

Entwicklung eines raumflugfähigen Moduls zur optischen Untersuchung weicher Materie unter Schwerelosigkeit

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus–Senftenberg zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Raphael Keßler (M.Sc.)

geboren am

05.05.1989 in Völklingen

Vorsitzender: Prof. Dr. Bernd Beirow

Gutachter: Prof. Dr. Thomas Voigtmann

Gutachter: Prof. Dr. Christoph Egbers

Tag der mündlichen Prüfung: 14.03.2024

Kurzfassung

Mit dem Begriff „weiche Materie“ wird eine Stoffklasse bezeichnet, die uns im Alltag ständig und nahezu überall begegnet. Dennoch zählt die Erforschung solcher Materialsysteme zu einer noch recht jungen Disziplin moderner Materialforschung. Dem Ziel, ein besseres Verständnis und Vorhersehbarkeit mechanischer Eigenschaften zu gewinnen, gehen Kenntnisse über die innere Dynamik voraus. Die Dynamik in solchen Systemen wird dabei von vergleichsweise geringen Kräften getrieben, die bei Untersuchungen auf der Erde von dominant erscheinenden schwerkraftgetriebenen Phänomenen wie beispielsweise der Sedimentation überlagert werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung einer Anlage beschrieben, die eine modulare Experimentplattform auf einer Höhenforschungsrakete darstellt und Experimente zur Untersuchung weicher Materie unter nahezu gänzlicher Ausschaltung der Schwerkraft ermöglicht. Ein druckdichter und wiederverwendbarer Rumpf stellt den Experimenten auch während des Fluges atmosphärische Bedingungen zur Verfügung, wobei durch eine Luke nicht langzeitstabile Proben kurz vor Start der Rakete integriert werden können. Häufig genutzte Diagnostikelemente von Lichtstreuexperimenten und Servicesystemkomponenten zur Versorgung mit Energie und Informationen werden in eine Baugruppe gebündelt und über definierte Schnittstellen für Neuentwicklungen zugänglich gemacht, sodass deren Entwicklungszeiten verkürzt werden können.

Exemplarisch werden zwei Lichtstreuexperimente entwickelt und in das Modul integriert: Ein kolloidaler Teil, der die Bewegung aktiver Mikroschwimmer untersucht, und einen granularen Teil, bei dem Licht an Teilchen und Gasblasen gestreut wird.

Die phototaktisch getriebenen Mikroschwimmer zeigen ohne die auf der Erde unvermeidlichen Randschichteffekte unter Mikrogravitation eine messbar verschiedene Dynamik.

Mit einer kritischen Bewertung werden Verbesserungspotentiale aufgelistet, die teils im Zweitflug umgesetzt werden. Für zukünftige Anwendungen auf der Experimentplattform werden Ideen und Vorhaben im Kontext der Möglichkeiten aufgeführt, wobei der Nutzen und der Mehrwert eines wiederfliegenden Moduls an Hand von Ergebnissen aus den stattgefundenen Flügen manifestiert werden können.

Abstract

The term "soft matter" refers to a class of materials that we encounter constantly and almost everywhere in everyday life. Nevertheless, research into such material systems is still a relatively new discipline in modern materials research. The aim of gaining a better understanding and predictability of mechanical properties is preceded by knowledge of the internal dynamics. The dynamics in such systems are driven by comparatively small forces, which can be superimposed by seemingly dominant gravity-driven phenomena such as sedimentation during investigations on Earth.

This paper describes the development of a system that represents a modular experimental platform on a sounding rocket and enables experiments to investigate soft matter with almost complete elimination of gravity. A pressure-tight and reusable fuselage provides the experiments with atmospheric conditions even during the flight, whereby non-long-term stable samples can be integrated through a hatch shortly before the launch of the rocket. Frequently used diagnostic elements of light scattering experiments and service system components for the supply of energy and information are bundled into one assembly and made accessible for new developments via defined interfaces, so that their development times can be shortened.

As an example, two light scattering experiments are developed and integrated into the module: A colloidal part, which investigates the movement of active microswimmers, and a granular part, in which light is scattered by particles and gas bubbles.

The phototactically driven microswimmers exhibit measurably different dynamics under microgravity without the boundary layer effects that are unavoidable on Earth.

A critical evaluation lists potential improvements, some of which will be implemented in the second flight. For future applications on the experimental platform, ideas and plans are listed in the context of the possibilities, whereby the benefits and added value of a re-flying module can be manifested on the basis of results from the flights that have taken place.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung	- 1 -
2 Theoretische Grundlagen	- 4 -
2.1 Weiche Materie	- 4 -
2.3 Lichtstreuung	- 7 -
2.4 Allgemeines zu Mikrogravitationsplattformen	- 10 -
2.5 Höhenforschungsraketen	- 13 -
3 Entwicklung einer modularen Experimentplattform mit optischen Diagnostiken auf Forschungsraketen	- 20 -
3.1 Gesamtdarstellung der Experimentplattform	- 20 -
3.2 Entwicklung einer druckdichten Rumpfstruktur mit radialer Zugänglichkeit ...	- 21 -
3.2.1 Anforderungen	- 21 -
3.2.2 Analyse	- 30 -
3.2.3 Stand der Technik	- 31 -
3.2.4 Rumpfsektionen	- 34 -
3.2.5 Druckschotten	- 36 -
3.2.6 Luke	- 38 -
3.2.7 Umbilicals	- 44 -
3.2.8 Lagerungen	- 53 -
3.2.9 Durchführungen	- 55 -
3.3 Entwicklung der permanenten Experimentinfrastruktur	- 55 -
3.3.1 Anforderungen	- 56 -
3.3.2 Analyse	- 56 -
3.3.3 Auswahl der Komponenten	- 56 -
3.3.4 Integration in eine Baugruppe	- 60 -
3.4 Überprüfung	- 63 -
3.5 Zusammenfassung	- 63 -
4 Entwicklung des kolloidalen Experimentteils	- 64 -
4.1 Anforderungen an den kolloidalen Experimentteil	- 64 -

4.1.1 Probenumgebung	- 67 -
4.1.2 Diagnostiken	- 68 -
4.1.3 Lichtquellen	- 69 -
4.1.4 Schnittstellen	- 70 -
4.1.5 Speichersystem	- 70 -
4.2 Funktionsstruktur des kolloidalen Experimentteils	- 70 -
4.3 Morphologie prinzipieller Lösungsmöglichkeiten	- 71 -
4.3.1 Probenumgebung	- 71 -
4.3.2 Diagnostik	- 73 -
4.3.3 Lichtquellen	- 74 -
4.3.4 Schnittstellen	- 75 -
4.3.5 Speichersystem	- 76 -
4.3.6 Zusammenfassung	- 77 -
4.4 Bewertung der Teil-Lösungsmöglichkeiten	- 77 -
4.5 Lösungsprozess und Konstruktion	- 83 -
4.5.1 Probenumgebung	- 84 -
4.5.2 Diagnostik	- 91 -
4.5.3 Lichtquellen	- 96 -
4.5.4 Schnittstellen	- 101 -
4.5.5 Speichersystem	- 102 -
4.5.6 Zusammenfassung	- 103 -
5 Entwicklung des granularen Experimentteils	- 105 -
5.1 Anforderungen	- 106 -
5.1.1 Zelle	- 108 -
5.1.2 Lichterzeugung und -formung für die DLS	- 109 -
5.1.3 DLS Diagnostik	- 109 -
5.1.4 Licht zum optischen Abbilden	- 109 -
5.1.5 Baugruppen zur Speicherung und Einbringung der Teilchen	- 109 -
5.1.6 Baugruppen zur Speicherung und Einbringung des Gases	- 109 -
5.1.7 Baugruppen zum Ausgleich der Gas- und Flüssigkeitsvolumina	- 110 -
5.1.8 Elemente zur Erzeugung einer treibenden Strömung	- 110 -
5.1.9 Zusammenfassung der abgeleiteten Anforderungen	- 110 -
5.2 Funktionsstruktur	- 110 -
5.3 Morphologie	- 112 -

5.3.1 Morphologischer Kasten	- 112 -
5.4 Bewertungsmatrix	- 114 -
5.6 Konstruktion	- 117 -
5.6.1 Zelle A.....	- 117 -
5.6.2 Zelle B.....	- 119 -
5.6.3 Laser.....	- 120 -
5.6.4 Komponenten der Laserlichtdiagnostik	- 121 -
5.6.5 Komponenten der optischen Analyse.....	- 122 -
5.6.6 Hydraulischer Kreis	- 124 -
5.6.7 Pneumatischer Kreis	- 124 -
5.6.8 Datenspeicherung.....	- 126 -
5.7 Zusammenfassung.....	- 126 -
6 Steuerung und elektrische Schaltungen.....	- 129 -
6.1 Allgemeines zur Steuerung	- 129 -
6.2 Bedienoberfläche des Steuergeräts	- 131 -
6.2.1 Allgemeiner Teil des Steuergeräts.....	- 132 -
6.2.2 Granulatexperiment.....	- 133 -
6.2.3 Kolloidexperiment	- 133 -
6.3 Automatik im Flugmodus	- 136 -
6.4 Remoteoberflächen	- 137 -
6.4.1 Bordrechner 1.....	- 137 -
6.4.2 Bordrechner 2.....	- 138 -
7 Flugvorbereitung und Durchführung	- 139 -
7.1 Benchttest.....	- 139 -
7.2 Umwelttest.....	- 139 -
7.3 Flugkampagne	- 140 -
7.3.1 Payload Preparation.....	- 141 -
7.3.2 Com-Checks.....	- 141 -
7.3.3 Flugsimulation	- 142 -
7.3.4 Test- und Hot Count Down.....	- 142 -
7.3.5 Recovery	- 144 -
7.3.6 Datentransferierung.....	- 144 -
8 Ergebnisse	- 145 -
8.1 Rumpf und Struktur.....	- 145 -

8.2 Kolloidaler Experimententeil	- 147 -
8.3 Granularer Experimententeil	- 147 -
9 Bewertung	- 149 -
9.1 Bewertung der Rumpfstruktur und der permanenten Infrastruktur	- 149 -
9.2 Bewertung des kolloidalen Experimententeils	- 154 -
9.3 Bewertung des granularen Experimententeils	- 157 -
9.4 Zusammenfassung	- 161 -
10 Ausblick	- 162 -
11 Zusammenfassung	- 163 -
Anhang	VII
Anhang A – Herleitung der Linsengeometrie	VIII
Anhang B – Auswahl des Harzes	XIV
Anhang C – Bestimmung der Brechzahlen	XVII
Anhang D – Anmerkungen zur Eloxiervorgabe der Rumpfsektionen ..	XVIII
Anhang E – Maß- und Toleranzvorgaben zur Konstruktion der Rumpfsektionen	XIX
Anhang F – Bilder zur Verdeutlichung	XX
Literaturverzeichnis	XXIII
Tabellenverzeichnis	XXV
Abbildungsverzeichnis	XXVI
Danksagung	XXX

1 Einleitung

Die Gravitation ist der einzige konstante Reiz, der während der Evolution die Entwicklung des Lebens, so wie wir es kennen, beeinflusst hat (1). Alle anderen Bedingungen, seien es der Druck, die Temperatur oder die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre, Licht- und UV Einstrahlung veränderten sich im Laufe der Zeit, sodass sich das Leben darauf anpassen musste. Eine Änderung der Gravitation kann in biologischen Systemen große Störung verursachen, z. B. ändern sich Gen-Regulationsmechanismen in einfachen Lebewesen (2), was auch für das Wachstum von Krebszellen relevant ist. Inspiriert von biologischen Systemen wird das gravitationsabhängige Verhalten – Gravitaxis – künstlicher Zellen und kolloidaler Mikroschwimmer untersucht (3), (4). Dies begründet das Forschungsfeld der „aktiven weichen Materie in Schwerelosigkeit“.

Dabei ist das Beobachten schwerkraftgetriebener Phänomene nicht nur auf biologische Systeme beschränkt, sondern erstreckt sich praktisch auf die gesamte Natur. Obwohl die Schwerkraft den Menschen seit seiner gesamten evolutionären Geschichte begleitet, ist das Bewusstsein über sie noch relativ jung. Zur Zeit von Newton war es eine allgemeine Ansicht, dass die Natur in anderen Teilen des Universums anderen Gesetzen gehorchen würde als auf der Erde (5). Aufbauend auf den Erkenntnissen von Johannes Kepler entwickelte Newton um 1666 das universelle Gravitationsgesetz, was zusammen mit den drei Bewegungsgesetzen klar machte, dass die Natur überall denselben Regeln folgte. Dieses neue Weltbild über die Natur leitete den Beginn der Klassischen Physik ein. Zahlreiche darauffolgende Forschungsarbeiten formten das heute bestehende und sich weiterentwickelnde Weltbild.

So überlagert sich in physikalischen Systemen die Schwerkraft mit anderen Kräften zu einer resultierenden Gesamtkraft, die die Bewegung von Körpern veranlasst. Dabei können andere Kräfte im Vergleich zur Schwerkraft sehr gering sein, sind jedoch dennoch von großer Bedeutung zum Grundlagenverständnis und möglicher technischer Manipulation eines Systems. So unterliegen beispielsweise kolloidale Suspensionen je nach Dichteverhältnis zwischen Festkörpern und Medium eines Auftriebs oder Sedimentation. Neben der gerichteten Bewegung entlang des Schwerkraftvektors beeinflussen Wechselwirkungen und Reibung an den Grenzflächen das dynamische Verhalten der zwei-Phasen Gemische. Um solche Kräfte isoliert zu betrachten, muss die Schwerkraft ausgeschaltet werden. Eine vollständige Ausschaltung ist bis heute nicht möglich und in den meisten Fällen auch nicht nötig. So bieten sogenannte Mikrogravitationsplattformen wie Falltürme, Parabelflüge, Forschungsraketen und Satelliten eine gewisse Qualität der Herabsetzung der Schwerkraft. Erreicht werden dabei zwischen 10^{-4} bis $10^{-7}g$ (6). Experimentellen Untersuchungen auf solchen Plattformen gehen in der Regel ausgiebige Vorbereitungen mit einem hohen Automatisierungsgrad voraus. Mit gezielten wissenschaftlichen Fragestellungen, deren Erkundung ein Herabsetzen der Schwerkraft bedingt, lassen sich technische Anforderungen formulieren und Anlagen entwickeln, die eine Umgebung erschaffen, physikalische Untersuchungen entsprechend der Möglichkeiten und Grenzen einer Plattform durchzuführen.

Weiche Materie stellt eine Stoffklasse dar, deren Eigenschaften sehr von der Schwerkraft geprägt sind. Definitionsgemäß handelt es sich um Stoffe, deren mechanische Modulen im Bereich von Pa bis zu wenigen MPa liegen, sodass thermische Fluktuationen und bereits moderate externe Kräfte große Auswirkungen haben. In der Regel handelt es sich um Systeme, bei deren Strukturelemente auf μm -Skalen relevant sind. Daher ähneln sich die zur Untersuchung mit optischen Methoden nötigen Diagnostikelemente oftmals, sodass diese für eine Vielzahl an Proben benutzt werden können.

Zielstellung der Arbeit

Zielstellung der Arbeit ist es eine modulare Experimentumgebung auf einer Forschungsrakete zu entwickeln, mit der unterschiedliche Proben weicher Materie unter Mikrogravitationsbedingungen untersucht werden können.

Der Entwicklung eines Experimentes, welches auf den Raketen im Höhenforschungsraketenprogramm MAPHEUS (Materialphysikalische Experimente unter Schwerelosigkeit) Verwendung findet, gehen in aller Regel, wie bereits erwähnt eine oder mehrere wissenschaftlichen Fragestellungen voraus. Es liegt dabei in der Verantwortung des Konstrukteurs technische Lösungen zu erarbeiten, die die Anforderungen aus dem wissenschaftlichen Anspruch an das Experiment und den erschwerten Bedingungen einer Raketen- und Mikrogravitationstauglichkeit vereinen. Letztere stellen insbesondere der stark eingeschränkte zur Verfügung stehende Bauraum, die aus den Beschleunigungen resultierenden Trägheitskräfte, der Thermalhaushalt bei Abwesenheit der Schwerkraft und die Bedienbarkeit bis hin zu einem völlig autarken Prozessieren der Untersuchungsgegenstände dar. Diesen Umständen geschuldet fällt oftmals das Ergebnis des Konstruktionsdesigns eines Experiments technisch hochspezialisiert auf eine konkrete Probenumgebung aus. Dabei sei bemerkt, dass selbst bei der Beantwortung einer wissenschaftlichen Fragestellung durch die Ergebnisse eines Flugexperiments neue, auf den Ergebnissen aufbauende Fragestellungen generiert werden können. Eine geometrische Veränderung als auch ein verschiedenes Prozessieren der zu untersuchenden Proben bei einem möglichen Wiederflug bedarf dann, aufgrund der hohen technischen Spezialisierung, eine zeit- und kostenaufwendige konstruktiven Revision.

Weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, eine auch wiederflugfähige, modulare Experimentumgebung zu schaffen, die es ermöglicht, unterschiedliche Experimente an weicher Materie auf Höhenforschungsraketen durchzuführen und dabei notwendige Neukonstruktionen auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Dabei sollen Diagnostiken verwendet werden, die eine Variabilität für unterschiedliche Untersuchungen an weicher Materie ermöglichen. Damit lassen sich zukünftig unter verkürzter Entwicklungszeit Probensysteme gestalten, die auf erprobter und getesteter Flughardware in Mikrogravitationsumgebung gebracht werden können. Abstrakter kann das Verständnis dahin gehen, ein Umfeld zu erschaffen, das es ermöglicht experimentelle Untersuchungen unter erdgebundenen Laborbedingungen Eins-zu-eins in Mikrogravitation durchzuführen, um den Einfluss dieser zu verstehen. Der sonst zwanghaften Bindung einzelner Raketenmodule an spezielle Probensysteme soll damit entgegengewirkt werden.

Die Gestaltung eines wiederflugfähigen Moduls beschränkt sich jedoch nicht nur auf den wissenschaftlichen Experimententeil, insbesondere dann nicht, wenn man der Idee der kurzfristigen Realisierung eines neuen Probensystems Rechnung tragen will. Die rauen Umweltbedingungen eines solchen Fluges stellen hohe Belastungen an die umgebende und mechanisch tragende Hülle des Experiments dar. Ein Wiederflug mit möglichst geringem technischem Mehraufwand bedingt daher sowohl eine gewisse Langlebigkeit bzw. Wiederverwendbarkeit der Bauteile als auch einen geringen Aufwand für die Instandhaltung.

Methodik

Es werden zunächst grundlegende Sachverhalte zu Lichtstreuexperimenten und zum allgemeinen Bau von Experimenten auf Höhenforschungsraketen sowie der Stand der Technik diskutiert. Damit soll ein Verständnis für die technischen Problemstellungen bei der Entwicklung geschaffen werden. Abweichend von der Reihenfolge einer Entwicklung gemäß der VDI Richtlinie 2222 – Vorgehensplan zur Erschaffung neuer Produkte, wird die Gesamtanlage mit ihren unmittelbar untergeordneten Unterbaugruppen vorgestellt, um dem

Leser anfangs eine bessere Orientierung zu gewähren. In den darauffolgenden Schritten werden diese Unterbaugruppen näher behandelt. Dabei ergeben sich einige Anforderungen, die anfänglich nicht geklärt werden können. Sie ergeben sich mit dem Fortschritt benachbarter Baugruppen und können nur in iterativen Entwicklungszyklen ermittelt werden. Übersichtshalber werden mit Verweis auf einen Vorgriff solche Anforderungen mit aufgeführt und späteren Verlauf geklärt.

Bei der Analyse werden die vorliegenden technischen Probleme in Teilprobleme zerlegt und die notwendigen Funktionen, die zur Gesamterfüllung der Anforderungen führen sollen, ermitteln zu können. Nach Klärung der Teilfunktionen werden prinzipielle Umsetzungen miteinander verglichen und anschließend gegeneinander bewertet. Es folgt die konstruktive Umsetzung der Variante, die sich technisch als die günstigste ergibt. Der sonst in der Entwicklung üblich folgende Teil der Zusammenführung der Teillösungen wird wie bereits erwähnt im Vorfeld zur besseren Übersichtlichkeit dargestellt.

2 Theoretische Grundlagen

Die in diesem Kapitel behandelten Themen sollen einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik bieten und dem Verständnis nachfolgender Kapitel dienen. Neben der Ausführung der wissenschaftlichen Untersuchungsgegenstände sowie der dafür notwendigen Diagnostiken wird auch ein allgemeiner Überblick über die Entwicklung von Experimenten unter Mikrogravitationsbedingungen, insbesondere derer von Höhenforschungsraketen gegeben.

2.1 Weiche Materie

Unter weicher Materie kann Materie verstanden werden, deren Kräfteverhältnisse des G-Moduls vergleichbar mit Kräfteverhältnissen sind, die wir im Alltag leicht ausüben können. Die Module liegen dabei im Bereich von Pa bis hin zu einigen kPa, jedoch deutlich unter den Modulen von harter Materie im GPa-Bereich. Der Schermodul ist das Verhältnis der relevanten Energie zum relevant betrachteten Volumen eines Teilchens:

$$G \sim \frac{\text{relevante Energie}}{\text{relevantes Volumen eines Teilchens}} = \frac{\kappa_B T}{(\text{Strukturlänge})^3}$$

Beschreibbar ist ein Längenskalen Bereich, in dem von weicher kondensierter Materie und dessen Eigenschaften gesprochen werden kann. Er stellt den mesoskopischen Übergangsbereich zwischen mikroskopischen und makroskopischen Skalen dar.

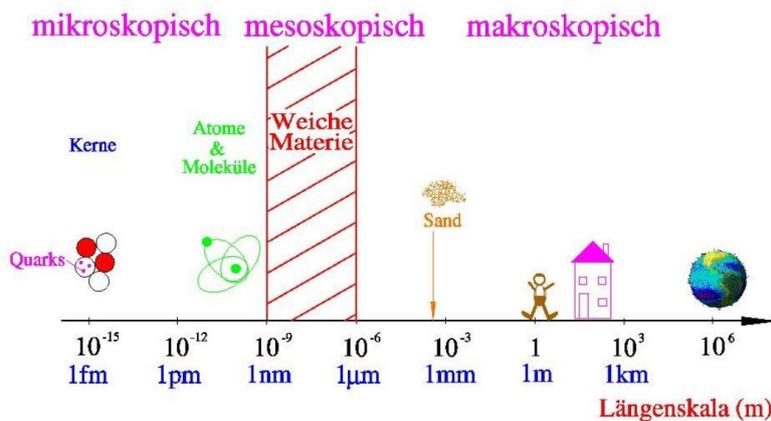


Abbildung 1: Größenordnung weicher Materie (7)

Ist der Schermodul G größer als der Kompressionsmodul E , sind die Bestandteile eines Materials leicht durch Abscherung in ihrer Ordnung zueinander veränderbar. Fluide erfüllen diese Bedingungen. Werden zudem makroskopische Teilchen in ein solches Fluid suspendiert, ist das Verhalten der Suspension von deren Ordnung abhängig. Damit lässt sich eine Charakterisierung eines solchen Stoffgemisches durch einen Aggregatzustand nicht ohne Kenntnis über die innere Verteilung der makroskopischen Bestandteile beschreiben. Zur Veranschaulichung können Gemische aus Sand aufgeführt werden. Makroskopische

Sandteilchen sind in einem Sandsturm so in einem Gas, d. h. Luft verteilt, dass das Gemisch in seinen Eigenschaften denen eines Gases entspricht. In Wasser verteilt ähnelt ihr Fließverhalten einer Flüssigkeit. Sie können aber auch so verpresst werden, dass ihre Wechselwirkungen untereinander zu einer festen äußeren Struktur führen und damit mit einem Festkörper am ehesten beschrieben werden können.

Es gibt unzählige weitere Beispiele in der Natur, insbesondere in biologischen Systemen, aber auch in künstlich erschaffenen technischen Anwendungen. Zum Erlangen eines grundsätzlichen Verständnisses solcher Systeme ist es von Vorteil, die Komplexität so gering wie möglich zu halten und vereinfachte Modellsysteme zu betrachten. Die in dieser Arbeit beschriebenen Modellsysteme sind zum einen Kolloide in Form von Mikroschwimmern in einer Lösung und granulare Polystyrol Teilchen in Wasser, deren makroskopischen Eigenschaften mit Gasblasen verglichen werden sollen.

2.2 Kolloide

Kolloide zählen zu der Klasse von weicher Materie, bei denen thermische Fluktuationen stark genug sind, um auf der Zeitskala der Beobachtung Brownsche Bewegung zu erzeugen.

Der Begriff Kolloid leitet sich aus dem Altgriechischen ab und kann mit „leimartig“ übersetzt werden. Ohne ein allzu starres Schema von Definition anzustreben, werden in (8) Kolloide als Zwischenstadium der Materie, welches zwischen der makroskopischen Volumenphase und molekular-dispersen Systemen liegt, beschrieben.

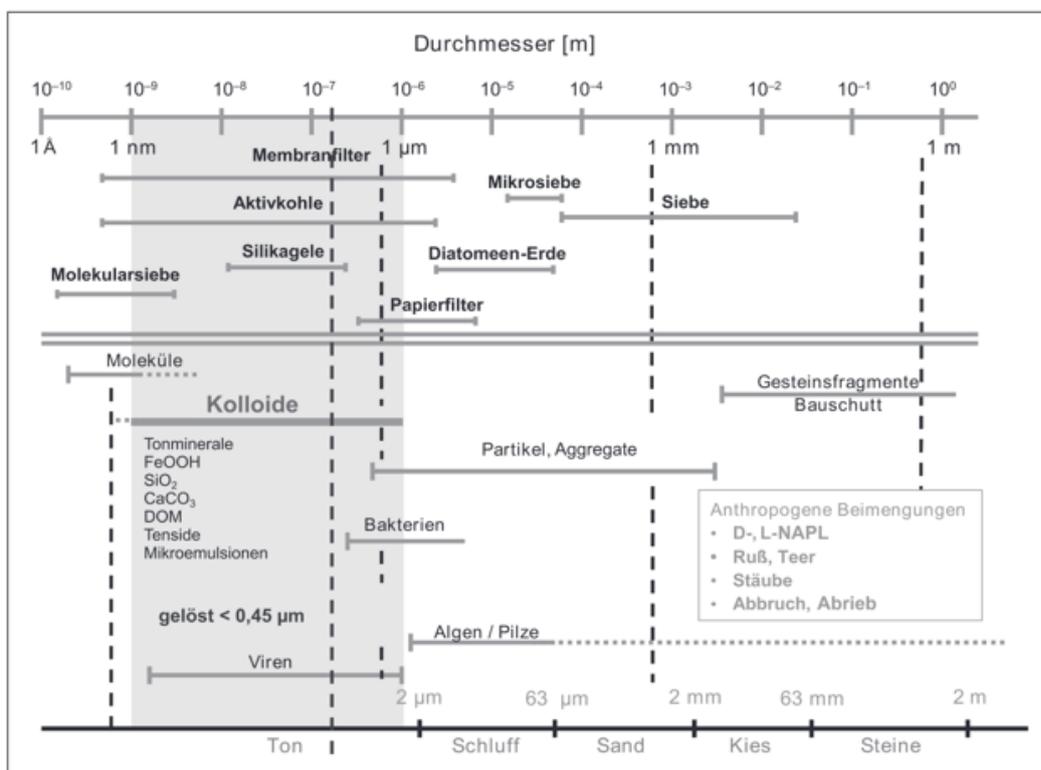


Abbildung 2: Größenspektrum von Bodenbestandteile

Dabei können sowohl die disperse Phase als auch das Dispersionsmedium in allen Aggregatzuständen vorliegen. Tabelle 1 verschafft einen Überblick über kolloidale Stoffsysteme.

Disperse Phase	Dispersionsmedium	Kolloid	Beispiele
Flüssigkeit	Flüssigkeit	Emulsionen, Mikroemulsion	Milch, Blut, Mayonnaise, Kosmetika
Gas	Flüssigkeit	Mikroschaum	Schlagsahne
Feststoff	Flüssigkeit	Sol, auch: kolloidale Suspension, kolloidale Lösung	Tinte, Schlamm, Kaffee, kolloidales Gold oder kolloidales Silber
Flüssigkeit	Gas	Aerosol	Nebel
Feststoff	Gas		Rauch
Flüssigkeit	Feststoff	Festemulsion	Materialfeuchte, etwa in Holz
Gas	Feststoff	Festschaum	Schaumstoff, Milchquarz
Feststoff	Feststoff	Festsuspension	Spezielle Verbundwerkstoffe, Farbstoff/ Pigmente in Kunststoff, Gold-Rubin-Glas, Opalglas

Tabelle 1: Varianten kolloidaler Medien nach Aggregatzuständen (9)

Als ein spezielles Modellsystem werden hier konkret sogenannte Janusteilchen in einer Lösung aus Wasser und 2,6- Lutidin betrachtet.

Aktive Kolloide

Zur Untersuchung biologischer Aspekte mit künstlich hergestellten, wohl kontrollierten Modellsystemen haben sich kolloidale Suspensionen von „Mikroschwimmern“ aus sogenannten Janus-Teilchen etabliert (10).

Janus Teilchen sind künstlich hergestellte Partikel. Die in der vorliegenden Arbeit verwendetet Teilchen sind aus SiO_2 . Sie haben einen Durchmesser von 1,8 μm und sind mit einer 20 nm dicken Kohlenstoffschicht einseitig beschichtet. Dadurch weisen die Teilchen eine helle, reflektierende Seite und eine durch den Kohlenstoff dunklere Seite auf. Sie haben damit zwei unterschiedliche Adsorptionskoeffizienten auf ihren Hemisphären, womit die Bezeichnung Janus als ein aus der römischen Mythologie bekannter Gott mit zwei Gesichtern abgeleitet wird. Die Teilchen werden in ein Gemisch aus Wasser und 2,6 Lutidin suspendiert. In Abhängigkeit von der Lösungsmittelkonzentration und der Temperatur liegt das Gemisch als eine Lösung oder Emulsion vor.

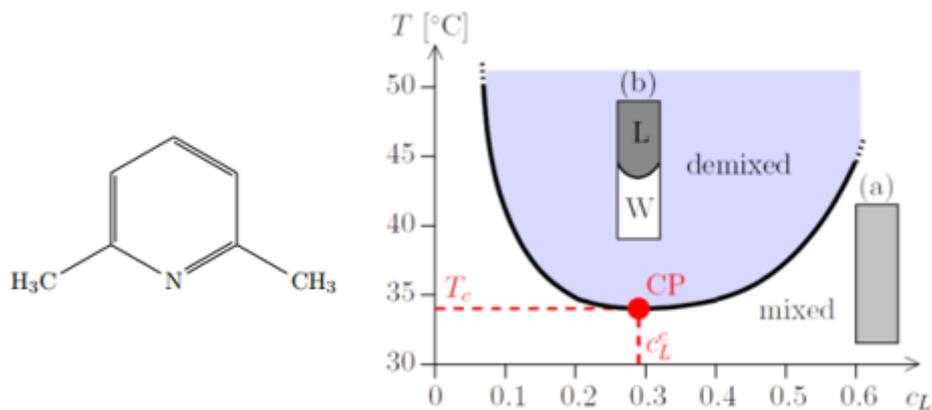


Abbildung 3: Phasendiagramm Wasser-2,6-Lutidin

Abbildung 3 zeigt das Zustandsdiagramm des Wasser-2,6-Lutidin Gemisches. Bei einer zuvor fest eingestellten und hier verwendeten Massenkonzentration von 0,28 liegt das Gemisch unterhalb von der kritischen Temperatur von $T_{krit} = 34\text{ °C}$ als Lösung vor, oberhalb als zwei Phasen.

Wird nun die Suspension mit einem Licht beleuchtet, dessen Wellenlänge stärker von der kohlenstoffbedampften Seite absorbiert wird als von der hellen unbeschichteten Seite, so steigt die Temperatur in der Peripherie um die dunkle Kappe. Bei entsprechender Regelung der Prozesstemperierung kann so erreicht werden, dass die Wasser-2,6-Lutidin Lösung eine Zone mit den entmischten zwei Phasen bildet. Dieser Konzentrationsgradient um das Teilchen sorgt für eine Strömung, womit dieses sich aktiv bewegt.

Die aktive Bewegung unterscheidet sich von der passiven dadurch, dass über einen hinreichend langen Zeitpunkt gemittelt sich ein Teilchen von seinem Verharrungsschwerpunkt wegbewegt. Beim sogenannten „random walk“ bewegen sich die Teilchen in einer nicht vorhersehbaren Richtung. Die aktive Bewegung entspricht in zahlreichen Aspekten der Schwimmbewegung von Mikroorganismen. Suspensionen aus Janusteilchen sind deshalb bevorzugte Modellsysteme zur Untersuchung biophysikalischer Grundlagen. Sie bieten also auch die Perspektive, neue, responsive aktive Materialien herzustellen.

Bis zum heutigen Zeitpunkt sind keine Systeme aktiver künstlicher Schwimmer bekannt, bei der die disperse Phase und das Dispersionsmedium in ihren Dichten gleichen. Somit lässt sich die Dynamik der Partikel unter Schwerkrafteinfluss nur in zwei Dimensionen untersuchen.

2.3 Lichtstreuung

Lichtstreuung ist ein in der Natur vorkommendes Phänomen. Wenn Licht auf Materie trifft, kann es seine Richtung ändern und damit in verschiedene Richtungen gestreut werden. Der Effekt der Lichtstreuung ist also auf die Wechselwirkung zwischen Licht und Teilchen in der Materie zurückzuführen. Dabei findet Lichtstreuung auch in zahlreichen technischen Anwendungen eine wichtige Rolle.

In der Medizin werden Diagnostiken mittels Streulicht eingesetzt um Informationen über die mikroskopische Struktur von Gewebe zu erhalten, was zur Erkennung und Behandlung von Krankheiten eine wichtige Rolle spielt (11).

Auch zur Umweltüberwachung werden als weiteres Beispiel Streulichtmessgeräte zur Erfassung von Partikeln in der Luft genutzt.

In der Materialwissenschaft werden mittels Lichtstreuung nanoskopische Strukturen in transparenten Materialien untersucht, indem Informationen über deren Größe, Form und Verteilung gewonnen werden.

Das Lichtstreuexperiment wertet dabei Informationen über Strukturordnungen auf einer Längenskala die vergleichbar mit der Wellenlänge der gestreuten Welle ist. Für sichtbares Licht, also Wellenlänge im Bereich $\lambda = [300; 800] \text{ nm}$, zeigt sich eine Eignung im Größenbereich der Kolloide und weiche Materie.

Es gibt mehrere Möglichkeiten Lichtstreuung zu unterteilen. In der vorliegenden Arbeit sollen Probensysteme sowohl mit statischer und dynamischer Lichtstreuung untersucht werden. Diese Unterteilung bezieht sich auf die zeitliche Stabilität oder der Variation der gestreuten Lichtmuster.

Statische Lichtstreuung

Bei der statischen Lichtstreuung wird Licht an Partikeln gestreut, die ihre Position und Eigenschaft über die Zeit nicht verändern. Die dabei detektierten Streumuster geben Aufschluss über die Größe, Form und optischen Eigenschaften der Teilchen und enthalten damit Informationen über die innere Struktur der analysierten Materie.

Experimente zur statischen Lichtstreuung umfassen in der Regel folgende grundlegende Komponenten:

- Lichtquelle: Die Lichtquelle sollte in ihrer Intensität zeitlich stabil sein und je nach Anwendung monochromatisches oder polychromatisches Licht emittieren. Laserdioden oder LED Emitter in bestimmten Ausführungen stellen solche Lichtquellen dar.
- Streuobjekt: Das Streuobjekt stellt für gewöhnlich die eigentliche Probe dar. Es enthält die Partikel oder die strukturierte Materie, an der das einfallende Licht gestreut wird. Dabei kann die Probe eine Küvette mit einer Suspension von Partikeln oder eine feste Oberfläche mit periodischen Strukturen sein.
- Detektor: Mit dem Detektor wird das von der Probe gestreute Licht unter bestimmten Winkel erfasst und gemessen. Je nach Anforderung an das Experiment können dies Photodioden, Photomultiplier oder ein CCD Sensor sein.
- Optik: Mit optischen Elementen wie Linsen, Spiegel, Filter oder Strahlformer wird zum einen das gestreute Licht zum Detektor gelenkt, aber auch unter Umständen von der Lichtquelle zur Probe geformt.
- Messgerät: Die vom Detektor erfassten Informationen in Form von Signalen werden von einem Messgerät weiterverarbeitet und gegebenenfalls auch gespeichert. Für eine möglichst breite Anwendungsvielfalt bieten sich hier PCs an.

Weitere Bauteile können je nach den spezifischen Anforderungen des Experiments variieren. So können zusätzliche Komponenten wie eine Temperaturkontrolleinheit notwendig sein. Erwähnenswert ist auch eine geeignete Experimentumgebung. Störeinflüsse wie Vibrationen

oder einfallendes Umgebungslicht nehmen Einfluss auf die Messdaten und können die Analyse verfälschen. Abbildung 4 zeigt das Prinzip der statischen Lichtstreuung (12).

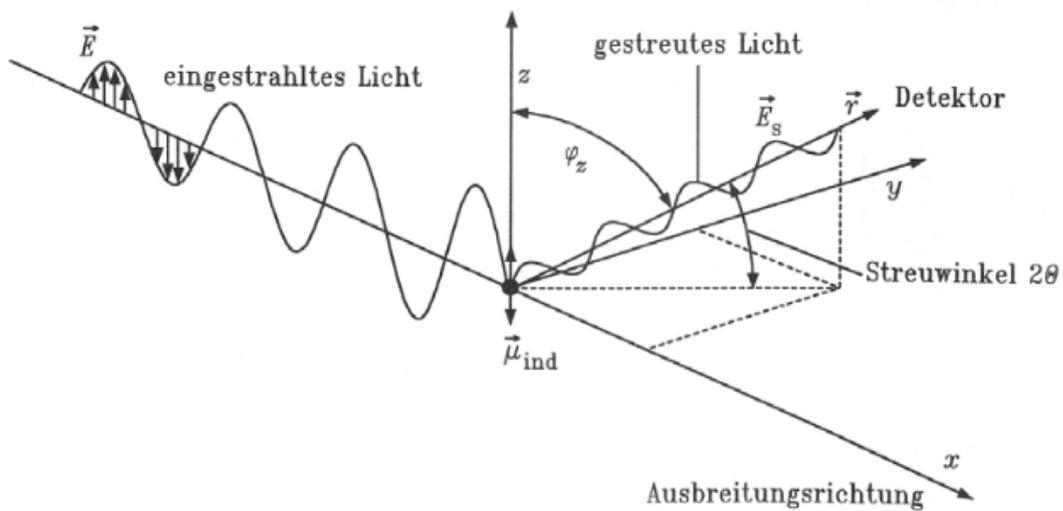


Abbildung 4: Lichtstreuung an einem Partikel

Dynamische Lichtstreuung

Bei der dynamischen Lichtstreuung verändern die lichtstreuenden Partikel ihre Position oder Orientierung im Medium über die Zeit. Diese Bewegungen können kontinuierlich oder zufällig ablaufen. Ursächlich dafür können thermische Effekte, Brownsche Bewegung, turbulente Strömungen oder andere dynamische Prozesse sein. So verändern sich auch die Streumuster im zeitlichen Verlauf. Eine Analyse der Streumuster unter bestimmten Winkel als Funktion der Zeit ermöglicht Rückschlüsse auf die dynamischen Eigenschaften des Systems. Dies umfasst unter anderem Untersuchungen von Partikelbewegungen und Partikelgrößenverteilungen.

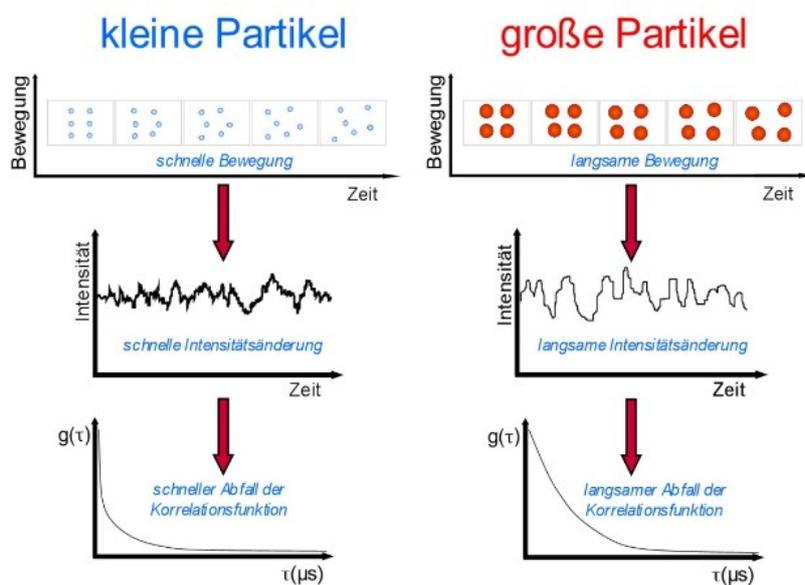


Abbildung 5: Zusammenhang von Partikelgröße und Intensität des Streulichts (13)

Der prinzipielle Messaufbau bei der dynamischen Lichtstreuung unterscheidet sich von dem der statischen Lichtstreuung nur in der Probe und der Art und Weise der Datenverarbeitung, da hier zeitliche Veränderungen gemessen werden.

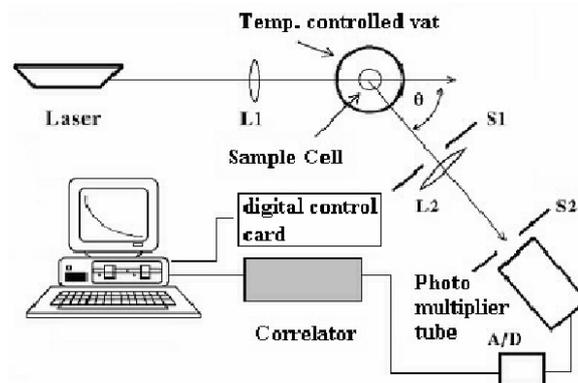


Abbildung 6: Prinzipieller Messaufbau eines Streulichtexperiments (14)

2.4 Allgemeines zu Mikrogravitationsplattformen

Auf Mikrogravitationsplattformen lassen sich Experimente unter verminderter Schwerkraft durchführen. Dabei unterscheiden sich diese Plattformen grundsätzlich in der zu erreichenden Qualität der Schwerkraftminimierung, den Kosten und dem Zeitaufwand einer Realisierung. Veranschaulichen lässt sich dies mit dem im Projektmanagement häufig verwendeten, sogenannten „Magischen Dreieck“.



Abbildung 7: Magisches Dreieck zur Wahl der geeigneten Mikrogravitationsplattform (eigene Abbildung)

Demzufolge gibt es nicht die pauschal geeignetste Plattform für Experimente unter verminderter Schwerkraft. Für jedes Experiment muss individuell eine Gewichtung der aufgeführten Kriterien vorausgehen. Allen gemeinsam sind die Bewertung des Risikos und Folgen eines Versagens.

Als Beispiele solcher Plattformen seien hier Forschungssatelliten, die Internationale Raumstation (ISS), Falltürme, Parabelflüge und Höhenforschungsraketen aufgezählt und miteinander verglichen.

	Satellit	ISS	Fallturm	Parabelflug	Forschungs- raketen
Kosten	Hoch	Sehr hoch	Gering	Mittel	Mittel
Zeitaufwand Vorbereitung	Hoch	Sehr hoch	Gering	Mittel	Mittel
Aufwand Betreuung/Steuerung	Hoch	Sehr hoch	Gering	Mittel	Mittel
µg-Zeit	Hoch	Hoch	Sehr gering	Gering	Mittel
µg-Qualität	Hoch	Gering	Sehr hoch	Gering	Hoch
Handhabung, Möglichkeit nachträglicher Prozessänderungen	Gering	Gering	Sehr hoch	Mittel	Mittel

Table 2: Vergleich von unterschiedlichen Mikrogravitationsplattformen

Table 2 fasst die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Mikrogravitationsplattformen zusammen, die im Folgenden weiter erläutert werden.

Forschungssatelliten und ISS

Satelliten und die Raumstation stellen orbitale Plattformen dar. Um eine Nutzlast in eine orbitale Umlaufbahn zu befördern, bedarf es vergleichsweise großer Mengen an Treibstoff und damit einhergehend größeren Raketen. Das Verhältnis von Kosten zu Masse der Nutzlast ist hier besonders hoch und spielt im Konstruktionsdesign eine führende Rolle. Die akzeptable Toleranzschwelle für den Mehraufwand des Leichtbaugrades zeigt Abbildung 8.

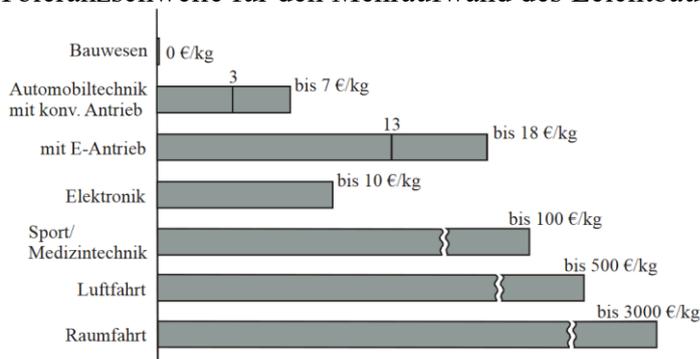


Abbildung 8: In der Industrie akzeptierter Mehraufwand für Leichtbau in € pro Kilogramm (15)

Neben den relativ hohen Kosten bestimmt auch das erhöhte Maß an Planungsaufwand die Realisierung eines Experimentes auf orbitalen Plattformen. Insbesondere bei bemannten Missionen spielt der Sicherheitsaspekt die wichtigste Rolle, wodurch das Beachten von zusätzlichen Richtlinien und Designvorgaben erforderlich wird.

Dem gegenüber steht die Möglichkeit Experimente auch unter längeren Zeitskalen durchzuführen, wenn nicht sogar mit der Option eines menschlichen Eingriffs zur Prozesssteuerung oder Reparatur bei einem Schadensfall.

Fallturm

Fallturmexperimente bieten einen kostengünstigen Zugang zu μg -Bedingungen mit kurzer Entwicklungszeit. Dabei werden die Experimente in druckdichte Kapseln integriert. An einem Beispiel soll die prinzipielle Handhabung für ein Experiment, das am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen durchgeführt wurde, verdeutlicht werden.

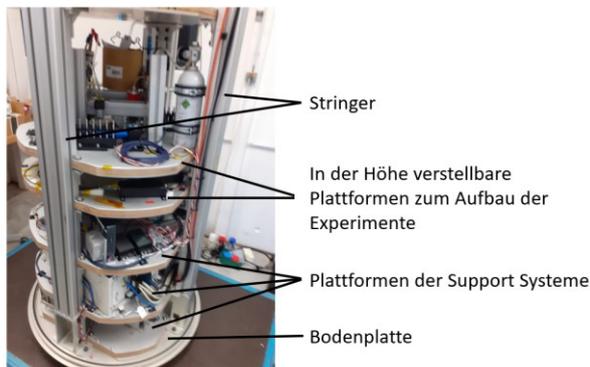


Abbildung 9: Experimentaufbau einer Fallturmkapsel (eigenes Werk)

Das Experiment wird unter Einhaltung des geometrisch vorgegebenen Bauraums auf Sandwichplatten konstruiert, die mit den vier im 90° Winkel stehenden Stringern verbunden werden. Die Stringer selbst sind auf der Bodenplatte verankert und tragen auf den unteren Ebenen die Supportsysteme, die die Bereitstellung von elektrischer Energie, Steuerung von Signalen und Kommunikation mit der Bodenstation sicherstellen. Die Höhe dieser Kapseln kann variiert werden. Nach vollständiger Integration wird die Kapsel druckdicht mit einer Haube verschlossen und in den eigentlichen Turm gefahren. Die Kapsel kann dabei optional mit einem Kran in die 110 m hohe Röhre hochfahren oder auf ein Katapult gestellt werden. Die Röhre ist freistehend gelagert und von einem Turm umbaut. Er schützt die Röhre vor Windlasten. Die Atmosphäre in der Röhre lässt sich evakuieren, um der Kapsel einen möglichst reibungsfreien freien Fall zu gewähren. Dabei hält die Haube den atmosphärischen Innendruck der Kapsel, sodass die Experimente nicht vakuumtauglich ausgelegt werden müssen. Durch das Fallenlassen der Kapsel in einen mit Polystyrol-Kügelchen gefüllten Auffangbehälter können bis zu 4 Sekunden Mikrogravitation zur Verfügung gestellt werden. Beim optionalen Katapultstart sogar nahezu die doppelte Zeit. Dabei werden Erdbeschleunigungen von bis zu $10^{-7} g$ erreicht.

Parabelflug

Mit speziell modifizierten Flugzeugen und ausgebildetem Flugpersonal werden Flugparabeln geflogen. Nachdem die Experimente an Bord die geforderten Anforderungen, insbesondere der sicherheitsrelevanten Anforderungen erfüllen, können diese im Transportraum der Maschine installiert werden. Pro Flug werden zwischen 20 und 40 Parabeln geflogen und bieten jeweils für ca. 20 Sekunden Milligravitationsbedingungen.

Experimente an Bord eines Parabelflugs müssen so ausgelegt werden, dass sie den Regularien des Luftfahrtstandards entsprechen. Entsprechende Prüfungen und Dokumentationen sind daher vorzulegen. Diesem Mehraufwand steht aber entgegen, dass Anlagen von Menschen unmittelbar während der Prozessierung betreut werden. Probenwechsel und gegebenenfalls

händisches Einschreiten sind während des Fluges möglich. Auch der Automatisierungsgrad verringert sich mit der Bemannung der Experimentdurchführung. Die erreichbare Qualität der Mikrogravitation beläuft sich in der Größenordnung von ca. $10^{-4}g$.

2.5 Höhenforschungsraketen

Aufgrund des unmittelbaren Bezugs zu dieser Arbeit wird die detailliertere Beschreibung von Höhenforschungsraketen und deren Anwendung in einem eigenen Unterkapitel behandelt. Höhenforschungsraketen bieten einen im Vergleich zu orbitalen Plattformen kosten- und zeitgünstigen Zugang zur Mikrogravitationsumgebung. Insbesondere stellen Experimente an weicher Materie die Anforderungen eine Mikrogravitationszeit größer einer Minute bei einer Qualität kleiner $10^{-5}g$.

Die in dieser Arbeit beschriebene Anlage wird zur Verwendung auf Raketen der MAPHEUS Missionen ausgelegt. Dabei können die Konfigurationen der Rakete von Mission zu Mission variieren. Das bedeutet, dass unterschiedliche Kombinationen von Raketenmotoren zum Einsatz kommen. Dies hat unter anderem Auswirkungen auf die auftretenden Beschleunigungen und damit Kräfte, den Thermalhaushalt, die zur Verfügung stehende Mikrogravitationszeit und nicht zuletzt auch auf den Umgang und die Bereitstellung von Daten. Beispielsweise ist bei der Verwendung von entmilitarisierten Raketenmotoren, wie die bei MAPHEUS 11 konfigurierten „Improved Malemut“, das Veröffentlichen bestimmter Daten nicht ohne weitere Genehmigung gestattet. Um jedoch angewandte Prinzipien darlegen zu können, werden in dieser Arbeit exemplarisch die Parameter der ebenfalls oft verwendeten VSB-30 Stufe dargestellt.

Das zweistufige Vehikel besteht aus seinen beiden Motoren, einer Interstage mit drei Spin-Up Motoren, einem Motoradapter und der Nutzlast, wobei sich Letztere weiter in einen wissenschaftlichen Experimentteil und die notwendigen Servicesysteme einteilen lässt.

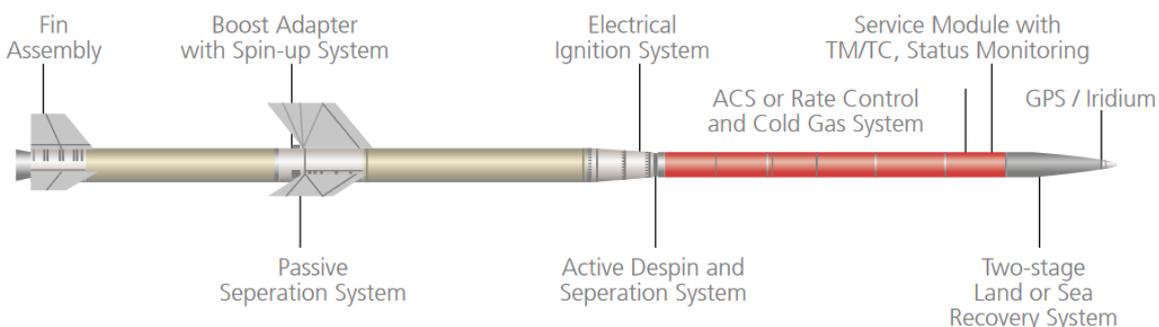


Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau einer zweistufigen Forschungsrakete (16)

Vor dem Start steht die Rakete auf einem Bock und wird durch eine Schiene, dem „Rail“, während der ersten Meter in Flugrichtung geführt. Kurz nach dem Verlassen der Startvorrichtung zünden die drei radial angebrachten Spin-Up Motoren, um dem Vehikel einen Drall zur Bahnstabilisierung zu vermitteln. Nach Brennschluss der ersten Stufe trennt sich diese ohne weitere Trennmechanik. Der obere Teil sitzt nur auf den Bolzen der Stufe. Mit dem Zünden der oberen Stufe beginnt die Phase, in der mit den höchsten Trägheitskräften zu rechnen ist. Ihr Brennschluss ist noch vor dem Erreichen der Kármán-Linie bei 100 km Höhe, die das Verlassen der Atmosphäre definiert. Vor dem Abtrennen des Motors mit einem Manacle-Ring

wickelt das De-Spin Modul seine Gewichte ab, um den zuvor initiierten Drall zu eliminieren. Weiterhin wird auch der Nasenkonus abgeworfen, der in der Aufstiegsphase nur aerodynamischer Zwecke dient. Restbeschleunigungen können mit den Kaltgasdüsen des RCS Modul (reaction control system) entgegengesteuert werden. Ein zum Servicesystem gehörendes Servicemodul versorgt die Experimentsektionen mit Informationen und ggf. auch elektrischer Energie. Über dieses Modul findet auch die Kommunikation mit der Bodenstation statt. Nach Beendigung der Mikrogravitationsphase, sprich bei Beginn des Wiedereintritts in die Erdatmosphäre wird versucht die Nutzlast mit den Kaltgasdüsen in Drehung zu halten. Damit soll der hohe Wärmeeintrag auf der äußeren Struktur verteilt werden. Ist die Geschwindigkeit des Vehikels ausreichend durch die Atmosphäre verringert worden, öffnen sich ein Stabilisierungsschirm und schließlich ein Bremsfallschirm. Mit einer Impakt Geschwindigkeit von ca. 8 m/s landet die Rakete auf dem Boden und kann geborgen werden. Auf Grund des oft unwegsamen Geländes des Einschlaggebietes erfolgt die Bergung meist per Hubschrauber.

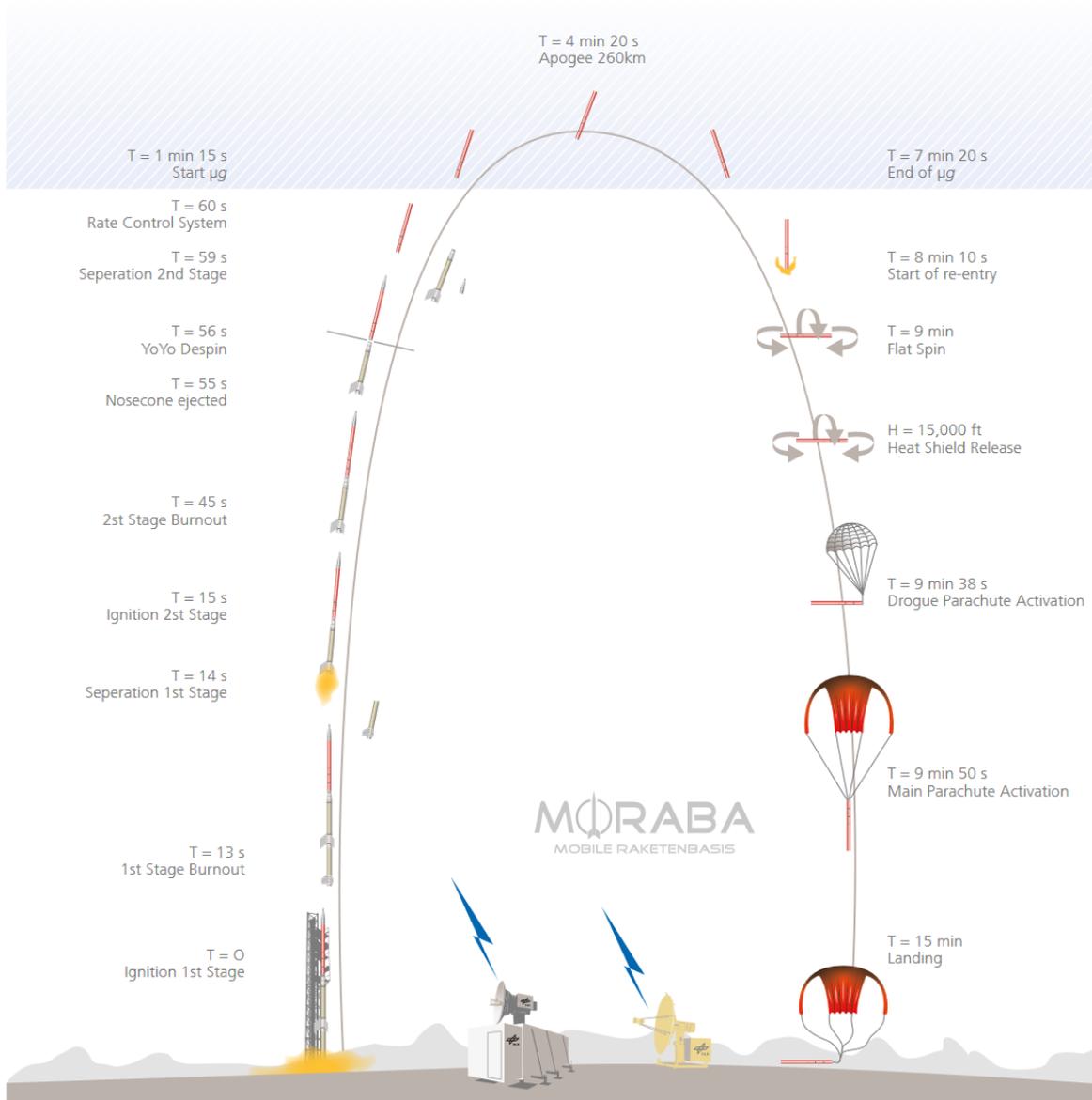


Fig. 3-2 Standard sounding rocket microgravity trajectory with flight events

Abbildung 11: Typischer suborbitaler Flugverlauf (16)

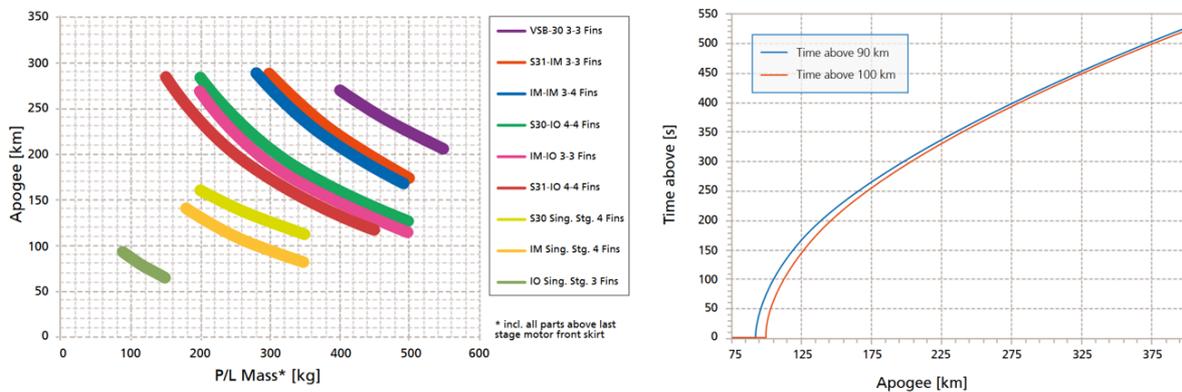


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Apogäum und Nutzlast an verschiedenen Vehikeln (17)

Für die wissenschaftlichen Experimente ist die zur Verfügung stehende Mikrogravitationszeit naturgemäß von besonderer Bedeutung. Sie variiert mit der Konfiguration der Motoren und

ihrer Masse. In Abbildung 12 werden die Verhältnisse von Nutzlastmasse und erreichbarem Apogäum in unterschiedlichen Motor Konfigurationen dargestellt. Die Mindestmasse wird durch die maximal erlaubte Flughöhe bestimmt, die wiederum Einfluss auf die Dispersion des Landepunktes hat. Der Zusammenhang zwischen dem Apogäum und der Mikrogravitationszeit ist im rechten Diagramm dargestellt, wobei Beginn und Ende bei 90 km und 100 km Höhe verglichen wird.

Für die technische Entwicklung eines Experiments ist es von Bedeutung über Hintergrundwissen zu verfügen, um die Funktionsfähigkeit aller Systeme unter Einwirkung der zu erwartenden Umweltbedingungen während des Fluges aufrecht zu erhalten. Es ergeben sich Anforderungen an den Aufbau, die in Kapitel 3 detaillierter beschrieben sind. Von besonderer Bedeutung seien hier die mechanischen und thermischen Belastungen sowie deren Ursachen etwas näher erörtert.

Ein Experimentmodul erfährt während des Fluges innere und äußere Kräfte. Die inneren Kräfte sind in erster Linie durch die Massenträgheit des Moduls selbst begründet. Fliehkräfte durch die Rotation sowie der Winkelbeschleunigung müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Dabei werden die statische Trägheit und die dynamischen Lasten unterschieden. Die dynamischen Lasten begründen sich im Vibrationsspektrum der Motoren und sind je nach Konfiguration unterschiedlich. Für jede Konfiguration werden Äquivalenzbeschleunigungen angegeben, die auf die statischen Beschleunigungen hinzuaddiert werden. Grundsätzlich muss gegen die höchste zu erwartende Beschleunigung ausgelegt werden. Gleichzeitig ist es von Interesse, vorhandenes Strukturmaterial auszulasten. Demzufolge wäre eine gleichbleibende Beschleunigung von Vorteil. Dies wird in der Praxis nicht erreicht. Raketen verlieren im Laufe ihrer Brenndauer an Masse, wodurch sie bei gleichem Schub eine höhere Beschleunigung und damit höhere Massenträgheit erfahren. Bei Feststoffmotoren lässt sich der Schubverlauf durch die Geometrie des gegossenen Treibstoffes etwas beeinflussen. Durch die Gestaltung der inneren Geometrie des Treibstoffes in Form eines Sterns, verringert sich die reaktive Oberfläche während des Abbrandes, wodurch der Schub bei abnehmender Gesamtmasse verringert wird.

Die äußeren Kräfte werden insbesondere durch die aerodynamischen Kräfte bestimmt und über die Rumpfstruktur abgeleitet. Dabei kommt dem aerodynamischen Druckpunkt, dem idealen Punkt, an dem alle aerodynamischen Kräfte angreifen, bei ungesteuerten Raketen eine besondere Bedeutung zu. Ohne Systeme, die aktiv in die Lage des Vehikels eingreifen, wie beispielsweise eine Schubvektorsteuerung oder Gyroskope, werden bei ungesteuerten Raketen für eine stabile Flugbahn bestimmte Bedingungen benötigt.

Abbildung 13 zeigt das Verhältnis zwischen Druckpunkt und Massenschwerpunkt im instabilen, labilen und stabilen Zustand.

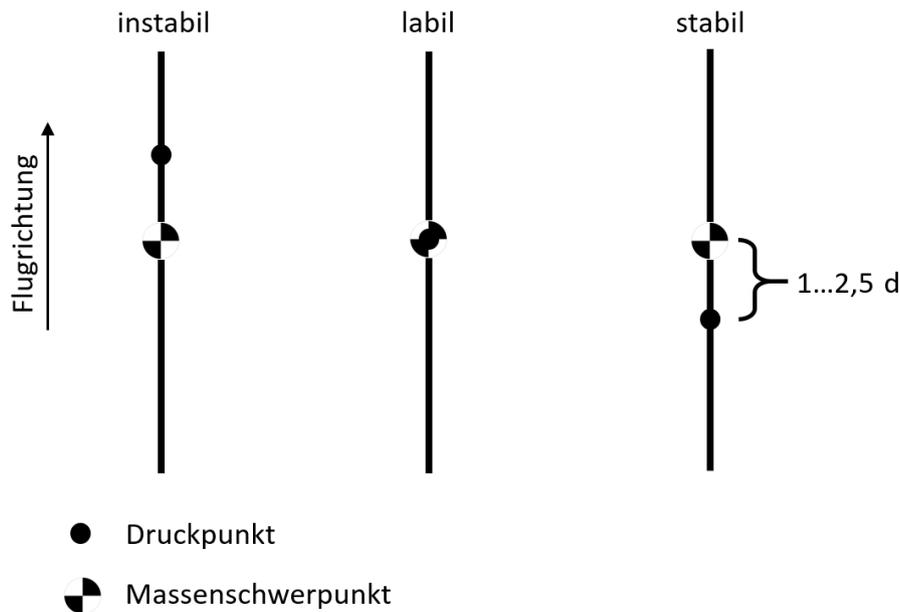


Abbildung 13: Für eine stabile Fluglage ungesteuerter Raketen müssen Druckpunkt und Massenschwerpunkt aufeinander abgestimmt sein

Für eine stabile Flugbahn muss der Abstand des Massenschwerpunkts zum Druckpunkt zwischen ein und zweieinhalb Kaliber, sprich dem Durchmesser betragen. Seitliche Strömungen, hervorgerufen durch Neigung des Vehikels oder Seitenwind, bewirken eine Drehung des Vehikels um den Massenschwerpunkt in die Strömung. Dabei greift die Kraft am Druckpunkt an und ein Biegemoment muss über die Rumpfstruktur getragen werden. Abbildung 14 zeigt exemplarisch den Biegespannungsverlauf entlang eines Vehikels. Auch wenn diese Spannung nur im Rumpf auftreten, ist die Kenntnis darüber wichtig für den Experimentteil. Je nach Biegesteifigkeit der Rumpfsektionen ist mit einer elastischen Deformation zu rechnen. Bei mehreren Lagerpunkten zur Befestigung der Nutzlast im Inneren ist darauf zu achten, dass keine unzulässig hohen Spannungen durch eine Verformung des Rumpfes initiiert werden.

Den Biegespannungen (MB) sind Spannungen durch Scher- (FS) und Normalkraft (FN) überlagert. Abbildung 14 verdeutlicht die Abhängigkeiten der Position eines Moduls in der Nutzlast.

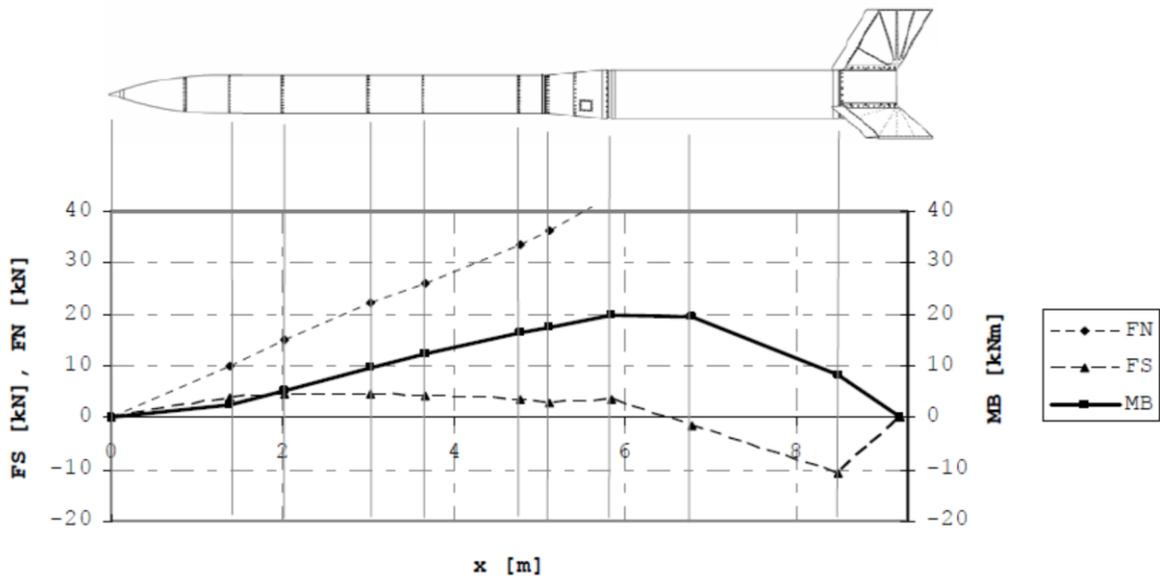


Abbildung 14: Kräfte und Biegemoment entlang der Flugachse (exemplarisch) (18)

Beim Abbrand der ersten Stufe wandert der Massenschwerpunkt in Flugrichtung, da der Motor seine Treibstoffmasse ausstößt, während der Druckpunkt bleibt. Durch die Motorseparation springen sowohl Druck- als auch Massenschwerpunkt. Gleiches gilt für die Oberstufe.

Der Biegespannung überlagert sich eine Druckspannung, die durch die Trägheit und der Reibung der darüber liegenden Module verursacht wird. Eine weitere Maßnahme zur Stabilisierung ist die Versetzung des Vehikels in eine Rotation. Kurz nach dem Verlassen der Startvorrichtung zünden radial angeordnete Spin-Up Motoren, die ihren Schub tangential abgeben. Dabei muss der Massenschwerpunkt in Rotationsachse liegen. Die dabei entstehende Winkelbeschleunigung verursacht eine Torsionsspannung im Rumpf als äußere Kraft, die Winkelgeschwindigkeit innere Kräfte in Form von Zentrifugal bzw. Zentripetalkraft, die naturgemäß auch auf den inneren Experimentalteil wirken.

Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsprofile der VSB 30 auf der MAPHEUS 5 Mission.

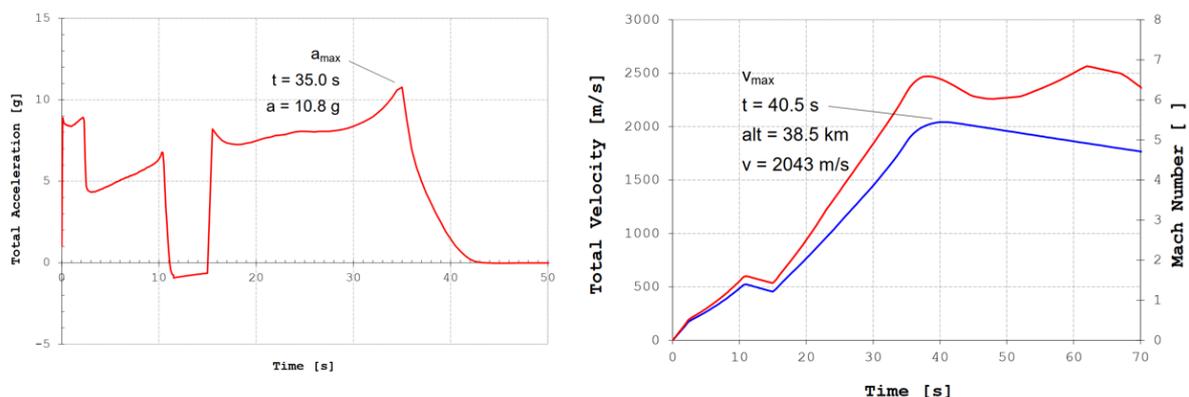


Abbildung 15: Beschleunigungsprofil am Beispiel der VSB 30 auf MAPHEUS 5 (19)

Eine exakte Quantifizierung des Wärmeeintrags ist nur schwer möglich und lokal an der Rumpffläche sehr unterschiedlich. Man baut auf Messwerte vorangegangener Flüge auf schätzt die zu erwartenden Wärmeströme.

3 Entwicklung einer modularen Experimentplattform mit optischen Diagnostiken auf Forschungsraketen

Es soll zunächst ein Überblick über die technischen Fähigkeiten und Grenzen der modularen Plattform SOMEX („Soft matter experiment module“) gegeben werden. Dabei wird die Gesamtbaugruppe in ihre Hauptunterbaugruppen aufgespalten, deren Entwicklung jeweils separat in folgenden Kapiteln beschrieben wird. Grundsätzlich kennzeichnet sich die Modularität der Anlage darin, dass unterschiedliche Experimente mit den ähnelnden Anforderungen diagnostischer Lichtstreuung mit weniger Aufwand in eine gemeinsame Basisstruktur integriert werden können. Diese Basisstruktur besteht aus dem Rumpf samt Anbauteilen und der inneren Experimentstruktur und deren Steuerungs- und Diagnoseeinheiten – im Folgenden als „C-Modul“ bezeichnet. Nach der zur Orientierung gezeigten Gesamtdarstellung werden die Entwicklungen der zuvor genannten Unterbaugruppen methodisch aufgezeigt.

3.1 Gesamtdarstellung der Experimentplattform

Aufgebaut ist die Anlage aus einem „inneren Teil“, der eigentlichen Experimentieranlage und der umgebenden Rumpfstruktur, die zugleich die äußere geometrische Begrenzung der Nutzlast darstellt.

Basis des inneren Teils sind vier senkrecht stehende Stringer, an denen alle Unterbaugruppen und Bauteile befestigt werden. Über sie werden sämtliche Trägheitslasten in die Rumpfstruktur abgeleitet. Am oberen Ende befindet sich das C-Modul mit den Diagnose- und Versorgungselementen, welches als eine Baugruppe an den Stringern verschraubt wird und Schnittstellen in Richtung zum Experimentraum bietet. Der untere Teil steht für die Integration von individuellen Experimenten zur Verfügung. In dieser Arbeit werden dabei exemplarisch zwei Experimente integriert: Ein Teil zur Untersuchung kolloidaler Suspensionen und ein Teil zur Prozessierung granularer Materie. Ein weiterer Experimentteil wurde nach den ersten erfolgreichen Flügen neu implementiert (Nanoteilchen-Agglomeration) und wird zum Ende der Arbeit kurz erläutert.

Da alle Komponenten des inneren Teils ausschließlich an den Stringern befestigt werden, lassen sich diese an wenigen Lasteinleitungsstellen in der Rumpfstruktur integrieren. Die Rumpfstruktur besteht aus drei Rumpfsegmenten, wobei das obere ein integriertes Druckschott darstellt, einem unteren Druckschott, welches die Hauptlasten überträgt, einer Luke mit Anbauteilen, zwei Umbilicals und obere Radiallagerungen.

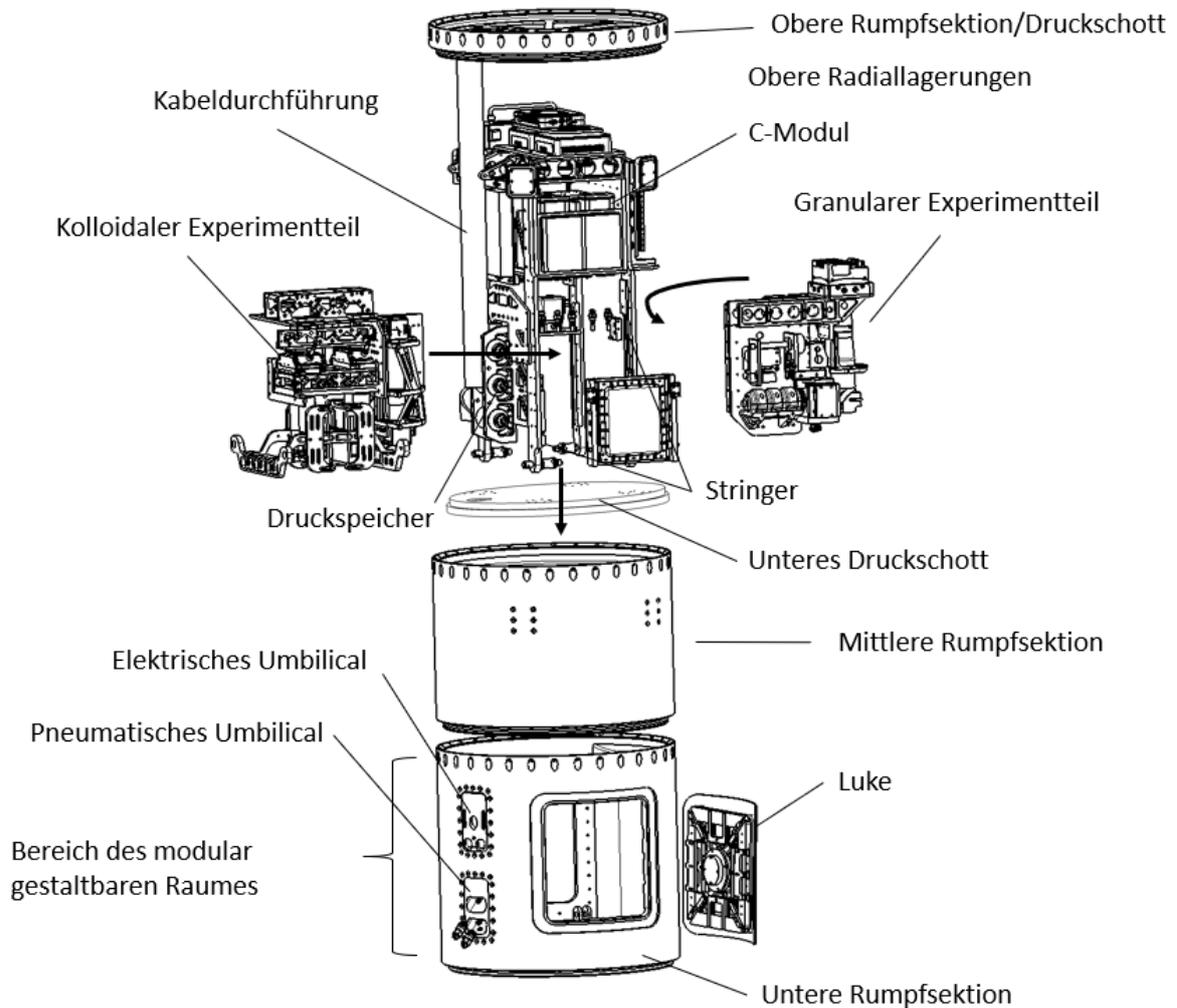


Abbildung 16: Explosionsansicht der Anlage mit Experimenteile und Rumpfbaueteile

3.2 Entwicklung einer druckdichten Rumpfstruktur mit radialer Zugänglichkeit

Es wird die Entwicklung einer druckdichten, optional in der Länge variabler Rumpfstruktur beschrieben. Zusätzlich soll ein manueller Zugriff während eines Late Access ermöglicht werden, was die Einbindung einer druckdicht verschließenden Luke bedingt.

3.2.1 Anforderungen

Den Anforderungen voraus gehen neben den bereits geschilderten Aspekten die technischen Vorgaben der Mobilen Raketenbasis (18), (19), (20), (21). In diesen Dokumenten sind Vergleiche und Bewertungen von Lösungsvarianten standardisierter Rumpfe bereits enthalten, sodass in diesem Punkt auf den Stand der Technik verwiesen wird.

Da der Rumpf und die permanente Infrastruktur technisch eng zusammenstehen, werden die Anforderungen für die Infrastruktur mit aufgenommen und im Folgenden zusammengefasst.

Nr.	F W	Anforderung	Bemerkung
Geometrie			
R01	F	<p>Maximale Gesamthöhe: $h_{\max} \leq 400$ mm pro Rumpfsegment</p> <p>Gesamthöhe: Modular gestaltbar</p> <p>Gesamtfläche:</p> <p>Kreisfläche mit $d_A = 438$ mm</p>	Ein Rumpfsegment darf maximal 400 mm hoch sein. Segmente werden über Radax-Verbindungen verbunden. Grenzmaße und Toleranzen gem. (20)
R02	F	<p>Seitlicher Zugang zum Inneren des Rumpfes durch eine Luke ermöglichen</p> <p>Maße für Luke sind iterativ mit Entwicklung des kolloidalen Teils zu ermitteln.</p> <p>Statische Anforderungen in Anlehnung an „Technical Note“; Abweichungen müssen geprüft und zugelassen werden (MORABA)</p>	Statische Berechnungen zur maximal zulässigen Durchbruchmaßen sind im Dokument „Technical Note“ (18) zu finden.
R03	F	Nach außen keine rausragenden Teile.	
Kinematik			
R04	F	Verbinden der Rumpfsektionen über Radax-Ringe.	Toleranzen nach (20)
R05	F	Anstecken der Versorgungsleitungen über Umbilicals.	Händisch steckbare Verbindungen müssen im Launcher zugänglich sein. Kollisionsanalyse im CAD Modell des Launchers mit Nutzlast durchführen.
R06	W	Automatischer Verschluss und Verriegelung des Hitzeschildes mit Trennung der Kabel	
R07	F	<p>Verschluss und Arretierung der Luke ohne elektrische Schaltung</p> <p><i>Weitere Bewegliche Baugruppen in „Ergonomie“ aufgeführt</i></p>	
Kräfte			
R08	F	Kräfte gemäß FRP	Arten der zu erwartenden Kräfte aus FRP; bereits in Kapitel 2 detaillierter diskutiert
R09	F	Zusätzliche Druckbeanspruchung: Luke und Druckschotten gegenüber Innendruck auslegen	
Stoffe			

R10	F	Grundsätzliche Verwendung von Leichtbau Konstruktionswerkstoffen	Beachtung elektrochemischer Potentiale. Legierungen teilweise vorgeschrieben
R11	F	Geeignete Wahl von Schmierstoffen zum Einbau der Radialdichtungen zwischen den Rumpfsegmenten: Vakuumtauglich	
R12	F	Einleitung, Ausleitung und Speicherung von Stickstoff	
Signale			
R13	F	Elektronische Schnittstelle zu Steuerungsrechner Signale: <ul style="list-style-type: none">- LO (Lift Off)- SOE (Start of experiment)- SODS (Start of data storage)	Die Signale des Servicemoduls werden im Anlageneigenen Rechner verarbeitet. Signalbezeichnungen historisch begründet. Können individuell genutzt werden.
		Interne Trigger zum Starten von Aufzeichnungen	
R14	W	Speicherung aller ein- und ausgehenden Signale in einem Logfile	
R15	F	Speicherung aller Daten auf Datenträger	Datenträger in SOMEX C
R16	W	Redundanz bei Ausfall des Servicemoduls bei den Signalen: <ul style="list-style-type: none">- LO- SOE- SODS und <ul style="list-style-type: none">- Powerleitung	
Ergonomie			
R17	F	Anbindung Umbilicals im Launcher	Bauliche Spezifikationen des Launchers beachten: Kabel müssen steckbar und riggbar sein.
R18	W	Möglichst wenig Bedarf an Werkzeug beim Probenintegrieren. Lösbare Normelemente gegen Verlust absichern	
R19	W	Betrieb der Anlage mit und ohne Rumpf möglich. Zugänglichkeit zu Subsystemen	
Fertigung			

R20	F	Toleranzen nach 2768-1-f	Technisch bedingte höhere Präzision mit externen Herstellern absprechen, bzw. in Zeichnungen kennzeichnen
Gebrauch			
R21	F	Volle Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb (auch ohne Rumpf)	
R22	F	Integration in Rumpf ohne Veränderung innerer Bauteile → Nach abschließendem Test ausschließlich Integration	
Energie			
R23	F	Hauptsächliche Energieversorgung über Schnittstelle und SOMEX C	
R24	F	Thermalhaushalt: Maximale Innentemperatur ist zu bestimmen, bei der gewährleistet werden kann, dass Temperaturregelung für den Flug ausreichend dimensioniert ist	
R25	W	Möglichkeit unter Laborbedingungen kontrolliert vorzuwärmen	Anwärmen mit Netzgerät
R26	F	Kein unzulässiges Ausdringen von elektromagnetischen Feldern	Anforderungen gemäß Mobile Raketenbasis (siehe Kontrolle)
R27	F	Kapazität der Batterien an Verbrauch anpassen	
Kontrolle			
R28	F	Abnahme der Probenumgebung durch Mobile Raketenbasis nach Zusendung des Entwurfs	Iterativer Prozess
R29	F	Prüfbericht zur Maßabnahme des Rumpfes	
R30	F	Ggf. weitere Prüfbescheide sind vorzulegen (Druckbehälter, neuentwickelte Strukturbauteile)	
R31	F	Messung elektromagnetischer Felder während des Betriebs	Wird von Moraba durchgeführt
Transport			
R32	W	Transport in der Gesamtanlage: Transportschäden sind durch geeignete Transportbehältnisse auszuschließen	
Sicherheit			
R33	F	Sicherheitsrelevante Aspekte: Einhaltung der Sicherheitsvorgaben zu: - Hochspannung, -strom	ESRANGE Safety Manual (22)

		<ul style="list-style-type: none"> - Chemikalien - Laser 	
R34	F	Druckspeicher Auslegung: Nach Sicherheitsvorgabe	Ausnahme für Druckspeicherauslegung gilt wenn: <ul style="list-style-type: none"> - die gespeicherte Druckenergie $E_p < 19306 J$, - der Nenndruck $p_N < 7 bar$, - keine toxischen und - keine explosiven Gase sind.

Tabella 3: Anforderungen an die Rumpfstruktur

Erläuterungen zu den Anforderungen

Geometrie

Die äußere Geometrie der Anlage wird durch den Rumpf bestimmt. Wie in Kapitel 2 bereits näher erläutert, ist er eine kraftübertragende Baugruppe. Daher gibt es Grenzmaß bestimmende Auslegungsvorschriften, die eine Einhaltung der maximal zulässigen Spannungen gewährleisten. Bei dieser Auslegungsvorschrift werden Material, Maße und Toleranzen vorgegeben. Ein Muster zur Konstruktion eines Rumpfsegmentes ist im Anhang zu finden. Die Gestaltung der Anlage im Inneren des Rumpfes orientiert sich an dem durch den Rumpf vorgegebenen Bauraum. Zur Minimierung der später angebrachten Wuchtmassen ist es wünschenswert den Massenschwerpunkt in die Rotationsachse der Anlage zu legen.

Kinematik

Die Rumpfsektionen werden an ihren Radax-Ringen miteinander verbunden. Dabei müssen Toleranzen und Maße der zusätzlichen Dichtung so gewählt werden, dass ein beschädigungsfreies Montieren gewährt bleibt.

Im Launcher müssen die gegebenen Zugänglichkeiten zur Rakete berücksichtigt werden. Sowohl die Luke als auch die Umbilicals müssen händisch vor dem Start bedient werden können. Weiterhin müssen die Kabel der Umbilicals riggbar sein. Unter dem „Riggen“ versteht man das Befestigen von Seilen zwischen der Struktur des Launchers und den Kabeln, um diese beim Starten der Rakete aus ihren Konnektoren zu ziehen.

Mit dem Startvorgang soll sich ein Hitzeschild automatisch schließen und verriegeln. Eine händische Verschließung der Luke erfolgt ohne elektrische Schaltvorgänge.

Kräfte

Die Kinetik der Gesamtanlage bestimmt sich hauptsächlich durch die wirkenden Kräfte während des Fluges. Die Ursachen der Kräfte wurden bereits in Kapitel 2 detailliert

beschrieben. Gegen diese Kräfte müssen entsprechende Bauteile und -gruppen ausgelegt werden.

Stoffe

Grundsätzlich ist die Verwendung von den im Leichtbau gängigen Werkstoffen anzustreben. Bei der Konstruktionsphilosophie von Forschungsraketen ist der Aspekt des Leichtbaus zwar ebenfalls von großer Bedeutung, hat jedoch nicht oberste Priorität. Dennoch sollen im Rahmen der rationalen Vertretbarkeit Leichtbaustrukturen zur Anwendung kommen. Sie sind im Einklang mit den Aspekten der Fertigungsgerechtigkeit, Funktionalität und Handhabung ausgewogen abzustimmen.

Schmierstoffe, die im Flugverlauf im Vakuum ausgesetzt sind, müssen entsprechend vakuumtauglich sein.

Ergänzend ist unter Druck stehender, gasförmiger Stickstoff durch den Rumpf zu Druckspeichern zu leiten, zu speichern und kontrolliert wieder abzulassen.

Signale

Das Servicemodul der Rakete bietet jedem Experiment an Bord eine Schnittstelle, über die sogenannte Events gesendet werden können. Historisch bedingt lauten diese Events "LO – Lift Off", "SOE - Start of experiment" und "SODS - Start of data storage". Im heutigen Gebrauch können diese Signale aber individuell für Bedürfnisse mit Ausnahme des LO Signal genutzt werden. Bei den Signalen handelt es sich um die Durchschaltung gegenüber einem Ground. Die ebenfalls schaltbare "Powerleitung" mit 28 V wird gegenüber dem entsprechenden Signal durchgeschaltet. Es ist üblich, die Potentiale der Experimente gegenüber denen des Servicemoduls galvanisch zu trennen, sodass mit der Durchschaltung eines Signals lediglich ein Optokoppler geschaltet wird, der dann ein Relais, das mit eigenem Potential gespeist wird, geschaltet wird.

Das LO Signal wird über eine Hardline zur Verfügung gestellt. An der Rakete werden redundant Splinte mit der Struktur des Startturms verbunden. Diese ziehen sich beim Verlassen des Turms raus und das Signal wird ausgelöst.

Ein Ausfall der Powerleitung des Servicemoduls oder der Signalleitungen hätte bei einem Flug zur Konsequenz, dass in der Anlage kein Trigger zum Aufzeichnen, bzw. zum Anfahren seiner Systeme auslösen würde. Um diesem Ausfallrisiko entgegenzuwirken, soll ein redundantes System integriert werden. Ohne Telekommando bedeutet dies eine Redundanzsteuerung über eine Timeline, die vor dem Start aktiviert wird.

Für die späteren Auswertungen der Daten nach dem Flug und zur besseren Nachvollziehbarkeit sollen alle Events in einem Log-File dokumentiert werden. So lassen sich mögliche beobachtbare Phänomene nachvollziehen oder plausibel erklären.

Im konkret vorliegenden Fall bedeutet das LO Signal den Beginn einer Timeline, bis SOE beginnt, also der Beginn der Mikrogravitationsphase. Das Timeout dient nur zur Redundanz, falls kein SOE Signal zur Schnittstelle ankommt und wird daher mit einem Puffer versehen. Mit anliegen eines SOE Signals beginnen die Aufzeichnungen unter μg Bedingungen und enden automatisch mit Ablauf der vorgegebenen μg Zeit.

Das SODS Signal wird zum Umschalten auf interne Spannung benutzt. Mit dem Durchschalten des Signals schaltet ein Optokoppler das interne Hauptlastrelais durch, sodass die Batterien mit ihrer höheren Nennspannung als das Netzgerät die Anlage versorgen. Auch dieses Signal soll redundant ausgelegt werden, da ein Ausfall eine Abschaltung der gesamten Anlage im Flug bedeuten würde.

Ebenfalls unter dem Begriff Signale sollen auch die Datenströme gefasst werden. Das Servicemodul der Rakete bietet neben der Bereitstellung der Signale auch die Möglichkeit über Telemetrie mit der Bodenstation zu kommunizieren. Die Datenübertragungsrate ist allerdings begrenzt. Da es zum Zeitpunkt der Definition der Anforderungen bereits abzusehen ist, dass es sich bei den Daten um Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von mehreren Kameras handelt, die die möglich übertragbaren Datenströme um mehrere Größenordnungen überschreiten werden, wird auf lokale Datenspeicherung ausgelegt. Das bedeutet aber neben der nicht Live-Übertragung, dass die Daten erst nach Bergung der Nutzlast ausgelesen werden können.

Neben den reinen Netto-Datenmengen, muss auch der Aspekt betrachtet werden, dass das Auslesen und Wegspeichern der Daten eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Vor dem eigentlichen Flug werden jedoch Messungen im Rahmen eines Testcountdown oder einer Flugsimulationen aufgenommen. Die Zeit, um diese Daten über eine Schnittstelle runterzuladen und extern zu speichern, ist in der Regel nicht gegeben. Daher sind die Speichersysteme so auszulegen, dass mehrere Referenzmessungen auf den Bordspeichersystemen Platz finden.

Während des Wiedereintritts sollen die Bordrechner kontrolliert heruntergefahren werden, um einem möglichen Datenverlust vorzubeugen.

Ergonomie

Das Installieren eines Einschubes oder einer Probenumgebung während eines Late Access ist den kontrollierten Umweltbedingungen einer Laborumgebung fern. Kurz getaktete Frequenzen im Ablauf zur verzögerungsfreien Einhaltung eines Countdowns als auch die physikalische Umwelt erfordern ein erhöhtes Maß an Planung. Konkret bedeutet das, dass die Prozedur des Einschubens einer Probeneinheit eine Fehlerresistenz gegenüber dem Bediener aufweisen soll. Der Faktor Mensch darf in diesem Zusammenhang nicht unterschätzt werden. Eine neue Umgebung, verfremdete Abläufe und möglicherweise persönliche Ambitionen können zu menschlichen Handlungen führen, die technisch kontraproduktiv wirken. Es liegt daher auch zum Teil in der Hand des Konstrukteurs, die Handlungsschritte so zu durchdenken, dass durch die konstruktive Gestaltung Fehleranfälligkeiten minimieren werden. Im vorliegenden Fall bedeutet das, dass der Einschub nicht falsch eingesetzt und durch formschlüssige elektrische Konnektoren und Sensorleitungen nicht falsch installiert werden können.

Zur Entlastung und Minimierung der Ausfallwahrscheinlichkeit gehört auch die mechanische Installation. Ein Verlieren von möglichen Befestigungselementen wie z.B. Schrauben hätte zeitintensive Folgen zur Konsequenz, da diese unbedingt vor dem Flug entfernt werden müssten. Befestigungselemente, die verliersicher oder in einer Art und Weise gestaltet werden, dass sie für den Bediener handhabbar und zuverlässig ein sicheres Fixieren signalisieren, sind in jedem Fall anzustreben.

Des Weiteren ist die Bedienung der Anlage sowohl im eingebauten als auch im ausgebauten Zustand gewünscht. Eine Notwendigkeit der Bedienung im eingebauten Zustand ergibt sich allein schon aus der Forderung der Vor-Flug Bereitschaftsprüfung. Ebenso die unmittelbare Bodenreferenzmessung kurz vor Flug bedingt die Bedienung im eingebauten Zustand. Im ausgebauten Zustand bieten sich die Möglichkeiten, direkt an Subsystemen zu arbeiten. Im Laborbetrieb können so effizient Parameter und weitere Einstellungen ermittelt und

grundlegende Bodenreferenzmessungen durchgeführt werden, um den Effekt der Gravitation genauer zu quantifizieren.

Fertigung

Für alle zu fertigen Bauteile sollen Fertigungstoleranzen nach DIN ISO 2768-1 eingehalten werden. Abweichende Toleranzen werden bei Notwendigkeit separat in den Fertigungszeichnungen gekennzeichnet.

Gebrauch

Im Vordergrund für den Gebrauch steht der Verwendungszweck eine raketentaugliche Anlage bereit zu stellen, die unter den gegebenen Umweltbedingungen einer Mikrogravitationsumgebung die Durchführung der physikalischen Untersuchungen ermöglicht. Solchen Untersuchungen gehen im Allgemeinen viele Untersuchungen im Laborbetrieb voraus, um beispielsweise vorteilhafte einzustellende Parameter zu finden. Einige dieser Parameter sind teilweise individuell an das verwendete Setup geknüpft, beispielsweise Belichtungsapparaturen oder die Temperaturregelungen, die immer in ihrer Steuerung in Verbindung mit der thermischen Masse der Probenumgebung stehen. Es bietet sich daher nicht nur im Aspekt der Ergonomie an, die durchzuführenden Referenzexperimente direkt an der flugtauglichen Anlage durchzuführen. Zu beachten ist auch, dass nach dem Einstellen aller Funktionen die Anlage in den Rumpf integriert werden kann ohne sie zu verändern.

Verbrauchs- und wechselbedürftige Medien sollten auch im integrierten Zustand getauscht bzw. aufgefüllt werden können, um bei diesem Vorgang nicht die Anlage aus dem Rumpf bauen zu müssen. Dies erfordert zugängliche Schnittstellen.

Energie

Obwohl Temperatur und Energie nicht gleichzusetzen sind, werden die Anforderungen an die Temperatur zu den Aspekten der Energie aufgelistet. Die beim Wandeln von Energie emittierte Verlustleistung äußert sich in der Energieform der Wärme. In der Anlage verbaute Geräte müssen innerhalb eines Temperaturintervalls ihrer Spezifikation betrieben werden, wobei dieses unter atmosphärischen Bedingungen unter Schwerkraft gekoppelt ist. Dem Thermalhaushalt ist zur funktionsfähigen Betreibung aller Subsysteme besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Besonders kritisch sind sensibel einzuhaltende Temperaturen der kolloidalen Suspensionen. Diese dürfen zu keinem Zeitpunkt ihre kritische Temperatur überschreiten, da diese damit ihre Funktionsfähigkeit verlieren.

Die Energieversorgung des Moduls soll über Schnittstellen möglich sein, sodass externe Geräte, die von den Bodennetzspannungen gespeist werden, entsprechend ausgelegt werden können. Während des Fluges muss die Energieversorgung über Akkumulatoren realisiert werden. Das spezifische Gewicht von Batterien zeigt ebenfalls eine Notwendigkeit, diese so gering wie möglich, aber auch so groß wie nötig auszulegen. Es bedarf daher einer genaueren Kenntnis der Verbraucher und damit auch ihrer Wärmeabgabe, die zu Anstieg der inneren Temperatur führen.

Auch eine zu tiefe Außentemperatur muss berücksichtigt werden. Können ermittelte Grenzwerte nicht eingehalten werden, so müssen diese Grenzbedingungen erfasst und dokumentiert werden, sodass entsprechende Instanzen Maßnahmen ergreifen können, die die Einhaltung dieser Grenzwerte sicherstellen. Beispiele solcher Maßnahmen sind das Heizen der Launcher oder das Boxing, d. h. das Isolieren der Nutzlast mit am Boden bleibenden Isolationsmaterialien.

Des Weiteren dürfen keine unzulässigen elektromagnetischen Strahlungen andere Systeme beeinflussen. Diese werden im Rahmen des Benchtests am laufenden Experiment gemessen.

Kontrolle

Tragende Strukturbauteile, die Einfluss auf die mechanische Statik der Rakete ausüben, werden durch die MORABA im Vorfeld anhand von technischen Zeichnungen und späterem Messen geprüft und zugelassen. Insbesondere zum Rumpf müssen Prüfberichte über deren Maßhaltigkeiten und der Qualität der Halbzeuge vorgelegt werden. Andere sicherheitsrelevante Elemente wie Druckbehälter, Chemikalien, Hochspannungen oder Laser werden in einem eigenen Dokument zusammengetragen und zur Prüfung vorgelegt.

Transport

Das gesamte Equipment wird für gewöhnlich per Straßenfracht zum Raketenstartplatz nach ESRANGE gebracht. Es muss daher sichergestellt sein, dass das Equipment und die Anlage sicher verpackt, verladen und transportiert werden kann. Vorliegende speziell dafür gebaute Transportkisten mit Innenauskleidung können bei Bedarf genutzt werden.

Sicherheit

Oberstes Gebot bei allen Entwicklungen und Handlungen ist der Aspekt der Sicherheit. Die Anlage soll zu jedem Zeitpunkt sicher betrieben werden können, sodass menschlicher Schaden bei Einhaltung aller Vorkehrungen ausgeschlossen werden kann. Da in der Handhabung des Experiments durchaus potentiell gefährliche Elemente vorhanden sein werden, sind spezielle Vorkehrungen zu treffen.

Der Betrieb von Laser bedingt Schutzmaßnahmen für den Bediener der Anlage. Sowohl direktes als auch gestreutes Licht stellt eine Gefahr für das menschliche Auge dar. Im eingebauten Zustand schützt der Rumpf vor austretenden Strahlen. Ohne Rumpf müssen weitere Schutzmaßnahmen vorgenommen werden.

Mit dem Einsatz von Chemikalien müssen Laboreinrichtungen für dessen Verwendung entsprechend ausgestattet sein und das Personal geschult. Es gelten die Sicherheitsdatenblätter und lokal geltende Regeln mit dem Umgang und der Handhabung gefährlicher Stoffe.

Die zu Verwendung kommenden Batterien haben eine Hochstromfähigkeit, d. h. bei Fehlströmen oder Kurzschlüssen fließen elektrische Ströme, die metallische Leitungen und Strukturbauteile verflüssigen. Unbeabsichtigt aufgeschmolzene Metalle bringen ein sehr großes Verletzungspotential mit sich. Ein bewusstes Handeln und geschultes Wissen während den Arbeiten an der Leistungselektronik sind somit unerlässlich.

Das Speichern bedruckter Gase und deren Leitungen unterliegen ebenfalls vorgegebenen Regeln. In Abhängigkeit von Stoff, Energiemenge und Druck unterscheiden sich die vorzukehrenden Maßnahmen und müssen einzeln geprüft werden.

Auch scharfe Kanten, die durch Entgraten vermieden werden könnten, stellen ein Verletzungsrisiko während händischer Arbeiten an der Anlage dar.

Mit dem Temperieren von Bauteilen, insbesondere der Proben, können heiße Oberflächen erzeugt werden. Schutzmaßnahmen die auf solche potentiell heißen Oberflächen hinweisen oder andere Maßnahmen, die eine Verletzung des Bedieners ausschließen, müssen vorgetroffen werden.

Alle prinzipiell gefährlichen Handhabungen werden in einem Dokument seitens Esrange zusammengefasst und abgefragt, sodass ein sicherer Umgang mit der Anlage und deren Umwelt sichergestellt werden kann.

3.2.2 Analyse

Der Rumpf als Gesamtbaugruppe wird hinsichtlich seiner zu erfüllenden Funktionen in Unterbaugruppen und Bauteilen zerlegt.

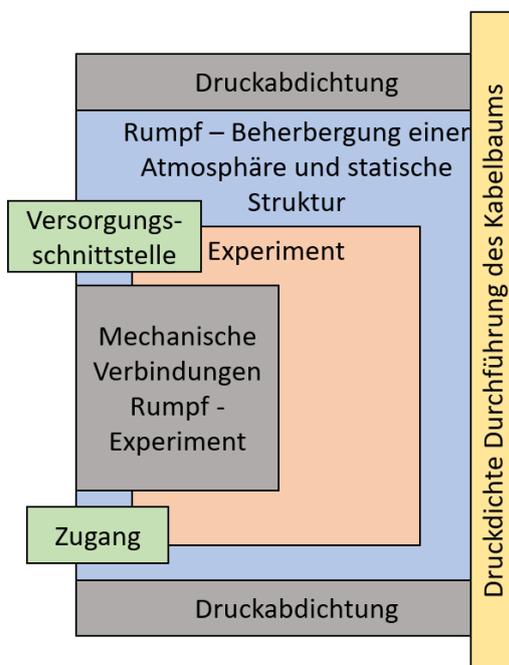


Abbildung 17: Skizze zur Verdeutlichung der zu erfüllenden Funktionen einzelner Unterbaugruppen

Zur Erfüllung der Gesamtfunktion des Rumpfes müssen also folgende Unterbaugruppen behandelt werden:

- die Rumpfsektionen,
- Druckschotten,
- Luke,
- Umbilicals,
- die Lagerungen bzw. Anbindungen des Experimentteils und
- die Durchführung von Leitungen.

3.2.3 Stand der Technik

Der Rumpf der Nutzlast besteht aus mehreren ringförmigen Segmenten, die über sogenannte Radax-Ringe miteinander verschraubt werden. Neben den fest verschraubten Radax-Ringen werden auch lösbare Verbindungselemente verwendet, die während der Flugphase Segmente der nicht wissenschaftlichen Nutzlast, d. h. von Modulen des Servicesystems der Rakete, voneinander trennen. Innerhalb dieser Segmente kann die Geometrie eines Experiments frei gestaltet werden. Es ist jedoch eine Konstruktion anzustreben, die ihren Gesamtmassenschwerpunkt nahe der Rotationsachse aufweist. Die Segmente werden als Drehteil aus der Aluminiumknetlegierung EN AW 7020 gefertigt. Kürzere Segmente, die aus dem Vollen gefräst werden, können auch aus EN AW 7075 gefertigt werden.

Es werden die relevanten Maße aus (19) und (20) erläutert und zusammengestellt.

Aus Gründen der Stabilität ist die maximale Länge eines Segments auf $l_{seg,max} = 400 \text{ mm}$ zu begrenzen. Der äußere Durchmesser liegt bei $d_{seg,\bar{a}} = 438 \text{ mm}$, wobei die minimale Wandstärke von $t_{seg,min} = 4 \text{ mm}$ nicht unterschritten werden darf. Dies gilt für geschlossene Profile.

Der Zugang zu einem Experiment in einer integrierten Nutzlast ist in vielen Fällen nötig. Integriert bedeutet, dass benachbarte Module bereits angeschraubt sind, wodurch die Zugänglichkeit von oben oder unten nicht mehr gewährleistet ist. Dafür können Luken in den Rumpf eingebaut werden.

Der Einbau von Luken bringt die Notwendigkeit von versteifenden Elementen mit. Die maximal hinnehmbaren Maße zweier gegenüberliegenden Durchbrüche werden bei einem 400 mm hohem Segment in Breite und Höhe angegeben mit $b_{hatch,max} = 215 \text{ mm}$ und $h_{hatch,max} = 230 \text{ mm}$. Die Luke selbst ist ein gekrümmtes Blech mit dem gleichen äußeren Krümmungsradius des Rumpfes. Mit Senkkopfschrauben wird sie in den Versteifungsrahmen geschraubt und bildet mit Ausnahme der Spalte eine der geschlossenen Form ähnliche Geometrie.

Weitere Anbauteile können Umbilicals sein. Sie stellen Schnittstellen für jegliche Art von Stoff-, Energie- und Informationsflüsse zwischen Experiment und Bodenequipment, dem sogenannten „Ground Support Equipment (GSE)“, dar. Beispielsweise kann das Experiment so am Boden mit externer Stromversorgung betrieben werden ohne die Akkumulatoren zu belasten. Ebenso ermöglichen Datenschnittstellen den Betrieb über eine Remoteverbindung zur Steuerung. Die Schnittstellen können entweder vor Start händisch getrennt werden oder so angeordnet werden, dass sie bei Lift-Off des Vehikels abgetrennt werden. Dazu werden die Durchführungen in einem 45° Winkel angeordnet, die angeschlossenen Kabel und Leitungen über Seile an die Struktur der Startvorrichtung gebunden und mit beim Start rausrutschenden elastischen Bändern vorgespannt. Das Vorspannen dient dazu die abgenabelten Verbindungen vom startenden Vehikel wegzuziehen, um Beschädigungen zu vermeiden. Teile aus Kunststoff sind in der Regel den thermischen Belastungen während des Fluges nicht gewachsen. Bei dieser Einwegverwendung muss bei elektrischen Komponenten auf Kurzschlussicherheit geachtet werden, da deren elektrische Isolierung funktionsunfähig wird.

Ein weiteres Anbauteil ist die Entlüftungsbohrung. Beim Aufstieg der Rakete verringert sich der umgebende atmosphärische Druck mit der Höhe. Der Innendruck der Experimente muss kontrolliert abgelassen werden, um einen Düseneffekt in Mikrogravitation durch aus Spalten austretende Restatmosphäre zu vermeiden.

Optional können Segmente auch druckdicht ausgelegt werden. Dies ist notwendig, wenn Komponenten der Nutzlast an atmosphärische Umgebung gebunden sind. Bei einer druckdichten Auslegung werden am oberen und unteren Radax-Ring Druckschotten eingebaut.

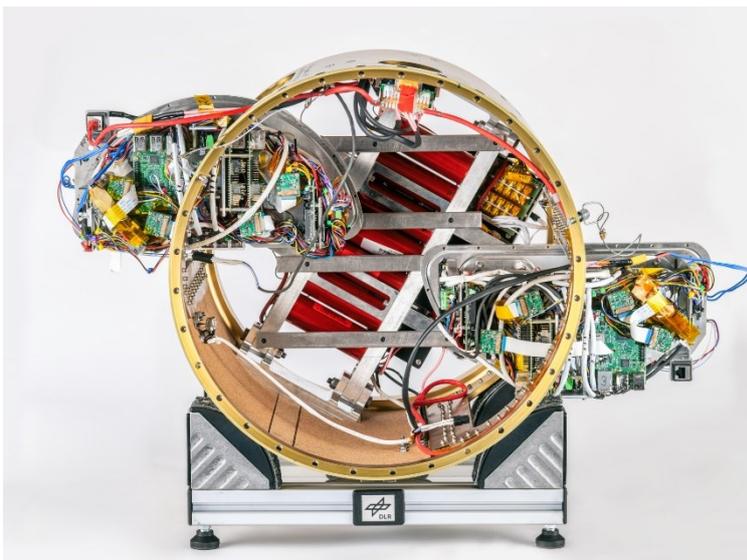
Durchbrüche für Umbilicals oder Nutzlastanbindungen durch den Rumpf werden axial abgedichtet. Druckdichte Rumpfe mit Luken sind nach dem aktuellen Stand der Technik nicht möglich. Wird dennoch beides benötigt, so sind druckdichte Einheiten zu verwenden, die in einem nicht druckdichten Rumpf integriert werden können.

Weiter ist zu beachten, dass ein Kanal zur Durchführung des Kabelbaums zur Verfügung gestellt werden muss. Über den Kabelbaum kommunizieren das Service-Modul und benachbarte Experimente.

Nachteile von druckdichten Einschüben

Werden druckdichte Systeme mit der Möglichkeit eines Late-Access benötigt, so werden sie wie bereits angedeutet mit Druckkammern in das Modul integriert. Die Nachteile dieser Variante werden exemplarisch an dem Höhenforschungsexperiment RAMSES dargestellt.

Die maximal zulässigen Maße zweier gegenüberliegenden Luken bei einem maximal längst möglichen Modul von 400 mm wurden zuvor erläutert. Abbildung 18 zeigt die Draufsicht auf RAMSES mit den zwei druckdichten Einschüben. Die Einschübe werden mit einer Stahlhaube bedeckt (hier nicht dargestellt).



$d_i = 430 \text{ mm}$,
Innendurchmesser Rumpf

$h_i = 400 \text{ mm}$, Höhe des
Rumpfes

$A_K = 37000 \text{ mm}^2$, Fläche
einer Kammer

$h_K = 205 \text{ mm}$, Höhe einer
Kammer.

Abbildung 18: Fotografie des Experimentmoduls "RAMSES"; Draufsicht ohne Druckhauben

Nachteil 1: Keine Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Bauraums

Zur Verdeutlichung des Bauraumverlusts wird in einer Überschlagsrechnung aufgeführt, die das unter Druck stehende Bauraumvolumen im dargestellten Fall mit dem inneren Bauraum des Rumpfes vergleicht.

Mit den gegebenen Maßen errechnet sich der Bauraum in den Kammern zu

$$- \quad 2 \cdot A_K \cdot h_K = 15,2 \text{ dm}^3 ,$$

und der Bauraum im Rumpf

$$- \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} h_i = 62,4 \text{ dm}^3.$$

Mit der Verwendung der Kammern werden also lediglich 24 % des prinzipiell zur Verfügung stehenden Bauraums genutzt.

Nachteil 2: Größere, nicht mobile optische Diagnostiken können nicht verwendet werden

Optischen Diagnostiken, wie beispielsweise Laser oder Mikroskope, bestehen oftmals aus nicht trennbaren Baugruppen. Das kann wegen einer sehr präzisen Ausrichtung der Komponenten untereinander erklärt werden als auch an sehr kleinen Arbeitsabständen zwischen Objektiv und Probe. Dem Einbau dieser Diagnostiken in einem nicht mit Druck beaufschlagten Teil der Rumpfsktion in Kombination mit einer druckdichten Probe wird dadurch Grenzen gesetzt. Qualitativ hochwertige Strahlengänge können nicht durch sehr dünne und zugleich transparente Teile eines Druckbehälters ohne Qualitätsverlust transmittiert werden. Solche Experimente auf Höhenforschungsraketen können nach dem aktuellen Stand der Technik nur langzeitstabile Proben untersuchen oder müssen vakuumtauglich ausgelegt werden. Die Vakuumtauglichkeit solcher Systeme kann sehr aufwendig werden. Unter anderem müssen Objektive dafür mit Entlüftungsbohrungen versehen werden, damit die Abstände ihrer Linsen untereinander nicht variieren.

Werden Komponenten außerhalb atmosphärischen Drucks verwendet, so müssen diese ebenfalls vakuumtauglich sein. Insbesondere bei der Wahl der Kabelisolierungen muss darauf geachtet werden, dass diese im Vakuum nicht ausgasen.

Bei Mitnahme von Flüssigkeiten verschärft eine Vakuumumgebung die Anforderungen an die Dichtungen. Schmale Küvettenböden, die für ein Mikroskopieren oft unerlässlich sind, werden dabei über ihre Belastungsgrenze beansprucht. Weiterhin sind auch im Rahmen einer Risikoabschätzung die Konsequenzen einer Leckage oder andere Störfälle durch Defekte zu bedenken. Flüssigkeiten könnten so verdampfen und an elektrischen Kontakten oder anderen empfindlichen optischen Funktionsflächen kondensieren.

Zu erwähnen sind auch elektrische Verbraucher, die im Vakuum ihre Wärme nicht an eine Atmosphäre abgeben können. Es müssen im Vorfeld zusätzliche Tests im Vakuum durchgeführt und ggf. zusätzliche Vorkehrungen zur Wärmeabfuhr getroffen werden. Dadurch entsteht ein nicht unerheblicher Mehraufwand während der Entwicklung.

Nachteil 3: Zeitintensive und fehleranfälliger Verschlussvorgang

Eine Luke in einer Raketennutzlast ist ein sicherheitsrelevantes Bauteil. Der Verlust einer Luke während eines Fluges kann zum Totalverlust der Rakete führen (siehe Rexus 24; https://elib.dlr.de/131728/1/PAC-24_A-190.pdf). Ein prinzipiell neues Konstruktionsdesign bedarf daher besonderer Aufmerksamkeit an technischer Sicherheit und ggf. Redundanz an Funktionselementen.

Die Luken werden nach dem heutigen Stand der Technik mit Senkkopfschrauben an den Rahmen gefügt. Bei dem oben aufgeführten Beispiel werden 17 Schrauben je Luke verwendet. Bei einem Late-Access müssen also 34 Schrauben mit dem Kreuzanzugsverfahren montiert und nachgezogen werden. Dafür wird ein gewisser Zeitaufwand in Anspruch genommen.

Bedeutung des benötigten Zeitaufwandes während eines Late-Access:

Ein Late-Access ist ein Zugang zur Raketennutzlast während eines Count Downs. In einem Count Down werden alle relevanten Systeme des Vehikels getestet und für den Flug vorbereitet. Dies erfolgt im Rahmen eines terminierten Ablaufes, dem „Launch-Procedure“. Abweichungen von der Timeline können durch Anhalten des Count Down – einem „Hold“ – an entsprechender Stelle kompensiert werden. Zu lange Holds oder Holds in einer kritischen Phase des Count Down können bedingt durch technische Anlagengrenzen zu einem Abbruch führen. Da die Rakete zu diesem Zeitpunkt vollständig integriert ist, müssen besondere Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Beispielsweise dürfen keine elektrischen Schaltkreise geschaltet werden, während Personen an der Rakete arbeiten. Der Zugang und die Anzahl der Personen sind streng reglementiert und zeitlich aufeinander abgestimmt. Verzögerungen beim Integrieren der Proben in die Nutzlast können sich daher kritisch auf weitere Prozesse auswirken. Um einen Late-Access sicher und schnell durchzuführen, ist ein Design zur Integration der Proben anzustreben, das möglichst wenig Handgriffe benötigt und wenig Fehlerquellen bietet.

Fällt eine Schraube in das Experimentmodul, muss diese zwingend entfernt werden. Dies kann den gesamten Ausbau der Nutzlast bedeuten. Ebenso beispielhaft sind vergessenes Werkzeug in der Nutzlast und Beschädigungen der Finnen durch herabfallende Teile.

3.2.4 Rumpfsktionen

Der Rumpf der Nutzlast bildet den äußeren Teil des Vehikels und ist zugleich tragende Struktur. Er besteht aus mehreren Segmenten, die miteinander verschraubt werden. Vorgegeben werden Material, Wandstärke, höchstzulässige Höhe und die Gestaltung der Verbindungen – die RADAX Ringe. Weiterhin werden Form- und Lagetoleranzen vorgegeben (20).

Für den vorliegenden Fall werden unter Einhaltung der genannten Bedingungen weitere konstruktive Ausgestaltungen benötigt. Da die für SOMEX aus Gründen der Modularität erforderliche innere Gesamthöhe über 400 mm liegt, werden folglich mehrere Segmente benötigt. Zur Erfüllung der Druckdichtigkeit müssen die Segmente untereinander abgedichtet werden. Da die Verschraubungen der Radax-Ringe 30° zur Längsachse geneigt sind, ist die Verwendung von statischen axialen Dichtungen von Nachteil. Die Achsen von Durchgangs- und Gewindebohrung lägen bei Verwendung einer axialen Dichtung vor dem Anziehen der Verschraubung nicht konzentrisch. Mit der Verwendung radialer Dichtungen wird das Problem umgangen. Ein Vorsprung mit radial gedrehter Dichtungsnut nimmt dabei die Dichtung auf während der gegenüberliegende Teil an seiner dichtenden Funktionsfläche entsprechend als solche gekennzeichnet werden muss.

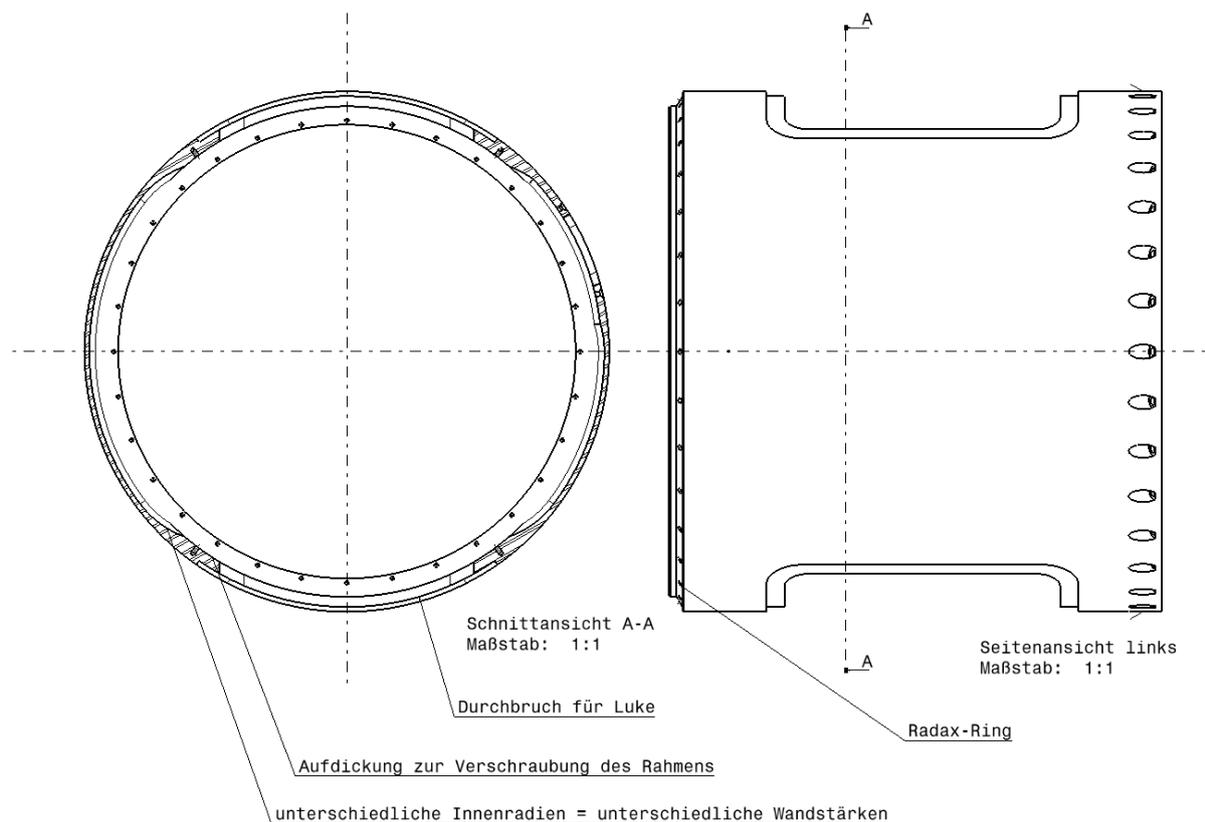


Abbildung 19: Drauf- und Seitenansicht untere Rumpfsktion

Zur Aufnahme der Luke wird ein Rahmen benötigt, der über die notwendigen Flächen zur Dichtung und Arretierung verfügt. Um den Rahmen zu montieren, soll er von innen in den Rumpf verschraubt werden. Er ist dadurch verliersicher gefügt. Dabei sollen die Schrauben in von innen gebohrte Gewindefacklöcher aufgenommen werden. Die Sacklöcher stellen im Gegensatz zu einfacher zu fertigen Durchgangsbohrungen keine zusätzlich zu dichtenden Elementen dar.

Grundsätzlich werden die Rumpfe aus Ronden gedreht. Das bedeutet, dass fertigungsbedingt die Wandung entlang des Umfangs gleich stark ist. Sie kann nur axialer Richtung variiert werden. Für von innen gebohrte Gewindefacklöcher ist eine Wandstärke von 4 mm nicht ausreichend. Zur Vermeidung einer generell dickeren Wandung wird daher neben dem Drehen ein Scheibenfräser bei der Herstellung der Rumpfsktion verwendet. Mit ihm lassen sich unterschiedliche Wandstärken entlang des Umfangs realisieren.

In (18) wird vorgegeben, wie ein Ausbruch für die Installation einer Luke verstärkt werden soll. Mit der Möglichkeit radial variierende Wandungen herstellen zu können, sollen die Vorgaben mit umgesetzt werden, ohne dabei ein zusätzliches Bauteil fertigen zu müssen. Das Aufmaß des sonst üblichen Verstärkungsrahmens wird zusätzlich bis zu den beiden Radax-Ringen geführt, sodass mit zusätzlicher Steifigkeit und Biegefestigkeit gerechnet werden kann.

Der Rumpf soll durch zwei sich gegenüberliegenden Luken nach Innen zugänglich sein. Die Entwicklung einer Luke, die alle Anforderungen erfüllt, stellt sich als Neuentwicklung dar. So soll im Sinne eines technischen Demonstrators erst eine Luke installiert werden, jedoch mit der Möglichkeit eine zweite später einzufügen. Wie bereits erwähnt werden die Luken von Rahmen mit entsprechenden Funktionsflächen aufgenommen. Ein Rahmen dient als Dummy, indem ein Teil nicht ausgefräst wird, jedoch in zukünftiger Anwendung nachträglich zur Aufnahme einer Luke verwendet werden kann.

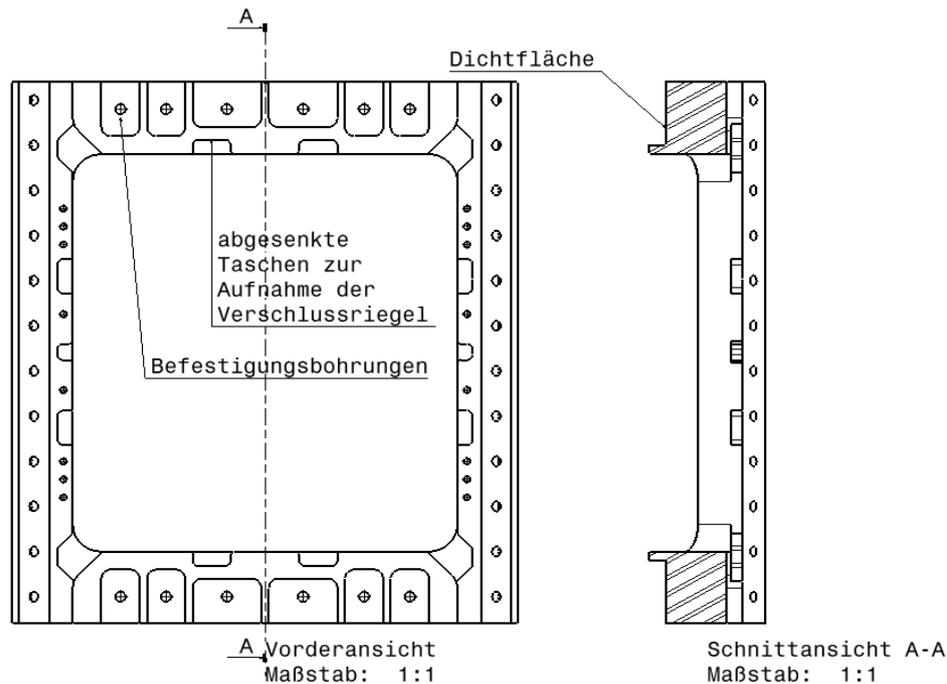


Abbildung 20: Drauf- und Seitenansicht Lukenrahmens

Der umlaufende Bund des Rahmens wird in die Ausfräsung eingesetzt. Die planen Kontaktflächen sind als Spielpassung ausgelegt. Das hat den Hintergrund, dass bei einer elastischen Verformung des Rumpfes die Kräfte direkt in den Bereich des Rahmens mit einem höheren Flächenträgheitsmoment abgeleitet werden anstatt über die Schraubverbindung mit dem Rumpf. Zwischen Rahmen und Rumpf wird eine Dichtmasse gelegt und die äußeren Stoßflächen nach Anziehen der Schrauben mit Silikon zusätzlich gedichtet, um ein kriechendes Austreten der Dichtmasse zu verhindern. Die Innenseite des Rahmens ist entsprechend der Mechanik der Luke gefräst.

Die mittlere Rumpfsektion wird auf die untere geschraubt. Sie wird ausschließlich nach standardisierten Fertigungsverfahren gedreht. Mit einer Variation ihrer Höhe im Bereich des zulässigen oder auch Anzahl mehrerer Sektionen, kann die Gesamthöhe beliebig an andere zu hüllenden Anlagen angepasst werden.

Die abschließende obere Rumpfsektion ist gleichzeitig das obere Druckschott und wird im nächsten Unterkapitel behandelt.

3.2.5 Druckschotten

Für einen druckdichtenden Innenraum bedarf es neben einem dichten Rumpf eine obere und untere Abdichtung. Dies wird mit Druckschotten realisiert. Das untere Druckschott hat neben seiner dichtenden Funktion auch die Aufgabe, die Last durch die Trägheitskraft des Experiments in den Rumpf abzuleiten. Das untere Druckschott wird auf einen Bund in der Innenseite des Rumpfes geschraubt und dichtet axial. Damit ist selbst bei einem Versagen der Schraubverbindungen ein Formschluss gewährleistet. Das Schott ist als eine auf Druck belastete Scheibe ausgelegt. Stege versteifen die Konstruktion. An den Lasteinleitungsflächen, auf denen die Wangen der Stringer montiert sind, ist die Wandung stärker. So lassen sich Gewinde-Sacklochbohrungen fertigen ohne die Platte zu durchbrechen und erneut dichten zu müssen. Die Stege an den Einleitungsflächen sind breiter ausgelegt.

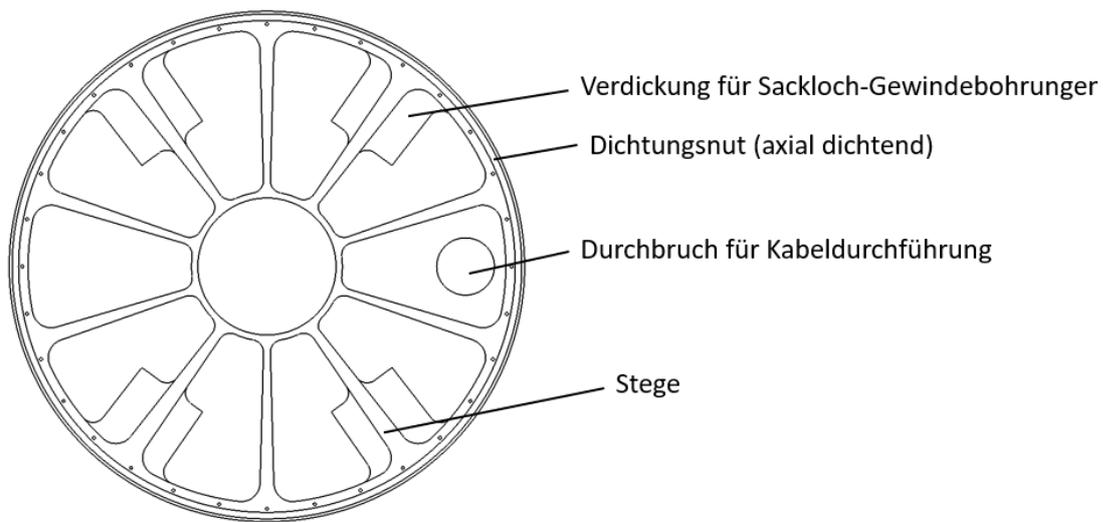


Abbildung 21: Untersicht des unteren Druckschotts

Das obere Druckschott ist mit Radaxverschraubung radial gedichtet. Es kann auf einen beliebigen Topf mit gegebenem Innendurchmesser und entsprechender Oberflächenqualität installiert werden. Innenseitig werden zwei Platten angeschraubt, die für den Verwendungszweck angepasst modifiziert werden können, ohne das gesamte Bauteil zu verändern. Für den hier beschriebenen Fall sind das D-Sub Buchsen als Schnittstelle zum Servicemodul der Rakete. An den Durchbruch wird der Stutzen zur Kabeldurchführung angeflanscht.

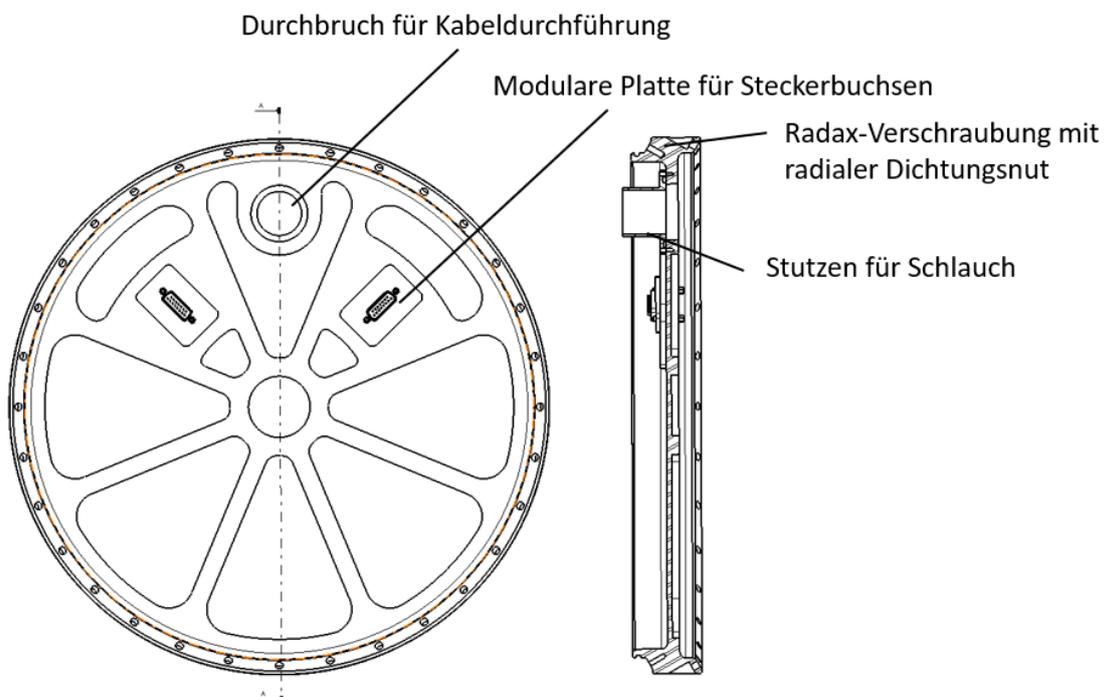


Abbildung 22: Draufsicht und Schnittdarstellung des oberen Druckschotts mit montierten Anbauteilen

3.2.6 Luke

Mit der Neuentwicklung der Luke werden im Wesentlichen folgende Vorteile durch deren Kinematik realisiert:

- Keine manuell anzuziehenden Schrauben bei der Installation
- Sichere Verriegelung während des Fluges
- Einfache Handhabung

Kinematik der Luke:

Die Luke besteht aus einem Grundkörper, der die Verschlussmechanik aufnimmt, einer Arretiermechanik, einer Dichtung und einer Blende.

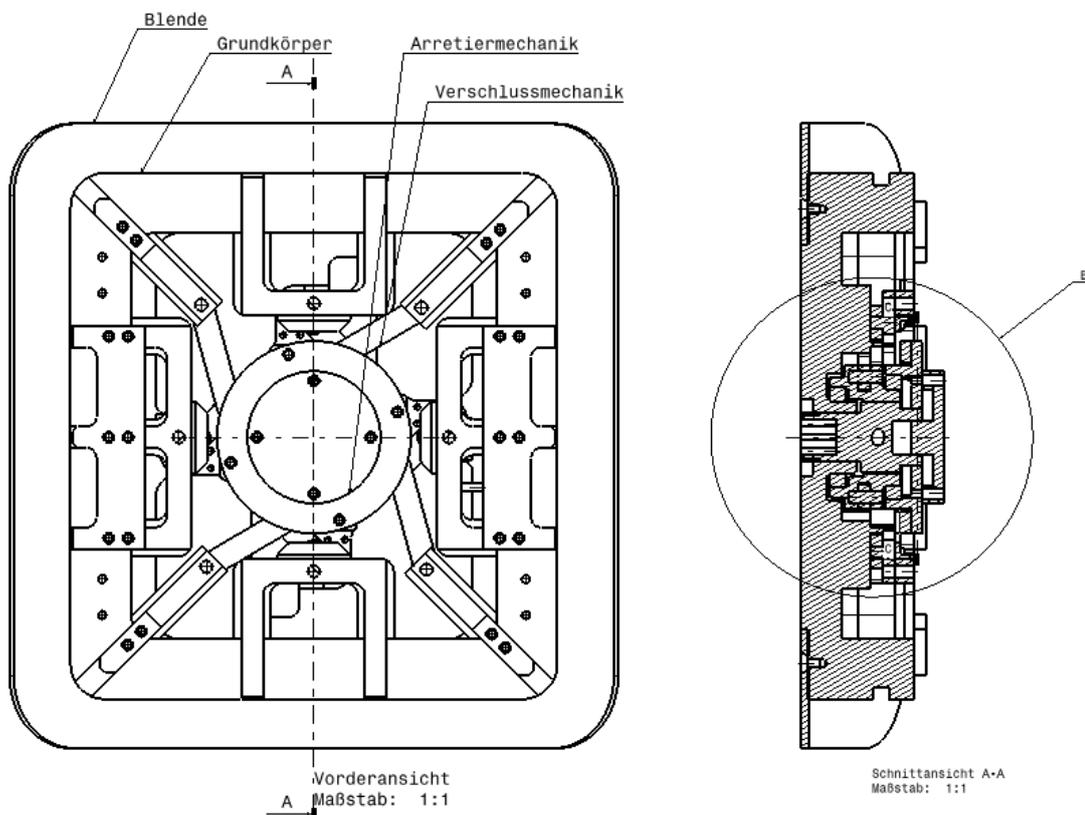
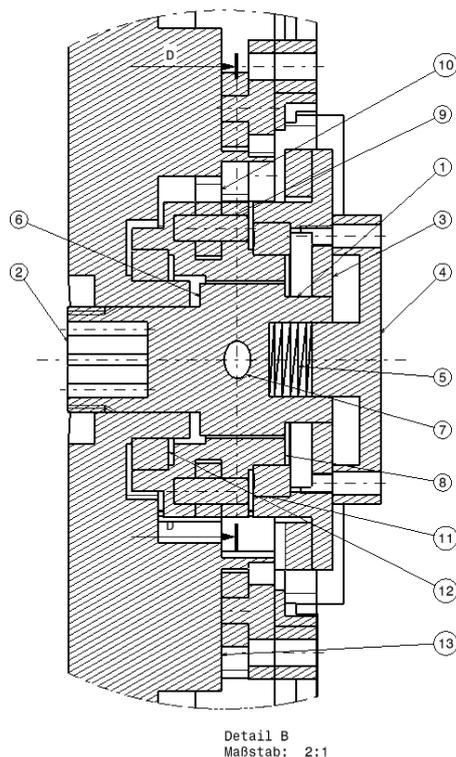


Abbildung 23: Draufsicht und Schnittdarstellung der Luke

Zum Verschließen der Luke wird diese in den Rahmen eingesetzt. Um die Verschlussmechanik zu bewegen, muss die Arretiermechanik betätigt bzw. entriegelt werden.



1. Drehkolben
2. Innenvierkantantrieb mit Außengewinde
3. Arretierscheibe mit Zähnen
4. Deckscheibe mit Zapfenführung
5. Druckfeder
6. Axialdichtung (nicht dargestellt)
7. Bohrung für Querbolzen
8. Kupplung
9. Stift zur radialen Lagerung der A-Hebel
10. A-Hebel
11. Inneres Radiallager der Kupplung
12. Äußeres Radiaxlager der Kupplung
13. Grundkörper

Abbildung 24: Schnittdarstellung der Arretiermechanik

Mit einem Vierkantschlüssel wird der Drehkolben (1) eingedrückt. Die Druckfeder (5) wird gespannt. Die Bohrung im Grundkörper (13) und der Zapfen der Deckscheibe (4) führen den Drehkolben. Der Querbolzen in der Querbohrung des Drehkolbens (7) kann sich axial in der Nut der Kupplung (8) bewegen. Im eingedrückten Zustand werden die Zähne des Drehkolbens aus der Verzahnung der Arretierscheibe (3) bewegt. Die Arretiermechanik ist nun geöffnet und eine Rotation um 90° ist möglich.

Beim Schließen der Arretiermechanik (nach 90° Drehung des Kolbens durch einen Vierkantschlüssel) drückt die Feder (5) den Drehkolben nach außen (hier links) und die Zähne von Kolben und Arretierscheiben greifen ineinander. Die Arretierscheibe ist fest mit dem Grundkörper verbunden. Dabei reicht der Federdruck aus, die Dichtung (6) zu verpressen. Zusätzlich wird eine Kontermutter auf den Drehkolben angezogen, um zusätzliche Sicherheit gegenüber der Dichtung und der Arretierung zu gewinnen.

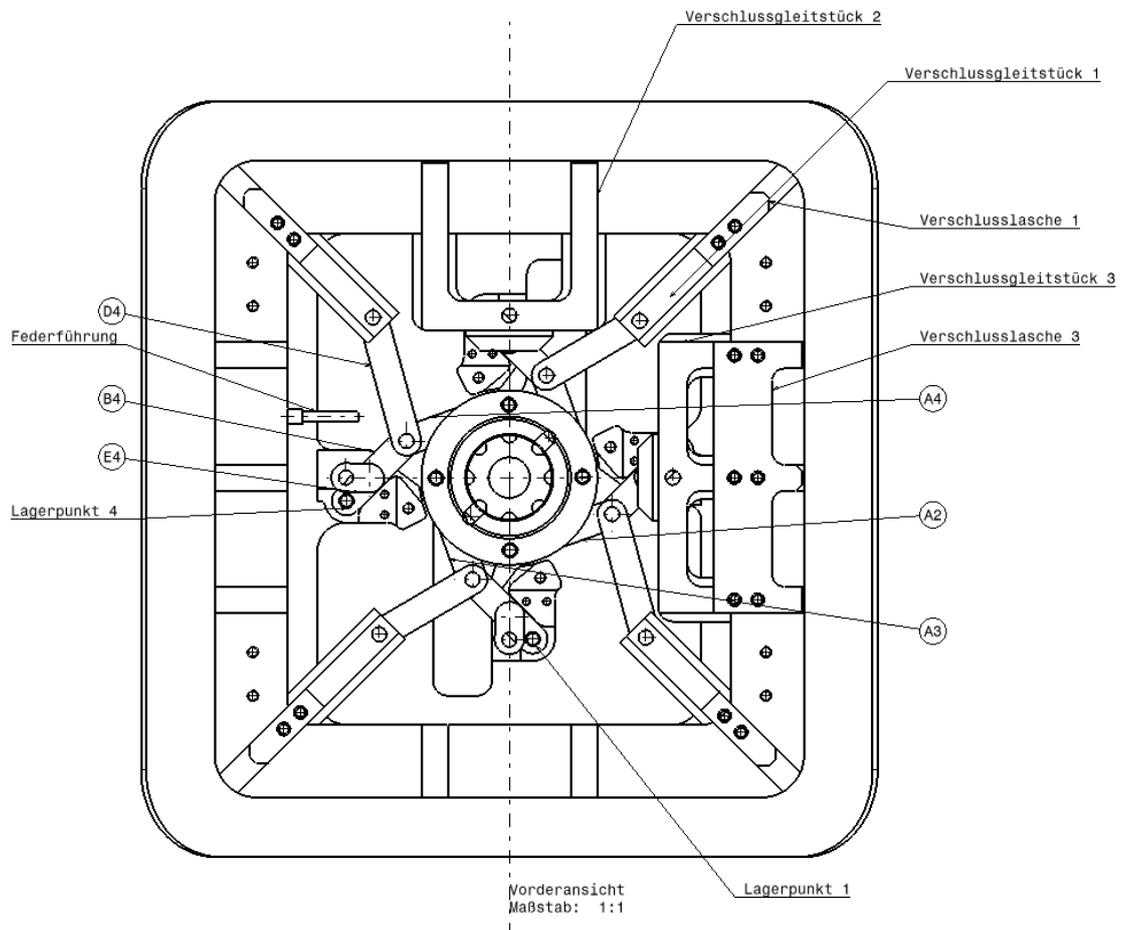


Abbildung 25: Innenansicht auf die Verschließmechanik; linkes und unteres Gleitstück, linke Lache, Arretierscheibe, zweites Federbein und Deckscheibe ausgeblendet. Die Mechanik ist in geöffneter Position abgebildet

Bei geöffneter Arretiermechanik lässt sich der Drehkolben drehen und nimmt die Kupplung mit.

Die Kupplung lagert radial beweglich je um 90° versetzt die Hebel A1, A2, A3 und A4. Die gegenüberliegenden Enden der Hebel A sind mit den jeweiligen Hebeln D und B ebenfalls radial beweglich verstiftet. Die Hebel D verbinden die in den Ecken sitzenden Verschlussgleitstücke. Die Hebel B lagern auf Zapfen, die in den Lagerpunkten im Grundkörper verschraubt sind. Die Hebel E verbinden die restlichen Gleitstücke. Die Gleitstücke mit den jeweils dreifachen T-Nut Führungen werden durch Federn, die auf den Federführungen gehalten werden, „aufgedrückt“. Die Feder und Mechanik stellen eine Energiesenke da. Dies wird später mit der Beschreibung der Kniehebel erläutert. Auf den Gleitstücken sind mit Ausnahme der zweifachgeführten Gleitstücken Laschen aufgeschraubt. Die Laschen greifen beim Verschließen in die Taschen des Rahmens. Fasen sorgen für eine genaue Positionierung, um die Spaltmaße möglichst genau einzuhalten. Dies ist für die Dichtung besonders wichtig. Dies wird später erläutert.

Kniehebel

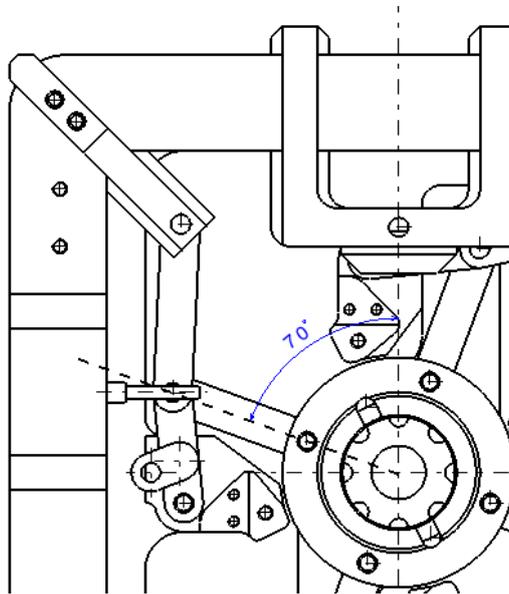


Abbildung 26: Totpunkt-Position

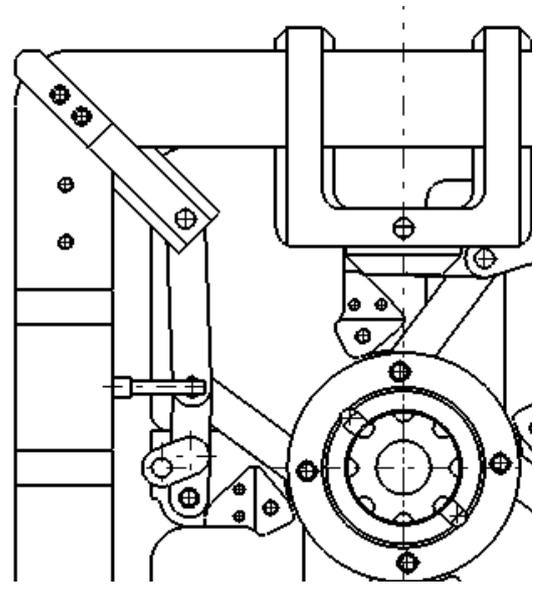


Abbildung 27: Geschlossene Position

Im geöffneten Zustand liegen die Hebel B an der Auflagekante der Lagerpunkte an und werden durch die Federn dort gehalten. Durch weiteres Drehen werden die Federn weiter gespannt, die Gleitstücke schieben die Laschen in die Taschen des Rahmens und zentrieren die Luke bis ein Verdrehwinkel von 70° erreicht ist. Das ist die Position, in der die Federn am meisten gespannt werden. Die Achse des Drehkolben (Kupplung), die Achse der Verstiftung Hebel A – Kupplung und die Achse der Verstiftung Hebel A – Hebel B/D stehen in einer Achse zueinander und stellen einen Totpunkt dar. Eine weitere Drehung der Kupplung ($>20^\circ$) bewirkt eine teilweise Entspannung der Federn. Hebel A wird an die Anschlagkante am Lagerpunkt gedrückt. Die Mechanik befindet sich in einer Energiesenke. Das bedeutet, dass die Hebelmechanik nur durch drehen der Kupplung wieder bewegt werden kann. Ein Öffnen über die Gleitstücke ist nicht möglich, da die Federn zum Öffnen durch Drehen in die andere Richtung erst weiter gespannt werden müssen, damit die Hebel über den Totpunkt gelangen können.

Hebel E dient der Ankopplung an die Gleitstücke und ist so auf Hebel B positioniert, dass eine Übersetzung zum Spannen der Feder vorliegt.

Die Zähne der Drehkolbens sind so angeordnet, dass sie bei korrekter Verschlussstellung in die Arretierscheibe einrasten und der Kolben durch die Rückstellfeder axial nach außen gedrückt werden (siehe Arretiermechanik).

Kräfte:

In diesem Konstruktionsdesign werden grundsätzlich primäre und sekundäre Kräfte unterschieden. Unter den primären Kräften werden die Kräfte definiert, die die Luke gegenüber ihrer Einsatzumwelt ausgesetzt ist. Es lassen sich aufzählen:

- Die maximal zu erwartende statische Trägheitskraft, die aus der Beschleunigung des Vehikels hervorgeht,

- Die dynamischen Kräfte, d. h. Schwingungen durch Motorabbrand – werden rechnerisch über Äquivalenzbeschleunigung abgedeckt,
- Druckkräfte, durch Differenz der statischen Drücke.

Die sekundären Kräfte sind Kräfte, die für die Zustandswechsel benötigt werden:

- Betätigungskräfte (und Moment) zum Verschließen/Öffnen
- Federkräfte zum Aufbau/Aufrechterhaltung der Energiesenke und Rückstellung des Kolbens

Die beweglichen mechanischen Bauteile sind radialsymmetrisch um die Kupplung angeordnet, sodass sich die Trägheitskräfte gegenseitig aufheben. Dabei kann die Luke in alle axialen Richtungen beschleunigt werden. Über die Federn wird die Hebelmechanik gespannt und an die Anschlagkanten angeedrückt. Die Anschlagkanten der Lagerpunkte des Grundkörpers sind aus einem Bauteil gefräst. Die Massenträgheitskraft der gesamten Luke wird über die Laschen in den Rahmen übertragen. Der Grundkörper hat zum Führen der Gleitstücke T-Nuten. Die Druckkraft durch die statische Druckdifferenz wird somit über einen Formschluss in Belastungsrichtung von den Laschen über die Gleitstücke direkt in den Grundkörper geleitet.

Als redundanter Sicherheitsmechanismus dient die bereits beschriebene Arretiermechanik. Der Dimensionierung der Rückstellfeder gehen folgende Anforderungen voraus:

- Der Kolben muss händisch gedrückt werden können,
- Der Anpressdruck muss groß genug sein, um die Dichtung ausreichend zu pressen,
- Die Vorspannkraft der Feder muss größer sein als das Produkt der Äquivalenzbeschleunigung durch dynamische Kräfte und der Masse des Drehkolbens, um den Kolben auf Position zu halten.

Mit Einrasten der Zähne des Kolbens in die mit dem Grundkörper verbundene Arretierscheibe werden die Haltekräfte durch einen Bolzen durch den Drehkolben und der Kupplung übertragen.

Das Aufschrauben der Kontermutter dient einer weiteren Redundanz. Mit aufgeschraubter Kontermutter lässt sich der Kolben nicht mehr eindrücken, damit auch nicht mehr drehen (Zähne greifen), die Kupplung nicht mehr drehen (Bolzen) und damit die Verschlussmechanik nicht mehr bedienen.

Dichtung:

Die Luke wird über eine aufblasbare Radialdichtung abgedichtet. Dabei liegt die Dichtung in einer Nut im Grundkörper. Die Dichtung ist eine Maßanfertigung der Firma *Flohreus*. Der aus Silikon bestehende „Schlauch“ verfügt über einen Memory-Effekt, d. h. die Dichtung fällt ohne Druckbeaufschlagung so in die Nut zurück, dass sie bündig abschließt. Dies ist wichtig, damit beim Einsetzen der Luke die Dichtung nicht durch Abscheren beschädigt wird. An das Ventil, das durch eine Bohrung im Nutgrund in das Innere der Luke geführt ist, ist ein flexibler Pneumatikschlauch verschraubt. Der Schlauch wird über Schnellkupplungen an ein Interface Paneel im Inneren des Rumpfes gesteckt, welches mit dem Druckspeicher verbunden ist. Die Druckspeicher werden über das extern zugängliche Umbilical über eine selbstsperrende Kupplung mit Stickstoff beaufschlagt. Ein normal offenes Magnetventil trennt bei anliegender

Versorgungsspannung die pneumatische Verbindung zwischen Druckspeicher und Umbilical. Damit soll verhindert werden, dass bei einem Ausfall der Anschlusskupplungen durch thermische Überbelastung während des Fluges der Druck in der Dichtung abfällt. Die Druckspeicher kompensieren höhere Druckschwankungen aufgrund von Temperaturänderungen während des Fluges. Da die Dichtung ein nur geringes Gasvolumen aufnimmt, würden auf selbst kleine Temperaturänderungen ohne Druckspeicher hohe Druckveränderungen folgen, die eine Zerstörung der Dichtung und damit ein Totalausfall verursachen würden. Ein Drucksensor überwacht und dokumentiert dabei den anliegenden Dichtungsdruck während der gesamten Einschaltzeit.

Mit dem Bedrücken der Dichtung presst sich diese an die elektropolierte Oberfläche des Rahmens und wirkt wie eine klassische Radialdichtung. Dabei darf das Spaltmaß nach Vorgabe des Herstellers 0,5 mm nicht überschreiten. Dies wird durch die Selbstzentrierung beim Verschließen mit den Fasen der Laschen und der Taschen des Rahmens sichergestellt.

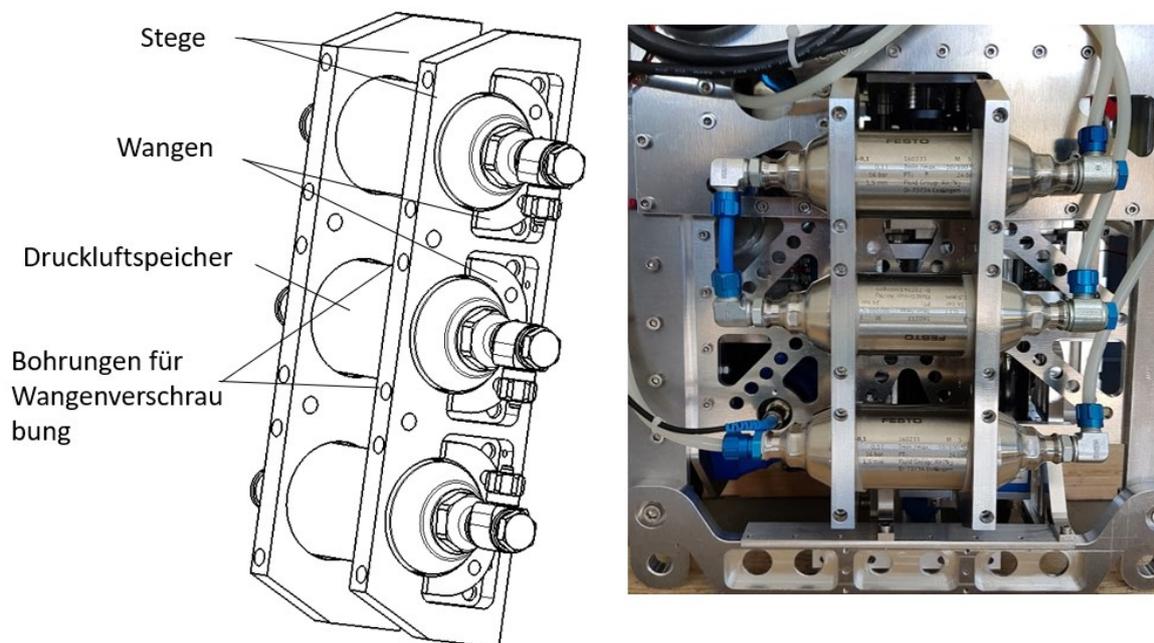


Abbildung 28: Isometrische Ansicht und Fotografie der Druckspeicher-Baugruppe

Abbildung 29 zeigt das Umbilical mit den pneumatischen Kupplungssteckern.

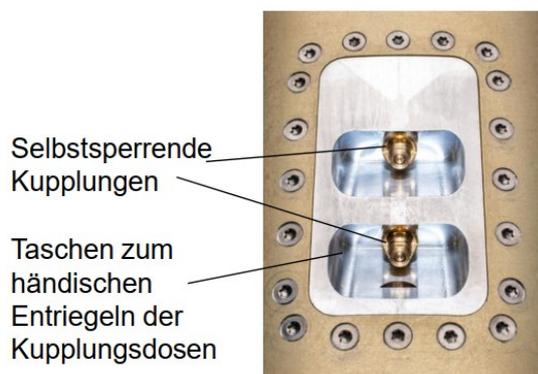


Abbildung 29: Pneumatik Umbilical mit zwei selbstsperrenden Kupplungen

Weiter Abbildungen sind zur besseren Übersichtlichkeit im Anhang zu finden.

3.2.7 Umbilicals

Zur Versorgung der Anlage mit Stoff-, Energie- und Informationsströme am Boden werden Schnittstellen am Rumpf benötigt: Die Umbilicals. Nach Art ihrer Eigenschaften werden im Folgenden das elektrische und das pneumatische Umbilical beschrieben.

Umbilical für elektrische Konnektoren



Abbildung 30: Umbilical nach einem Flug



Abbildung 31: Umbilical vor einem Flug

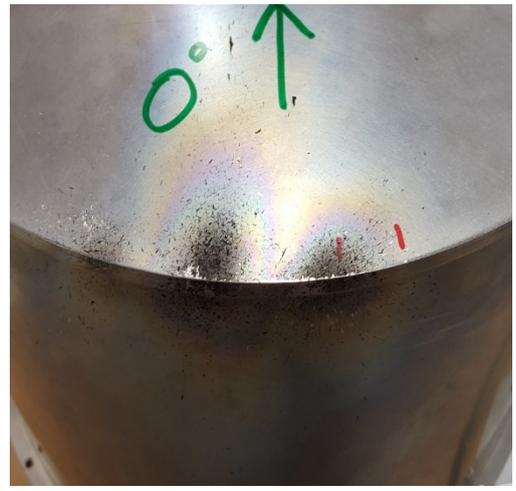


Abbildung 32: Bauteil aus Edelstahl unmittelbar hinter dem Umbilical. Heißes Gas durchdrang die Konnektoren. Anlauffarben sind erkennbar und lassen auf die erreichte Temperatur schließen



Abbildung 33: Zerstörte Konnektoren nach einem Wiedereintritt

Abbildung 30 und 31 zeigen ein Umbilical eines nicht druckbeaufschlagten Experiments auf einer Höhenforschungsraketen vor und nach dem Flug. Deutlich zu erkennen sind im ersten Fall die verbrannten Kunststoffteile der Steckverbindung. In Abbildung 32 ist ein aus Edelstahl gefertigtes Bauteil zu sehen, welches sich unmittelbar hinter dem Umbilical befindet. Die Anlauffarben lassen den Wärmeeintrag durch Eindringen heißen Gases in den Innenraum erahnen. In Abbildung 33 ist ein weiteres Beispiel für ein thermisch zerstörtes Umbilical gezeigt.

Die oben gezeigte Zerstörung hätte für ein mit Druck beaufschlagtes Modul unter Umständen ein Totalausfall der Gesamtfunktionalität zur Folge. Daher werden die Konnektoren mit einem Hitzeschild geschützt.

Ein beweglicher Hitzeschild schließt mit dem Trennen der Steckverbindungen. Dabei werden am vorgelegten Beispiel zwei elektrische, kunststoffisolierte Durchführungen und eine RJ45-Einbaubuchse vor der thermischen Einwirkung geschützt.

Die dargestellte Konstruktion soll als prinzipielles Muster verstanden werden. Die Verwendung anderer Konnektoren unterschiedlicher Art ist ebenfalls durch Anpassung der Maße des Umbilicals möglich.



Abbildung 34: Häufig verwendete
Pneumatik/Hydraulikkupplung (Herstellerfoto Stäubli)

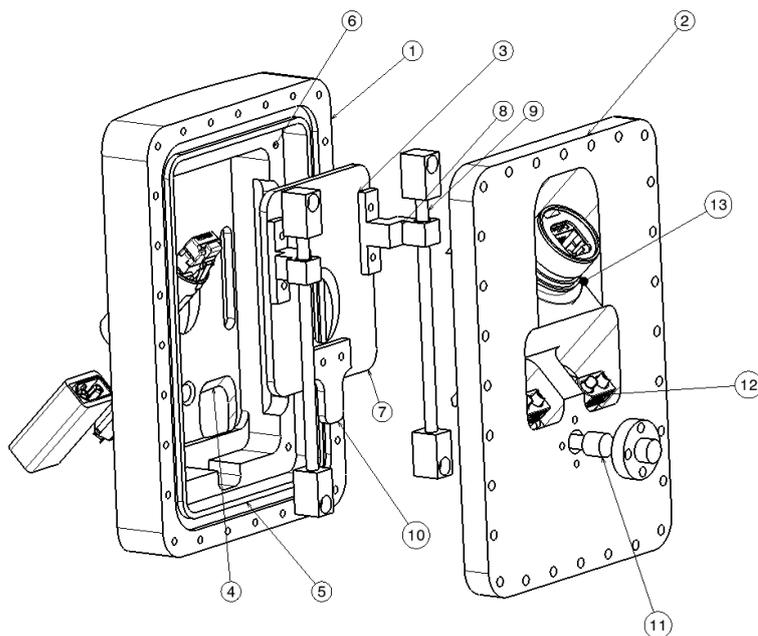


Abbildung 35: USB-Einbaubuchse
(Herstellerfoto)

Zur Erfüllung der Gesamtfunktion wird diese zunächst gedanklich in zwei Teilfunktionen zerlegt. Zum einen ist das die Auslegung zur Druckdichtigkeit und zum andern die Auslegung des automatisierten Verschließens des Hitzeschildes zur Vermeidung einer thermischen Überbelastung.

Druckdichtigkeit

Das Umbilical besteht aus einem Inneren und äußeren Grundkörper sowie der beweglichen Baugruppe des Schildes.



- 1: Äußerer Körper
- 2: Innerer Körper
- 3: Bewegliche Baugruppe
- 4: Schräge Ausfräsungen
- 5: Dichtungsnut
- 6: Gewindebohrung zur Aufnahme der Wellenböcke
- 7: Stahlblech
- 8: Lagerbuchse mit Gleitlager
- 9: Druckfeder (nicht dargestellt)
- 10: Führungslasche
- 11: Arretierzapfen
- 12: XT-60 Stecker
- 13: RJ45 Buchse

Abbildung 36: Explosionsansicht des elektrischen Umbilicals

Der äußere Grundkörper (1) wird von innen in den Ausbruch des Rumpfes gesetzt. Von außen eingedrehte Senkkopfschrauben ziehen dabei den Körper mit seiner Dichtung in der Dichtungsnut an die Innenseite des Rumpfes. Er weist auf der von außen nicht verdeckten Ansicht mehrere (hier im Beispiel: drei) ausgefräste Taschen (4) auf, durch die später die Steckverbinder geführt werden. Die Taschen sind in einem 45° Winkel gefräst. Auf der Innenseite befinden sich eine weitere Dichtungsnut (5) sowie ringsum angeordnete Gewindebohrungen, womit der innere Grundkörper (2) verschraubt und gedichtet wird. Im Innenteil werden mit vier weiteren Gewindebohrungen (6) Wellenböcke der Linearführung der beweglichen Baugruppe (3) fixiert.

Die bewegliche Baugruppe besteht aus einem Stahlblech (7), zwei Lagerbuchsen mit Gleitlagern (8), Druckfedern (9), einer Führungslasche (10), zwei Linearwellen und einer Arretiervorrichtung (11).

Der innere Körper wird auf den äußeren aufgeschraubt und lagert die Durchführungen: Im Beispiel zwei elektrische Verbindungen (12) und eine RJ45 Buchse (13). Die RJ45 Buchse wird mittels einer Flachdichtung und einer Kontermutter druckdichtend auf die 45° geneigte Funktionsfläche verschraubt. Bei den elektrischen Durchführungen handelt es sich im Beispiel um XT-60 Stecker, die häufig ihre Anwendung im Modellbau finden. Jeweils zwei Stecker werden mit blanken Kupferlitzen im 90° Winkel verlötet und in die ebenfalls im 45° Winkel ausgefräste Tasche gesetzt. Die Wandung der Tasche wird mit Silikon ausgekleidet und mit transparentem Epoxidharz ausgegossen, sodass die Kupferleitungen komplett eingebettet sind. Das Harz dient dem formschlüssigen Halt der Durchführungen in entsprechender Druck-Belastungsrichtung. Das Silikon soll die unterschiedliche Ausdehnung auf Grund unterschiedlichen thermischer Ausdehnungskoeffizienten zwischen Epoxid und Aluminium kompensieren und damit ein Ablösen der Grenzflächen verhindern. Die transparente Eigenschaft des Epoxidharzes ermöglicht eine optische Inspektion auf Risse oder Ablösungen im Inneren des Materials.



Abbildung 37: Mit Epoxidharz ausgegossene Tasche

Eine abgesenkte Durchgangsbohrung führt einen Zapfen, der der Arretierung des Schildes gewährleistet. Der Zapfen wird durch eine Feder gespannt und mit einem Blindflansch von innen verschraubt.

Zusammenfassend wird die Druckdichtigkeit durch eine klassische axiale Dichtung zwischen Rumpf und äußerem Körper, einer axialen Dichtung zwischen äußerem und innerem Körper, einem Blindflansch (14), einer Flachdichtung an der RJ45 Buchse und der ausgegossenen Tasche mit den elektrischen Steckverbindern erreicht.

Kinematik des Hitzeschilds

Die Lagerbuchsen mit dem eingepressten Gleitlager werden mit Senkkopfschrauben auf das Stahlblech geschraubt und über die Linearwellen axial geführt. Zwei Druckfedern üben dabei eine Kraft in Richtung geschlossenen Zustand auf. Die Druckfeder des Arretierzapfens wird durch die Führungslasche auf Spannung gehalten, wenn sich das Stahlblech im geöffneten, d. h. in der oberen Position befindet. In geschlossener Position drückt die Feder den Zapfen in die Öffnungsbohrung des Schildes, wodurch dieses nicht mehr geöffnet werden kann.

Zum Verbinden des Umbilicals wird zunächst der Arretierzapfen eingedrückt, das Schild gegen den Federdruck hochgeschoben, ein RJ45 Stecker mit entfernter Arretiernase in die RJ45 Buchse gesteckt und eine Rückschlaghülse eingeführt. Die Rückschlaghülse liegt um den RJ45 Stecker und hält den Schild oben. Damit wird das Kabel geschützt und ein vollständiges Rausziehen sichergestellt. Dann lassen sich die beiden XT-60 Stecker, ebenfalls mit 3D gedruckten Schutzhüllen, in die entsprechenden Verbinder einstecken. Das Umbilical ist verbunden.

Beim Start der Rakete werden die an Seilen befestigten Kabel festgehalten und die „Rakete zieht sich aus ihrer Steckverbindung raus“. Die Rückschlaghülse (15) gibt den Hitzeschild frei, während die Druckfedern und die Trägheitskraft auf die bewegliche Baugruppe in Richtung Schließposition wirkt. Dabei verdeckt das Schild alle ausgefrästen Durchbrüche des äußeren Körpers. Der Arretierzapfen sichert zusätzlich ein nachträgliches Öffnen des Schildes bei einem möglichen Taumeln während des Wiedereintritts. Die Spalte zwischen äußeren Körper und dem

Schild sind so gering, dass die dadurch eintretende Menge an Heißgas keinen Einfluss auf die dahinter befindlichen Kunststoffteile ausübt.

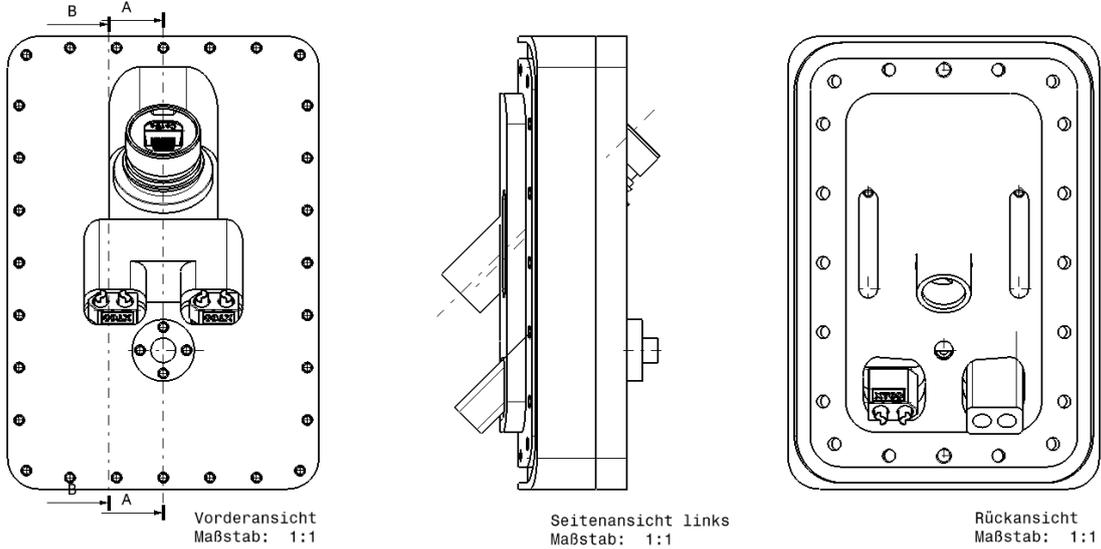
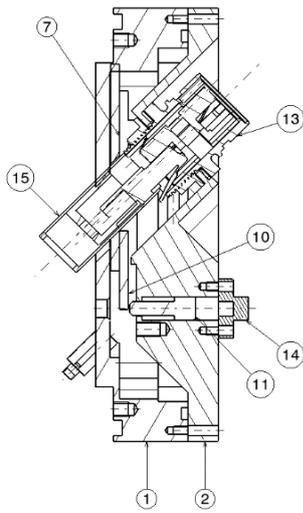


Abbildung 38: Verschiedene Ansichten der Gesamtbaugruppe



14: Blindflansch
 15: Rückschlaghülse

Abbildung 39: Schnittdarstellungen mit geöffnetem Schild in verschiedenen Ebenen (Siehe Vorderansicht Abb. 38)

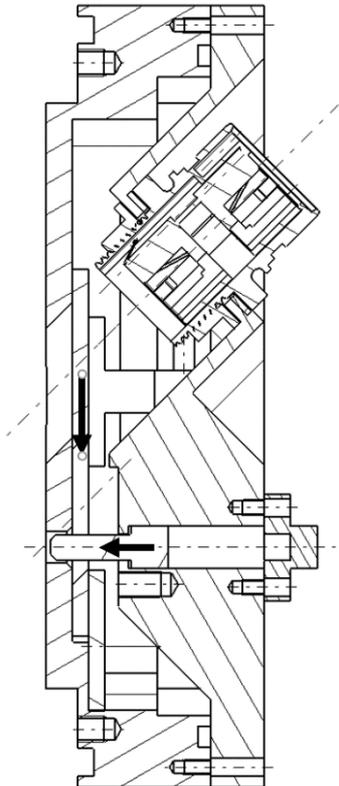


Abbildung 40: Geschlossene Position und abgezogenen Konnektoren

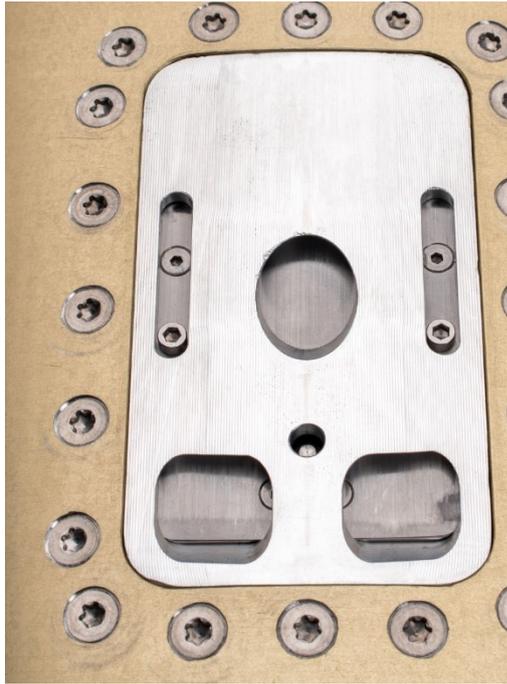


Abbildung 41: Umbilical mit geschlossenem Hitzeschild



Abbildung 42: Umbilical mit geöffnetem Hitzeschild



Abbildung 43: Umbilical mit eingesteckten Konnektoren und Rückschlaghülse

Umbilical für pneumatische Konnektoren

Für das Bedrücken der Lukendichtung und zur Bedruckung des Modulinnenraums zur Dichtigkeitsprüfung werden zwei leakagefreie Kupplungen benötigt. Sie werden im 45° Winkel zur Flugachse in den Grundkörper geschraubt. Die Kupplungsstecker dichten an ihrer Auflage. An der gegenüberliegenden Seite der Einschraubung befinden sich Schlauchanschlüsse, um das Gas an entsprechende Stelle weiterzuleiten. Der Grundkörper wird von innen an den Rumpf angebracht und dichtet entlang der Verschraubung axial ab. Da in dem geschlossenen Experimentraum unter Druck stehende Behälter verbaut werden, wird zusätzlich ein einstellbares Druckbegrenzungsventil eingebaut. Dieses soll im Fall eines Versagens einen unzulässigen Überdruck verhindern.

Mit dem Anschluss der Kupplungsdosen ist eine pneumatische Verbindung zur externen Versorgung hergestellt. Die Dosen werden nach der Druckbeaufschlagung händisch abgezogen.

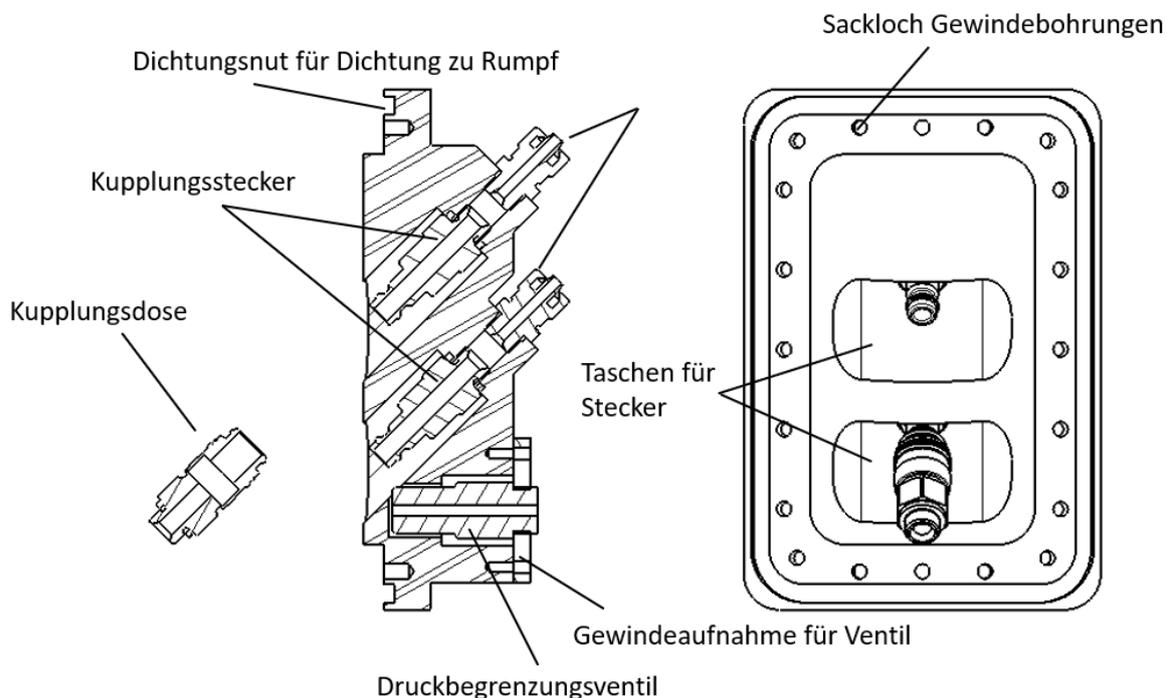


Abbildung 44: Schnittdarstellung und Draufsicht auf das pneumatische Umbilical

Nach dem Erstflug hat sich gezeigt, dass eine Dichtung im Inneren eines Kupplungssteckers durch zu hohen Wärmeeintrag beschädigt wurde. Um die Stecker vor der direkten heißen Strömung zu schützen, wird das Umbilical mit Wärmeschutzkappen erweitert. Dazu werden in den Grundkörper je zwei Gewindegewindebohrungen in den Boden der Taschen gebohrt. Die Kappen werden nach der Bedienung der Stecker in diese Taschen eingeschoben und verschraubt. Beim Montieren der Kappen werden neben den Kappen selbst noch Schrauben und Werkzeug benötigt. Um eine sichere Montage bei alleiniger Bedienung während eines Late Access zu ermöglichen, werden die Kappen mit verliersicheren Schrauben ausgestattet. Dazu werden M6 Zylinderkopfschrauben soweit abgedreht, dass nur noch die einzuschraubende Tiefe am Gewinde stehen bleibt. Das obere Restgewinde der manipulierten Schraube kann durch das Innengewinde der Kappe gedreht werden, wobei der dünnere Schaft im Innengewinde Spiel hat.

Von außen ist dem Zylinderkopf der Schraube nicht anzusehen, dass die Schraube manipuliert ist, d. h., dass sie einen verminderten Querschnitt aufweist. Es ist daher von Nöten, das zulässige Anzugmoment zu berechnen.

Die Schraube wird so abgedreht, dass sie an ihrem dünnsten Querschnitt einen Durchmesser von $d_{min} = 4 \text{ mm}$ misst. In diesem Bereich darf die zulässige Torsionsspannung nicht überschritten werden.

Für einen kreisförmigen Querschnitt errechnet sich das polare Widerstandsmoment mit

$$W_P = \frac{\pi d^3}{16}.$$

Für den kleinsten Querschnitt bedeutet dies:

$$W_{P,min} = \frac{\pi 4^3 \text{ mm}^3}{16} = 12,57 \text{ mm}^3.$$

In (23) wird die zulässige Torsionsspannung für das Schraubenmaterial für den Edelstahl 1.4301 angegeben mit $\tau_{t,zul} = 145 \text{ MPa}$. Da allgemein

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_P} \text{ ist,}$$

muss also

$$M_{t,zul} < \tau_t W_P$$

sein.

Einsetzen der Werte führt zu $M_{t,zul} < 1822,6 \text{ Nmm}$.

Das Anziehdrehmoment der Schraube setzt sich zusammen durch die Reibung zwischen Schraubenkopf und dessen Auflage sowie die Reibung in den Gewinden. Da das Anziehdrehmoment am Schraubenkopf angreift, erfährt der dünnste Querschnitt nur das Moment, das in den Gewindeeingriffen entsteht.

Das Anziehmoment wird berechnet mit

$$M_A = F_V \left[\frac{d_2}{2} \tan(\varphi^0 + \rho') + \mu_K \frac{d_{KR}}{2} \right].$$

Dabei sind

F_V ... die Vorspannkraft,

d_2 ... der Flankendurchmesser, für M6: $d_2 = 5,35 \text{ mm}$,

$\varphi^0 = \arctan\left(\frac{P}{d_2 \pi}\right)$... der Steigungswinkel, mit P als Steigung,

$\rho' = \arctan\left(\frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right)$... mit

μ_G als Reibwert im Gewindeeingriff und dem Flankenwinkel $\beta = 60^\circ$,

μ_K ... der Reibwert der Kopfauflage,

$d_{KR} = \frac{d_K + d_i}{2}$... der Reibdurchmesser der Kopfauflage mit dem Kopfdurchmesser

$d_K = 10 \text{ mm}$ und dem Bohrungsdurchmesser,

$d_i = 6 \text{ mm}$ für eine M6 Zylinderkopfschraube.

Die Reibwerte werden in (24) angegeben mit $\mu_G = 0,32 \dots 0,43$ und $\mu_K = 0,08 \dots 0,11$. Dabei soll der schlechteste einzutretende Fall betrachtet werden, wenn die Gewindereibung hoch und die Kopfreibung gering ist.

So muss nun der Gewindeanteil kleiner als die zulässige Torsionsspannung sein und es lässt sich die maximale Vorspannkraft errechnen:

$$F_{V,max} = \frac{M_{t,zul}}{\frac{d_2}{2} \tan(\varphi^0 + \rho')}$$

Einsetzen führt zu $F_{V,max} = 1195,3 \text{ N}$.

Bei dieser Vorspannkraft wird ein Torsionsmoment von $1195,3 \text{ N} \cdot 0,64 \text{ mm} = 765 \text{ N mm}$ an der Kopfauflage erzeugt, welches zum Anziehdrehmoment hinzuaddiert werden muss.

Schrauben dürfen in der Regel mit 90 % ihrer zulässigen Spannung angezogen werden, sodass sich für das Anziehdrehmoment der manipulierten Schrauben

$$M_{A,soll} = 0,9 (M_{t,zul} + M_K) = 2328,8 \text{ Nmm}$$

ergibt.

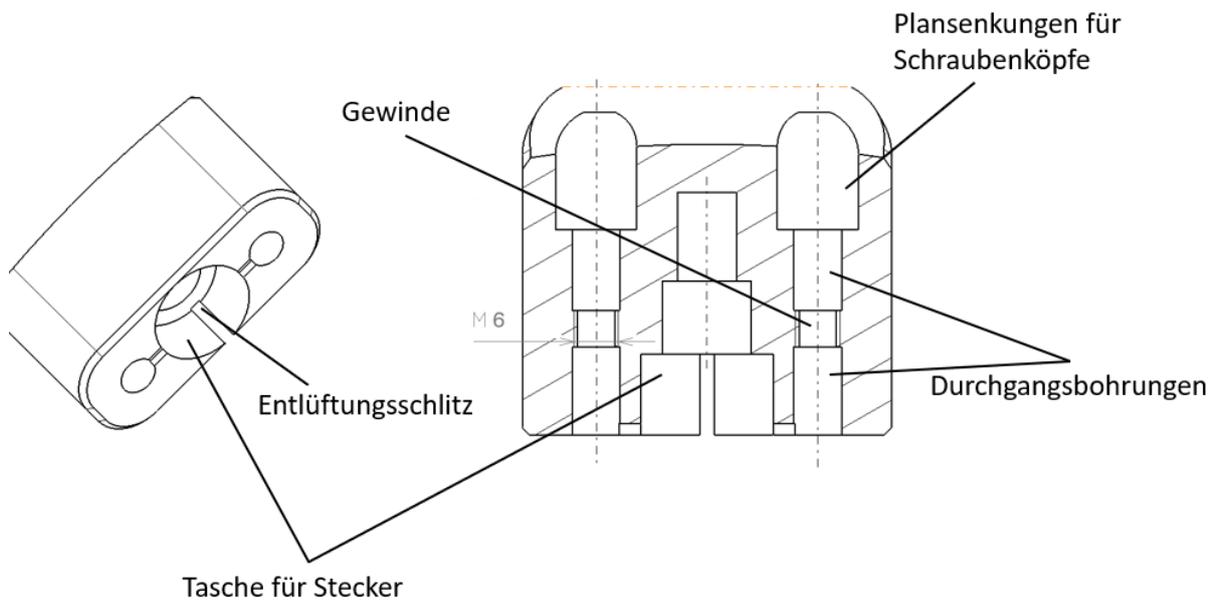


Abbildung 45: Isometrische Ansicht und Schnittansicht einer Hitzeschutzkappe

Auf der Unterseite ist ein Entlüftungsschlitz zwischen dem Hohlraum der Steckertasche und der Außenseite gefräst. Er soll verhindern, dass sich während der Aufstiegsphase mit abnehmendem Umgebungsdruck die verbleibende Luft zurückgehalten wird und unter μg Bedingungen ein Düseneffekt entsteht.

3.2.8 Lagerungen

Radiale Stringer Lagerung:

Das Experiment wird mit seinen vier tragenden Stringern an der mittleren Rumpfsktion an den Rumpf angeschraubt. Dazu wird je Lager eine Rumpfanbindung mit Dichtung an die Innenseite des Rumpfes verschraubt. Auf die Rumpfanbindung werden die Anbindestücke, die bereits an den Stringern befestigt sind, montiert. Langlöcher lassen ausreichend Spiel um eventuelle Anpassungen vorzunehmen. Aufgrund der Vielzahl von benachbarten Bauteilen ist die

Gesamttoleranz kaum präzise vorhersehbar. Die Anbindung der Stringer an die im nächsten Unterkapitel beschriebenen Wangen bedarf jedoch eine erhöhte Toleranz. So lassen sich die Anbindestücke mittels Abdrückgewinde und einem Anschlag an der Rumpfanbindung vor Verschraubung in der Höhe einstellen. Alle Schrauben werden erst angezogen, sobald die Bolzen gesteckt sind. So lassen sich Verspannungen über der Gesamtbaugruppe verhindern.

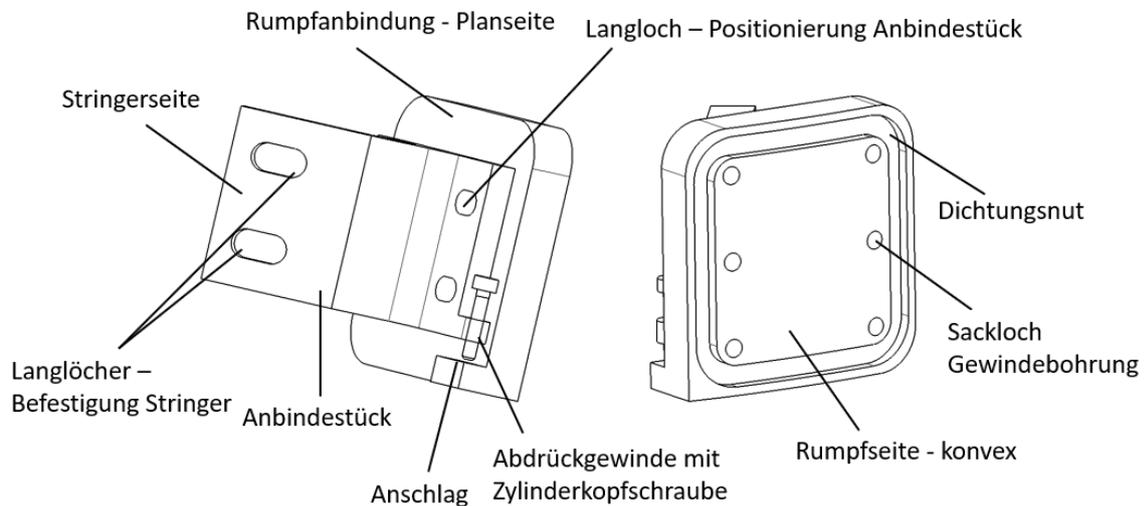


Abbildung 46: Isometrische Ansichten der oberen Lagerung

Lastwangen:

Die Stringer werden zwischen die auf dem Druckschott montierten Wangen abgelassen, bis ein Kugelsperrbolzen quer durchgesteckt werden kann. Damit ist eine werkzeuglose Montage möglich.

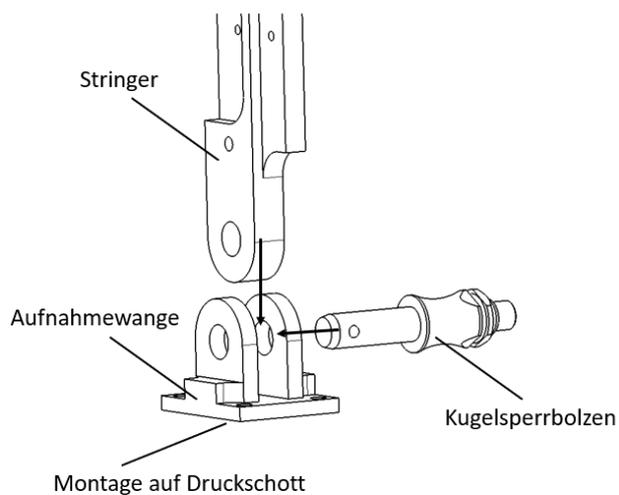


Abbildung 47: Darstellung der unteren Lagerung

3.2.9 Durchführungen

Zur Kabeldurchführung wird ein Silikonschlauch verwendet. Am oberen Ende wird ein Stutzen mit Flansch an das obere Druckschott geschraubt. Gedichtet wird mit dem Zuziehen durch eine Schlauchschelle. Am unteren Ende ist ebenfalls mit einer Schlauchschelle ein Stutzen, mit Außengewinde und dichtendem Bund eingeschoben. Der Bund sitzt auf dem unteren Schott und wird mit einer von außen aufgedrehten Ringmutter gekontert.

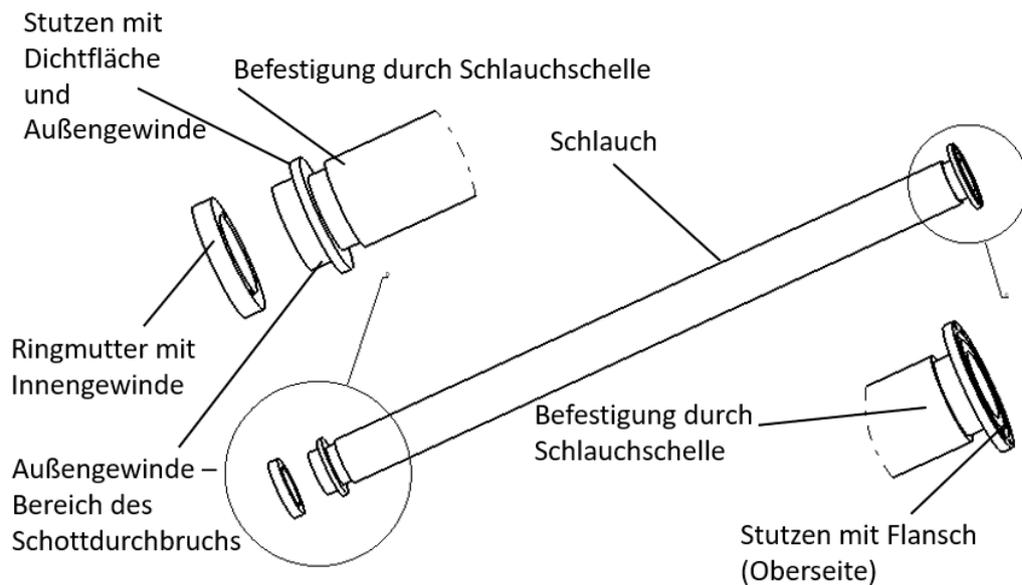


Abbildung 48: Darstellungen der Kabeldurchführung

3.3 Entwicklung der permanenten Experimentinfrastruktur

Unter der permanenten Infrastruktur des Experimentes soll der mechanisch konstruktive und elektrische permanente Teil der Anlage verstanden werden. Er soll so ausgelegt werden, dass potentielle Neuentwicklungen an Lichtstreuexperimente mit wenig Aufwand integriert werden können. Die Infrastruktur besteht damit aus einem C-Modul sowie einer universal nutzbaren Tragstruktur. Das C-Modul soll als eine modulare Unterbaugruppe des Gesamtexperiments verstanden werden. Die dort verbauten Komponenten entsprechen den häufig genutzten Elementen von Lichtstreuexperimenten und sollen damit ein gewisses Maß zur universellen Nutzbarkeit darbieten. Weiterhin werden Elemente zur Steuerung, Regelung, Energieversorgung und Kommunikation installiert, die grundsätzlich bei jedem Flug benötigt werden. Beim Design zukünftiger Experimente kann sich somit an den vom C-Modul zur Verfügung stehenden Schnittstellen orientiert werden. Der Mehraufwand einer Bereitstellung der Servicesysteme entfällt.

3.3.1 Anforderungen

Wegen der besseren Übersichtlichkeit und den unmittelbaren Abhängigkeiten zwischen Rumpf und der permanenten Infrastruktur wurden die Anforderungen bereits in Kapitel 3.2.1 behandelt.

3.3.2 Analyse

Die Analyse richtet sich an die Vorgaben weiche Materie mittels optischer Diagnostiken zu untersuchen. Dabei sollen die optische Mikroskopie zur DDM als auch die statische Lichtstreuung zur Nahfeldstreuung und dynamische Lichtstreuung auf zwei Experimenten realisiert werden. Mit der Klärung der prinzipiellen Aufbauten der Diagnostiken in Kapitel 2 wurden die notwendigen Komponenten und deren Anordnung zueinander bereits vorgestellt.

3.3.3 Auswahl der Komponenten

Aus den Experimenten gehen folgend zusammengefasste Komponenten für die beiden Experimente hervor:

- 6 APDs,
- Lichtleiter mit Strahlteiler,
- 2 Korrelatoren,
- 2 Rechner,
- 2 Lasertreiber,
- Speichersystem und
- 2 Lasertreiber.

Grundsätzlich müssen die Laserköpfe und deren Laseroptiken mit zur Diagnostik gezählt werden. Da deren Positionierung im Experiment individuell gestaltet werden muss, können diese nicht mit in den C-Modul Teil integriert werden, sondern werden lediglich an die Schnittstelle zu den Lasertreibern angeschlossen.

Das Servicesystem besteht aus Steuerungselementen, Energieversorgung und Kommunikationsschnittstellen.

Steuerungselemente:

- NI MyRio
- Relaisbox
- Redundanzschaltung

Energieversorgung:

- Batterie
- Spannungswandler
- Ladeschnittstelle inklusive Balancing
- Schaltungselektronik intern – externe Versorgung
- Verteilerklemmen

Kommunikation:

- Ethernet Switch
- Elektronik zur Signalverarbeitung
- Schnittstelle zu Servicemodul der Rakete

Abschätzung des Energiebedarfs

Zur Auswahl und Auslegung der Servicekomponenten, muss zuvor der aus den Experimenten hervorgehende Bedarf an elektrischer Energie betrachtet werden. Es wird sich dabei an den maximalen Verbräuchen orientiert, um den ungünstigsten zu erwartenden Fall abzudecken. Die Daten werden aus den jeweiligen Datenblättern entnommen oder im Laborbetrieb gemessen.

Komponente	Anzahl	Maximaler Strom [I]	Nennspannung* [V]	Leistung gesamt [W]	Bemerkung
APD Kolloid	4	0,4	5	8	
APD Gran.	2	0,1	6	1,2	
Korrelatoren	2	k. A.	k. A.	3	Versorgung über USB Nuc
Intel Nuc	2	2,5	12	30	
Lasertreiber 1500	1	5	12	60	
Lasertreiber 500	1	5	12	60	
Speichersystem NI MyRio	1	1,04	25,6	26,6	Gemessen
Ethernet Switch	1	0,2	12	2,4	
LED Kolloid	2	1	28	56	
LED Gran	1	1	24	24	
Pumpe Gran	1	1,4	12	16,8	
Peltierelemente	4	1,8	12	86,4	Aus Diagramm (U, Nenn =15,6 V, 2,2 A)
Spindel LED	1	1	24	24	
Injektor	1	1	24	24	
Quetschventil	1	0,5	12	6	
Hubankerventil Gas, Gran	1	0,7	24	16,8	
Hubankerventil NO	1	0,7	24	16,8	

Tabelle 4: Energiebedarf einzelner Verbraucher

* hier verwendete Spannung, angegebene Nennspannung liegen bei einigen Komponenten in einem Intervall.

Für die verschiedenen Spannungslevel ergeben sich die jeweils maximalen Ströme:

- 5 V: 1,8 A; 9 W
- 12 V: 25,5 A; 306 W

- 24 V: 5,44 A; 130,56 W
- 28 V: 2 A; 56 W

- Maximal mögliche Gesamtleistung $W_{max} = 502 W$

- Maximaler Strom bei Nennspannung der Batterien: $I_{max} = 19,6 A$

Es werden *Traco Power* DCDC Wandler entsprechend des Leistungsbedarfs ausgesucht. Sie werden an ihren Eingängen direkt mit der Hauptspannung, d. h. mit der Spannung des Netzgerätes bzw. der Batterien gespeist. An der Ausgangsseite werden alle Verbraucher mit den Ausnahmen des Bordrechner, des Steuergeräts und des Redundanzventils über Halbleiterrelais geschaltet. Ströme bis 3 A werden in der im nächsten Unterkapitel beschriebenen Relaisbox geschaltet. Größere Ströme können mit den Relais auf der neben den Wandlern montierten Platte geschaltet werden (siehe Abb. 53).

Zur Spannungsversorgung während des Fluges werden Batterien gewählt, die robust gegenüber mechanischen Belastungen, schnell ladbar, und brandsicher sind. Die Firma *itecc* bietet fertig geschweißte Batteriepacks mit LiFePO4 Zellen an. Optional werden die Packs mit Anschlüssen zum Balancen oder mit integriertem Balancer ausgestattet. Die 10 Ah Variante kann Ströme von bis zu 200 A dauerhaft liefern. Zum Erreichen der Nennspannung werden zwei Packs in Reihe geschaltet.

Auslegung der Relaisbox

Mit der Relaisbox werden die relativ kleinen und zahlreichen elektrischen und elektronischen Bauteile zusammengefasst. Die Bauteile werden mit Anschlussklemmen auf Platinen mit den Einbaubuchsen der Ein- und Ausgangsseite verbunden. Ein Vorteil der Zentralisierung der Komponenten besteht in der separaten Bearbeitung der Schaltungen. Auch eine mögliche Fehlersuche kann mittels Ausschlussverfahren zielgerichteter durchgeführt werden, da durch das Trennen der Ein- bzw. Ausgangsseite eine Störung lokal eingegrenzt werden kann.

Auf dem oberen Paneel befinden sich D-Sub Einbaubuchsen. Sie werden mit Flachbandkabel mit den digitalen oder analogen Ein-/Ausgänge des Steuergeräts verbunden. Intern führen sie zu den Steuerleitungen der Relais und Sensoren. Ebenso die Signalleitungen, die die Events des Servicemoduls leiten, finden sich in dem oberen Paneel. Bei Anliegen der Signalspannung und bei Schaltung des entsprechenden Signals werden so Optokoppler geschaltet, die wiederum ein internes Potential zum Steuergerät schalten. Damit ist das Servicemodul galvanisch vom Experiment getrennt. An den Ethernet Switch werden Steuergerät und Bordrechner mit der Umbilicalschnittstelle verbunden. Durch zwei Bohrungen werden die Versorgungsleitungen von den DCDC Wandler oder der Batterie auf Verteilerklemmen angeschlossen. An ihnen werden die entsprechenden Spannungslevel intern verteilt. Peltiertreiber sind mit den Temperatursensoren des Kolloidexperiments und der Temperaturregelung verbunden.

Die Relaiskarten sind auf einer Zwischenplatte montiert, die über einer Montagebrücke und den Seitenwänden in der Box verschraubt ist.

An dem unteren Paneel befinden sich die experimentseitigen Buchsen. Dort werden die Experimente mit ihren Schnittstellen angeschlossen.

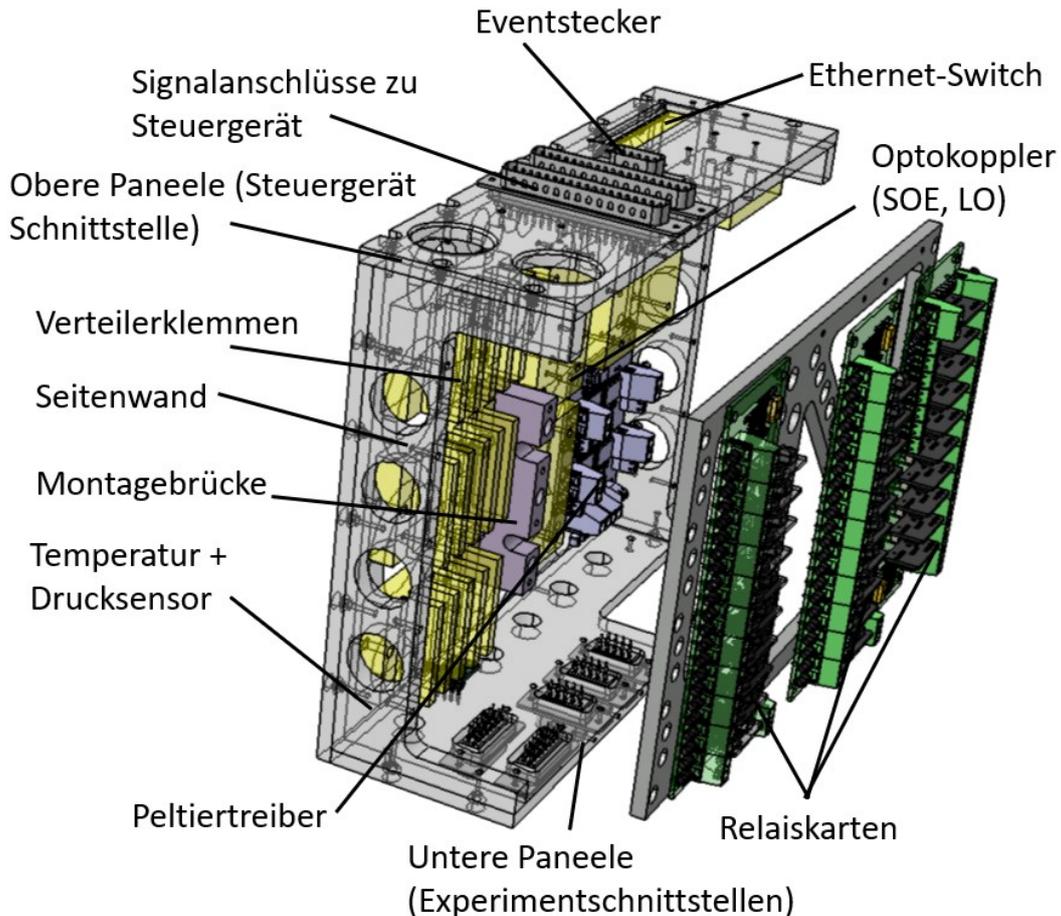


Abbildung 49: CAD Modell der Relaisbox (seitliche Baugruppe ist zur besseren Sichtbarkeit rausgezogen)

Speichersystem

Zur Dimensionierung des Speichersystems für die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera des granularen Experimentteils sollen folgende Überlegungen diskutiert werden:

Aus dem Datenblatt der Kamera erlesen sich

- eine Auflösung von 1696 x 1710 Px
- mit einer maximalen Bildrate von 556 fps
- und einer Bittiefe von 8 Bit.

Das Speichersystem soll so ausgelegt werden, dass es den maximal möglichen Datenstrom der Kamera speichern kann. Mit den oben genannten Einstellungen wird ein Datenstrom von

$$1696 \cdot 1710 \text{ px} \cdot 8 \text{ Bit} \cdot 556 \text{ s}^{-1} = 12,9 \text{ GBit/s}$$

errechnet.

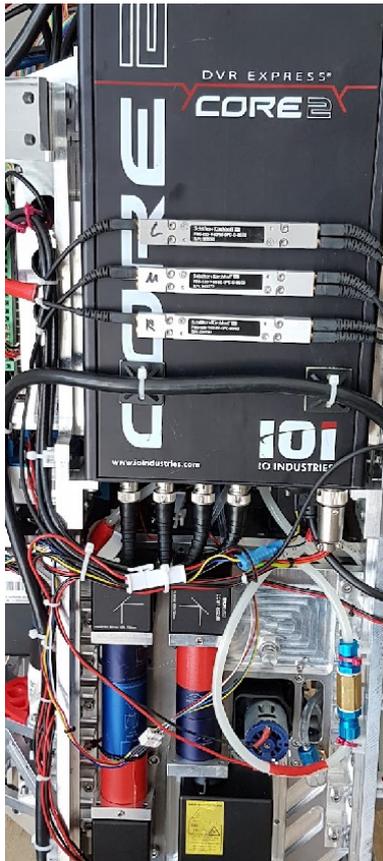


Abbildung 50: Foto des Speichersystems

Datenströme in dieser Größenordnung werden nicht von Standardrechnern wie beispielsweise den eingebauten Bordrechnern geschrieben. In Kapitel 6 wird die Auswahl eines geeigneten Speichersystems näher diskutiert. Lediglich die konstruktiven Maßnahmen und Modifikationen sollen hier beschrieben werden.

Das Speichersystem wird standardmäßig mit Gehäuse geliefert. Bei hohen Schreibgeschwindigkeiten produzieren SSD und Prozessoren so viel Abwärme, dass zwei Lüfter für einen Luftdurchsatz im Inneren sorgen. Dieser Luftdurchsatz ist nur mit Gehäuse gewährleistet. Ein Verzicht auf diesen bedingt weitere Maßnahmen der gezielten Temperaturregulierung. Aus diesem Grund werden größere Bauteile der Platinen mit Epoxidharz vergossen und mit Gehäuse in das Experiment verbaut. Aufgrund des relativ großen Platzbedarfs, wird die plane Gehäusefläche für die Befestigung weiterer Bauteile benutzt.

Das Speichersystem wird mit der Anschlussleiste nach unten auf zwei an den Stringern befestigte Winkel verschraubt. Im oberen Drittel wird das Gehäuse durch die Innenseite mit der letzten Traverse des Relaisbords verschraubt. Auf der abnehmbaren Deckplatte werden die Strahlteiler für beide Experimenteile montiert.

3.3.4 Integration in eine Baugruppe

Es bietet sich an, schwerere Bauteile möglichst mittig anzuordnen. Die höchste Dichte weisen die Batterien auf. Um die Masse der Struktur zu verringern, werden offene Strukturen angestrebt. Gleichfalls muss darauf geachtet werden, die Batterien keiner unzulässigen Flächenpressung auszusetzen. Es werden daher 3D gedruckte Kunststoffplatten mit Silikonauflage in das Gehäuse der Batterien gelegt. Sie liegen formschlüssig, gleichmäßig und nicht statisch überbestimmt in allen Raumachsen. An den Durchbrüchen des Bodens werden sie in Reihe geschaltet. Mit der oberen Abdeckung werden die Packs fixiert und mit dem Hauptlastrelais verbunden.

Es werden sechs APDs mit ihren Lichtleiteranschlüssen zur Experimentseite auf Trägerplatten geschraubt. Bei der senkrechten Einbauweise liegt das größte Flächenträgheitsmoment in der Hauptbelastungsrichtung.

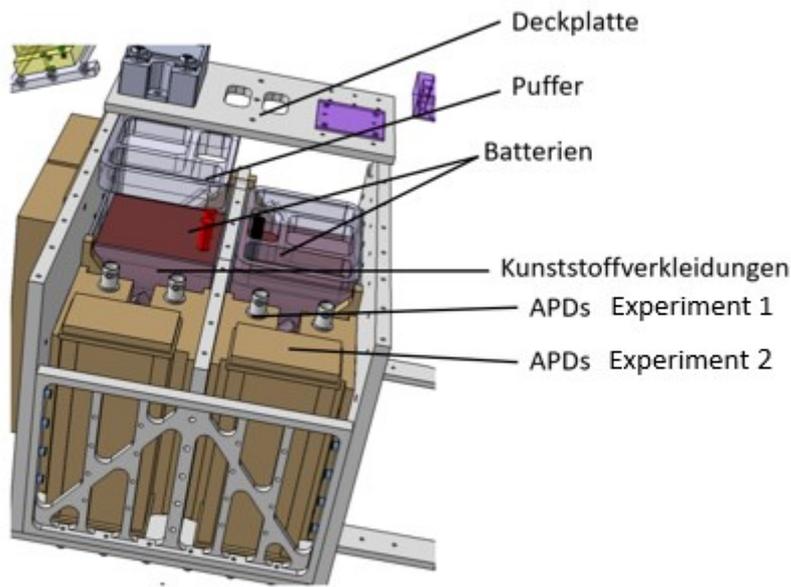


Abbildung 51: CAD Modell zur Lagerung einiger Komponenten des C-Moduls

Auf der Platte mit den DCDC Wandlern sind Traversen aufgeschraubt. Sie dienen als Abstandshalter und stabilisieren die dünnen Platten. Die Bordrechner werden auf einer weiteren Platte auf die Traversen verschraubt. Abstandsbolzen lagern das Steuergerät, sodass dieses von oben zugänglich bleibt.

Eine weitere Verteilerklemme, an der die Hauptspannung verteilt wird, findet sich am hinteren Ende, ebenfalls zugänglich, zwischen zwei Traversen.

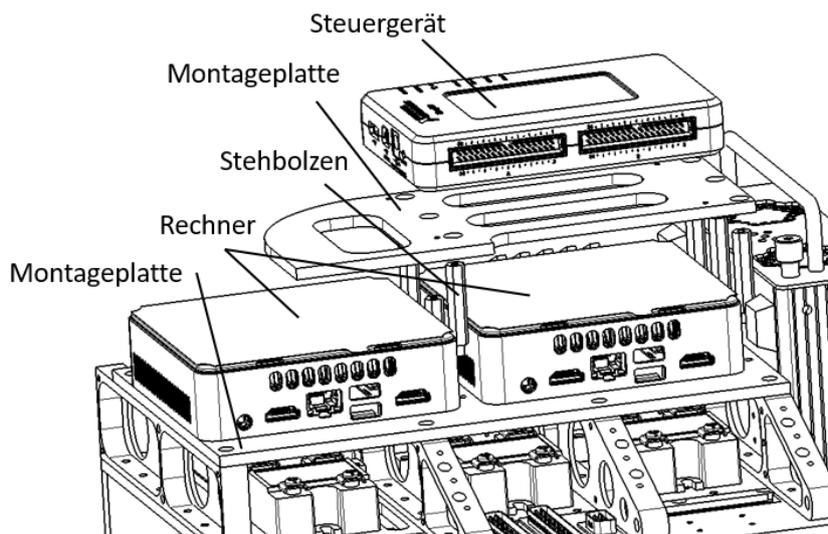


Abbildung 52: Darstellung der Lagerung von Bordrechner und Steuergerät

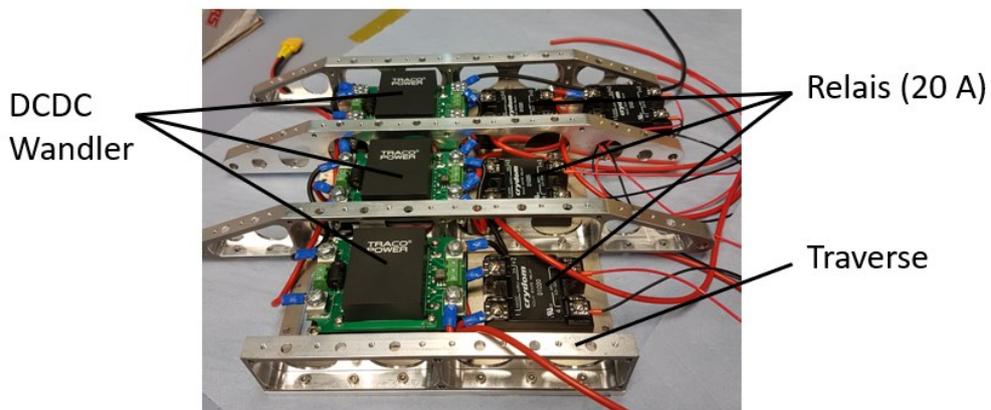


Abbildung 53: Foto des Relaisboards mit aufgesetzten Traversen

Beide Korrelatoren werden mit der Bodenplatte ihres Gehäuses frontal an die Deckplatte der APDs geschraubt. An der letzten seitlichen Planfläche werden die Lasertreiber montiert. Das gesamte C-Modul stellt eine Baugruppe dar und lässt sich über die Schnittstellen von den Experimenten trennen. Es wird von oben zwischen die vier Stringer geschoben und seitlich mit diesen verschraubt.

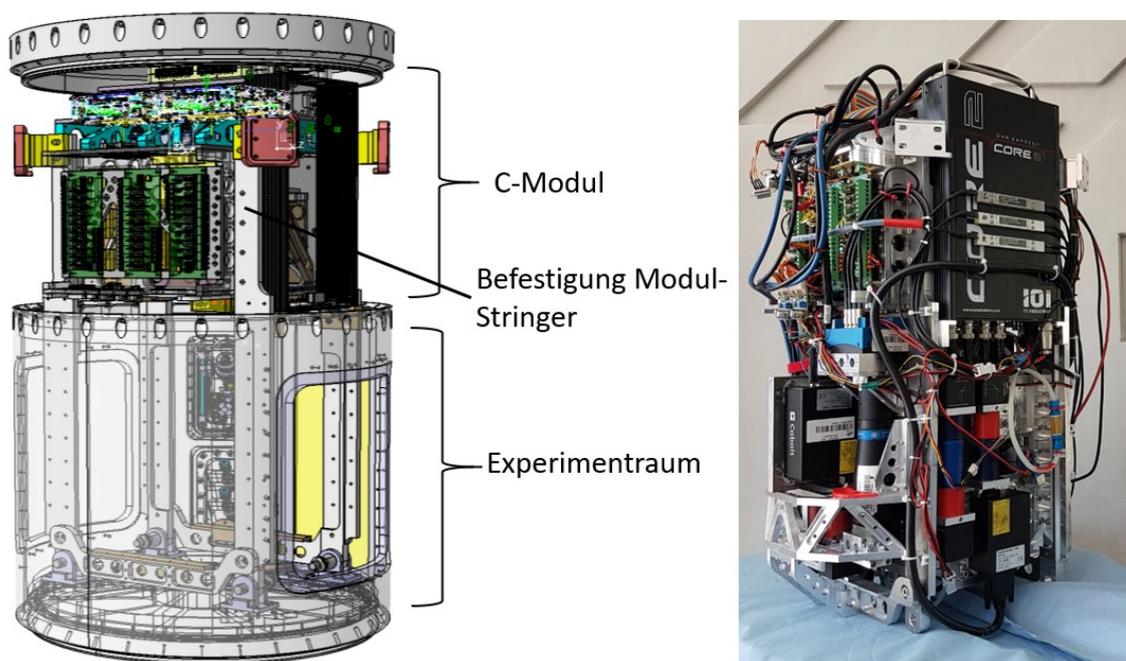


Abbildung 54: CAD Modell ohne Experimente und mittleren Rumpf und Fotografie der Gesamtanlage

3.4 Überprüfung

Die Maße einer Rumpfsektion müssen in den vorgegebenen Toleranzen gefertigt werden. Abweichungen haben Auswirkungen auf das gesamte Vehikel. Daher bedarf es einer Überprüfung der Einhaltung der Maße. Dies erfolgt in einem Prüfprotokoll, welches die tatsächlichen Maße dokumentiert.

3.5 Zusammenfassung

Die gesamte Rumpfstruktur ist in mehrere Segmente unterteilt: Eine untere, mittlere und obere Rumpfsektion. Dabei ist das mittlere Segment in seiner Höhe und Anzahl variabel und damit die Gesamthöhe des Rumpfes modular anpassbar. Zum Erreichen einer atmosphärischen Druckdichtigkeit werden Anbauteile mit Dichtungen versehen. Eine Luke im unteren Segment ermöglicht einen direkten Zugang zum Experiment im eingebauten Zustand und sorgt mit ihrer Mechanik für eine ergonomische, sichere und druckdichte Verschiebung des Rumpfes. Das obere Segment ist zugleich das obere Druckschott und verfügt über Schnittstellen zur raketeninternen Kommunikation mit dem Servicemodul. Ein elektrisches und ein pneumatisches Umbilical ermöglichen Informations-, Energie- und Stoffströme über Leitungen am Launcher verfügen über technische Maßnahmen, die dem hohen Wärmeeintrag während des Fluges entgegenwirken. Aufgrund der Zerstörungsfreiheit der Verbindungselemente in den Umbilicals sind eine Wiederverwendbarkeit und ein sicherer Flugbetrieb gegeben.

Neben der äußeren Rumpfstruktur und ihrer Anbauteile wird eine permanente Infrastruktur entwickelt, die eine gewisse Form einer Basisausstattung für Diagnostiken zur Lichtstreuung beinhaltet. Am oberen Ende der tragenden Struktur werden diese Elemente in eine Gesamtbaugruppe gebündelt, hier als C-Modul bezeichnet. Das C-Modul beherbergt weiterhin alle Servicesysteme, die für einen Betrieb während des Fluges nötig sind. Unterhalb des C-Moduls befindet sich der modifizierbare Bauraum für individuell gestaltbare Lichtstreuexperimente. Diese lassen sich also entwickeln ohne den peripheren Serviceteil neu gestalten zu müssen. Ihre Entwicklungszeit lässt sich damit erheblich verkürzen.

4 Entwicklung des kolloidalen Experimentteils

Exemplarisch für die Verwendung der modular nutzbaren Plattform zur Untersuchung weicher Materie wird in diesem Kapitel die Entwicklung eines Experiments zur Untersuchung von kolloidalen Mikroschwimmern beschrieben.

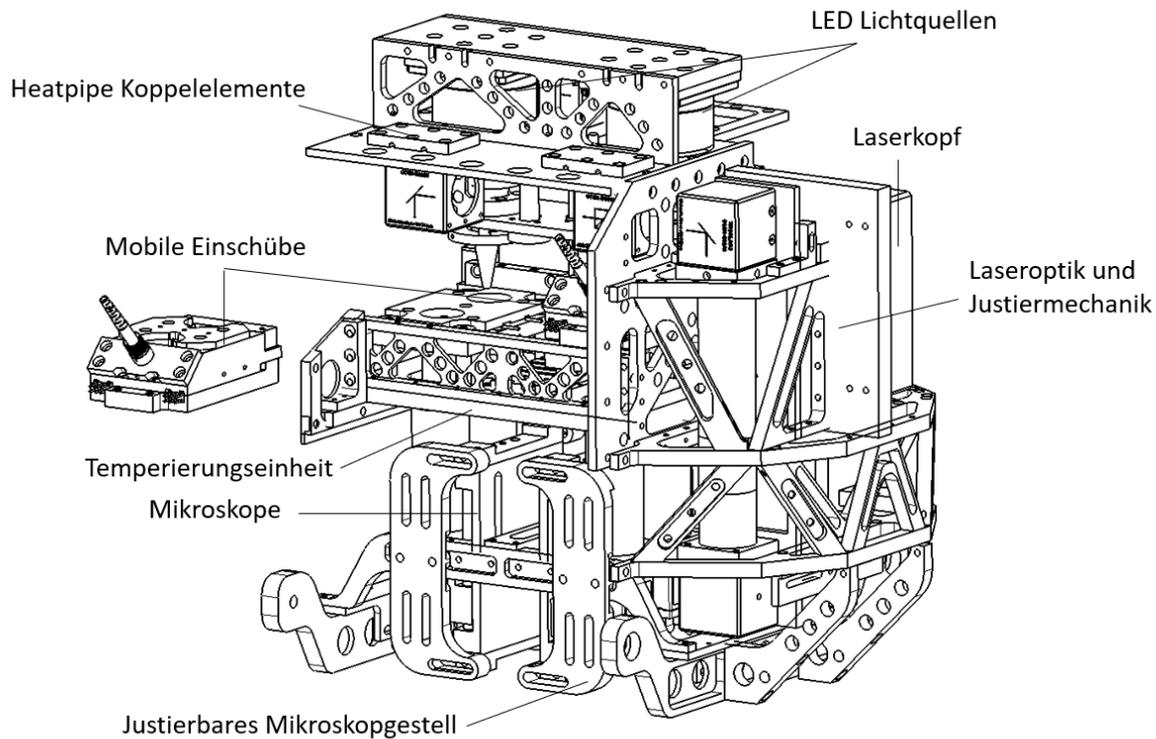


Abbildung 55: Gesamtdarstellung des kolloidalen Experimentteils

4.1 Anforderungen an den kolloidalen Experimentteil

Zunächst werden die Anforderungen an das Experiment in der nachfolgenden Tabelle notiert und anschließend näher diskutiert.

Nr.	F W	Anforderung	Bemerkung
Geometrie			
K01	F	Gesamtmaße gemäß dem zur Verfügung stehenden Bauraum der permanenten Infrastruktur.	Bauraum muss mit granulearem Experiment geteilt werden.
K02	F	Anbindung an Stringer	Mehr Platzbedarf kann durch Anpassung der Länge der Stringer

K03	F	Mobile Probenumgebung zur Luke Orientieren	und mittleren Rumpfsktion realisiert werden. Iterativer Entwicklungsprozess
K04	F	Lichtquelle und Kamera gegenüberstehend für Untersuchungen an Mikroschwimmer	Bedingung der Durchlichtmikroskopie
K05 K06	F F	Laser und Kamera gegenüberstehend Kollimator und Laserachse in 45°	
K07	W	Vorzugsweise austauschbare Küvetten im Standardformat 3x1 Zoll.	
Kinematik			
K08 K09	F F	Justierbarkeit von Kamera und Probensystem muss gewährleistet sein. Justierbarkeit von Komponenten der Laseroptiken.	Manuelle Justierbarkeit mit Sicherung gegenüber Verstellung während des Fluges
K10	F	Ein-/Ausbau mobiler Probenumgebung während Late Access	
K11	W	Integriertes Verfahren zur Redispergierung der Suspension.	Zeitliche Verlängerung der Probenstabilität
K12	F	Homogenisatoren verfahrbar	Zum Schutz der Küvetten
Kräfte			
K13	F	Kräfte gemäß FRP	Art und Quantifizierung der zu erwartenden Kräfte bereits in Kapitel 2 beschrieben
Stoffe			
K14 K15	W F	Grundsätzliche Verwendung von Leichtbau Konstruktionswerkstoffen Inerte Einhausung lösungsmittelhaltiger Substanzen	Beachtung elektrochemischer Potentiale. Verwendung von inerten Stoffkombinationen
Signale			
K16 K17	F W	Signalverarbeitung zur zeitlichen Steuerung mit gegebenem Interface zum Servicemodul Redundanz durch einstellbare Timelines	

Ergonomie			
K18	W	Mobile Probenumgebung im Late Access integrierbar. Keine elektronischen Werkzeuge	Bauliche Spezifikationen des Launchers beachten
K19	W	Möglichst wenig Bedarf an Werkzeug beim Probenintegrieren. Lösbare Normelemente gegen Verlust absichern	
Fertigung			
K20	F	Toleranzen nach 2768-1-f	Technisch bedingte höhere Präzision mit externen Herstellern absprechen, bzw. in Zeichnungen kennzeichnen
Gebrauch			
K21	F	Volle Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb (auch ohne Rumpf)	Manuelle und separate Ansteuerung ohne Flugsequenzen ermöglichen
K22	F	Blasenfreies Befüllen der Mikroschwimmer Suspensionen ermöglichen	
K23	W	Manuelle und automatisierte Redispergierung	
Energie			
K24	F	Temperaturstabil auf $T_{\text{ai}} = 28 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$ bei Außentemperaturen von $T_{\text{außen,zul}} = 15 \dots 40 \text{ °C}$	Temperaturwerte aus Vorstudien
K25	W	Messung und Protokollierung des Temperaturverhaltens der eingeschlossenen Atmosphäre während des Fluges	Zu erwartende Innentemperatur nur abschätzbar; Messung für künftige Flüge vorteilhaft
K26	W	Protokollierung der Temperaturregelung	
K27	F	Hauptsächliche Energieversorgung über Schnittstelle und SOMEX C	
K28	F	Elektrischer Gesamtverbrauch ermitteln	Iterativer Schritt zur Auslegung der Akkukapazitäten
Kontrolle			
K29	F	Inbetriebnahme und Parameterermittlungen unter Laborbedingungen	Iterativer Prozess

K30	F	Bench- und Umwelttest in integriertem Zustand	
Transport			
K31	W	Transport im eingebauten Zustand im Rumpf	
Optik			
K32	F	Auflösung Mikroschwimmer: Iterativer Prozess; Erster Ansatz mit mehreren Pixeln pro Teilchen	Die Vergrößerung soll als Richtwert angesehen werden, kleine Abweichungen sind bei vergleichbaren Objektiven mit besseren Performance-Parametern vorzuziehen.
K33	F	Belichtung Mikroschwimmer - Art des Lichtes: Polychromatisch zum optischen Abbilden, monochromatisch für Lichtstreuung - Wellenlänge ca. 532 nm	
K34	F	Aufnahmefrequenz für: 1-5 Hz; 500 Hz	
Sicherheit			
K35	F	Umgang mit Chemikalien (Lutidin 2,6) beachten. Entsprechende Maßnahmen umsetzen	
K36	F	Umgang mit Hochspannung beachten	
K37	F	Schutz vor bewegter Mechanik	

Tabelle 5: Anforderungen an den kolloidalen Experimententeil

Es erfolgt eine weitere Unterteilung in die Unterbaugruppen: Proben, Diagnostiken, Lichtquellen, Schnittstellen und Speichersystem.

4.1.1 Probenumgebung

Die Probenumgebung stellt die physische Umgebung der Suspension dar. Sie muss daher die Suspension umschließen und darf dabei nicht mit ihr chemisch reagieren. Gleichzeitig muss sie auch mit ihr befüllt werden können. Dabei dürfen keine Luftblasen miteingeschlossen werden, da diese aufgrund der unterschiedlichen optischen Brechungsindizes von Luft und Lösung als Lichtstreuwer wirken und damit die Diagnostik verfälschen würden.

Aus vorherigen experimentellen Untersuchungen (25) ist bekannt, dass durch die Sedimentation der Teilchen keine langzeitstabile Probe gewährleistet werden kann. Die Reversibilität durch Aufschütteln der Probe verringert sich mit zunehmender Standzeit der Zelle. Insbesondere im Hinblick auf einen länger anhaltenden Count Down sollte die Probe daher über die Möglichkeit einer automatisierten Durchmischung verfügen.

Um eine möglichst hohe Aktivität der Teilchen während des Fluges zu erzielen, soll die Zelle unmittelbar vor einem möglichen Late Access während des Count Downs befüllt werden. Das bedingt, dass die Probenumgebung unabhängig vom fest installierten Experiment handhabbar, befüllbar und nachträglich integrierbar ist.

Bei der Untersuchung von Janus Teilchen in der vorgegebenen Wasser-Lutidin Konzentration ist zur Erzeugung einer aktiven Schwimmbewegung eine Temperaturregelung nötig. Ein Temperaturbereich von $T_{koll} = 28 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ hat sich in Vorversuchen bewährt.

Weiterhin muss die Zellwandung transparent für Licht visueller Wellenlängen sein, damit die treibenden und abbildenden Lichtquellen die Suspension durchdringen und von den Diagnostikelementen erfasst werden können.

Es sollen zwei identische Einschübe gestaltet werden, um Experimentmöglichkeiten zu schaffen.

4.1.2 Diagnostiken

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, sollen die Suspensionen durch drei Diagnostiken untersucht werden: Die Nahfeldlichtstreuung, die Dynamische Lichtstreuung und die Differentielle Dynamische Mikroskopie per optischer Mikroskopie.

Für die Nahfeldlichtstreuung werden demnach eine Kamera, eine Optik, die in entsprechendem Arbeitsabstand zur Zelle ein Bild auf den Chip der Kamera abbildet, ein Speichersystem sowie eine geeignete Lichtquelle benötigt. Die Anforderungen der Kamera begründen sich aus der Raketflugtauglichkeit und den spezifischen Anforderungen zur Nahfeldlichtstreuung. Flugtauglich ist eine Kamera grundsätzlich dann, wenn sie den mechanischen Belastungen während eines Fluges standhält. Im vorliegenden Fall sind dies die statischen und dynamischen Lasten. Weiterhin sollte sie auch so montiert werden können, dass sie ohne zusätzlichen Aufwand oder Bau von Adaptern befestigt werden kann. Das schließt Kameras mit einem Gehäuse aus, welche aus Designgründen gekrümmte Freiformflächen aufweisen, die für die statische Verwendung im Labor hinnehmbar sind, jedoch nicht für eine feste Montage in einer sich bewegenden Anlage. Ebenso sollte eine Anbindungsmöglichkeit der vorgeschzten Optik vorhanden sein, um weiteren Mehraufwand und Gewicht zu vermeiden. Bei der Wahl des Sensors der Kamera müssen die Aspekte der Wahl der Sensortyps, die Sensorgröße, Pixelgröße, Bildrate, Bittiefe, Farb- oder Graustufen und die Shuttertechnologie überlegt und auf den Anwendungsfall abgestimmt werden. Die ersten drei Aspekte können nicht unabhängig von der Auslegung der abbildenden Optik festgelegt werden. Was jedoch bereits festgehalten werden kann sind Bildraten in der Größenordnung $f \approx 30 \text{ fps}$, eine Auflösung, die etwa mehrere Pixel pro Teilchen entspricht, und eine *Bittiefe* $\geq 10 \text{ Bits}$. Die Aufnahme in Graustufen ist für den Informationsgewinn ausreichend. Die abzubildende Ebene sollte sich ca. 2 mm unter der Zelle, d. h. entgegen der Lichtquellen-Eingangsseite befinden.

Ähnliches gilt auch für die optische Mikroskopie, jedoch variieren sowohl die Parameter als auch die Wahl der Lichtquelle. Hierbei soll die Bildrate bei $f \approx 500 \text{ fps}$, eine Auflösung von mehreren Pixel pro Teilchen und eine *Bittiefe* $\approx 8 \text{ Bits}$ liegen. Die abzubildende Ebene liegt dabei in der Mitte des Zellvolumens, um möglichst weit weg von der mit Randschichteffekten behafteten Grenzfläche zu sein.

Zur Realisierung der Dynamischen Lichtstreuung werden hardwareseitig Lichtleiter samt optischer Ein- und Auskopplungselemente, Photodioden, Korrelatoren und ein Speichersystem benötigt. In einem Winkel von $\theta = 45^\circ$ soll das Streulicht in einen Singlemode Lichtleiter eingekoppelt werden. Über einen Strahlteiler wird das Licht gesplittet und an zwei Photodioden weitergeleitet. Die Lawinen-Photodioden verstärken das einkommende Licht und wandeln die

darin enthaltenen optischen Informationen zu elektrischen Informationen. Diese Informationen sollen an einen Korrelator weitergegeben werden um die Informationen über Kreuz zu korrelieren. Damit erhofft man sich eine Unterdrückung der Rauschsignale. Ein daran angeschlossener Rechner speichert die Daten über entsprechender Software ab. Für die Auswahl der Lawinen-Photodioden soll eine möglichst hohe Sensibilität und Robustheit angestrebt werden. Bei der Wahl des Korrelators wird sich auf Grund von Vorerfahrung in der Raumfahranwendung und einer gewissen Monopolstellung des Herstellers auf den Korrelator ALV-7004 der Firma *ALV GmbH* festgelegt.

Nachfolgende Tabelle soll die in diesem Unterkapitel festgelegten und offenen Anforderungen an die Diagnostiken zusammenfassen und spiegelt die Leistungsfähigkeit der ausgewählten Komponenten wieder.

	Nahfeldlichtstreuung	Optische Mikroskopie
Frequenz (fps)	35	511
Auflösung (Px)	2448 x 2048	800 x 600
Bittiefe	12 (16)*	10 (8)*
Mono/Color	Mono	Mono
Sensortyp	CMOS	CMOS
Shuttertechnologie	Global shutter	Global shutter

Tabelle 6: Anforderungen an die Diagnostikkomponenten

* Bei Ansteuerung der Kameras über die LabView-Software können nur ganzzahlige Bittiefen eingestellt werden, sodass unabhängig von der tatsächlichen Bittiefe entweder 8 oder 16 Bit gespeichert werden.

4.1.3 Lichtquellen

Die Lichtquellen sind strenggenommen Teil der Diagnostik, werden aber separat behandelt, da deren Auswahl, Auslegung und Entwicklung der Komponenten anhand der zu erfüllenden Randbedingungen der jeweiligen Anforderungen abgegrenzt werden können.

Bei der Untersuchung von aktiven Mikroschwimmern ist neben den optischen Anforderungen der Diagnostik die treibende Funktion des Lichtes zu beachten. Diese ist gegeben, wenn die optische Leistungsdichte ausreichend hoch und die gewählte Wellenlänge des Lichts eine relativ hohe Absorption des halbseitig beschichteten Kohlenstoffs, und relativ geringe Absorption des Umgebenden Fluids sowie der unbeschichteten Seite der Teilchen aufweist. Aus Vorversuchen kann eine notwendige optische Energiedichte $E_{opt} = [10; 50] \frac{mW}{mm^2}$ abgeschätzt werden. Eine Möglichkeit die Energiedichte im fertigen Setup anpassen zu können, ist unabdingbar, da Eigenschaften wie die Einkopplungseffizienz des Lichts, die Zellengeometrie und der Verlust bei Verwendung der Optiken nicht exakt vorhersagbar sind. Die finale Einstellung der optisch emittierten Energie erfolgt also empirisch im vollständigen Setup. Aus (26) ist bekannt, dass sich zum Treiben der Teilchen ein Licht der dominanten Wellenlänge von $\lambda = 532 \text{ nm}$ eignet.

Betreffend der Diagnostiken für die Dynamische Lichtstreuung und der Nahfeldlichtstreuung eignen sich Laser mit einer hohen Kohärenzlänge. Für optisches Abbilden haben sich in vorherigen Versuchen (25) LED-Emitter mit einer angepassten Optik als zielführend herausgestellt. Beiden Lichtquellen sind jedoch gemein, dass sie über die zu untersuchende Zellfläche eine homogene Ausleuchtung bezüglich ihrer Lichtintensitäten über den Querschnitt vorzeigen sollen.

4.1.4 Schnittstellen

Die Schnittstellen lassen sich in mechanische, optische und elektrische Schnittstellen unterscheiden.

Die mechanischen Schnittstellen erfordern ein Augenmerk auf eine hinreichend exakte Positionierung der Probenzellen gegenüber Diagnostik und Lichtquellen. Diese drei Subsysteme müssen daher justierbar sein. Unter der bereits diskutierten Anforderung der Late-Access Fähigkeit der Probenzellen wird auch die Notwendigkeit einer Reproduzierbarkeit der Position der Zellen nach deren Einschieben in das Gesamtsystem deutlich. Eine Justage vor Ort mit laufenden Systemen ist auf Grund des der Sicherheit bedingten Abschaltens jeglicher Elektronik nicht möglich.

Zu den optischen Schnittstellen zählen:

- Laserkopf – Laseroptik bzw. LED Emitter – LED Optik,
- Laseroptikkomponenten untereinander,
- Laseroptik/LED Optik – Zelle,
- Zelle – Diagnoseoptik,
- Diagnoseoptik Zelle,
- Einkopplung des Streulichts in Lichtleiter,
- Strahlteilung des Lichts und
- Einkopplung in Photodioden.

Die Anforderungen der genannten Schnittstellen sind maßgeblich an die entsprechenden Bauteile gebunden und damit Teil des Lösungsprozesses.

Zwischen den elektrischen Schnittstellen werden elektrische Informationen und Energie ausgetauscht. Mit ihrer Trennbarkeit soll eine modulare Handhabung geschaffen werden, d. h. Austausch, Wartung und Reparatur ermöglicht werden ohne nichtreversible Eingriffe, wie das Durchschneiden/Löten von Kabel, vornehmen zu müssen.

4.1.5 Speichersystem

Die Speichersysteme müssen neben den abgestimmten Schnittstellen die produzierten Datenmengen speichern können. Erstrebenswert ist zudem die gleichzeitige Fähigkeit als Rechner zu fungieren. Die Speichermedien müssen dabei auf eine Flugfähigkeit hin ausgewählt bzw. modifiziert werden.

4.2 Funktionsstruktur des kolloidalen Experimentteils

Nach vorangegangener Klärung der Anforderungen an den Experimentteil, der kolloidale Suspensionen untersuchen soll, und Abspaltung dieses Teils von den Gesamtanforderungen, lässt sich eine prinzipielle Funktionsstruktur erarbeiten. Mit dieser Funktionsstruktur sollen weitere Subsysteme nach den zu ihr erfüllenden Funktionen ausgelegt und entwickelt werden.

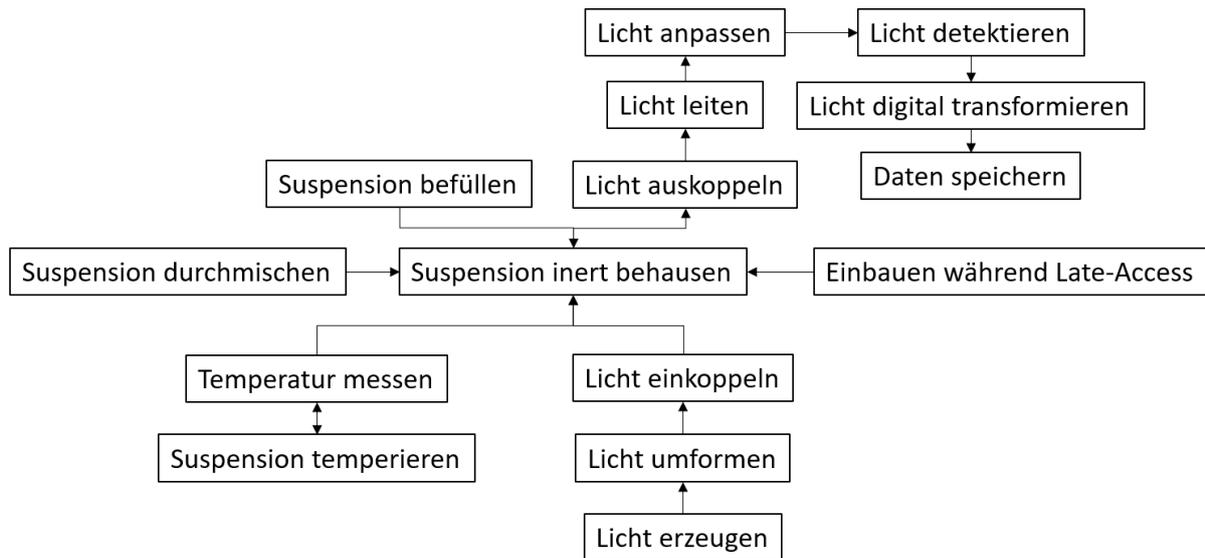


Abbildung 56: Funktionsstruktur des kolloidalen Experimentteils

4.3 Morphologie prinzipieller Lösungsmöglichkeiten

Zur Ideenfindung prinzipieller Lösungsmöglichkeiten sollen verschiedene Varianten aufgegriffen und im nächsten Unterkapitel diskutiert, miteinander verglichen und bewertet werden.

4.3.1 Probenumgebung

Als transparente Materialien der direkten Suspensionswandung eignen sich Gläser und Kunststoffe, die sich gegenüber der Wasser-Lutidin Lösung inert verhalten. Dabei darf die Wandung gegenüber der Diagnostik-Seite nicht beliebig stark sein. Die Wandungsstärke geht aus der Wahl der Optik mit deren Arbeitsabstand hervor. Die hydrophobe Eigenschaft kann durch Silanisierung einer geeigneten Beschichtung verbessert werden.

Geometrie des Probenvolumens

Um Randschichteffekte auszuschließen wird ein angenähertes Volumen mit einer Fläche $A_{koll,Z} = (4 \cdot 4) \text{ mm}^2$ und einer Höhe von $h_{koll,Z} = 0,4 \text{ mm}$ vorgegeben.

Ein solches Volumen könnte aus einem oder mehreren gegossenen Teilen hergestellt werden, die über die Möglichkeit zum Anschluss eines Septums verfügen, um die Zelle mit einer Spritze und aufgesetzter Kanüle zu befüllen.

Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von Kaufteilen wie Objektträger mit Deckgläsern. Dabei wird ein Zwischenstück, dessen Bohrung den späteren Innenraum der Suspension darstellt, auf den Objektträger geklebt. Nach dem Auffüllen des Innenraums wird dieser mit dem Deckglas verschlossen und ebenfalls verklebt.

Eine weitere Option geht auf die Konstruktion des vorangegangenen Kolloidexperiments RAMSES (25) zurück. Dabei werden kreisrunde Glasscheiben und ein dazwischenliegendes Distanzstück durch eine äußere Mechanik gegeneinander verpresst. Damit kann auf Klebstoff verzichtet werden.

Anwendungen in der Mikrofluidik findet man auch in der Biologie bei der Anzucht von Mikroorganismen, die damit ohne Umsiedlung der Kulturen direkt mikroskopiert werden können. Die Firma IBIDI stellt solche sogenannten „Channel-Slides“ in verschiedenen Kammergrößen und Eigenschaften her.

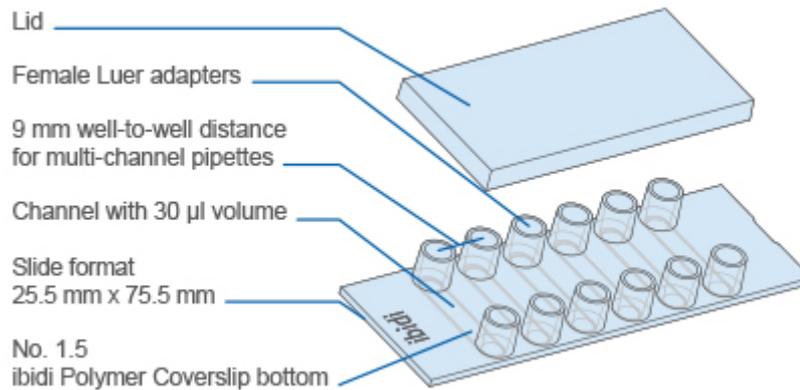


Abbildung 57: Ibidi Durchflussküvette (Fa. IBIDI)

Die Kanäle verfügen über standardisierten Luer-Anschlüsse und sind im gängigen Format von 1x3 Zoll eingebettet. Aufgrund der dünnen Wandstärke des Bodens, eignen sie sich für Mikroskopierungen, da Optiken mit geringen Arbeitsabständen verwendet werden können.

Durchmischen der Suspension

Das Durchmischen der Suspension bzw. das Erreichen einer möglichst homogenen Verteilung der Teilchen nachdem sie sedimentiert sind, wurde im RAMSES durch exzentrische Rüttelmotoren versucht zu erreichen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass der Effekt des Aufschüttelns sich mit der Standzeit der Zelle verschlechtert. Ein effektives Aufschütteln der Teilchen, wie es im Labor durch einen Vortex auch vor der Befüllung der Zellen praktiziert wird, ist nur dann möglich, wenn sich eine Gasphase über der Suspension im Gefäß befindet. Eine solche Gasphase ist jedoch für Untersuchungen in Mikrogravitation ein Ausschlusskriterium, da sie sich räumlich mit dem Fluid vermengen kann. Ebenso das Ultraschallen der Suspension, um Agglomerationen aufzulösen, zeigte Komplikationen. Zu hohe Amplituden und Frequenzen führen zur Ablösung der Kohlenstoffbeschichtung der Teilchen. Mit diesem Vorwissen sollen weitere Lösungsmöglichkeiten überlegt werden.

Zur Verteilung der Teilchen könnten elektrostatische Kräfte erzeugt werden. Dabei kommen elektrisch leitende Objektträger als Deck- und Bodenglas zum Einsatz, die an eine Spannungsquelle angeschlossen werden. Die Teilchen müssten dazu entgegengesetzt zum unteren Bodenglas geladen sein. Ein Nachteil dieser potentiellen Methode ist, dass Ladungen auf Teilchen experimentell nicht wünschenswert sind. In vielen Experimenten mit Kolloiden werden dem Medium teilweise Salze zugesetzt, um eine Aufladung der Teilchen zu verhindern. Aus der Vielzahl an fehlenden Parameter muss ein experimentelles Vorgehen erfolgen.

Ein anderer Ansatz beschäftigt sich mit der Erzeugung von Strömungen in der Zelle. Dabei wird die Suspension in einem geschlossenen Kreislauf durch unterschiedliche Querschnitte gepumpt. Entstehende Wirbel sollen die Teilchen mitreißen und chaotisch im Volumen

verteilen. Hier müssen experimentelle Untersuchungen vorausgehen, um die Funktionsfähigkeit eines solchen Prinzips zu zeigen. Versuche dazu werden im weiteren Verlauf aufgezeigt.

Temperierung der Suspension

Beim Betrieb des Experiments muss mit einer sich verändernden Umgebungstemperatur gerechnet werden. Hierdurch ergeht die Forderung, die Suspension sowohl wärmen als auch auf Zieltemperatur kühlen zu können.

Peltierelemente bieten eine solche Möglichkeit und sind zudem vergleichsweise gut zu regeln. Auch Kombinationen von Heiz- und Kühlelementen sind denkbar, wobei das elektrische Heizen grundsätzlich die geringeren Herausforderungen darstellt. Zum Kühlen kann der Joule-Thompson Effekt genutzt werden, in dem Gas expandiert wird. Zur Umsetzung einer solchen Variante müssen die dafür notwendigen zusätzlichen Elemente überprüft und die Auswirkung auf das Gesamtsystem berücksichtigt werden.

Ein weiterer Gedankenpunkt ist die Lokalisierung der Temperierungseinheit, d. h. welche Vor- und Nachteile eine unmittelbar direkt an der Zelle sitzende Temperierung im Gegensatz zu einer örtlich getrennten Regelung mit sich bringt.

Temperierung der Optik

Optische Systeme unterliegen grundsätzlich einem Temperaturbereich, indem sie arbeiten können. Dies liegt neben den Ausdehnungskoeffizienten der optischen Bauteile selbst besonders an den optomechanischen Komponenten, deren Ausdehnungskoeffizienten sich von ersteren unterscheiden. Dadurch werden Änderungen in den Distanzen der Bauteile untereinander erzeugt, was Einfluss auf den Strahlengang nimmt. Nach Erarbeitung iterativer Entwicklungsschritten zeigt sich aber, dass der zum Betrieb notwendige Temperaturbereich der umgebenden Atmosphäre von den zu temperierenden Proben bestimmt wird. Mögliche auftretende Temperaturschwankungen liegen innerhalb der von den Herstellern angegebenen Grenzen.

4.3.2 Diagnostik

Die Elemente der Diagnostiken sind überwiegend Kaufteile. Dabei gilt es, diese nach ihren Anforderungen auszuwählen und aufeinander anzupassen. In den meisten Fällen sind diese Produkte nicht für die Belastungen auf einer Höhenforschungsrakete ausgelegt. Daher muss die mechanische Beschaffenheit jedes Produkts auf die statischen und dynamischen Lasten hin untersucht und ggf. modifiziert werden.

Für die Kleinwinkellichtstreuung werden

- Lichtleiter sowie geeignete Einkopplungselemente,
- Strahlteiler,
- Fotodioden,
- Einen Korrelator
- und einen Rechner benötigt.

Die Nahfeldlichtstreuung und die optische Mikroskopie benötigen neben der Speicher- und Kontrolleinheit lediglich Mikroskope, die aus einem Objektiv und einer Kamera bestehen. Eine geeignete Auswahl kann erst nach der Berechnung im Lösungsprozess getroffen werden.

4.3.3 Lichtquellen

Wie in den Anforderungen bereits erwähnt, werden die Lichtquellen in einen durch Laser erzeugte und eine durch LEDs erzeugte Quelle getrennt behandelt.

Auswahl des Lasers sowie Zusatzkomponenten

Die Auswahl des Lasers erfolgt im Lösungsprozess. Aus den Anforderungen geht hervor, dass die Suspension homogen ausgeleuchtet werden soll, damit im zu untersuchenden Probenraum gleichmäßige Bedingungen vorherrschen. Laser emittieren jedoch kein gleichmäßiges Strahlprofil, sondern variieren ihre Intensität in einer gausschen Form. Aus diesem Grund lässt sich auch kein rationaler „Strahldurchmesser“ definieren. Unter dem Begriff Strahldurchmesser soll im Folgenden der Durchmesser verstanden werden, indem ein gleichmäßig vom Laser emittiertes Licht zu erwarten ist. Dieser Durchmesser muss mit geeigneter Optik auf die Zelle angepasst werden. Zum Umformen des gausschen Profils eignen sich speziell auf die Wellenlänge angepasste Strahlformer. Solche Strahlformer können als sogenannte „Flat-Top“ Varianten konfiguriert werden. Um aus der gausschen Form eine flache Form des Strahls zu formen, benötigt der Umformer eine aufbereitete Eingangsapertur des Laserstrahls. Mit Strahlaufweiter können die Eingangsaperturen für den Umformer eingestellt werden. Sie weiten oder verjüngen je nach Einbaulage den Querschnitt des Laserstrahls. Die Komponenten können demnach erst mit Auswahl eines geeigneten Lasers ausgelegt werden.

Zur Diskussion steht noch die Anzahl der zur Verwendung kommenden Laser aus, da zwei Zellen gleichzeitig belichtet werden sollen. Es können zwei unabhängige Laser oder ein gemeinsamer Laser, dessen Strahl aufgeteilt wird, installiert werden. Vor- und Nachteile werden im Lösungsprozess abgewägt.

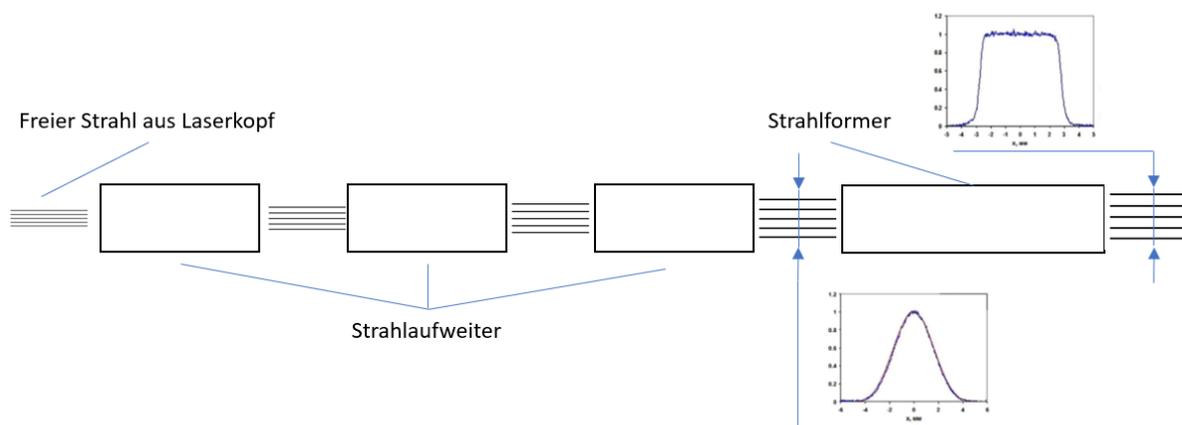


Abbildung 58: Prinzip der Strahlmodifikation

LED Lichtquelle

In RAMSES (27) wurden LED Lichtquellen sowie speziell entwickelte Optiken verwendet. Die Optiken bestehen aus mehreren Linsen sowie deren Halterungen. Auf dem Wissen und den in der Praxis gemachten Erfahrungen soll eine Weiterentwicklung dieser LED-Optik erfolgen. Die Optimierung fokussiert insbesondere

- eine kompaktere Bauart,

- eine besser reproduzierbare Qualität der Optiken,
- eine einfachere Herstellung der Linsen,
- eine optimierte Ankopplung des Homogenisators und
- weniger aufeinander abzustimmender Toleranzen in der Linsenhalterung.

Abbildung 59 zeigt das prinzipielle Design der Lichtquelle aus RAMSES (25).

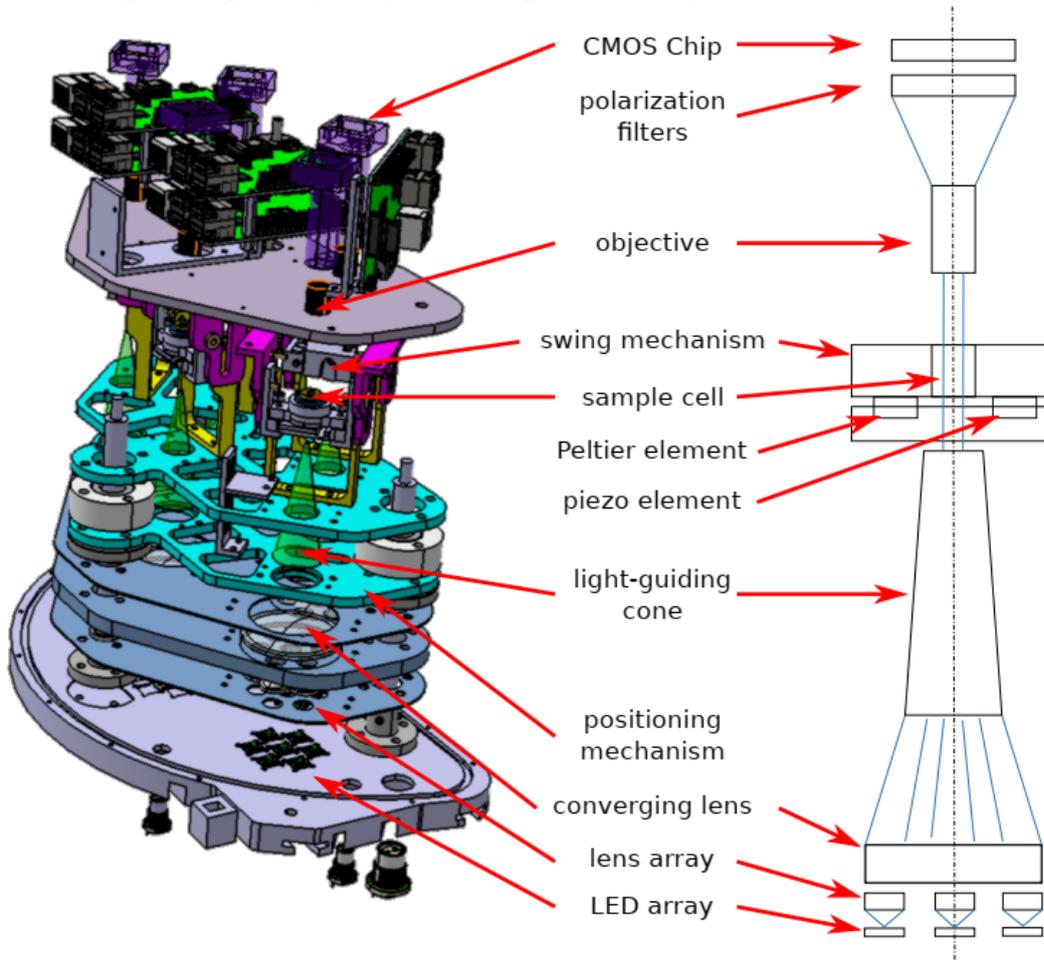


Abbildung 59: CAD Modell als Explosionsansicht und Funktionsprinzip der Lichtstrahlengänge

Das Licht aus sieben „High-Power“ LED Emitter wird jeweils durch Linsen kollimiert. Eine plankonvexe Sammellinse bündelt die Strahlengänge so, dass diese auf einen homogenisierenden Konus treffen. Durch den Konus werden die Strahlengänge weiter gebündelt und homogenisiert, d. h. an seiner Austrittsfläche wird die Lichtleistung der Emitter mit einer möglichst homogenen Lichtintensität in eine Zelle geleitet.

Die Berechnungen zu den Linsen und der Strahlengänge befinden sich im Anhang.

4.3.4 Schnittstellen

Mechanische Schnittstellen

Die mechanischen Schnittstellen haben die Aufgabe, bewegliche und statische Komponenten untereinander an einem bestimmten Ort zu fixieren. Unter statischen Komponenten sollen hier Bauteile und Baugruppen verstanden werden, die im regulären Betrieb gegenüber dem Experiment nicht bewegt und mit klassischen trennbaren Fügeverfahren, wie beispielsweise Schraubverbindungen, verbunden werden. Trotz der festen Verbundenheit werden sie als Schnittstellen betrachtet, um der übergeordneten Anforderung der Modularität des Experiments gerecht zu werden. D. h. ein möglicher Austausch von Subsystemen für andere Experimente soll durch die Trennbarkeit gegeben sein. Mit der Verwendung von Schraubverbindungen und dem Verzicht auf Schweißen, Kleben oder Löten von Subsystemen mit dem Gesamtsystem soll dieser Anforderung unter Beachtung der Zugänglichkeit der Schraubverbindungen genüge getan sein und hier nicht weiter behandelt werden.

Zu den beweglichen Komponenten zählen die Probenumgebungen, die während des Late-Access installiert werden. Es muss sichergestellt sein, dass diese reproduzierbar platziert werden. Eine Möglichkeit zur hinreichend exakten Positionierung stellen Normelemente dar, die mit entsprechenden Lage- und Formtoleranzen eingebaut werden. Da die Zellen im Betrieb mikroskopiert werden, könnte auch eine elektrische Feinjustierung nach dem Late-Access in Betracht gezogen werden. Dabei fahren elektrische Spindeln einen auf Führungswellen gelagerte Plattform gegen einen fixen Anschlagpunkt, referenzieren dort ihre Position und fahren auf die voreingestellte Position zurück. Eine Rückmeldung könnte ebenfalls durch Encoder erfolgen.

Elektrische Schnittstellen

Elektrische Schnittstellen sollen elektrische Schaltkreise miteinander verbinden bzw. sie kontrolliert trennen, wenn deren elektrischen Komponenten ausgetauscht oder ortsveränderlich bewegt werden. Bei den elektrischen Elementen statischer Komponenten bieten sich konfigurierbare D-Sub Steckverbindungen mit Verschraubungsmöglichkeit an. Dabei sollte die Buchse in ein Paneel fest verbaut werden, um ein zusätzliches Sichern zu vermeiden. Bei den nicht statischen Komponenten ist dies ebenfalls zu bevorzugen, jedoch nach dem zur Verfügung stehenden Platz abzuwägen. In jedem Fall sind die Steckverbinder mit form- oder kraftschlüssigen Sicherungen auszuwählen.

Optische Schnittstellen

Die optischen Schnittstellen sind auf die Anforderungen der optischen Bauteile anzupassen. In der Regel bieten die Hersteller solcher Elemente passende Schnittstellen mit an. Im Fall der selbst entwickelten Optik der LED Emitter ist insbesondere die Einkopplung des Lichts vom Homogenisator in die Probenzelle von Bedeutung. Um eine hinreichend effiziente Einkopplung zu realisieren, muss die Spitze des Homogenisators einen Flächenkontakt mit der Probenzelle aufweisen. Da die Probenzellen jedoch mobil sind, müssen zwei mögliche Positionszustände des Homogenisators einstellbar sein: Eine Einschub- und Startposition und eine Betriebsposition. Diese Anforderung wird im Design der Lichtquelle berücksichtigt.

4.3.5 Speichersystem

Das Speichersystem muss die aufgenommenen Daten während der Flugphase speichern. Dazu bieten sich klassische Rechner als auch spezielle Datenspeichersysteme an. Die Verwendung von klassischen Rechnern hat den Vorteil, dass gleichzeitig Software zum Steuern des Experiments implementiert werden kann. Dabei kann auf Komplettsystemen, die den Datenstrom verarbeiten können, zurückgegriffen werden oder auch individuell konfigurierbare Rechner, die ausschließlich die Anforderungen decken, bevorzugt werden.

4.3.6 Zusammenfassung

Es werden die wichtigsten, abzuwägenden Aspekte möglicher Lösungsvarianten in einem morphologischen Kasten zusammengefasst werden.

	1	2	3	4	5	6
Geometrie der Probenumgebung	Individuelle Gussteile	Objekträger mit Zwischenstück	Glasscheiben mit Zwischenstück	IBIDI Slides		
		(verklebt)	(verschraubt)			
Durchmischen der Suspension	Exentermotor	Ultraschall	Elektrostatische Aufladung	Strömung durch veränderliche Querschnitte		
Temperierung der Suspension	Peltier-elemente	Getrennte Heiz- und Kühlkomponenten				
		Heizfolie	Nutzung von elektr. Abwärme	Gasexpansion	Vorgekühltes Speichermedium	Regulation direkt oder indirekt an der Zelle
Befüllen der Zelle	Septum	Überbefüllung und Dichtung	Schlauch Injektion	Ventile (Zulauf und Entlüftung)		
Mechanische Schnittstellen	Normelemente	Elektrische Justierbank	Pendelaufhängung – Selbstjustierung durch Schwerkraft	Vorgespannte Feder-Aufnahmen		
Elektrische Schnittstellen	Einzelne Steckverbindungen	Gemeinsame Steckverbindung	Docking Mechanismus			

Tabelle 7: Morphologischer Kasten zur Lösungsvarianten des kolloidalen Experimentteils

4.4 Bewertung der Teil-Lösungsmöglichkeiten

Im Folgenden werden die zuvor diskutierten Lösungsansätze miteinander verglichen und nach den technischen Aspekten der Fertigungsgerechtigkeit, der Handhabung, dem Volumen bzw. Bauraumbedarfs, der Masse, der Sicherheit, auch im Sinne von Sicherheit gegenüber Versagen und den Kosten bewertet. Da den Kriterien nicht alle die gleiche technische Wertigkeit zugewiesen wird, werden diese mit einem Gewichtungsfaktor G gewichtet. Die Punktebewertungsskala E richtet sich nach (Roloff/Matek) von $E = [0; 4]$, wobei der Wert $E = 0$ als Ausschlusskriterium angesehen wird.

Bewertung der Lösungsvarianten zur Geometrie der Probenumgebung

Geometrie der Probenumgebung	G	1		2		3		4		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	1	3	2	6	3	9	4	12	12
Handhabung	5	3	15	1	5	3	15	4	20	20
Kompakte Bauweise	3	4	12	4	12	2	6	2	6	12
Masse	2	4	8	3	6	2	4	2	4	8
Sicherheit	5	2	10	2	10	3	15	3	15	20
Kosten	2	1	3	4	8	3	6	2	4	8
Summe		51		47		55		61		80

Tablle 8: Bewertungsmatrix zur Geometrie der Probenumgebung

Zur Herstellung der Probenumgebung aus einem Gussteil müssen Gussformen hergestellt werden. Dabei müssen Aspekte wie ein blasenfreies Abgießen des transparenten und inerten Materials und das spätere Trennen des Gusses aus der Gießform beachtet werden. Das Verfahren zur Herstellung eines Gussteils muss in mehreren iterativen Schritten entwickelt werden, was die Fertigung dieser Variante als sehr aufwendig erscheinen lässt. Vorteile eines Gussstückes sind das Fehlen von Fügeflächen und deren Elemente samt Dichtflächen, die individuelle Gestaltung der Geometrie und damit auch kompaktere Bauweise und Ersparnis der erforderlichen Masse. Für das Verfahren zum Gießen solcher Bauteile liegen nicht ausreichend Erfahrungen vor, wodurch das Risiko gegenüber einem Versagen als unzulässig hoch eingestuft wird.

In (28) wurden Janusteilchen zwischen zwei Objektträger und einem Zwischenstück verklebt. Zu beobachten ist eine Abnahme der Aktivität der Mikroschwimmer mit der Zeit. Der Prozess ist irreversibel, sodass die Probenumgebung ausgetauscht werden muss. Ein Eingreifen im integrierten Zustand ist somit nicht mehr möglich.

Aufbauend auf dem zuvor geschilderten Design wurden in (25) ein Zwischenstück mit zwei Glasscheiben durch Verschrauben zusammengedrückt. Ein Vorteil besteht darin, dass die Bauteile für die Probenumgebung wiederverwendbar sind. Das blasenfreie Befüllen der Zelle gestaltet sich als schwierig heraus. Eine langzeitige Dichtigkeit der Zelle hängt dabei von der korrekten Befüllung der Zelle durch den Experimentator ab.

Bei der Verwendung von Standardkomponenten wie eine Durchflussküvette der Firma IBIDI lassen sich gängige Anschlussverbindungen von Luer verwenden. Dadurch werden Handhabungen und Sicherheit erheblich vergrößert, da solche Verbindungen in der Praxis erprobt sind. Zusätzlich zu fertigen Bauteilen beschränken sich auf die Lagerung der Küvetten. Durch die Standardisierung der Maße muss ein höheres Bauvolumen und Masse in Kauf genommen werden.

Bewertung der Lösungsvarianten zum Durchmischen der Suspension

Durchmischen der Suspension	G	1		2		3		4		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	4	12	2	6	2	6	3	9	12
Handhabung	5	3	15	2	10	2	10	4	20	20

Kompakte Bauweise	3	2	6	4	12	4	12	3	9	12
Masse	2	1	2	4	8	4	8	3	6	8
Sicherheit	5	2	10	1	5	1	5	4	20	20
Kosten	2	3	6	3	6	2	4	4	8	8
Summe	51		47			45		72		80

Tabelle 9: Bewertungsmatrix zur Durchmischung der Suspension

Im Laborbetrieb wird die Suspension vor dem Befüllen durch einen Vortexer aufgeschüttelt. Durch die exzentrische Stimulation verteilen sich die kolloidalen Teilchen in der Lösung. Es liegt daher nahe, eine solche Bewegungsstimulation im Experiment zu integrieren, um eine sedimentierte Probe zu durchmischen. Der Einbau eines solchen Apparates ist vergleichbar einfach zu realisieren. Bauraum und Masse hingegen sind besonders hoch, da neben einer robusten Mechanik, die die Kräfte durch die hohen Beschleunigungen der Unwucht ableiten müssen, auch ein Getriebemotor benötigt wird. Weiterhin werden diese Kräfte über Lager in die Struktur geleitet, was bei Verwendung des Apparates unter μg Bedingungen zu μg Qualitätsverlust führt. Es muss auch beachtet werden, dass diese Art des Aufschüttelns nur in Anwesenheit einer Gasphase über der Suspension möglich ist. Unter Erdbedingungen stört diese Gasphase nicht, da sie sich wegen der Schwerkraft von der flüssigen Phase separiert. Unter μg Bedingung führt dies zum Vermischen der Gasphase mit der Suspension und es entstünden unerwünschte Streuer in Form von Gasblasen.

Das Ultraschallen von Suspensionen mit Mikroschwimmer ist ein in der Praxis ebenfalls gängiges Verfahren, um Agglomerationen von Teilchen aufzulösen. Bei den hier verwendeten Janusteilchen zeigt sich in Laborversuchen, dass sich beim Beschallen der Teilchen die Kohlenstoffschicht unter bestimmten Bedingungen ablöst. Auf die Sedimentation der Teilchen übt das Beschallen keinen Einfluss aus. So wird der Einbau einer Ultraschallanlage lediglich als Zusatzkomponente zur eigentlichen Redispergierung angesehen, wobei erforderliche Parameter, insbesondere Amplitude, Frequenz und Zeiteinwirkung der Beschallung im Vorfeld verstanden und experimentell erprobt sein müssen. Eine mögliche Realisierung kann durch Piezokristalle, die von einem Frequenzgenerator und einem Verstärker in Schwingung versetzt werden, umgesetzt werden. Eine Ankopplung sollte möglichst durch einen Stoffschluss an das zu schallende Fluid übertragen werden.

Ein weiterer zu diskutierender Gedanke ist der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen Teilchen und der Zellwandung entgegenzuwirken. Dazu können elektrisch leitfähig beschichtete Gläser Zellboden und -decke bilden. Mit der Variation von angelegten elektrischen Spannungen könnte das Verhalten des „Stick-Effektes“ mikroskopisch untersucht werden und gegebenenfalls Maßnahmen ergriffen werden. Es ist allerdings offen, ob damit eine vollständige Redispergierung erzielt werden könnte. Abgesehen vom Bauraum und der Masse eines spannungsgenerierenden Generators wäre die Implementation in eine Probenumgebung durch entsprechende Beschichtung der Wandung vergleichsweise einfach umzusetzen.

Ein anderer Ansatz verfolgt die Erzeugung turbulenter Strömung, die die Teilchen in der Lösung verteilen sollen. Dazu soll die Suspension durch unterschiedliche Querschnitte im geschlossenen System strömen. Werden Standardkomponenten verwendet, so bilden deren Anschlüsse bereits solche Querschnittsveränderungen. Benötigt wird dann eine Pumpe, die die Suspension in einem Kreislauf durch diese Anschlüsse und schließlich auch durch die Küvette befördert.

Temperierung der Suspension	G	1		2		3		4		5		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	4	12	4	12	4	12	2	6	3	9	12
Handhabung	5	4	20	2	10	1	5	2	10	1	5	20
Kompakte Bauweise	3	3	9	4	12	4	12	1	3	1	3	12
Masse	2	3	6	4	8	4	8	2	4	1	2	8
Sicherheit	5	2	10	1	5	0	0	4	20	3	15	20
Kosten	2	3	6	4	8	4	8	2	4	4	8	8
Summe		63		55		45		47		42		80

Eine Temperierung der Probenumgebung mit Peltierelementen hat den Vorteil, dass mit einem Element sowohl gekühlt als auch geheizt werden kann. Gleichzeitig ist die Ansteuerung vergleichsweise einfach durch die Stromrichtung durch das Peltierelement zu gestalten. Nachteilig sind der Wirkungsgrad der Peltierelemente und deren begrenzte Wärmetransportleistung.

Heizfolien sind sehr kompakt zu integrieren und einfach anzusteuern, jedoch nicht in der Lage zu kühlen. Ihr Einsatz kann also nur in Verbindung mit kühlenden Komponenten erfolgen.

Beim Betrieb des Experiments dissipieren zahlreiche elektrische Verbraucher Wärme. Grundsätzlich könnte diese Wärme durch geeignete Methoden zur Zelle regelbar transportiert werden. Auch hier ist eine solche Verwendung nur mit einer ergänzenden Kühlkomponente weiterdenkbar.

Größere Wärmetransporte in oder aus der Probenumgebung raus lassen sich mit dem Verdichten und Expandieren von Gasen erzeugen, wobei diese Prozesse außerhalb der Zelle stattfinden und über geeignete Wärmetransportelemente an die Zelle gekoppelt sind. Dabei ähnelt der Aufbau einer Klimaanlage. Die externen, dafür notwendigen Komponenten nehmen viel Bauraum und Masse in Anspruch. Des Weiteren erzeugen auch diese Komponenten Abwärme, die im Experiment nur an die eigene Struktur oder die umgebende interne Atmosphäre abgegeben werden kann, wodurch sich auch die Umgebungstemperatur und damit der Temperaturgradient zwischen Zelle und Umgebung erhöht.

Eine Möglichkeit ohne aktiv kühlende Komponente wäre das Vorkühlen eines thermischen Speichers. Dieser Speicher könnte ein Material darstellen, das regelbar über thermische Kopplungselemente Wärme von der Zelle in den Speicher leiten würde. Ein solcher thermischer Speicher benötigt entsprechend viel Masse, eine gute Isolierung und Bauraum in Anspruch. Ebenso ist die zeitliche Benutzbarkeit eines solchen „thermischen Akkus“ eingeschränkt.

Bewertung der Lösungsvarianten zum Befüllen der Zelle

Befüllen der Zelle	G	1		2		3		4		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	4	12	4	12	4	12	2	6	12
Handhabung	5	3	15	2	10	2	10	4	20	20
Kompakte Bauweise	3	3	9	4	12	4	12	1	3	12
Masse	2	4	8	4	8	4	8	2	4	8
Sicherheit	5	2	10	3	15	1	5	4	20	20
Kosten	2	4	8	4	8	4	8	2	4	8
Summe		62		65		55		57		80

Tabelle 11: Bewertungsmatrix zum Befüllen der Zellen

Mit einem im geschlossenen hydraulischen System integrierten speziellen Element kann ein temporärer Zugang geschaffen werden. Solche Bauteile finden sich oftmals an Infusionsbeuteln, durch die mit einer auf einer Spritze montierten Kanüle ein Mittel eingebracht werden kann. Nach dem Entfernen der Kanüle aus dem Septum verschließt dieses leakagefrei den sonst geschlossenen Kreislauf. Bei der Wahl eines Septums ist auf die Materialverträglichkeit zwischen dem elastischen Material und Lutidin zu achten. Als Kaufteil stellt das Septum aus fertigungstechnischer Sicht keinen Aufwand dar. Mehrfaches Durchstechen des elastischen Materials mit einer Kanüle kann zur Undichtigkeit führen, was einen Austausch zur Folge hätte. Für einen flugtauglichen Einbau muss der Grundkörper gestützt werden, was mit einer mittleren Kompaktheit bewertet wird. Die Sicherheit gegenüber einer Leckage ist vergleichsweise gering.

Das Überfüllen eines Lueranschlusses mit anschließender Verschlüßung ist eine gängige Praxis in routinierten Laboranwendungen. Diese Methode stellt ebenfalls keinen Mehraufwand zur Fertigung dar und bewertet damit auch positiv Platzbedarf und Masse. Dieses Vorgehen bedarf jedoch etwas Übung, um ein blasenfreies Befüllen zu erreichen. Nachteilig erscheint die dadurch verursachte äußere Verschmutzung durch das Überlaufen der Suspension. Es muss darauf geachtet werden, dass überlaufende Flüssigkeit nicht bis zu den observierenden Flächen vordringt und dort verdunstet.

Ähnlich eines Septums lässt sich auch ein Schlauch mit einer Kanüle penetrieren. Da ein gewöhnlicher Schlauch keine selbstdichtende Wirkung nach der Penetration aufweist, muss dieser abtrennbar vom geschlossenen System sein. Dabei lässt sich eine Reihe von Abtrennmöglichkeiten erdenken, beispielsweise durch Quetschen, selbstsperrende Kupplungen oder schaltbare Ventile. Es entsteht ein Mehraufwand zur Lagerung der notwendigen Bauteile. Eine klassische Variante stellt das Befüllen durch ein schaltbares Ventil, wobei ein zweites zur Entlüftung während des Befüllens benötigt wird. Solche Ventile müssen für Mikrofluidiksysteme, gegenüber Lutidin resistent und flugtauglich ausgelegt sein. Eine Handhabung erscheint benutzerfreundlich, jedoch baulich dafür ausladender.

Bewertung der Lösungsvarianten der mechanischen Schnittstelle

Mechanische Schnittstelle	G	1		2		3		4		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	4	12	1	3	2	6	3	9	12
Handhabung	5	4	20	4	20	2	10	4	20	20

Kompakte Bauweise	3	3	9	1	3	2	6	2	6	12
Masse	2	3	6	1	2	2	4	2	4	8
Sicherheit	5	4	20	3	15	2	10	1	5	20
Kosten	2	3	6	2	4	3	6	4	8	8
Summe	73			47		42		52		80

Tabella 12: Bewertungsmatrix zu mechanischen Schnittstellen

Bei der Verwendung klassischer Normelemente zur Positionierung von Werkstücken bedient man sich an den bereits gefertigten Formtoleranzen. Das vereinfacht die Fertigung und bietet ein gewisses Maß an Sicherheit.

Bei einer elektromechanisch gelagerten Aufnahme, ließen sich Positionen der Küvetten live über die Mikroskope einstellen. Zur Fertigung einer solchen Lagerung benötigt es Präzisionsführungswellen, Schlitten und Elektromotoren, was sowohl viel Masse und Bauraum zur Folge hätte.

Eine Pendelaufhängung, bei der der Massenschwerpunkt auf Höhe des Rotationslagers liegt, bietet den Vorteil, dass Kräftevektoren in radialer Richtung auf Grund der Rotation der Rakete normal zum Küvettenboden stünden. Dabei muss bei der geometrischen Gestaltung der Lagerung sehr genau auf die Position des Massenschwerpunktes Wert gelegt werden. Dies erschwert die Fertigung. Für den Bauraum muss ausreichend Platz reserviert werden, um eine Auslenkung kollisionsfrei zu realisieren.

Ebenfalls denkbar ist eine Lagerung mit vorgespannten Federn. Sie ermöglichen eine flexible, statisch nicht bestimmte Möglichkeit des Einbaus und bewegen die Zelle in den Ausgleichszustand bei äußerer Kräftefreiheit reversibel zurück. Dies setzt geringe Lagerreibwerte voraus und reduziert die Sicherheit gegenüber einer exakten Zielposition.

Bewertung der Lösungsvarianten der elektrischen Schnittstelle

Elektrische Schnittstellen	G	1		2		3		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	4	12	3	9	2	6	12
Handhabung	5	3	15	3	15	4	20	20
Kompakte Bauweise	3	4	12	3	9	4	12	12
Masse	2	3	6	3	6	3	6	8
Sicherheit	5	3	15	3	15	2	10	20
Kosten	2	4	8	4	8	2	4	8
Summe	68		62		58		80	

Tabella 13: Bewertungsmatrix elektrische Schnittstellen

Da die Einschübe über elektrische Bauteile verfügen, müssen die Einschübe elektrisch an das Experiment angeschlossen werden.

Die fertigungseinfachste Umsetzung besteht wohl darin, alle Stecker einzeln zu konfektionieren und nach dem Einbau miteinander zu verbinden. Es besteht die Gefahr des Vertauschens einzelner Leitungen. Diese Gefahr kann durch die Verwendung eines einzelnen, mehrpoligen

Steckers umgangen werden, der jedoch einen entsprechenden Bauraum für die Einbaubuchse benötigt.

Ein Panel am hinteren Ende eines Einschubs, die Verbindungen positionsgenau gleichzeitig schließt, bietet beim Einbau den größtmöglichen Schutz gegenüber einer Vertauschung oder Beschädigung der Kabel. Der Steckvorgang muss jedoch sehr präzise ablaufen, sodass aufgrund der hohen Genauigkeit eine Beschädigung des Panels selbst als auch ein Verklemmen einem schnellen und sicheren Einbau entgegensteht.

4.5 Lösungsprozess und Konstruktion

Es werden die konstruktiven Umsetzungen unter Zuhilfenahme festgelegter Komponenten beschrieben.

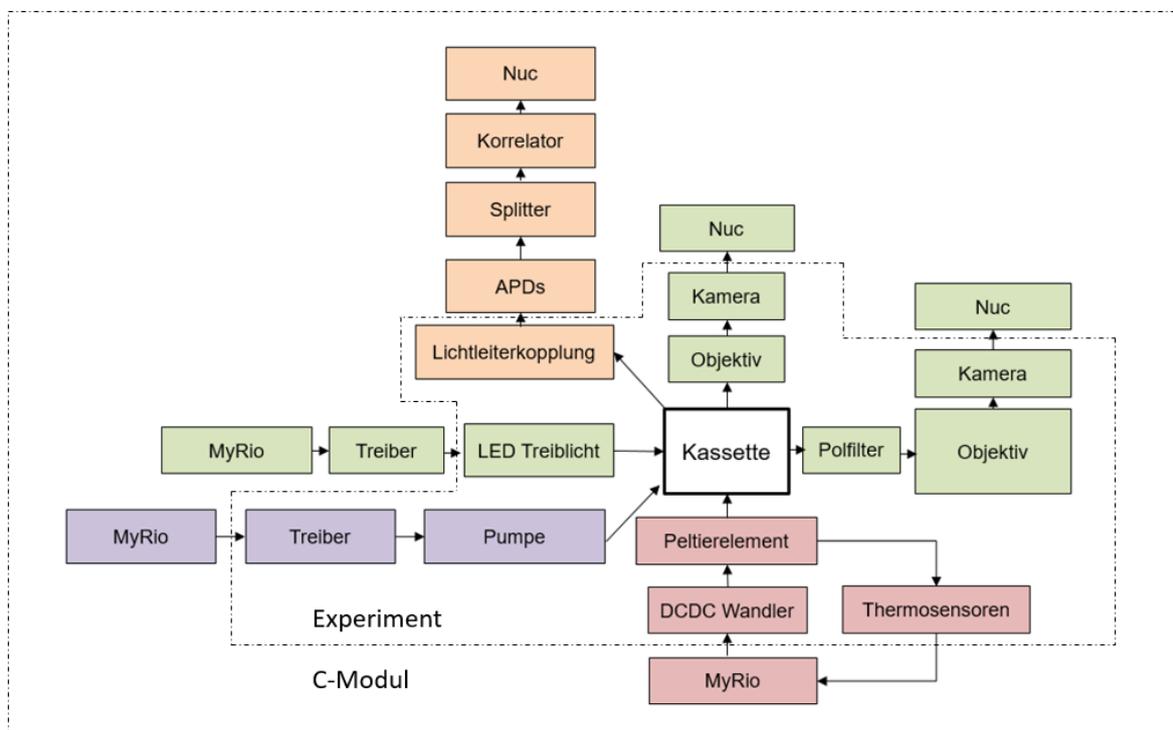


Abbildung 60: Grafische Darstellung der Komponenten

4.5.1 Probenumgebung

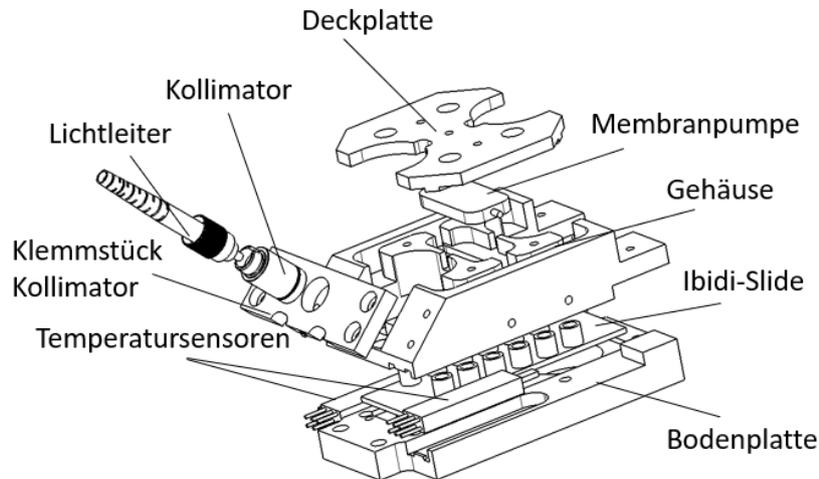


Abbildung 61: Explosionsansicht der Probenumgebung

Die Channel-slides werden in gefräste Taschen der Grundplatten gesetzt. Dabei werden die Toleranzen so gewählt, dass die Slides durch leichten Druck formschlüssig in der Tasche gelagert werden und ihre ebene Position festgelegt ist. Durch das Eindringen in die Tasche darf jedoch keine Wölbung in den Böden der Kanäle entstehen. Auch die Tiefe der Tasche ist so gewählt, dass die Oberkante des Slides über der Grundplatte steht. Dadurch wird ein möglicher Freiheitsgrad beim Aufsetzen des Deckstückes ausgeschlossen und das Slide ist gegenüber der Baugruppe vollständig bestimmt gelagert. Das Deckstück wird mit der Grundplatte verschraubt und stellt der Membranpumpe eine Tasche zur Verfügung, die analog zur Lagerung des Slides eine feste Position zuweist. Seitliche Nuten führen die Schläuche, die von den Lueranschlüssen der Kanäle zur Pumpe, in den gegenüberliegenden Kanal und wieder zur Pumpe führen. Dabei kreuzt die Rückführung in einer Nut unter der Pumpe. Eine aufschraubbare Abdeckung sichert den Sitz der Pumpe und hält die Schläuche in den Nuten. Der Sitz der Schläuche in den Nuten erlaubt nicht weiter zu sichernde Steckverbindungen zur Pumpe und modifizierten Lueradapter zu den Kanälen, da ein Herausrutschen durch Formschluss verhindert wird. Die Modifikation der Lueradapter besteht nur im Entfernen des Kranzes, der die Handhabung zum Entfernen des Adapters aus dem konischen Sitz erleichtern soll, jedoch im gegebenen Anwendungsfall aus Platzgründen stört. Ein blasenfreies Befüllen kann durch Pipettieren eines offenen Kanals erfolgen. Die Pumpe läuft dabei mit geringer Frequenz während die Säule der Suspension im Schliff aufrechterhalten wird. Bildet sich am abgezogenen Ende des Adapters ein Tropfen, so kann der Adapter in den Schliff gedrückt werden. Beide Kanäle sind blasenfrei befüllt.

Auf der Rückseite werden Positionierzapfen eingeschraubt. Durch sie und ihrem Gegenstück kann eine hinreichend genaue reproduzierbare Positionierung der Probenumgebung im Experiment erreicht werden. Auf der Vorderseite befinden sich zwei senkrechte Durchgangsbohrungen, durch die die gesamte Baugruppe letztlich mit dem Experiment befestigt wird. Seitlich werden spiegelverkehrt die Treiberplatinen der Pumpen über Distanzbolzen montiert. Die Spiegelverkehrtheit ergibt sich aus dem erst später erkennbaren Platzangebot im Experiment.

Bei dem Design der Baugruppe ist berücksichtigt, dass die Objektive nah genug an die Zelle herangefahren werden können. Ebenso wird der Laserstrahl nicht behindert und der Homogenisator kann bis zum Flächenkontakt an die Zelle herangefahren werden.

Das Deckstück nimmt in einem 45° Winkel einen Halter für einen Kollimator (Thorlabs F220FC-532) auf. Der Kollimator sitzt dabei in einer Übermaßpassung im Halter und wird durch zwei sich gegenüberliegende Madenschrauben gesichert. Der Abstand des Kollimators zur Zelle kann dabei variiert werden. Mit der integrierten FC/PC Verbindung kann ein Lichtleiter angeschlossen und mit einer Überwurfmutter gesichert werden.

Die grenzenden Abmaße werden in einem iterativen Prozess festgelegt und orientieren sich am Platzbedarf der Diagnostiken. Sie werden der Übersicht halber an dieser Stelle als gegeben betrachtet.

Die Probeneinschübe werden extern durch eine fest verbaute Temperierungseinheit temperiert. Dem Grund eine externe Einheit einer internen vorzuziehen geht folgende technische Problemstellung voraus.

Technische Problemstellung:

Peltierelemente benötigen zum Transportieren von Wärme eine Anbindung zu den Elementen, die geheizt oder gekühlt werden sollen. Die Flächenpressung der Kontaktflächen p_P ist dabei maßgeblich und wird von den Herstellern in einem zulässigen Arbeitsintervall angegeben. Bei einer Verschraubung der Kühl- zur Heizseite lässt sich dies mit der Vorspannkraft F_V der Schrauben erreichen. In einem statischen Anwendungsfall ist dies ausreichend. Unterliegt diese Verschraubung jedoch Beschleunigungen, so verringert bzw. erhöht sich die Vorspannkraft je nach der Trägheitskraft F_Z des darüberliegenden Bauteils. Das zulässige Arbeitsintervall der Flächenpressung kann je nach der Masse des Aufbaus und der ausgesetzten Beschleunigung nicht mehr eingehalten werden. Abbildung 62 stellt das Problem schematisch dar.

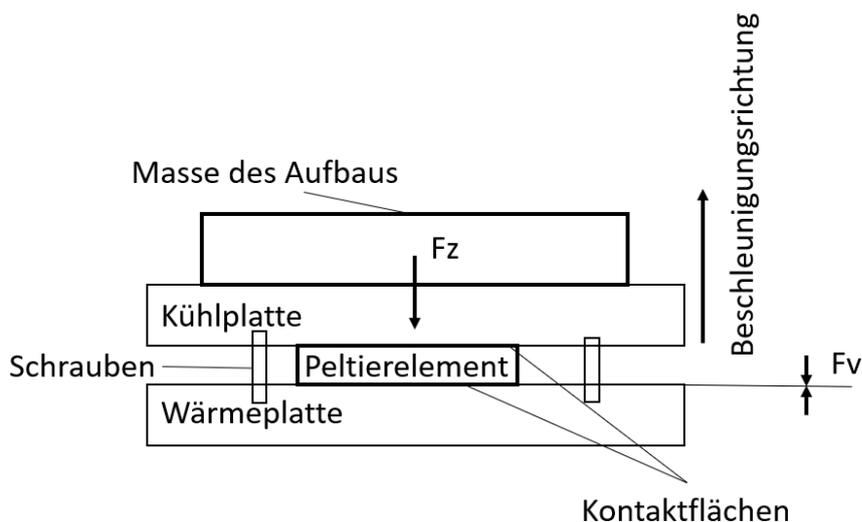


Abbildung 62: Schematischer Aufbau der Temperierungseinheit zur Veranschaulichung der Anpresskräfte

Im statischen Fall ist ersichtlich, dass $p_P \cdot A = F_V$. Wird das gesamte System beschleunigt, gilt $p_P \cdot A = F_V + F_Z$, wobei F_Z je nach Beschleunigungsrichtung auch negativ werden kann. Damit kann $p_P < p_{P,zul}$ oder $p_P > p_{P,zul}$ werden.

Lösungskonzept des technischen Problems:

Der Lösungsansatz beruht auf der Möglichkeit, die zusätzliche Trägheitskraft der Aufbaumasse direkt in eine tragende, von der Kühlplatte entkoppelte Struktur abzuleiten. Bei der Umsetzung wird ein weiteres Problem erkennbar: Die zu temperierende Aufbaumasse stellt in diesem Fall der mobile Einschub dar. Damit die Wärmeströme von der Aufbaumasse in die Kühlplatte strömen können, muss auch hier ein Flächenkontakt gegeben sein. Winkelabweichungen beider sich berührenden Flächen oder gar ein Spalt sind damit nicht hinnehmbar. Theoretisch würde ein Erfüllen dieser Bedingung unter Verwendung statischer Bauteile eine perfekte Maßhaltigkeit gegenüber der Kühlplatte und dem kräfteableitenden Element, auf dem die Aufbaumasse sitzt bedeuten. Praktisch ist dies jedoch nicht möglich.

Die Baugruppe der Kühlplatte, Heizplatte und Peltierelemente wird daher lageveränderlich zu den statischen, mechanischen Komponenten ausgelegt, indem Federn die Baugruppe gleichmäßig gegen die Aufbaumasse drücken.

Temperierungseinheit

Die Einheit besteht aus zwei identischen, separat geregelten Blöcken mit je zwei Peltierelementen. Die Peltierelemente werden in gefräste Taschen gelegt, dürfen dabei aber nicht formschlüssig in diesen liegen. Metallische Maßveränderungen auf Grund thermaler Ausdehnungen könnten sonst die spröde Keramik der Halbleiterelemente beschädigen. Die Kontaktflächen weisen polierte Oberflächen auf, um einen möglichst geringen thermischen Widerstand der Elemente mit der Oberen und unteren Platte zu erreichen. Zur Verbesserung des Kontakts kann Wärmeleitpaste verwendet werden. Es ist zu beachten, dass Wärmeleitpasten, entgegen der begriffsableitenden Bezeichnung, im Vergleich zu metallischen Werkstoffen schlechte Wärmeleiter sind. Sie leiten jedoch Wärme besser als Luft und verdrängen diese aus mikroskopischen Oberflächenrauigkeiten. Der Einsatz der Pasten soll daher dezent sein und ausschließlich Luft aus Unebenheiten verdrängen.

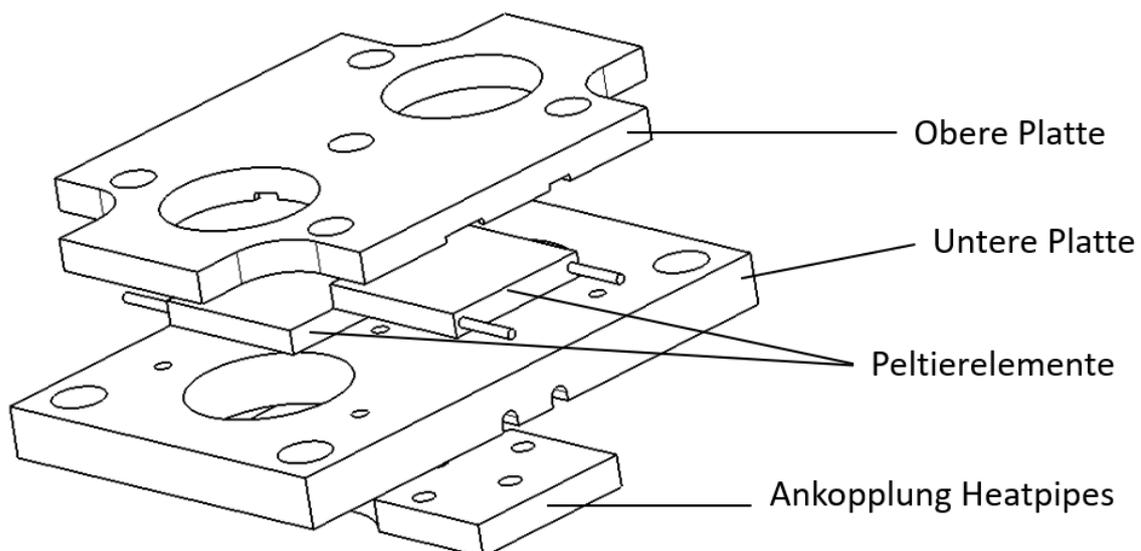


Abbildung 63: Einspannung der Peltierelemente

Obere und untere Platte werden gegeneinander verschraubt. Dabei muss wie bereits erwähnt sichergestellt werden, dass die minimal notwendige Flächenpressung jederzeit gegeben ist und die maximal zulässige Pressung nicht überschritten wird. Das Anziehen der Schrauben erfolgt

dabei abwechselnd und mit einem Drehmomentschlüssel, um ein Verkanten und damit Zerstörung der Peltierelemente zu verhindern. Unter die Schraubenköpfe werden Ringe aus PEEK gesetzt, um die Wärmeleitung der Wärmebrücken, die die Schrauben darstellen, zu verringern.

Die Berechnung der Anziehungsmomente erfolgt nach (23) für unterschiedliche Reibwerte in Auflage- und Gewindeflanken nach

$$M_A = F_{VM} \left[0,159P + 0,577\mu_G \cdot 2 + \mu_K \cdot \frac{d_K}{2} \right],$$

wobei

M_A ... Anziehdrehmoment

F_{VM} ... Montagevorspannkraft

P ... Steigung des Schraubengewindes

μ_G ... Reibungszahl im Gewinde

μ_K ... Reibungszahl an der Kopfauflage

d_2 ... Flankendurchmesser des Gewindes

d_K ... wirksamer Reibungsdurchmesser mit $\frac{d_K}{2} \approx \frac{(d_w + d_h)}{4}$,

mit

d_w ... Kleinstmaß der Auflagendurchmessers und

d_h ... Lochdurchmesser

sind.

Die empfohlene Flächenpressung der Peltierelemente werden durch den Hersteller mit $p_{pelt,em} = 0,5 \dots 1,2 \text{ MPa}$ angegeben und hier zu $p_{pelt} = 1 \text{ MPa}$ festgelegt. Mit den Maßen eines Peltierelements von $(25 \cdot 25) \text{ mm}^2$ errechnet sich eine Gesamtfläche von $A_{pelt,ges} = 2 \cdot 25 \text{ mm} \cdot 25 \text{ mm} = 1250 \text{ mm}^2$.

Dazu muss eine Montagevorspannkraft von $F_{VM} = p_{pelt} \cdot A_{pelt,ges} = 1 \text{ MPa} \cdot 1250 \text{ mm}^2 = 1250 \text{ N}$ aufgebracht werden.

Es werden alle Werte zur Berechnung des Anziehungsmoments zusammengetragen:

Eine M3 Schraube hat die Steigung $P = 0,5 \text{ mm}$, einen Flankendurchmesser von $d_2 = 2,675 \text{ mm}$, $d_w = 5,5$ und $d_h = 3,4$. Für die Reibzahl am Gewinde wird für Stahl auf Aluminiumlegierung $\mu_G = 0,1 \dots 0,28$ in (24) angegeben. Die Reibung zwischen Schraubenkopf und der Scheibe aus PEEK wird nach (29) mit $\mu_K = 0,3 \dots 0,4$ angegeben. Bei der Berechnung werden nach (23) die kleinsten Reibzahlen angenommen.

Für eine einzelne Schraube ergibt sich ein Anziehdrehmoment von $\frac{M_A}{i} = 264,7 \text{ Nmm}$, bzw. $M_A = 1323,5 \text{ Nmm}$.

Zum Anziehen der Schrauben können zwei unterschiedliche Methoden Anwendung finden. Die erste Methode ist nur zulässig, da es sich hier nicht um eine klassische Schraubverbindung handelt.

- Die Mittlere Schraube wird mit dem errechneten Anziehdrehmoment angezogen, danach die äußeren über Kreuz mit je einem Fünftel des Momentes,
- Alle Schrauben werden über Kreuz in mehreren Zyklen auf ein Fünftel des Anziehdrehmoments angezogen.

Es gilt dabei zu beachten, dass die Schrauben nachgezogen werden müssen, da der Kunststoff relaxieren kann und sich die Vorspannkraft dadurch verringert.

Alternativ können die Platten über eine Presse mit Kraftmesser zusammengedrückt werden, die Schrauben handfest angezogen und die Plattenpressung wieder entspannt werden. Damit ließe sich eine gleichmäßigere Druckverteilung erreichen. Auf der unteren Platte befinden sich Anbindungsmöglichkeiten zur Installation von Heatpipes. So können bei höher geforderten Temperaturgradienten oder unerwarteten höherer Umgebungstemperatur höhere Kühlleistungen erzielt werden. Da die Kühlleistung der Peltierelemente vom Temperaturgradient zwischen oberer und unterer Platte abhängt, muss die zusätzlich in die untere Platte eingeleitete Wärme abgeführt werden. Mehrere Heatpipes leiten so einen Teil der Wärme in einen externen Kühlblock, der mit der Struktur verbunden ist und bei Bedarf zusätzlich Ventiliert werden kann. Die Heatpipes dürfen dabei nicht gerade verbunden werden, sondern müssen einen Bogen aufweisen, um die Höhenbewegung der Blöcke kompensieren zu können.

Die beiden Blöcke sitzen federnd auf Passschrauben, die in die Grundplatte des Temperierungsbettes eingeschraubt werden. Die Federn sind so vorgespannt, dass durch die maximal zu erwartenden dynamischen Lasten in Flugrichtung ein permanenter Sitz der Kontaktflächen zu den Einschüben gewährleistet wird. Gleichzeitig wird damit auch sichergestellt, dass die damit einhergehende zusätzliche Flächenpressung der Peltierelemente im zulässigen Bereich liegt.

Zur Auslegung der Federn muss zunächst das Trägheitsverhalten der Blöcke selbst berechnet werden. Es müssen zwei Bedingungen eingehalten werden:

- Die Federn müssen die Blöcke derart gegen die Einschübe pressen, dass unabhängig von den zu erwartenden Beschleunigungen ein Flächenkontakt beider Baugruppen gewährleistet und
- gleichzeitig eine Überbeanspruchung der Peltierelemente ausgeschlossen werden kann.

Die auftretenden dynamischen Lasten überlagern sich mit der statischen Last der Beschleunigung. Zur Auslegung wird die höchst zu erwartenden statische Beschleunigung mit der Äquivalenzbeschleunigung der dynamischen Last in Flugachse angenommen. Es liegt eine schwellende Belastung vor, da die Amplitude kleiner ist als die statische Komponente und das Material deswegen keinen Richtungswechsel in der Belastung erfährt.

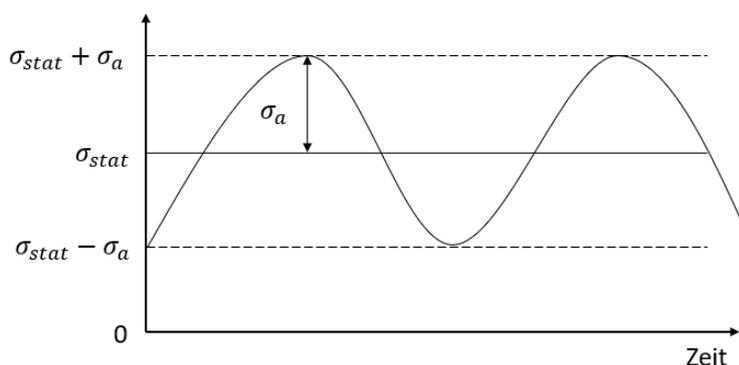


Abbildung 64: Andeutung der schwellenden Spannung aufgrund dynamischer Lasten

Es werden zunächst die Massen der federnd gelagerten Baugruppe ermittelt:

Bauteil	Masse [g]
Obere Platte	45
Untere Platte	89
Peltierelemente (2x)	$2 \cdot 14 = 28$
Heatpipe Ankopplung	19
Edelstahlschrauben 13x M3x10	$13 \cdot 7,5 = 97,5$
Gesamt	278,5

Tabelle 14: Zusammenfassung der relevanten Bauteilmassen

Bei Anliegen der Auslegungsbeschleunigung in Flugachse wird also eine Trägheitskraft $F_{tr\ddot{a},z} = 40 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,2785 \text{ kg} = 109,3 \text{ N}$ angenommen. Reibkräfte werden vernachlässigt, da sie der Richtung der Federwirkung entgegengerichtet sind.

Die Baugruppe wird auf vier Federn gelagert. Dabei zeichnen sich vorerst festgelegte Konstruktionsparameter für die Auswahl und Auslegung der Federn ab. Begrenzend für den minimalsten Innendurchmesser $d_{i,min}$ ist der Durchmesser der Schulterschraube. Der Abstand zum nächstgelegenen Bauteil begrenzt den maximalen Außendurchmesser $d_{a,max}$ der Feder. Ohne Einschub drücken die Federn die bewegliche Baugruppe gegen die Schraubenköpfe und haben die gespannte Länge l_0 . Mit montiertem Einschub werden die Federn weitere 0,8 mm gespannt und haben die Einbaulänge l_1 . Dies soll einen sicheren Flächenkontakt zwischen beweglicher Baugruppe und Einschub gewährleisten. Man liest folgende Maße ab:

$$d_{i,min} = 8 \text{ mm},$$

$$d_{a,max} = 14 \text{ mm},$$

$$l_0 = 17 \text{ mm},$$

$$l_1 = 16,2 \text{ mm}.$$

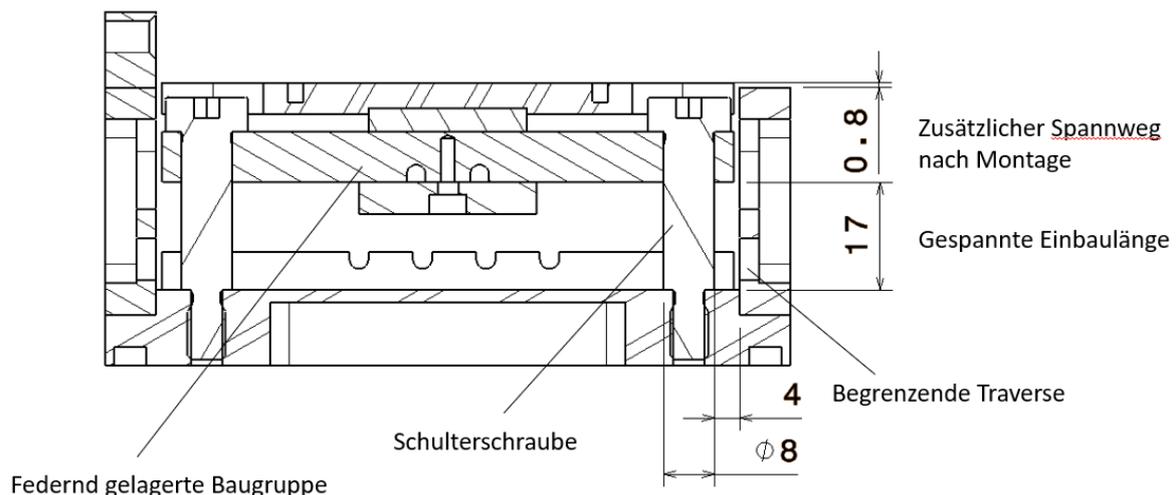


Abbildung 65: Schnittdarstellung der Temperierungseinheit zur Verdeutlichung der Einbaumaße

Um einen stetigen Flächenkontakt zu gewährleisten muss also die gesamte Vorspannkraft der Federn $F_{V,Ges} > F_{tr\ddot{a},z}$ sein. Gleichzeitig darf es aber nicht zu einer unzulässigen Flächenpressung der Peltierelemente kommen. Der Anpressdruck der Peltierelemente wurde zuvor auf $p_{pelt} = 1 \text{ MPa}$ ausgelegt und haben eine zulässige Flächenpressung von $p_{pelt,zul} =$

1,2 MPa, womit sich eine Reserve von 0,2 MPa ergibt. Bei der gegebenen Fläche der Peltierelemente errechnet sich eine zusätzlich zu Pressung beitragende Kraft von $F_{pelt,res} = 250 \text{ N}$.

Es muss also die Bedingung

$$F_{pelt,res} > F_{V,ges} > F_{tr\ddot{a}g,z}$$

beziehungsweise

$$F_{V,ges} = [109,3; 250] \text{ N}$$

erfüllt werden.

Die von einer Feder ausgeübte Kraft verhält sich allgemein nach dem Produkt der Federkonstante und der Längenänderung: $F = D\Delta l$. Die Federkonstante hängt dabei vom Schubmodul G des Federmaterials, dem Drahtdurchmesser d_D , dem mittleren Federdurchmesser d_F und der Anzahl der Windungen n ab. Es gilt:

$$D = \frac{G \cdot d_D^4}{8 \cdot d_F^3 \cdot n} \Leftrightarrow \frac{\Delta l}{n} = \frac{F \cdot 8 \cdot d_F^3}{G \cdot d_D^4}$$

Der mittlere Federdurchmesser darf dabei die limitierenden Einbaumaße nicht unter- bzw. überschreiten. Es wird ersichtlich, dass für den minimalen mittleren Durchmesser $d_{F,min} = d_{i,min} + d_D$ und für den maximalen mittleren Durchmesser $d_{F,max} = d_{a,max} - d_D$ gelten muss. Mit der Ungleichung

$$d_{a,max} - d_D > d_F > d_{i,min} + d_D$$

steht der mittlere Durchmesser in Bezug auf den zu wählenden Drahtdurchmesser.

Da die Umweltumgebung keine besonderen Anforderungen an das Material der Feder stellt, wird ein geläufiger Federstahl verwendet: EN 10270-1, dessen Schubmodul mit $G = 81500 \text{ MPa}$ angegeben wird.

Mit diesen Festlegungen und Eingrenzungen der Parameter lassen sich nun die Gesamtfederlänge, die Anzahl der Windungen und der Drahtdurchmesser wählen. Eine Rückrechnung soll die tatsächlich zu erwartenden Kräften quantifizieren.

Im Katalog der Firma „Gutekunst Federn“ wird nach passenden Druckfedern gesucht, die die zuvor gestellten Anforderungen erfüllen. Die Druckfeder mit der Artikelnummer D179M erfüllt die Kriterien:

$l = 55,9 \text{ mm}$	$\Rightarrow \Delta l = l - l_1 = 39,1 \text{ mm}$
$D = 1,212 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$	$\Rightarrow F_i = \Delta l D = 47,4 \text{ N} \Rightarrow F_{ges} = 189,6 \text{ N}$
$d_a = 12 \text{ mm}$	$d_F = \frac{d_a + d_i}{2} = 10,6$
$d_i = 9,2 \text{ mm}$	
$d_D = 1,1 \text{ mm}$	
$n = 9,5$	

Tabelle 15: Parameter der Federn

Damit kann gezeigt werden, dass die Bedingungen

$$F_{V,ges} = [109,3; 250] \text{ N}, \text{ hier } F_{ges} = 189,6 \text{ N},$$

und

$$d_{a,max} - d_D > d_F > d_{i,min} + d_D, \text{ hier } 10,9 \text{ mm} > 10,6 \text{ mm} > 10,3 \text{ mm}$$

erfüllt sind sowie die geometrisch begrenzenden Einbaumaße eingehalten werden.

Die Grundplatte des Temperierungsbetts ist seitlich mit Traversen verstrebt, um eine Formstabilität und Anbindungsmöglichkeit als modulare Einheit in das Experiment zu ermöglichen. Die hintere Verstrebung nimmt das Gegenstück der Positionierzapfen auf. Die vordere Verstrebung verfügt über Gewindebohrungen, durch die die Einschübe gehalten und gesichert werden. Über die Traversen wird die zusätzliche Trägheitskraft der Einschübe in die Struktur abgeleitet.

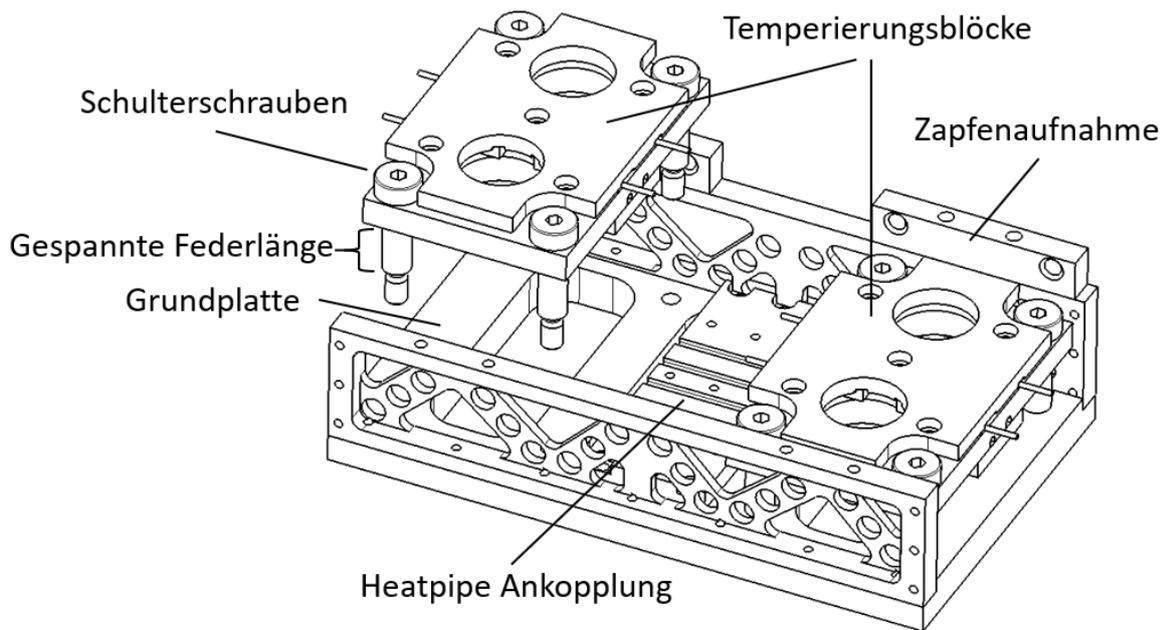


Abbildung 66: Isometrische Ansicht der Temperierungseinheit

4.5.2 Diagnostik

Kleinwinkellichtstreuung

Die Komponenten der Kleinwinkellichtstreuung sind Kaufteile. Zur Umsetzung müssen diese an die Struktur befestigt werden und ggf. zusätzliche Vorkehrungen für die erhöhten mechanischen Belastungen getroffen werden. Das betrifft konkret ausschließlich die Platinen der Photodioden. Hochstehende Elektronikkomponenten, wie beispielsweise Kondensatoren, werden um ihre Auflagenfläche herum mit einem Zwei-Komponenten Epoxidharz vergossen. Da alle Komponenten der Diagnostik für die Kleinwinkelstreuung im sogenannten C-Modul untergebracht werden, wurde die Konstruktion der Halterungen und die mechanische Integrität in Kapitel 3 behandelt.

Nahfeldlichtstreuung und optische Mikroskopie

Sowohl für die Nahfeldlichtstreuung als auch für die optische Mikroskopie werden Mikroskope benötigt, die sich nur in ihren Anforderungen unterscheiden. Die Mikroskope bestehen jeweils aus einer Kamera, einem Objektiv sowie dessen mechanische Anbindung an die Kamera und

einer lagernden Verstellmechanik, die eine hinreichende Einstellung des Fokus ermöglicht. Bei der Auswahl des Objektivs muss sich zwischen endlich oder unendlich korrigierten Objektiven entschieden werden. Unendlich korrigierte Objektive haben den Vorteil frei in der Auslegung der Tubuslänge zu sein. Weiterhin sind sie baulich meist größer als korrigierte Objektive. Die in der Beschreibung der Probenumgebung genannten Bohrungen, um die Objektive nah genug an die Zelle zu führen, müssen den Kompromiss eines verringerten Wärmetransports aufgrund ausladender Durchmesser für die Durchführung der Objektive eingehen. Es wird sich deshalb für endlich korrigierte Objektive entschieden. Um die modifizierte Tubuslänge zu berechnen, muss zunächst der Strahlengang berechnet werden. Aus einem iterativen Prozess wird ein Objektiv mit 20-facher Vergrößerung in Betracht gezogen.

Abschätzende Berechnung des Strahlengangs

Die Berechnung erfolgt exemplarisch an dem F20x Objektiv statt. Korrigierte Mikroskopobjektive sind auf eine Tubuslänge von $l_{korrr} = 160 \text{ mm}$ ausgelegt. Das Objektiv hat ein Bildfeld von $d_0 = 1 \text{ mm}$. Die Brennweite lässt sich grundsätzlich berechnen mit Tubuslänge/Vergrößerungsfaktor. Dies ist bei einfachen Linsen der Fall. Da es sich bei einem Objektiv um mehrere Linsen handelt, gibt man analog eine effektive Brennweite an, die bei vorliegendem Objektiv laut Hersteller bei $f = 8,33 \text{ mm}$ liegt.

Die entsprechende Kamera von Basler (Basler ACE800-510 um) besitzt folgende relevante Werte:

- Sensorgröße: $3,8 \text{ mm} \times 2,9 \text{ mm}$
- Pixelgröße: $4,8 \mu\text{m} \times 4,8 \mu\text{m}$
- Auflösung: $800 \text{ px} \times 600 \text{ px}$

Es wird zunächst der nominelle Strahlengang skizziert:

Für den halben Öffnungswinkel α ergibt sich

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\frac{d_1}{2}}{160-f}\right) = 3,77^\circ,$$

mit $d_1 = 20 \cdot d_0 = 20 \text{ mm}$.

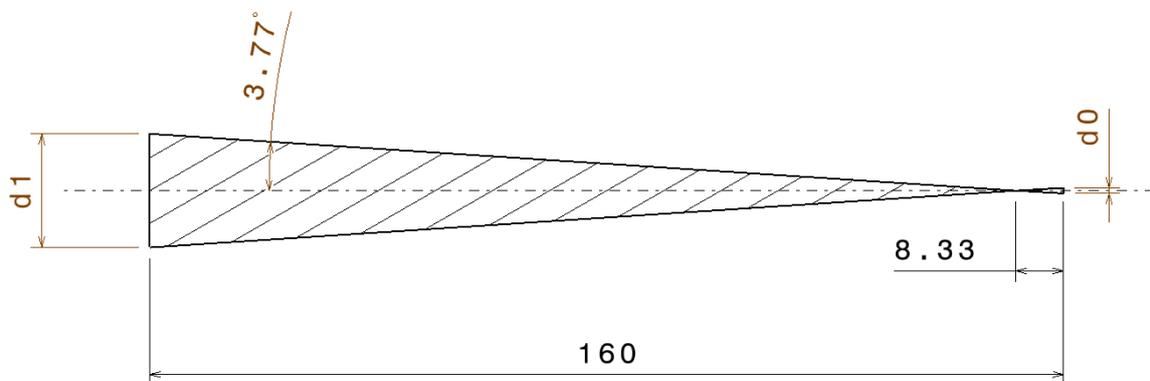


Abbildung 67: Grafische Andeutung des Strahlengangs

Der Durchmesser eines Teilchens soll mit 4 bis 5 Pixel abgebildet werden. Das entspricht bei quadratischer Anordnung der Pixel auf dem Sensor zwischen 16 und 25 Pixel pro Teilchen.

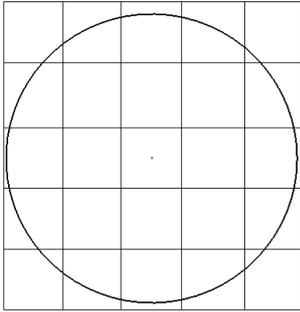


Abbildung 68: Bildfeld auf Sensor mit Pixel

Um das vorgegebene Intervall einzuhalten, werden 22 Pixel pro Teilchen angenommen. Das entspricht für den Durchmesser eines Teilchens $\sqrt{22} = 4,69$ Pixel. Mit der gegebenen Pixelgröße entspricht demnach ein $1,8 \mu\text{m}$ durchmessendes Teilchen eine Breite auf dem Sensor von $4,69 \text{ Px} \cdot 4,8 \mu\text{m} = 22,51 \mu\text{m}$ und damit einer Auflösung von $\frac{22,51 \mu\text{m}}{1,8 \mu\text{m}} = 12,51$. Zur Erreichung dieser Vergrößerung wird nun der Abstand zum Brennpunkt berechnet mit $l_0 = \frac{12,51}{\tan(3,77^\circ)} = 94,91 \text{ mm}$. Da die Brennweite unverändert bleibt, muss diese hinzuaddiert werden, sodass eine Tubuslänge von $94,91 \text{ mm} + 8,33 \text{ mm} = 103,2 \text{ mm}$ errechnet wird.

Überprüfung der Auflösung

Um die errechnete Auflösung zu überprüfen wird der Aufbau mit Kamera und Objektiv durch einen 104 mm langen Tubus verbunden und per Durchlicht ein Mikrometer aufgenommen. Dabei wird das Programm „ImageJ“ verwendet. Es lassen sich in einer $25 \mu\text{m}$ breiten Kachel 67 Pixel zählen. Damit werden $25 \mu\text{m}$ Objektseitig mit $67 \text{ Px} \cdot 4,8 \mu\text{m} = 321,6 \mu\text{m}$ aufgelöst, was einer Vergrößerung von $\frac{321,6 \mu\text{m}}{25 \mu\text{m}} = 12,8$ entspricht.

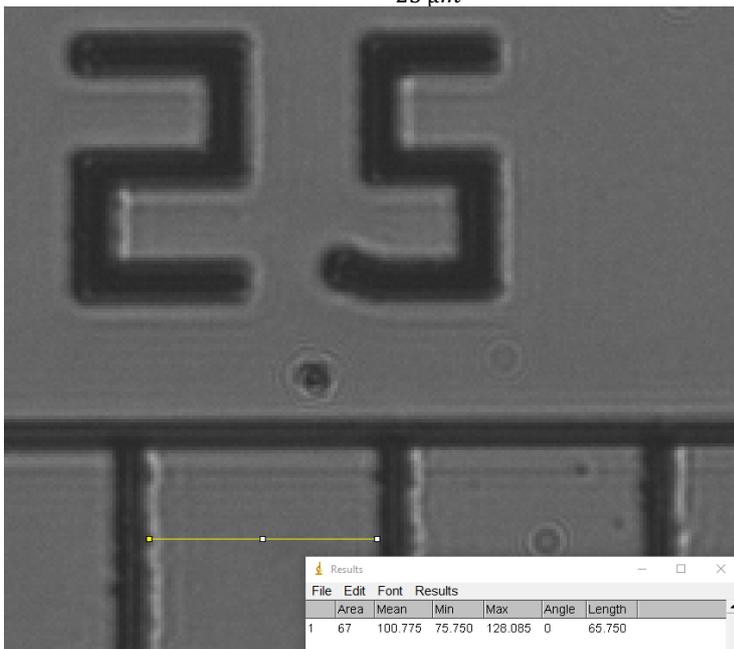


Abbildung 69: Überprüfung der tatsächlichen Auflösung

Das Objektiv wird mit seinem RMS Gewinde über einen Gewindeadapter mit dem C-Mount Gewinde des Tubus verschraubt. Der Tubus wiederum wird mit dem C-Mount Gewinde der Kamera verschraubt. Die entstandene Baugruppe wird von einem Kameraträger gelagert, der die Mikroskope in alle räumlichen Achsen einstellen lässt.

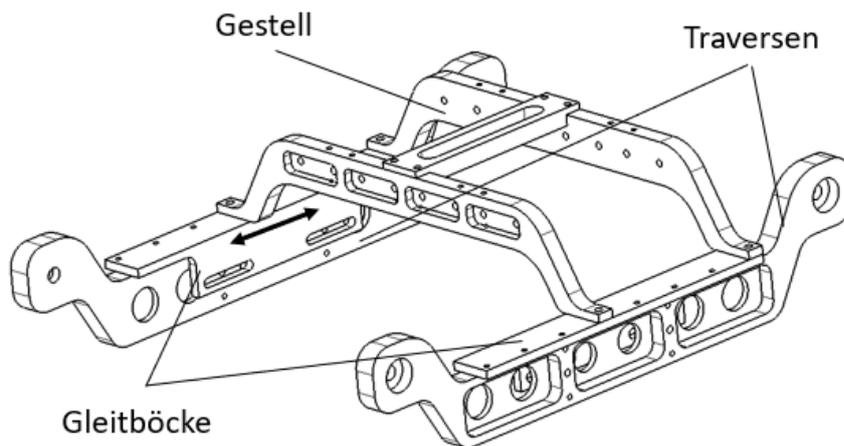


Abbildung 70: Isometrische Ansicht des Traggestells

Das Einstellen entlang der y-Achse erfolgt durch die Lagerung des gesamten Trägers. Die Träger sitzen auf zwei Gleitböcken, die wiederum auf fest verbundenen Traversen liegen und durch Feststellschrauben und Langlöcher um $\Delta Y_K = 24 \text{ mm}$ verschiebbar sind. Verschiebungen in der x-Achse sind ebenfalls durch Langloch-Verschraubungen der Aufnahmegruppe möglich. Bei korrektem Sitz der Tuben in den Bohrungen der Einschübe sind die Objektive in den x- und y-Koordinaten zentriert zu den Kanälen der Zelle. Die Einstellschrauben werden angezogen. Das Einstellen der z-Achsen Positionen muss variabler und präziser gestaltet werden, da eine freihändige, nicht mechanisch unterstützte Justierung kaum möglich ist. Dazu wird die Mikroskop-baugruppe verwendet.

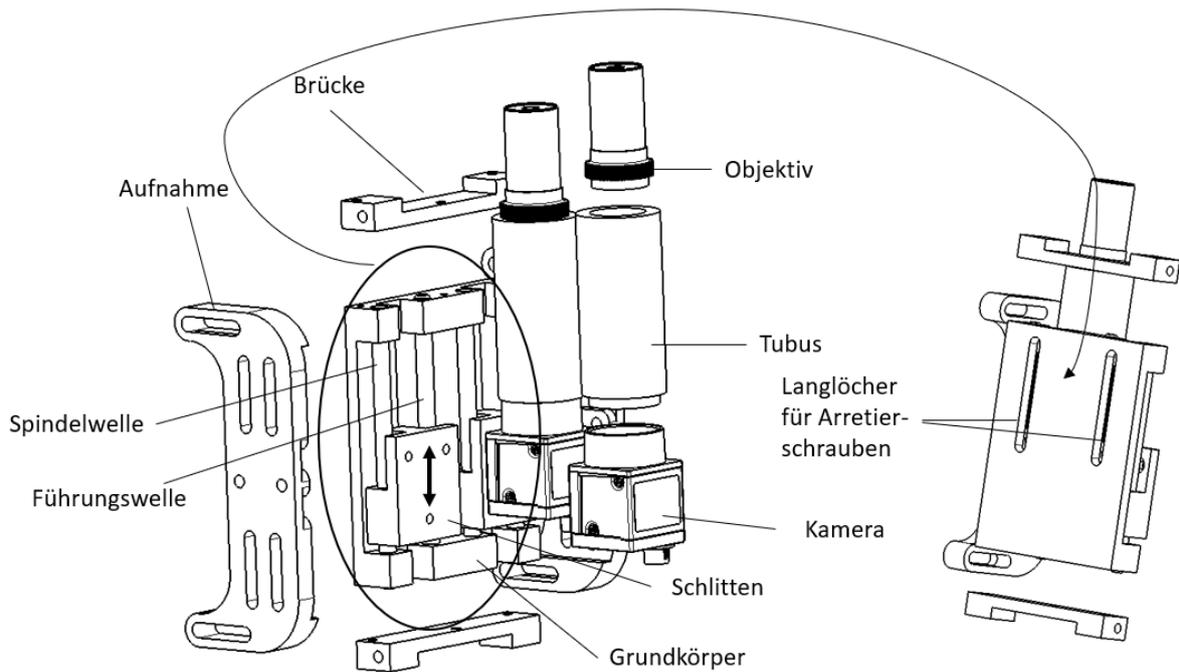


Abbildung 71: Darstellung der Kameraträger und Verfahrmechanik

Die Kameras werden mit ihren Montage-Gewindebohrungen auf Schlitten verschraubt. Diese sind einseitig mit einem M7x0,5 Gewinde versehen und eine Spindel mit Zapfen eingedreht. Durch eine Durchgangsbohrung auf der gegenüberliegenden Seite wird eine Linearwelle mit einer H7/e7 Passung geführt. Gelagert werden die Wellen und die Zapfen der Spindel in Bohrungen des Aufnahmestücks. Aufgeschraubte Brücken verhindern durch Formschluss ein Verlieren der Elemente.

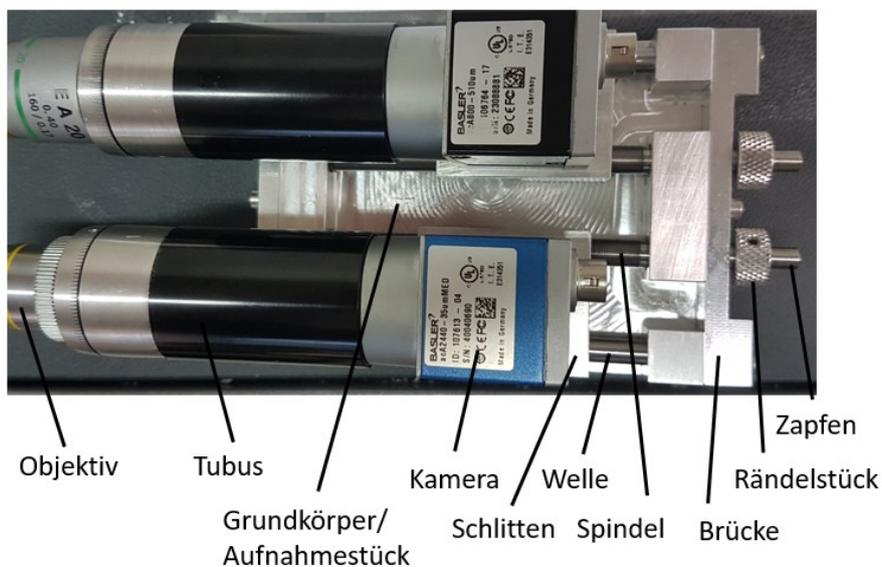


Abbildung 72: Foto der Kameraträger mit Fokuseinstellung über Spindelmechanik

Eine Rändelung am unteren Ende der Spindel ermöglicht ein Drehen per Hand. Zusätzlich kann an dem überstehenden Zapfen ein Bohrfutter einer Maschine angebracht werden, um ein zügigeres Verstellen zu ermöglichen. Bei dem verwendeten Feingewinde entspricht eine volle

Umdrehung einer axialen Verstellung von 500 μm . Zum Einstellen der Fokuse wird bei laufender Kamera ein Referenzpunkt angefahren, beispielsweise sedimentierte Teilchen auf dem Boden der Küvette. Mit entsprechender Umrechnung kann so der Fokus auf jeden beliebigen Abstand durch Drehen der Spindel eingestellt werden. Nach erfolgter Einstellung der Fokuse werden die Schlitten zusätzlich mit Feststellschrauben an die Aufnahmekomponenten gesichert.

4.5.3 Lichtquellen

Wie bereits erwähnt werden zwei unterschiedliche Lichtquellen integriert: Eine Laser- und eine LED-Lichtquelle.

Laserlichtquelle

Die Laserlichtquelle besteht aus folgenden Komponenten:

- Lasertreiber,
- Laserkopf,
- Strahlweiter und
- Strahlformer.

Es wird sich dazu entschieden, einen gemeinsamen Laserkopf für beide Einschübe zu nutzen. Der Grund dafür liegt in dem Vorteil, dass die relativ kosten- und platzaufwendige Laseroptik nur einmal benötigt wird, wenn der Strahl nach dessen Formung geteilt wird. Die Lagerung der optischen Bauteile muss so gestaltet werden, dass sie aufeinander justierbar eingestellt werden können. Daher werden weitere Bauteile benötigt:

- Umlenkspiegel,
- justierbare Montage-Lagerungen und einen
- Strahlteiler.

In Abbildung 58 wurde die prinzipielle Funktionsweise beschrieben. Dazu werden die einzelnen Komponenten an ihren Innen- und Außengewinde miteinander verschraubt. Für Anwendungen unter Laborbedingungen kann der Laserkopf über ebenfalls zu erwerbenden Justiereinheiten entsprechend installiert werden. Eine Verwendung solcher Hilfsmittel ist für die Anwendung in einem raketenflugtauglichen Experiment zum einen aus Platzgründen und zum andern aus Festigkeitsgründen nicht möglich. Einige Halterungen halten ihre Elemente nur mit Federkraft auf Position, die im Labor völlig ausreichend sind. Des Weiteren zeigt eine herstellervorgesehene Verschraubung der optischen Elemente in einer Achse einem Längenbedarf der Baugruppe, die so nicht mehr integrierbar wäre. Für eine flugfähige und integrierbare Lösung muss also der optische Strahlengang mehrfach umgelenkt werden und dabei seine Konzentrität gegenüber der Ein- und Ausgangsseite der optischen Elemente beibehalten.

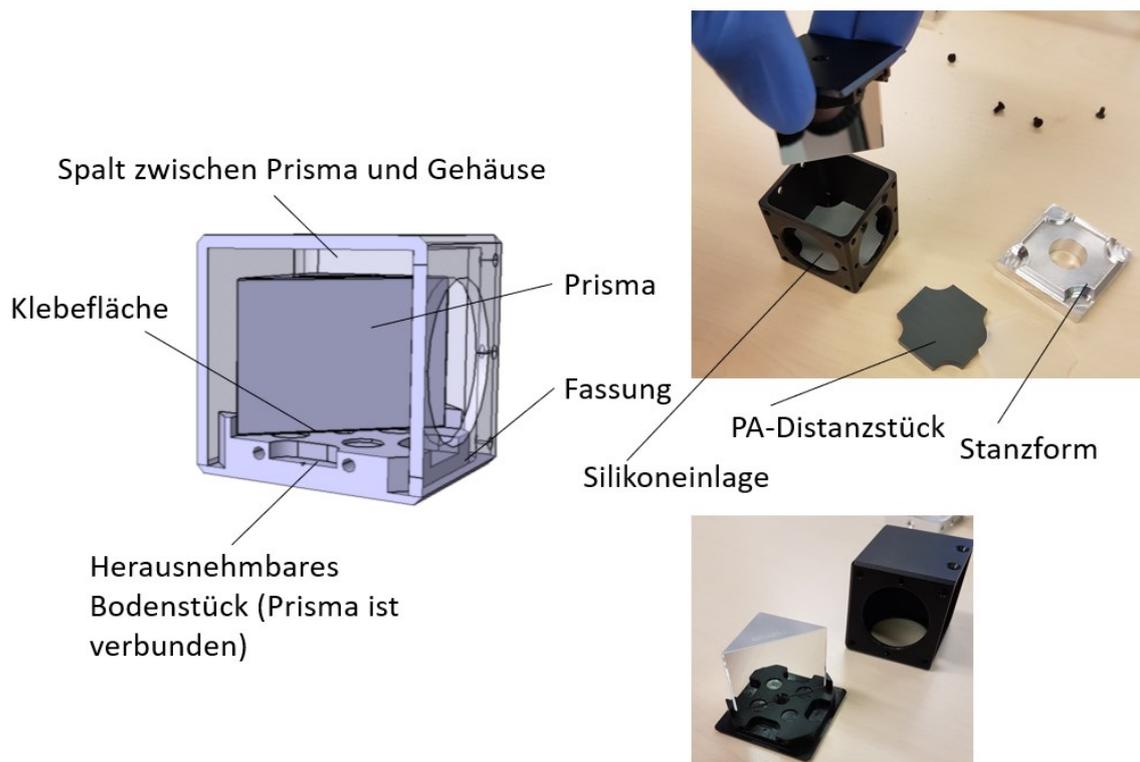


Abbildung 73: CAD Darstellung und Fotos zur Modifikation der Spiegel

Als Spiegel werden gefasste Prismen von Thorlabs (CCM1-F01/M) verwendet. Durch die Fassung bietet sich die Möglichkeit den Spiegel an benachbarte Komponenten auszurichten. Das Prisma ist in der Fassung eingeklebt und geklemmt. Aufgrund fehlender Kenntnis über die Art und Qualität der Klebung, lässt sich keine zuverlässige Aussage über die Festigkeit dieser Fügung vorhersagen. Die Spiegel werden daher zusätzlich so modifiziert, dass die Prismen formschlüssig in ihrer Fassung liegen.

Der Spalt wird mit einem Distanzstück aus Polyamid gegenüber dem Gehäuse überbrückt. Um eine Überbestimmtheit und damit eine unzulässige Verspannung des Prismas zu vermeiden, ist die Dicke des Distanzstückes 0,8 mm geringer als der Spalt. Mit einer Stanzform werden aus einer 1 mm starken Silikonmatte Stücke gleicher Abmessungen des PA-Stückes herausgetrennt und in den Spalt gelegt. Die elastischen Eigenschaften des Silikons kompensieren fertigungsbedingte Unregelmäßigkeiten und stellen einen sicheren Kontakt zum Gehäuse sicher.

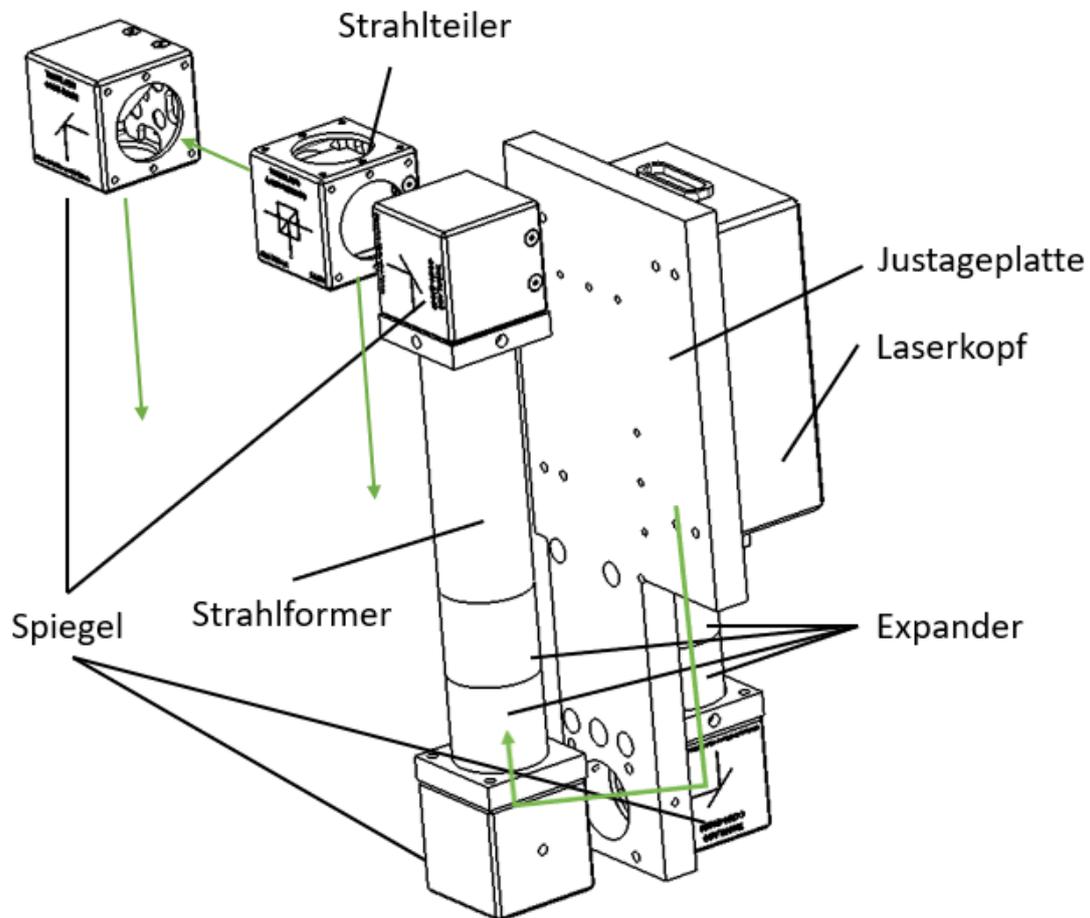


Abbildung 74: Darstellung der Baugruppen der Laseroptik

Alle Komponenten, die zur Erzeugung des fertig geformten Strahles benötigt werden, werden in eine gemeinsame Baugruppe integriert, die damit unabhängig auch außerhalb des Experiments betrieben werden kann. Zum Justieren der optischen Elemente müssen diese nach und nach, beginnend mit dem Laserkopf montiert und unter Zuhilfenahme eines Photometers vermessen werden. Der Laserkopf wird auf eine Kühlplatte verschraubt, die wiederum über Einstellschrauben in ihrer planaren Ebene als auch in der Höhe einstellbar ist. Das emittierte Licht wird in zwei miteinander verschraubte Expander eingekoppelt. Die Expanderbaugruppe lagert eingangsseitig auf einem nicht einstellbaren, fest mit der Hauptbaugruppe verbundenen Bock. Dieser Bock gibt demnach die Referenzposition zur Justage des Laserkopfes vor. Ausgangsseitig lagert die erste Expanderbaugruppe radial. Der radiale Lagerbock lässt mit seinem 0,5 mm durchmessenden Spiel in seiner Durchgangsbohrung und den vier seitlichen Madenschrauben eine konzentrische Einstellung zu. Zwei sich gegenüberstehende 45° Spiegel lenken den Strahl um 180° in die nächste Unterbaugruppe, bestehend aus zwei weiteren Expandern und dem Strahlumformer. Sie ist analog zur ersten Expanderbaugruppe gelagert und lässt sich über Gleitschienen längs verschieben. Ein abschließender Umlenkspiegel lenkt den Strahl aus der Hauptbaugruppe fertig geformt aus.

Die Strahlteilung erfolgt erst im integrierten Experiment. Ein 50/50 Strahlteiler teilt und lenkt den Strahl zum rechten Einschub, während ein dahinterliegende Umlenkspiegel den linken Einschub bestrahlt.

LED Emitter

Die Berechnungsgrundlage sowie das prinzipielle Funktionsprinzip sind in einer Vorarbeit (27) entwickelt worden. Sowohl Herstellungsverfahren der Gussformen als auch Verfahren zum Abgießen orientieren sich an dieser Arbeit.

Highpower-LEDs emittieren bezogen auf ihren Strom- und Platzbedarf relativ hohe Lichtleistungen. Die in (27) durchgeführten Untersuchungen im Labor haben jedoch gezeigt, dass ein einziger Emitter die benötigte Lichtleistung zum Treiben der aktiven Teilchen nicht aufbringt. Es werden daher mehrere Emitter benötigt, die ihre Lichtleistung auf die Fläche der zu untersuchende Zelle projizieren und gleichzeitig homogenisieren. Es ist keine erwerbbar Optik bekannt, die diese Anforderungen erfüllt.

Aufbauend auf diesem Funktionsprinzip soll die Lichtquelle kompakter, fertigungsgerechter und mit weniger Toleranzen gestaltet werden.

Die Verwendung einzelner Emitter setzt eine sehr präzise Lagerung der Einzelplatinen voraus und setzt die minimal mögliche Ausdehnung der gesamten Baugruppe fest. Platinen mit mehreren Emittlern bauen kompakter. Einzelne Kollimatoren können aber nicht in dieser Kompaktheit nebeneinander existieren. So wie die Emitter auf einer Platine Platz finden, soll auch eine Linse mit mehreren Kollimatoren hergestellt werden. In einem Schleifgang können so sieben einzelne Funktionsflächen bearbeitet werden.

Zum Herstellen dieser „Mehrfachlinse“ wird eine Gussform hergestellt. Sie wird vor dem Abgießen mit Harz mit einem Deckstück verschraubt. Eine dazwischenliegende Dichtung verhindert während des Abbindens des Harzes ein Verkleben beider Bauteile. Abdrückgewindebohrungen im Deckstück ermöglichen ein gleichmäßiges Entfernen der Linse nach Abbindung des Harzes. Die Linse ist einseitig formschlüssig mit dem Deckstück verbunden. In die Gewindebohrungen werden nun von der gegenüberliegenden Seite Stahlstifte mit Gewindezapfen eingeschraubt. An ihnen kann das Deckstück samt noch festsitzender Linse händisch geschliffen werden. Die Farbe des Schleiffilms lässt erkennen, wann und vor allem wo die Linse ihr Endmaß erreicht hat, d. h. wann die Planseite der Linse plan zur Oberfläche des Deckstücks ist.

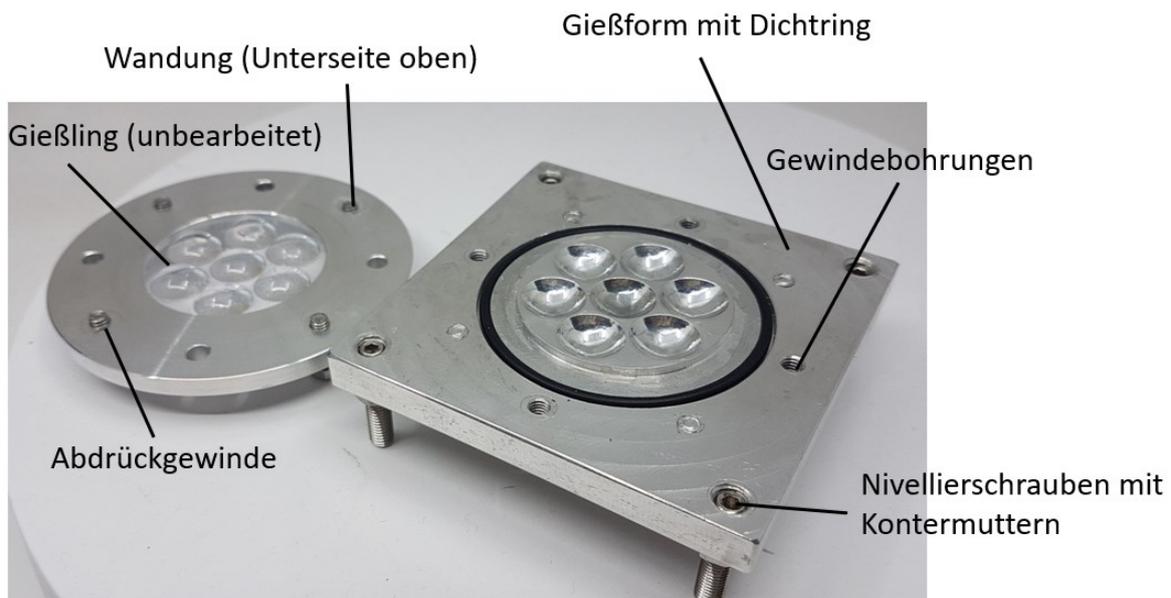


Abbildung 75: Gießform der Kollimatorlinsen

Auf analoge Weise wird auch die Sammellinse hergestellt.

Die Platine mit den LED Emittern wird auf eine Kühlplatte verschraubt. Ein Sockel nimmt die Kollimatorlinsen auf. Passstifte sichern die Linse vor einem Verdrehen. Mit dem Sockel ist der empfindlich zur Funktion erfüllende Abstand zwischen Kollimator und Emittler gewährleistet. Ein Gewintheadapter verbindet einen zwei zölligen Tubus mit der Kühlplatte. Eingesetzte Halteringe sichern die Passstifte und die beiden Linsen.

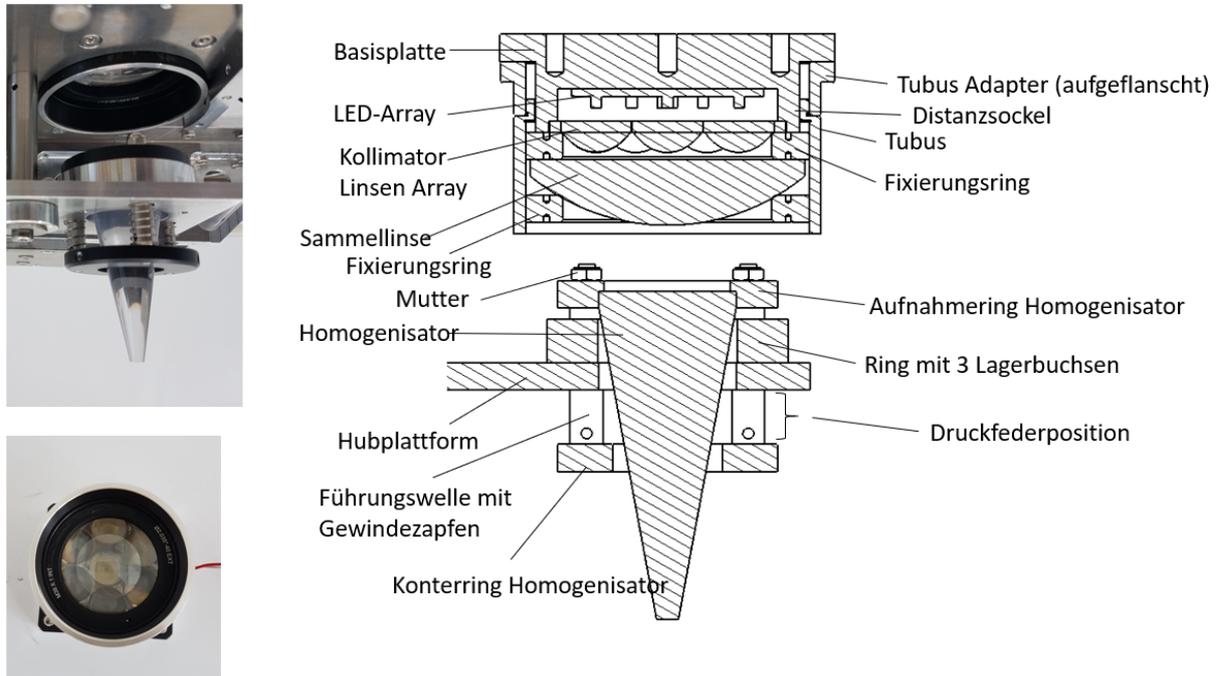


Abbildung 76: Fotos und Schnittdarstellung der LED Baugruppe

Beide LED Baugruppen werden auf eine mit Traversen verstärkte Tragplatte verschraubt, die neben ihrer tragenden Funktion auch für einen Wärmeabtransport des LEDs sorgt. Tragplatte und Traversen werden auf eine den Maßen referenzierende Platte, die Basisplatte, gesetzt. An diese Basisplatte werden die Baugruppen der Homogenisatoren angebunden. Diese müssen konzentrisch zu den LED Baugruppen liegen. Dazu werden die bereits mit ihren Bauteilen konzentrisch ausgerichteten LED Baugruppen an ihren Tuben in Aussparungen der Basisplatte gesetzt. Da die Tuben selbst keine tolerierten Außendurchmesser haben und eine Reibhale für die Durchgangsbohrungen in dieser Dimension nicht vorliegt, werden die Durchbrüche der Platte „auf Maß“ gefräst. Zum Fügen der Tuben mit der Basisplatte, wird diese erwärmt und die thermische Ausdehnung genutzt, um die Tuben einzusetzen.

Nach erfolgtem Fügen der Tuben, können die Montageschrauben der Tragplatten angezogen werden.

Wie bereits erwähnt, müssen die Homogenisatoren beim Betrieb mittels Flächenkontakt ihr Licht in die Zellen einkoppeln. Eine feste Positionierung dieser verhindert jedoch das mobile Einschieben der Küvetten. Daraus folgt die Notwendigkeit, die Homogenisatoren verfahren zu können. Gleichzeitig darf bei Anfahren der Konen bis zum Erreichen der empfindlichen Küvettenoberfläche diese nicht beschädigt werden. Die Konen werden daher federnd auf eine Verfahrplattform gelagert, die zur Referenzplatte ausgerichtet werden kann.

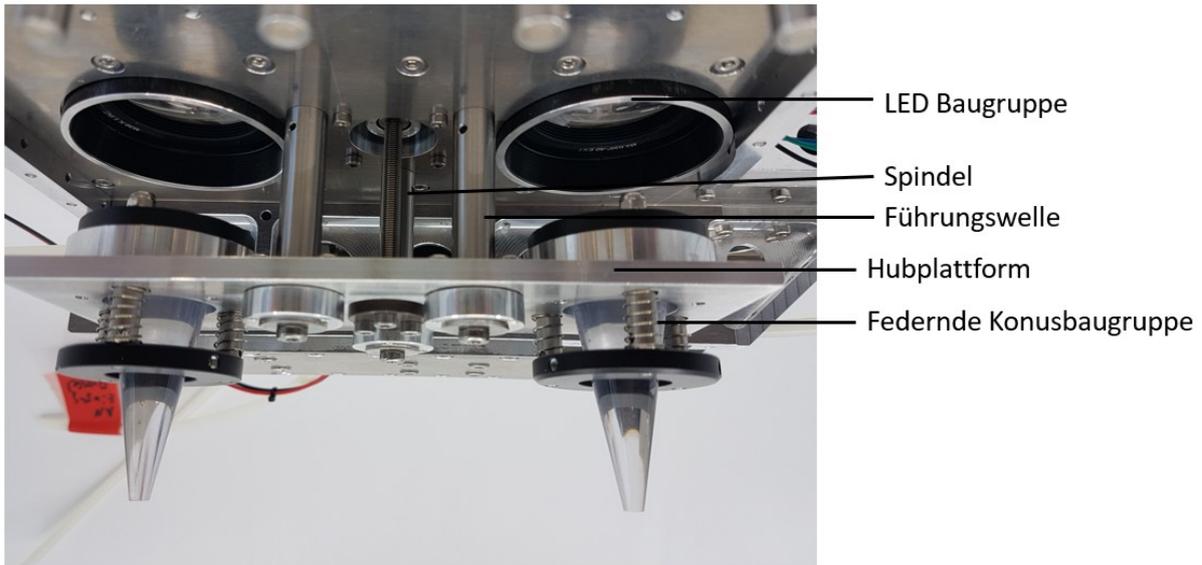


Abbildung 77: Foto der LED Baugruppe mit Verfahrmechanik der Konen

Ein Linearaktuator, bestehend aus einem Motor mit eingebauter Spindel, ist auf der Basisplatte montiert und treibt eine auf Linearwellen geführte Hubplattform mittels Spindelmuttern an. An den Linearwellen werden stirnseitig Anschlagpunkte geschraubt, um den Verfahrweg zu begrenzen. Die Konen werden über zwei mit Stahlstiften verbundene Ringe gehalten. Die Stifte dienen gleichzeitig zum Führen von Druckfedern. Je ein mit der Hubplattform fester Anbindungsring führt die Stahlstifte, sodass bei Überschreiten der unteren Position (Betriebsposition) ein maximaler Anpressdruck der Konenspitzen auf die Küvettenoberfläche nicht überschritten wird. In der angefahrenen oberen Position (Einbau und Startposition) wird der obere Ring des Konushalter gegen den Haltering der Sammellinse gedrückt, sodass die federnde Wirkung der Halterung während des Starts blockiert wird.

Zum besseren Abtransport der durch die LEDs erzeugten Wärme, werden die Kühlplatten mit Heatpipes zur Basisplatte gekoppelt.

4.5.4 Schnittstellen

Durch die Methodik, sensibel aufeinander abgestimmter Bauteile in Baugruppen zu konstruieren, lässt sich der gesamte Aufwand zur Justage und der zu tolerierenden Elemente verringern. Auch mögliche Fehlerquellen lassen sich so besser eingrenzen, indem die funktionalen Baugruppen unabhängig betrieben werden können. Die statischen mechanischen Schnittstellen werden in die Gesamtbaugruppe des Experiments eingeschraubt und sind damit auch austauschbar, um auf sich verändernde Anforderungen potentieller zukünftiger Experimente reagieren zu können. Zum Positionieren der Einschübe wurden alle Vorkehrungen getroffen, diese mechanisch reproduzierbar zu installieren. Mit der Kombination aus Aufnahmebohrung und den Zapfen an den Einschüben werden diese mit einer Verschraubung auf die Temperierungseinheit während des Late-Access montiert. Die Temperierungseinheit selbst ist nach dem einmaligen Prozess der Justage gegenüber den anderen funktionalen Baugruppen fest positioniert.

Bei den optischen Schnittstellen sind zum einen zwei freie Laserstrahlen zu erwähnen, die durch die Einstellung der Umlenkspiegel bzw. des Strahlteilers einen bereits fertig geformten Strahl zu den Küvetten mit den Einschüben leiten. Die Anbindung des durch die LEDs emittierten Lichts ist durch die Konstruktion der verfahrbaren Konen gegeben. Nach Installation der Einschübe werden die Lichtleiter über eine FC/PC Steckverbindung mit Bajonettverschluss an die in den Einschüben fest verbauten Kollimatoren angebunden.

USB-C Anschlüsse mit Schraubsicherung verbinden die Mikroskop-Kameras mit dem Speichersystem. Sie übertragen die aufgezeichneten Daten und versorgen die Kameras gleichzeitig mit Strom. Molex-Steckverbinder verbinden die Peltierelemente, den Spindelmotor und die Treiber der Pumpen zur entsprechenden D-Sub Schnittstelle des C-Moduls. Die Analog-Digital Wandler der PT1000 Sensoren werden über geschirmte Kabelstränge ebenfalls zur Elektronik-Box des C-Moduls verbunden. Alle Verbindungen sind trennbar, was eine Demontage der funktionalen Baugruppen und den Austausch zukünftiger Baugruppen unter Vorgabe der Schnittstellenspezifikation ermöglicht.

4.5.5 Speichersystem

Das Speichersystem muss in erster Linie dazu in der Lage sein, die produzierten Datenmengen zu speichern. Gleichzeitig sollen noch genügend Kapazitäten für eine Steuerung gegeben sein. Als Festplatten kommen ausschließlich Datenspeicher ohne mechanisch bewegliche Komponenten in Frage. Optische Laufwerke sind für einen Flug nicht geeignet. Neben der Datenmenge, die durch die Speicherkapazität ausgewählt wird, müssen die Schreibgeschwindigkeit der Speicherbausteine sowie deren Schnittstelle entsprechend der Datenströme ausgelegt sein.

Zur Quantifizierung der anfallenden Daten können aus dem Datenblatt der Kameras folgende Eigenschaften aufgegriffen werden.

	ACE 800-510um	ACE 2440-35um
Frequenz [Hz]	511	35
Anzahl Pixel	480.000	5.013.504
Bittiefe	10	10/12
Max. Datenstrom ψ	2,45 Gbit/s	2,1 Gbit/s

Tabella 16: Kamera Eigenschaften und Datenströme

Aus den Produkten dieser Werte lassen sich die theoretisch maximalen Datenströmen nach $\psi = f \cdot n(Px) \cdot bit(Px)$ berechnen. Die Kameras sind mit einem USB 3.0 Anschluss ausgestattet. Da jeweils zwei Kameras an einem Rechner angeschlossen werden sollen, muss darauf geachtet werden, dass diese jeweils zwei separate USB 3 Ports für die Kameras vorhanden sein müssen. Um diese Datenströme auch auf ein Speichermedium schreiben zu können, muss dieses über eine Schnittstelle angeschlossen werden, die entsprechend der Datenströme über ausreichend Kapazitäten verfügt.

Über gängige SATA III Schnittstellen können mit bis zu 4,8 Gbit/s auf SSD Platten geschrieben werden. Da aber allein schon die Datenströme der Kameras bei 4,55 Gbit/s liegen, sind vorzuhaltende Reserven stark eingeschränkt.

Bei der Verwendung einer PCI Express Schnittstelle werden wesentlich höhere Datenströme von bis zu 28 Gbit/s ermöglicht. Diese Variante zeichnet sich außerdem als eine platzsparende Variante aus.

Um einen Rechner zu bestimmen, der diese Eigenschaften erfüllt ohne dabei weitere, nicht benötigte und damit stromverbrauchende Eigenschaften zu verhindern, wird sich dafür entschieden, einen Rechner entsprechend der Anforderung zu konfigurieren. „Intel“ bieten einen solchen Konfigurator online an.

4.5.6 Zusammenfassung

In Abbildung 78 wird das Kolloidexperiment zusammenfassend dargestellt.

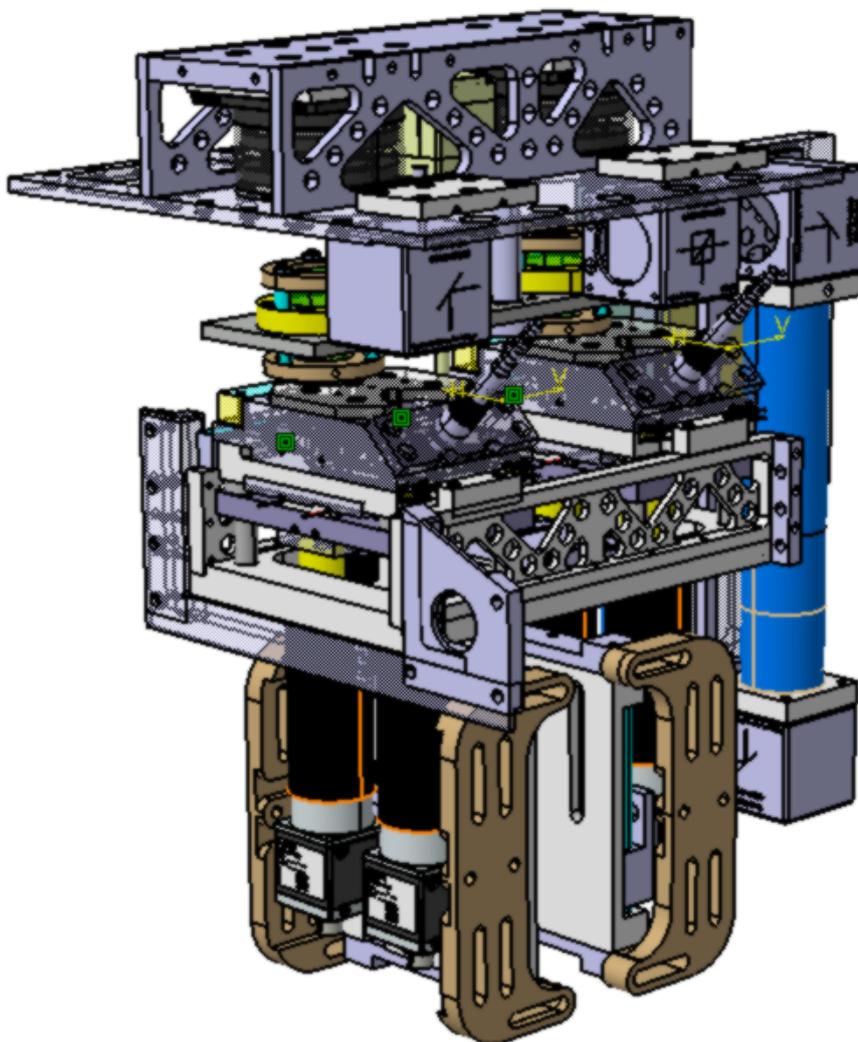


Abbildung 78: CAD Modell der Gesamtbaugruppe des kolloidalen Experimentteils

Die funktionale Baugruppe der fertig strahlgeformten Laserlichtquelle emittiert ihr Licht in ein Strahlteilende und zu den Einschüben hin umgelenkte Optikbaugruppe. Eine referenzierende Basisplatte lagert die Unterbaugruppen der durch die LEDs betriebenen Lichtquelle. Eine Verfahrmechanik erlaubt eine sichere und zerstörungsfreie Ankopplung des Lichts in die Küvettenkanäle sowie deren mobiles Einschieben. Die Einschübe selbst werden reproduzierbar

auf ein Temperierungsbett montiert und elektrisch mit der Steuerungseinheit verbunden. Einstellbare Mikroskope erlauben das Mikroskopieren der Küvetten unter Einhaltung des jeweils vorgegebenen Fokus. Zwei den Anforderungen konfigurierter Bordrechner sorgen für die Ansteuerung und Datenspeicherung des Experiments.

5 Entwicklung des granularen Experimentteils

Mit dem zweiten Experimentteil soll granulare Materie mittels Lichtstreuung untersucht werden. Abgrenzend von den zuvor beschriebenen Kolloiden liegt die Größenordnung von Granulaten über dem μm - Bereich. Die Teilchen sollen dabei durch Strömungen im Wasser angeregt werden. Zunächst sollen Gasblasen mit einer nahezu perfekten Kugelform und Teilchen in gleicher Größenordnung miteinander verglichen werden mit dem Ziel, deren Streueigenschaften zu vergleichen. Im zweiten Experiment soll die Streuung an realen festen Materialien insofern untersucht werden, um die Grenzen der Diagnostik an granularer Materie mittels Lichtstreuung näher einzugrenzen.

Wie der kolloidale Experimentteil soll auch der granulare Teil möglichst modular gestaltet werden, um auf andere Anforderungen von zukünftigen Experimenten reagieren zu können. In der hier beschriebenen Entwicklung wird eine solche Modifikation beschrieben. Dabei ändert sich die Peripherie des Experimentes nicht, lediglich die unmittelbare Probenumgebung, d. h. die Zelle sowie Anbauteile werden auf die neu gegebenen Umstände angepasst. Unter *Zelle A* wird im Folgenden das Experiment des Erstfluges auf Mapheus im Mai 2021 verstanden, *Zelle B* ist das konstruktive Ergebnis der nachfolgenden Untersuchung, die auf der nächsten Mission im Dezember 2021 geflogen ist.

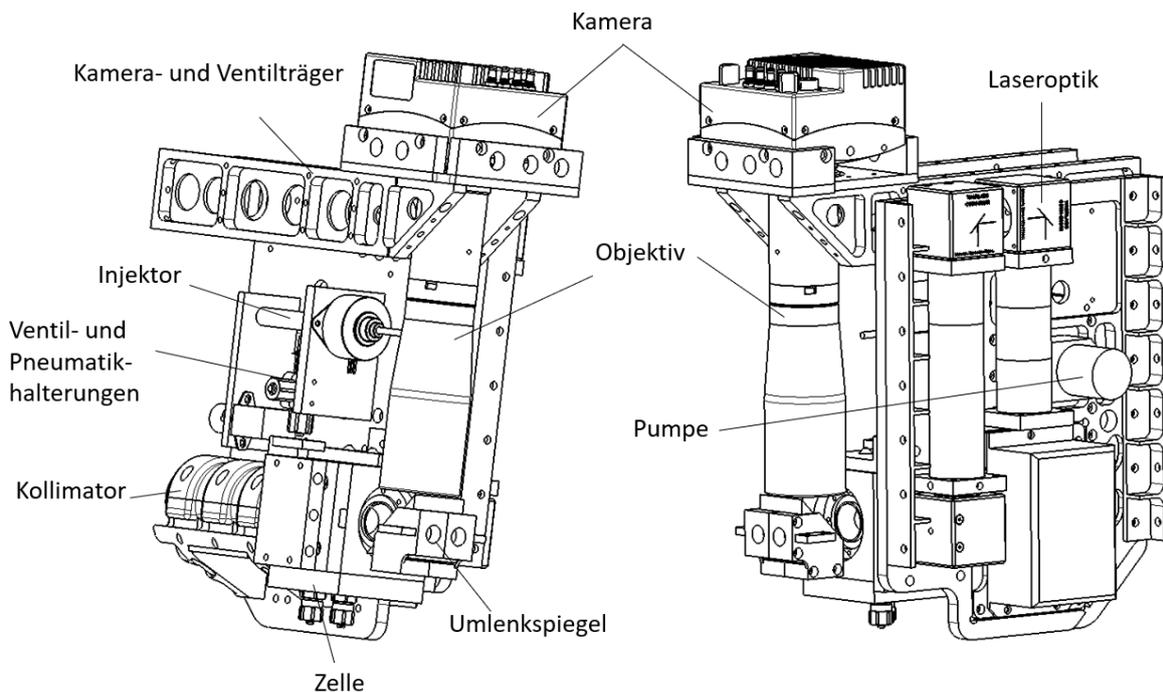


Abbildung 79: Abbildung des granularen Experimentteils

5.1 Anforderungen

Nr.	F W	Anforderung	Bemerkung
Geometrie			
G01	F	Gesamtmaße gemäß dem zur Verfügung stehenden Bauraum der permanenten Infrastruktur.	Bauraum muss mit kolloidalem Experiment geteilt werden.
G02	F	Anbindung an Stringer	Mehr Platzbedarf kann durch Anpassung der Länge der Stringer und mittleren Rumpfsektion realisiert werden.
G03	F	Laser und Kamera im 90° Winkel zueinander Belichtung und Kamera im 90° Winkel zueinander Kollimator und Laser im 90° Winkel zueinander	
G04	W	Vorzugsweise austauschbare Zelle	
Kinematik			
G05	F	Durchströmung der Zelle mit Wasser als Medium	
G06	F	Justierbarkeit von Komponenten der Laseroptiken.	
G07	F	Ein-/Ausbau der Zelle in Flugvorbereitungsphase	
G08		Einleitung von Stickstoff in die Probenzelle	
Kräfte			
G09	F	Kräfte gemäß FRP	Siehe Anforderung Modultopf und Gesamtanlage
Stoffe			
G10	F	Grundsätzliche Verwendung von Leichtbau Konstruktionswerkstoffen	Beachtung elektrochemischer Potentiale. Verwendung von verträglichen Stoffkombinationen
G11	F	Stoffe der Probe: Strömungsmedium: Wasser Teilchen: Polystyrol, PTFE, Siliziumdioxid (SiO ²)	

		Gas: N ²	
Signale			
G12	F	Signalverarbeitung zur zeitlichen Steuerung mit gegebenem Interface zum Servicemodul Redundanz durch einstellbare Timelines	
Ergonomie			
G13	F	Zugänglichkeit im integrierten Zustand zu Verbrauchsmedien: Wasser austauschbar, Gas nachfüllbar	
G14	W	Einbau der Zelle mit positionshaltender Aufnahme	
Fertigung			
G15	F	Toleranzen nach 2768-1-f	Technisch bedingte höhere Präzision mit externen Herstellern absprechen, bzw. in Zeichnungen kennzeichnen
Gebrauch			
G16	F	Volle Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb (auch ohne Rumpf)	
G17	F	Integration in Rumpf ohne Veränderung innerer Bauteile → Nach abschließendem Test ausschließlich Integration	
G18	W	Wechsel der Medien im eingebauten Zustand	
G19	F	Kontrollierte Gaseinleitung mit Volumenkompensation	
Energie			
G20	F	Hauptsächliche Energieversorgung über Schnittstelle und SOMEX C	
G21	W	Kapazität der Batterien an Verbrauch anpassen	
Kontrolle			
G22	F	Hydraulisches System auf Dichtigkeit prüfen	
G23	F	Prüfnachweise Druckbehälter	
Transport			

G29	F	Transport in der Gesamtanlage: Transportschäden sind durch geeignete Transportbehältnisse auszuschließen	
Optik			
G30	F	Auflösung Kamera: Gasblasen und Teilchen sollen in der Fokusebene sichtbar und erkennbar sein	
G31	F	Aufnahmefrequenz Kamera: Anpassung der Aufnahmefrequenz an Auflösung der Detektoren, um mögliche Phänomene mit optischer Abbildung zu vergleichen	
G32	F	Lasereigenschaften: kohärent, homogen Wellenlänge: 532 nm Leistung: Einstellbar und ausreichend für Detektion Strahlformung: Auf Zelle anpassen	
G33	F	Belichtung für Kamera: Experimentelle Erprobung und Optimierung	
G34	F	Justierbarkeit optischer Komponenten zueinander	
Sicherheit			
G35	F	Umgang mit Laser: Maßnahmen beachten	

Tabelle 17: Anforderungen an den granularen Experimentteil

5.1.1 Zelle

In Zelle A sollen Teilchen und Gasblasen entlang des diagnostizierbaren Bereiches getrieben werden, d. h. von einem zum anderen Ende durch die Zelle strömen. In Zelle B sollen die Teilchen in einem geschlossenen Kreislauf bewegt werden. Die Anforderungen an ihrem Design unterscheiden sich daher nur spezifisch in zuvor genannten Punkten.

Gemeinsame Anforderungen beider Zellen

Zur Wahl des Materials der Zellen müssen zunächst die Aspekte zur Festigkeit, Transparenz für visuelle Wellenlängen und die Inertheit gegenüber dem eingeschlossenen Medium, d. h. die Sicherstellung der Korrosionsbeständigkeit beachtet werden. Zum Trennen des LED Lichtes vom Laser muss die Möglichkeit zur Anbindung entsprechender Filter vorgesehen werden.

Spezifische Anforderungen zur Zelle A

Wie bereits erwähnt sollen die Teilchen und die Gasblasen in einer möglichst geradlinigen Bewegung durch die Zelle getrieben werden. Dies erfordert Überlegungen zur konstruktiven Gestaltung zum Einleiten des Mediums, dem Injizieren der Teilchen und der Gasblasen.

Spezifische Anforderungen zur Zelle B

In Zelle B sollen die Teilchen schon vor dem Prozessieren im zum untersuchenden Raum eingebracht und eingeschlossen sein. Bewegt werden sollen sie durch ein im Kreislauf strömendes Medium. Durch den Verzicht auf eine Gaseinleitung bedarf es keiner Vorrichtung zum Ausgleich dieses zusätzlichen Volumens.

5.1.2 Lichterzeugung und -formung für die DLS

Die Lichterzeugung zur Diagnostik der DLS unterscheidet sich von der des kolloidalen Teils nur in der Laserleistung, da das Licht in diesem Fall keine treibende Funktion der Teilchen aufweisen muss. Die Leistung muss lediglich hoch genug sein, dass das an den Teilchen gestreute Licht von den Detektoren als Signal verarbeitet werden kann. Bei einem kleineren Laserkopf müssen dann entsprechend die Expander und Strahlformer angepasst werden.

5.1.3 DLS Diagnostik

Die Diagnostik zur DLS ähnelt ebenfalls der des kolloidalen Teils. Neu bestimmt werden muss der Kollimator, da das zu untersuchende Volumen größer ist. Weiterhin soll das LED Licht zum Abbilden nicht mit in die Signalaufwertung einfließen, sodass es gefiltert werden muss.

5.1.4 Licht zum optischen Abbilden

Das Licht zum Abbilden muss über eine ausreichende Helligkeit verfügen, um ausreichend Licht für die Hochgeschwindigkeitskamera bereitzustellen. Auch die Wellenlänge muss sich von der des Lasers unterscheiden, damit eine Trennung der Lichtstrahlen über Passfilter möglich ist.

5.1.5 Baugruppen zur Speicherung und Einbringung der Teilchen

Im Fall der Zelle A werden die Teilchen erst nach Beginn der Mikrogravitationsphase in das Zellvolumen eingeleitet. Dazu bedarf es einer Vorrichtung, die dies kontrolliert umsetzt. Dabei ist auch ein externes, blasenfreies Befüllen zu berücksichtigen.

5.1.6 Baugruppen zur Speicherung und Einbringung des Gases

Wie bei den Teilchen muss auch das Gas gespeichert und eingeleitet werden. Neben der Speicherung des Gases bedarf es auch einer reproduzierbaren Methode gleichgroße Gasblasen zu erzeugen.

5.1.7 Baugruppen zum Ausgleich der Gas- und Flüssigkeitsvolumina

Beim Einleiten von Gas in ein geschlossenes System muss das eingebrachte Volumen kompensiert werden, sofern nicht der innere Systemdruck erhöht werden soll. Weiterhin ist bei einem geschlossenen aber nicht zirkulierenden System zu beachten, dass Flüssigkeiten nicht aus und in einen starren Behälter befördert werden können. Durch den Wegfall der Schwerkraft würden sich beim Rausbefördern aus einem starren Behälter die Gas- und Flüssigkeitsphase vermischen, was zu einer unkontrollierten Einbringung von Gasblasen führen würde.

5.1.8 Elemente zur Erzeugung einer treibenden Strömung

Um Gase und Flüssigkeiten zu fördern, benötigen diese naturgemäß eine Baugruppe, die diese der Anwendung angepasst treiben.

5.1.9 Zusammenfassung der abgeleiteten Anforderungen

Zelle A	<ul style="list-style-type: none"> - Durchflutung der Zelle mit Wasser - Transparenz für visuelles Licht für DLS und Abbildung, jeweils 90 ° zur Diagnostik - Anbindungsmöglichkeit für weitere Apparaturen - Installationsmöglichkeiten zur Filterung von Licht
Zelle B	<ul style="list-style-type: none"> - Wie Zelle A, jedoch keine Durchflutung. Fluid soll in der Zelle zirkulieren
Lichtquelle DLS	<ul style="list-style-type: none"> - In Anlehnung an Laserlichtquelle - Justagemöglichkeiten der optischen Komponenten
Lichtquelle optisches Abbilden	<ul style="list-style-type: none"> - Lichtquelle hoher, zu ermittelnder Intensität für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen - Wellenlänge des Lichts unterschiedlich zum Laserlicht
Injektion Teilchen	<ul style="list-style-type: none"> - Kontrollierte Einbringung der Teilchen während der μg-Phase
Injektion und Erzeugung Gasblasen	<ul style="list-style-type: none"> - Kontrollierte Erzeugung und Einbringung während der μg-Phase - Kontrollierte Ausbringung während der Flugphase
Volumenkompensation	<ul style="list-style-type: none"> - Ausgleich des Gasvolumens - Zu- und Abwasserbehausung unter μg Bedingung (nur für Zelle A)
Fluid Bewegungen	<ul style="list-style-type: none"> - Erzeugung von kontrollierter Strömung

Tabelle 18: Zusammenfassung der abgeleiteten Anforderungen

5.2 Funktionsstruktur

Mit den in Kapitel 5.1 aufgeführten Anforderungen lässt sich eine prinzipielle Funktionsstruktur aufstellen.

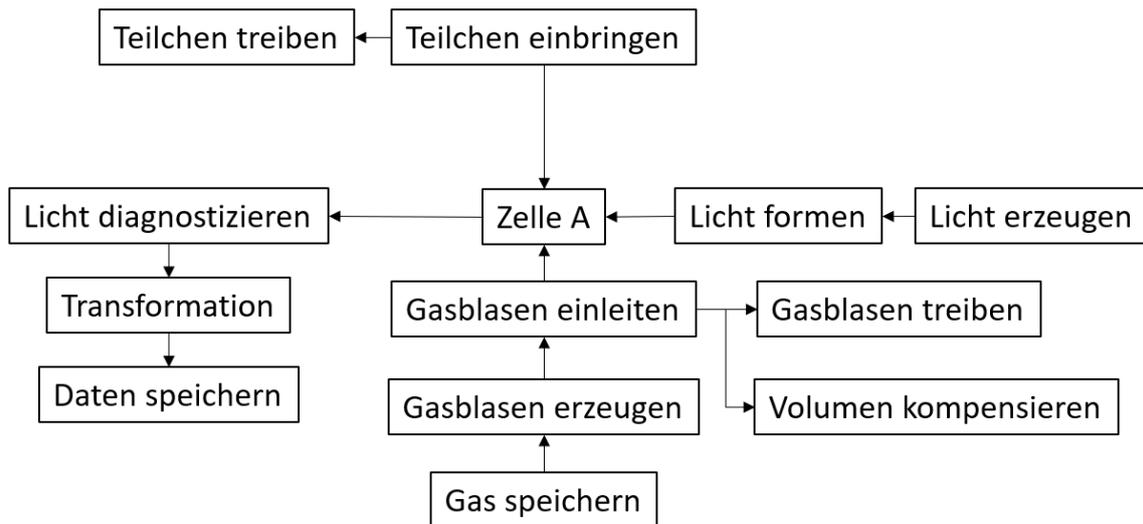


Abbildung 80: Funktionsstruktur zur Zelle A

Die Zellen haben die Funktion die im Wasser befindlichen Teilchen und die Gasblasen zu behausen und diese für die Diagnostikelemente zugänglich zu machen. Das Funktionsprinzip zur Erzeugung des Lichts für die dynamische Lichtstreuung gleicht dem des kolloidalen Experimentteils und muss hinsichtlich dem zur Verfügung stehenden Bauraums und den spezifischen Anforderungen einzelner optischer Elemente angepasst und ausgelegt werden. Zum hochfrequenten Abbilden der Bewegungen im Inneren der Zelle muss diese zusätzlich belichtet werden. Dabei sollte dieses Licht nicht die Diagnostik der DLS beeinflussen.

Um Gasblasen in vergleichbaren Größen zu den Teilchen zu erzeugen, bedarf es geeigneter Funktionselemente. Beim Einleiten von Gas in einen geschlossenen Kreislauf muss auch die Volumenkompensation beachtet werden. Insbesondere in der Anwendung unter Mikrogravitation können klassische Ausgleichbehälter nicht verwendet werden, da deren zwei Phasen sich vermischen würden.

Gasblasen und Teilchen sollen sequenziell untersucht werden. Hieraus geht die Notwendigkeit des Speicherns und Einbringens hervor.

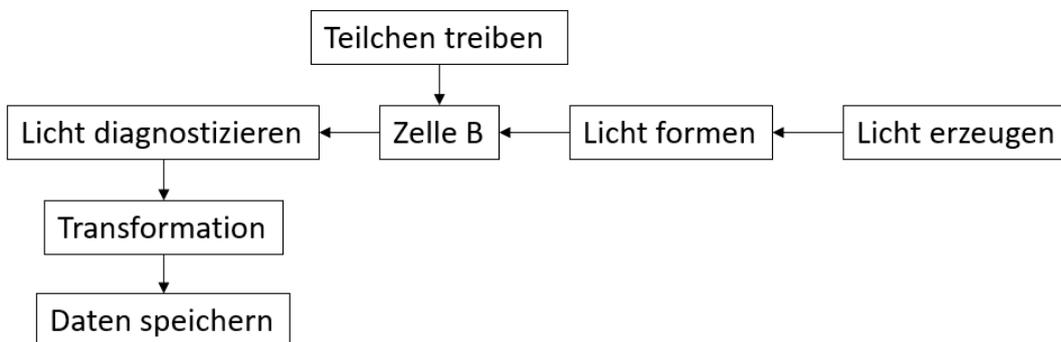


Abbildung 81: Funktionsstruktur zur Zelle B

Zelle B unterscheidet sich grundsätzlich in ihrem geschlossenen Strömungskreislauf. Dabei soll die Zelle so konstruiert sein, dass die Teilchen die Zelle nicht verlassen können und die nicht

einschbaren Volumina, wie beispielsweise hinter verdeckten Kanten, möglichst klein gehalten werden.

5.3 Morphologie

Es werden prinzipielle Lösungsmöglichkeiten betrachtet, um diese nach im späteren Verlauf zu bewerten.

5.3.1 Morphologischer Kasten

Die Maße der inneren Geometrie der Zelle wird hauptsächlich durch den effektiven Durchmesser des geformten Laserstrahls bestimmt. Sowohl Laser und Diagnostik als auch Kamera und die LED Belichtung sollen im rechten Winkel zueinanderstehen. Damit werden vier Flächen benötigt, durch die visuelles Licht transmittiert werden kann. Durchflossen kann die Zelle damit nur noch orthogonal zur Betrachtungsebene. In einer ersten Abstrahierungsstufe kann aus diesen Überlegungen ein Modell zur inneren Geometrie der Zelle erstellt werden.

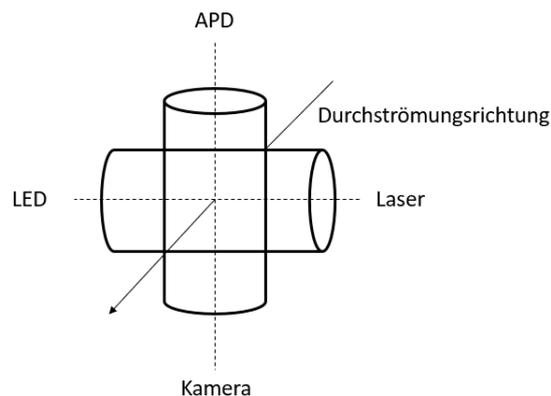


Abbildung 82: Darstellung zur Verdeutlichung des geometrischen Problems

Bei der dreidimensionalen Betrachtung wird schnell ersichtlich, dass die direkte geometrische Umsetzung Kanten und Vorsprünge bildet. Sowohl Außen- und Innenseite der transparenten Bauteile müssen plan und parallel zueinander liegen, da sie sonst optische Linsen darstellen und den Strahlengang beeinflussen würden.

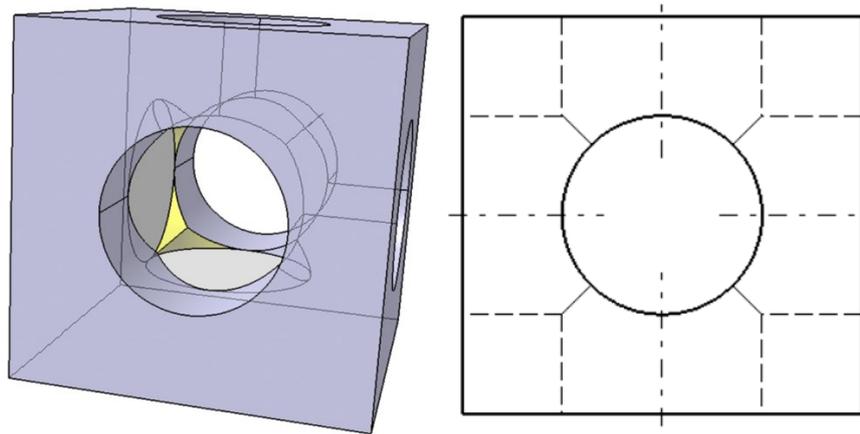


Abbildung 83: Darstellung der strömungsbeeinflussenden Kanten

Um den durchströmten Querschnitt mit möglichst wenigen Hindernissen zu gestalten, müssen die Kanten durch Radien auf eine Art ersetzt werden, dass die Vorsprünge nahtlos anschließen. Es ergibt sich eine rechteckige innere Geometrie mit abgerundeten Kanten.

Die gesamte Zelle könnte aus einem transparenten Gussteil hergestellt werden, wobei lediglich die Funktionsflächen bei Ein- und Auskopplung des Lichts plan und poliert seien. Dazu müsste einmalig die entsprechende Gussform gefertigt werden.

Auch eine Kombination von transparenten Materialien und tragenden festeren Werkstoffen ist denkbar.

Zur Erzeugung des aufbereiteten Laser Lichts müssen Vor- und Nachteile von fasergebundenen und optomechanischen Elementen freier Strahlengänge gegeneinander abgewägt werden.

Gas ließe sich durch eine chemische Reaktion erzeugen. Eine weitere Möglichkeit wäre das Verdichten der umgebenden Luft mittels eines Kompressors oder vorkomprimierte Gase in Druckbehälter mitzuführen. Durch Anheben der Temperatur des Mediums und der Verringerung des Atmosphärendrucks lassen sich Gasblasen durch Entgasung des Wassers erzeugen. Neben der Bereitstellung des Gases muss auch die kontrollierte Einleitung und Erzeugung gleich großer Blasen in der Zelle betrachtet werden. Experimentelle Untersuchungen mit Kanülen, feinmaschiger Siebe und gesinterten Materialien sollen Erkenntnisse über deren Potentiale zur reproduzierbaren Erzeugung gleichgroßer Gasblasen liefern.

Zur Kompensation des eingebrachten Gasvolumens eignen sich Membranbehälter. In einem Behältnis konstanten Volumens ist eine elastische Membran eingebracht, die unter Druckbelastung das innere Volumen vergrößert. Auch eine klassische Kolbenspritze oder Beutel würden eine Volumenänderung erlauben ohne das geschlossene System zu öffnen. Eine weitere Möglichkeit ist, dass überschüssige Volumen auslaufen und gelieren zu lassen. Alternativ zur Volumenkompensation wäre eine druckdichte Auslegung des Systems.

Partikel könnten durch eine sich öffnenden Membran oder durch eine Kanüle mit in die Zelle eingebracht werden. Alternativ wäre auch ein separater Kreislauf mit Partikel denkbar. Dieser Kreislauf könnte durch Ventile zugeschaltet werden, sodass sich die Partikelkonzentration allmählich im Untersuchungsraum erhöht. Im Gegensatz dazu könnten die Teilchen bereits im

geschlossenen System integriert aber fixiert sein. Beispielsweise könnte ein Revolver durch Drehen oder eine Siebschere durch Translation Partikel in die Strömung frei geben.

Merkmal	Varianten							
	1	2	3	4	5	6	7	
Material der Zelle	Vollständig transparent	Hybride aus tragender Struktur und transparenten Bauteilen						
		Korrosionsbeständige Legierung	Nichtkorrosionsbeständige Legierung mit Beschichtung	Transparente Kunststoffe	Glas			
Licht für Lichtstreuung bereitstellen	Fasergekoppelte Lichtführung	Freie Strahlformung						
Gas erzeugen und einleiten	chemische Reaktion	Kompressor	Druckspeicher / Gasflasche				Ausgasung des Mediums	
		Kanüle	gelochter Schlauch	Fritte	Sieb/gelochte Folie	gedruckte Gitterplatte		
Volumenkompensation	Membranbehälter	Kolbenspritze	Beutel	Gelierung	Druckbeständiger Kreislauf			
Partikel einleiten	Membrandurchbruch	Injektion mit Kanüle	Separater Kreislauf zuschalten	Injektor	In geschlossenen System integriert	Schaltbare Klappe mit Reservoir	Siebschere	
			Pumpe	Spritze		Revolver		

Tabelle 19: Morphologischer Kasten zum granularen Experimentteil

5.4 Bewertungsmatrix

Bewertung der Lösungsvarianten zum Material der Zelle

Material der Zelle	G	1		2		3		4		5		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	1	3	3	9	3	9	4	12	2	6	12
Handhabung	5	3	15	4	20	4	20	4	20	3	15	20
Kompakte Bauweise	3	4	12	4	12	4	12	4	12	4	12	12
Masse	2	4	8	2	4	2	4	3	6	2	4	8
Sicherheit	5	2	10	3	15	3	15	3	15	2	10	20
Kosten	2	1	2	1	3	2	4	4	8	2	4	8
Summe		50		63		64		73		51		80

Tabelle 20: Bewertungsmatrix zur Auswahl des Materials der Zelle

Die Gestaltung der Zelle aus einem transparenten Material birgt die Gefahr, dass Licht unkontrolliert austritt oder reflektiert wird. Weiterhin ist die Festigkeit, insbesondere bei Schraubgewinde mit der von metallischen Werkstoffen eingeschränkt.

Bei einer hybriden Gestaltung aus tragenden metallischen Werkstoffen und transparenten Funktionsbauteile erhöht sich die Anzahl der Bauteile und damit die Anzahl der Dichtflächen. Die in der Raumfahrt und auch in der hier beschriebenen Konstruktion oft verwendete Aluminium-Knetlegierung ist nicht korrosionsbeständig gegenüber Wasser. Zwar bilden die

Aluminiumlegierungen ein sauerstoffdichtes Eloxal, jedoch können sich Teile des Eloxals lösen und in das Zellvolumen eindringen, wo sie dann als Streuer ungewollt Licht reflektieren. Korrosionsbeständige Stähle bringen den Nachteil der hohen Dichte und damit Gewicht mit sich. Titan stellt bezüglich seiner Dichte einen Kompromiss dar, verlangt aber in Fertigung und Anschaffung höhere Beachtung.

Eine technische Eloxierung der Knetlegierung bietet einen ausreichenden Schutz gegenüber der Korrosion durch Wasser und lässt sich zudem auch mit Licht adsorbierenden Farben einfärben. Dabei muss darauf geachtet werden, dass bei Schraubverbindungen mindestens ein Gewinde blank bzw. nicht Eloxier wird, um die elektrische Leitfähigkeit unter den Bauteilen zu gewähren. Zur Transmission der transparenten Bauteile stellen Gläser die hochwertigste Variante dar. Durch ihre Sprödigkeit sind sie aber auch Anfällig gegenüber Stößen und nur umständlich zu bearbeiten. Beim Gießen der Bauteile mit transparenten Epoxidharzen bleibt die Gefahr von optischen Inhomogenitäten, die möglicherweise mit bloßem Auge nicht sichtbar sind. Hier bieten industriell gefertigte Kunststoffe Vorteile. Polycarbonat vergilbt nicht durch UV-Einwirkung und lässt sich durch spanende Bearbeitung formen und polieren.

Bewertung der Lösungsvarianten zur Gaserzeugung und Gaseinleitung

Gaserzeugung und Einleitung	G	1		2		3		4		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	3	9	3	9	3	9	4	12	12
Handhabung	5	2	10	4	20	4	20	4	20	20
Kompakte Bauweise	3	3	9	1	3	3	9	3	9	12
Masse	2	4	8	1	2	2	4	3	6	8
Sicherheit	5	1	5	3	15	4	20	0	0	20
Kosten	2	3	6	3	6	3	6	4	8	8
Summe		47		55		68		55 (0)		80

Table 21: Bewertungsmatrix zur Gaserzeugung

Eine chemische Gaserzeugung, beispielsweise durch Zink und Calciumcarbonat, bedingt beide Reaktionspartner voneinander zu trennen und zeitgesteuert zusammenzuführen. Eine solche Reaktion ist nicht reversibel, es bedarf also nach einer Prozessierung einen kompletten Austausch. Dafür begleitet diese Variante den Vorteil, dass keine sicherheitsrelevanten Druckbehälter mit verbaut werden müssen.

Mit einem Kompressor ließe sich die umgebende Luft verdichten und mittels Ventile in die Apparatur zur Einleitung in die Zelle bringen. Dadurch bräuchte kein zusätzliches Gas mehr mitgeführt werden. Nachteil eines Kompressors sind dessen Vibrationen, die er auf die Struktur während der Mikrogravitationsphase ausübt. Eine geeignete Lagerung kann diesen Effekt verringern.

Gasflaschen oder bedruckbare Behältnisse stellen eine robuste, leicht zugängliche aber auch schwerere Variante dar. Eine Ausgasung des Mediums erfordert im Hinblick auf kontrollierte Gasblasengrößen eine sehr genaue Kenntnis der Zustandsparameter und deren Kontrolle. Dabei spielen Temperatur des Mediums und die Methode zur Druckabsenkung der Oberfläche eine wichtige Rolle. Auch das im Wasser gelöste Gas vor der Befüllung muss bekannt sein, damit eine Ausgasung im geschlossenen System überhaupt stattfinden kann. Ein Vorteil dieser Variante zur Gaserzeugung besteht darin, dass sich das Gas auch wieder im Wasser lösen kann, womit eine Reversibilität gegeben ist.

Eine Methode zum Einleiten des Gases kann nicht gänzlich theoretisch festgelegt werden. Dazu werden Versuche mit den unterschiedlichen Methoden im Labor durchgeführt. Es zeigt sich, dass das Einleiten des Gases mit einer Kanüle sehr von der Strömungsgeschwindigkeit des Medium, die das Abreißen der Blase an der Spitze bewirkt, abhängt.

Gleiche unzureichende Wiederholgenauigkeit wird bei der Einbringung des Gases mit einer gelochten 3D gedruckten Gitterplatte und einem perforierten Schlauch erreicht. Das einzige Element, welches eine hinreichende Genauigkeit erzielt, ist eine gesinterte Fritte.

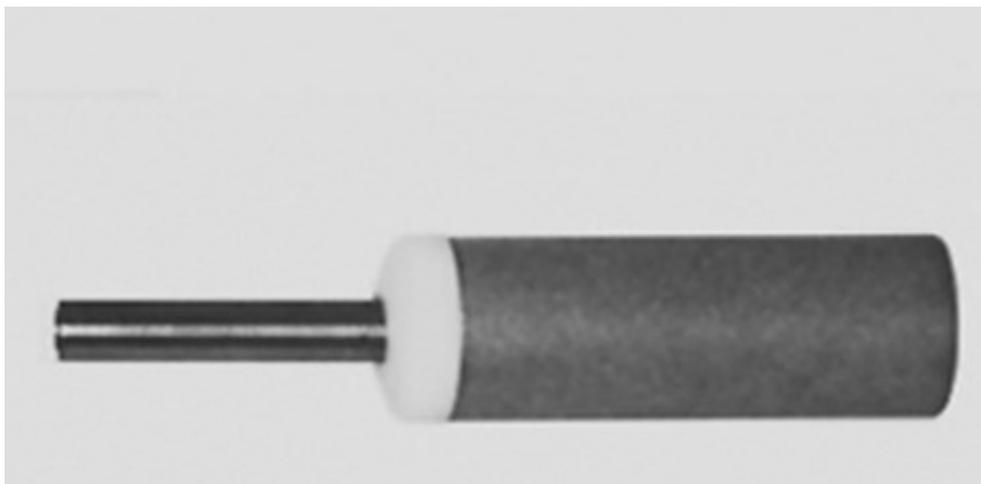


Abbildung 84: Gesinterte Edelstahlfritte

Abbildung 84 zeigt eine gesinterte Edelstahlfritte der Firma *Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.*

Bewertung der Lösungsvarianten zur Volumenkompensation

Volumen- kompensation	G	1		2		3		4		5		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	4	12	4	12	3	9	4	12	2	6	12
Handhabung	5	4	20	2	10	3	15	2	10	3	15	20
Kompakte Bauweise	3	2	6	2	6	3	9	3	9	4	12	12
Masse	2	1	2	2	4	3	6	4	8	3	6	8
Sicherheit	5	4	20	3	15	4	20	2	10	1	5	20
Kosten	2	2	4	4	8	4	8	3	6	1	2	8
Summe		64		55		67		55		46		80

Tabelle 22: Bewertungsmatrix zur Volumenkompensation

Membranbehälter weisen ein hohes Maß an Robustheit auf, in diesem Fall eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit durch Leckagen. Dagegen haben sie oft eine höhere Masse und bauen voluminöser. Ebenso die Variante mit einer Kolbenspritze benötigt mindestens den Bauraum ihres Nennvolumens unabhängig der Kolbenstellung. Bei einer Gelierung des überschüssigen Mediums bedarf es eines weiteren Ventils, das bei einem eingestellten Druck öffnet. Beutel bieten den Vorteil, dass sie kein definiertes äußeres Volumen aufweisen und das

innere Volumen variieren können. Bei der Verwendung von Beutel als Reservoir muss darauf geachtet werden, dass dieser bei Ansaugung des Mediums nicht zusammenfällt und den Ausgangsstutzen verschließt. Eine druckdichte Auslegung des geschlossenen Systems würde ebenfalls eine zweite Phase mit einem komprimierbaren Medium voraussetzen. Weiterhin müssten Anschlüsse, Kupplungen und Schläuche dafür ausgelegt werden, was einen nicht unerheblichen Mehraufwand und ein höheres Ausfallrisiko mit sich bringen würde.

Bewertung der Lösungsvarianten zum Einleiten der Partikel

Einleitung der Partikel	G	1		2		3		4		Ideal
		E	G · E	E	G · E	E	G · E	E	G · E	
Fertigung	3	3	9	3	9	2	6	2	6	12
Handhabung	5	2	10	3	15	4	20	2	10	20
Kompakte Bauweise	3	4	12	4	12	3	9	4	12	12
Masse	2	4	8	3	6	3	6	3	6	8
Sicherheit	5	1	5	2	10	3	15	1	5	20
Kosten	2	2	4	3	6	2	4	2	4	8
Summe		48		58		60		43		80

Tabella 23: Bewertungsmatrix zur Einleitung der Partikel

Eine geeignete Variante zur Einbringung der Partikel wird ebenfalls teils experimentell bestimmt. Kanülen zeigen grundsätzlich einen zu engen Querschnitt, um eine größere Anzahl von Partikeln in einer Größenordnung von zwei Millimeter durchzudrücken. Eine Zuschaltung eines separaten Systems, in dem sich die Partikel befinden bietet den Vorteil das Reservoir mit Teilchen zu bestücken, ohne das geschlossene Hauptsystem zu öffnen. Mit einem Injektor, der prinzipiell eine automatisierte Kolbenspritze darstellt, entstehen ähnliche Probleme wie bei der Variante mit Kanülen. Die Partikel verstopfen den Auslass. Abhilfe hier verschafft ein vorheriges Ansaugen von Wasser. Durch die Aspiration verteilen sich die Teilchen und vergrößern ihren Abstand untereinander derart, dass sich durch den Ausgangsquerschnitt gedrückt werden können. Der Vorgang muss mehrfach Wiederholt werden, um das Gesamtvolumen auszubringen.

Weitere Varianten, bei denen sich die Teilchen bereits im System befinden und gesteuert freigesetzt werden haben den Nachteil, dass durch die Irreversibilität nach jeder Prozessierung das gesamte System ausgebaut werden müsste.

5.6 Konstruktion

5.6.1 Zelle A

Zelle A besteht aus einem kubischen Grundkörper aus der Knetlegierung EN AW 7075. Um das Material vor Korrosion zu schützen, wird dieses nach der Fertigung Eloxiert. Ein schwarzes Eloxal soll zudem reflektierendes Licht absorbieren. Seitliche Durchbrüche nehmen transparente Scheiben aus Polycarbonat auf. Sie werden mit einem Dichtring in Ausbrüche montiert und schließen innenseitig bündig mit der Wandung ab, sodass keine Vorsprünge entstehen. Auf den planen Ober- und Unterseiten werden der Diffusor bzw. die Düse

angeflanscht. Ihre konisch zulaufende Innengeometrie verbinden Schlauchanschlüsse mit dem Zellkörper.

Zur optischen Beleuchtung wird ein LED Array in die Tasche eines Aluminiumkörpers verschraubt, sodass diese auch ohne Zelle als Kühlkörper zerstörungsfrei betrieben werden kann.

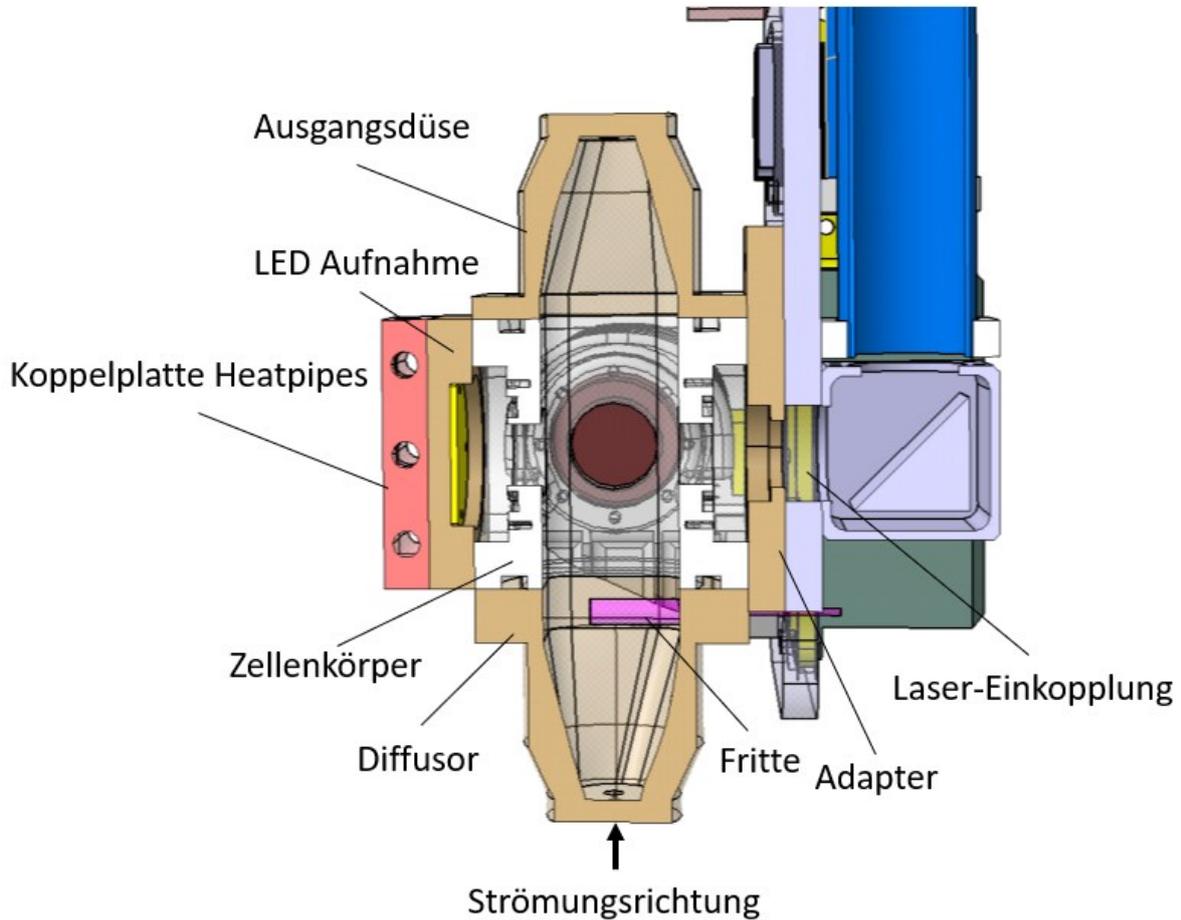


Abbildung 85: CAD Schnitt durch Zelle

Mit der Polfilteraufnahme kann die Orientierung des geklemmten Filters um 90° verstellt und arretiert werden. Zur Einstellung des angestrebten Winkels wird bei der Inbetriebnahme die gemessene Zählrate des vom Kollimator aufgefangenen Lichts verglichen.

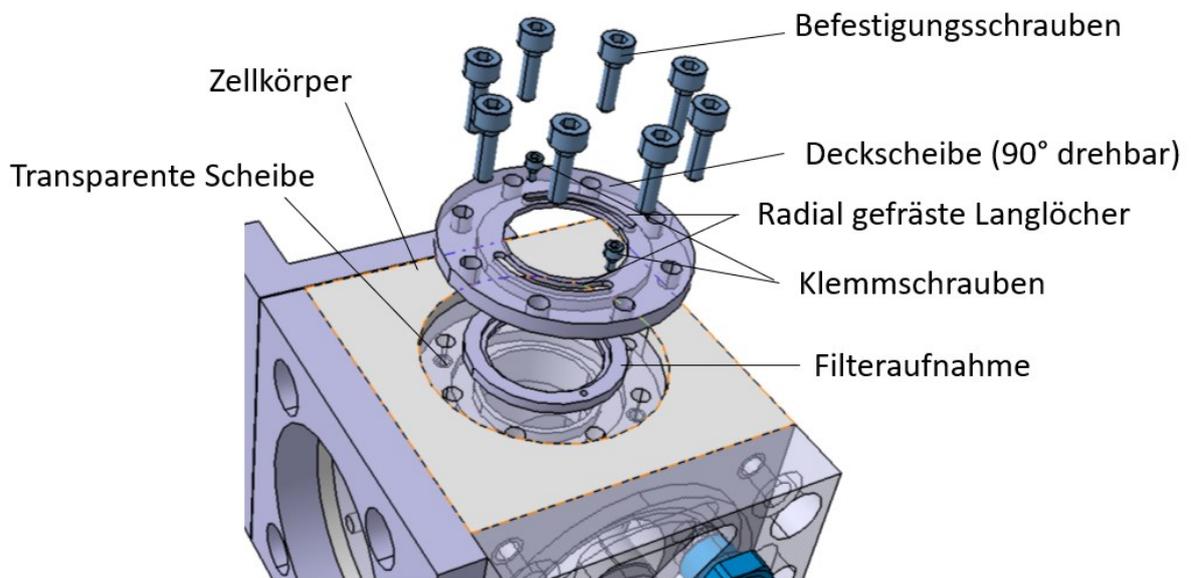


Abbildung 86: CAD Modell des verstellbaren Polfilterhalters

5.6.2 Zelle B

Bei Zelle B befinden sich sowohl Zulauf als auch Ablauf an der Unterseite. Die Oberseite ist geschlossen und wird zur Montage zweier Positionierzapfen genutzt. Mit diesen Zapfen ist es möglich, die Zelle positioniergenau gegenüber der festverbauten Diagnostikelementen zu installieren und damit die Befüllung der Zelle außerhalb durchzuführen. Im Zu- und Ablaufteil befinden sich zwei voneinander gedichteten Nuten mit Bohrungen, die einen kleineren Durchmesser aufweisen als der der Teilchen. Durch die Anschlussstücke wird das Wasser zu- bzw. abgeführt. Um unter Mikrogravitationsbedingungen ein Ansaugen der Teilchen auf eine Bohrung zu verhindern wird eine 3D-gedruckte konusförmige Kappe über die Ansaugbohrungen geschraubt. Sie verringert bei gleichem Massenstrom die Geschwindigkeit der Strömung und damit die haltende Kraft.

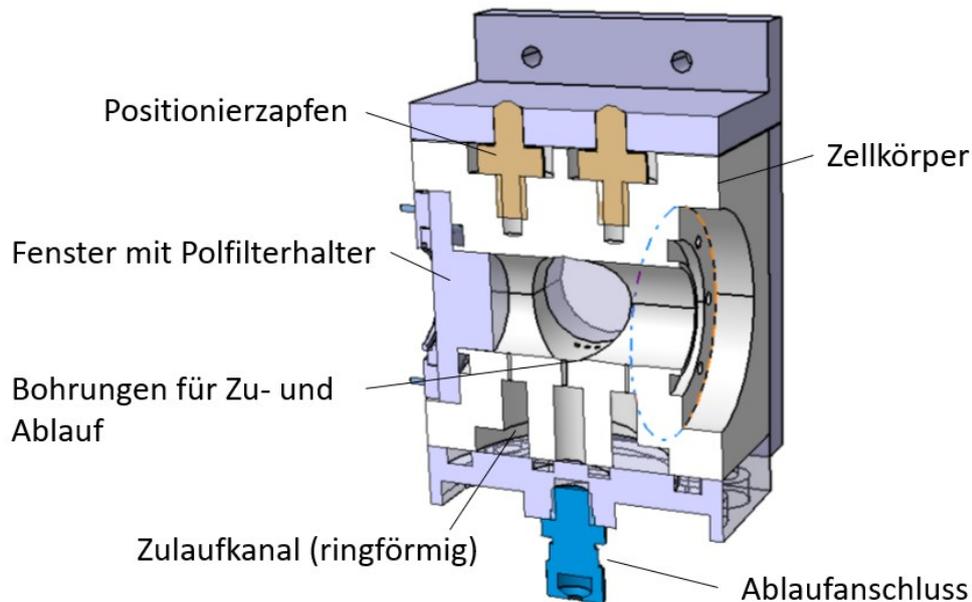


Abbildung 87: Schnitt durch das CAD Modell der Zelle B

5.6.3 Laser

Alle Komponenten, die benötigt werden, um einen fertig umgeformten Strahl zu erzeugen, werden mit ihren justierbaren Lageranbindungen auf eine Platte, im Folgenden als Laserbord bezeichnet, montiert. Damit soll erreicht werden, dass das Justieren außerhalb des Experiments ermöglicht wird. Beim Justieren muss nacheinander vorgegangen werden. Beginnend mit der Lichtquelle werden die optischen Elemente in Reihenfolge montiert und unter Zuhilfenahme eines Photometers eingestellt. Das Photometer benötigt zum Vermessen des Strahles einen definierten Arbeitsabstand von mindestens 250 mm. Dies ist nur möglich, wenn die Lichtemittierenden Baugruppen außerhalb des Experiments betrieben werden.

Der Laserkopf wird mit seinen Montagebohrungen fest auf eine Kühlplatte verschraubt. Die Kühlplatte selbst liegt in einer Tasche des Laserbords und wird mit Verstellerschrauben so fixiert, dass eine Einstellung des Winkels als auch ein orthogonales Offset einstellbar ist. Drei Expander werden in Reihe mit den herstellergegebenen Verschraubungen verbunden. Ein Lagerbock nimmt mit dem passenden Innengewinde die Eingangsseite der dreiteiligen Baugruppe auf. Die Ausgangsseite lagert den Zylinder radial, um eine statische Überbestimmtheit zu verhindern. In den vier Seiten des radialen Lagerbocks werden Madenschrauben eingesetzt, die mit dem durchmessenden Spiel des Bocks von 0,5 mm den Zylinder einstellen. Zwei darauffolgende 45 ° Spiegel lenken den Strahl um 180 ° in den nächsten Aufweiter und den damit verschraubten Expander. Diese Baugruppe ist analog zu den dreifachen Aufweiter gelagert.

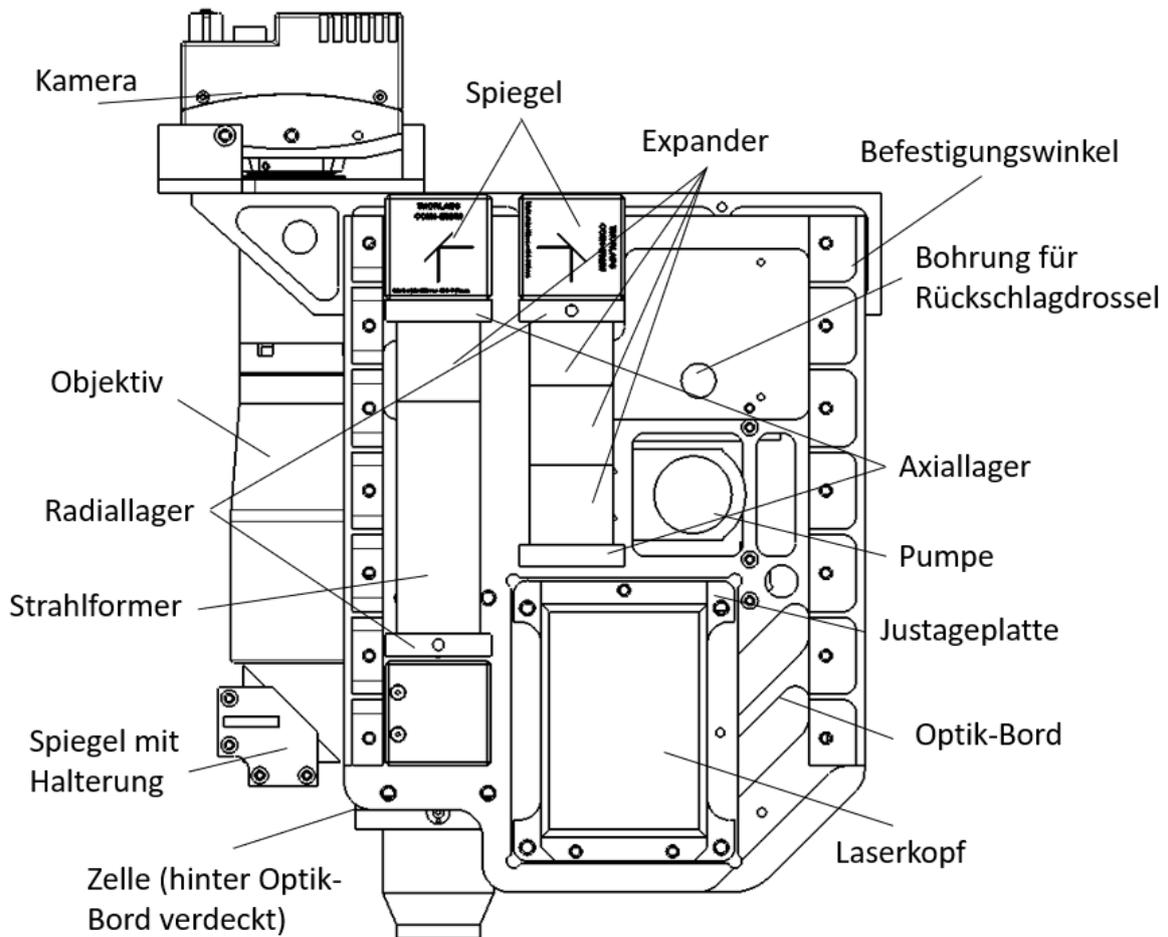


Abbildung 88: Draufsicht auf den granularen Experimentteil

5.6.4 Komponenten der Laserlichtdiagnostik

Das streuende Laserlicht wird im rechten Winkel zur Lasereinkopplung mit einem Kollimator in einen Lichtleiter gebündelt. Dieses Bauteil wird im Laborbetrieb durch optomechanischen Standardelemente geklemmt. Für den Einsatz im Flug sind diese Elemente aufgrund der nicht ausreichenden Kräfte ungeeignet. Daher wird der Kollimator zwischen zwei 3D- gedruckte Halbschalen geklemmt. In eine mittig liegende Nut wird der Bund des Gehäuses eingelegt und verhindert formschlüssig eine Positionsänderung. Die Halbschalen selbst werden mit einem Winkel am Optikbord befestigt.

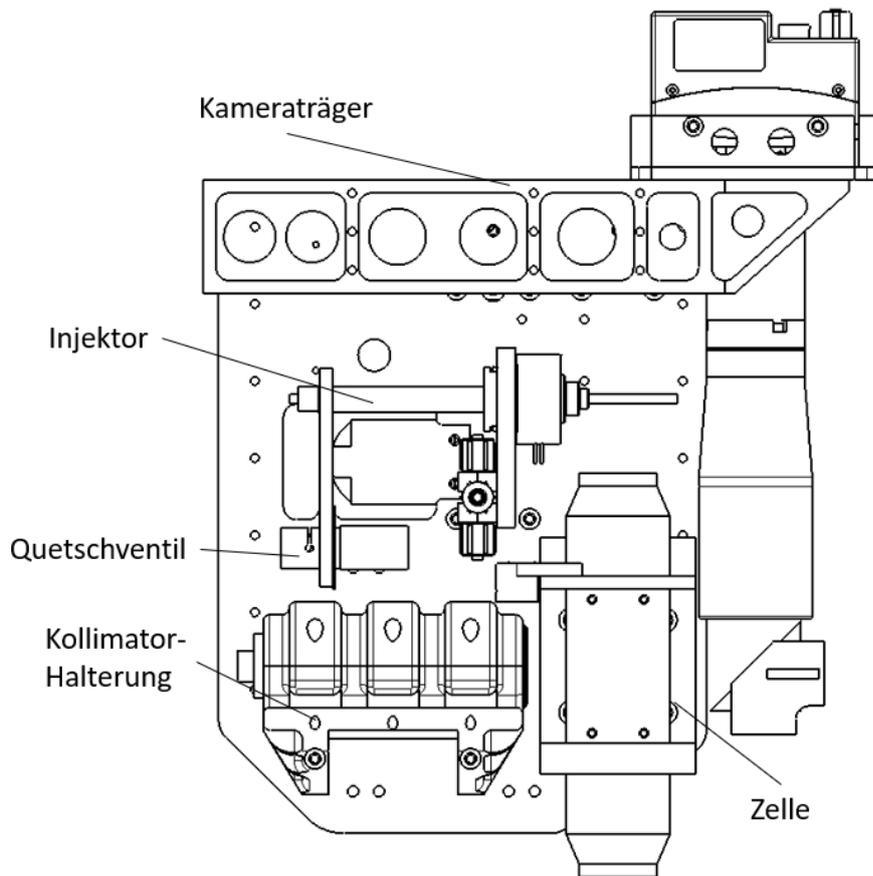


Abbildung 89: Hintersicht auf den granularen Experimentteil

Der Lichtleiter mit dem integrierten Strahlteiler wird unter Einhaltung des minimal zulässigen Biegeradius zu den APDs des C-Modul geleitet.

5.6.5 Komponenten der optischen Analyse

Wie auch die Komponenten des Laserstrahls können die Komponenten der optischen Analyse aus Platzgründen nicht in einer Achse stehen. Kamera und Objektiv werden herstellergemäß mit einer C-Mount Verbindung verschraubt. Dabei lagern zwei Traversen die Kamera. Ein gedruckter Halter lagert das Objektiv am unteren Ende radial. Über einen 45 ° Spiegel kann so der Fokus in die Mitte der Zelle gelegt werden. Das telezentrische Objektiv soll ohne Parallaxe das Bild der Teilchen auf den Sensor der Kamera abbilden, um damit unabhängig von der räumlichen Lage der Teilchen diese gleich groß abzubilden.

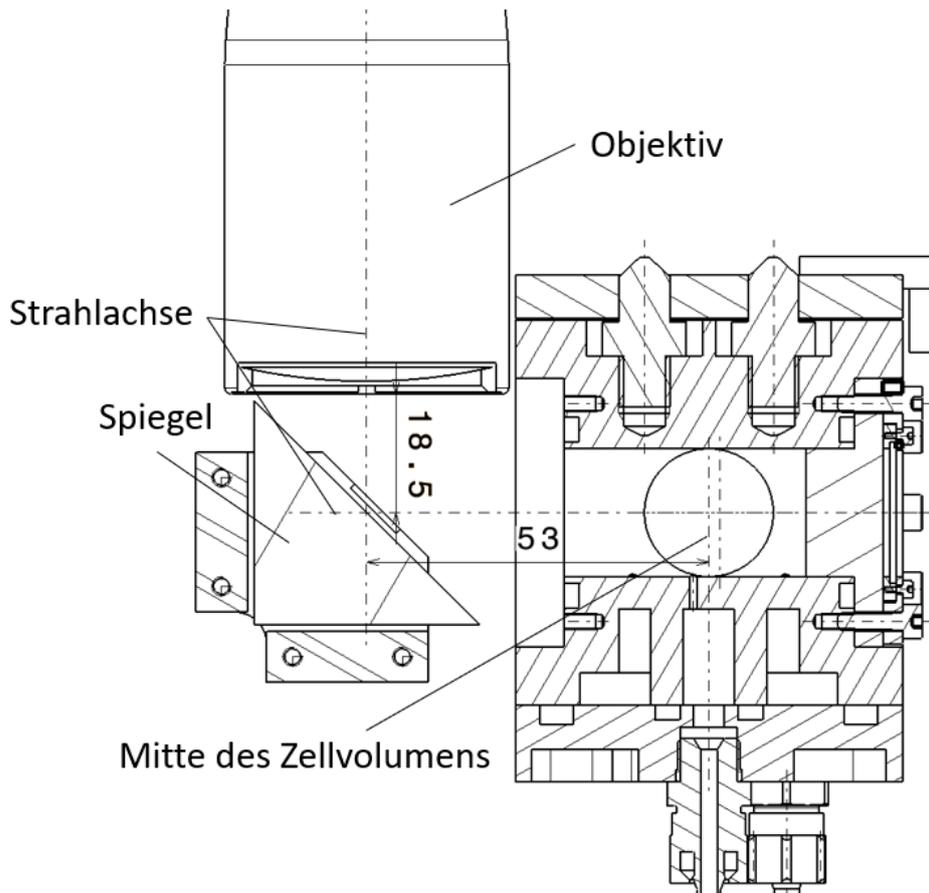


Abbildung 90: Verdeutlichung des Arbeitsabstandes des Objektivs in der Baugruppe

Das Telezentrische Objektiv TC3MHRO24-C von *Opto Engineering* hat einen Arbeitsabstand von 67,2 mm und eine Schärfentiefe von 1,8 mm. Der Bildkreisdurchmesser des Objektivs begrenzt die Maße des Spiegels und muss auf den Durchmesser des transparenten Fensters ausgewählt werden. Variabel ist dann nur noch der Abstand zwischen Objektiv und Spiegel. Dadurch lässt sich der scharf aufgelöste Tiefenbereich einstellen.



Abbildung 91: Foto von 3D gedruckter radialer Lagerung des Objektivs

5.6.6 Hydraulischer Kreis

Der hydraulische Kreis lässt sich an dem vorderen Paneel, das auch im eingebauten Zustand des Experiments zugänglich ist, mit leakagefreien Kupplungen öffnen. Zwischen Zuleitung und dem Zelleingang befindet sich eine Zahnradpumpe, die das Wasser in die Zelle leitet. Zwischen Pumpe und Zelle verbindet ein normal geschlossenes Quetschventil den Injektor. Der Zylinder einer handelsüblichen Kolbenspritze wird mit seinen Flügeln mittels einer Haltescheibe auf eine Platte geklemmt, sodass er in seinem rotierenden Freiheitsgrad eingeschränkt wird. Am anderen Ende wird er radial gelagert ohne dabei geklemmt zu werden. Der Kunststoffkolben wird durch einen Stahlkolben ausgetauscht auf dem die elastische Dichtung aufgebracht wird. Mit einer Gewindebohrung wird der Stahlkolben mit der Gewindestange eines Linearaktuators verschraubt, sodass dieser bewegt werden kann.

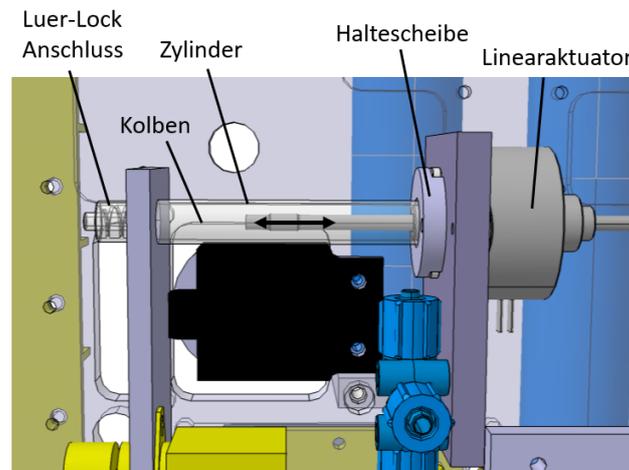


Abbildung 92: CAD Modell des Injektors

Das Quetschventil verhindert ein unkontrolliertes Eindringen der Teilchen in den Kreislauf.

5.6.7 Pneumatischer Kreis

Wie auch der hydraulische Kreis kann der pneumatische über dem Paneel an der Front des Experiments zugänglich gemacht werden. Ein Druckspeicher wird mit Stickstoff befüllt und durch ein normal geschlossenes Hubankerventil geschlossen. Über eine einstellbare Rückschlagdrossel kann bei geöffnetem Ventil der Gasstrom eingestellt werden. In die Zelle eingeleitet wird das Gas durch eine gesinterte Fritte, die im Einlauf der Zelle quer zur Strömungsrichtung angebracht ist.

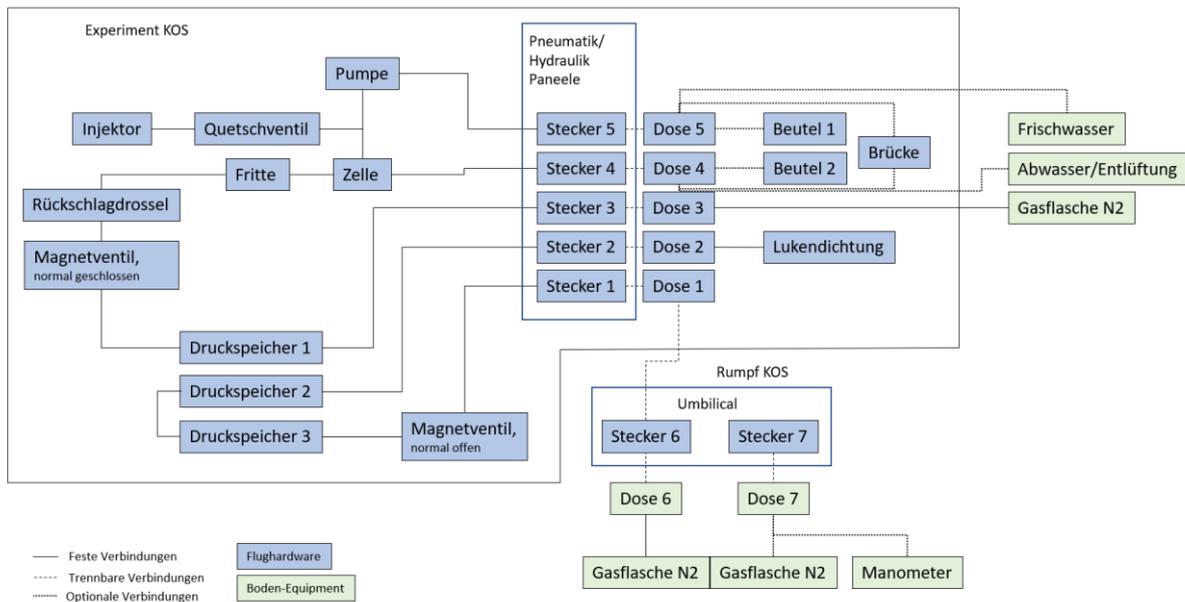


Abbildung 93: Pneumatischer Kreis

Der hydraulische Kreis kann geschlossen oder geöffnet betrieben werden. Bei Überbrückung der Zu- und Abfluss Anschlüsse am Paneel ist der Kreislauf geschlossen. Dabei ist zu beachten, dass Teilchen die Zahnräder der Pumpe beschädigen können. Ebenso das Einleiten von Gas wird zu einem nicht zulässigen Druckanstieg im Kreislauf führen, da keine Komponenten das Volumen kompensieren können. Damit keine Teilchen zur Pumpe gelangen können und ein Volumenausgleich zu schaffen, wird ein einsteckbarer Korpus mit Beuteln zugänglich an die Front des Experiments gelegt. Infusionsbeutel mit einem Nennvolumen von 150 ml werden an ihren Schläuchen so modifiziert, dass pneumatische Standardverschraubungen angebracht werden können. In den Beutel für das Frischwasser wird durch den Zulaufstutzen ein Silikonschlauch eingeklebt. Er ist entlang seiner Länge im Beutel ringsum perforiert. Damit soll verhindert werden, dass der Unterdruck beim Ansaugen den Beutel nicht zusammenfallen lässt und so die Abgabe der Flüssigkeit mindert oder sogar verhindert. Die zwei Beutel liegen in Halbschalen übereinander. Saugfähige Einlagen kleiden die Innenseiten der Halbschalen aus und verhindern bei einer Leckage das Ausdringen von Wasser. Zwischen den Halbschalen befindet sich der tragende Rahmen an dessen unteren Ende zwei Zapfen montiert sind. Diese Zapfen greifen in einen am Experiment befestigten Beschlag ein, sodass die gesamte Baugruppe durch Verschrauben der oberen Anschlagbleche befestigt werden kann. Damit ist die Wasserversorgung mobil und kann unabhängig vom gesamten Experiment vorbereitet und wenn nötig ausgetauscht werden.

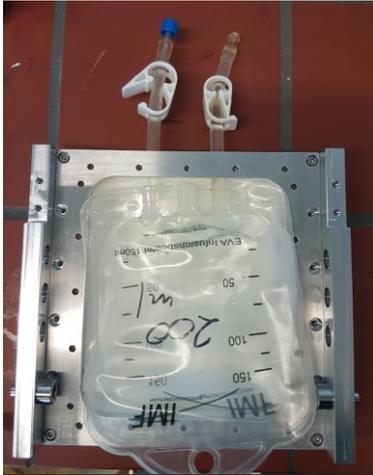


Abbildung 94: Foto des Infusionsbeutels in seinem Halter

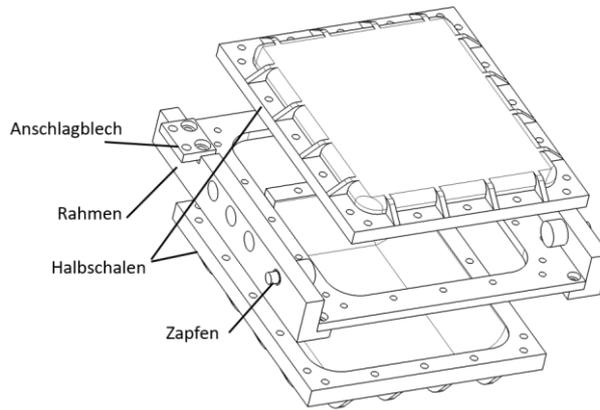


Abbildung 95: Explosionsdarstellung des Beutelträgers

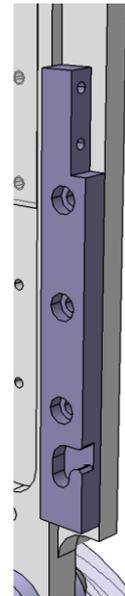


Abbildung 96: Beschlag zur Aufnahme des Beutelträgers

Die Schlauchanschlüsse liegen unmittelbar unter dem vorderen Panel.

5.6.8 Datenspeicherung

Das Speichersystem wird dem C-Modul zugeordnet, sodass deren Beschreibung bereits in Kapitel 3 erfolgte.

5.7 Zusammenfassung

Mit dem zweiten Experimentteil wurde der konstruktive Prozess zur Entwicklung eines Experiments beschrieben, das granulare Materie in einem Strömungsmedium mittels Lichtstreuung untersuchen kann. Dabei wurden zwei unterschiedliche Zellen beschrieben, die mit den gleichen Diagnostiken untersucht werden können. Die Zellen werden von einem Laserlicht, welches durch abgestimmte Optiken in die Probenumgebung gebracht wird, durchleuchtet. Eine polychromatische Lichtquelle mit einer dem Laserlicht verschiedene Wellenlänge belichtet die Probe zur Aufzeichnung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Mit einem Filter lassen sich die Lichtquellen voneinander trennen, sodass ausschließlich das Streulicht des Lasers zur Detektion in die Photodioden gelangt.

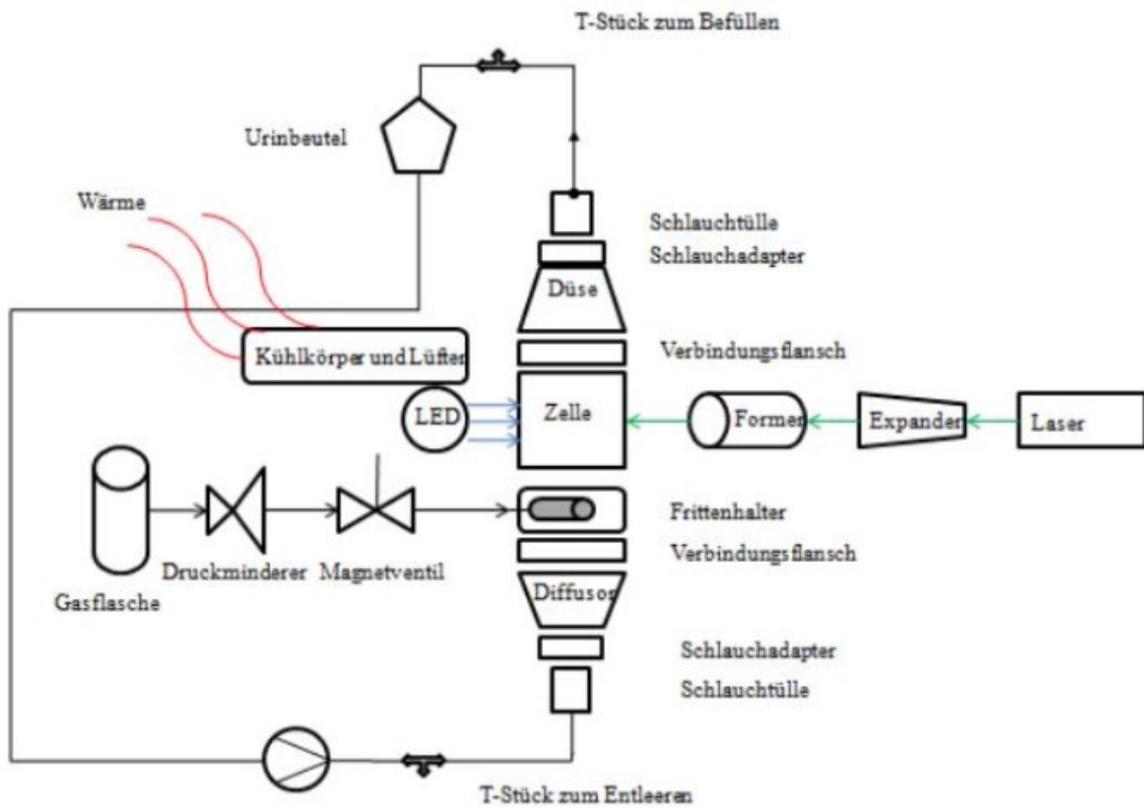


Abbildung 98: Darstellung einzelner Baugruppen in ihrer Gesamtfunktion

6 Steuerung und elektrische Schaltungen

In diesem Kapitel soll die Bedienung des Experiments erläutert werden. Ausgewählte elektrische Schaltungen werden Auszugsweise aus dem Schaltplan vorgestellt, um ein Hintergrundverständnis zur Bedienoberfläche zu erlangen.

Die Steuerung erfolgt über LabView. Die Programmierung der Experimentprozessierung soll kein zentraler Bestandteil dieser Arbeit sein. Für die beiden hier vorgestellten Experimenteile erfolgte die Programmierung zusammen mit Herrn Dr. D. Bräuer (DLR-MP).

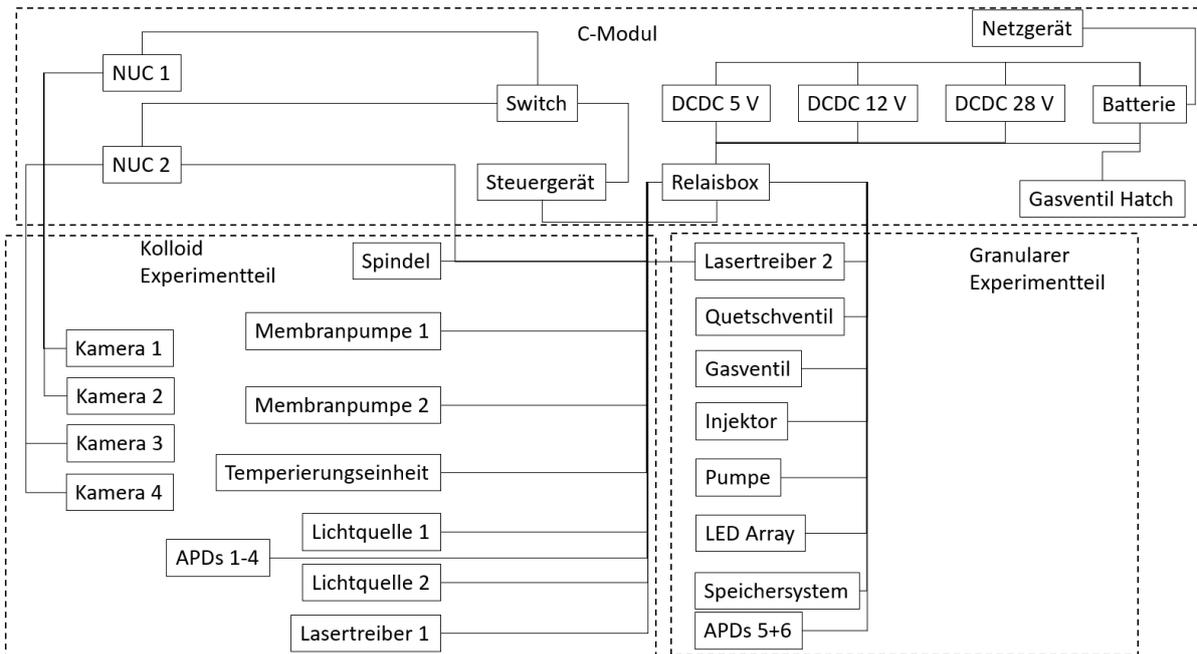


Abbildung 99: Blockdiagramm zu relevanten Komponenten zur Programmierung

6.1 Allgemeines zur Steuerung

Zur Steuerung des Experiments wird ein sogenanntes „Electronic Ground Support Equipment“ (kurz: EGSE) benötigt. Mit diesem lässt sich das Experiment einschalten, manuell bedienen und für den Flug vorbereiten. Es besteht aus einem Bodenrechner, einem Netzwerk-Switch und einem remotefähigen Netzgerät.

Der im Kontrollraum stationierte Bodenrechner ist über Ethernet mit den im Launcher befindlichen Netzgerät und Relaiskarte über einen Netzwerkswitch verbunden. Alle Geräte im Launcher werden von schaltbaren Steckdosen mit elektrischer Energie versorgt, sodass diese vom Kontrollraum aus abgeschaltet werden können.

Es gibt zwei Möglichkeiten das Experiment einzuschalten: Über das Schalten der internen Stromversorgung (SODS-Signal) oder dem Bestromen des Umbilicals mittels Netzgeräts. Letzteres sollte den Regelfall darstellen, um die Kapazität der Batterien zu schonen. Nachdem die im Launcher befindlichen Geräte durch das Anschalten der Steckdosen hochgefahren sind, lassen sich diese über die LabView Software auf dem Bodenrechner kontrollieren. Dabei wird

eine Spannung von $U = 25,6 V$ und die Strombegrenzung auf $I = 17 A$ eingestellt. An der Relaiskarte liegt nun die Versorgungsspannung an. Durch das Schalten des entsprechenden Relais wird die Versorgungsspannung an das Umbilical geleitet. Von dort aus wird die Versorgungsleitung neben einem zusätzlichen Verteilersockel auf DCDC Wandler gesplittet, mit denen entsprechende Verbraucher versorgt werden. Die beiden Bordrechner und das Steuergerät booten bei Spannungsversorgung und sind mit Netzkabel über das Umbilical mit dem Bodenrechner verbunden. Auf sie kann nun remote zugegriffen werden.

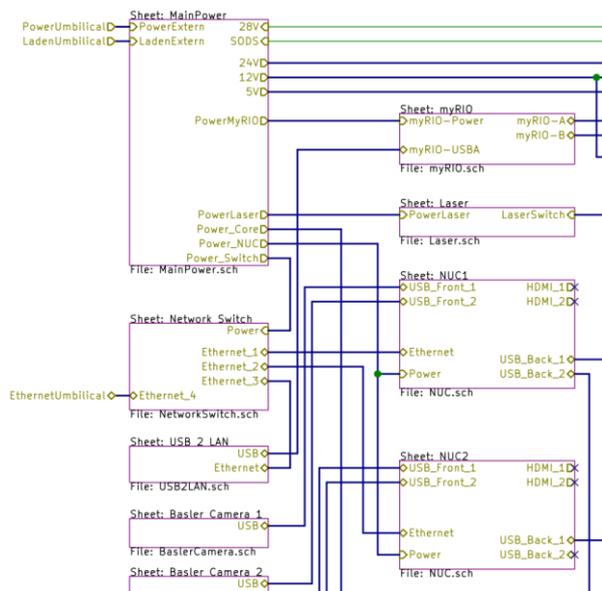


Abbildung 100: Schaltplan zur Spannungsversorgung

Beim Bestromen des Umbilicals wird ein Hubankermagnetventil aktiv geschlossen. Das Ventil trennt die Druckleitung zwischen der pneumatischen Kupplung am Umbilical und der Lukendichtung. D. h. die Lukendichtung muss bedruckt werden, bevor die elektrischen Systeme angeschaltet werden. Umgekehrt lässt sich das Ventil und damit auch die Luke nur öffnen, wenn das Experiment spannungsfrei bzw. abgeschaltet ist.

Analog zum Einschaltvorgang, lassen sich die Batterien laden. Beim ausgeschalteten Experiment wird die Spannung des Netzgerätes auf $U = 29,5 V$ mit einem Ladestrom $I = 5 A$ eingestellt und das Relais im Stromkreis zur Ladebuchse des Umbilicals geschlossen. Im ausgebauten Zustand können optional Balancer Module an die Batterien angeschlossen werden, um dem Driften der Einzelzellen bei öfters wiederholten Ladevorgängen entgegenzuwirken.

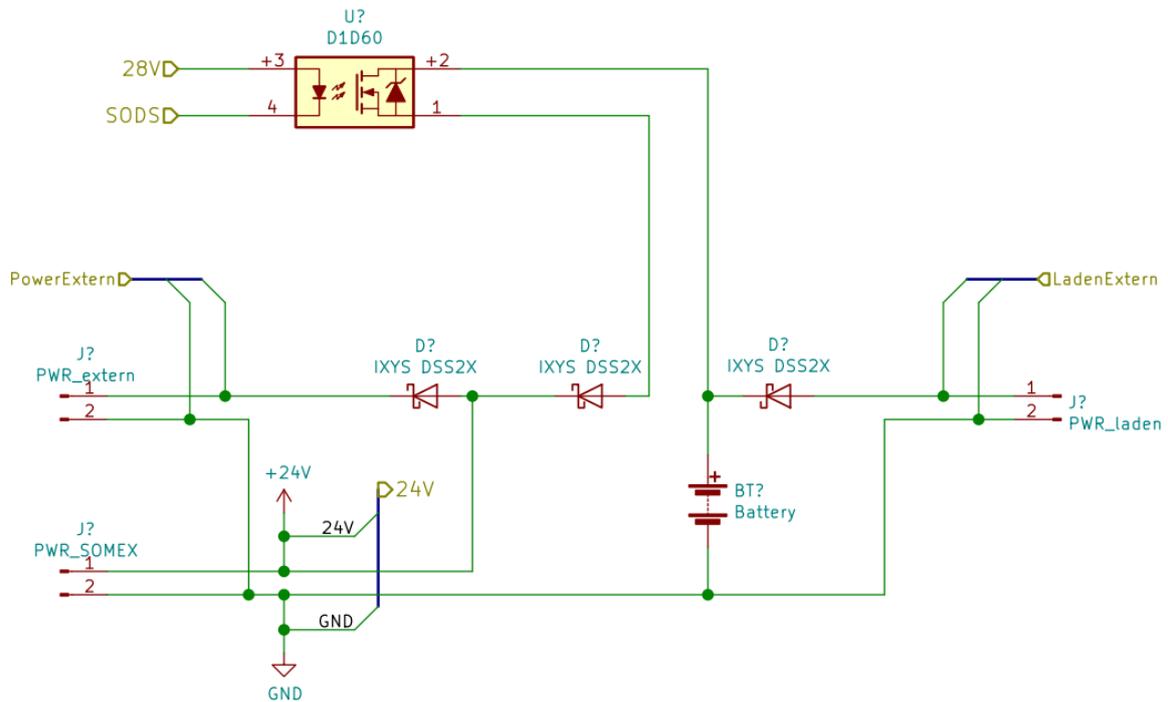


Abbildung 101: Verschaltung der Lade- und Betriebselektrik

Dioden verhindern, dass bei Laden der Batterie das Experiment eingeschaltet wird. So gibt es einen Ladestromkreis und einen Betriebsstromkreis. Über der Diode fallen 0,7 V ab. Dieser Spannungsabfall muss beim Laden der Zellen auf die Ladeschlussspannung hinzuaddiert werden.

6.2 Bedienoberfläche des Steuergeräts

Nach dem Einschalten des Experiments lässt sich die LabView Software öffnen. Die Bedienoberfläche des Steuergeräts gliedert sich in drei Bereiche: Einen allgemeinen Teil und die für die Steuerung der einzelnen Experimente.

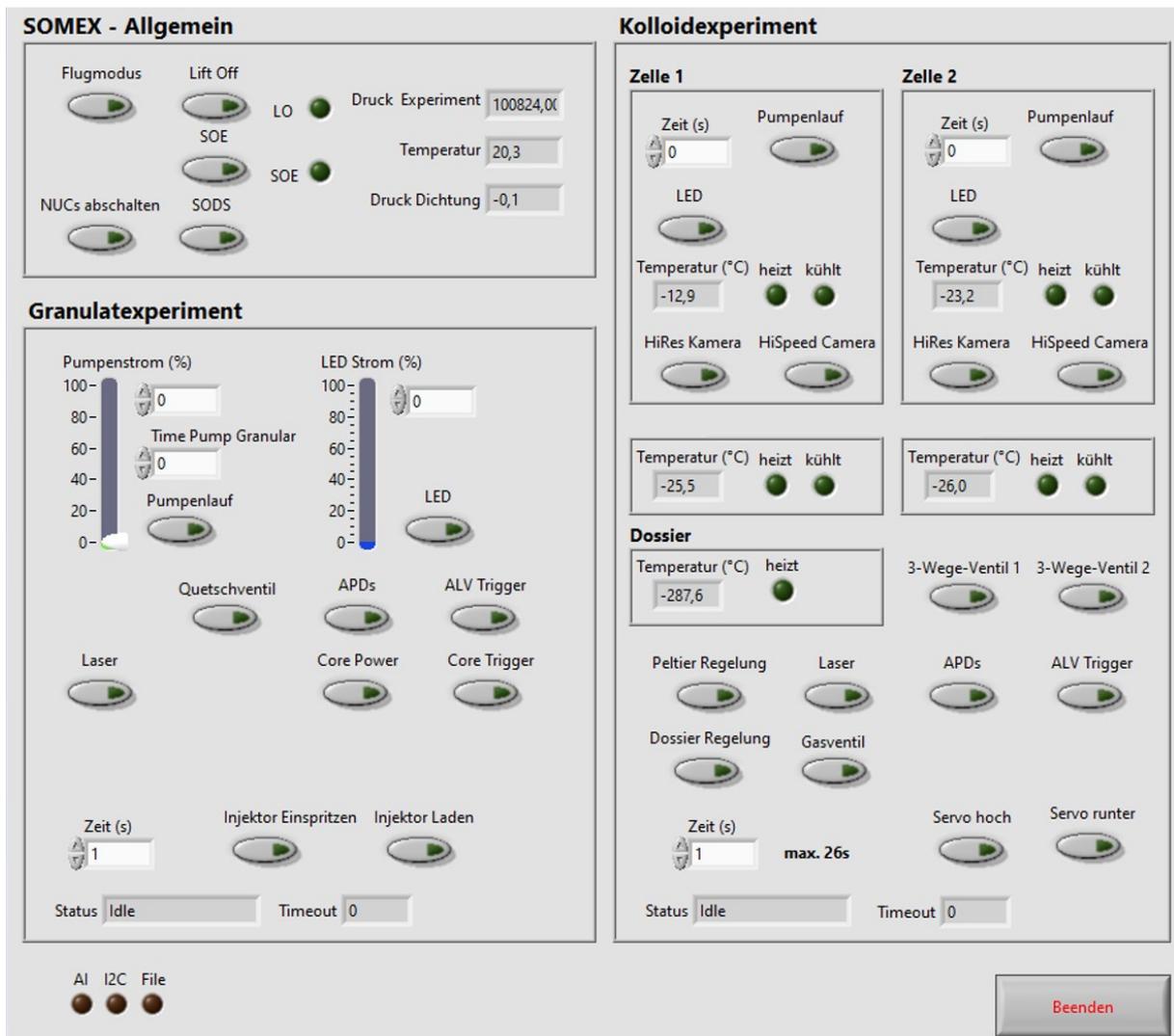


Abbildung 102: Bedienoberfläche am Bodenrechner zum manuellen Schalten der Komponenten

6.2.1 Allgemeiner Teil des Steuergeräts

Im allgemeinen Teil werden die von einem BMP180, ein Druck- und Temperatursensor, gemessenen Daten angezeigt und während des gesamten Betriebs in einer Log-Datei mit einem Herz gespeichert. Die Bedeutsamkeit dieser beiden Werte wird in Kapitel 8 näher behandelt. Ein weiterer Drucksensor misst den Relativdruck in der Lukendichtung. Eine Leckage kann so während des Count Downs entdeckt werden.

Jeweils ein Indikator für die LO und SOE Signale zeigen, ob diese Signale vom Servicemodul das Steuergerät erreichen. Bei nicht aktiviertem Flugmodus lösen die Signale keine Reaktion aus, sodass ein Signaltest nicht mit einer Prozessierung der Proben verbunden werden muss. Bei aktiviertem Flugmodus wird durch manuelle Betätigung der LO Taste ein Timeout ausgelöst, bis sich entweder das System selbst ein SOE Signal setzt oder dieses vorzeitig durch Drücken der SOE Taste auslöst. SOE soll in der Flugphase zum Beginn der Mikrogravitation die Experimentsequenzen starten, sodass die Timeouts der Aufstiegsphase entsprechend angepasst sind. Mit SODS wird das interne Hauptlast Relais durchgeschaltet und das Experiment wird mit Batteriespannung versorgt. Damit sind alle Signale redundant ausgelegt, selbst wenn das Service Modul der Rakete Events nicht mehr weiterleitet. Mit einer weiteren

Taste lassen sich die Bordrechner automatisch herunterfahren ohne diese per Remote zu bedienen.

6.2.2 Granulatexperiment

Im granularen Teil findet sich zunächst ein Regler mit dem der Eingangsstrom der verbauten Kraftstoffpumpe eingestellt werden kann. Im Eingabebereich kann die Laufzeit, mit der die Pumpe laufen soll, eingestellt werden. Ebenso die LED Beleuchtung an der Zelle kann in ihrer Helligkeit der Belichtungszeit der Kamera angepasst werden. Durch das drücken der Laser-Taste wird der Remotekanal des Lasertreibers aktiviert. Dieser wurde vorher in OEM Konfiguration versetzt, sodass der Interlock deaktiviert ist. Einstellungen der Laserparameter wie Leistung und Vorwärmzeit können beim granularen Teil nur über direkten Anschluss des Treibers an einen PC mit entsprechender Software verändert werden. Zwischen Injektor und Zelle trennt ein Quetschventil die Zuleitung, um ungewolltes Einbringen von Partikeln zu verhindern. Dieses lässt sich durch Schalten eines Relais manuell öffnen. Ebenso die APDs und das Speichersystem können manuell zugeschaltet werden, um bei längeren Wartezeiten elektrische Verbraucher dem Thermalhaushalt anzupassen. Mit dem ALV Trigger kann manuell separat die Sequenz der ALV Software gestartet werden ohne das gesamte Experiment mit einem SOE Signal in den Prozessmodus zu versetzen. Analoges gilt für die Datenspeicherung im IO Core. Zum Laden des Injektors wird dieser mit einem Schrittmotor aufgezogen. Dazu lässt sich die Zeit des Verfahrens, d. h. das Ladevolumen einstellen. Im unteren Feld werden der aktuelle Status der Programmschleife und das dazugehörigen Timeout angezeigt.

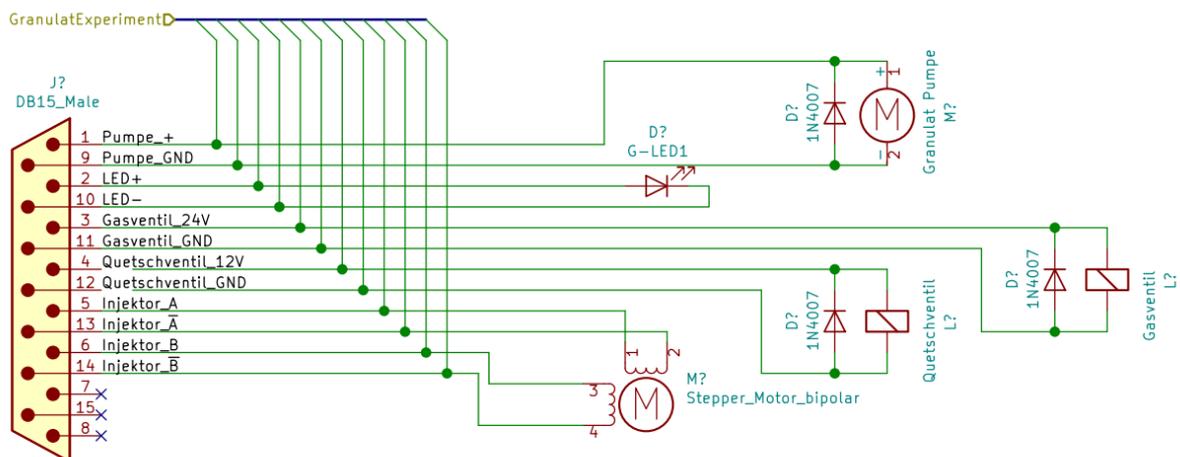


Abbildung 103: Elektrische Schnittstelle zum granularen Experimentteil

6.2.3 Kolloidexperiment

Die Einschübe des kolloidalen Teils sind in der Bedienoberfläche als Zelle 1 und Zelle 2 betitelt und gleich aufgebaut. Die Membranpumpen lassen sich in einem einstellbaren Zeitintervall aktivieren. Dabei versorgen die an den Einschüben montierten Treiber die Piezopumpen mit der eingestellten Spannung $U_{P-P} = 120 V$. Als einer der größeren elektrischen Verbraucher können die LED Treiblichtquellen separat geschaltet werden. Dabei schaltet ein Relais den dazugehörigen LED Treiber. Er ist über dem Dimm-Pin fest eingestellt und kann in diesem Fall die Lichtleistung nicht variieren. Vor dem Start müssen die Konen in die Startposition gefahren

werden, um zum einen das Einbauen der Einschübe zu ermöglichen und um die Küvetten während der Startphase nicht zu beschädigen. Dazu fährt ein Spindelmotor in hier einstellbarer Zeit die Plattform mit den Konen auf ihre Position.

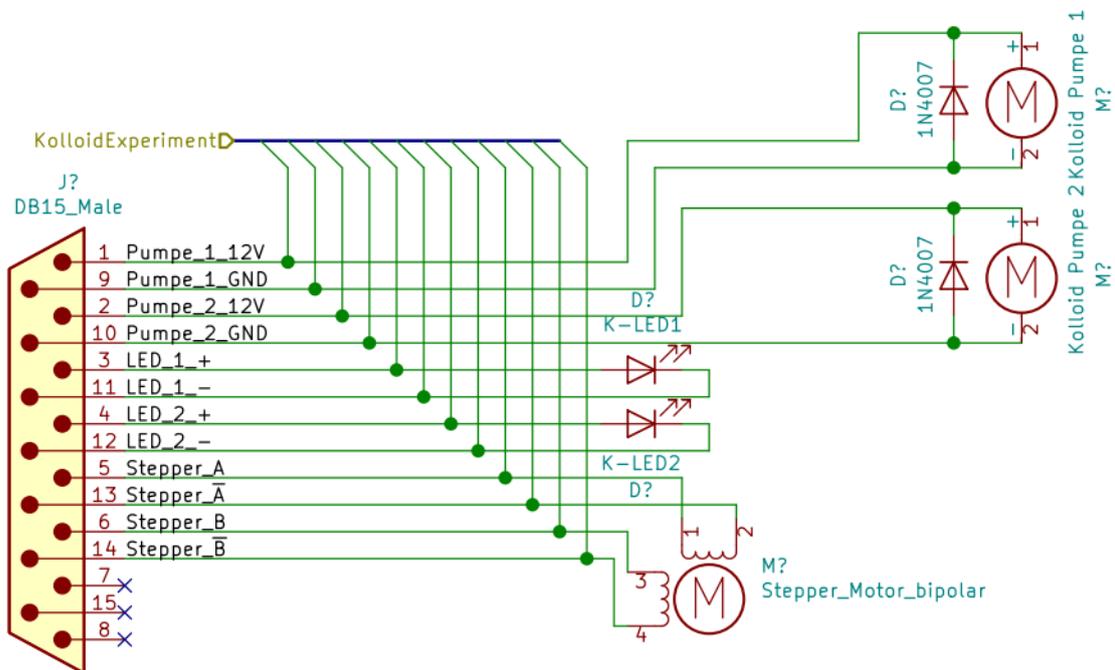


Abbildung 104: Elektrische Schnittstelle zum kolloidalen Experimentteil

Nach dem Einbau der Einschübe werden diese an die Temperatursensorleitungen angeschlossen. Die PT1000 Sensoren übermitteln ihre Messwerte an das Steuergerät, welches dann zur Regelung der eingestellten Zieltemperatur die Peltierelemente in entsprechender Stromrichtung schaltet. Ist der Stecker nicht an die Sensoren angeschlossen, wie im abgebildeten Fall, werden unrealistische Werte angezeigt. Es ist daher wichtig, dass die Temperaturregelung abgeschaltet werden kann, da sonst permanent geheizt bzw. gekühlt werden würde. Indikatoren zeigen den aktuellen Status an, ob das Steuergerät die Relais zur Kühl- oder Wärmefunktion schaltet, nicht jedoch den tatsächlichen Status dieser Funktionen. Damit sind die Indikatoren kein ausreichendes Anzeichen für eine funktionierende Temperaturregelung. Vielmehr muss bei der Funktionsüberprüfung auf eine gleichmäßige Temperaturveränderung bis auf Zieltemperatur geachtet werden.

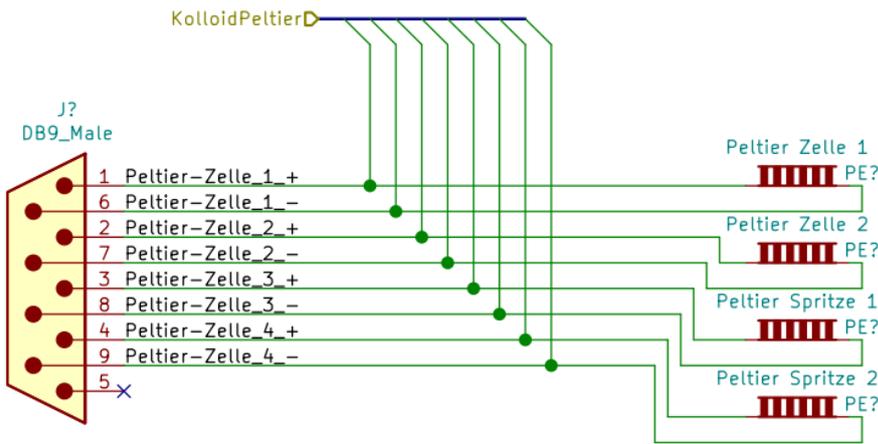


Abbildung 105: Elektrische Schnittstelle zur Temperierungseinheit

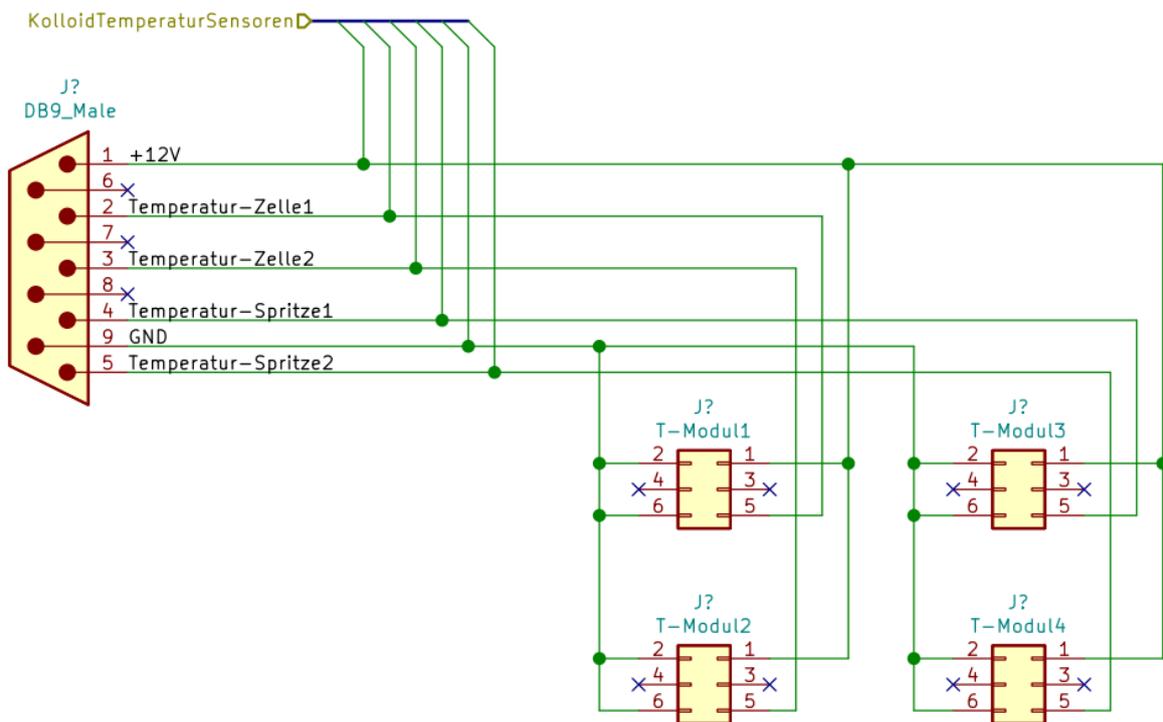


Abbildung 106: Schnittstelle der Temperatursensoren

Die Kameras der Mikroskope können wie die ALV Software einzeln getriggert werden. Das Gasventil zur Einleitung des Stickstoffs wie auch die APDs können bei Bedarf manuell geschaltet werden.

Um die Laserleistung bei kolloidalen Proben mit unterschiedlichen Konzentrationen zu variieren, wird der Laser nicht wie im granularen Teil mit festen Parametern eingeschaltet. Mit dem aktivieren der Laser Taste wird lediglich der Treiber angeschaltet. Der Treiber selbst ist mit einem der Bordrechner verbunden, sodass über die Software Oberfläche die Leistungsparameter eingestellt und ein Interlock aktiviert wird. Abbildung 102 zeigt im Vorgriff schon die erweiterten Funktionen für ein Nachfolgeprojekt, welches zusätzliche Wegeventile und eine weitere Temperierungseinheit beinhalten.

6.3 Automatik im Flugmodus

Während des Fluges finden keine manuellen Steuerungen statt. Damit das Experiment die eingestellte Flugsequenz abarbeitet, muss zuvor in den Flugmodus gewechselt werden. Manche Verbraucher wie beispielsweise die LED Treiblichtquellen benötigen für eine hinreichend fluktuationsfreie Emission ihre Betriebstemperatur und müssen wenige Minuten vor Start manuell angeschaltet werden. Mit dem LO Signal werden alle für den Flug benötigten Verbraucher nochmals automatisch aktiviert, sodass bei Vergessen ein Totalversagen ausgeschlossen werden kann. Nach Ablauf des LO Timeouts oder nach Anliegen des SOE Signals durch das Servicemodul wird die Experimentsequenz gestartet.

Beim kollidalen Teil werden die Konen heruntergefahren. Währenddessen werden die Suspensionen durch die Piezopumpen nochmals im Kreislauf gepumpt, bis die Endposition der Konen angefahren wurde. Die Kameras laufen derweil mit ihren voreingestellten Parametern und zeichnen bis zum Ablauf des SOE Timeouts auf. Ebenso die ALV Software arbeitet ihre Sequenz ab.

In der granularen Zelle wird zunächst eine Referenzaufnahme gestartet. Danach folgt durch ein kurzzeitiges Öffnen des Gasventils die Einleitung des Stickstoffs durch die Fritte in die Zelle. Die Pumpe treibt das Gasblasen Wasser Gemisch in das Beobachtungsvolumen der Zelle. Kamera und ALV Software laufen bis zum Ablauf der μg Phase. Nach der Untersuchung der Gasblasen wird die Zelle durch Treiben der Pumpe wieder gespült und Teilchen eingeleitet. Dazu wird das Quetschventil geöffnet, der Injektor zieht etwas an und drückt die Teilchen in den Kreislauf.

Vor Wiedereintritt in die Erdatmosphäre werden die Konen wieder hochgefahren, die Subsysteme abgeschaltet und nach Beendigung aller Programme auf den Bordrechner diese heruntergefahren. Nach Verstreichen eines Timeouts, jedoch vor Touch Down schaltet das Steuergerät schließlich das SODS Signal ab, womit die gesamte Stromversorgung abgeschaltet wird.

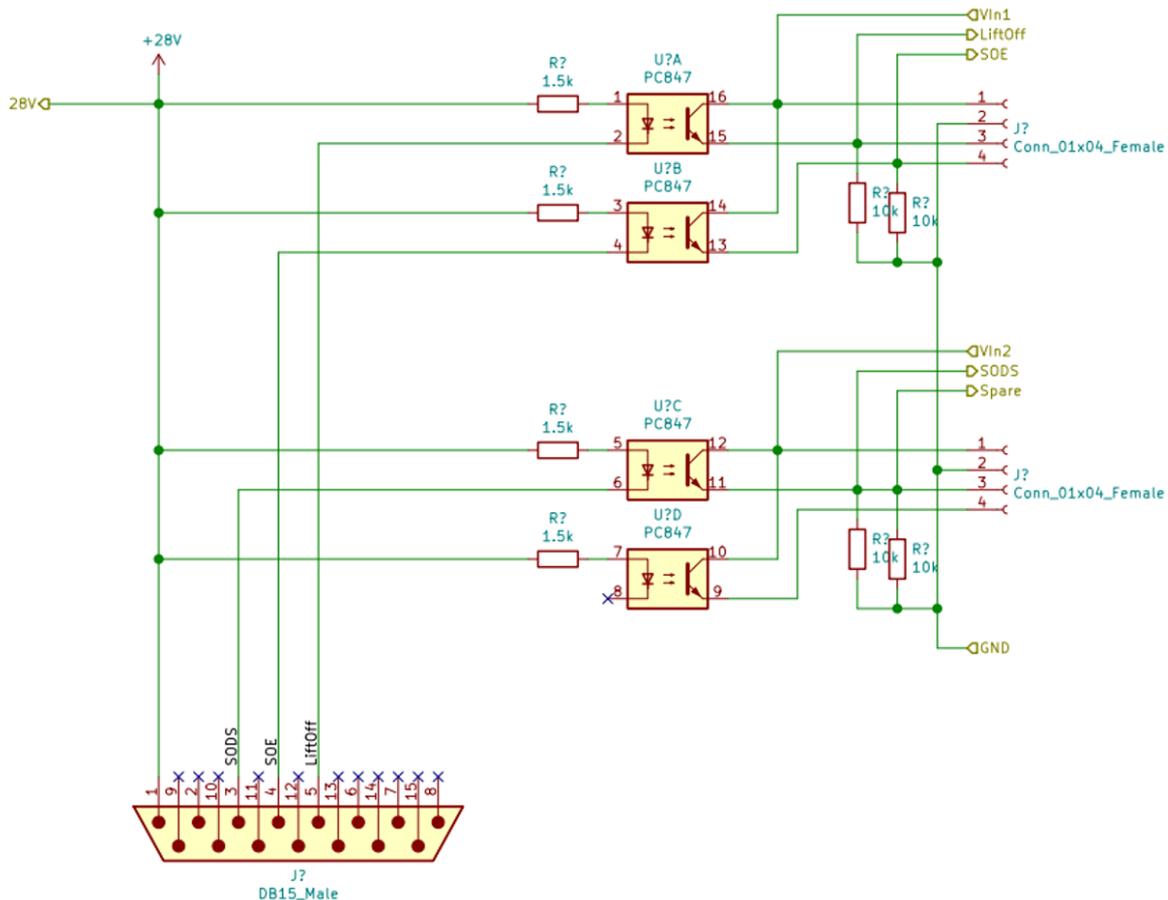


Abbildung 107: Elektrische Schnittstelle und Schaltung der Signale

6.4 Remoteoberflächen

Neben dem Speichern von Daten erfüllen die Bordrechner auch die Funktion die für den Betrieb notwendige Software laufen zu lassen. Auf beide Rechner verteilt sind die Systeme der Lasersteuerung des kolloidalen Teils, die Software zum Betrieb des granularen Speichersystems, ALV Softwares für beide Experimente und die Kameras. Installiert sind die Systeme so, dass beide Rechner möglichst gleich ausgelastet sind, insbesondere im Hinblick der zu schreibenden Datenströme der Hochgeschwindigkeitskameras. Ein bordinterner Netzwerkschwitch und feste IP-Adressen der Bordrechner erlauben ein zeitgleiches Zugreifen auf alle Oberflächen. Dabei erfüllt jeder Rechner unterschiedliche Aufgaben.

6.4.1 Bordrechner 1

Über die Bedienoberfläche des Steuergeräts lassen sich die einzelnen Systeme ein- und ausschalten. Nach dem Einschalten des Speichersystems des Granulat Experiments wird dessen Software gestartet. Es werden im Wesentlichen Belichtungszeit, Aufnahmezeit, Beginn und Ende der Aufzeichnung eingestellt. Die zur Verfügung stehende Speicherkapazität muss überprüft werden, sodass ausreichend Speicher für den Flug bereitsteht. Im nächsten Schritt werden die APDs angeschaltet. Mit der ALV Software wird deren Funktionsfähigkeit überprüft, indem die aktuelle Zählrate bei eingeschalteten Lichtquellen angezeigt wird. Damit ist auch die

Funktionsfähigkeit des Korrelators überprüft. Einstellungen für den automatisierten Ablauf während des Fluges werden vorgenommen.

Zur Aufteilung der Datenströme sind an jedem Rechner eine Hochgeschwindigkeitskamera und eine hochauflösende Kamera des kolloidalen Experimentteils angeschlossen. Das Aufrufen der Kamerasoftware über LabView ist ebenfalls für das zeitgesteuerte und automatisierte Herunterfahren der PCs während des Wiedereintritts in die Atmosphäre nötig. Sind die Kameras nicht aktiviert, werden die PCs nicht heruntergefahren.

6.4.2 Bordrechner 2

Bordrechner 2 versorgt analog zu Rechner 1 jeweils zwei Kameras des kolloidalen Experimentteils zur Verteilung der Datenströme. Ebenso die ALV Software mit dem angeschlossenen Korrelator für den granularen Experimentteil wird über diesen Rechner bedient. Des Weiteren werden die Einstellungen für den Laserkopf zur Belichtung der Kolloide vorgenommen. Hier kann die Leistungsintensität eingestellt werden. Im granularen Teil sind diese voreingestellt und nur durch separaten Anschluss eines Externen Computers möglich.

7 Flugvorbereitung und Durchführung

Vor einem Flug auf einer Forschungsrakete müssen die Experimente auf ihre Funktionalität, Interaktionen mit dem Vehikel und seinen Umweltbedingungen getestet werden. Diese Tests werden im DLR in Oberpfaffenhofen und bei Airbus in Ottobrunn durchgeführt und sollen hier beschrieben werden. Die Aktivitäten vor und während der Flugdurchführung in Esrange werden speziell für das hier aufgeführte Modul beschrieben.

7.1 Benchttest

Bei einem Benchttest werden alle Nutzlastsysteme, d. h. alle wissenschaftlichen Experimente als auch die Servicesysteme elektrisch und mechanisch in der zuvor bestimmten Flugkonfiguration verbunden. Geprüft wird zunächst im Rahmen eines „Com-Checks“ das Senden und Empfangen der Signale vom Servicemodul zu den einzelnen Experimenten. Dieser wird in Kapitel 7.3.2 näher beschrieben. Es folgen ein EMV Test und ein Testen auf gegenseitige Beeinflussung der angeschalteten Systeme.

Durch das Zusammenfügen der Module lassen sich mögliche konstruktionsbedingte mechanische Kollisionen oder gar Beschädigungen der Schnittstellenstrukturen erkennen. Ebenso die Ablängung des Kabelbaums zwischen Servicemodul und den einzelnen Schnittstellen kann final überprüft werden.

7.2 Umwelttest

Der Begriff Umwelt versteht sich auf die Umweltbedingungen, in denen das Vehikel später operieren soll. Es ist naturgemäß nicht möglich, diese Bedingungen gänzlich im Labor abzubilden, jedoch kann man sich auf technische Erfahrungswerte berufen, die solche Bedingungen möglichst ähnlich nachbilden. So bilden die gefahrenen Vibrationsspektren auf den Rütteltischen die entsprechend der gewählten Motoren, dynamischen Belastungen während der Aufstiegsphase nach.

Dabei können einzelne Module oder die gesamte Nutzlast gerüttelt werden. Ersteres findet meist nur dann Anwendung, wenn andere Module bereits durch vorangegangene Tests qualifiziert sind und nicht erneut den mechanischen Stressbelastungen ausgesetzt werden sollen.

Der Ablauf eines Umwelttests beginnt analog zum Benchttest mit dem Verlegen der Kabelstränge und der Anbringung aller elektrischen Steckverbindungen, gefolgt von einem erneuten Com-Check. Parallel dazu wird ein Adapter separat ausgewuchtet. Der Adapter wird benötigt, um die 17 zöllige Nutzlast auf den 16 zölligen Wuchttisch später zu installieren. Nachdem die Nutzlast vollständig horizontal integriert ist, werden die Schrauben der Radaxverbindungen in vertikaler Position mit ihrem Anzugsmoment angezogen. Auf dem Wuchttisch werden nun die Wuchtmassen sowie deren Positionen ermittelt und eingestellt. So soll der Massenschwerpunkt in der geometrischen Hauptachse liegen. Im Anschluss wird der sogenannte „Tip Runout“ gemessen. Dabei wird der axiale Ausschlag der Spitze bei Rotation vermessen. Er spiegelt ein Maß der Geradlinigkeit der zusammengesetzten Module wieder und muss im festgelegten Toleranzbereich liegen.

Es folgt ein Wiegen der Gesamtmasse, die Bestimmung der lateralen und polaren Trägheitsmomente sowie die Ermittlung des Massenschwerpunkts und die Messung der

Gesamtlänge. Dies geschieht zum einen in „Lift-Off- Konfiguration“ und zum andern in „Reentry-Konfiguration“. Letzteres unterscheidet sich dahingehend, dass beim Wiedereintritt der Nasenkonus und der Motoradapter mit den Teilen des De-Spin Moduls schon abgeworfen worden sind.

Die bereits erwähnten Vibrationstests erfolgen anschließend jeweils separat in den beiden Querachsen und in der Flugachse.

Abbildung 108 zeigt das Experiment zusammen mit einem Manacle Ring, dem De-Spin Modul und einem Motoradapter auf einem Rütteltisch exemplarisch für Belastungen in der Flugachse. Beschleunigungssensoren werden an ausgewählten Punkten an die Struktur angebracht. Nach dem Sinuslauf (Abb. 109, oben rechts) folgt der „Randomlauf“, der die Belastung simulieren soll. Anschließend wird der Sinuslauf wiederholt, um mögliche mechanische Veränderungen der Struktur sichtbar zu machen. Diese Auswertung wird bei allen Beschleunigungssensoren durchgeführt. Alle Testdaten werden zur Dokumentation in einem Bericht zusammengefasst.



Abbildung 108: Gesamtexperiment auf dem Rütteltisch bei AIRBUS in Ottobrunn

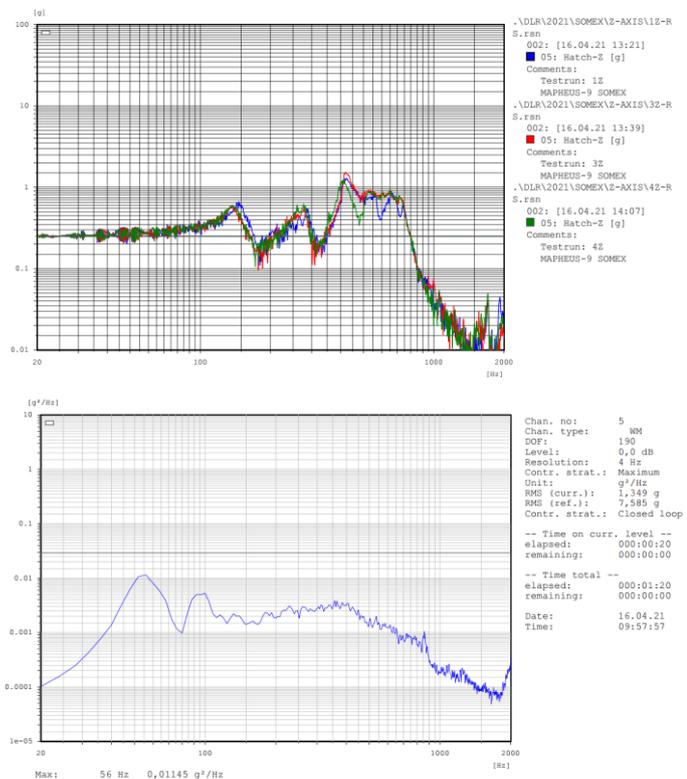


Abbildung 109: Exemplarische Messwerte der Beschleunigungen

7.3 Flugkampagne

Die Durchführung der Flugkampagne auf Esrange gliedert sich in sequenzielle Arbeitsschritte. Nach Anreise und Einrichtung der individuellen Arbeitsplätze beginnt die Nutzlastvorbereitung, sowohl in wissenschaftlicher als auch technischer Handlungen. Parallel dazu werden die Motoren vorbereitet. Nach erfolgter Überprüfung aller Systeme wird die Nutzlast mit den Motoren auf der Startvorrichtung installiert. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, werden die Umbilicals mit ihrer EGSE verbunden, die Kabelführungen definiert verlegt und geriggt. Beim darauffolgenden „Box-Test“ wird der Launcher bis zu seinen

maximalen Einstellungen verfahren, d. h. in den Winkeln der Elevation und des Azimuts. Hier zeigt sich, ob die Kabelführungen mit ausreichend langen Schlingen gelegt wurden. Es folgen Test- und Hot- Count Down und abschließend nach dem Flug das Bergen der Nutzlast. Die speziell für das Experiment relevanten Schritte sollen im Folgenden erläutert werden.

7.3.1 Payload Preparation

Das Experiment wird zunächst aus seinen Rumpfmusername ausgebaut, um die zu präparierenden Funktionsbaugruppen zugänglich zu machen. Dabei wird es an zwei diagonal liegenden Radiallagerungen mit einer Schlinge an einem Kran befestigt.

Beim kolloidalen Experimentteil sind ausschließlich die Positionen des Mikroskops einzustellen, da die eigentlichen Zellen später durch die Luke eingeschoben werden können. Aufgrund der geringen Langzeitstabilität der Suspension, werden die Zellen erst im Count Down bzw. für eine Referenzmessung in der Flugsimulation vorbereitet.

Die Zelle des granularen Experimentteils und deren Zu- und Ableitungen werden demontiert und gereinigt, um Verschmutzungen, die das Licht zur Diagnose streuen könnten, zu vermeiden. Die Polystyrol Teilchen werden in den Injektor geladen und der Druckluftspeicher mit Stickstoff bedruckt. Das gereinigte Wasser für die Zelle wird vor der Befüllung entgast. Dazu wird ein Infusionsbeutel so manipuliert, dass Schläuche mit kompatiblen Hydraulikkupplungen versehen werden können. In einem geschalteten Kreislauf wird das Wasser über eine baugleiche Zahnradpumpe zirkulierend gepumpt. Zusätzlich liegt der Beutel in einem gewärmten Ultraschallbad. Die Ausgasungen werden über ein Septum am Infusionsbeutel mit einer Kanüle abgelassen. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt und dient im ersten Schritt nur zur Befüllung der Zelle. Später kann ein weiterer Beutel bis in den Count Down die Zelle weiterhin über Anschlüsse an dem durch die Luke zugänglichen Panel angeschlossen werden.

Nach der Überprüfung aller Funktionen wird das Experiment wieder in den Rumpf eingebaut. Dazu werden die unteren Lager des Experiments in die auf dem Druckschott montierten Wangen gesteckt und mit je einem Kugelsperrbolzen fixiert. Nun werden die Anschlussleitungen zu den Umbilicals mit dem Experiment verbunden, da im eingebauten Zustand keine Zugänglichkeit mehr besteht. Die mittlere Rumpfsektion kann nun aufgesetzt werden und die oberen Lager verbinden die Experimentstruktur mit dem Rumpf. Vor dem Installieren des oberen Druckschotts wird der Interfacestecker mit dem Servicemodule gesteckt und die Schlauchdurchführung bis zum unteren Schott geführt. Die Ringmutter fixiert den Stutzen der Schlauchdurchführung auf dem Druckschott.

Da zur Sicherstellung der Druckdichtigkeit alle Dichtungen korrekt sitzen müssen, wird abschließend ein Drucktest durchgeführt. Am Pneumatik-Umbilical befindet sich eine Anschlussverbindung, über die Pressluft oder Stickstoff über einen Druckminderer in das Innere des Moduls geleitet wird. Beobachten lässt sich der Druck, indem an die Anschlussverbindung nach dem Befüllen ein Manometer angeschlossen wird. Ist nach 30 Minuten kein sichtbar abzulesender Druckabfall zu erkennen, wird das Modul als ausreichend druckdicht angesehen. Das Experiment ist nun bereit mit der Nutzlast integriert zu werden. Auch danach werden wieder alle Systeme auf ihre Funktionalität hin überprüft.

7.3.2 Com-Checks

Com-Checks werden grundsätzlich nach jedem Trennen und Wiederverbindung der Schnittstellen durchgeführt, um mögliche Probleme frühzeitig zu erkennen. Im hier gebotenen Fall werden die Signale „LO“ (Lift-Off), „SOE“ (Start of experiment), „SODS“ (Start of Data

Storage) und die Power-Leitung getestet. Dabei sind die Bezeichnungen der Signale historisch bedingt und geben keine Rückschlüsse auf deren Funktion. Die einzelnen Signale wurden bereits in Kapitel 6 beschrieben.

7.3.3 Flugsimulation

In der Flugsimulation werden die für die Nutzlast relevanten Schritte in der Count Down Prozedur sequenziell durchlaufen und die Flugphase mit den programmierten Events simuliert. Im Gegensatz zu den Com-Checks wird das Experiment in den Flugmodus versetzt, um die Trigger Funktionen und die automatisierte Programmsequenz zu testen. Im vorliegenden Fall wird die Flugsimulation auch für einen Referenzdurchlauf mit Flugteilchen benutzt.

7.3.4 Test- und Hot Count Down

Test - und Hot Count Down unterscheiden sich nur im letzten Punkt des Launchprocedures – der Zündung der ersten Stufe.

Der Count Down beginnt mit der Vorbereitung der Einschübe des kolloidalen Teils. Die Suspension wird aufgeschüttelt, ultrageschallt, in die Küvette gepumpt und blasenfrei verschlossen. Es folgt ein „Payload checkout # 1“ bei dem das EGSE eingeschaltet und das Experiment gebootet wird. Alle reversiblen Funktionen des Experiments werden noch einmal überprüft, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Zünder eingebaut sind. Im Falle eines angeschlossenen Infusionsbeutels kann durch Betätigung der Pumpe die Granulatzelle noch einmal gespült werden. Nach Bestätigung der Funktionalität werden die Systeme runtergefahren und die EGSE abgeschaltet.

Die Einschübe werden während des Late-Access integriert und elektrisch angeschlossen. Der Infusionsbeutel wird abgeklemmt und die Schnittstellen des Ein- und Auslasses entweder durch eine hydraulische Brücke verbunden, sodass der Kreislauf geschlossen ist oder das Einwege-Beutelreservoir wird angeschlossen. Die Pneumatikkupplung der Luke wird an das Paneel gesteckt und die Luke eingesetzt und verriegelt. Eine Stickstoffflasche mit Druckminderer beaufschlagt über das Pneumatikumbilical die Druckspeicher womit die Luke im Rahmen abdichtet. Abschließend werden die Hitzeschutz Abdeckungen über die Anschlüsse des Umbilicals montiert.

Nachdem der Late Access beendet ist, wird das Experiment wieder angeschaltet und der „Payload Checkout # 2“ wird analog zum Ersten durchgeführt. Da das Anschalten des Experiments etwa 50 Minuten vor Lift Off stattfindet, muss hier auf den Thermalhaushalt geachtet werden. Das bedeutet, dass elektrische Verbraucher erst nach ihrer Notwendigkeit eingeschaltet werden sollten, um die Innentemperatur zu begrenzen. Ein Überschreiten der Entmischungstemperatur der kolloidalen Suspension hätte ein Austausch der Zellen zur Folge. Tabelle 24 fasst die wesentlichen Schritte der Prozedur zusammen.

Zeit vor Lift OFF	Handlung
T-6h	Befüllen der Zellen
T-5h 30 min	Payload Checkout #1: Einschalten der Netzgeräte, Funktionsprüfung aller schaltbaren Subsysteme
T-2h 30 min	Beginn Late Access: Einbau der Einschübe in Nutzlast

T-50 min	Ende Late Access, Payload Checkout #2: Einschalten der Netzgeräte, Funktionsprüfung aller schaltbaren Subsysteme
T-30 min	Umwälzen der Probe durch Einschalten der Membranpumpe
T-20 min	Einschalten der LED Treiblichtquellen zur Vorwärmung Bestromung der APDs ALV Software auf beiden Rechnern öffnen: Prozessierungsparameter einstellen Lasertreiber Granulatexperiment aktivieren, Leistungseinstellungen vornehmen
T-12 min	4 Kameras des Kolloid Experimentteils aktivieren Aktivierung der Temperierungseinheit
T-10 min	Laser Kolloid Experimentteils aktivieren zur Vorwärmung
T-8 min	Aktivierung Speichersystem Granulatexperiment Einstellungen in Software vornehmen, Trigger aktivieren Flugmodus aktivieren
T-6 min	Umwälzen der Kolloidproben durch Membranpumpen
T-5 min	Überprüfung aller Messwerte Überprüfung elektrischer Strom und Spannung auf Anomalien
T-4 min	SODS schalten: Umschalten auf interne Spannungsversorgung Überprüfung des Stromabfalls am Netzgerät Netzgeräte abschalten
T-3 min	Überprüfung aller Systeme auf Triggerabfragen Überprüfung Temperaturmesswerte Überprüfung auf Flugmodus
T-60 s	Manuelles Setzen des Timeouts für LO Signal

Tabelle 24: Prozedur der wichtigsten Schritte während des Count Downs

Während des Fluges wird die Flugsequenz abgefahren. Abbildung 110 soll die automatisierten Prozesse grafisch verdeutlichen.

SOMEX Erstflug - Postflight
18.08.2021

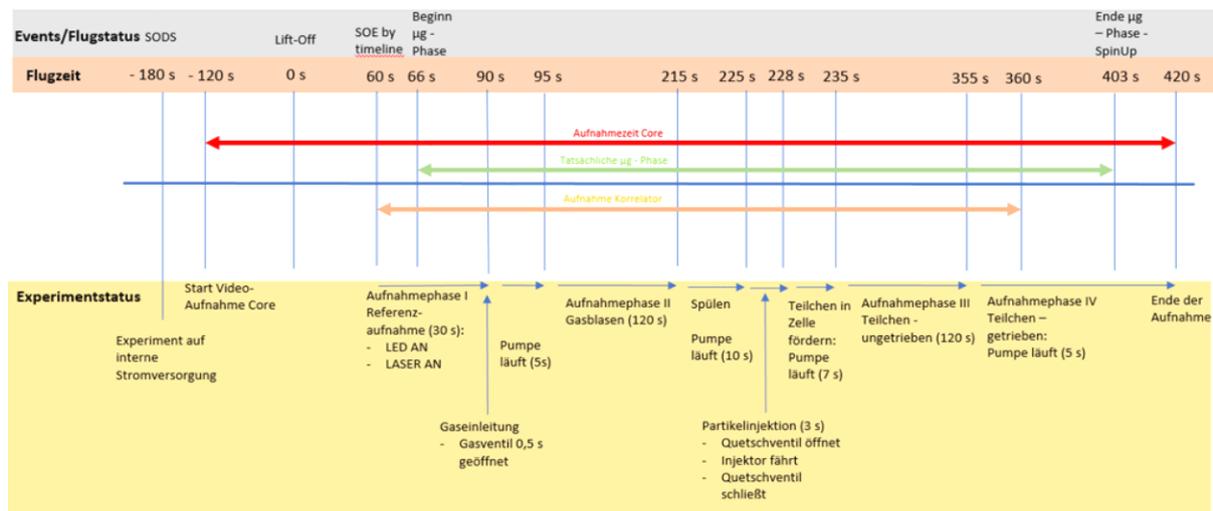


Abbildung 110: Flugsequenz

Grundsätzlich beginnt die Flugsequenz bei T-0, d. h. mit Lift-Off. Da im Vorfeld eine Redundanz geschaffen werden soll, die ein Ausfall der Signale des Servicemoduls der Rakete kompensiert, müssen während des Count Downs zeitgenau Timelines aktiviert werden. Dies beginnt mit dem Setzen des SODS Signals, sowohl extern als auch intern. Die Anlage bezieht nun ihre Energieversorgung über die Batterien. Durch ein manuelles Starten der Aufzeichnungen des Framegrabbers, der das Aufzeichnen nach eingestellter Laufzeit beendet, werden zwar Daten gespeichert, die noch während des Launch-procedure stattfinden, was jedoch aufgrund der ausreichenden Speicherkapazitäten als nicht störend zu bewerten ist. Überflüssige Daten können im Postprozess entfernt werden. Das Verlassen des Launchers wird mit einem Lift-Off Signal markiert. Das Signal löst einen Timer aus, der nach Ablauf ein SOE Signal auslöst. Dabei ist dieses Timeout größer als die zu erwartende Zeit bis SOE, welches aufgrund der Detektion der Mikrogravitation durch das Servicemodul erwartet wird. Liegt SOE an, unabhängig von welcher Quelle, beginnt der erste Messzyklus der Probe. Sicherheitshalber werden die dafür notwendigen Systeme nochmals angeschaltet, falls dies bei der Bedienung im Vorfeld nicht geschehen ist. Es wird 30 Sekunden lang ohne Partikel und Gasblasen als Referenz gemessen und aufgezeichnet. Danach öffnet sich das Gasventil für 0,5 Sekunden. Gasblasen werden erzeugt und die Pumpe befördert Gas und Wasser durch die Zelle für 5 Sekunden. Es wird weiter für 120 Sekunden gemessen. Nun soll das Gas aus der Zelle geleitet werden. Diesen Spülvorgang soll durch 10 Sekunden langes Pumpen realisiert werden. Das Quetschventil öffnet und der Partikelinjektor drückt Teilchen in das hydraulische System. Die Pumpe fördert für weitere 7 Sekunden. Es wird 120 Sekunden lang gemessen. In der letzten Phase wird wieder für 5 Sekunden das Teilchen-Wasser-Gemisch umgewälzt. Nach Beendigung der letzten Phase werden alle Systeme runtergefahren und schließlich vor Touch Down von der Spannungsversorgung abgetrennt, um eine Beschädigung durch zu hohen Beschleunigungen bzw. durch einen zu hohen Impuls bei einer harten Landung zu vermeiden.

7.3.5 Recovery

Nach dem Flug wird die Nutzlast in Abhängigkeit des Wetters so schnell wie möglich per Hubschrauber geborgen. Dazu wird die Nutzlast geortet. Das Team bereitet die Nutzlast für den Transport mit dem Hubschrauber vor und stellt sicher, dass diese keine Gefahr für den Hubschrauber darstellt.

7.3.6 Datentransferierung

Ist die Nutzlast zurück, kann mit dem Übertragen der Daten von den Festplatten des Experiments begonnen werden. Je nach Witterung kann die Nutzlast ausgekühlt sein, sodass vor dem Einschalten auf Kondenswasserbildung geachtet werden sollte. Gegebenenfalls muss die Nutzlast vor dem Einschalten erst auf Raumtemperatur klimatisiert werden.

8 Ergebnisse

Bei der Beschreibung der Ergebnisse wird der Fokus analog zur Entwicklungsaufgabe auf die technische Funktionalität gelegt. Wissenschaftliche Ergebnisse werden nur übersichtshalber angerissen, um auch den Zusammenhang der technischen Funktionalität mit dem Mehrwert wissenschaftlicher Erkenntnisse deutlicher darzustellen. Es wird zunächst die umgebende Struktur des Experiments, d. h. Rumpf, Struktur und interne Servicesysteme während des Fluges betrachtet. Der kolloidale und granulare Experimententeil wird separat betrachtet, da sie unabhängig voneinander bewertet werden können.

8.1 Rumpf und Struktur

Der Betrieb des Experiments ist sowohl im eingebauten als auch im ausgebauten Zustand möglich. Im letzteren Fall ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der fehlenden Hülle Sicherheitsmaßnahmen beim Betrieb der Laser zu treffen sind. Das Umwickeln des Experiments mit einer Laserschutzdecke oder der Betrieb in einer Laserschutzkabine verhindert mögliche unkontrollierte Reflektionen der Laserstrahlen.

Weder bei den Umwelttests noch nach den Flügen konnten plastische Deformationen festgestellt werden. Bei Erstflug wurde die pneumatische Kupplung im Umbilical, welches zur Bedruckung der Lukendichtung dient, durch den Wärmeeintrag in der Auf- oder Abstiegsphase beschädigt. Das zusätzlich als Redundanz vorgesehene Ventil verhinderte jedoch einen Druckabfall in der Dichtung, womit der atmosphärische Druck im Rumpf über den gesamten Flug aufrechterhalten werden konnte. Als Maßnahme für weitere Flüge, wurden Wärmeschutzstecker über die Kupplungen angebracht, deren schützende Wirkung während der nächsten Flüge nachgewiesen werden konnten. Die Diagramme 111 und 112 zeigen die Innendruck- und Temperaturverläufe der Flüge auf MAPHEUS im Mai und Dezember 2021.

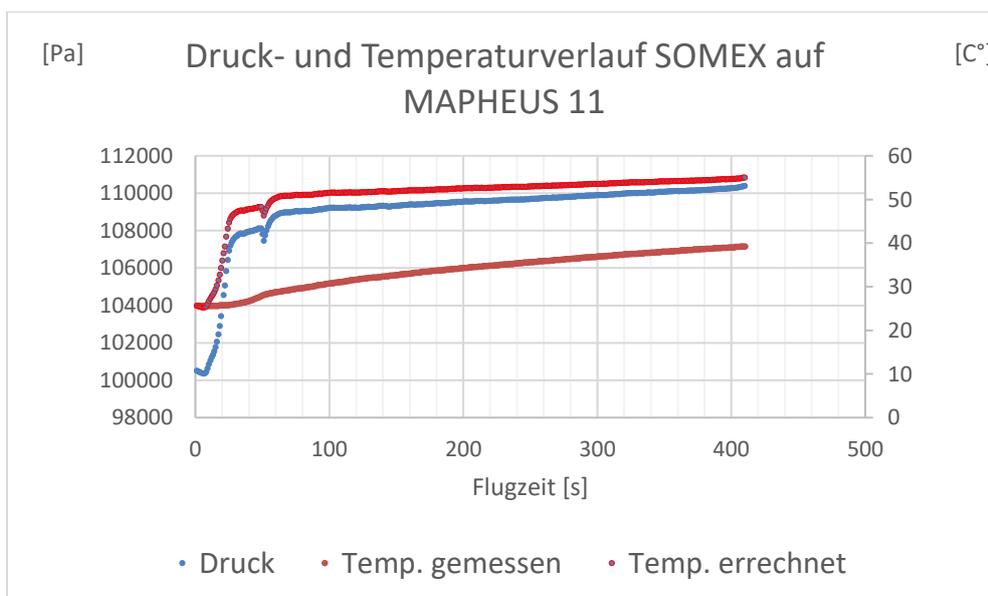


Abbildung 111: Druck- und Temperaturverlauf des Experiments während des MAPHEUS Fluges im Mai 2021

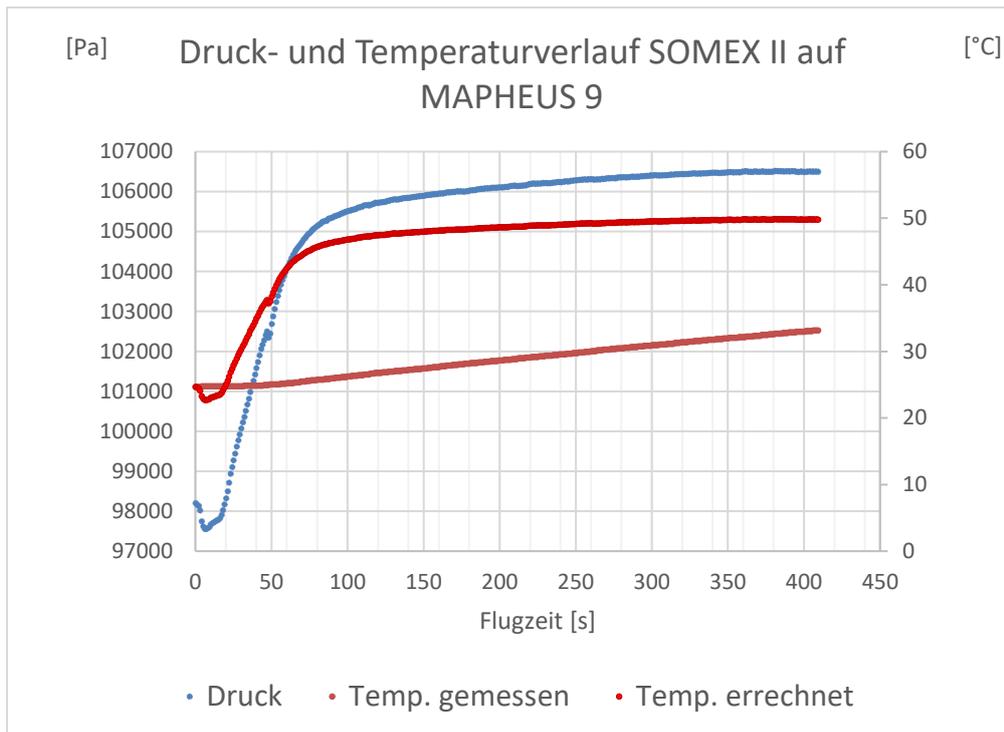


Abbildung 112: Druck- und Temperaturverlauf während des Fluges auf MAPHEUS im Dezember 2021

Es ist zu erkennen, dass die gemessene Temperatur deutlich von der errechneten abweicht. Erklärt wird diese Abweichung mit der ungenauen Messmethode eines Temperatursensors. Der Sensor befindet sich in der Relaisbox und misst die Temperatur seiner unmittelbaren Umgebung. Durch den schnellen und hohen Wärmeeintrag in der Aufstiegsphase erwärmt sich zunächst der Rumpf und gibt die Wärme an die innere Atmosphäre ab. Dadurch entstehen im Inneren Temperaturgradienten, d. h. das eingeschlossene Gas ist in Rumpfnähe wesentlich wärmer als an der Messstelle des Temperatursensors. Der Sensor ist daher ausschließlich für langsamere Wärmeeinträge geeignet und kann für die Überwachung der Innentemperatur während eines Count Down genutzt werden. Neben dem Temperatursensor befindet sich auch ein Drucksensor, der den Innendruck misst und aufzeichnet. Unter Zuhilfenahme der idealen Gasgleichung lässt sich eine gemittelte Temperatur des eingeschlossenen Gases abschätzen, zumal sich Druckgradienten wesentlich schneller als Temperaturgradienten anpassen. Nach Umstellung der idealen Gasgleichung

$$pV = mRT$$

zu

$$T = p \cdot \frac{V}{mR}$$

lässt sich erkennen, dass der Ausdruck $\frac{V}{mR}$ konstant sein muss. Das Gasvolumen ist durch die komplexe Struktur des Experiments und der nichthomogenen Dichten unterschiedlicher Bauteile nicht bekannt. Er lässt sich jedoch aus den gemessenen Anfangswerten quantifizieren. Zu diesem Zeitpunkt kann man noch von einem stationären Zustand mit nur geringfügigen Temperaturänderungen ausgehen. Damit lässt sich die gemittelte Temperatur über den gemessenen Druck berechnen zu

$$T + \Delta T = (p + \Delta p) \cdot \frac{V}{mR},$$

mit

$$\frac{V}{mR} = \frac{T_{Anfang}}{p_{Anfang}}.$$

Weiterhin sind während der Aufstiegsphase scheinbare negative Drucksprünge zu sehen. Der Drucksensor ist mit seiner Membran entgegen der Flugrichtung montiert. Die Eigenmasse der Membran scheint bei den während der Aufstiegsphase wirkenden variierenden Beschleunigungen den Messwert zu verfälschen. Eine Auftragung der Beschleunigungen ist aus Verschussgründen der Motoreigenschaften nicht gestattet.

Beim Vergleich der Anfangsmesswerte zu den Messwerten am Ende der μg -Zeit beider Flüge zeigen sich Temperaturdifferenzen bei MAPHEUS 11 von $\Delta T_{11} = 29,7 \text{ K}$ und MAPHEUS 9 von $\Delta T_9 = 26,5 \text{ K}$. Diese Abweichungen begründen sich im Unterschied der geflogenen Nutzlastmassen, der Wahl der Raketenmotoren und Anfangsbedingungen. Sie werden als plausibel angesehen.

Grundsätzlich lässt sich aus den Messwerten das eigentliche Ziel des Nachweises einer ausreichenden Druckdichtigkeit ablesen.

Bei der Nachprüfung konnten bis auf die bereits erwähnte Beschädigung der Pneumatikkupplung beim Erstflug keine Beschädigungen festgestellt werden. Der Hitzeschild des Elektroumbilicals schloss unmittelbar nach Lift-Off. Rußablagerungen, die durch den ablativen Abbrand der Korkverkleidung während der Aufstiegsphase auf die äußere Struktur und damit auch auf den Hitzeschild des Umbilicals niedergehen, zeigen, dass der Schild vor dem Abbrand geschlossen war.

Ebenfalls die Luke ist ohne weiteres Refurbishment im vollen Umfang wiedereinsatzfähig.

8.2 Kolloidaler Experimententeil

Die Aufzeichnungen durch das *LogFile* zeigen eine durchgängige Temperierung der Einschübe auf Solltemperatur. Mit den Kameraaufzeichnungen lässt sich das Umwälzen der Suspension beobachten. Sowohl die LED Lichtquelle mit deren verfahrbaren Einkopplungsmechanik als auch die Laserlichtquelle haben planmäßig gearbeitet und alle Aufzeichnungen wurden gespeichert.

Die wissenschaftliche Auswertung der Daten soll nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit sein.

8.3 Granularer Experimententeil

Alle elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Schaltvorgänge und Prozesse haben planmäßig funktioniert. Mit der optionalen Verwendung der hydraulischen Anschlüsse des Panels lässt sich ein Pumpen von Beutel zu Beutel als auch ein Pumpen im geschlossenen Kreislauf umsetzen. Wie auch beim kolloidalen Experimententeil soll die wissenschaftliche Auswertung der Daten nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit sein. Es soll nur ein Anriss zur Demonstration der Funktionsfähigkeit kurz dargestellt werden.

Während des Erstfluges wurden im granularen Experimentteil sequenziell Gasblasen und Teilchen gleichen Durchmessers mittels Lichtstreuung untersucht. Abbildung 113 zeigt die Autokorrelationsfunktionen der Gasblasen im getriebenen und ungetriebenen Fall in Mikrogravitation und vergleichsweise am Boden. Dabei wird im getriebenen Fall die an der Pumpe anliegende Spannung als quantitativer Wert festgelegt.

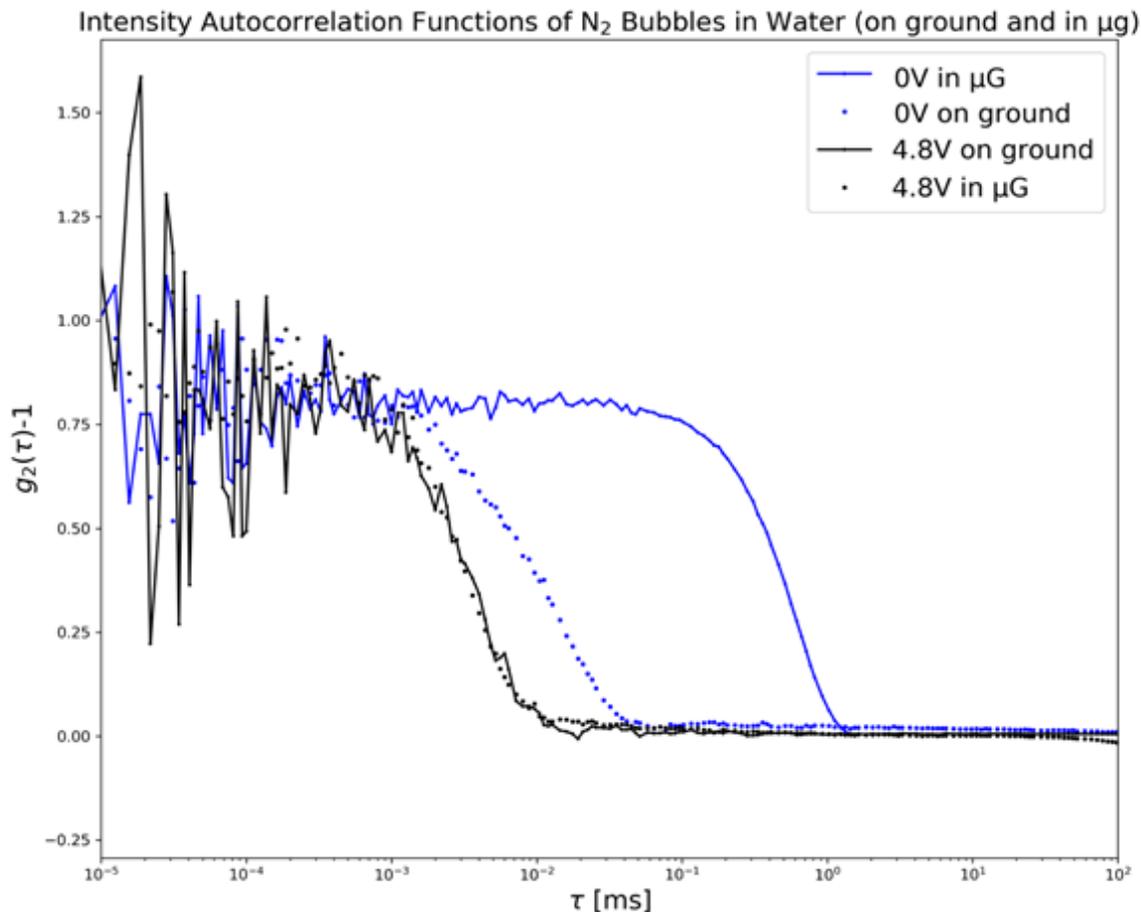


Abbildung 113: Autokorrelationsfunktionen von Gasblasen in Wasser mit ein- und ausgeschalteter Pumpe während μg und am Boden (Quelle: Lisa Künstler, DLR-MP)

Im ungetriebenen Fall ist ein schnellerer Zerfall der Kurve unter Mikrogravitationsumgebung zu sehen. Interpretiert wird diese Beobachtung durch den am Boden vorherrschenden natürlichen Auftrieb der Gasblasen, der eine gerichtete Bewegung der Blasen verursacht und der Zerfall verlangsamt. Ohne Schwerkraft fällt die gerichtete Bewegung weg, sodass der Zerfall beschleunigt wird.

Im getriebenen Fall ändern sich die Positionen der Teilchen mit und ohne Schwerkraft ähnlich. Turbulente Bewegungsmuster der Streuer sorgen für einen schnelleren Zerfall.

Vor dem Einleiten der Teilchen soll die Zelle gespült und von Gasblasen befreit werden. Durch das optische Abbilden der Zelle ist ersichtlich, dass das Gas nicht vollständig aus der Zelle gespült werden konnte, sodass sich Teilchen und Gas gleichermaßen in der Zelle befanden.

Im Zweitflug wurden ausschließlich Teilchen untersucht. Dabei wurde das Wasser in der Zelle im Kreislauf gepumpt. Das Pumpen erfolgte in unterschiedlichen Intervallen während der μg -Phase.

9 Bewertung

Basierend auf die vorangegangenen Anforderungen an das Experimentmodul sollen in diesem Kapitel die erreichten Umsetzungen diskutiert und bewertet werden. Dabei werden auch aus dem Erstflug gewonnen Erkenntnisse genutzt, um Verbesserungspotentiale auszunutzen sowie deren Nutzen im Zweitflug dargestellt. Ähnlich der vorangegangenen Kapitel gliedert sich dieses in der allgemeinen Behandlung des Experimentmoduls und den spezifischen Einzelexperimenten.

9.1 Bewertung der Rumpfstruktur und der permanenten Infrastruktur

Nr.	F W	Anforderung	Bemerkung	Erreicht
Geometrie				Ja [J], Nein [N]
R01	F	Maximale Gesamthöhe: $h_{\max} \leq 400$ mm pro Rumpfsegment Gesamthöhe: Modular gestaltbar Gesamtfläche: Kreisfläche mit $d_A = 438$ mm	Grenzmaße wurden alle eingehalten, vermessen und technisch dokumentiert.	J
R02	F	Seitlicher Zugang zum Inneren des Rumpfes durch eine Luke ermöglichen Maße für Luke sind iterativ mit Entwicklung des koloidalen Teils zu ermitteln. Statische Anforderungen in Anlehnung an „Technical Note“; Abweichungen müssen geprüft und zugelassen werden (MORABA)	Durch den Einsatz einer druckdichten Luke realisiert	J
R03	F	Nach außen keine rausragenden Teile.	Kein Anbauteil ragt über den Außenradius hinaus	J
Kinematik				
R04	F	Verbinden der Rumpfsektionen über Radax-Ringe.		J
R05	F	Anstecken der Versorgungsleitungen über Umbilicals.	Umbilicals sind steckbar	J
R06	W	Automatischer Verschluss und Verriegelung des Hitzeschildes mit Trennung der Kabel	Unter Realbedingung erprobt	J
R07	F			

		Verschluss und Arretierung der Luke ohne elektrische Schaltung <i>Weitere Bewegliche Baugruppen in „Ergonomie“ aufgeführt</i>		
Kräfte				
R08	F	Kräfte gemäß FRP	Unter Realbedingungen erprobt	J
R09	F	Zusätzliche Druckbeanspruchung: Luke und Druckschotten gegenüber Innendruck auslegen		J
Stoffe				
R10	F	Grundsätzliche Verwendung von Leichtbau Konstruktionswerkstoffen	Hauptsächlicher Werkstoff für Strukturelemente: EN AW 7075 Abweichungen in der Wahl der Knetlegierung fertigungstechnisch bedingt	J
R11	F	Geeignete Wahl von Schmierstoffen zum Einbau der Radialdichtungen zwischen den Rumpfsegmenten: Vakuumtauglich	Verwendung von Vakuumfett zum Fügen der Rumpfsegmente	J
R12	F	Einleitung, Ausleitung und Speicherung von Stickstoff	Über Pneumatikumbilical und Druckspeicher realisiert	J
Signale				
R13	F	Elektronische Schnittstelle zu Steuerungsrechner Signale: - LO (Lift-Off) - SOE (Start of experiment) - SODS (Start of data storage)	Signale über D-Sub Einbaubuchse an integrierter Schnittstelle am oberen Druckschott	J
		Interne Trigger zum Starten von Aufzeichnungen	Über Steuergerät können Trigger individuell programmiert werden	J
R14	W	Speicherung aller ein- und ausgehenden Signale in einem Logfile	Steuergerät speichert automatisch ein Log-File mit jedem Bootvorgang	J
R15	F	Speicherung aller Daten auf Datenträger	Datenspeicher auf Nucs und Speichersystem mit Coaxpress	J

R16	W	<p>Redundanz bei Ausfall des Servicemoduls bei den Signalen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - LO - SOE - SODS <p>und</p> <ul style="list-style-type: none"> - Powerleitung 	<p>Separate Platine, mit der das Signal zum Schalten auf interne Spannung selbst gegeben werden kann.</p> <p>LO kann manuell gegeben werden; timeout bis Highpegel. SOE nach timeline</p>	<p>J</p> <p>J</p>
Ergonomie				
R17	F	Anbindung Umbilical im Launcher	Unter Realbedingungen erprobt	J
R18	W	Möglichst wenig Bedarf an Werkzeug beim Probenintegrieren. Lösbare Normelemente gegen Verlust absichern	Einbautätigkeiten während Late Access nur mit Vierkantschlüssel, Inbus und Steckschlüssel möglich	J
R19	W	Betrieb der Anlage mit und ohne Rumpf möglich. Zugänglichkeit zu Subsystemen		J
Fertigung				
R20	F	Toleranzen nach 2768-1-f	Alle technischen Zeichnungen sind entsprechend gekennzeichnet. Sicherheitsrelevante Bauteile liegt Prüfprotokoll vor	J
Gebrauch				
R21	F	Volle Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb (auch ohne Rumpf)		J
R22	F	Integration in Rumpf ohne Veränderung innerer Bauteile →Nach abschließendem Test ausschließlich Integration		J
Energie				
R23	F	Hauptsächliche Energieversorgung über Schnittstelle und SOMEX C	Komplette Versorgung über C Modul	J
R24	F	Thermalhaushalt: Maximale Innentemperatur ist zu bestimmen, bei der gewährleistet werden kann, dass Temperaturregelung für den Flug ausreichend dimensioniert ist	Eine begrenzende Innentemperatur der Atmosphäre zu bestimmen, bei der eine Temperierung der Zellen auf Solltemperatur noch funktioniert, ist kaum aussagekräftig. Entscheidende Größe ist der Wärmestrom, der durch den Rumpf stattfindet. Dieser ist vom Temperaturgradient	N

			zwischen Innen- und Außentemperatur abhängig, sodass mehrere Faktoren berücksichtigt werden müssen und nicht pauschal mit einem Temperaturwert bestimmt werden kann.	
R25	W	Möglichkeit unter Laborbedingungen kontrolliert vorzuwärmen	Anwärmen mit elektrischen Verbrauchern	J
R26	F	Kein unzulässiges Ausdringen von elektromagnetischen Feldern	EMV Test bestanden	J
R27	F	Kapazität der Batterien an Verbrauch anpassen	Unter Realbedingungen erprobt	J
Kontrolle				
R28	F	Abnahme der Probenumgebung durch Mobile Raketenbasis nach Zusendung des Entwurfs	Abnahme bestanden	J
R29	F	Prüfbericht zur Maßabnahme des Rumpfes	Liegt vor	J
R30	F	Ggf. weitere Prüfbescheide sind vorzulegen (Druckbehälter, neuentwickelte Strukturbauteile)	Nachweise gem. Esrange Safety Document vorhanden	J
R31	F	Messung elektromagnetischer Felder während des Betriebs	Durchgeführt	J
Transport				
R32	W	Transport in der Gesamtanlage: Transportschänden sind durch geeignete Transportbehältnisse auszuschließen	Transportbehältnisse liegen vor	J
Sicherheit				
R33	F	Sicherheitsrelevante Aspekte - Hochspannung, -strom, - Chemie, - Laser, - Druckspeicher	Alle Dokumente vollständig, geprüft und genehmigt	J
R34	F	Druckspeicher Auslegung: Nach Vorgabe <i>Safety manual Esrange</i>	Druckspeicher mit CE Prüfung. Weitere Druckbehälter erfüllen Ausnahmebedingungen	J

Tabelle 25: Vergleich der Anforderungen mit den erreichten Ergebnissen zur Rumpfstruktur und permanenten Infrastruktur

Die Geometrie der einzelnen Rumpfsktionen entspricht in Form und Lage den Vorgaben der zitierten Dokumente. Alle relevanten Maße wurden überprüft und dokumentiert. Dabei stellt die seitliche Zugänglichkeit bei gleichzeitig druckdichten Segmenten eine Besonderheit im Sinne einer Neuentwicklung dar, die separat für eine Flugfreigabe überprüft werden musste.

Zur Versorgung des Experiments mit Energie-, Stoff- und Informationsströme wurden ein Umbilical für elektrische Konnektoren und ein Umbilical für die pneumatische Versorgung mit Stickstoff integriert. Beide werden vor den thermischen Einwirkungen während der Aufstiegsphase der Rakete durch konstruktive Maßnahmen geschützt. Einschraubbare Hitzeschutz Stecker schützen die Pneumatikkupplungen während ein mit Lift-Off automatisch zufallender und arretierender Hitzeschild die elektrischen Konnektoren schützt. Beide Systeme haben sich nach mehreren Flügen als funktionsfähig bewiesen.

Ein kräftegerechtes Design bestätigte sich durch Begutachtung und Messung aller Komponenten der Rümpfe nach vorangegangenen Flügen, wodurch auch eine vollständige Wiederverwertbarkeit gegeben war.

Über eine druckdicht eingebaute D-Sub Schnittstelle am oberen Druckschott können Signale zwischen dem Servicemodul der Rakete und dem Experiment übertragen werden. Mit einer Redundanzschaltung können die Signale während des Count Downs per Timeline zusätzlich geschaltet werden. Eine zweite Ausfräsung, die mit einem Blindflansch verschlossen ist, kann bei Bedarf eine weitere Schnittstelle integriert werden, ohne das Druckschott zu verändern.

Um ein ergonomisches Arbeiten am Launcher zu ermöglichen, spielen mehrere Faktoren eine bedeutsame Rolle, die zum Teil nicht immer garantiert werden können. Von daher ist es umso bedeutsamer, die Komponenten während den Einbautätigkeiten im Count Down so zu gestalten, dass diese für den Bediener zugänglich und sicher zu montieren sind. Zum Einbau der Zellen wird lediglich ein Inbusschlüssel benötigt. Mit einem Vierkantschlüssel wird die Luke geschlossen und mit einem weiteren Steckschlüssel eine Kontermutter zur Sicherung montiert. Verliersichere Schrauben im Hitzeschutz der pneumatischen Kupplungen ermöglichen eine sichere Montage mit zwei Händen. Durch die Reduktion der Anzahl verschiedener Werkzeuge fällt auch die Wahrscheinlichkeit solches im Inneren zu vergessen.

Während des Betriebs des Experiments im ausgebauten Zustand, d. h. ohne Rumpf, ist eine Zugänglichkeit zu den Komponenten mit Verstellmöglichkeiten gegeben. Der modulare Aufbau mit seinen Schnittstellen ermöglicht es außerdem defekte Bauteile auszutauschen, in dem die entsprechende Baugruppe entfernt werden kann. Zusätzlich erleichtert dieses Konzept die Eingrenzung eines Fehlers bei einem Störfall.

Die notwendigen Arbeitsschritte zum Einbauen des Experiments in den Rumpf müssen sehr aufeinander abgestimmt sein. Es muss dabei sehr sorgfältig vorgegangen werden, um Beschädigungen an Struktur, Dichtflächen und Kabeln zu vermeiden. Insbesondere beim Verwenden eines Kranes fehlt ein Gefühl der Schwergänglichkeit während des Anhebens und Absenkens, sodass das Einbauen als risikoreich gewertet wird. Eine robustere Gestaltung des Experiments hätte aber auch mehr Masse und Volumen bedeutet, d. h. in der Beschränktheit des Durchmessers eine größere Gesamthöhe.

Der elektrische Energiehaushalt wird durch extern anschließbare Netzgeräte und durch Batterien mit entsprechend ausgelegter Elektronik während des Fluges bereitgestellt. Um den thermischen Eintrag während der Aufstiegsphase möglichst gering zu halten, ist die Innenseite der Rümpfe mit Kork ausgekleidet. Mit der isolierenden Schicht wird aber auch der Wärmestrom durch den thermischen Eintrag der elektrischen Abwärme im Inneren nach außen reduziert. Zur Verhinderung einer zu warmen inneren Atmosphäre müssen elektrische Verbraucher nach einer bestimmten Priorität im Count Down zugeschaltet werden. Ebenso ein längerer Hold bei eingeschalteten Systemen während des Count Down kann zur Überhitzung führen, sodass für jedes Szenario eine Prozedur bis hin zu Abbruchbedingungen überlegt und formuliert werden muss.

9.2 Bewertung des kolloidalen Experimentteils

Nr.	F W	Anforderung	Bemerkung	Erreicht
Geometrie				Ja [J], Nein [N]
K01	F	Gesamtmaße gemäß dem zur Verfügung stehenden Bauraum der permanenten Infrastruktur.	Experimentteil im E-Modul integriert	J
K02	F	Anbindung an Stringer		
K03	F	Mobile Probenumgebung zur Luke Orientieren	Einschübe über Luke erreichbar	
K04	F	Lichtquelle und Kamera gegenüberstehend für Untersuchungen an Mikroschwimmer		J
K05 K06	F F	Laser und Kamera gegenüberstehend Kollimator und Laserachse in 45°		
K07	W	Vorzugsweise austauschbare Küvetten im Standardformat 3x1 Zoll.	Verwendung von IBIDI Slides	J
Kinematik				
K08 K09	F F	Justierbarkeit von Kamera und Probensystem muss gewährleistet sein. Justierbarkeit von Komponenten der Laseroptiken.	Kameras in alles drei Achsen einstellbar Alle Komponenten der Laseroptiken sind justierbar gelagert	J
K10	F	Ein-/Ausbau mobiler Probenumgebung während Late Access	Unter Realbedingungen erprobt	J
K11	W	Integriertes Verfahren zur Redispersierung der Suspension.	Membranpumpen verlängern die mögliche Standzeit der Zellen	J
K12	F	Homogenisatoren verfahrbar	Spindelgetriebene Verfahrenmechanik	J
Kräfte				

K13	F	Kräfte gemäß FRP	Unter Realbedingungen erprobt	J
Stoffe				
K14	W	Grundsätzliche Verwendung von Leichtbau Konstruktionswerkstoffen	Ausnahmen sind technisch begründet	J
K15	F	Inerte Einhausung lösungsmittelhaltiger Substanzen		
Signale				
K16	F	Signalverarbeitung zur zeitlichen Steuerung mit gegebenem Interface zum Servicemodul	Schnittstelle zu C-Modul, Aktivierung von Trigger	J
K17	W	Redundanz durch einstellbare Timelines	Prozesssteuerung via Signale und Timelines	
Ergonomie				
K18	W	Mobile Probenumgebung im Late Access integrierbar. Keine elektronischen Werkzeuge	Mechanische Integration	J
K19	W	Möglichst wenig Bedarf an Werkzeug beim Probenintegrieren. Lösbare Normelemente gegen Verlust absichern	Nur Inbusschlüssel benötigt	J
Fertigung				
K20	F	Toleranzen nach 2768-1-f	Toleranzen sind auf technischen Zeichnungen vermerkt	J
Gebrauch				
K21	F	Volle Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb (auch ohne Rumpf)	Betrieb im Labor möglich	J
K22	F	Blasenfreies Befüllen der Mikroschwimmer Suspensionen ermöglichen	Bedarf Übung für Experimentator	J
K23	W	Manuelle und automatisierte Redispergierung	Mit separatem Steuergerät auch manuelles Pumpen ohne C-Modul möglich	J
Energie				
K24	F	Temperaturstabil auf $T_{\text{oi}} = 28 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$ bei Außentemperaturen von	Unter Realbedingungen erprobt	J

		$T_{\alpha_{\text{au\ss en,zul}}} = 15 \dots 40 \text{ } ^\circ\text{C}$		
K25	W	Messung und Protokollierung des Temperaturverhaltens der eingeschlossenen Atmosphäre während des Fluges	Sensor misst Innentemperatur und Druck	J
K26	W	Protokollierung der Temperaturregelung	Steuergerät speichert Log File	J
K27	F	Hauptsächliche Energieversorgung über Schnittstelle und SOMEX C	Über Schnittstelle	J
K28	F	Elektrischer Gesamtverbrauch ermitteln	In der Entwicklung beachtet	J
Kontrolle				
K29	F	Inbetriebnahme und Parameterermittlungen unter Laborbedingungen	Durchführung von Tests	J
K30	F	Bench- und Umwelttest in integriertem Zustand	Bestanden und dokumentiert	J
Transport				
K31	W	Transport im eingebauten Zustand im Rumpf	Transport im Gesamtmodul	J
Optik				
K32	F	Auflösung Mikroschwimmer: Mehrere Pixel pro Teilchen	Auflösung errechnet und experimentell überprüft und dokumentiert	J
K33	F	Belichtung Mikroschwimmer Polychromatisches und monochromatisches Licht Bei ca. 532 nm	Photometrische Vermessung	J
K34	F	Aufnahmefrequenzen: Entsprechend der Anforderungen der Diagnostik		
Sicherheit				
K35	F	Umgang mit Chemikalien (Lutidin 2,6) beachten. Entsprechende Maßnahmen umsetzen	Sicherheitsvorkehrungen getroffen	J
K36	F	Umgang mit Hochspannung beachten		J

K37	F	Schutz vor bewegter Mechanik		J
-----	---	------------------------------	--	---

Tabelle 26: Vergleich der Anforderungen mit den erreichten Ergebnissen des kolloidalen Experimentteils

Das gesamte Experiment wurde in seiner Geometrie dem zur Verfügung stehenden Bauraum angepasst und an die Stringer angeschraubt. Dabei befindet sich die Ebene für die mobilen Probeneinschübe im Zugangsbereich der Luke. Die Anforderungen an die Lichtstreuung, der Belichtung und der optischen Mikroskopie wurden erreicht, im Labor getestet und während Flüge erprobt. Die Kameras samt Mikroskope sind in allen drei Raumachsen verstellbar und können nachträglich an die Position der Probe angepasst werden. Dabei erfolgt die Höhenverstellung über ein Feingewinde, sodass der Fokus mit einem Livebild der Kameras und eingebauter Probe ausreichend präzise angefahren werden kann. Die Probenumgebung selbst wird auf eine temperierte Einheit eingeschoben und arretiert. Interne Membranpumpen in der Probeneinheit erweitern die Standzeitfähigkeit der Proben, sodass bei einem längeren Hold während eines Count Downs die Proben nicht ausgetauscht werden müssen. Ein Count Down Abbruch bedingt jedoch ein Austausch, da die Aktivität der Teilchen mit dieser Methode nicht endlos aufrechterhalten werden kann. Zum Einkoppeln des polychromatischen Lichts in die Zelle werden Homogenisatoren mit einer elektromechanischen Verstellung an die Zelle gekoppelt. Eine Mechanik verhindert dabei eine Beschädigung der Küvettendecke.

Das Experiment lässt sich sowohl im Laborbetrieb als auch vollautomatisiert im eingebauten Zustand bedienen. Eine Temperierungseinheit temperiert die Zellen auf ihre Solltemperatur. Eine federnde Lagerung sorgt dafür, dass die Komponenten in ihrem mechanisch zulässigen Betriebsintervall betrieben werden. Alle Stellgrößen werden durch das Steuerungsgerät erfasst und automatisch protokolliert.

Optisch aufgelöst und aufgezeichnet werden die Teilchen in Pixeldichte und Frequenz entsprechend ihrer Diagnostiken. Details zur Berechnung und experimentellen Überprüfung wurden aufgeführt. Eine polychromatische Lichtquelle wurde mit eigens konstruierter Optik entwickelt. Weiter wurden für die monochromatische Lichterzeugung neben dem speziell dafür ausgewählten Laserkopf Laseroptiken aufeinander abgestimmt und konstruktiv so gelagert, dass sie einer Raketentauglichkeit entsprechen und justierbar sind.

9.3 Bewertung des granularen Experimentteils

Nr.	F W	Anforderung	Bemerkung	Erfüllt
Geometrie				Ja [J], Nein [N]
G01	F	Gesamtmaße gemäß dem zur Verfügung stehenden Bauraum der permanenten Infrastruktur.	Experimentteil in E-Modul integriert	J
G02	F	Anbindung an Stringer		
G03	F	Laser und Kamera im 90° Winkel zueinander	Anordnung der Zelle legt Winkel fest	J

		Belichtung und Kamera im 90° Winkel zueinander		
		Kollimator und Laser im 90° Winkel zueinander		
G04	W	Vorzugsweise austauschbare Zelle	Über Positionierungszapfen ein- und ausbaubar	J
Kinematik				
G05	F	Durchströmung der Zelle mit Wasser als Medium	Pumpe fördert Wasser durch Zelle	J
G06	F	Justierbarkeit von Komponenten der Laseroptiken.	Alle Optikkomponenten des Lasers sind justierbar gelagert	
G07	F	Ein-/Ausbau der Zelle in Flugvorbereitungsphase	Durch Wechselmechanik möglich	J
G08		Einleitung von Stickstoff in die Probenzelle	Einleitung von Stickstoff durch Druckspeicher, Ventile und gesinterter Fritte in die Zelle	J
Kräfte				
G09	F	Kräfte gemäß FRP	Unter Realbedingungen erprobt	J
Stoffe				
G10	F	Grundsätzliche Verwendung von Leichtbau Konstruktionswerkstoffen	Ausnahmen technische begründet	J
G11	F	Stoffe der Probe: Strömungsmedium: Wasser Teilchen: Polystyrol, PTFE, Glas (SiO ²) Gas: N ²		
Signale				
G12	F	Signalverarbeitung zur zeitlichen Steuerung mit gegebenem Interface zum Servicemodul Redundanz durch einstellbare Timelines	Schnittstelle zu C-Modul	J
Ergonomie				
G13	F	Zugänglichkeit im integrierten Zustand zu Verbrauchsmedien:	Über Anschlusspaneel erreichbare Kupplungen	J

		Wasser austauschbar, Gas nachfüllbar	zum Austausch und Befüllen der Arbeitsmedien	
G14	W	Einbau der Zelle mit positionshaltender Aufnahme	Positionierzapfen ermöglichen redundante Positionierung	J
Fertigung				
G15	F	Toleranzen nach 2768-1-f	Toleranzen in technischen Zeichnungen vermerkt	J
Gebrauch				
G16	F	Volle Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb (auch ohne Rumpf)		J
G17	F	Integration in Rumpf ohne Veränderung innerer Bauteile →Nach abschließendem Test ausschließlich Integration		J
G18	W	Wechsel der Medien im eingebauten Zustand	Paneel mit Kupplungen ermöglichen Austausch der Medien	J
G19	F	Kontrollierte Gaseinleitung mit Volumenkompensation	Wechselbarer Beutelträger mit Infusionsbeutel zur Volumenkompensation	J
Energie				
G20	F	Hauptsächliche Energieversorgung über Schnittstelle und SOMEX C	Energieversorgung über Schnittstelle	J
G21	W	Kapazität der Batterien an Verbrauch anpassen		J
Kontrolle				
G22	F	Hydraulisches System auf Dichtigkeit prüfen	Dichtigkeit nachgewiesen	J
G23	F	Prüfnachweise Druckbehälter	Nachweise liegen vor	J
Transport				
G29	F	Transport in der Gesamtanlage: Transportschäden sind durch geeignete Transportbehältnisse auszuschließen	Transport im Gesamtmodul	J
Optik				
G30	F	Auflösung Kamera: 3 MP	Microtron CXP3	J
G31	F	Aufnahmefrequenz Kamera: 500 fps		J

G32	F	Lasereigenschaften: Wellenlänge: 532 nm Leistung: 500 mW Strahlformung	Kohärenter Laser mit strahlformender Optik	J
G33	F	Belichtung für Kamera: Wellenlänge: 420 – 490 nm Leistung:	Blaue High Power LED Beleuchtung	J
G34	F	Justierbarkeit optischer Komponenten zueinander	Mechanische Lagerungen mit Justiermöglichkeiten	J
Sicherheit				
G35	F	Umgang mit Laser: Maßnahmen beachten		J

Tabelle 27: Vergleich der Anforderungen mit den erreichten Ergebnissen des granularen Experimentteils

Wie auch der kolloidale Experimentteil wurde der granuläre Experimentteil in seiner Geometrie dem Bauraum angepasst. Das gesamte Experiment wurde beidseitig mit Ausnahme der Kamera und Optik auf ein Bord gebaut, was über Winkel an den Stringer montiert werden kann. Damit ist es auch separat im Labor zu betreiben. Dies stellt einen Vorteil für die Justagearbeiten dar. Die Zelle selbst ist auf ihre Diagnostik ausgerichtet konstruiert. Positionierzapfen sorgen für eine reproduzierbare Position nach einem erneuten Ein- und Ausbau. Dabei lassen sich zwei unterschiedliche Arten von Zellen einbauen. Eine Pumpe sorgt für das Durchströmen bzw. Umwälzen der Zelle mit Wasser. Im ersten Fall können über einen Injektor und vorgeschaltetem Ventil Partikel zielgerichtet in die Zelle eingebracht werden. Stickstoff kann über ein Gasventil von einem Gastank über eine in der Zelle montierte Fritte eingeleitet werden und dort Gasblasen erzeugen. Der Kontakt mit Wasser stellt erhöhte Anforderungen an die Konstruktion mit Leichtbauwerkstoffen. Unbehandelte Aluminiumlegierungen neigen zur Eloxalbildung. Kleine Partikel des Eloxals können sich lösen und so als Lichtstreuer fungieren. Diskutiert wurden mehrere Lösungen, von Nirosta Stählen über Titanlegierungen hin zu Eloxieren Aluminium Knetlegierungen. Letzteres hat sich als funktionsfähig und als ökonomischste Variante bewiesen.

Gesteuert werden kann das Experiment durch manuelle Vergabe von Signalen, manueller Ansteuerung einzelner Komponenten oder vollautomatisch in einem vorprogrammierten Prozessablauf.

Das Austauschen des Mediums kann über an ein durch die Luke zugängliches Panel über hydraulische Kupplungen erfolgen ohne dabei direkten Zugang zur Zelle zu haben.

Eine durch die Luke einbaubare Volumenkompensationseinheit erlaubt die Gaseinleitung in ein starres, nicht druckdichtes System, indem entweder von Beutel zu Beutel gepumpt werden kann oder das zusätzliche Volumen trocken aufgefangen wird.

Mit der verbauten Hochgeschwindigkeitskamera und dem Speichersystem lassen sich hochauflösende Aufnahmen entsprechend der Anforderungen aufnehmen. High Power LEDs sorgen für eine ausreichende Belichtung. Dabei wird in einem dem Laser unterschiedlichen Wellenlängenbereich belichtet, sodass beide Lichtquellen für die Diagnostik unterschieden werden kann.

9.4 Zusammenfassung

Basis für die Bewertung der konstruierten Anlage sind die zuvor festgehaltenen Anforderungen, die mit den erreichten Resultaten verglichen worden sind. Wie eingangs erwähnt handelt es sich beim Bau von experimentellen Anlagen auf der Forschungsplattform MAPHEUS um Prototypen, die mit ihrer Entwicklungsgeschwindigkeit und Zulassung bzw. Prüfung der einzuhaltenden Sicherheitsmaßnahmen einen schnellen und im Vergleich kostengünstigen Zugang zur Forschung unter Mikrogravitationsbedingungen bieten. Mit diesen Vorteilen gehen naturgemäß auch Nachteile einher. Eine vollständig benutzerfreundliche Handhabung wie sie in heutigen Serienfertigungen zu finden sind sowie eine äußerst zuverlässige technische Umgebung samt automatischer Fehlerdiagnostik und -Behebung sind in diesem Zusammenhang minderpriorisiert. Viele der anfangs gestellten Anforderungen mussten auf Grund der geplanten fehlenden und zeitaufwendigen Machbarkeitsstudie erst im Labor auf ihre prinzipielle Machbarkeit hin untersucht werden. Ebenso Methoden, die zum Erreichen der Ziele führen, mussten entwickelt werden.

Technisch erfüllt die Anlage alle Ziele, die im Detail beschrieben worden sind. Nach dem ersten Flug wurden im Rahmen einer Post-Flight Analyse Erkenntnisse und Lehren gezogen, die die Anlage benutzerfreundlicher zu gestalten. Diese Erkenntnisse wurden umgesetzt. Das Prozessieren der Proben, das Austauschen von defekten Komponenten, das Ein- und Ausbauen der Anlage in den Rumpf wurden in den dafür notwendigen Schritten sicherer und zuverlässiger gestaltet.

Mit der modularen Gestaltung können unterschiedliche Experimente an weicher Materie umgesetzt werden und in die Anlage integriert werden. Dabei wird die gemeinsame Infrastruktur genutzt und zeitliche und materielle Ressourcen geschont.

10 Ausblick

Das Experiment ist auf den Missionen MAPHEUS 11 im Juni 2021, MAPHEUS 9 im Dezember 2021 und MAPHEUS 12 im Oktober 2022 erfolgreich geflogen. Dabei wurden in den ersten beiden Flügen im kolloidalen Teil Mikroschwimmer und im granularen Teil zunächst Gasblasen und Teilchen im Vergleich, nach einer Modifikation halbseitig beschichtete Teilchen untersucht. Im dritten Flug wurde in Kooperation mit dem Leibniz Institut für neue Materialien der kolloidale Teil zur Untersuchung von Gold-Nanoteilchen angepasst. Unter der Projektbezeichnung „ARNIM“ wurden Teilchen aus Gold in einer vorgewärmten Lösung aus Decan in eine kühlere Umgebung durch ein getrenntes pneumatisches System während der Mikrogravitationsphase befördert, wo sie Agglomerate bildeten. Dieser Prozess konnte mit der vorhandenen optischen Diagnostik analysiert werden.

Mit der Umsetzung des Projektes konnte die Modularität der Experimentplattform gezeigt werden.

Es ist geplant, eine weitere Modifikation des Experiments im Februar 2024 auf MAPHEUS 14 zu fliegen. Dabei soll ein Mikroskopobjektiv durch eins mit höherer numerischer Apertur ersetzt und die Winkel der Lichtleiterfaserhalterungen verändert werden.

Weiterhin hat bereits die Entwicklung eines Epifluoreszenz Mikroskops mit einem Inkubator begonnen. Mit diesem Experiment sollen biologische Zellen untersucht werden, die zur Untersuchung unter atmosphärischen Bedingungen die Möglichkeit haben erst während des Late Access integriert zu werden. Ein solches Umfeld samt den dazugehörigen Servicesystemen bietet die in dieser Arbeit entwickelte Plattform.

Neben diesen zwei vorgestellten Projekten bietet sich die Experimentplattform für potentiell viele weitere Forschungsgegenstände zur weichen Materie an, die mittels Lichtstreuungsmethoden untersucht werden.

11 Zusammenfassung

Einleitend wurde das Potential der Forschung unter Mikrogravitation und die daraus resultierenden Erkenntnisgewinne mit ihrem Mehrwert beschrieben. Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung einer Experimentumgebung, die eine solche Forschung ermöglicht, sodass die angestrebten Ziele in ihrem bis dahin bekannten Umfang und das methodische Vorgehen dahin aufgeführt werden. Unterschiedliche Plattformen, die solche Möglichkeiten bieten, wurden mit ihren Vor- und Nachteilen veranschaulicht und verglichen. Dabei wurde die für diese Arbeit wesentliche Umgebung einer Höhenforschungsrakete näher betrachtet. Physikalische Grundlagen sowie bekannte Methoden zur Lichtstreuung wurden in ihren Prinzipien ergründet, um ein Verständnis für später folgende Beschreibung der Entwicklung der Experimente zu erlangen. Die Entwicklungsphasen gliedern sich über mehrere Kapitel hinweg in die Aufstellung der Anforderungen, der Analyse, Funktionsstrukturen, prinzipielle Lösungsmöglichkeiten sowie deren Bewertungen nach vorher diskutierten Kriterien, der konstruktiven Umsetzung und der vorgegriffenen Synthese aller Subsysteme. Ein Unterschied zur klassischen Entwicklung technischer Produkte besteht darin, dass nicht alle Anforderungen in einem Pflichtenheft anfänglich zusammengestellt werden können, da es schlichtweg an Wissen fehlt, wie eine Umsetzung zu gestalten ist. Diese Lücken müssen rechnerisch oder empirisch herausgefunden werden, sodass sich die Anforderungen von zerlegten Subsystemen und Möglichkeiten im synthetisierten System in iterierenden Entwicklungsprozessen wiederfinden. Die dem Gesamtsystem direkt untergeordneten Subsysteme sind der kolloidale Experimentteil, der granulare Experimentteil, das C-Modul mit seinen modular nutzbaren Diagnose und Servicesysteme und die mechanische Struktur des Moduls, welches unter Beachtung einer Druckdichtigkeit Late Access fähig zu sein hat.

Mit der Entwicklung des C-Moduls, welches über der eigentlichen Experimentierumgebung behaust wird, wurde der Anforderung der Modularität anderer potentieller Lichtstreuexperimente entgegengekommen. Es beheimatet die gängigen Komponenten solcher Experimente, welche ebenfalls den rauen Umweltbedingungen eines Fluges an Bord einer Höhenforschungsrakete nach ihrer Modifikation standhalten. Als kompakte Einheit bietet es mit seiner Relaisbox und dem Steuergerät unterschiedlichste Möglichkeiten elektrische Schaltkreise auf verschiedene Spannungslevels, bereitgestellt durch DCDC Wandler, zu schalten. Die Signale des Service Moduls der Rakete werden dort verarbeitet und sind durch Optokoppler von diesem galvanisch getrennt. Zwei nach den Anforderungen der Experimente konfigurierte Bordrechner bieten neben der Datenspeicherung die Möglichkeit Software für weitere Subsysteme zu installieren und autark laufen zu lassen. Mittig platzierte Batterien versorgen die gesamte Anlage mit der ermittelten notwendigen elektrischen Energie während des Fluges. Mit dem Anschluss der Kommunikationsschnittstelle an das Umbilical, lassen sich Steuergerät und Bordrechner per Remoteverbindung von einem Bodenrechner kontrollieren und Einstellungen für den Flug vornehmen.

Um der Anforderung einer druckdichten Experimentumgebung und gleichzeitigem Zugang zum Experiment während eines Late Access gerecht zu werden, wurde ein neuartiges Konzept erarbeitet und konstruktiv umgesetzt. Dazu musste eine druckdicht zu verschließende Luke mit Schnellverschlussmechanik entwickelt werden, durch die auch die Geometrie des Rumpfes und dessen Anbauteilen beeinflusst wurde. Ein automatisch schließender Hitzeschild schützt die elektrischen Konnektoren im Umbilical vor Zerstörung durch den hohen thermischen Eintrag während der Aufstiegsphase und dem Wiedereintritt in die Erdatmosphäre. Sowohl die Luke als auch das Umbilical wurden beim Deutschen Patentamt angemeldet.

Zur Entwicklung des kolloidalen Experimentteils wurde dieser weiter in Subsysteme gemäß ihrer angestrebten Funktionserfüllung zerlegt. Technische Lösungen zur Behausung und Temperierung der Suspension führten zu mobilen Einschüben mit anpressdruck-geschützten Temperierungseinheiten. Der für die Prozessierung notwendige Laser wurde mit seinen Komponenten so gelagert, dass diese zielführend zur Strahlformung justiert und eingestellt werden kann. Aufbauend auf zuvor errungenen Erkenntnissen zur Nutzung von LED Lichtquellen als Treiblicht, wurde eine kompaktere und präzisere Lichtquelle entwickelt, die ihre Homogenisatoren in Form von Konen über Feder gelagerte Anpressschutzvorrichtung zerstörungsfrei auf die Küvetten koppeln. Die Komponenten der Mikroskope wurden ihren Anforderungskriterien ausgesucht und mechanisch justierbar konstruiert. Dabei wurden auch die Anforderungen aus den hohen Datenströmen für das Speichersystem dargestellt und entsprechende Möglichkeiten gefunden.

Bei dem granularen Experimentteil wurden zwei unterschiedliche Zellen beschrieben, die jedoch nur geringfügige Änderungen am gesamten Subsystem erforderten. Neben den optischen Komponenten der Laserführung und -formung wurden auch die Komponenten weiterer Diagnostik mit ihrer Fixierung gezeigt. Die technisch verwobenen pneumatischen und hydraulischen Systeme erfordern weitere Überlegungen in ihrem funktionalen Zusammenspiel. Aufgrund der produzierten Datenströme ist das Speichern auf klassischen PCs nicht möglich, sodass ein separates Speichersystem raketentauglich modifiziert und integriert wurde.

Die Steuerung der Anlage wurde in der praktischen Handhabung beschrieben. Dabei wurden ausgewählte Schaltkreise, die diese Steuerungen elektrisch umsetzen gezeigt, um ein Hintergrundverständnis der Bedienung zu erlangen. Bedienfelder des Steuergeräts und einige Einstellmöglichkeiten der Diagnosesysteme wurden exemplarisch an Hand des Erstfluges aufgeführt.

Die sequentiellen Abfolgen einzelner Schritte zur Vorbereitung und Durchführung einer Raketenkampagne zeigen im Anschluss die Komplexität und Notwendigkeit interdisziplinärer Zusammenarbeit. Der dem Flug vorangehende Count Down führt die einzelnen Schritte bis zur Flugfähigkeit in zeitlich präziser Abfolge. Das Aufzeigen kritischer Stellen und die Notwendigkeit eines Count Down legen das Zusammenspiel aller für den Flug notwendigen Systeme der Rakete dar.

Unter Beachtung der Zielstellung eine Anlage zu entwickeln, die die technische Möglichkeit einer Experimentierumgebung zu Verfügung stellt, wurde auch der Fokus der Ergebnisse auf die technischen Systeme sowie deren Beitrag zur Zielerreichung gelegt. Die technische Funktionsfähigkeit konnte bisher auf drei Flügen nachgewiesen werden. Dabei wurden die planmäßigen Ausführungen der Subsysteme betrachtet und deren Zusammenspiel begutachtet. Die wissenschaftlichen Ergebnisse werden nur kurz angerissen und sollen keinen Teil der Arbeit darstellen.

Die technischen Ergebnisse werden anschließend bewertet. Verbesserungspotentiale und deren Umsetzung auf dem folgenden Flug zeigen die Wirkung der neuen Modifikationen. Es hat sich gezeigt, dass die Gaseinleitung in Schwerelosigkeit schwer zu kontrollieren ist. Auch die Wahl der Zahnradpumpe führt zu einem Mehraufwand durch das zusätzliche Entgasen von Wasser während der Probenvorbereitung. Die prinzipielle Funktionsfähigkeit der gesamten Anlage sowie die Modularität hinsichtlich anderer Experimente konnten im Vorgriff auf Arnim II bestätigt werden. Konkrete Vorschläge zur weiteren Verwendung sind zu Zeit mit Arnim III und einem Epifluoreszenz-Mikroskop bereits in Entwicklung.

Anhang

- Anhang A - Herleitung der Linsengeometrie
- Anhang B - Auswahl des Harzes
- Anhang C - Bestimmung der Brechzahlen
- Anhang D - Anmerkungen zu Eloxiervorgaben der Rumpfsektionen
- Anhang E - Maß- und Toleranzvorgaben zur Konstruktion der Rumpfsektionen
- Anhang F - Bilder zur Verdeutlichung

Anhang A – Herleitung der Linsengeometrie

Nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz ist

$$n_1 \sin(\delta_1) = n_2 \sin(\delta_2),$$

wobei n_i die Brechungsindizes und δ_i die Brechwinkel zum Lot hin beschreiben.

Für den Grenzwinkel der Totalreflexion gilt

$$\theta_G = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

Aufgrund der Rotationssymmetrie der Linsen dürfen weitere Betrachtungen im Schnitt durch die Symmetrieachse vollführt werden. Um eine Totalreflexion und damit Verluste beim Eintritt in die Linse zu vermeiden, muss der äußerste Lichtstrahl des Lichtkegels einen zum Lot der Eintrittsfläche kleineren Winkel haben als der Grenzwinkel des Linsenmaterials.

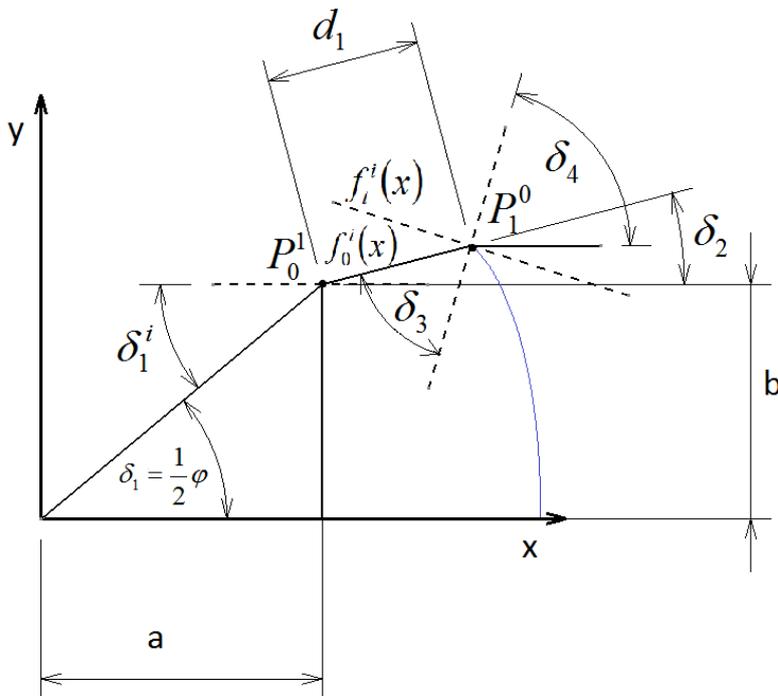


Abbildung 114: Skizze zur geometrischen Überlegung

Aus Abbildung 114 wird der Zusammenhang zwischen dem Abstrahlwinkel φ und dem Eintrittswinkel δ_1 ersichtlich:

$$\delta_1 = \frac{1}{2}\varphi.$$

Um den Abstand a der LED zur Linse so klein wie möglich zu halten, soll die Linseneintrittsfläche plan sein. Der Lichtkegel wird in dicht benachbarten Lichtstrahlen

aufgeteilt. Für jeden Strahl mit dem Winkel δ_1^i ergibt sich unter Einbindung der trigonometrischen Sätze ein Schnittpunkt P_0^i auf der Planfläche zu

$$P_0^i = (x_0^i | y_0^i) = (a | a \cdot \tan \delta_1^i).$$

Sei nun $\delta_1^{i+1} = \delta_1^i + \Delta\delta$, dann ist für den dicht benachbarten Punkt auf der Planfläche

$$P_0^{i+1} = (x_0^{i+1} | y_0^{i+1}) = (a | a \cdot \tan \delta_1^{i+1}).$$

Mit der Festlegung von d_1 , ein Konstruktionsparameter, der mit der Dicke des späteren Montageanschlags zusammenhängt, lässt sich nun der Punkt P_1^0 auf der gekrümmten Fläche beschreiben mit

$$P_1^0 = (x_1^0 | y_1^0) = (a + d_1 \cdot \cos \delta_2^0 | a \cdot \tan \delta_1^0 + d_1 \cdot \sin \delta_2^0).$$

Für die Berechnung des benachbarten Punkts P_1^{i+1} auf der gekrümmten Fläche, müssen weitere Überlegungen getroffen werden.

Mit der Annahme eines Brechungsindex für Luft von $n_1 = 1$ lässt sich die Beziehung

$$\frac{\sin \delta_4}{\sin \delta_3} = n_2$$

für den Brechungsindex des Materials der Linse aus dem Snelliusschen Gesetz aufschreiben. Weiterhin soll die Linse die Lichtstrahlen kollimieren, d. h. alle Strahlen verlassen die Linse parallel zur x-Achse. Mit Betrachtung des Brechlots wird schnell ersichtlich, dass auch

$$\delta_4 = \delta_2 + \delta_3$$

gelten muss. Beim Ansatz δ_4 zu eliminieren wird unter Anwendung der Additionstheoreme

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\delta_2 + \delta_3)}{\sin \delta_3} = n_2 &= \frac{\sin \delta_2 \cdot \cos \delta_3 + \cos \delta_2 \cdot \sin \delta_3}{\sin \delta_3} \\ \Leftrightarrow \frac{\sin \delta_2 \cdot \cos \delta_3}{\sin \delta_3} + \cos \delta_2 &= n_2 = \frac{\sin \delta_2}{\tan \delta_3} + \cos \delta_2. \end{aligned}$$

Weitere Umformung ergibt schließlich

$$\delta_3 = \arctan \left(\frac{\frac{\sin \delta_1}{n_2}}{n_2 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \delta_1}{n_2} \right) \right)} \right).$$

Mit δ_3 ist die Steigung der Lote an den Punkten P_1^i in ausschließlicher Abhängigkeit vom Brechungsindex des Linsenmaterials und den Abstrahlwinkeln der LED beschrieben. Für die Winkel der senkrecht auf den Loten stehenden Tangenten gilt

$$\varphi_i = \delta_3 - 90^\circ.$$

Mit den bereits berechneten Punkten P_0^i und den Winkeln $\delta_2^i = \frac{\sin \delta_1^i}{n_2}$ lassen sich die Geraden

$f_0^i(x)$ konstruieren, die die Strahlengänge in der Linse beschreiben:

$$f_0^i(x) = y_0^i + \tan(\delta_2^i) \cdot (x - x_0^i),$$

mit $x_0^i = a$ und $y_0^i = a \cdot \tan \delta_1^i$.

Der Punkt P_1^{i+1} liegt demnach auf der Geraden $f_0^{i+1}(x)$. Ist $\Delta\delta$ klein genug, soll in einer Annäherung nun die Bedingung gelten, dass die Tangente des benachbarten Punktes P_1^i die Gerade von P_1^{i+1} schneidet. Die Tangenten berechnen sich zu

$$f_t^i(x) = y_1^{i-1} + \tan(\varphi_i) \cdot (x - x_1^{i-1}).$$

Für die Koordinaten der gekrümmten Fläche muss also gelten:

$$f_0^{i+1}(x) = f_t^i(x),$$

mit dem durch d_1 vorgegebenen Startpunkt.

Einsetzen führt zu

$$y_0^{i+1} + \tan(\delta_2^i) \cdot (x - x_0^{i+1}) = y_1^i + \tan(\varphi_i^{i+1}) \cdot (x - x_1^i).$$

Weitere Umformungen ergeben schließlich für die x-Koordinaten

$$x^i = \frac{y_1^i - \tan(\varphi_i^{i+1}) \cdot x_1^i - y_0^{i+1} + \tan(\delta_2^i) \cdot x_0^{i+1}}{\tan \delta_2^i - \tan \varphi_i^{i+1}}.$$

Durch einsetzen von x^i in $f_0^i(x^i)$ findet man die zum Punkt P_1^i zugehörige Koordinate y^i .

Die hier dargestellten Zusammenhänge werden in Excel programmiert und für $\Delta\delta = 0,1^\circ$ ergeben sich $i = 400$ Strahlengänge. Die berechneten Punkte werden geplottet und zeigen einen Viertelschnitt der Linse. Lässt man diesen Schnitt um die x-Achse rotieren, ist die gesamte Geometrie der Linse bestimmt, die notwendig ist, um das von der LED emittierte Licht zu kollimieren.

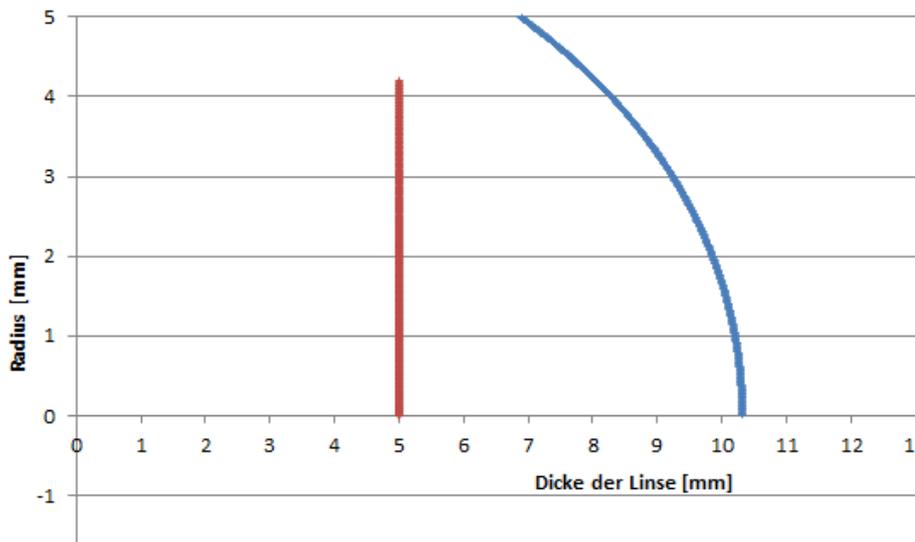


Abbildung 115: Plot der Koordinaten der Kollimatorlinsen

Das kollimierte Licht soll nun gebündelt werden. Da die in die Sammellinse einfallenden Strahlen parallel auftreffen, vereinfacht sich das Berechnen der gekrümmten Seite, wenn die plane Seite in Richtung der parallelen Strahlen zeigt. Fällt das Lot mit dem Strahl zusammen, wird das Licht nicht gebrochen. Die Strahlengänge werden also nur einmal an der gekrümmten Seite gebrochen.

Im ersten Schritt muss der maximale Durchmesser der funktionalen Geometrie bestimmt werden. Ausschlaggebend dafür sind die Anzahl der LEDs sowie der damit verbundene Platzbedarf für die Kollimatoren. Mit der Möglichkeit der Montage der Kollimatoren, wird diesen ein Platzbedarf mit einem jeweiligen Durchmesser von $d_{koll} = 15 \text{ mm}$ zugesprochen. Bei enger Anordnung von sieben LEDs findet man unter Berücksichtigung der Montierbarkeit einen Radius für die Funktionsfläche der Sammellinse von $r_{sam} = 22 \text{ mm}$.

Abbildung 116 verdeutlicht die zur Herleitung getroffenen Überlegungen.

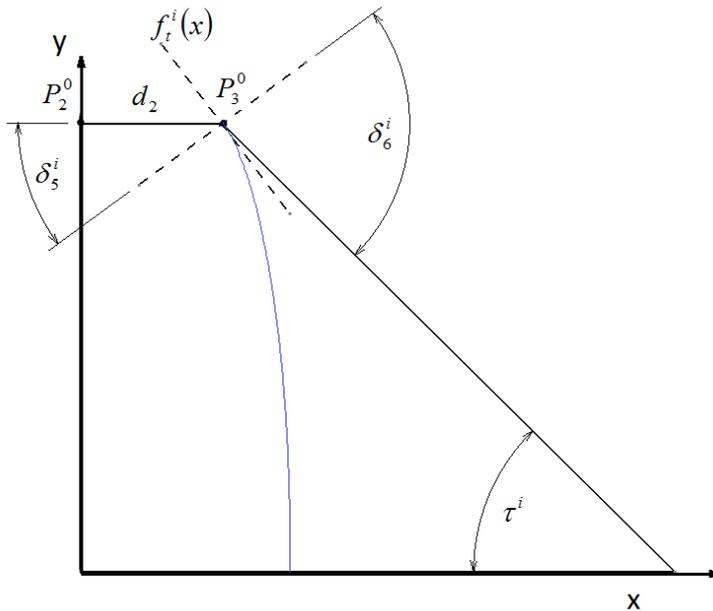


Abbildung 116: Skizze zur geometrischen Überlegung

Zur besseren Übersicht wird die Ordinate auf die Planfläche der Linse gelegt. Der äußerste kollimierte Lichtstrahl tritt am Punkt $P_2^0 = (0 | r_{sam})$ in die Linse ein und verlässt diese am Punkt $P_3^0 = (d_2 | r_{sam})$, wobei d_2 wieder einen Konstruktionsparameter darstellt. Die Winkel τ^i stehen in Abhängigkeit zu den Koordinaten von P_3^i :

$$\tan \tau^i = \frac{y_3^i}{f - (x_3^i - d_2)} \Rightarrow \tau^i = \arctan \left(\frac{y_3^i}{f - x_3^i + d_2} \right).$$

Aus dem Snelliusschen Gesetz lässt sich der Zusammenhang

$$n_2 = \frac{\sin \delta_6^i}{\sin \delta_5^i}$$

herleiten. Weiter wird ersichtlich, dass

$$\delta_6^i = \delta_5^i + \tau^i$$

darstellt. Damit lässt sich durch Einsetzen δ_6^i eliminieren:

$$n_2 = \frac{\sin(\delta_5^i + \tau^i)}{\sin \delta_5^i}.$$

Unter Anwendung der Additionstheoreme lässt sich der Ausdruck umformen zu:

$$n_2 = \frac{\sin \delta_5^i \cdot \cos \tau^i + \cos \delta_5^i \cdot \sin \tau^i}{\sin \delta_5^i} = \cos \tau^i + \frac{\cos \delta_5^i \cdot \sin \tau^i}{\sin \delta_5^i}$$

$$\Rightarrow n_2 = \cos \tau^i + \frac{\sin \tau^i}{\tan \delta_5^i} \Leftrightarrow \tan \delta_5^i = \frac{\sin \tau^i}{n_2 - \cos \tau^i}.$$

Für die Winkel δ_5^i ergibt sich schließlich

$$\delta_5^i = \arctan\left(\frac{\sin \tau^i}{n_2 - \cos \tau^i}\right),$$

womit diese nur noch in Funktion $\delta_5^i = f(f, P_3^i, d_2)$ stehen. Sie geben die Steigung des Brechlots an. Die senkrecht auf dem Lot stehenden Tangenten haben die Steigung

$$g_t^i = -(\delta_5^i + 90^\circ)$$

und errechnen sich unter der Annahme einer hinreichenden Näherung zu

$$f_t^i(x) = y_3^{i-1} + \tan g_t^i \cdot (x - x_3^{i-1}).$$

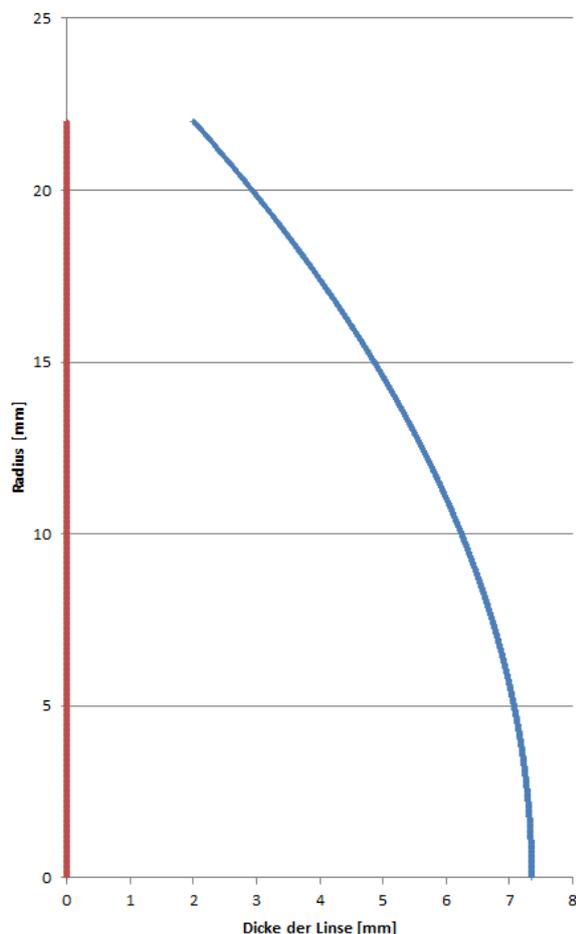


Abbildung 117: Errechnete Koordinaten der Sammellinse

Mit dem bereits geometrisch bedingt festgelegten Punkt P_3^0 und einer Schrittweite Δy_3 lassen sich nun in Analogie zu den Kollimatoren alle Punkte berechnen und wieder in Excel programmieren. Abbildung 117 zeigt die geplotteten Punkte der Berechnung.

Den zwei dargestellten Berechnungen ging die Bestimmung der Brechzahl des Linsenmaterials voraus. Die experimentelle Bestimmung der Brechzahl wird in weiter im Anhang beschrieben.

Anhang B – Auswahl des Harzes

Zur Bestimmung eines geeigneten Harzes werden unterschiedliche Gießharze miteinander verglichen. Dazu werden Gießlinge in eine Form gegossen und auf unterschiedliche Aspekte hin untersucht.

Vorgehen

1. Reinigung der Gussform mit Aceton und gründlichen Ausspülen mit Wasser
2. Trocknung durch Druckluft (nicht mechanisch!)
3. Abdeckung der Gießling Taschen 11 – 16
4. Auftrag des Trennmittels auf Gießling Taschen 21 – 26
5. Sequenzielles Anrühren der Harze und Füllen der Gießling Taschen
6. Zum Anrühren
 - a. Gereinigtes Becherglas (trocken ohne Tuch!) auf Waage stellen
 - b. Abwiegen der Harz- und Härtermengen gem. Datenblatt
 - c. Rührwerkzeug und Akkuschauber zum Durchmischen
 - d. Abgießen
 - e. Reinigung mit Aceton, Spülen mit deionisiertem Wasser, Lufttrocknung
 - f. Nächstes Harzsystem
7. Abbindezeit 8 Tage
8. Entnahme der Gießlinge durch Abfräßen des Bodens. Entnahme durch Abdrückgewinde nicht möglich. Gießlinge sitzen so fest in den Taschen, dass sich die Schrauben in das Harz drücken
9. Rauspressen der Gießlinge durch Presse
10. Polieren der Planflächen: Nassschleifen mit P2500, anschließend mit P4000
11. Polieren der halben konvexen Fläche
12. Positionierung auf Laservermessungsapparat (Laser, rot, 4 mW)
13. Messung der Austrittswinkel zum Lot unter den Eintrittswinkel 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°
14. Übertrag in Excel-Tabelle und Ermittlung einzelner Brechungsindizes
15. Minimalster und Maximalster Wert entfernen und arithmetischer Mittelwert der verbliebenen Brechungsindizes vornehmen
16. Vergleich mit Vergleichsmessung auf Plausibilität

Positionierung

Taschen 11- 16 unbeschichtet

Taschen 21 – 26 mit Trennmittel (siehe Lieferschein) beschichtet

11/21: SKresin 2K

12/22: SKresin 3210

13/23: SKresin 72

14/24: SKresin P34

15/25: EP (alter verwendeter Harz) 15 bei Entnahme zerstört

16/26: leer

Handhabung

	11/21	12/22	13/23	14/24	15/25
Gießbarkeit	Noch tragbar	gut			schwierig
Verarbeitungszeit	Wenige Minuten	Mehrere Stunden			
Abbindezeit	1 Tag	8 Tage			
Verhalten mit Trennmittel	Keine Auffälligkeiten/ Trennen nicht möglich (siehe Erläuterung)				
Polierbarkeit	gut	Sehr gut	gut	schlecht	
Mischungsempfindlichkeit	Relativ unempfindlich				empfindlich

Table 28: Testergebnisse der Aspekte der Gießlinge

Die Entnahme der Gießlinge war auch mit der Verwendung des Trennmittels nicht möglich. Die Funktion des Trennmittels konnte nicht festgestellt werden. Eine mögliche Ursache liegt in der relativ rauen Oberfläche der Taschenseitenwände, die nach dem Fräsen nicht poliert wurden. Durch die vergrößerte Oberfläche als auch der eingreifenden Riefen könnte die Haftung so verstärkt worden sein, dass eine Entnahme ohne Beschädigung der Gießlinge oder Abfräsen des Bodens nicht mehr möglich war. Dies müsste jedoch durch weitere Versuche bestätigt werden.

Optische Qualität

	11/21	12/22	13/23	14/24	15/25
Schlieren	Keine	Keine	Deutlich	keine	Deutliche Schlieren im Material erkennbar
Oberflächenbeschaffenheit	Grundsätzlich gut; bei vorzeitigem Kontakt mit Wasser (Schleifen) entsteht eine irreversible Trübung der Oberfläche				
Schrumpf	Sehr hoch	gering			
Festigkeit	Mittel	Hoch	Hoch	Elastisch	Mittel
Klebrigkeit	Mittel	Keine	Keine	Hoch	mittel
Blasenbildung	Blasen sammeln sich oben	Viele homogen verteilte Blasen	Wenig homogen verteilte Blasen	Viele Blasen	Wenig Blasen aber Risse in Oberfläche
Brechungsindex (arith. gemittelt)	1,49/1,51	1,60/1,61	1,62/1,55	1,55/1,53	-/1,58

Table 29: Testergebnisse der optischen Qualität der Gießlinge



Abbildung 118: Gussform der Gießlinge

Anhang C – Bestimmung der Brechzahlen

Das Verfahren zur Bestimmung der Brechzahlen wurde im Rahmen einer Vorarbeit durchgeführt (27).

Zur Bestimmung der Brechzahlen werden die Gießlinge einzeln auf eine Winkelschablone positioniert. Mit einem Laser wird das Zentrum des Gießlings anvisiert. Der Winkel des gebrochenen Strahls lässt sich ablesen.

Mit dem gemessenen Grenzwinkel der Totalreflexion $\theta_G = 40^\circ$ lässt sich nun die Brechzahl ermitteln zu

$$n_2 = \frac{1}{\sin\theta_G} = 1,56.$$

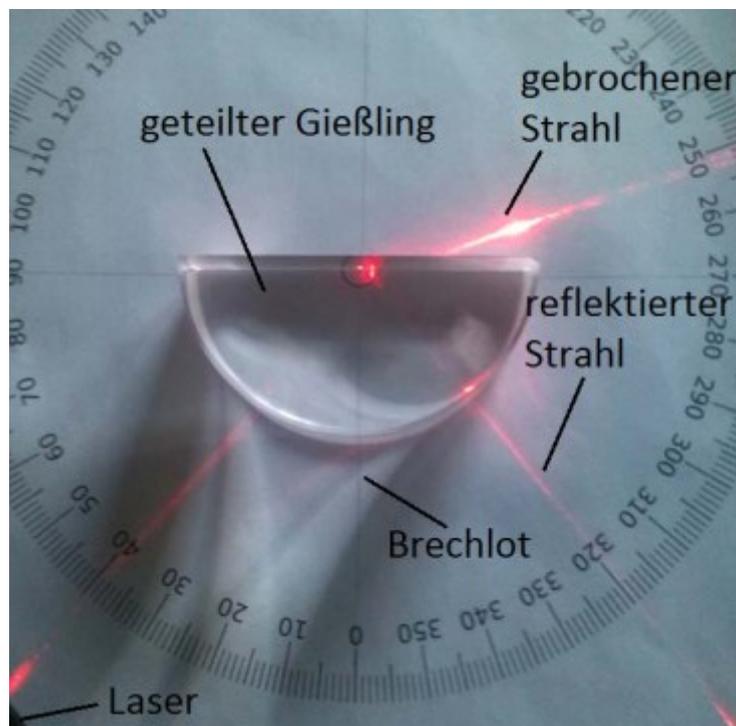
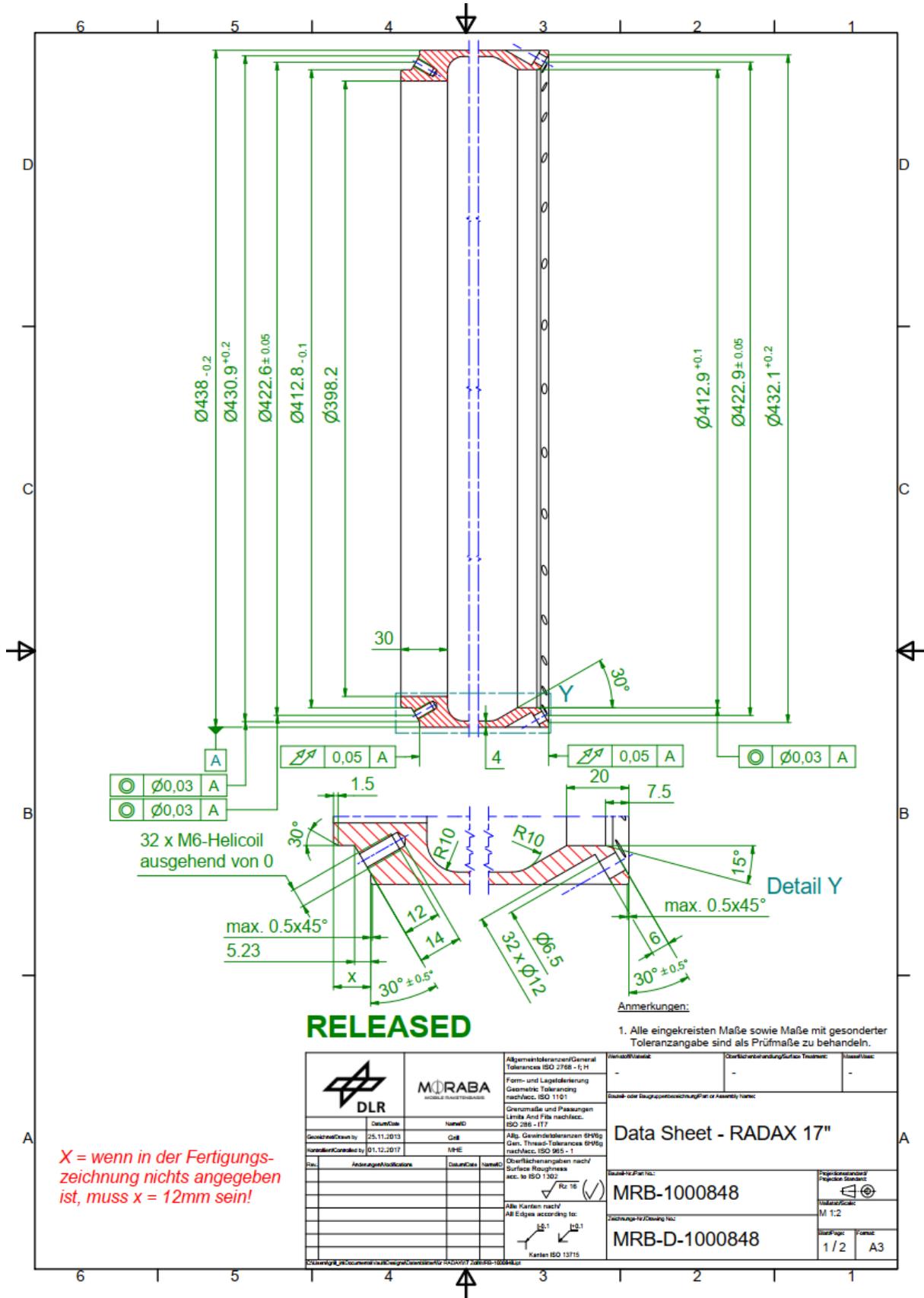


Abbildung 119: Ermittlung der Brechzahlen der Gießlinge

Anhang E – Maß- und Toleranzvorgaben zur Konstruktion der Rumpfsektionen



X = wenn in der Fertigungszeichnung nichts angegeben ist, muss x = 12mm sein!

		Allgemein-toleranz/General Tolerances ISO 2768 - F; H	Form- und Lagertoleranz Geometrische Toleranz nach VDI 2263	Datum/Date: 25.11.2013 Gezeichnet/Drawn by: MHE Konstruiert/Constructed by: 01.12.2017	Projekt/Project: MRB-1000848 Zeichnung/Drawing No.: MRB-D-1000848
		Form- und Lagertoleranz Geometrische Toleranz nach VDI 2263	Datum/Date: 25.11.2013 Gezeichnet/Drawn by: MHE Konstruiert/Constructed by: 01.12.2017	Projekt/Project: MRB-1000848 Zeichnung/Drawing No.: MRB-D-1000848	

Anhang F – Bilder zur Verdeutlichung

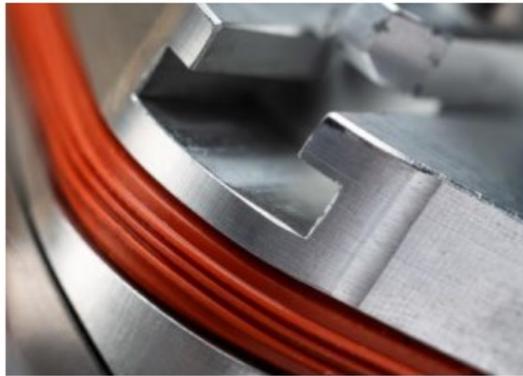


Abbildung 120: Aufblasbare Radialdichtung mit Memoryeffekt

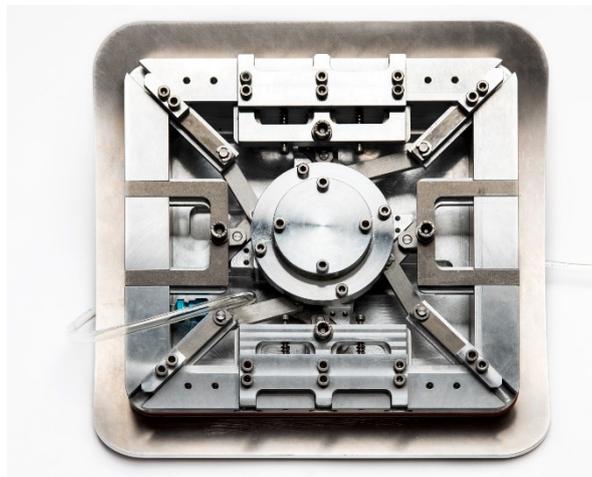


Abbildung 121: Innenansicht der Luke mit geöffneter Mechanik

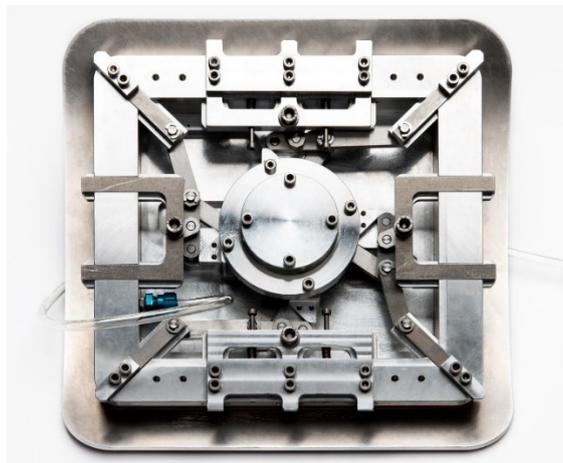


Abbildung 122: Innenansicht der Luke mit geschlossener Mechanik



Abbildung 123: Gesamtansicht mit nicht eingesetzter Luke



Abbildung 124: Gesamtansicht mit eingesetzter Luke



Abbildung 125: Außenansicht mit Andeutung des Vierkantwerkzeugs und dessen Bewegung beim Schließvorgang

Literaturverzeichnis

1. **Jens Hauslage, Medea Abbrecht, Lars Hanke, Ruth Hemmersbach.** Cytosolic Calcium Concentration Changes in Neuronal Cells. *Microgravity Sci. Technol.* 2016.
2. **al., Wehland Markus et.** The Impact of Hypergravity and Vibration on Gene and Protein Expression of Thyroid Cells. *Microgravity Science and Technology.* 2016.
3. **Hagen, Borge ten, et al., et al.** Gravitaxis of asymmetric self-propelled colloidal particles. *Nature communications.* 2014.
4. **Ivo Buttinoni, Giovanni Volpe, et al., et al.** Active Brownian motion tunable by light. *Journal of Physics: Condensed Matter.* 2012.
5. **Paul a. Tipler, Gene Mosca.** Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
6. **Lotz, Christoph.** *Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Qualität von.* Universität Hannover : Dissertation, 2022.
7. **Löwen, Hartmut.** *Weiche Materie: vom hässlichen Entlein zum schönen Schwarm.* Universität Düsseldorf : s.n.
8. **Everett, Douglas H.** *Grundzüge der Kolloidwissenschaft.* s.l. : Steinkopff Heidelberg, 2013.
9. Wikipedia.org. *Wikipedia.* [Online] 10. 09 2023. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kolloid>.
10. **Volpe, Giovanni, et al., et al.** Microswimmers in patterned environments. *Soft Matter.* 2011.
11. **Michels, Renè.** *Verständnis des mikroskopischen Ursprungs der Lichtstreuung in biologischen Gewebe.* Universität Ulm : Dissertation, 2010.
12. **Roland Winter, Frank Noll.** *Methoden der Biophysikalischen Chemie.* s.l. : Teubner Studienbücher Chemie, 1998.
13. **Rainer H. Müller, Cornelia M. Keck.** *Moderne Pharmazeutische Technologie .* Berlin : s.n., 2009.
14. *Universal Laboratory Networking System (ULabNet).* **Miguel Montes, Janusz Swiatczak, Peter J. Lesniewski, John C. Thomas, Matthew Golczak.** Sorrento Italien : s.n., 2006.
15. **Klein, Bernd.** *Leichtbau-Konstruktion.* s.l. : Springer-Verlag.
16. **DLR - MORABA.** MORABA Sounding Rocket Flight Experiments.
17. —. Sounding Rocket Launch Vehicles.
18. **Frank Scheuerpflug, Alexander Kallenbach.** *Load Bearing Hatch Design of MAPHEUS ESL 17" Module - Technical Note.* s.l. : DLR, 2014.
19. **Scheuerpflug, Frank.** *MAPHEUS-5 Flight Requirements Plan.* s.l. : DLR RB, 2015.

20. **Grill.** Technische Zeichnung Radaxring. *Data Sheet - RADAX 17"*. 2013.
21. **MORABA, DLR-RB.** Hinweise zum Eloxieren der Modultöpfe. *Structure_ARS14" - Ignition Unit*.
22. **Swedish Space Corporation SSC.** Esrange Safety Manual. *SCIENCE-60-4208*. Kiruna, Sweden : s.n., 2012.
23. **Roloff/Matek.** *Maschinenelemente - Formelsammlung*. s.l. : Springer, 2015.
24. **1:2015-11, VDI 2230 Blatt.** *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen - Zylindrische Einschraubverbindungen*. 2015.
25. **R Keßler, et al., et al.** Direct-imaging of light-driven colloidal Janus particles in weightlessness. *Review of Scientific Instruments*. 91, 2020.
26. **Buttinoni, Ivo, et al., et al.** Dynamical Clustering and Phase Separation in Suspensions of Self-Propelled Colloidal Particles. *Physical Review Letters*. Lett. 110, 2013.
27. **Keßler, Raphael.** *Entwicklung eines raumflugfähigen Mikroschwimmermoduls zur Untersuchung des dreidimensionalen Phasenverhaltens selbstphoretischer Teilchen unter Schwerelosigkeit*. Brandenburgische Technische Universität Cottbus : Masterarbeit, 2017.
28. **Buttinoni, Ivo und Giovanni Volpe, Felix Kümmel, Giorgio Volpe, Clemens Bechinger.** *Active Brownian motion tunable by light*. s.l. : Journal of Physics: Condensed Matter, 2012.
29. **R, Künkel.** *Auswahl und Optimierung von Kunststoffen für tribologisch beanspruchte Systeme; Dissertation*. Erlangen : Lehrstuhl für Kunststoffe, 2005.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Varianten kolloidaler Medien nach Aggregatzuständen (9).....	- 6 -
Tabelle 2: Vergleich von unterschiedlichen Mikrogravitationsplattformen	- 11 -
Tabelle 3: Anforderungen an die Rumpfstruktur	- 25 -
Tabelle 4: Energiebedarf einzelner Verbraucher	- 57 -
Tabelle 5: Anforderungen an den kolloidalen Experimentteil	- 67 -
Tabelle 6: Anforderungen an die Diagnostikkomponenten	- 69 -
Tabelle 7: Morphologischer Kasten zur Lösungsvarianten des kolloidalen Experimentteils	- 77 -
Tabelle 8: Bewertungsmatrix zur Geometrie der Probenumgebung	- 78 -
Tabelle 9: Bewertungsmatrix zur Durchmischung der Suspension	- 79 -
Tabelle 10: Bewertungsmatrix zur Temperierung der Suspension	- 79 -
Tabelle 11: Bewertungsmatrix zum Befüllen der Zellen	- 81 -
Tabelle 12: Bewertungsmatrix zu mechanischen Schnittstellen.....	- 82 -
Tabelle 13: Bewertungsmatrix elektrische Schnittstellen	- 82 -
Tabelle 14: Zusammenfassung der relevanten Bauteilmassen.....	- 89 -
Tabelle 15: Parameter der Federn	- 90 -
Tabelle 16: Kamera Eigenschaften und Datenströme	- 102 -
Tabelle 17: Anforderungen an den granularen Experimentteil	- 108 -
Tabelle 18: Zusammenfassung der abgeleiteten Anforderungen.....	- 110 -
Tabelle 19: Morphologischer Kasten zum granularen Experimentteil.....	- 114 -
Tabelle 20: Bewertungsmatrix zur Auswahl des Materials der Zelle	- 114 -
Tabelle 21: Bewertungsmatrix zur Gaserzeugung.....	- 115 -
Tabelle 22: Bewertungsmatrix zur Volumenkompensation.....	- 116 -
Tabelle 23: Bewertungsmatrix zur Einleitung der Partikel	- 117 -
Tabelle 24: Prozedur der wichtigsten Schritte während des Count Downs.....	- 143 -
Tabelle 25: Vergleich der Anforderungen mit den erreichten Ergebnissen zur Rumpfstruktur und permanenten Infrastruktur	- 152 -
Tabelle 26: Vergleich der Anforderungen mit den erreichten Ergebnissen des kolloidalen Experimentteils.....	- 157 -
Tabelle 27: Vergleich der Anforderungen mit den erreichten Ergebnissen des granularen Experimentteils.....	- 160 -
Tabelle 28: Testergebnisse der Aspekte der Gießlinge	XV
Tabelle 29: Testergebnisse der optischen Qualität der Gießlinge	XV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Größenordnung weicher Materie (7).....	- 4 -
Abbildung 2: Größenspektrum von Bodenbestandteile	- 5 -
Abbildung 3: Phasendiagramm Wasser-2,6-Lutidin.....	- 7 -
Abbildung 4: Lichtstreuung an einem Partikel	- 9 -
Abbildung 5: Zusammenhang von Partikelgröße und Intensität des Streulichts (13).....	- 9 -
Abbildung 6: Prinzipieller Messaufbau eines Streulichtexperiments (14)	- 10 -
Abbildung 7: Magisches Dreieck zur Wahl der geeigneten Mikrogravitationsplattform (eigene Abbildung)	- 10 -
Abbildung 8: In der Industrie akzeptierter Mehraufwand für Leichtbau in € pro Kilogramm (15)...	- 11 -
Abbildung 9: Experimentaufbau einer Fallturmkapsel (eigenes Werk)	- 12 -
Abbildung 10: Prinzipieller Aufbau einer zweistufigen Forschungsrakete (16)	- 13 -
Abbildung 11: Typischer suborbitaler Flugverlauf (16)	- 15 -
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Apogäum und Nutzlast an verschiedenen Vehikeln (17) -	15 -
Abbildung 13: Für eine stabile Fluglage ungesteuerter Raketen müssen Druckpunkt und Massenschwerpunkt aufeinander abgestimmt sein	- 17 -
Abbildung 14: Kräfte und Biegemoment entlang der Flugachse (exemplarisch) (18)	- 18 -
Abbildung 15: Beschleunigungsprofil am Beispiel der VSB 30 auf MAPHEUS 5 (19)	- 18 -
Abbildung 16: Explosionsansicht der Anlage mit Experimentteile und Rumpfbauteile	- 21 -
Abbildung 17: Skizze zur Verdeutlichung der zu erfüllenden Funktionen einzelner Unterbaugruppen .	- 30 -
Abbildung 18: Fotografie des Experimentmoduls "RAMSES"; Draufsicht ohne Druckhauben.....	- 32 -
Abbildung 19: Drauf- und Seitenansicht untere Rumpfsktion	- 35 -
Abbildung 20: Drauf- und Seitenansicht Lukenrahmens.....	- 36 -
Abbildung 21: Untersicht des unteren Druckschotts	- 37 -
Abbildung 22: Draufsicht und Schnittdarstellung des oberen Druckschotts mit montierten Anbauteilen	- 37 -
Abbildung 23: Draufsicht und Schnittdarstellung der Luke	- 38 -
Abbildung 24: Schnittdarstellung der Arretiermechanik	- 39 -
Abbildung 25: Innenansicht auf die Verschleißmechanik; linkes und unteres Gleitstück, linke Lache, Arretierscheibe, zweites Federbein und Deckscheibe ausgeblendet. Die Mechanik ist in geöffneter Position abgebildet.....	- 40 -
Abbildung 26: Totpunkt-Position	- 41 -
Abbildung 27: Geschlossene Position	- 41 -
Abbildung 28: Isometrische Ansicht und Fotografie der Druckspeicher-Baugruppe.....	- 43 -
Abbildung 29: Pneumatik Umbilical mit zwei selbstsperrenden Kupplungen	- 43 -
Abbildung 30: Umbilical nach einem Flug.....	- 44 -
Abbildung 31: Umbilical vor einem Flug	- 44 -
Abbildung 32: Bauteil aus Edelstahl unmittelbar hinter dem Umbilical. Heißes Gas durchdrang die Konnektoren. Anlauffarben sind erkennbar und lassen auf die erreichte Temperatur schließen ...	- 44 -
Abbildung 33: Zerstörte Konnektoren nach einem Wiedereintritt.....	- 44 -
Abbildung 34: Häufig verwendete Pneumatik/Hydraulikkupplung (Herstellerfoto Stäubli)	- 45 -
Abbildung 35: USB-Einbaubuchse (Herstellerfoto)	- 45 -

Abbildung 36: Explosionsansicht des elektrischen Umbilicals	- 46 -
Abbildung 37: Mit Epoxidharz ausgegossene Tasche.....	- 47 -
Abbildung 38: Verschiedene Ansichten der Gesamtbaugruppe	- 48 -
Abbildung 39: Schnittdarstellungen mit geöffnetem Schild in verschiedenen Ebenen (Siehe Vorderansicht Abb. 38).....	- 49 -
Abbildung 40: Geschlossene Position und abgezogenen Konnektoren	- 49 -
Abbildung 41: Umbilical mit geschlossenem Hitzeschild	- 50 -
Abbildung 42: Umbilical mit geöffnetem Hitzeschild.....	- 50 -
Abbildung 43: Umbilical mit eingesteckten Konnektoren und Rückschlaghülse	- 50 -
Abbildung 44: Schnittdarstellung und Draufsicht auf das pneumatische Umbilical	- 51 -
Abbildung 45: Isometrische Ansicht und Schnittansicht einer Hitzeschutzkappe	- 53 -
Abbildung 46: Isometrische Ansichten der oberen Lagerung	- 54 -
Abbildung 47: Darstellung der unteren Lagerung	- 54 -
Abbildung 48: Darstellungen der Kabeldurchführung	- 55 -
Abbildung 49: CAD Modell der Relaisbox (seitliche Baugruppe ist zur besseren Sichtbarkeit rausgezogen)	- 59 -
Abbildung 50: Foto des Speichersystems.....	- 60 -
Abbildung 51: CAD Modell zur Lagerung einiger Komponenten des C-Moduls	- 61 -
Abbildung 52: Darstellung der Lagerung von Bordrechner und Steuergerät	- 61 -
Abbildung 53: Foto des Relaisboards mit aufgesetzten Traversen	- 62 -
Abbildung 54: CAD Modell ohne Experimente und mittleren Rumpf und Fotografie der Gesamtanlage	- 62 -
Abbildung 55: Gesamtdarstellung des kolloidalen Experimentteils	- 64 -
Abbildung 56: Funktionsstruktur des kolloidalen Experimentteils	- 71 -
Abbildung 57: Ibbidi Durchflussküvette (Fa. IBIDI).....	- 72 -
Abbildung 58: Prinzip der Strahlmodifikation	- 74 -
Abbildung 59: CAD Modell als Explosionsansicht und Funktionsprinzip der Lichtstrahlengänge.....	- 75 -
Abbildung 60: Grafische Darstellung der Komponenten	- 83 -
Abbildung 61: Explosionsansicht der Probenumgebung.....	- 84 -
Abbildung 62: Schematischer Aufbau der Temperierungseinheit zur Verdeutlichung der Anpresskräfte	- 85 -
Abbildung 63: Einspannung der Peltierelemente	- 86 -
Abbildung 64: Andeutung der schwellenden Spannung aufgrund dynamischer Lasten	- 88 -
Abbildung 65: Schnittdarstellung der Temperierungseinheit zur Verdeutlichung der Einbaumaße -	89 -
Abbildung 66: Isometrische Ansicht der Temperierungseinheit.....	- 91 -
Abbildung 67: Grafische Andeutung des Strahlengangs	- 92 -
Abbildung 68: Bildfeld auf Sensor mit Pixel	- 93 -
Abbildung 69: Überprüfung der tatsächlichen Auflösung.....	- 93 -
Abbildung 70: Isometrische Ansicht des Traggestells	- 94 -
Abbildung 71: Darstellung der Kameraträger und Verfahrmechanik	- 95 -
Abbildung 72: Foto der Kameraträger mit Fokuseinstellung über Spindelmechanik	- 95 -
Abbildung 73: CAD Darstellung und Fotos zur Modifikation der Spiegel.....	- 97 -
Abbildung 74: Darstellung der Baugruppen der Laseroptik.....	- 98 -
Abbildung 75: Gießform der Kollimatorlinsen	- 99 -
Abbildung 76: Fotos und Schnittdarstellung der LED Baugruppe	- 100 -
Abbildung 77: Foto der LED Baugruppe mit Verfahrmechanik der Konen	- 101 -

Abbildung 78: CAD Modell der Gesamtbaugruppe des kolloidalen Experimentteils	- 103 -
Abbildung 79: Abbildung des granularen Experimentteils.....	- 105 -
Abbildung 80: Funktionsstruktur zur Zelle A.....	- 111 -
Abbildung 81: Funktionsstruktur zur Zelle B.....	- 111 -
Abbildung 82: Darstellung zur Verdeutlichung des geometrischen Problems	- 112 -
Abbildung 83: Darstellung der strömungsbeeinflussenden Kanten	- 113 -
Abbildung 84: Gesinterte Edelstahlfritte.....	- 116 -
Abbildung 85: CAD Schnitt durch Zelle.....	- 118 -
Abbildung 86: CAD Modell des verstellbaren Polfilterhalters.....	- 119 -
Abbildung 87: Schnitt durch das CAD Modell der Zelle B	- 120 -
Abbildung 88: Draufsicht auf den granularen Experimentteil	- 121 -
Abbildung 89: Hintersicht auf den granularen Experimentteil	- 122 -
Abbildung 90: Verdeutlichung des Arbeitsabstandes des Objektivs in der Baugruppe.....	- 123 -
Abbildung 91: Foto von 3D gedruckter radialer Lagerung des Objektivs.....	- 123 -
Abbildung 92: CAD Modell des Injektors.....	- 124 -
Abbildung 93: Pneumatischer Kreis	- 125 -
Abbildung 94: Foto des Infusionsbeutels in seinem Halter.....	- 126 -
Abbildung 95: Explosionsdarstellung des Beutelträgers	- 126 -
Abbildung 96: Beschlag zur Aufnahme des Beutelträgers	- 126 -
Abbildung 97: Komponenten des granularen Experimentteils	- 127 -
Abbildung 98: Darstellung einzelner Baugruppen in ihrer Gesamtfunktion	- 128 -
Abbildung 99: Blockdiagramm zu relevanten Komponenten zur Programmierung	- 129 -
Abbildung 100: Schaltplan zur Spannungsversorgung	- 130 -
Abbildung 101: Verschaltung der Lade- und Betriebselektrik	- 131 -
Abbildung 102: Bedienoberfläche am Bodenrechner zum manuellen Schalten der Komponenten -	132
-	
Abbildung 103: Elektrische Schnittstelle zum granularen Experimentteil	- 133 -
Abbildung 104: Elektrische Schnittstelle zum kolloidalen Experimentteil	- 134 -
Abbildung 105: Elektrische Schnittstelle zur Temperierungseinheit	- 135 -
Abbildung 106: Schnittstelle der Temperatursensoren	- 135 -
Abbildung 107: Elektrische Schnittstelle und Schaltung der Signale	- 137 -
Abbildung 108: Gesamtexperiment auf dem Rütteltisch bei AIRBUS in Ottobrunn	- 140 -
Abbildung 109: Exemplarische Messwerte der Beschleunigungen	- 140 -
Abbildung 110: Flugsequenz	- 143 -
Abbildung 111: Druck- und Temperaturverlauf des Experiments während des MAPHEUS Fluges im Mai 2021.....	- 145 -
Abbildung 112: Druck- und Temperaturverlauf während des Fluges auf MAPHEUS im Dezember 2021-	146 -
Abbildung 113: Autokorrelationsfunktionen von Gasblasen in Wasser mit ein- und ausgeschalteter Pumpe während μg und am Boden (Quelle: Lisa Künstler, DLR-MP).....	- 148 -
Abbildung 114: Skizze zur geometrischen Überlegung	VIII
Abbildung 116: Plot der Koordinaten der Kollimatorlinsen	XI
Abbildung 117: Skizze zur geometrischen Überlegung	XII
Abbildung 118: Errechnete Koordinaten der Sammellinse	XIII
Abbildung 119: Gussform der Gießlinge	XVI
Abbildung 120: Ermittlung der Brechzahlen der Gießlinge.....	XVII

Abbildung 121: Aufblasbare Radialdichtung mit Memoryeffekt	XX
Abbildung 122: Innenansicht der Luke mit geöffneter Mechanik.....	XX
Abbildung 123: Innenansicht der Luke mit geschlossener Mechanik.....	XX
Abbildung 124: Gesamtansicht mit nicht eingesetzter Luke.....	XXI
Abbildung 125: Gesamtansicht mit eingesetzter Luke.....	XXI
Abbildung 126: Außenansicht mit Andeutung des Vierkantwerkzeugs und dessen Bewegung beim Schließvorgang	XXII

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den Personen meinen Dank ausdrücken, die mich während der Zeit der vorgestellten Arbeit fachlich, aber auch moralisch unterstützt haben. Meinen Betreuern Herrn Professor Dr. Christoph Egbers und Herrn Professor Dr. Thomas Voigtmann danke ich für ihre Geduld, ihren fachlichen Ratschlägen und die Betreuung während der gesamten Zeit der Entwicklung und Verfassen der Promotionsschrift. Herr Professor Dr. Philip Born begleitete mich als Mentor und unterstützte mich besonders mit dem Verständnis zur optischen Physik der weichen Materie. Herrn Dr. Dirk Bräuer (DLR-MP) danke ich für die sehr zeitintensive Programmierung der Steuerung und die sehr konstruktive Zeit unserer Zusammenarbeit. Den zahlreichen fachlichen und konstruktiven Diskussionen mit den Ingenieuren des Instituts für Materialphysik im Weltraum gebührt ebenfalls mein ausgesprochener Dank. Besonders hervorheben möchte ich die moralische Unterstützung von Herrn Dr. Marc Engelhardt, der mir mit freundschaftlicher Fürsorge stets zur Seite stand und immer ein offenes Ohr für mich hatte.

Meinen größten Dank spreche ich den Mechanikern und Industriemeister des Instituts für Materialphysik im Weltraum Herrn Konstantin Afanasev, Herrn Matthias Nell, Herrn Horst Esser und Herrn Till Trompetter aus. Mit ihren Erfahrungen und ihrer ausgesprochenen Hilfsbereitschaft konnten auch schwierig zu fertigenden Bauteilen sehr schnell realisiert werden. Auch der gegenseitige Austausch zu technischen Lösungsfindungen und Problembehebungen haben mich sehr bereichert um maßgeblich zur Erreichung des Gesamtziels beigetragen.