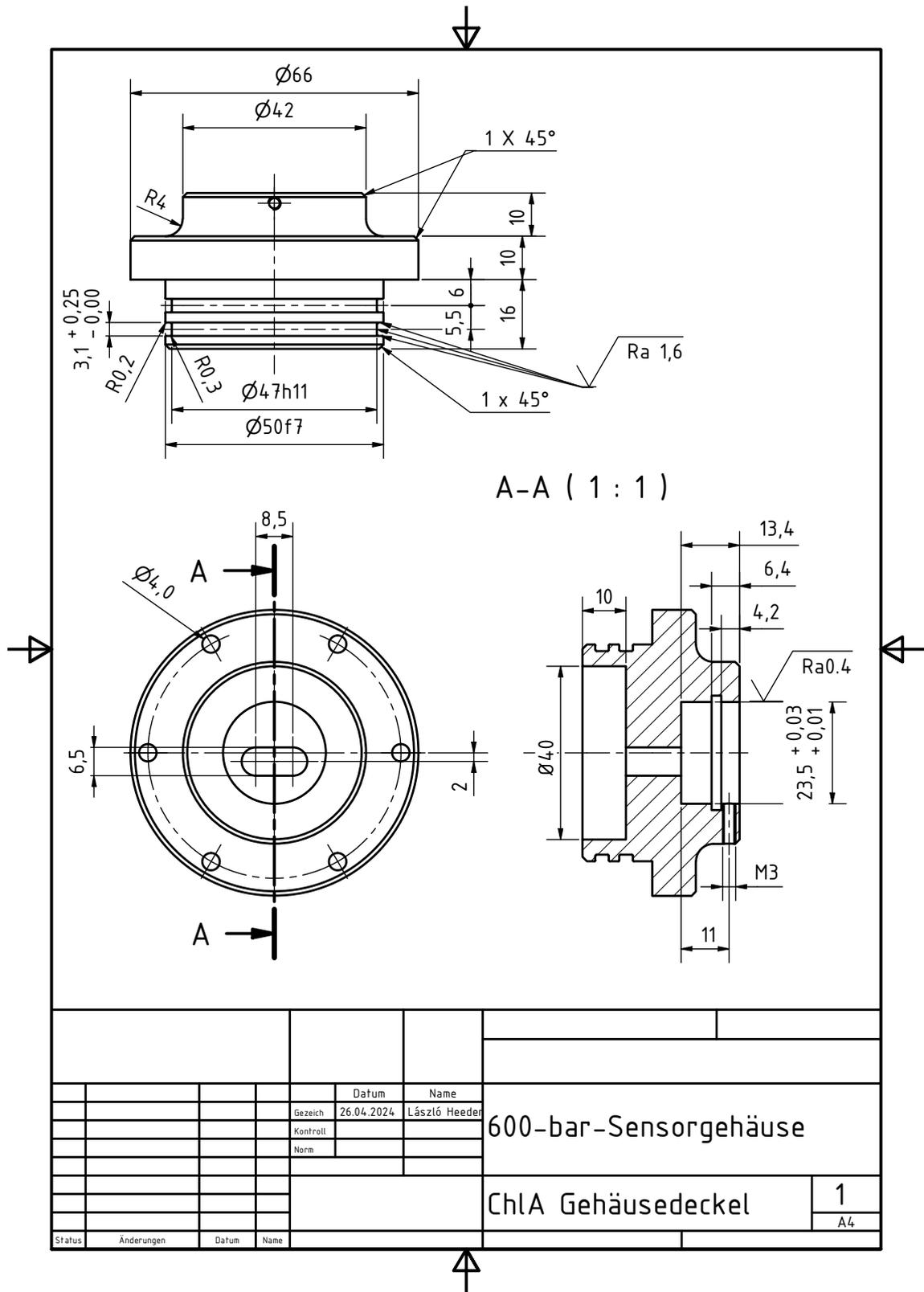


Abbildung C.9: Gehäusedeckel (Chl-a-Sensor) des 600-bar-Sensorgehäuse

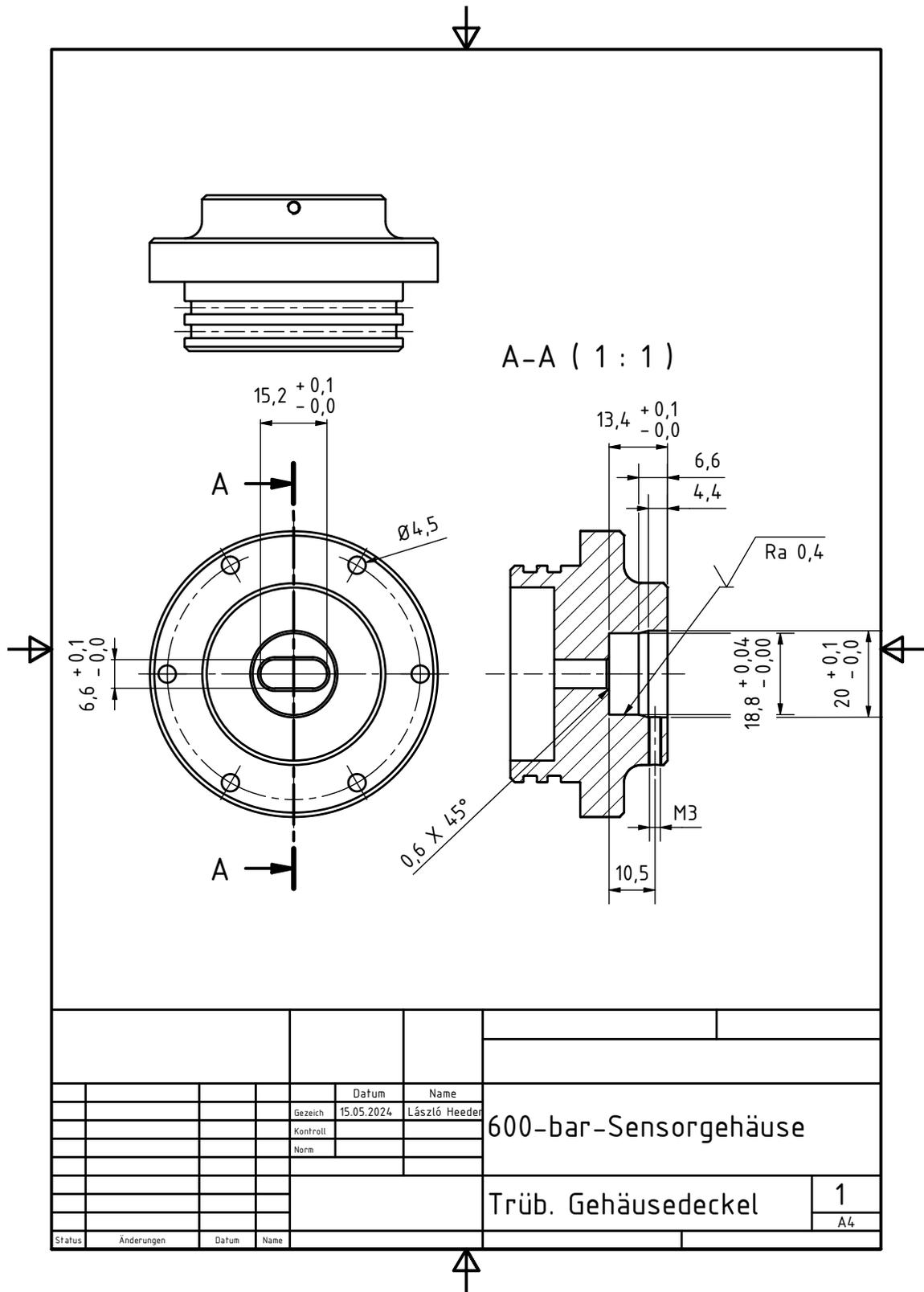


Abbildung C.10: Gehäusedeckel (Trübungssensor) des 600-bar-Sensorgehäuse

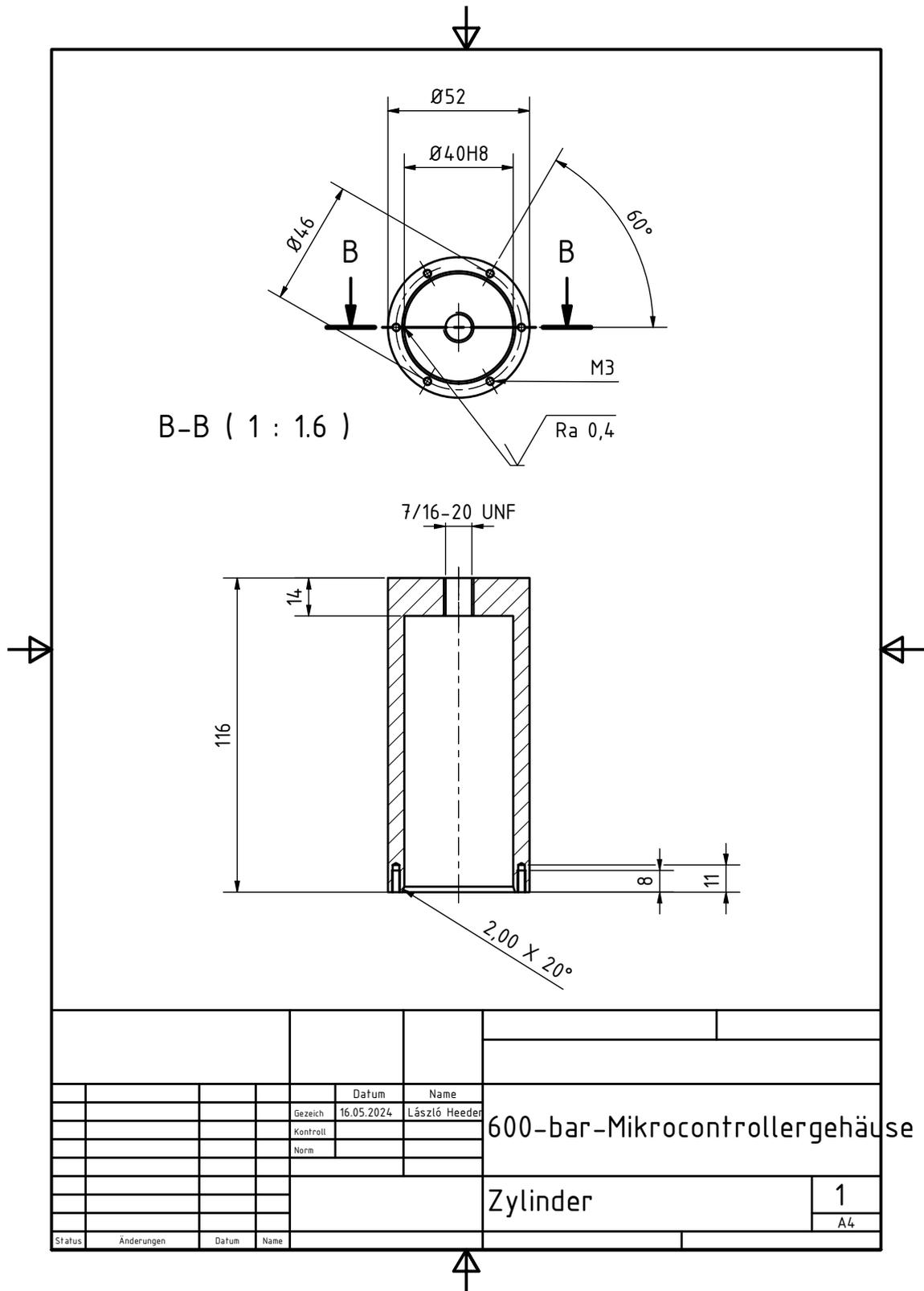


Abbildung C.11: Zylinder des 600-bar-Mikrocontrollergehäuse

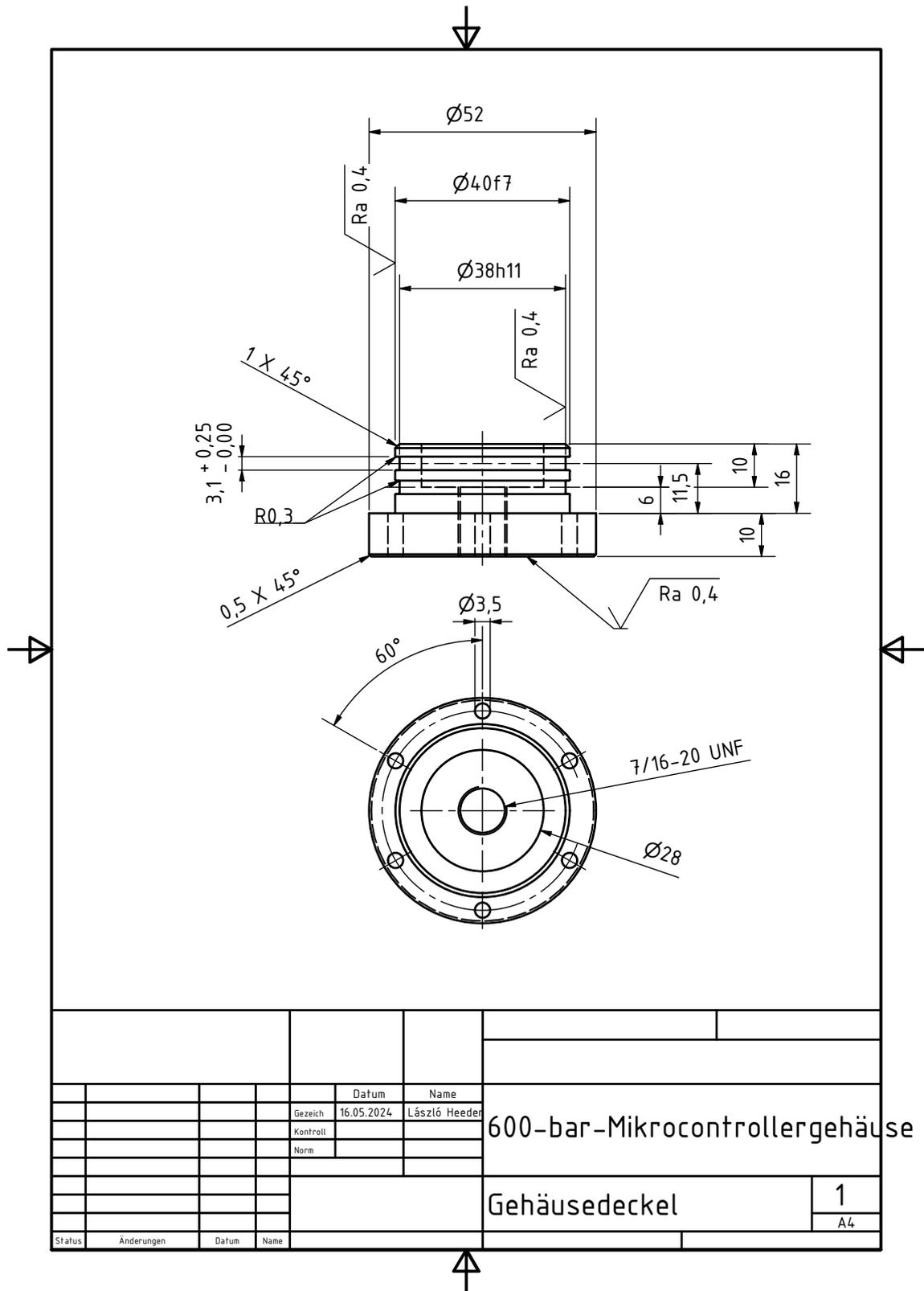
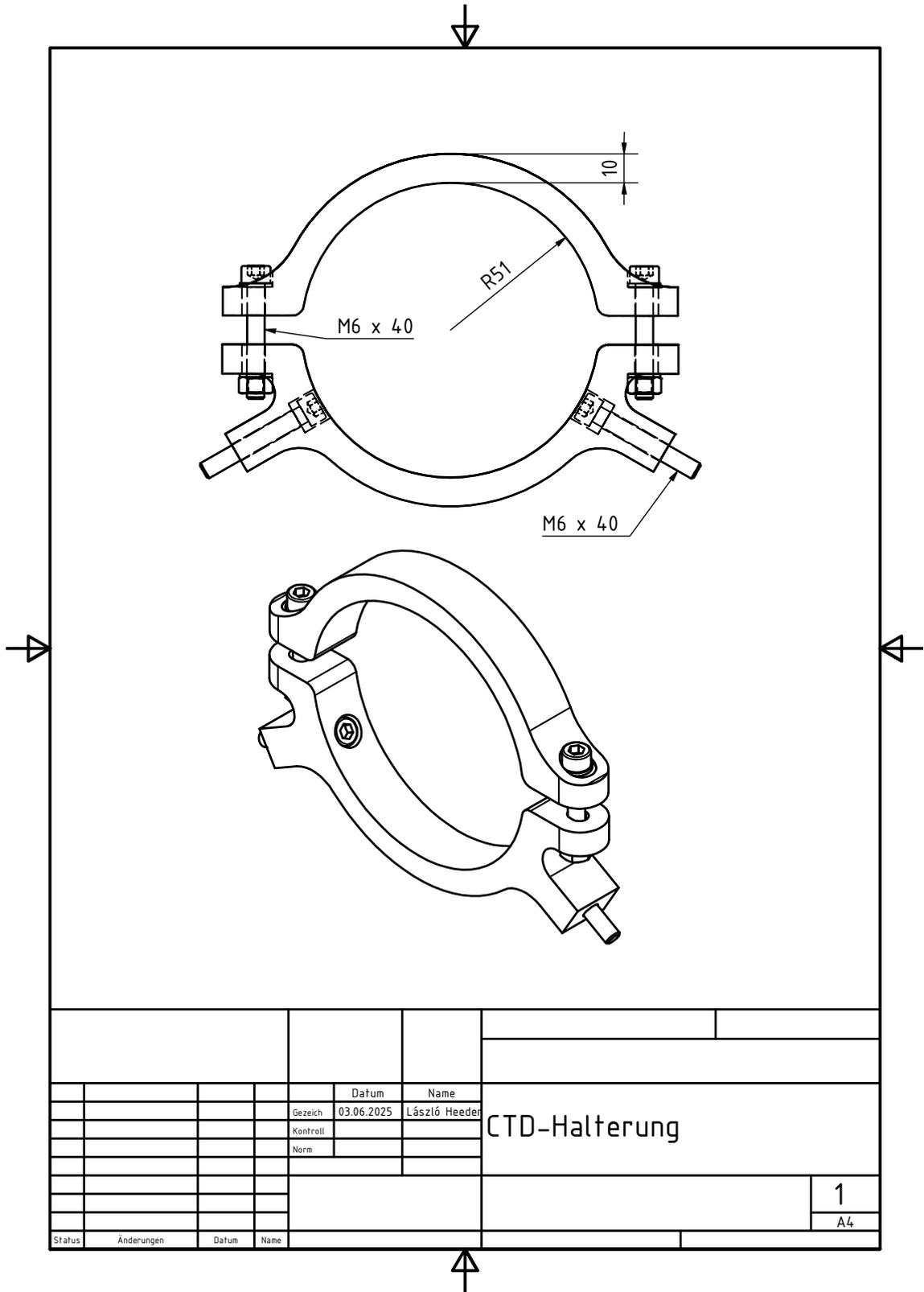


Abbildung C.12: Gehäusedeckel des 600-bar-Mikrocontrollergehäuse



			Datum		Name	CTD-Halterung	
			03.06.2025		László Heeder		
			Kontroll				
			Norm				
						1	
						A4	
Status	Änderungen	Datum	Name				

Abbildung C.13: CTD-Halterung

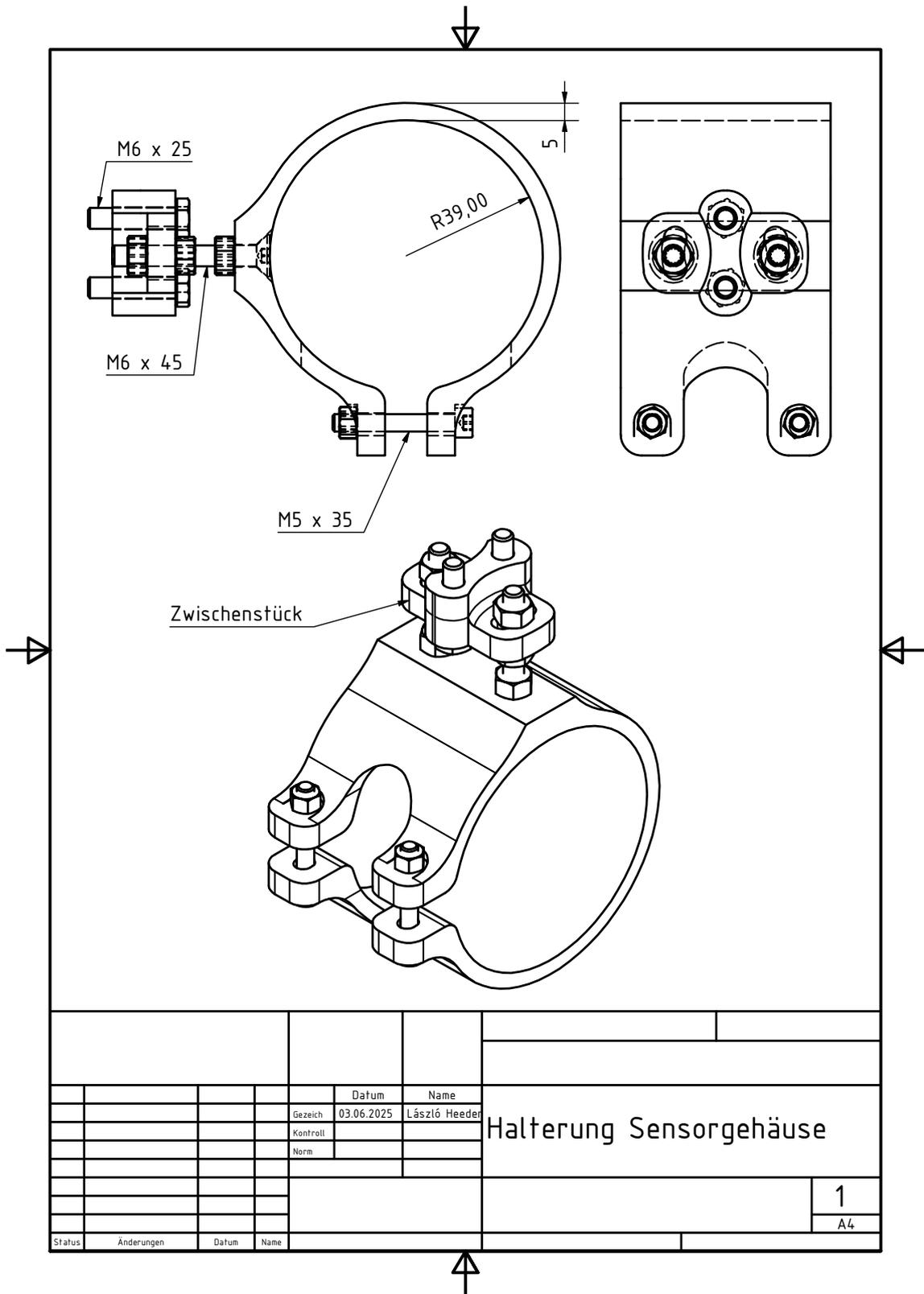


Abbildung C.14: Halterung Sensorgehäuse

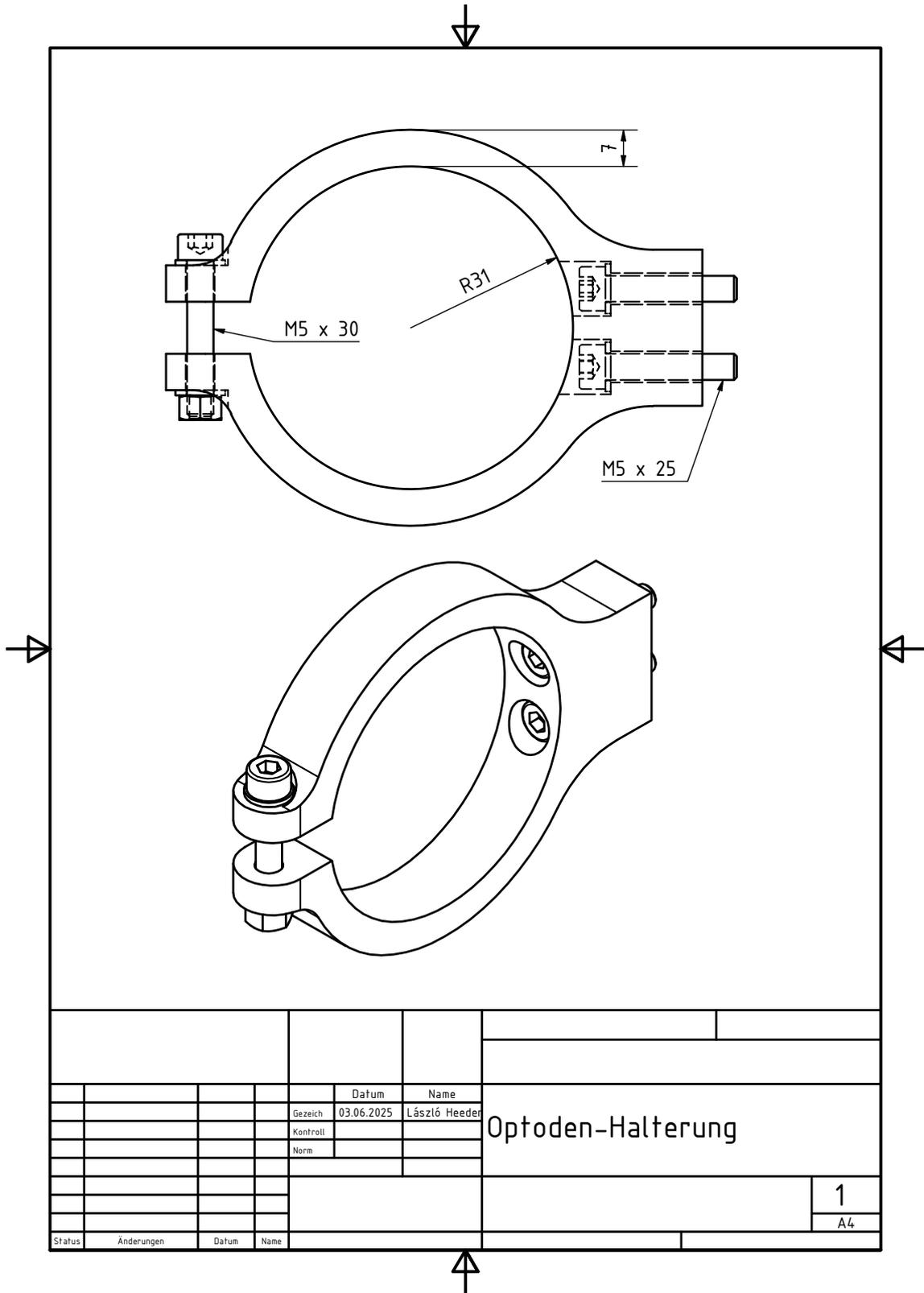


Abbildung C.15: Optoden-Halterung

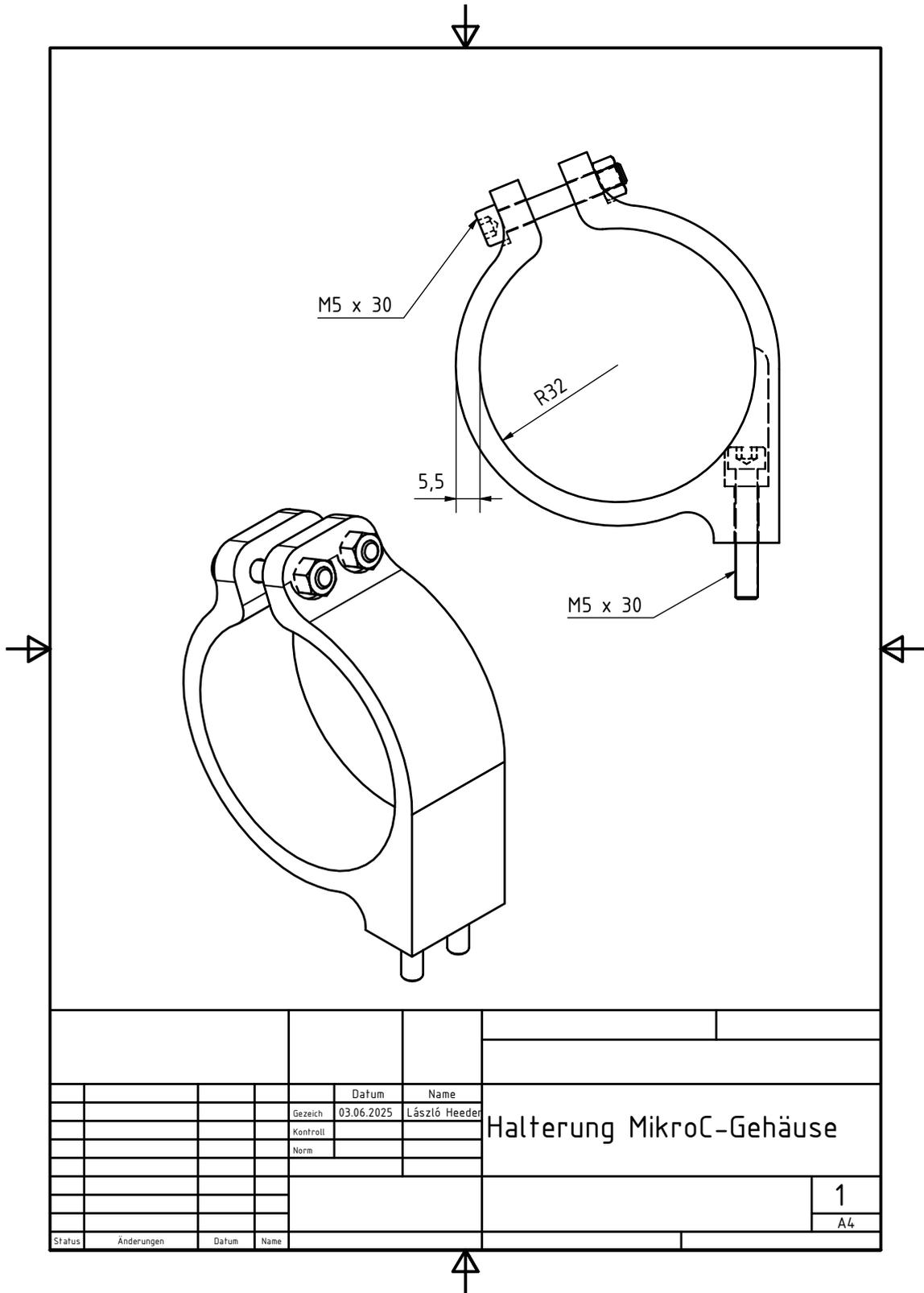


Abbildung C.16: Halterung Mikrocontrollergehäuse

D Datenblätter

Options

- Plastic (600 m) or titanium (7000 m) housing.
- SBE 43F Dissolved Oxygen Sensor (frequency-output version of our SBE 43).
- RS-232 or logic level (0 - 3.3 V) interface.
- XSG/AG or wet-pluggable MCBH connectors.

SBE 52-MP

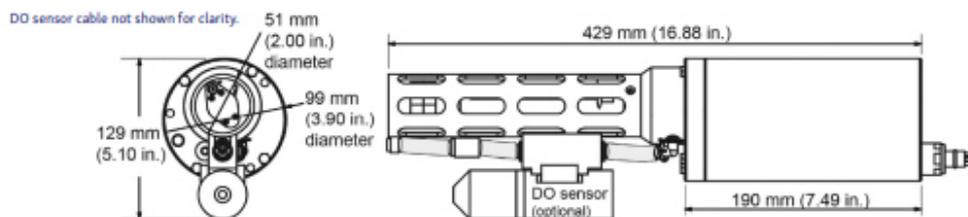
MOORED PROFILER CTD & OPTIONAL DO SENSOR

Field Specifications

The specifications below represent the expected performance of the instrument when deployed in the field. Under controlled circumstances in a lab, we would expect the instrument to outperform these specifications.

We have chosen to display field specifications to give our users a true measure of how Sea-Bird Scientific instruments perform in harsh environments and applications. It is critical to keep this in mind when comparing specifications with instruments from other manufacturers.

Measurement Range	
Conductivity	0 to 9 S/m (0 to 90 mmho/cm)
Temperature	-5 to 35 °C
Pressure	0 to 20 / 100 / 350 / 600 / 1000 / 2000 / 3500 / 7000 m
Dissolved Oxygen (optional)	120% of surface saturation (all natural waters, fresh & salt)
Initial Accuracy	
Conductivity	± 0.0003 S/m (± 0.003 mmho/cm)
Temperature	± 0.002 °C
Pressure	± 0.1% of full scale range
Dissolved Oxygen (optional)	± 2% of saturation
Typical Stability	
Conductivity	0.0003 S/m per month (0.003 mmho/cm per month)
Temperature	0.0002 °C per month
Pressure	± 0.05% of full scale range per year
Dissolved Oxygen (optional)	0.5% per 1000 hours (clean membrane)
Resolution	
Conductivity	0.00005 S/m (0.0005 mmho/cm) (most oceanic waters; 0.4 ppm in salinity)
Temperature	0.001 °C
Pressure	0.002% of full scale range
Dissolved Oxygen (optional)	0.035% of saturation (0.003 ml/l at 0 °C & 35 PSU)
Sampling Speed	
	1 Hz (1 sample/sec)
External Power Requirements	
	Input power: 3 Watts at 7-16 VDC (consult factory for voltage outside this range) Turn-on transient: 300 mA at 10V Sampling (includes pump): 62 mA at 10V
Memory	
	Static RAM stores up to 28,000 samples of C, T, P, & DO (if power removed, data in memory is lost)
Housing, Depth Rating, & Weight	
	Plastic, 600 m, in air 3.2 kg, in water 1.5 kg 3AL-2.5V Titanium, 7000 m, in air 5.3 kg, in water 3.7 kg



seabird.com | sales@seabird.com | +1 425-643-9866

Specifications subject to change without notice. ©2025 Sea-Bird Scientific. All rights reserved.

SBE 52-MP DS 5.3. May 25

Abbildung D.1: Technisches Datenblatt der CTD SBE 52-MP (Seabird Scientific) [44]

SBE 63 Optical Dissolved Oxygen Sensor

Performance

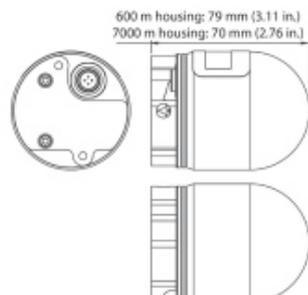
Measurement Range	120% of surface saturation in all natural waters (fresh and salt)
Initial Accuracy	larger of $\pm 3 \mu\text{mol/kg}$ (equivalent to 0.07 mL/L or 0.1 mg/L) or $\pm 2\%$
Sample-Based Drift	$< 1 \mu\text{mol/kg}/100,000$ samples (20 °C)
Resolution	0.2 $\mu\text{mol/kg}$
Response Time	(τ , 63% response): < 6 sec (20 °C)
Sampling Speed	1 Hz (1 sample/sec)

Electrical

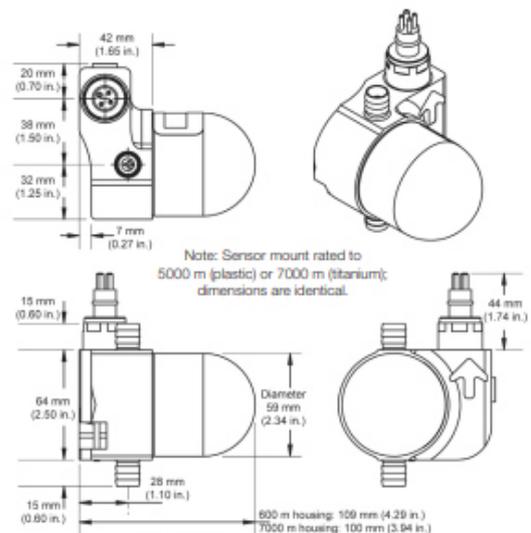
Input Power	6 - 24 VDC; 35 mA (0.08 J/sample)
Output Signal	RS-232, 600-115,200 baud (user-selectable), 8 data bits, no parity, 1 stop

Mechanical

SBE 63 sensor (weight in air)	600 m Plastic housing - 245 g 7000 m Titanium housing - 270 g
Optional sensor mount for SeaCAT (weight in air)	5000 m Plastic mount - 190 g 7000 m Titanium mount - 545 g



SBE 63 sensor for integration with SBE 37 ODO MicroCAT, or SBE 41 CTD for Navis and other Argo floats



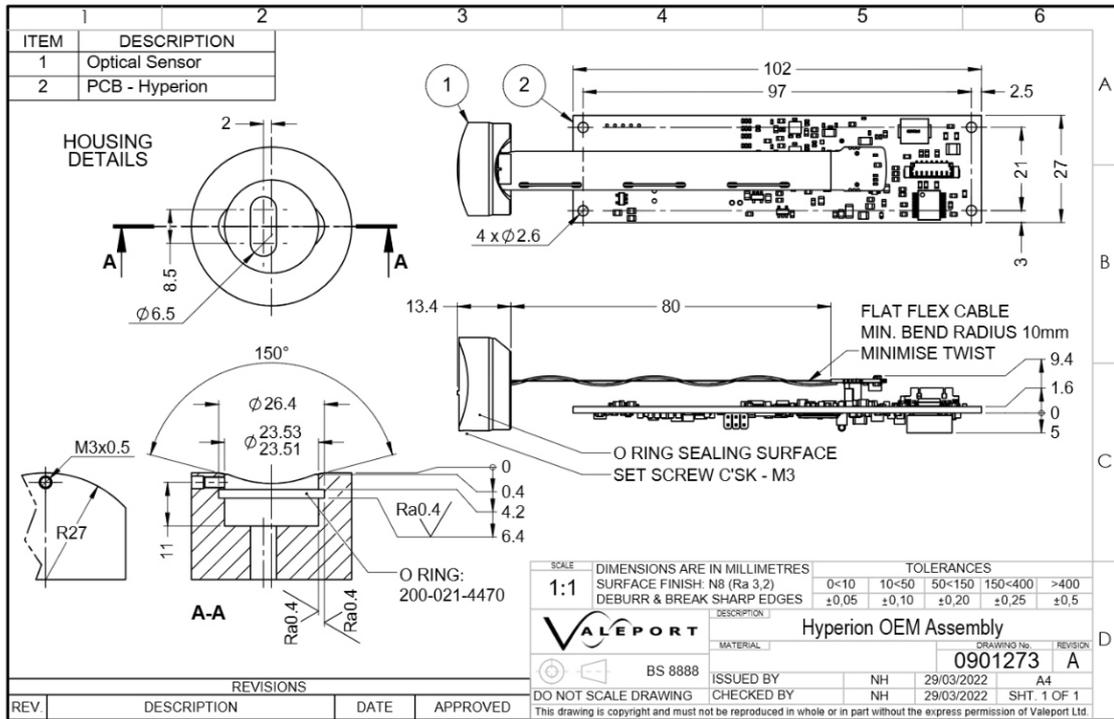
SBE 63 sensor installed in sensor mount for use with RS-232 auxiliary sensor channel on CTD

Specifications subject to change without notice. ©2014 Sea-Bird Scientific. All rights reserved. Rev. December 2014



Sea-Bird Electronics
+1 425-643-9866
sales@seabird.com
www.seabird.com

Abbildung D.2: Technisches Datenblatt der Optode SBE 63 (Seabird Scientific) [45]



Sensor Specification	
Chlorophyll a*	
Excitation	470 nm
Detection	696 nm
Dynamic Range	0-800 µg/l
Minimum Detection (3x SD in RD water)	0.025 µg/l
Linearity	0.99 R ²
Response Time	0.03 - 2 sec
Output Rate	0.5 Hz to 16 Hz (free running) software controlled

* Calibrated against Chlorophyll a in acetone solution

Physical	
Materials	Titanium with glass window
Depth Rating	6,000 m
Dimensions	Ø40 mm x 179.5 mm (including connector)
Weight	0.50 kg (in air) 0.26 kg (in water)
Operating Temperature	-5°C to 35°C (the sensor is damaged above 60°C)

Electrical	
External	9 - 28 VDC Isolated
Power	<600 mW
Connector	Sub-Conn MCBH6F

Communications	
The instrument will operate in real time, with set up performed by direct communications with a PC before deployment.	
RS232 RS485	2400 - 230400 baud rate 8 data bits 1 stop bit No Parity No Flow Control
USB	Supplied cable and converter (RS232 to USB)
Modbus RTU (standard)	19200 baud rate 8 data bits 1 stop bit Even Parity No Flow Control

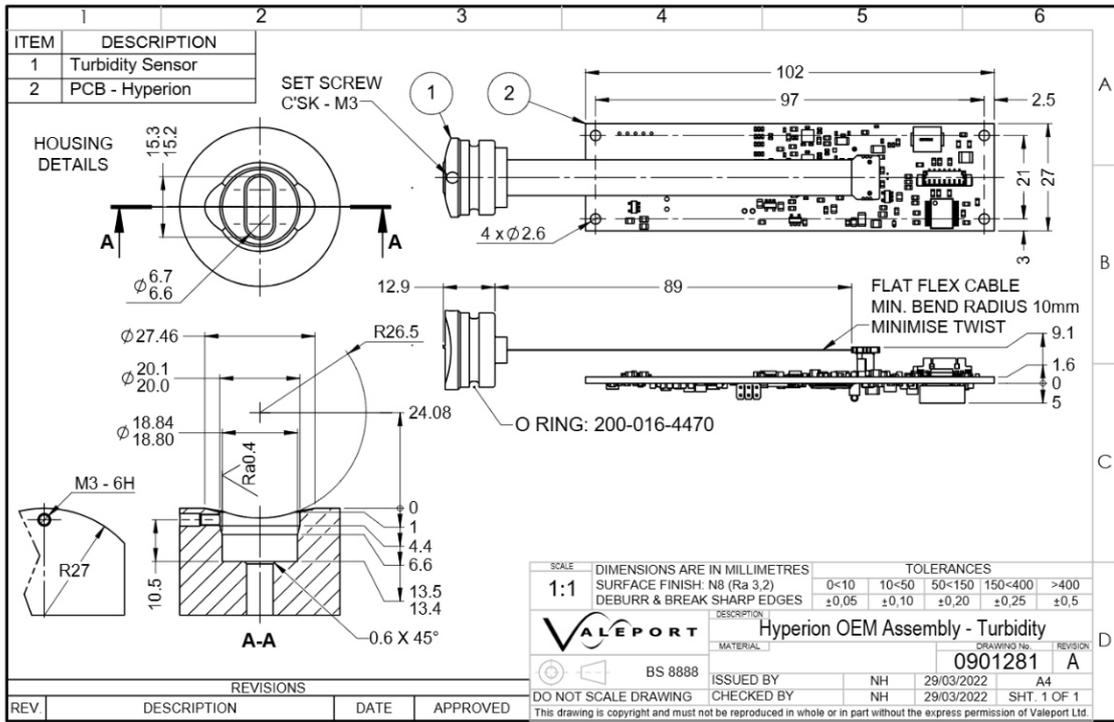
Software	
System is supplied with Configure Windows based PC software for instrument set up.	

Datasheet Reference: Hyperion Chlorophyll a | December 2024

As part of our policy of continuing development, Teledyne Valeport Ltd. reserve the right to alter at any time, without notice, all prices, specifications, designs and conditions of sale of all equipment - Teledyne Valeport Ltd © 2024



Abbildung D.3: Technisches Datenblatt des Chlorophyll-a-Sensors (Valeport) [46]



Sensor Specification	
Turbidity	
Dynamic Range	Nephelometer: 0 to 1,000 NTU - linear response OBS: 0 to 4,000 NTU - linear response >4,000 NTU has a non-linear monotonic response that allows derivation of higher values using look-up tables
Minimum Detection Level	0.03 NTU (Nephelometer)
Linearity	0.99 R ²
Physical	
Materials	Titanium with Sapphire window
Depth Rating	6,000 m
Dimensions	Ø40 mm x 179.5 mm (including connector)
Weight	0.50 kg (in air) 0.26 kg (in water)
Operating Temperature	-5°C to 35°C (the sensor is damaged above 60°C)

Electrical	
External	9 - 28 V DC Isolated
Power	<600 mW
Connector	SubConn MCBH6F
Communications	
The instrument will operate in real time, with set up performed by direct communications with a PC before deployment.	
RS232 RS485	2400 - 230400 baud rate 8 data bits 1 stop bit No Parity No Flow Control
USB	Supplied cable and converter (RS232 to USB)
RS485 Modbus RTU (standard)	19200 baud rate 8 data bits 1 stop bit Even Parity No Flow Control
Software	
System is supplied with Configure Windows based PC software for instrument set up.	

Datasheet Reference: Hyperion Turbidity | Decemeber 2024
 As part of our policy of continuing development, Teledyne Valeport Ltd. reserve the right to alter at any time, without notice, all prices, specifications, designs and conditions of sale of all equipment - Teledyne Valeport Ltd © 2024



Abbildung D.4: Technisches Datenblatt des Trübungssensors (Valeport) [47]

E Programmcode

30.05.25 10:29 C:\Users\lasz1\OneDri...\suche pa BA.m 1 of 1

```
%% Konstanten
pi = 0.1; % 1 bar = 0.1 N/mm^2
sigma_pom = 67; %MPa
ri = 20;
ra = 23.23;
di = 2 * ri;
da = 2 * ra;
s = ra-ri;
r = ri; % Schwächster Punkt liegt innen

%% Maximal zulässiger Außendruck nach GEH

syms pa real % pa = gesuchter äußerer Druck

% Radial-, Tangentiak- und Axialspannungen

sigma_r=-pi*(ri^2/(ra^2-ri^2))*((ra^2/r^2)-1)-pa*(ra^2/(ra^2-ri^2))*(1-(ri^2/r^2));
sigma_t=pi*(ri^2/(ra^2-ri^2))*((ra^2/r^2)+1)-pa*(ra^2/(ra^2-ri^2))*(1+(ri^2/r^2));
sigma_a = (pi * ri^2 - pa * ra^2) / (ra^2 - ri^2);

% GEH-Kriterium: Vergleichsspannung = sigma_pom

sigma_1 = sigma_r;
sigma_2 = sigma_a;
sigma_3 = sigma_t;

eqn_geh=1/sqrt(2)*sqrt((sigma_1-sigma_2)^2+(sigma_2-sigma_3)^2+(sigma_3-sigma_1)^2)
==sigma_pom;

% Gleichung lösen
pa_sol = solve(eqn_geh, pa);
pa_geh = double(pa_sol);

% Nur reelle und positive Lösungen
pa_geh = pa_geh(imag(pa_geh) == 0 & pa_geh > 0);

% Ausgabe in bar
fprintf('pa_max nach GEH: %.2f bar\n', pa_geh * 10);
```

Abbildung E.1: Programmcode zur numerischen Ermittlung des maximal zulässigen Außendrucks nach der GEH

Abbildung E.2: Programmcode zum Sensordatenmanagement

```
1 // SENSORDATENMANAGEMENT FÜR WISSENSCHAFTSMODUL
2 // -----
3 // Autor   : László Heeder
4 // Datum  : 04.06.2025
5
6 // Bibliotheken einbinden
7 #include <QNEthernet.h>
8 #include <Arduino.h>
9 #include <SD.h>
10 #include <TimeLib.h>
11
12 using namespace qindesign::network;
13
14 // Netzwerk-Konfiguration
15 IPAddress ip{192, 168, 0, 218}; // Statische IP-Adresse
16 IPAddress sn{255, 255, 255, 0}; // Subnetzmaske
17 IPAddress gw{192, 168, 1, 1}; // Gateway
18
19 EthernetServer server(23); // Telnet-Server-Port
20 EthernetClient client = server.available();
21
22 // Sensor-Schnittstellen definieren
23 #define CTD Serial1
24 #define OPTODE Serial2
25 #define FLUOROMETER Serial3
26 #define TURBIDITY Serial4
27 #define BAUD_RATE 9600
28
29 // SD-Karte
30 const int chipSelect = BUILTIN_SDCARD;
31 File dataFile;
32
33 // Zeitvariablen
34 unsigned long lastLogTime = 0;
35 const unsigned long logInterval = 1000;
36
37 // Sensorwerte-Puffer
38 static char CTDValues[45];
39 static char OPTODEValues[45];
40 static char FLUOROMETERValues[45];
41 static char TURBIDITYValues[45];
42
43 // Fallback-Werte bei fehlender Datenübertragung
44 const String CTDNaN = "NaN, NaN, NaN, NaN";
45 const String OptodeNaN = "NaN, NaN, NaN, NaN";
46 const String FluorometerNaN = "NaN,NaN,NaN,NaN,,NaN,,NaN,NaN";
47 const String TurbidityNaN = "NaN,NaN,NaN,NaN,,NaN,NaN,,NaN,NaN,NaN";
48
49 // Zähler
50 static int CTDCount = 0, OPTODECount = 0, FLUOROMETERCount = 0, TURBIDITYCount = 0;
51
52 // Letzte gültige Sensorwerte
53 String lastCTDData = CTDNaN;
54 String lastOPTODEData = OptodeNaN;
55 String lastFLUOROMETERData = FluorometerNaN;
56 String lastTURBIDITYData = TurbidityNaN;
57
58 bool lastOptodeWasNaN = false;
59 bool sdCardInitialized = false;
60 unsigned long startTime = 0;
61
62 // Setup -----
63 void setup() {
64     Serial.begin(BAUD_RATE);
65
66     // SD-Karte initialisieren
67     if (SD.begin(chipSelect)) {
68         sdCardInitialized = true;
69         Serial.println("SD-Karte initialisiert");
70     } else {
71         Serial.println("SD-Karte nicht verfügbar");
72     }
73
74     // Ethernet starten
75     if (!Ethernet.begin(ip, sn, gw)) {
```

```

76 | Serial.println("Keine Ethernetverbindung");
77 | return;
78 | } else{
79 | Serial.print("Der Telnet-Server befindet sich unter ");
80 | client.print("Der Telnet-Server befindet sich unter ");
81 | Serial.println(Ethernet.localIP());
82 | client.println(Ethernet.localIP());
83 | }
84 | }
85 |
86 | // Sensor-Schnittstellen öffnen
87 | CTD.begin(BAUD_RATE);
88 | OPTODE.begin(BAUD_RATE);
89 | FLUOROMETER.begin(BAUD_RATE);
90 | TURBIDITY.begin(BAUD_RATE);
91 |
92 | // Zeit vom RTC-Modul synchronisieren
93 | setSyncProvider(getTeensy3Time);
94 | if (timeStatus() != timeSet) {
95 |   Serial.println("RTC-Synchronisation erfolgreich");
96 |   client.println("RTC-Synchronisation erfolgreich");
97 | } else {
98 |   Serial.println("RTC-Synchronisation fehlgeschlagen");
99 |   client.println("RTC-Synchronisation fehlgeschlagen");
100 | }
101 |
102 | sendStartProfileCommand();
103 |
104 | // Header auf SD-Karte schreiben
105 | if (sdCardInitialized) {
106 |   dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
107 |   if (dataFile) {
108 |     dataFile.println("Timestamp , Cond., Temp., Press., DO, RPD, RTV, DO, Temp., NMEA ,IA,I,1st P
109 |     ,,ug/l,,,OM,CS , NMEA ,IA,I,1st P,,NTU,2st P ,,NTU,OM,CS");
110 |     dataFile.println(" ,[mmho/cm], [°C], [dbar], [ml/l], [ms], [V],[ml/l], [°C], , , , , , , ,
111 |     | , , , , , , , ");
112 |     dataFile.close();
113 |   }
114 | }
115 | // Header per Ethernet senden
116 | client.println("Timestamp , Cond., Temp., Press., DO, RPD, RTV, DO, Temp., NMEA ,IA,I,1st P ,,ug/l,,
117 | ,,OM,CS , NMEA ,IA,I,1st P,,NTU,2st P ,,NTU,OM,CS");
118 | client.println(" ,[mmho/cm], [°C], [dbar], [ml/l], [ms], [V],[ml/l], [°C], , , , , , , , , ,
119 | , , , , , ");
120 | }
121 |
122 | // Profilstart-Kommando an CTD senden
123 | void sendStartProfileCommand() {
124 |   CTD.println("startprofile");
125 | }
126 |
127 | // Zeitstempel setzen
128 | String getTimeStamp() {
129 |   char buffer[20];
130 |   sprintf(buffer, sizeof(buffer), "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d",
131 |   | | | | year(), month(), day(), hour(), minute(), second());
132 |   return String(buffer);
133 | }
134 |
135 | // \r\n am Zeilenende entfernen
136 | String removeNewline(String data) {
137 |   if (data.endsWith("\n")) data.remove(data.length() - 1);
138 |   if (data.endsWith("\r")) data.remove(data.length() - 1);
139 |   return data;
140 | }
141 |
142 | // Funktion zum Einlesen der Sensordaten
143 | String readSensorData(HardwareSerial &port, char *buffer, int &count, int size, String &lastValue,
144 | const String &defaultValue) {
145 |   while (port.available()) {
146 |     char c = port.read();
147 |     if (c == '\n') {
148 |       buffer[count] = '\0';
149 |       count = 0;
150 |       lastValue = String(buffer);
151 |       return lastValue;

```

```

152     }
153     if (count < size - 1) {
154         |   buffer[count++] = c;
155     }
156 }
157 return defaultvalue;
158 }
159
160 // Hauptprogramm -----
161 void loop() {
162
163     if (millis() - lastLogTime >= logInterval) {
164         |   lastLogTime = millis();
165
166         String CTDData=readSensorData(CTD, CTDValues, CTDCount, sizeof(CTDValues), lastCTDData, CTDNaN);
167         String FLUOROMETERData = readSensorData(FLUOROMETER, FLUOROMETERValues, FLUOROMETERCount,
168         sizeof(FLUOROMETERValues), lastFLUOROMETERData, FluorometerNaN);
169         String TURBIDITYData = readSensorData(TURBIDITY, TURBIDITYValues, TURBIDITYCount,
170         sizeof(TURBIDITYValues), lastTURBIDITYData, TurbidityNaN);
171
172         // Optode separat behandeln
173         String OPTODEData = OptodeNaN;
174         while (OPTODE.available()) {
175             char c = OPTODE.read();
176             if (c == '\n') {
177                 OPTODEValues[OPTODECount] = '\0';
178                 OPTODEData = String(OPTODEValues);
179                 OPTODECount = 0;
180                 break;
181             }
182             if (OPTODECount < sizeof(OPTODEValues) - 1) {
183                 |   OPTODEValues[OPTODECount++] = c;
184             }
185         }
186
187         // Fehlerbehandlung bei CTD
188         if (CTDData == CTDNaN) sendStartProfileCommand();
189
190         // Fehlerbehandlung bei OPTODE
191         if (OPTODEData == OptodeNaN) {
192             |   OPTODEData = lastOptodeWasNaN ? OptodeNaN : lastOPTODEData;
193             lastOptodeWasNaN = true;
194         } else {
195             lastOptodeWasNaN = false;
196             lastOPTODEData = OPTODEData;
197         }
198
199         // Zeilenenden entfernen
200         CTDData = removeNewLine(CTDData);
201         OPTODEData = removeNewLine(OPTODEData);
202         FLUOROMETERData = removeNewLine(FLUOROMETERData);
203         TURBIDITYData = removeNewLine(TURBIDITYData);
204
205         String dataLine = getTimestamp() + " , " + CTDData + " , " + OPTODEData + " , "
206         + FLUOROMETERData + " , " + TURBIDITYData;
207
208         Serial.println(dataLine);
209         if (client && client.connected()) client.println(dataLine);
210
211         // Daten auf SD-Karte schreiben
212         if (sdCardInitialized) {
213             dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
214             if (dataFile) {
215                 dataFile.println(dataLine);
216                 dataFile.close();
217             }
218         }
219     }
220 }
221
222 // RTC-Zeitfunktion
223 time_t getTeensy3Time() {
224     return Teensy3Clock.get();
225 }

```

F Sonstiges

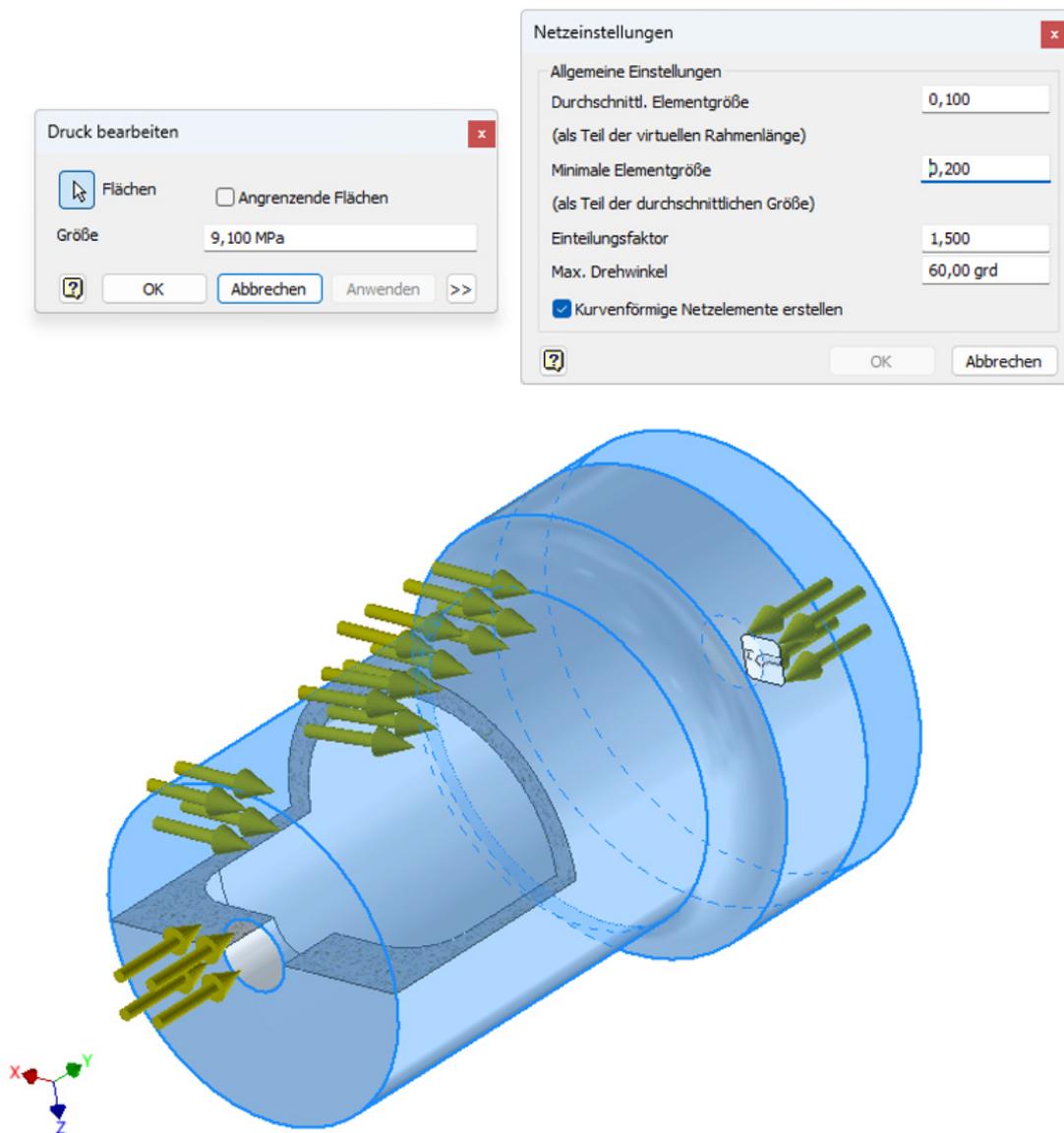


Abbildung F.1: Netzeinstellungen der FEM-Simulation in Inventor anhand des Mikrocontroller-Testgehäuses

Schichthöhe

Schichthöhe: 0.2 mm

Höhe der ersten Schicht: 0.2 mm

Breite der Linie

Standard: 0.42 mm

Erste Schicht: 0.5 mm

Außenwand: 0.42 mm

Innere Wand: 0.45 mm

Oberfläche: 0.42 mm

Füllung: 0.45 mm

Innere massive Füllung: 0.42 mm

Stützen: 0.42 mm

Naht

Nahtposition: Ausgerichtet

Smart scarf seam application:

Scarf application angle threshold: 155 °

Scarf around entire wall:

Scarf steps: 10

Scarf joint for inner walls:

Role-based wipe speed:

Präzision

Slice-Lückenschlussradius: 0.049 mm

Auflösung: 0.012 mm

Bogenanpassung:

X-Y-Loch-Kompensation: 0 mm

X-Y-Konturkompensation: 0 mm

Elefantenfußkompensation: 0.15 mm

Precise Z height:

Glätten

Glätten-Typ: Kein Glätten

Wandgenerator

Wandgenerator: Klassisch

Erweiterte Einstellungen

Reihenfolge der Wände: innen/außen

Zuerst die Füllung drucken:

Brücken Flussrate: 1

Wände

Wandlinien: 3

Dünne Wände erkennen:

Oberer/Untere Schichten

Muster der Oberfläche: Monotonisch... 4

Oberer Schalenschichten: 1 mm

Dicke der oberen Schale: Monotonisch 4

Muster der unteren Fläche: Monotonisch 4

Untere Schalenschichten: 0 mm

Dicke der unteren Schale: Geradlinig

Internes massives Füllmuster: Geradlinig

Füllung

Füllichte: 100 %

Füllmuster: Geradlinig

Länge des Füllungsankers: 400% mm or %

Maximale Länge des Füllungsankers: 20 mm or %

Erweiterte Einstellungen

Überlappung Füllung/Wand: 70 %

Richtung der Füllung: 45 °

Richtung der Brücke: 0 °

Mindestschwelle für Füllung: 15 mm²

Kombinieren der Füllung:

Erkennen einer schmalen internen soliden Füllung:

Sicherstellung der vertikalen Wanddicke:

Geschwindigkeit der ersten Schicht

Erste Schicht: 50 mm/s

Füllung der ersten Schicht: 105 mm/s

Geschwindigkeit der restlichen Schichten

Außenwand: 200 mm/s

Innere Wand: 300 mm/s

Kleine Wände: 50% mm/s oder %

Schwellenwert für kleine Wände: 0 mm

Füllung: 270 mm/s

Innere massive Füllung: 250 mm/s

Oberfläche: 40 mm/s

Verlangsamten bei Überhängen:

Überhangsgeschwindigkeit: 0 mm/s

over 100% wall (not bridge): 50 mm/s

Überbrückung: 50 mm/s

Lückenfüllung: 250 mm/s

Stützen: 150 mm/s

Stützstruktur-Schnittstelle: 80 mm/s

Fahrtgeschwindigkeit

Eilgang: 500 mm/s

Beschleunigung

Normales Drucken: 10000 mm/s²

Erste Schicht: 500 mm/s²

Außenwand: 5000 mm/s²

Innere Wand: 0 mm/s²

Oberfläche: 2000 mm/s²

Füllung: 100% mm/s² or %

Stützen

Stützstrukturen aktivieren:

Typ: Baum (auto)

Stil: Standard

Schwellenwinkel: 60 °

Nur auf Druckplatte:

Nur kritische Bereiche stützen:

Kleine Überhänge entfernen:

Floß: Floßschichten

Floßschichten: 0 Schichten

Filament für Stützen

Stütz-/Floßbasis: Standard

Stütz-/Floß Schnittstelle: PLA

Vermeiden Sie das Schnittstellenfilament für die Basis:

Erweiterte Einstellungen

Dichte der ersten Schicht: 90 %

Ausdehnung der ersten Schicht: 2 mm

Ausdehnung der ersten Schicht: 2 mm

Stützwandschlaufen: 0

Oberer Z-Abstand: 0 mm

Unterer Z-Abstand: 0.2 mm

Basismuster: Standard

Abstand des Grundmusters: 2.5 mm

Winkel des Musters: 0 °

Oberer Schnittstellenschichten: 2 layers

Untere Schnittstellenschichten: 2 layers

Schnittstellenmuster: Geradlinig ...

Oberer Schnittstellabstand: 0 mm

Normale Stützerweiterung: 0 mm

Stützen/Objekt XY-Abstand: 0.35 mm

Support/object first layer gap: 0.2 mm

Max Überbrückungslänge: 0 mm

Unabhängige Stützstruktur-Schichthöhe:

Abbildung F.2: Druckereinstellungen für 3D-Druck mit 100% Infill

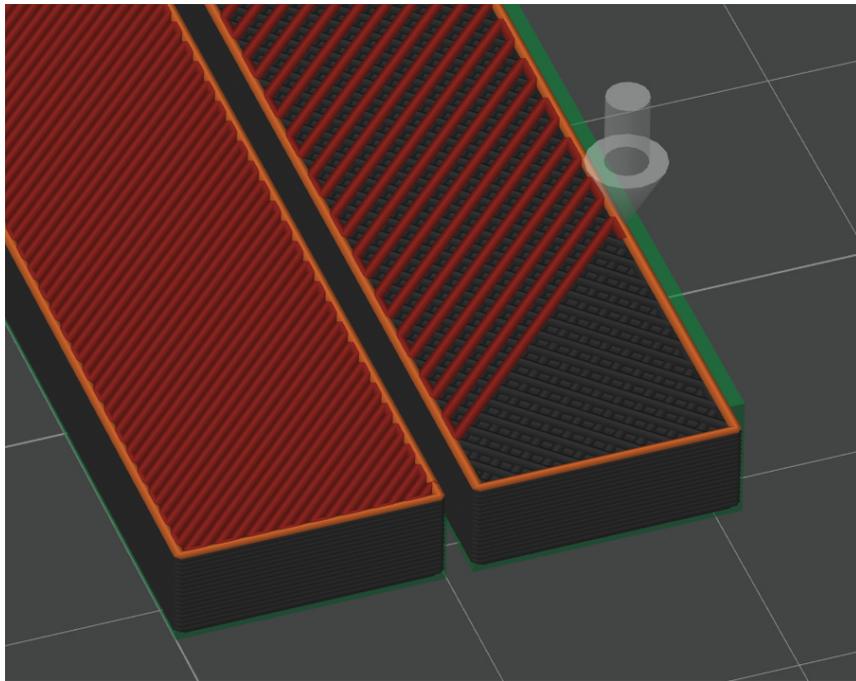


Abbildung F.3: Vorschau eines 3D-Drucks von Proben mit einem Infill von 50 % (rechts) und 100 % (links)