



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# **Bachelorarbeit**

Marcel Brockmann

## **Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Flüssigkeitsstrahlquelle in einer Vakuumkammer**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Mechanical Engineering and  
Production Management*

**Marcel Brockmann**

**Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme  
einer Flüssigkeitsstrahlquelle  
in einer Vakuumkammer**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau Entwicklung und Konstruktion

am Department Maschinenbau und Produktion

der Fakultät Technik und Informatik

der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Abteilung: Forschung mit Photonen

Notkestraße 85

22607 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer

Zweitprüfer: Priv. Doz. Dr. habil. Tim Laarmann

Abgabedatum: 06.09.2024

# Zusammenfassung

**Marcel Brockmann**

## Thema der Bachelorarbeit

Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Flüssigkeitsstrahlquelle in einer Vakuumkammer

## Stichworte

Flüssigkeitsstrahl-Experiment, *liquid flatjet system*, Glycin in wässriger Lösung, Vakuumtechnik, Flanschsysteme, Skimmer, Lineardurchführungen, *Poka-Yoke*, methodisches Konstruieren, Finite-Element-Methode, Gaslast, Wärmeleitung

## Kurzzusammenfassung

Mithilfe des Freie-Elektronen Lasers FLASH soll das Absorptionsverhalten der im Wasser gelösten Aminosäure Glycin untersucht werden. Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der Konstruktion eines Versuchsaufbaus für dieses Flüssigkeitsstrahl-Experiment in einer Vakuumkammer unter Anwendung wesentlicher Schritte der methodischen Produktentwicklung. Die Validierung der Konstruktion erfolgt durch Finite-Elemente-Methode-Simulationen, vakuumtechnische Berechnungen und die Erprobung des Aufbaus in der Praxis. Die Simulation sowie eine Berechnung zum Drehimpuls sollen gewährleisten, dass eine an die Kammer angeschlossene Turbomolekularpumpe im Berstfall den Versuchsaufbau und die Umgebung nicht gefährdet. Die vakuumtechnischen Berechnungen stellen sicher, dass die vorgegebenen Betriebsbedingungen bezüglich Kammerdruck und Vakuumpumpen eingehalten werden, und so ein reibungsloser Versuchsablauf ermöglicht wird. Das Ergebnis der Inbetriebnahme zeigt, dass die Konstruktion für eine Messzeit bei FLASH geeignet ist.

# Abstract

**Marcel Brockmann**

## **Title of the paper**

Design, construction and commissioning of a liquid jet source in a vacuum chamber

## **Keywords**

Liquid jet experiment, liquid flatjet system, glycine in aqueous solution, vacuum technology, flange systems, skimmer, linear stage, *Poka-Yoke*, methodical design, finite-element method, gas load, heat conduction

## **Abstract**

The free-electron laser FLASH linear accelerator will be used to investigate the absorption behavior of the amino acid glycine dissolved in water. This bachelor's thesis deals with the construction of an experimental setup for this liquid jet experiment in a vacuum chamber using essential steps of methodical product development. The design is validated through finite-element method simulations, vacuum-engineering calculations and practical testing of the setup. The simulation, as well as a calculation of the angular momentum, are intended to ensure that a turbopump connected to the chamber does not endanger the test setup and the environment in the event of a burst. The vacuum-technical calculations ensure that the boundary conditions for operating the setup with respect to residual gas pressure and vacuum pumps are maintained, thus enabling a smooth experimental campaign. The results of the commissioning show that the design is suitable for FLASH beamtime operation.

## Danksagung

Ich danke allen, die mir während des Studiums zur Seite standen und auf deren Rat und Unterstützung ich jederzeit zählen konnte.

Im Hinblick auf die Bachelorarbeit möchte ich mich insbesondere bei meinem Erstprüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Schäfer und meinem Zweitprüfer Herrn Priv. Doz. Dr. habil. Tim Laarmann für die Betreuung, Organisation und Unterstützung bedanken. Ihre Ratschläge und Ideen waren sehr hilfreich und haben mich und mein Projekt vorangebracht.

Vielen Dank auch an Herrn Andreas Przystawik und Herrn Dian Diaman aus der Arbeitsgruppe „Femtochemie und Röntgenphysik“ geleitet von Herrn Laarmann beim DESY. Für die stetige Zuverlässigkeit und Gelassenheit bei der Lösung von Problemen, sowie die geduldige Beantwortung meiner Fragen danke ich Ihnen sehr.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie und Freunde, die immer an mich geglaubt haben und mir stets mit Verständnis und Unterstützung entgegengekommen sind.

# Aufgabenstellung



## Aufgabenstellung

für die Bachelorarbeit

von Herrn Marcel Brockmann



**Thema:** Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Flüssigkeitsstrahlquelle in einer Vakuumkammer

Ziel der Bachelorarbeit ist es, einen Versuchsaufbau für ein Flüssigkeitsstrahl-Experiment in einer Vakuumkammer zu realisieren, wobei der Fokus auf das methodische Konstruieren und Designen der geheizten Probenumgebung (*Liquid Flatjet System*) gelegt wird. Die Validierung des Aufbaus erfolgt durch die Anwendung von FEM-Simulationen und analytischen Berechnungen zur mechanischen Stabilität des Aufbaus, sowie zu den geforderten Vakuum- und Temperaturbedingungen während des Betriebs. Wichtig sind dabei die Aspekte einer Vakuumkonstruktion bezüglich der Gaslast und Wärmeleitung zu berücksichtigen, um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten. Abschließend folgt die Inbetriebnahme und Erprobung des Versuchsaufbaus.

**Schwerpunkte:** Methodisches Konstruieren, Design, Finite-Element-Methode, Vakuumtechnik, Erprobung

# Inhaltsverzeichnis

|   |      |
|---|------|
| <b>Symbolverzeichnis</b> .....                          | VIII |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....                      | IX   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....                        | X    |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....                      | XI   |
| <b>1. Einleitung</b> .....                              | 1    |
| 1.1    Über das Unternehmen.....                        | 1    |
| 1.2    Vorstellung der Aufgabe.....                     | 1    |
| <b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....                 | 6    |
| 2.1    Vakuumtechnik.....                               | 6    |
| 2.1.1  Vakuum.....                                      | 6    |
| 2.1.2  Vakuumpumpen.....                                | 6    |
| 2.1.3  Vakuummessung.....                               | 9    |
| 2.1.4  Flanschsysteme und wichtige Komponenten.....     | 11   |
| 2.1.5  Werkstoffe.....                                  | 13   |
| 2.2    Physikalische Begriffe zum Experiment.....       | 14   |
| 2.2.1  Absorption.....                                  | 14   |
| 2.2.2  Röntgenstrahlen.....                             | 14   |
| 2.2.3  Photoeffekt.....                                 | 16   |
| <b>3. Konzeptentwicklung</b> .....                      | 17   |
| 3.1    Gantt-Diagramm.....                              | 17   |
| 3.2    Anforderungsliste.....                           | 19   |
| 3.3    Brickworld-Konzept.....                          | 24   |
| 3.4    Kontextdiagramm.....                             | 26   |
| 3.5    Morphologischer Kasten.....                      | 27   |
| 3.6    Konzeptbewertung.....                            | 31   |
| <b>4. Konstruktion</b> .....                            | 34   |
| 4.1    Auffangvorrichtung.....                          | 34   |
| 4.2    Lochplatte zur Halterung der Probenumgebung..... | 40   |
| 4.3    Lineareinheit und Diagnostik.....                | 42   |
| 4.4    Austrittsweg der Probe.....                      | 44   |
| <b>5. Validierung des Modells</b> .....                 | 47   |
| 5.1    FEM-Simulation.....                              | 47   |
| 5.1.1  Simulation des Vakuumwürfels.....                | 47   |
| 5.1.2  Simulation des Gestells.....                     | 51   |
| 5.2    Berechnungen zum Drehimpuls.....                 | 55   |
| 5.3    Vakuumtechnische Berechnungen.....               | 57   |

|           |   |             |
|-----------|---|-------------|
| 5.3.1     | Vorvakuumumpfen .....   | 57          |
| 5.3.2     | Turbomolekularpumpe .....   | 59          |
| 5.3.3     | Wärmeleitung .....  | 61          |
| <b>6.</b> | <b>Inbetriebnahme</b> .....   | <b>63</b>   |
| 6.1       | Vorbereitung .....  | 63          |
| 6.2       | Durchführung .....  | 65          |
| <b>7.</b> | <b>Zusammenfassung</b> .....  | <b>70</b>   |
| <b>8.</b> | <b>Fazit und Ausblick</b> .....   | <b>72</b>   |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b> .....   | <b>75</b>   |
|           | <b>Anhang</b> .....   | <b>i</b>    |
|           | <b>Anhang A: Gantt-Diagramm</b> .....   | <b>ii</b>   |
|           | <b>Anhang B: Auszug Betriebsanleitung HiPace 700 M [24]</b> .....                     | <b>iii</b>  |
|           | <b>Anhang C: Auszug Betriebsanleitung Wälzkolbenpumpe XR60i [25]</b> .....            | <b>iv</b>   |
|           | <b>Anhang D: Netze der FEM-Analyse und Verformungsplot (Vakuumswürfel)</b> .....      | <b>v</b>    |
|           | <b>Anhang E: Netze der FEM-Analyse (Viertelplatten)</b> .....                         | <b>vi</b>   |
|           | <b>Anhang F: Auszug Werkstoffdatenblatt EN AW-5083 (3.3547) [30]</b> .....            | <b>ix</b>   |
|           | <b>Anhang G: Bestimmung des Tangentenmoduls <math>E_t</math> von EN AW-5083</b> ..... | <b>x</b>    |
|           | <b>Anhang H: Auszug Spezifikation Pirani-Druckmesskopf [32]</b> .....                 | <b>xi</b>   |
|           | <b>Anhang I: Auszug Spezifikation Pirani-Heißkathode-Druckmesskopf [33]</b> .....     | <b>xii</b>  |
|           | <b>Anhang J: Ergänzende Skizze zur Berechnung des Drehimpulses</b> .....              | <b>xiii</b> |
|           | <b>Anhang K: Auszug Werkstoffdatenblatt AISI 316L (1.4404) [35]</b> .....             | <b>xiv</b>  |
|           | <b>Anhang L: Eidesstattliche Erklärung</b> .....                                      | <b>xv</b>   |

## Symbolverzeichnis

| Symbol         | Bedeutung                                | Einheit            |
|----------------|--|--------------------|
| $\alpha$       | Winkelbeschleunigung                     | $rad \cdot s^{-2}$ |
| $A$            | Bruchdehnung                             | %                  |
| $A_S$          | Spannungsquerschnitt                     | $mm^2$             |
| $c$            | Stoffmengenkonzentration                 | $mol \cdot m^{-3}$ |
| $D / d$        | Durchmesser                              | $mm$               |
| $\Delta H_v$   | Molare Verdampfungsenthalpie             | $J \cdot mol^{-1}$ |
| $\Delta h_v$   | Spezifische molare Verdampfungsenthalpie | $J \cdot kg^{-1}$  |
| $f$            | Frequenz                                 | $Hz$               |
| $\varepsilon$  | Dehnung                                  | –                  |
| $E$            | Energie                                  | $J$                |
| $E_e$          | Elastizitätsmodul                        | $MPa$              |
| $E_t$          | Tangentenmodul                           | $MPa$              |
| $F$            | Kraft                                    | $N$                |
| $F_B$          | Betriebskraft                            | $N$                |
| $g$            | Erdbeschleunigung                        | $m \cdot s^{-2}$   |
| $h$            | Höhe                                     | $mm$               |
| $J$            | Massenträgheitsmoment                    | $kg \cdot m^2$     |
| $l$            | Länge                                    | $mm$               |
| $\lambda$      | Wellenlänge                              | $m$                |
| $M$            | Drehmoment                               | $Nm$               |
| $M_{Berst}$    | Berstmoment                              | $Nm$               |
| $m$            | Masse                                    | $kg$               |
| $m_{mol}$      | Molare Masse                             | $g \cdot mol^{-1}$ |
| $P$            | Leistung                                 | $W$                |
| $p$            | Druck                                    | $Pa$               |
| $p_{Spirale}$  | Steigung der Spirale                     | $mm$               |
| $Q$            | Volumenstrom                             | $m^3 s^{-1}$       |
| $q_m$          | Massenstrom                              | $kg \cdot s^{-1}$  |
| $R_e$          | Streckgrenze                             | $MPa$              |
| $R_m$          | Zugfestigkeit                            | $MPa$              |
| $r$            | Radius                                   | $mm$               |
| $S$            | Sicherheitsfaktor                        | –                  |
| $\sigma_v$     | Vergleichsspannung                       | $MPa$              |
| $\sigma_{vor}$ | Vorspannung                              | $MPa$              |
| $\sigma_{zul}$ | Zulässige Spannung                       | $MPa$              |
| $T$            | Temperatur                               | $K$                |
| $t$            | Zeit                                     | $s$                |
| $\varphi$      | Drehwinkel                               | $rad$              |
| $V_m$          | Molvolumen                               | $l \cdot mol^{-1}$ |
| $\omega$       | Winkelgeschwindigkeit                    | $rad \cdot s^{-1}$ |

## Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung                                      |
|-----------|--|
| CF        | ConFlat  |
| CNC       | Computerized Numerical Control                 |
| DESY      | Deutsche Elektronen-Synchrotron                |
| EN        | Europäische Norm                               |
| FEL       | Freie-Elektronen-Laser                         |
| FEM       | Finite-Elemente-Methode                        |
| FLASH     | Freie-Elektronen-Laser in Hamburg              |
| GEH       | Gestaltänderungshypothese                      |
| ISO       | International Organization for Standardization |
| KF        | Kleinflansch                                   |
| PEEK      | Polyetheretherketon                            |
| PETRA     | Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage           |
| UHV       | Ultrahochvakuum                                |
| VDI       | Verein Deutscher Ingenieure                    |
| VUV       | Vakuumultraviolettstrahlung                    |
| WIG       | Wolfram-Inertgas                               |
| XHV       | Extremhochvakuum                               |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Gantt-Diagramm (Planung) .....                         | 18 |
| Tabelle 2: Anforderungsliste zur Konstruktion .....               | 20 |
| Tabelle 3: Spezifikation Skimmer [20] .....                       | 23 |
| Tabelle 4: Abmaße vorhandener Skimmer .....                       | 23 |
| Tabelle 5: Morphologischer Kasten .....                           | 27 |
| Tabelle 6: Konzeptvarianten .....                                 | 30 |
| Tabelle 7: Nutzwertanalyse .....                                  | 32 |
| Tabelle 8: Ergebnisse der Lagerreaktionen .....                   | 50 |
| Tabelle 9: Gaslast (Achse Saugvermögen) der Vorvakuumpumpe .....  | 58 |
| Tabelle 10: Volle Gaslast (Achse Saugvermögen) .....              | 60 |
| Tabelle 11: N <sub>2</sub> -Gaslast der Turbomolekularpumpe ..... | 60 |
| Tabelle 12: Checkliste Inbetriebnahme .....                       | 66 |
| Tabelle 13: Ergebnisse Druckmessung .....                         | 68 |
| Tabelle 14: Anforderungsliste mit Bewertung .....                 | 73 |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: DESY Campus Hamburg [2].....  | 1  |
| Abbildung 2: Liquid Flatjet System [8].....  | 2  |
| Abbildung 3: Vergrößerung des Liquid Flatjet [8].....                                      | 3  |
| Abbildung 4: Vakuumkammergestell.....  | 4  |
| Abbildung 5: Äußerer Versuchsaufbau.....   | 4  |
| Abbildung 6: Arbeitsbereich üblicher Vakuumpumpen (modifiziert von [4]).....               | 8  |
| Abbildung 7: Funktionsweise einer Wälzkolbenpumpe [4].....                                 | 9  |
| Abbildung 8: Messbereiche üblicher Vakuummeter [4].....                                    | 11 |
| Abbildung 9: KF-Verbindung im Schnitt.....   | 12 |
| Abbildung 10: Beispiel für Wellbalg mit KF-Anschluss.....                                  | 12 |
| Abbildung 11: CF100- auf KF40-Adapterflansch.....  | 13 |
| Abbildung 12: Elektromagnetisches Spektrum [11].....                                       | 15 |
| Abbildung 13: Modell eines Skimmers.....   | 21 |
| Abbildung 14: Lineareinheit (ohne Motor) [19].....   | 21 |
| Abbildung 15: Skizze mit Maßen A, B, C, D und X (modifizierte Skizze von [20]).....        | 23 |
| Abbildung 16: Brickworld-Konzept.....  | 25 |
| Abbildung 17: Kontextdiagramm.....   | 26 |
| Abbildung 18: Oberer Teil Auffangvorrichtung.....  | 34 |
| Abbildung 19: Anschraubdeckel im Schnitt.....  | 35 |
| Abbildung 20: Befestigung Skimmer im Schnitt.....  | 35 |
| Abbildung 21: Mittlerer Teil Auffangvorrichtung im Schnitt.....                            | 35 |
| Abbildung 22: Mittlerer Teil Auffangvorrichtung mit Poka-Yoke-Prinzip (um 180° gedreht)... | 36 |
| Abbildung 23: Unterer Teil Auffangvorrichtung im Schnitt.....                              | 36 |
| Abbildung 24: Unterer Teil Auffangvorrichtung.....   | 37 |
| Abbildung 25: Zusammenbau der Auffangvorrichtung vor dem Schweißen.....                    | 38 |
| Abbildung 26: Werkzeugkörper.....  | 38 |
| Abbildung 27: Endergebnis der Auffangvorrichtung mit Spiralnut.....                        | 39 |
| Abbildung 28: Hülse für die Auffangvorrichtung.....  | 40 |
| Abbildung 29: Korrekte Ausrichtung der Anschweißlaschen an die Kragenkonstruktion.....     | 40 |
| Abbildung 30: Lochplatte.....  | 41 |
| Abbildung 31: Adapterplatte (transparent).....   | 42 |
| Abbildung 32: Aufbau auf der Lineareinheit.....  | 43 |
| Abbildung 33: Fortschritt der am Kragen geschweißten Konstruktion.....                     | 44 |
| Abbildung 34: Konzept 2, Auffangvorrichtung.....   | 45 |
| Abbildung 35: Konzept 2, Zusammenbau im Schnitt.....                                       | 45 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 36: Prüfen der Lage der Linse .....                                     | 46 |
| Abbildung 37: Modifiziertes Vakuumwürfel-Modell .....                             | 47 |
| Abbildung 38: Vakuumwürfel-Modell mit Stützen und Lasten .....                    | 48 |
| Abbildung 39: Vergleichsspannung im Vakuumwürfel .....                            | 49 |
| Abbildung 40: Konvergenzverlauf der Vergleichsspannung .....                      | 49 |
| Abbildung 41: Modifiziertes Viertelplatten-Modell .....                           | 51 |
| Abbildung 42: Viertelplatten-Modell mit Stützen und Lasten .....                  | 52 |
| Abbildung 43: Vergleichsspannung in Viertelplatten.....                           | 52 |
| Abbildung 44: Singularität an einer Bohrung nach zwei Netzverfeinerungen .....    | 53 |
| Abbildung 45: Totale Verformung der Viertelplatten .....                          | 53 |
| Abbildung 46: Konvergenzverlauf der totalen Verformung .....                      | 54 |
| Abbildung 47: Leistungskurve der Vorvakuumpumpe (modifiziert von [25]) .....      | 59 |
| Abbildung 48: Leistungskurve der Turbomolekularpumpe (modifiziert von [27]) ..... | 61 |
| Abbildung 49: Experimentaufbau im Kammerinneren .....                             | 65 |
| Abbildung 50: Flatjet Inbetriebnahme 1 .....                                      | 67 |
| Abbildung 51: Flatjet Inbetriebnahme 2 .....                                      | 68 |

# 1. Einleitung

## 1.1 Über das Unternehmen

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) wurde 1959 gegründet und ist ein Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft. Es gibt zwei Standorte, einen in Hamburg und einen in Zeuthen bei Berlin. Insgesamt sind ca. 3.000 Mitarbeiter beim DESY beschäftigt, davon ungefähr 1.300 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Dazu kommen außerdem jährlich über 3.000 Forscherinnen und Forscher aus über 40 Nationen, um Experimente an den Beschleunigeranlagen durchzuführen. Zu den Schwerpunkten bei der Forschung am DESY zählen Beschleuniger, Photonen, Teilchenphysik und Astroteilchenphysik. [1]

In Abbildung 1 ist der Forschungscampus in Hamburg Bahrenfeld von oben zu sehen, in der die aktiven Beschleunigeranlagen gekennzeichnet sind.

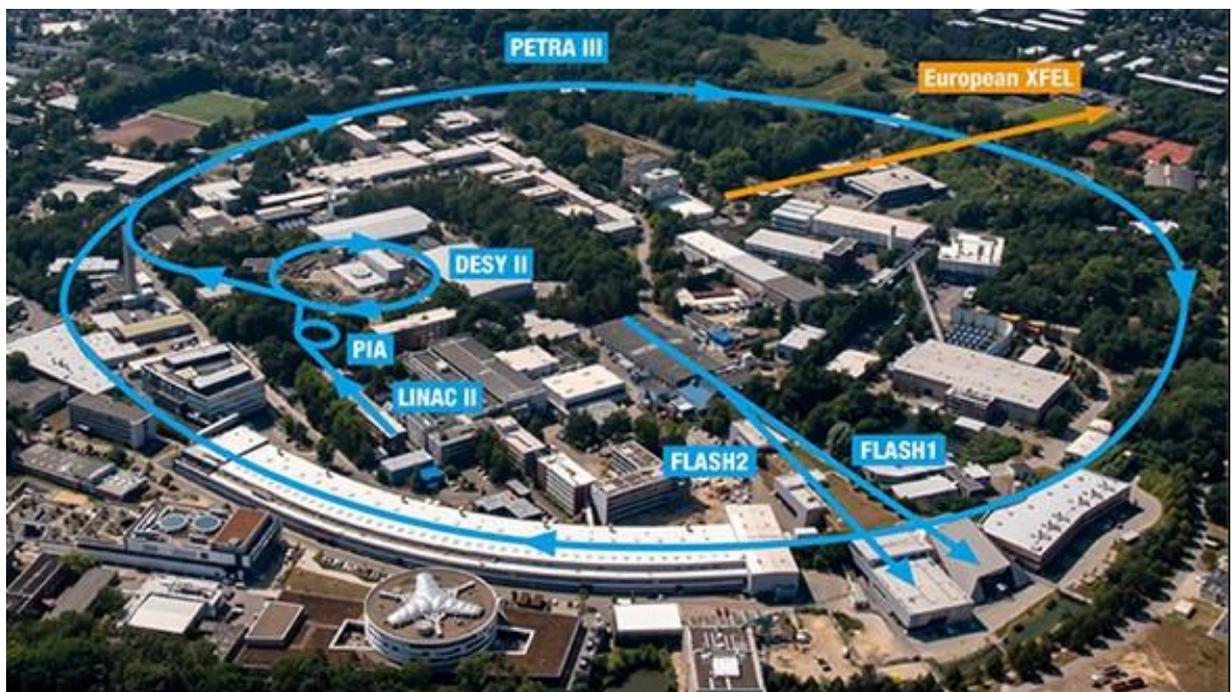


Abbildung 1: DESY Campus Hamburg [2]

Das nächste große Projekt ist PETRA IV (Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage). Seit 2020 befindet sich die vierte Generation des PETRA-Ringbeschleunigers in der Entwicklung und soll 2032 in Betrieb genommen werden. Dieser wird erneut neue Maßstäbe für die Forschung mit Photonen setzen und zu den weltweit führenden Beschleuniger-basierten Lichtquellen zählen.

## 1.2 Vorstellung der Aufgabe

Der 315 m lange Freier-Elektronen Laser FLASH, welcher seit 2005 im Nutzerbetrieb ist und 2014 durch eine weitere Strahlführung (Flash 2) erweitert wurde, war der erste Freie-Elektronen Laser (FEL) im extrem ultravioletten Spektralbereich weltweit und genießt nach wie vor

eine große Beliebtheit in der Nutzgemeinschaft. Im Betrieb werden Elektronen auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und mithilfe von Magneten in der Bewegung so manipuliert, dass sie anfangen zu schwingen und dadurch extrem kurze (Femtosekunden [fs]) und intensive Röntgenlichtblitze abstrahlen. Forscherinnen und Forscher können an insgesamt elf Messplätzen mit diesen Lichtblitzen die Struktur und Dynamik des Nanokosmos erforschen. [3]

Mithilfe von FLASH, soll in einem zukünftigen Experiment das Absorptionsverhalten einer im Wasser gelösten Aminosäure untersucht werden. Bei der Aminosäure handelt es sich um Glycin, der kleinsten Aminosäure mit der einfachsten Struktur ( $C_2H_5NO_2$ ). Für das geplante Experiment muss die Aminosäure mithilfe von einem *Liquid Flatjet System* in eine Vakuumkammer eingebracht werden. Hier werden mithilfe eines Gases sogenannte *Flat-Sheets*, welche nur ca. 20 nm dick und 50  $\mu\text{m}$  breit sind, erzeugt und so ausgerichtet, dass sie vom Röntgenlaser exakt durchquert werden.

In Abbildung 2 ist zu sehen, wie die Probe aus der Düse propagiert wird. Die wässrige Aminosäure-Lösung wird dabei durch einen Kanal in der Mitte der Düse befördert, welche am unteren Ende auf das von links und rechts aus zwei Kanälen strömende Gas trifft. Der resultierende *Flatjet* ist in Abbildung 2 gut zu erkennen.

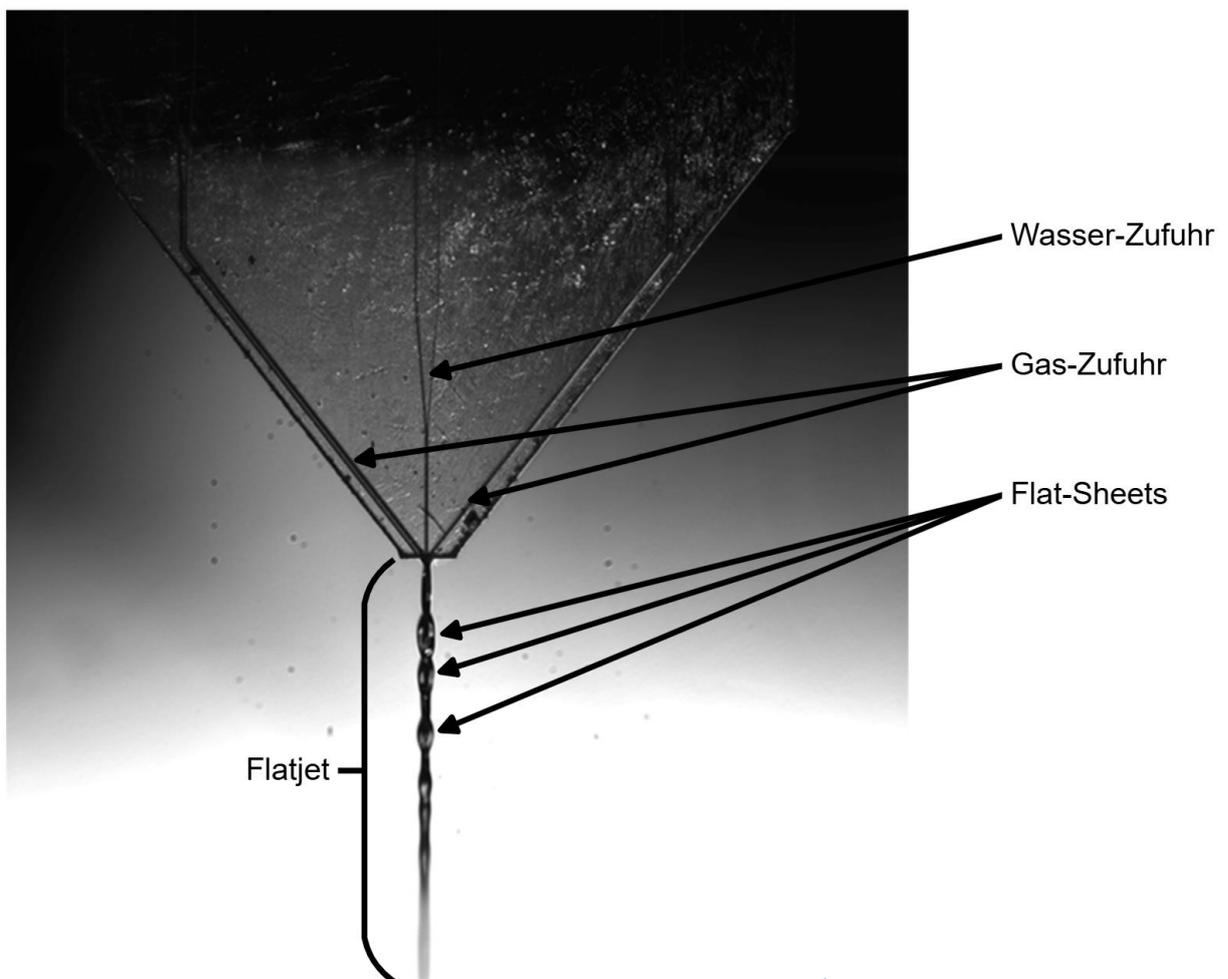


Abbildung 2: Liquid Flatjet System [8]

In Abbildung 3 ist, stark vergrößert, einer der sogenannten *Flat-Sheets* zu sehen. Die Struktur eines Blattes ist hier gut sichtbar. Die Mitte dieses Blattes soll auf die Strahlhöhe von FLASH justiert werden.

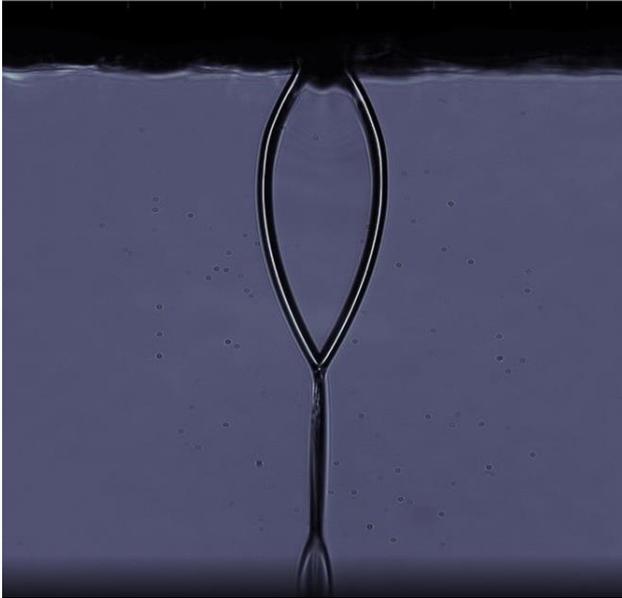


Abbildung 3: Vergrößerung des Liquid Flatjet [8]

Um einen reibungslosen Versuchsablauf bei FLASH realisieren zu können, wird ein Feinvakuum in der Probenkammer benötigt. Wenn die Flüssigkeit in die Vakuumkammer gelangt und dort verbleibt, steigt der Druck stark an. Daher ist es unerlässlich, dass die Probe wieder aus der Kammer über eine Auffangvorrichtung herausbefördert wird.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, für das beschriebene Experiment den Versuchsaufbau zu entwickeln und zu konstruieren. Dabei werden nötige Berechnungen und Finite-Elemente-Methode-Simulationen (FEM) zur Validierung des Aufbaus durchgeführt, um anschließend die konstruierte Baugruppe fertigen zu lassen, und nach der Montage die erste Inbetriebnahme des Aufbaus für das Experiment vorzunehmen. Dazu sind auch resultierende Vakuumbedingungen zu beachten und zu berechnen, wie beispielsweise das Verhalten der Gaslast und Wärmeleitung im Inneren der Vakuumkammer. Wichtig ist auch die Randbedingung, dass das Experiment an zwei verschiedenen Orten durchgeführt werden soll, und zwar im Labor zum Testen des Aufbaus, sowie später in der FLASH-Halle. Wenn der Aufbau den Ort wechselt, soll dies mit möglichst wenig Aufwand verbunden sein. Dafür soll der Aufbau modular konzipiert sein. Das Vakuumkammergestell sowie der äußere Aufbau des Experiments sind bereits aufgrund einer vorangegangenen Arbeit vorhanden. Zu sehen ist das Vakuumkammergestell in Abbildung 4.

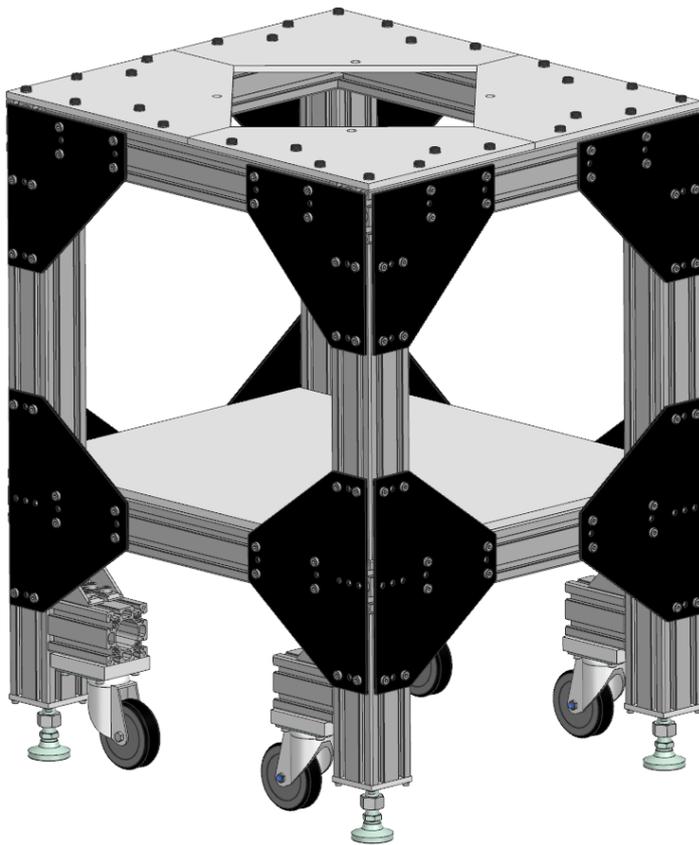


Abbildung 4: Vakuumkammergestell

Es trägt den experimentellen Aufbau für die Studien im Testlabor.

Der fertige äußere Aufbau des Experiments ist Abbildung 5 zu entnehmen (ohne Diagnostik).

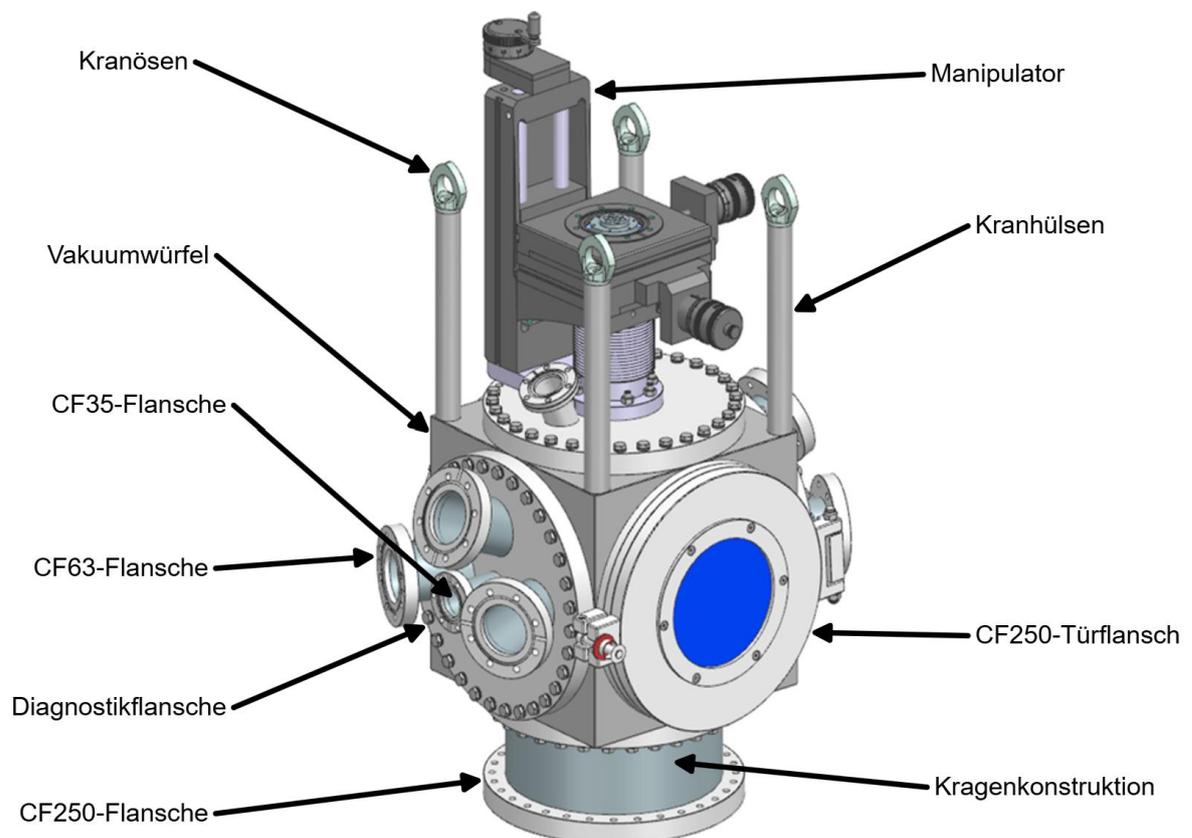


Abbildung 5: Äußerer Versuchsaufbau

Dieser äußere Aufbau wird für die Testexperimente im Labor an das Gestell geschraubt. Für die Durchführung in der FLASH-Halle wird er auf eine dort bereits vorhandene größere Vakuumkammer gesetzt. An die sechs Seiten des Vakuumwürfels passt jeweils ein CF250-Flansch. Die obere Seite weist einen Manipulator auf, welcher das darunterliegende *Liquid Flatjet System* in X-, Y- und Z-Richtung bewegen und um die vertikale Achse rotieren lassen kann. Des Weiteren ist eine Tür inklusive eines Sichtfensters, für die Überwachung des Experiments, an einer Seite des Vakuumwürfels angebracht. An zwei weiteren Seiten befinden sich zwei identische Diagnostikflansche. Flansche wie diese, bei der ein Basisflansch die Grundlage bildet und weitere Flansche über Rohrstücke an diesen eingeschweißt sind, werden als Clusterflansche bezeichnet. Über diese Flansche wird der Laser in die Probenumgebung ein- und ausgekoppelt. Alle weiteren Flansche werden zur Auswertung des Experiments für die Strahldiagnostik genutzt. Die Flansche sind dabei so ausgerichtet, dass die jeweiligen Achsen genau zur Würfelmitte verlaufen. An der sechsten, in der Abbildung nicht sichtbaren Seite, wird eine Turbomolekularpumpe „HiPace 700 M“ (Anhang B) über einen Adapterflansch an den Würfel montiert.

Zum Transport des Versuchsaufbaus sind am Würfel zusätzlich vier Kranösen angebracht, welche den Transport vom Testlabor zur FLASH-Halle erleichtern sollen. Damit die Konstruktion nicht kippen kann, sind zwischen dem Würfel und den Ösen noch jeweils eine Kranhülse geschraubt, so dass der Schwerpunkt in jedem Fall unter dem Angriffspunkt der Ösen liegt.

Nach der Konstruktion und Fertigung des inneren Versuchsaufbaus sowie der Endmontage der einzelnen Bauteile, wird abschließend die Inbetriebnahme der Flüssigkeitsstrahlquelle im Testlabor durchgeführt.

## 2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für die Aufgabenstellung benötigten Grundlagen zur Vakuumtechnik und Physik erläutert.

### 2.1 Vakuumtechnik

Die Vakuumtechnik ist ein wichtiger Bestandteil in der Forschung mit Röntgenstrahlen. So werden auch viele der Experimente an den Teilchenbeschleunigern beim DESY unter Vakuumbedingungen durchgeführt, um beispielsweise die Flugbahnen der im Röntgenlicht erzeugten Elektronen und Ionen nicht zu verfälschen und die Probenumgebung maximal störungsfrei zu halten. Dementsprechend wichtig ist die verwendete Vakuumtechnik. Diese beinhaltet zum einen Pumpen, die das Vakuum erzeugen, Apparaturen, die den Druck halten und Messmittel, welche notwendig sind, um ein Vakuum zu klassifizieren und die Forschung erfolgreich durchzuführen.

#### 2.1.1 Vakuum

Ein Vakuum herrscht in Systemen, wo der Druck unter dem atmosphärischen Druck von 1.013,25 mbar (101.325 Pa) liegt. Dies bringt mit sich, dass sich im Vakuum deutlich weniger Teilchen (Atome und Moleküle) befinden. Unterschiedliche Experimente an verschiedenen Anlagen beim DESY haben verschiedenartige Anforderungen an die Qualität des Vakuums. In der Vakuumtechnik werden daher in Bezug auf den Druck verschiedene Vakuumstufen klassifiziert:

- Grobvakuum  $\rightarrow$  1 bis  $10^3$  mbar
- Feinvakuum  $\rightarrow$   $10^{-3}$  bis 1 mbar
- Hochvakuum  $\rightarrow$   $10^{-7}$  bis  $10^{-3}$  mbar
- Ultrahochvakuum  $\rightarrow$   $10^{-7}$  bis  $10^{-11}$  mbar
- Extremhochvakuum  $\rightarrow$   $< 10^{-11}$  mbar

Für die Wahl der einzusetzenden Vakuumtechnik ist es wichtig zu wissen, in welchen dieser Bereiche beim Forschen vorgedrungen werden soll. Jeder Bereich setzt spezielle Maßnahmen voraus, um das jeweilige Vakuum zu erreichen. Während diese beim Grobvakuum überschaubar sind, ist das Realisieren eines Ultrahochvakuums (UHV) oder Extremhochvakuums (XHV) eine Herausforderung. [4]

#### 2.1.2 Vakuumpumpen

Ein Vakuum kann durch spezielle Vakuumpumpen erzeugt werden, welche im Allgemeinen die Gasdichte durch Entfernen von Gasmolekülen aus dem definierten Raum (der Vakuumkammer) reduzieren. Davon gibt es viele unterschiedliche, die sich grundsätzlich jedoch in zwei Gruppen mit verschiedenen Wirkprinzipien unterteilen lassen. Eine Hauptgruppe bilden die Gastransfer-Vakuumpumpen (auch Kompressionspumpen genannt). Diese befördern die

Gasteilchen aus dem zu pumpenden Bereich in die Außenatmosphäre. Bei diesem Vorgang werden zwei Funktionsweisen unterschieden. Bei der einen erfolgt der Prozess über das mechanische Verdrängen der Gasmoleküle (Verdränger-Vakuumpumpen). Das Volumen wird innerhalb der Pumpe mithilfe mechanischer Komponenten verändert und kann so hinausbefördert werden. Pumpen dieser Art werden üblicherweise für Vakua im Grob- und Feinvakuumbereich genutzt, oder dienen als Vorvakuumpumpe, wenn noch niedrigere Drücke erreicht werden sollen. Typische Vakuumpumpen dieser Gruppe, die beim DESY häufig ihre Verwendung finden, sind Drehschieber-, Scroll- und Wälzkolbenvakuumpumpen. Dort erfolgt die Verdrängung des Volumens beispielsweise über rotierende Schieber oder zwei ineinandergreifende Spiralen.

Bei der anderen Funktionsweise, der Gastransfer-Pumpen, wird mithilfe von Impulsübertragung kinetische Energie auf die Teilchen übertragen, die so in eine bestimmte Richtung beschleunigt und aus der Kammer befördert werden (Kinetische Vakuumpumpen). Bei den gängigen Turbomolekularpumpen geschieht diese Impulsübertragung mithilfe der eingebauten Hochgeschwindigkeitsrotoren. [4]

Die zweite große Hauptgruppe bilden die gasbindenden Vakuumpumpen. Pumpen dieser Gruppe reduzieren die Gasdichte, indem sie die Moleküle chemisch (Chemisorption) oder physikalisch (Adsorption) binden. Bewährte Pumpen dieser Gruppe beim DESY sind Getter-Pumpen, welche spezielle Werkstoffe nutzen, um die Moleküle zu binden. Aber auch Kryopumpen, welche die Gasmoleküle so weit herunterkühlen, dass diese bei Kontakt mit kalten Oberflächen kondensieren oder adsorbiert werden, kommen zum Einsatz. Bei Beschleunigern, in denen supraleitende Komponenten verbaut sind (wie z. B. beim FLASH am DESY), werden bestimmte Komponenten (*Cavities*) der Beschleunigermodule auf etwa 1,8 K heruntergekühlt und wirken dadurch wie eine Kryopumpe. [4]

Es ist wichtig zu beachten, dass jede Pumpe Vor- und Nachteile hat und nur für einen bestimmten Druckbereich optimal zu verwenden ist. Für welche Druckbereiche die in der Vakuumtechnik üblichsten Pumpen genutzt werden, ist in Abbildung 6 zusammengefasst. Der Arbeitsbereich der Turbomolekularpumpe ist hier modifiziert, da heutige Turbomolekularpumpen nahezu immer vor der Turbostufe noch eine sogenannte Holweck-Stufe (*Drag-Stufe*) verbaut haben. Diese wird für höhere Druckbereiche verwendet und dient daher als Vorstufe der Turbomolekularpumpe und vergrößert dementsprechend den Arbeitsbereich. Holweck-Pumpen nutzen eine schnell rotierende Oberfläche mit einer spiralförmigen Struktur, um Moleküle in Richtung Pumpenauslass mitzureißen. Die rotierende Oberfläche ist dabei von einer feststehenden, zylindrischen Außenwand eng umgeben.

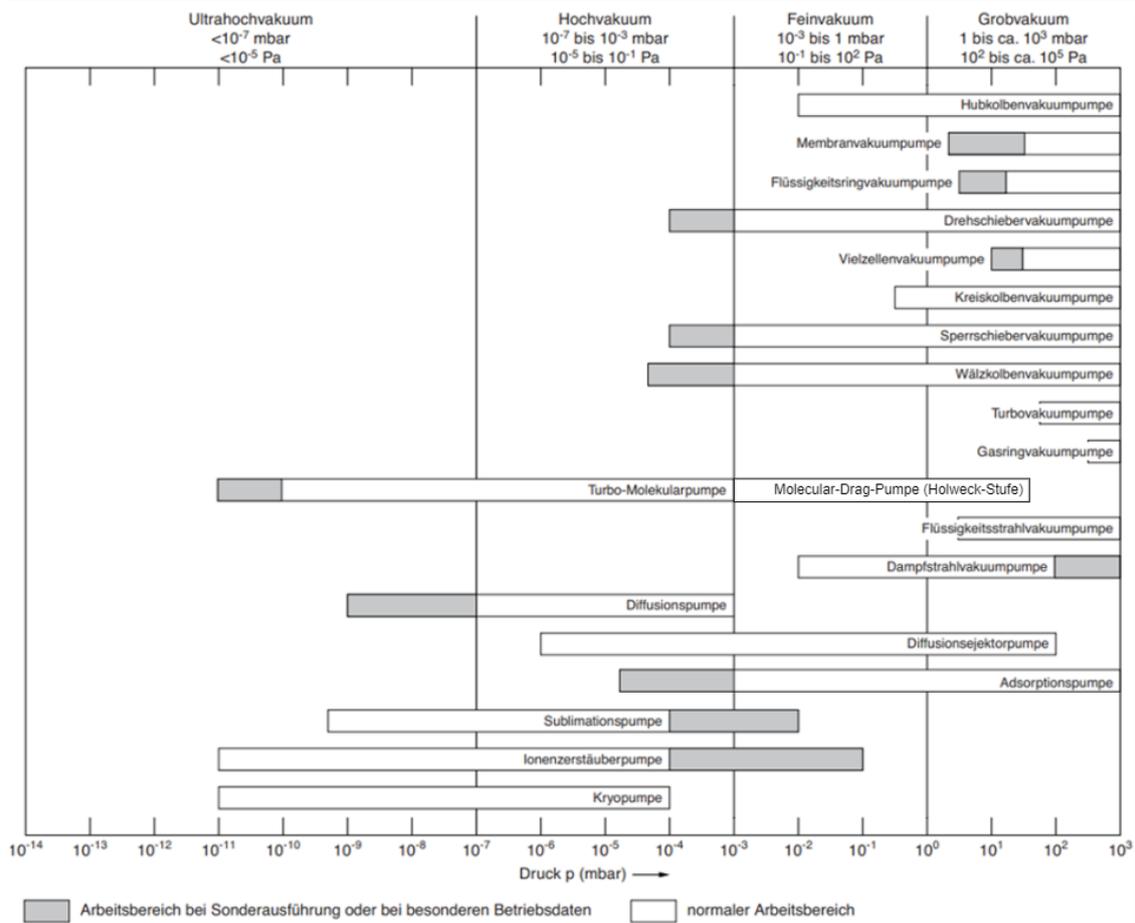
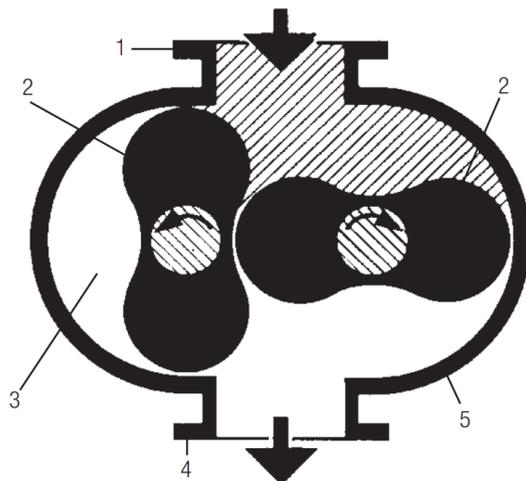


Abbildung 6: Arbeitsbereich üblicher Vakuumpumpen (modifiziert von [4])

Im Experiment dieser Aufgabe soll eine Verdränger-Vakuumpumpe, genauer gesagt eine Wälzkolbenpumpe (auch Rootspumpe genannt), verwendet werden. Diese zeichnet sich aufgrund ihres hohen Saugvermögens und damit einer hohen Wirtschaftlichkeit aus und eignet sich gut für die Erzeugung eines Grob- oder Feinvakuums. Bewerkstelligen tut die Pumpe dies, indem zwei identische Rotoren (häufig mit achtförmigem Querschnitt) gegenläufig rotieren, ohne sich dabei zu berühren und so die Gasteilchen nach und nach in Richtung Pumpenausgang transportieren und dort in die Atmosphäre verdrängen. Da die Genauigkeit und Synchronität der zwei Kolben extrem wichtig ist, wird die Bewegung über ein Zahnradgetriebe realisiert. Sowohl der Abstand zwischen den Kolben, als auch der Abstand zum Gehäuse beträgt zu jedem Zeitpunkt weniger als 0,1 mm, um eine möglichst optimale Funktionsweise zu ermöglichen. Daraus resultiert ein wesentlicher Vorteil. Da es zu keinem direkten Kontakt der Komponenten kommt, funktioniert die Pumpe nahezu partikelfrei. Dies ist bei Scrollpumpen z. B. nicht der Fall, da es dort zum Abrieb zwischen den gleitenden Dichtungen kommt und somit viele Partikel entstehen (Teflonstaub).

Durch die Verwendung mehrerer Stufen hintereinander auf einer Achse kann die maximale Kompression (Druckunterschied Ein- und Auslassseite) erhöht werden. Die verwendete Rootspumpe im Experiment weist sieben Stufen auf. Schematisch ist die Funktionsweise eines Wälzkolbenpaares in Abbildung 7 dargestellt. [4, 5]



- |                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| 1 Ansaugflansch | 4 Pumpenausgangsflansch |
| 2 Wälzkolben    | 5 Gehäuse               |
| 3 Kammervolumen |                         |

Abbildung 7: Funktionsweise einer Wälzkolbenpumpe [4]

### 2.1.3 Vakuummessung

Um den Druck in einer Vakuumkammer zu messen und zu überwachen, sind je nach Vakuum (Druck und Betriebsbedingungen) unterschiedliche, spezielle und komplexe Messgeräte (Vakuummeter) notwendig. Die Überwachung ist sehr wichtig, da bei einer plötzlichen Zunahme des Drucks schnell gehandelt werden muss, wie beispielsweise das Schließen von Ventilen zu den Kryomodulen des Beschleunigers oder das Abschalten der Hochspannungsversorgung von Detektoren.

Unterschieden werden Vakuummeter mit Gasart-unabhängiger und mit Gasart-abhängiger Druckanzeige. Bei Ersteren wird der Druck direkt als flächenbezogene Kraft gemessen. Letztere hingegen messen den Druck indirekt mithilfe physikalischer Größen, mit denen aufgrund ihrer Proportionalität der herrschende Druck hergeleitet werden kann. Ein Beispiel für eine derartige physikalische Größe ist die Wärmeleitung, die bei einem Druck von unter 1 mbar druckabhängig ist. Ein gängiges Vakuummeter, welches sich dieser Proportionalität bedient, ist das Pirani-Vakuummeter. Dieses wird unter anderem auch im Experiment verwendet. Im Pirani-Vakuummeter wird ein feiner Draht (meist aus Wolfram) elektrisch beheizt. Die erzeugte Wärme wird an die Umgebung des Drahtes abgegeben und je nach dem dort vorliegenden Druck wird mehr oder weniger Wärme abgegeben. Je niedriger der Druck, desto höher ist der Wärmewiderstand (desto geringer die Wärmeleitfähigkeit) des umgebenden Gases. Um bei konstanter Heizleistung die Wärmemenge pro Zeiteinheit abzugeben, wird die Temperatur des Drahtes bei niedrigem Druck höher sein, was über die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes des Heizdrahtes gemessen werden kann. Daraus wird anschließend der Druck berechnet. Unterschiedliche Gase in der Vakuumkammer und damit unterschiedliche

Wärmeleitfähigkeiten können durch entsprechende Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. [4, 5]

Ein weiteres Vakuummeter mit Gasart-abhängiger Anzeige ist das Ionisations-Vakuummeter. Es misst mithilfe der druckproportionalen Teilchenanzahldichte den vorliegenden Druck. Im Messkopf des Vakuummeters befindet sich eine Ionisationskammer, welche das Gas aus der Vakuumkammer enthält. Aus einer Kathode treten Elektronen aus, die mittels eines elektrischen Feldes in Richtung der Anode beschleunigt werden. Treffen die Elektronen auf ihrem Weg zwischen den beiden Elektroden auf ein Gasmolekül, so wird dieses ionisiert. Dabei entstehen zusätzliche Elektronen und positive Ionen, welche durch das elektrische Feld in Richtung der entsprechenden Elektrode beschleunigt werden. Sie tragen so zu einer Erhöhung des Stromflusses zwischen den Elektroden bei. Diese Erhöhung ist ein Maß für die Teilchenanzahldichte in der Vakuumkammer. Unterschiedliche Gasmoleküle können dabei unterschiedlich gut ionisiert werden, weshalb Gasart-abhängige Korrekturfaktoren zur Anwendung kommen. Das grobe Funktionsprinzip ist bei den Vakuummetern dieser Kategorie gleich, jedoch gibt es Unterschiede bezüglich der Kathoden. [4]

Bei einer Kaltkathode (Penning-Vakuummeter) wird mithilfe einer Gleichspannung zwischen zwei nicht beheizten Elektroden (Anode und Kathode) eine Kaltkathodenentladung hervorgerufen, wodurch sich die Kathode bei der Entladung nicht erwärmt. Ein Magnetfeld sorgt dafür, dass diese Entladung erhalten bleibt, indem die Elektronen auf eine spiralförmige Laufbahn geraten und ausreichend Ladungsträger bilden. Diese werden je nach Ladung zur Anode oder Kathode gezogen, wodurch der messbare Ionisationsstrom entsteht, mit dem der Druck ermittelt wird. [4]

Die zweite Variante ist eine Heißkathode (Heißkathoden-Ionisations-Vakuummeter), die sich neben der Heißkathode aus einer Anode und einem Ionenfänger zusammensetzt. Durch die Erwärmung der Kathode werden Elektronen aus der Kathodenoberfläche freigesetzt und durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Dadurch kommt es erneut zur Ionisierung von Gasteilchen und es entsteht wieder ein messbarer Ionisationsstrom. [4]

Auch das Heißkathoden-Ionisations-Vakuummeter wird im Flüssigkeitsstrahl-Experiment eingesetzt. Um einen größeren messbaren Bereich abzudecken, wird eine Kombination aus Heißkathode- und Pirani-Vakuummeter verwendet. Eine Übersicht für welche Druckbereiche die in der Vakuumtechnik gängigsten Vakuummeter genutzt werden, ist in Abbildung 8 zu sehen.

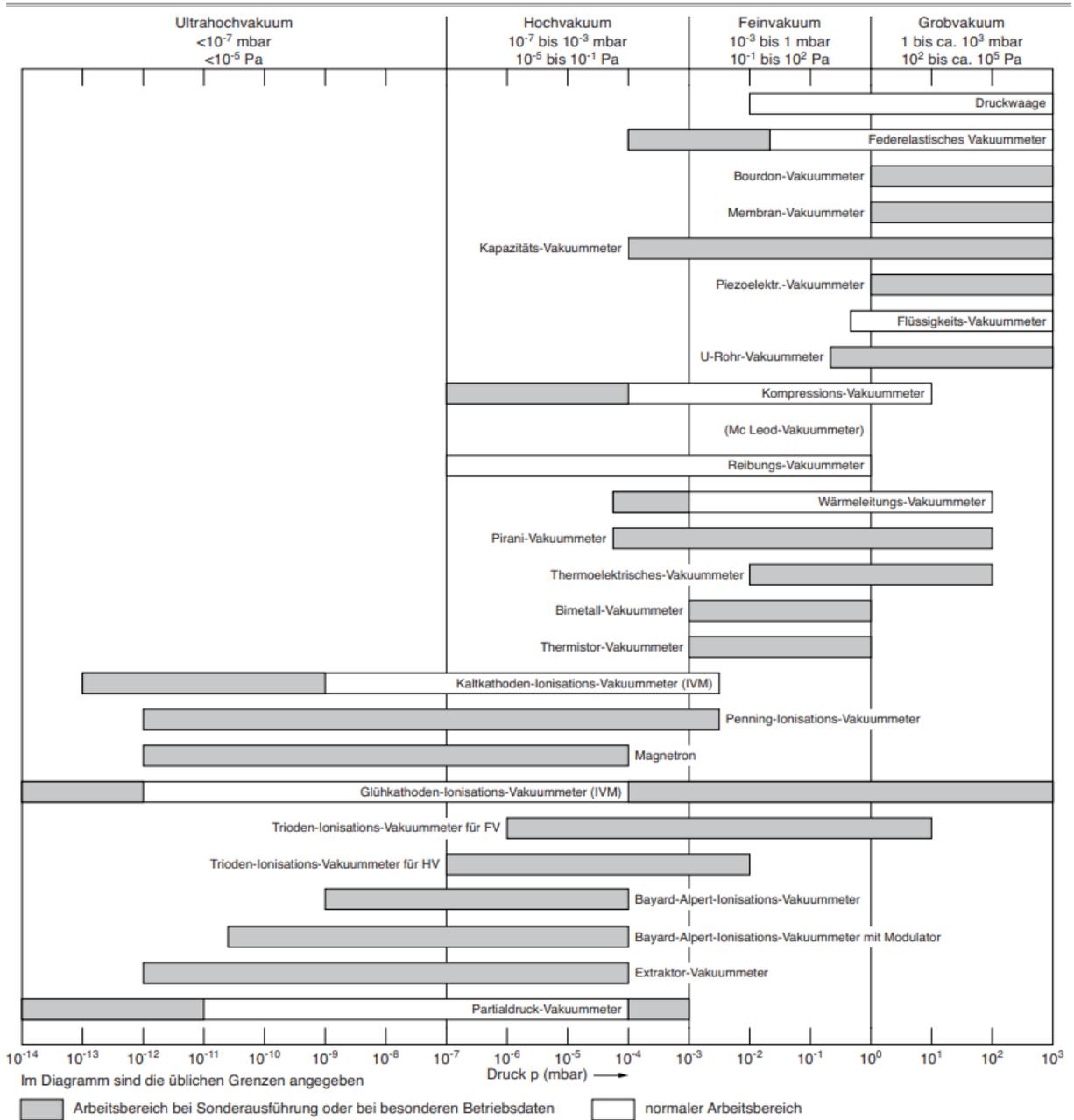


Abbildung 8: Messbereiche üblicher Vakuummeter [4]

### 2.1.4 Flanschsysteme und wichtige Komponenten

Viele der Experimente an den Beschleunigeranlagen beim DESY finden innerhalb von Vakuumkammern statt. Um diese mit anderen Kammern und Flanschen zu erweitern bzw. mit Rohrprofilen dicht zu verbinden, werden Flanschsysteme benötigt und genutzt. Der große Vorteil dieser Systeme ist, dass es sich dabei um lösbare Verbindungen handelt, die mit Flanschen hergestellt werden. Je nach Einsatzzweck und Vakuumanforderungen gibt es verschiedene Flanschsysteme. Die Systeme, die für das Flüssigkeitsstrahl-Experiment relevant sind, werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Kleinflansche (ISO-KF) sind standardisierte Flanschverbindungen, mit denen Komponenten dicht miteinander verbunden werden; üblicherweise im Bereich des Grob- und Feinvakuums (selten UHV). Wie dem Namen zu entnehmen ist, sind diese Flansche in ihrer Größe begrenzt.

Ihre Nennweiten betragen 10 bis 50 mm. An der Innen- oder Außenseite der Flansche gibt es einen Absatz für die Dichtung. Die zu verwendende Dichtung ist ein O-Ring (Elastomerring) mit Zentrierring. Um die Verbindung fest zu verschließen, wird ein Spannring um die Verbindung gespannt, welcher typischerweise per Hand mit einer Flügelmutter angezogen wird. In Sonderfällen werden auch Metaldichtungen, z. B. aus Aluminium eingesetzt. Die dazu passenden Spannringe werden mithilfe eines Maulschlüssels angezogen. Ein Beispiel einer Kleinflansch-Verbindung ist in Abbildung 9 dargestellt.

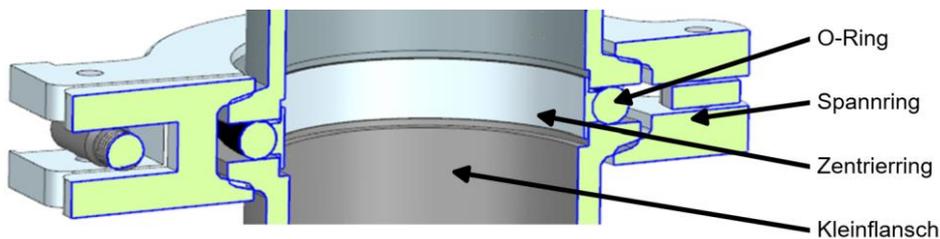


Abbildung 9: KF-Verbindung im Schnitt

Besonders wichtig sind die Kleinflansche, um Vakuumpumpen mit Vakuumkammern zu verbinden. Das wesentliche Verbindungsstück hierbei ist oft ein sogenannter Wellbalg (auch *Bellow* genannt), welcher aufgrund seiner Baustruktur sehr beweglich ist. Ein solcher Wellbalg (Abbildung 10) hat an beiden Enden einen KF-Anschluss. Auch diesen gibt es in verschiedenen Nennweiten, Längen und Ausführungen.

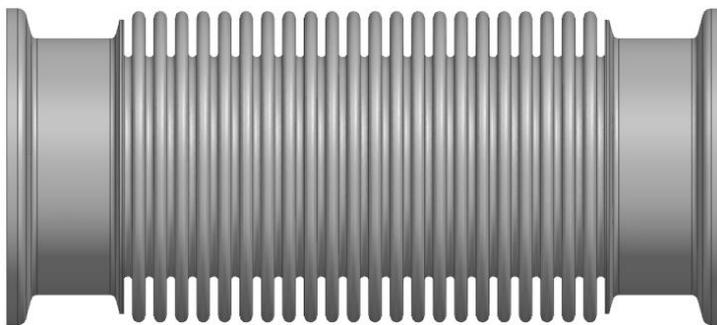


Abbildung 10: Beispiel für Wellbalg mit KF-Anschluss

Ein weiteres wichtiges Flanschsystem bilden die ConFlat-Flansche (CF-Flansche). Diese werden meist aus Edelstahl gefertigt und sind aufgrund der sehr stabilen und dichten Verbindung für Ultrahochvakuumanwendungen nutzbar. Das Spektrum der Nennweiten ist bei diesem Flanschtyp größer und reicht von 10 bis 400 mm (in Serie bis 250 mm). Das Anflanschen von CF-Komponenten wird mittels Schrauben oder Bolzen mithilfe eines außenliegenden Lochkreises möglich. Für die Dichtung empfiehlt es sich eine aus Kupfer (nur einmal verwendbar) oder Viton (Polymer, mehrfach verwendbar) einzusetzen. Auf der Dichtfläche von CF-Flanschen gibt es eine Schneidkante, welche für die Nutzung von Kupferdichtungen essentiell ist. Beim Anziehen der Flanschverbindung dringen die Schneidkanten in das Kupfer ein und sorgen dadurch für eine hohe Dichtigkeit.

CF-Flansche weisen eine große Varianz an verschiedenen Ausführungen auf. Zum einen gibt es Blindflansche (fest und drehbar), welche entweder zum Verschließen von Vakuumkammern dienen oder aber für gewünschte Zwecke mechanisch modifiziert werden können. Weiterhin gibt es sogenannte Reduzier- oder Adapterflansche. Diese sind hilfreich, wenn von einer größeren Nennweite auf eine kleinere gewechselt werden soll (z. B. von CF250 auf CF100), oder auch um unmittelbar an einem CF-Flansch eine KF-Verbindung anzuschließen (Abbildung 11). Eine weitere Möglichkeit bilden Schweißflansche (fest und drehbar), in denen u. a. Rohre mit Hilfe einer Anschlagkante eingeschweißt werden können. Sogenannte Durchführungsflansche erlauben es, Kabel aus dem Kammerinneren ohne Druckverluste nach außen zu bringen. Da die Vielfalt an CF-Flanschen groß ist, wird in dieser Arbeit nur ein kleiner Einblick in die CF-Komponenten gegeben.

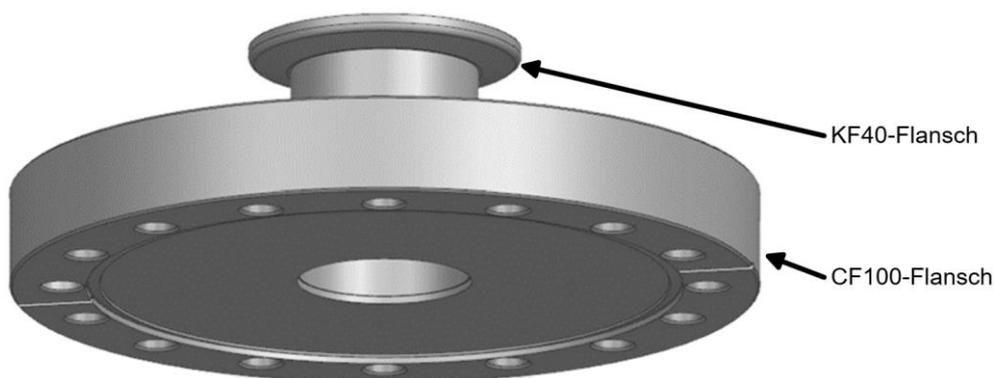


Abbildung 11: CF100- auf KF40-Adapterflansch

### 2.1.5 Werkstoffe

Wichtig im Umgang mit Vakuum ist die Wahl der richtigen Werkstoffe. Je nach Verwendungszweck, Umgebungsfaktoren und dem angestrebten Vakuumbereich unterscheiden sich die Anforderungen an die Werkstoffe. Besonders bedeutend ist dabei eine hohe Gasdichtheit der Werkstoffe im Vakuum, um zu verhindern, dass Gase in das Material eindringen und auch durchdringen. Dies ist vor allem bei der Werkstoffwahl der Vakuumkammer entscheidend, da es die CF-Flansche nur aus besonders ausgewählten Materialien gibt. Des Weiteren ist die Festigkeit ein wesentlicher Faktor für die Auswahl des Werkstoffes. Da von beiden Seiten der Kammer unterschiedliche Drücke auf das Material wirken, muss der Werkstoff ausreichend gegen Verformung standhalten.

Für alle Werkstoffe innerhalb der Kammer gilt, dass sie einen möglichst geringen Eigendampfdruck aufweisen, um weniger zum Ausgasen zu neigen, was das Vakuum verschlechtern würde. Voraussetzung für ein gutes Vakuum ist außerdem, dass die Werkstoffoberflächen von Fett befreit sind und das Material möglichst wenig Anteile von Fremdgasen enthält. Es sollte sich zudem leicht entgasen lassen, d. h. eingeschlossene Gase und Feuchtigkeit können gut und schnell aus dem Werkstoff entfernt werden. Sofern die geschilderten Eigenschaften bei der Wahl der Werkstoffe berücksichtigt sind, ist ein geringerer Druck schneller realisierbar und

in Kombination mit den richtigen Vakuumpumpen lassen sich auch besonders niedrige Drücke erreichen. [4-6]

Für Vakuumkonstruktionen am DESY gibt es eine technische Spezifikation bezüglich der Richtlinien für UHV-Komponenten. Dort sind neben Hinweisen zur vakuumgerechten Konstruktion, Fertigung und Montage auch vakuumgeeignete sowie -ungeeignete Werkstoffe aufgelistet. Zu den geeigneten reinen Werkstoffen zählen beispielsweise Aluminium, Kupfer und Titan. Ebenfalls geeignet sind bestimmte Edelmehle, wie z. B. die mit der Werkstoffnummer 1.4429 und 1.4435 (nichtrostende, austenitische Chrom-Nickel-Molybdän-Stähle). Es gibt auch vakuumtaugliche Legierungen, wie z. B. ausgewählte Aluminium-, Kupfer-Beryllium- und Zinn-Bronze-Legierungen. Kunststoffe wie Kapton (Polyimid) und Polyetheretherketon (Peek) werden ebenfalls oft in Vakuumanlagen beim DESY (auch für UHV) genutzt. Zu den unzulässigen Werkstoffen im Vakuum gehören unter anderem Blei und Zink. [7, 9, 10]

## 2.2 Physikalische Begriffe zum Experiment

Da der Aufgabenstellung ein physikalisches Experiment zugrunde liegt, ist es sinnvoll, die wichtigsten physikalischen Begrifflichkeiten und Zusammenhänge für das Experiment aufzugreifen und zu erläutern.

### 2.2.1 Absorption

Das übergeordnete Ziel des Experiments ist, das Absorptionsverhalten der Probe im Röntgenlicht zu analysieren. Unter Absorption versteht man den Prozess, bei dem ein Material aus elektromagnetischer Strahlung Energie aufnimmt. Das Absorptionsverhalten hängt dabei von der einfallenden Wellenlänge bzw. Frequenz der Einstrahlung, den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Materials und den Umgebungsbedingungen ab. Da verschiedene Materialien unterschiedlich auf Licht verschiedener Wellenlängen reagieren, werden charakteristische Absorptionsspektren erstellt, um damit ihre Materialeigenschaften spektroskopisch zu klassifizieren. Im Flüssigkeitsstrahl-Experiment wird das Absorptionsverhalten der in Wasser gelösten Aminosäure Glycin unter Röntgenstrahlung untersucht. [21-23]

### 2.2.2 Röntgenstrahlen

Bei Röntgenstrahlen spricht man von elektromagnetischen Wellen bei einer extrem kurzen Wellenlänge von 0,01 bis 10 nm und einer Frequenz von ca.  $3 \cdot 10^{16}$  bis  $3 \cdot 10^{19}$  Hz. Im elektromagnetischen Spektrum (Abbildung 12) liegt dieser Bereich zwischen der Gammastrahlung (< 0,1 nm) und der Ultraviolett-Strahlung (10 nm bis ca. 400 nm). [12]

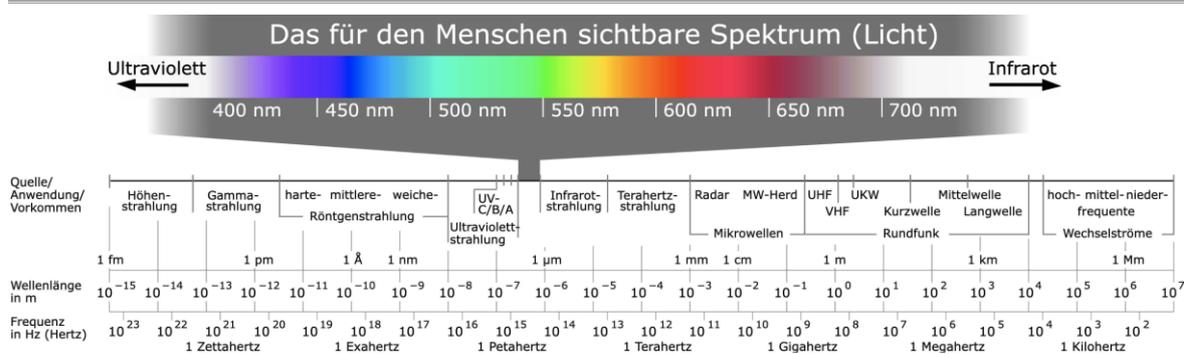


Abbildung 12: Elektromagnetisches Spektrum [11]

Insbesondere harte Röntgenstrahlung zeichnet sich dadurch aus, dass sie aufgrund der sehr kurzen Wellenlänge nahezu alle Materialien durchdringen kann. Zu den wenigen aber effektivsten Abschirmungen gegen harte Röntgenstrahlen zählen Blei und Wolfram. Für mittlere Röntgenstrahlung sind die Abschirmungsanforderungen bereits gemindert und weiche Röntgenstrahlung wird von allen Materialien sehr stark absorbiert (selbst von Luft). Der Bereich von 1 bis 100 nm wird oft auch Vakuum-UV (VUV) genannt, weil dieses Licht sich nur im Vakuum ausbreiten kann. Entsprechende Absorptionsexperimente sind unter Vakuumbedingungen auszuführen. In diesem Spektralbereich sind die geplanten FLASH-Experimente angesiedelt.

Da Röntgenstrahlung eine sehr hohe Photonenenergie aufweist (ca. 100 eV bis 250 keV), hat sie eine ionisierende Wirkung. Das bedeutet, dass Elektronen aus den Atomen entfernt werden, wodurch Ionen entstehen. Diese Eigenschaft macht Röntgenstrahlung für die Forschung sehr interessant und birgt zugleich ein ernstzunehmendes Risiko aufgrund der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung für den Menschen. Letzteres macht Strahlenschutzmaßnahmen in einer Vielzahl der Experimente insbesondere mit harter Röntgenstrahlung zwingend erforderlich. [12, 14]

Röntgenstrahlung entsteht zum einen in Röntgenröhren, wenn Elektronen (emittiert durch die erwärmten Kathoden) mit einer hohen Geschwindigkeit (mittels Hochspannung) auf eine metallische Anode treffen. Die Elektronen geben beim Aufprall Energie ab und dadurch werden Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung erzeugt. Diese bilden gemeinsam die Röntgenstrahlung. Alternativ kann Röntgenstrahlung auch mithilfe von Teilchenbeschleunigern entstehen, indem Elektronen auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und durch Magnetfelder umgelenkt werden. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Flüssigkeitsstrahllexperiments im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit kommt bei den geplanten Experimenten bei FLASH die Methode der Röntgenabsorptionsspektroskopie zum Einsatz. Sobald die ultrakurzen Röntgenpulse von FLASH auf die Probe treffen, kommt es zum Photoeffekt. [12, 13]

### 2.2.3 Photoeffekt

Der photoelektrische Effekt, beschrieben von Einstein, gilt als ein sehr wichtiger Meilenstein in der Quantenphysik. Er beschreibt den Vorgang, wenn Licht auf ein Atom trifft, bzw. die Wechselwirkung zwischen Photonen und gebundenen Elektronen. Der Effekt ist die Grundlage der Photovoltaik. [15]

Es gibt drei verschiedene Arten des Photoeffekts. Wo diese auftreten, hängt vorwiegend von den spezifischen Materialeigenschaften und der Photonenenergie ab. [15]

Der äußere Photoeffekt besagt, dass Photonen, wenn sie auf einen Feststoff (Metall oder Halbleiter) treffen, ihre Energie auf die Elektronen der Atome übertragen. Diese sorgt dafür, dass die Elektronen aus dem Material emittiert werden. Der äußere Effekt tritt vorwiegend bei Metallen auf, da dort die Elektronen frei beweglich sind. Die Photonenenergie muss dabei ausreichend groß sein, entsprechend der materialabhängigen Austrittsarbeit (in Elektronenvolt [eV]). [15-17]

Der innere Photoeffekt beschreibt, was passiert, wenn keine Elektronen emittiert werden. In diesem Fall absorbieren die Elektronen die Photonenenergie, was sie auf ein höheres Energieniveau befördert (vom Valenzband auf das Leitungsband). Dadurch werden die elektrischen Eigenschaften des Materials beeinflusst und die elektrische Leitfähigkeit verbessert. Dieser Vorgang kommt auch bei der Nutzung von Solarzellen zum Tragen. Der innere Photoeffekt tritt aufgrund ihrer Bandstruktur vorwiegend bei Halbleitern auf. Dort muss die Photonenenergie mindestens so groß wie die Bandlücke (Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leitungsband) sein. [17, 18]

Als dritte Art gibt es den molekularen Photoeffekt. Dieser beschreibt den Prozess, wie die atomaren Bestandteile ionisiert werden (Photoionisation) und somit elektrisch geladen sind. Dieser Vorgang setzt Strahlung von hoher Energie oberhalb des Ionisationspotentials voraus (z. B. XUV und Röntgenstrahlung). [15, 18]

### **3. Konzeptentwicklung**

Um gut strukturiert und effizient ein geeignetes Konzept für den Versuchsaufbau im Inneren der Vakuumkammer zu finden, werden die für diese Aufgabe relevanten Schritte der methodischen Produktentwicklung (nach VDI 2221) nach und nach durchgeführt. Dieses Vorgehen erleichtert es, alle Anforderungen im Überblick zu behalten, sich allen zu erfüllenden Funktionen bewusst zu werden und letztendlich das optimale Konzept mit einer hohen Qualität zu finden.

#### **3.1 Gantt-Diagramm**

Das Gantt-Diagramm (Tabelle 1) ist hilfreich, um den Arbeitsprozess zeitlich zu planen und zu vereinfachen. Hierfür werden Arbeitspakete (Meilensteine) erstellt und in weitere Unteraufgaben unterteilt. Für die jeweiligen Aufgaben wird eine Bearbeitungsdauer kalkuliert und im Gantt-Diagramm festgehalten. Im Verlauf des Projektes wird nach und nach die wirkliche Zeitdauer für die Aufgaben ergänzt (wiederzufinden in Anhang A). Für den Nutzer ist so ersichtlich, wie gut er im Zeitplan ist und ob ggf. mehr oder weniger Arbeitszeit investiert werden muss, als zuvor geplant war.

| Gantt - Diagramm   |    | Wochenplan (geplante Zeitdauer) |                 |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
|--|----|---------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Flüssigkeitsstrahlquelle     |    | Geplante Startwoche             | Dauer in Wochen | Reale Startwoche | Reale Dauer in Wochen | 1 (KW 25) | 2 (KW 26) | 3 (KW 27) | 4 (KW 28) | 5 (KW 29) | 6 (KW 30) | 7 (KW 31) | 8 (KW 32) | 9 (KW 33) | 10 (KW 34) | 11 (KW 35) | 12 (KW 36) |
| <b>Meilenstein 1 - Vorbereitung, Planung und Konzipierung</b>              |    |                                 |                 |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Erstellung Theses-Dokument   | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Gliederung planen  | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Meilensteine definieren  | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Erstellung Gantt-Diagramm  | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Erstellung Anforderungsliste   | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Brickworld-Konzept designen  | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Kontextdiagramm erstellen  | 1  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Morphologischer Kasten entwickeln  | 1  | 2                               | 2               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Konzepterstellung  | 1  | 2                               | 2               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Konzeptbewertung   | 1  | 2                               | 2               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Dokumentation (1/4)  | 1  | 2                               | 2               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| <b>Meilenstein 2 - Konstruktion und Design</b>                             |    |                                 |                 |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Umsetzung Konzept in Konstruktion  | 2  | 2                               | 2               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Designoptimierung der Konstruktion   | 4  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Erstellung Gesamtaugruppe  | 5  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Technische Zeichnungserstellung  | 5  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Fertigung organisieren   | 5  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Dokumentation (2/4)  | 3  | 3                               | 3               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| <b>Meilenstein 3 - Validierung der Konstruktion und Vakuumberechnungen</b> |    |                                 |                 |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Planung Simulation   | 6  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Durchführung Simulation  | 7  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Vakuumberechnungen   | 8  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Im Notfall Anpassung Komponenten   | 8  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Im Notfall Absprache Fertigung   | 8  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Dokumentation (3/4)  | 6  | 3                               | 3               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| <b>Meilenstein 4 - Endmontage, Inbetriebnahme und Fazit</b>                |    |                                 |                 |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Qualitätskontrolle durchführen   | 9  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Endmontage durchführen   | 9  | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Vorbereitung Inbetriebnahme  | 10 | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Durchführung Inbetriebnahme  | 10 | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Fazit  | 11 | 1                               | 1               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |
| Dokumentation (4/4)  | 9  | 4                               | 4               |                  |                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |            |            |

Tabelle 1: Gantt-Diagramm (Planung)

Die farbliche Unterscheidung der Arbeitspakete gibt einen Hinweis auf die vier im vorliegenden Projekt zu erreichenden Meilensteine. Im ersten Meilenstein geht es primär um die Planung und Konzipierung unter Anwendung der methodischen Produktentwicklung. Ziel des zweiten Meilensteines ist es, die Konstruktion mithilfe der Ergebnisse aus dem ersten Meilenstein umzusetzen und Zeichnungen zu erstellen, um damit eine abschließende Fertigung zu ermöglichen. Im dritten Meilenstein werden die Ergebnisse validiert und erforderliche Berechnungen für die Vakuumtechnik durchgeführt. Im Falle einer Unterdimensionierung der Konstruktion oder bestimmter Komponenten müssen notwendige Maßnahmen ergriffen werden, um Änderungen in der Fertigung durchzusetzen. Im vierten und letzten Meilenstein erfolgen die Endmontage und die abschließende Inbetriebnahme des Experiments. Am Ende wird die Aufgabe zusammengefasst. Parallel zu allen Meilensteinen wird der Prozess begleitend dokumentiert. Inhaltlich sollte dieser immer so weit sein, wie der derzeitige Fortschritt im Gantt-Diagramm. Es ist daher anzustreben, vor Beginn des nächsten Meilensteins die Dokumentation vom vorherigen Meilenstein abzuschließen.

### 3.2 Anforderungsliste

Um die Aufgabe zunächst zu präzisieren, werden die Forderungen (F) und Wünsche (W) an die Konstruktion in Kategorien gegliedert und in eine übersichtliche Anforderungsliste gebracht. Anforderungen, welche als Forderung zugeordnet werden, müssen in jedem Fall verpflichtend erfüllt werden. Die Wünsche sind zwar nicht notwendig, haben aber je nach Einstufung von W1 (nicht wichtig) bis W4 (sehr wichtig) eine entsprechende Priorität. Zu sehen ist die erstellte Anforderungsliste in Tabelle 2.

| W1 = nicht wichtig<br>W2 = wenn möglich<br>W3 = wichtig<br>W4 = sehr wichtig<br>F = Forderung |       | <b>Anforderungsliste</b><br>Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme<br>einer Flüssigkeitsstrahlquelle<br>in einer Vakuumkammer |            |
|---|-------|--|------------|
| Lfd. Nr.  | F / W | Anforderung  | Werte      |
| <b>1</b>  |       | <b>Funktionalität</b>  |            |
| 1.1   | F     | Vakuumgeeignete Werkstoffe   |            |
| 1.2   | F     | Maximaler Druck in der Kammer  | < 0,1 mbar |
| 1.3   | F     | Auffangen der Flüssigkeit knapp unter Würfelmitte  |            |
| 1.4   | F     | Flüssigkeit aus der Kammer befördern   |            |
| 1.5   | F     | Eiskristallbildung der Probe verhindern  |            |
| <b>2</b>  |       | <b>Geometrie / Design</b>  |            |
| 2.1   | W3    | Effizientes Abpumpen gewährleisten (Design)  |            |
| 2.2   | W2    | Freie Sicht auf Wechselwirkungszone Laser - Probe  |            |
| 2.3   | W2    | Platzsparende Bauweise   |            |
| 2.4   | W2    | Fertigungsfreundliche Gestaltung   |            |
| 2.5   | F     | Nutzung eines Skimmers als Auffangvorrichtung  |            |
| 2.6   | W3    | Unkomplizierter Versuchsaufbau   |            |
| 2.7   | W2    | 2,81° Verdrehung der Lochkreise berücksichtigen  |            |
| <b>3</b>  |       | <b>Kinematik</b>   |            |
| 3.1   | W4    | Justierung der Höhe der Auffangvorrichtung   |            |
| 3.2   | F     | Lineareinheit zum Verfahren der Linse nutzen   |            |
| 3.3   | W4    | Justierung der Höhe der Linse (auf Lineareinheit)  |            |
| 3.4   | W4    | Lineareinheit Fahrweg frei   | 12,7 mm    |
| <b>4</b>  |       | <b>Diagnostik</b>  |            |
| 4.1   | W4    | Einbau von genügend Kameras  |            |
| 4.2   | W3    | Einfaches Ausrichten und Justage der Diagnostik  |            |
| 4.3   | W4    | Überhitzen von Komponenten vermeiden   | < 150°C    |
| <b>5</b>  |       | <b>Ergonomie</b>   |            |
| 5.1   | W3    | Plug & Play Prinzip für Experimentdurchführung   |            |
| 5.2   | W2    | Bequemes Justieren   |            |
| <b>6</b>  |       | <b>Fertigung</b>   |            |
| 6.1   | W2    | Fertigung beim DESY  |            |
| 6.2   | W2    | Nutzung von Kaufteilen   |            |
| 6.3   | W4    | Vakuumreinigung nach Fertigung   |            |
| 6.4   | W2    | Fertigungsfreundlicher Werkstoff   |            |
| <b>7</b>  |       | <b>Montage</b>   |            |
| 7.1   | W2    | Montagefreundliche Konstruktion  |            |
| 7.2   | W1    | Fehlervermeidung durch Poka-Yoke   |            |
| 7.3   | W2    | Keine schweren Bauteile  |            |
| 7.4   | W4    | Tragen von Einweghandschuhen   |            |
| 7.5   | W4    | Fettfreie und saubere Komponenten im Vakuum  |            |
| 7.6   | W2    | Montage unter Reinraumbedingungen  |            |
| <b>8</b>  |       | <b>Sicherheit</b>  |            |
| 8.1   | F     | Schutz gegen Verformung im Betriebsfall  |            |
| 8.2   | F     | Schutz gegen Versagen im Berstfall   |            |
| <b>9</b>  |       | <b>Umgebung</b>  |            |
| 9.1   | W3    | Saubere Umgebung   |            |
| 9.2   | W1    | Trockene Umgebung  |            |
| 9.3   | W3    | Gleichbleibende Lichtverhältnisse  |            |
| 9.4   | W1    | Raumtemperatur   |            |

Tabelle 2: Anforderungsliste zur Konstruktion

Besonders wichtig sind die Anforderungen der Kategorien Funktionalität und Sicherheit. Alle Anforderungen aus diesen Segmenten müssen zwingend erfüllt werden, da sonst ein erfolgreiches Experiment nicht zu gewährleisten bzw. aufgrund mangelnder Sicherheit nicht verantwortbar ist.

Es gibt einen Druck in der Kammer der maximal vorhanden sein darf (0,1 mbar). Daher ist es wichtig, die verschiedenen Aspekte der Vakuumtechnik für ein gutes Vakuum einzuhalten. In diesem Zusammenhang ist es unbedingt erforderlich, die Flüssigkeit aufzufangen und aus der Kammer zu schaffen. Das Auffangen soll dabei mit einem Skimmer (Abbildung 13) geschehen. Dieser weist eine hyperbolische Form auf, die dabei hilft, dass sich der feine Wasserstrahl nach Eintritt gut verteilt. Gleichzeitig dient der Skimmer dazu, eine differentielle Druckstufe zwischen der nachfolgenden Auffangkonstruktion und der Probenkammer herzustellen. Auf diese Weise wird der niedrige Druck in der Kammerumgebung aufrechterhalten.

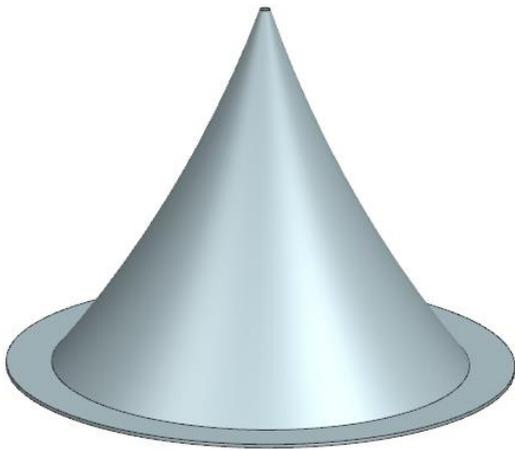


Abbildung 13: Modell eines Skimmers

Eine weitere Forderung ist, dass eine für die Flüssigkeitsstrahldiagnostik erforderliche Linse mittels einer Lineareinheit (Abbildung 14) verfahren und justiert werden kann. Die Feinjustage geschieht mittels eines Piezomotors, welcher an der Lineareinheit angebracht wird. Die Justierung kann somit auch während des Experimentbetriebes vorgenommen werden.



Abbildung 14: Lineareinheit (ohne Motor) [19]

Bezüglich der Sicherheit ist darauf zu achten, dass die Komponenten, die einer nennenswerten Belastung ausgesetzt sind, ausreichend gegen Verformung geschützt sind. Auch muss der Fall eingeplant werden, dass eine Turbomolekularpumpe blockiert (z. B. aufgrund eines Lagerschadens) und es dadurch zum Berstfall kommt. Das daraus entstehende Drehmoment darf den Experimentaufbau samt Versuchsgestell nicht umkippen.

Die weiteren Anforderungen sind Wunschanforderungen mit verschiedenen Wertigkeiten. Generell gilt, je mehr von diesen erfüllt werden, desto besser wird das Experiment funktionieren und auch bessere Endergebnisse liefern.

Großen Einfluss auf die Konstruktion haben die Anforderungen aus der Kategorie Geometrie / Design. Die Konstruktion im Kammerinneren soll so konzipiert werden, dass das Abpumpen der Kammer und der Flüssigkeitsabsorption möglichst effizient funktioniert. Dies ist dann gewährleistet, wenn der Weg zur Pumpe viel Freiraum und wenig Hindernisse aufweist. Um dies möglich zu machen, wird eine platzsparende Bauweise der Komponenten angestrebt.

Weiterhin ist es von Vorteil, wenn die Kameras für die Strahldiagnostik sowie die Tür mit dem Sichtfenster ins Innere des Vakuumschranks freie Sicht auf das Experiment geben. So können die Ergebnisse gut erfasst werden, und es kann während des Versuchs vom Sichtfenster aus beobachtet werden, ob der Betrieb reibungslos funktioniert. Es wird außerdem gewünscht, dass der Versuchsaufbau, bezüglich Versuchseinrichtung und Fertigung, möglichst unkompliziert unter Einhaltung der Forderungen durchführbar ist.

In manchen Fällen wird es nötig sein, die um  $2,81^\circ$  verdrehten Lochkreise des Vakuumschranks zu beachten. Diese sind aus dem Grund verdreht, damit es zwischen den Gewinden zu keinen Kollisionen kommt. Deshalb sind sie jeweils um ein Viertellochabstand versetzt.

Anforderungen der Kategorie Kinematik zielen darauf ab, dass bestimmte Komponenten im Kammerinneren in mindestens eine Richtung beweglich bzw. justierbar sein müssen. Wäre dies nicht der Fall, müssten alle Teile extrem genau gefertigt werden, da die Höhe der Auffangvorrichtung auf Zehntelmillimeter eingestellt werden muss. Das ist u. a. deshalb problematisch, da während des Versuchs möglicherweise mehrere kommerziell erhältliche Skimmer unterschiedlicher oberer Öffnungsdurchmesser verwendet werden müssen und diese in ihrer Gesamthöhe verschieden sind. Welche Dimensionen die Skimmer einnehmen, lässt sich mithilfe der Spezifikationen bestimmen (Tabelle 3). Die Abmaße A, B, C und D sind in der Skizze (Abbildung 15) dargestellt.

|              | (A)= Uncut Length, base to apex | Length, Base to Orifice - (D)= Orifice Diameter | (B)= Outside Diameter at Base (Brim O.D.) | (C)= Brim Width (approx.) |
|--------------|---------------------------------|---|---|---------------------------|
| Model No.    |                                 |   |   |                           |
| Stock Models |                                 |   |   |                           |
| 1            | 19.1mm (0.750")                 | A - 2.26D                                       | 22.23mm (0.875")                          | 2.0mm (0.080")            |
| 2            | 25.4mm (1.000")                 | A - 2.26D                                       | 27.94mm (1.100")                          | 2.5mm (0.100")            |

Tabelle 3: Spezifikation Skimmer [20]

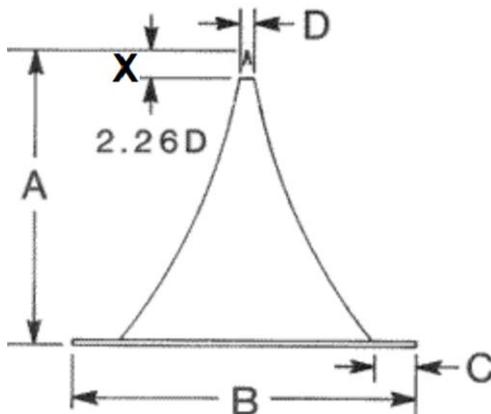


Abbildung 15: Skizze mit Maßen A, B, C, D und X (modifizierte Skizze von [20])

Zur Bestimmung der Gesamthöhe wird vom jeweiligen Skimmer der obere Durchmesser benötigt. Dieser ist fertigungsbedingt bei jedem Exemplar verschieden und daher bei jedem einzeln angegeben, damit man mithilfe der Spezifikationen alle restlichen Abmaße berechnen kann. Es wurden fünf verschiedene, bereits gekaufte und vorliegende Skimmer ausgewählt. Unter ihnen ist der mit dem kleinsten und der mit dem größten Durchmesser enthalten. Für diese fünf Skimmer sind beispielhaft die ergebenden Abmaße in Tabelle 4 zu sehen, dabei von links nach rechts im oberen Durchmesser zunehmend und in der Gesamthöhe abnehmend. Die Höhe der möglichen Skimmer variiert somit zwischen minimal 20,88 mm und maximal 24,27 mm. Das gezeigte Skimmer-Modell aus Abbildung 13 entspricht den Abmaßen von Skimmer 5 aus Tabelle 4.

| Skimmer         | 1     | 2      | 3     | 4     | 5     |
|-----------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| A [mm]          | 25,4  | 25,4   | 25,4  | 25,4  | 25,4  |
| B [mm]          | 27,94 | 27,94  | 27,94 | 27,94 | 27,94 |
| C [mm]          | 2,5   | 2,5    | 2,5   | 2,5   | 2,5   |
| D [mm]          | 0,5   | 0,75   | 1     | 1,5   | 2     |
| X [mm]          | 1,13  | 1,695  | 2,26  | 3,39  | 4,52  |
| Gesamthöhe [mm] | 24,27 | 23,705 | 23,14 | 22,01 | 20,88 |

Tabelle 4: Abmaße vorhandener Skimmer

Zur Charakterisierung des Flüssigkeitsstrahls während des Experimentbetriebs müssen aus verschiedenen Perspektiven Kameras von außen in Richtung Würfelmitte ausgerichtet

werden. Für eine bestimmte Ansicht muss eine Kamera ein Bild vom *Flat-Sheet* in einer bestimmten Vergrößerung abbilden können. Dafür muss sich eine passend ausgerichtete Linse zwischen der Kamera und dem *Flat-Sheet* befinden. Der Einbau der Strahldiagnostik in Nominalposition sollte so geplant werden, dass die verwendeten Geräte kaum noch justiert werden müssen.

Wünsche der Kategorien Ergonomie und Montage sind entscheidend dafür, dem Monteur das Montieren deutlich leichter, angenehmer und weniger fehleranfällig zu gestalten. Außerdem wird die Verletzungsgefahr des Monteurs reduziert und mögliche Schäden an Bauteilen vermieden (z. B. durch das Herunterfallen schwerer und unhandlicher Komponenten). Es ist bei der Montage der Vakuumkomponenten essentiell, dass diese frei von Fett und Unreinheiten sind. Daher ist zusätzlich darauf zu achten, dass beim Montieren regelmäßig gewechselte Einweghandschuhe zu nutzen sind. Das *Plug & Play*-Prinzip hat den Sinn, dass das Experiment einfach und schnell in Betrieb genommen werden kann, ohne dass es dabei zu hohem Arbeitsaufwand durch notwendige Änderungen abhängig von der Lage des Versuchsortes kommt.

Die Erfüllung der Wünsche aus der Kategorie Fertigung sorgt dafür, dass die Fertigung schneller erfolgen kann. Dies ist aufgrund des begrenzten Zeitraums, der für die Inbetriebnahme des Versuchsaufbaus zur Verfügung steht, sehr wichtig. Daher ist es sinnvoll eine interne Fertigung beim DESY anzustreben und Kaufteile direkt zu bestellen. Die Konstruktion, die Werkstoffe und die Bemaßungen der technischen Zeichnungen, sollten fertigungsfreundlich gestaltet und ausgewählt werden. Wichtig ist es zudem, eine abschließende Reinigung der Vakuumkomponenten durchzuführen.

Es ist sinnvoll, dass die Versuchsumgebung beim Versuchsaufbau möglichst sauber und trocken ist. Außerdem sollten während des Experiments gleichbleibende Lichtverhältnisse gewährleistet werden, damit für die Versuchsauswertung die Hintergrundbeleuchtung nahezu identisch ist und die Ergebnisse besser miteinander vergleichbar sind.

### 3.3 Brickworld-Konzept

Um ein ungefähres Bild vom Versuchsaufbau zu erstellen, wird im Folgenden (Abbildung 16) die *Brickworld*-Methode angewendet. Diese zeigt stark vereinfacht, welche Hauptkomponenten verwendet werden müssen, ohne dabei eine genaue Lösung darzustellen.

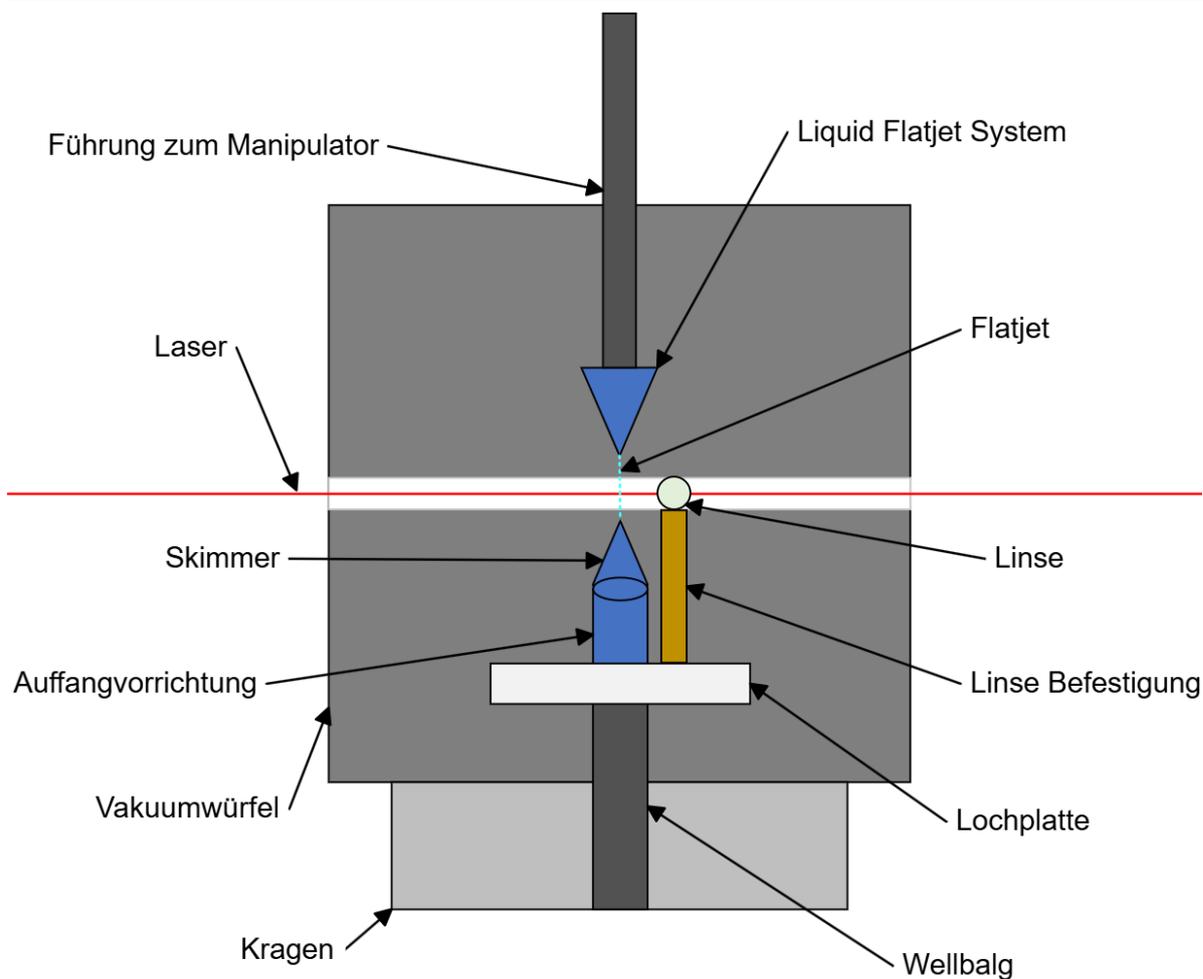


Abbildung 16: Brickworld-Konzept

Hier ist erkennbar, dass die aus der Düse austretende Flüssigkeit von einem Bauteil aufgefangen wird. Dieser Teil wird im Weiteren als Auffangvorrichtung betitelt. An ihrer Oberseite muss ein Weg gefunden werden, den Skimmer zu befestigen. Der Skimmer ist für die Erfüllung der Aufgabe vorgeschrieben, weswegen er auch als Forderung in der Anforderungsliste wiederzufinden ist. Aufgrund der sehr kleinen Öffnung des Skimmers, kann innerhalb des Auffangsystems von unten abgepumpt werden. An dieser Stelle wird auch ersichtlich, dass die Wichtigkeit des Manipulators darin besteht, die Düse präzise in alle Achsrichtungen bewegen zu können.

Die Auffangvorrichtung wird in der Kammer in einer stabilen Art und Weise befestigt, da diese während des Experiments möglichst bewegungsfrei bleiben soll. Dazu wird sie an einer Lochplatte fixiert, welche wiederum in der Kammer verankert wird. Wichtig dabei ist, dass entweder die Auffangvorrichtung oder die Platte in der Höhe justierbar ist. Da die Auffangeinheit die aufgefangene Flüssigkeit aus der Kammer hinausbefördern soll, ist es notwendig, dass dieses Bauteil dicht an eine weitere Komponente gefügt wird, welche die Flüssigkeit weiterbefördern kann. Da aufgrund der Höhenjustierung die Länge von diesem Zwischenstück veränderlich sein muss, wird ein Wellbalg genutzt (Abbildung 10). Dieser ist in seiner Länge je nach Modell unterschiedlich variabel und wird zum Flansch unterhalb der Kammer geführt.

Für die Flüssigkeitsstrahldiagnostik ist es entscheidend, dass eine Linse im Inneren der Kammer in richtiger Ausrichtung auf Strahlhöhe angebracht wird. Der Abstand zur Würfelmitte entspricht dabei der Brennweite der Linse. Zusätzlich muss die Achse der Linse auf der Achse eines CF63-Flansches von einem der beiden Clusterflansche liegen (Würfelmitte).

### 3.4 Kontextdiagramm

Im Kontextdiagramm (Abbildung 17) wird veranschaulicht, wie die Flüssigkeitsstrahlquelle mit ihrer Umwelt interagiert und wie die Beziehung zueinander ist. Anhand der Richtung der Pfeile ist sowohl der Input, als auch der Output erkennbar. Die Pfeilfarbe beschreibt, wo es sich um einen Informations-, Material- oder Energiefluss handelt. Dies hilft dabei, den Kontext des Systems zu erkennen.

Zum Informationsfluss zählt u. a. der Bediener, der das Experiment begleitet und Einstellungen vornimmt. Während und am Ende des Experiments erhält er Informationen in Form von Messergebnissen und Daten.

Als Energiefluss gelten die Pumpleistung, welche zur Vakuumerzeugung in die Vakuumkammer eingebracht wird, und der Laserstrahl, welcher in die Kammer eindringt, die Probe durchdringt und sie dann wieder verlässt. Die Vakuumpumpe, das Vakuum, die Diagnostik, aber auch die Probe zählen zum Materialfluss.

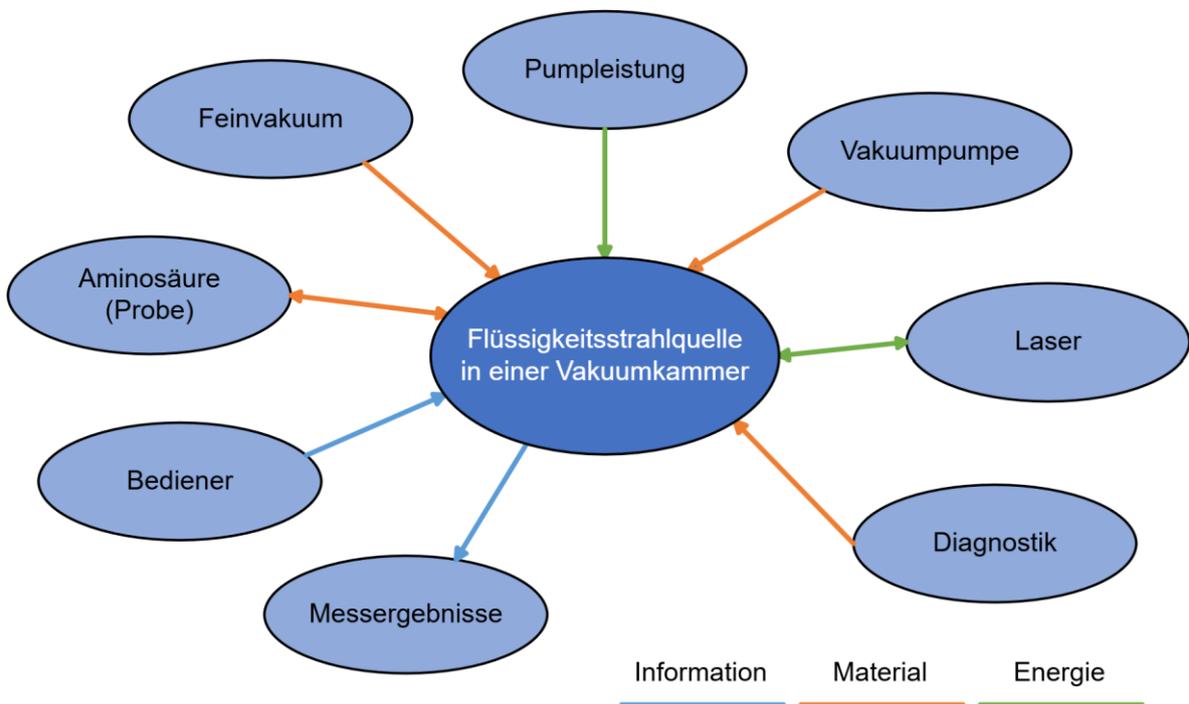


Abbildung 17: Kontextdiagramm

Die erhaltenen Informationen aus dem Kontextdiagramm und dem *Brickworld*-Konzept werden im weiteren Verlauf bei der Konzipierung der Konstruktion helfen, da das System nun verständlicher und greifbarer geworden ist.

### 3.5 Morphologischer Kasten

Aus den erstellten Anforderungen können Teilfunktionen hergeleitet werden. Um daraus mögliche Konzepte zu erstellen, wird die Methodik des morphologischen Kastens angewendet. In diesem können verschiedene Lösungsansätze zur Erfüllung der Teilfunktionen in Form von Komponenten, Wirkprinzipien etc. dargestellt werden. In Tabelle 5 ist der morphologische Kasten abgebildet.

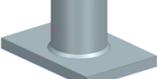
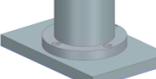
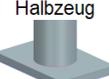
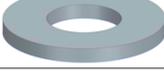
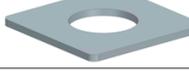
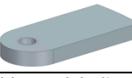
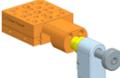
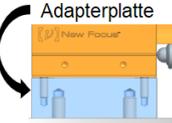
| Morphologischer Kasten         |                                    |  |   |  |   |
|--------------------------------|------------------------------------|--|---|--|---|
| Flüssigkeitsstrahlquelle       |                                    |  |   |  |   |
| Parameter                      |                                    | Lösungsmöglichkeiten   |   |  |   |
| Ebene 1                        | Ebene 2                            | Lösung 1   | Lösung 2  | Lösung 3   | Lösung 4  |
| Auffang-<br>vorrichtung        | Werkstoff                          | Aluminium (z. B. 3.3547)   | Edelstahl (z.B. 1.4429)   | Titan  | Kunststoff (z.B. PEEK)  |
|                                | Höhenjustierbar                    | Elektrisch   | Manuell   | Nicht Justierbar   |   |
|                                | Geometrie                          | Viereckig<br>                         | Zylindrisch<br>                          |  |   |
|                                | Verbindung Wellbalg                | Stoffschlüssig   | KF-Klemme<br>                            | KF-Kette<br>              |   |
|                                | Befestigung Skimmer                | Anschraubdeckel<br>                   | Einschweißen<br>                         | Anlöten<br>               | Einpassen<br>                        |
|                                | Vermeidung vertikale<br>Eisbildung | Chopper<br>                         | Erwärmung außen durch<br>Heizdraht<br> | Schrägen im Inneren<br> | Anbringen<br>Wärmegitter innen<br> |
|                                | Befestigung Platte                 | Schrauben anklammern<br>            | Anschweißen<br>                        | Anschrauben<br>         | Beides aus einem<br>Halbzeug<br>   |
| Platte                         | Werkstoff                          | Aluminium  | Edelstahl (z.B. 1.4429)   | Titan  |   |
|                                | Höhenjustierbar                    | Elektrisch   | Manuell   | Nicht Justierbar   |   |
|                                | Geometrie                          | Kreisförmig<br>                     | Viereckig<br>                          | Kontur mit Radien<br>   |   |
|                                | Befestigung Kammer                 | CF250 Flansch oben   | CF250 Flansch unten   | Kragenverbindung   | Innerhalb des Würfels   |
|                                | Art der Befestigung                | Anschweißlaschen<br>                | Gewindebolzen<br>                      | Direkt anschweißen   |   |
| Diagnostik<br>Innen<br>(Linse) | Höhenverstellung                   | Lineareinheit mit<br>Piezomotor<br> | Manuell über Stangenhalter<br>         |  |   |
|                                | Befestigung<br>Lineareinheit       | Kleiner Stangenhalter<br>           | Großer Stangenhalter<br>               | Kein Stangenhalter<br>  |   |
|                                | Befestigung Platte                 | Adapterplatte<br>                   | Anschweißen   | Anlöten  | Anschrauben<br>                    |

Tabelle 5: Morphologischer Kasten

Neben den definierten Teilfunktionen sind jeweils bis zu vier Lösungsvorschläge zu sehen. Zur Übersichtlichkeit sind die Teilfunktionen in zwei Ebenen aufgeteilt. Den ersten großen Konstruktionspunkt stellt die Fangkonstruktion der Flüssigkeitsprobe dar. Für diese muss ein vakuumgeeigneter Werkstoff gewählt werden. Zur Auswahl stehen daher Aluminium, Edelstahl und Titan. Eine alternative Möglichkeit ist ein Kunststoff wie PEEK. Wichtig ist auch die Entscheidung, ob die Konstruktion in der Höhe einstellbar sein soll und wenn ja, ob mit einer elektrischen oder manuellen Lösung (z. B. mithilfe von Langlöchern, in denen mit Schrauben der Freiheitsgrad in der Höhenbewegung blockiert werden kann).

Der nächste wichtige Punkt beschäftigt sich mit der Geometrie des Körpers. Möglich ist eine zylindrische oder eine viereckige Form. Diese Entscheidung hat maßgeblichen Einfluss auf die Fertigung und auf die Lösungsfindung, wie die vertikale Eisbildung vermieden werden soll. Mögliche Lösungen dafür sind ein *Chopper* (rotierende Rotorblätter), die Erwärmung der Auffangvorrichtung mit einem Heizdraht, oder ein spezielles Design im Inneren des Bauteils, welches ein Hochwachsen erschwert, da es bei Kontakt zum Bruch des Eises kommt (z. B. durch Schrägen). Eine weitere Möglichkeit ist das Anbringen eines Wärmegitters im Inneren, welches die Probe zwingend passieren muss, dabei verdunstet und abgepumpt wird. Damit das Abpumpen überhaupt funktioniert, muss die Auffangeinheit dicht mit einem Wellbalg verbunden werden. Dies ist durch Anschweißen oder aber über eine KF40-Verbindung (Verbindungsstück in Form einer Kette oder einer Klemme) möglich.

Den sensiblen Skimmer gilt es sicher an der Auffangvorrichtung zu fixieren, neben stoffschlüssigen Möglichkeiten bietet sich die Nutzung eines Anschraubdeckels an, welcher den Skimmer festklemmt. Es kann auch versucht werden, den Skimmer passgenau einzupassen.

Da die Auffangkonstruktion auf eine Platte geschraubt werden soll, muss auch hierfür eine Entscheidung getroffen werden. Der Aufbau könnte mit einer Schraube angeklemt werden und wäre dann auch in der Höhe justierbar. Alternativ kann er angeschweißt werden, dies hat jedoch großen Einfluss auf die Materialwahl. Denkbar ist auch, dass die Auffangvorrichtung einen im Durchmesser größeren Absatz aufweist, in denen Durchgangslöcher eingebracht werden können. Auf diese Weise kann sie mit der Platte verschraubt werden. Die Auffangeinheit und die Platte können auch in einem Stück aus dem Vollen gefräst werden, was aber eine sehr unwirtschaftliche Lösung darstellt.

Ähnliche Entscheidungen müssen auch für die Lochplatte getroffen werden. Sehr wichtig ist hier die Wahl, wo und wie die Platte innerhalb der Vakuumkammer befestigt wird. Möglich wäre dies auf der Innenseite des oben oder unten liegenden CF250-Flansches, auf Höhe der Kragenverbindung oder im Vakuumwürfel selbst. Eine potenzielle Befestigungsmöglichkeit ist dabei das direkte Anschweißen. Es ist auch denkbar, die Flansche mit Gewindebohrungen zu modifizieren, um Gewindebolzen einschrauben zu können. Die Konstruktion kann dann daran aufgebaut und mittels Sechskantmuttern gesichert werden. Auf diese Weise wäre eine auf die Bolzen gesetzte Lochplatte in der Höhe justierbar. Ähnlich ist auch die Befestigung mit

Anschweißlaschen realisierbar. Es werden vier Laschen in die Kammer (z. B. an die unten liegende Kragenkonstruktion) geschweißt und anschließend Gewindebolzen eingeschraubt und durch Sechskantmuttern gekontert.

Aus dem *Brickworld*-Konzept ist ersichtlich, dass für die Flüssigkeitsstrahldiagnostik im Kammerinneren eine Linse verbaut werden muss. Sie muss entlang der Achse eines CF63-Flansches (Komponente der Diagnostikflansche) auf die Kammermitte justierbar sein. Laut der Anforderungsliste soll dies mithilfe einer Lineareinheit umgesetzt werden, welche je nach Modell mittels eines Motors in bestimmte Richtungen mikrometergenau verfahrbar ist. Mit einer Lineareinheit ist eine Höheneinstellung möglich. Manuell ist dies aber auch mit der Stange (Komponente unter der Linse) durchführbar, welche sich mit einer Feststellschraube fixieren lässt. Die Stange wird in jedem Fall verwendet, da diese zur Fixierung der Linse (mit Linsenhalter) notwendig ist. Die Höhenjustierung ist notwendig, um die Linse möglichst genau auf die Strahlhöhe einstellen zu können. Auch wenn die Lochplatte vertikal frei beweglich ist, ist es notwendig die Höhe der Linse separat einzustellen. Der Abstand zwischen der Linsenmitte und der Platte wird nicht immer gleich sein, da die verwendeten Skimmer unterschiedlich hoch sein können.

Für die Befestigung von Stange und Linse an der Lineareinheit wird ein Zwischenstück verwendet. Dieses ermöglicht eine Höhenjustierung, aber auch die Rotation der Stange um ihre Achse, was eine entscheidende Einstellungsmöglichkeit für die Inbetriebnahme ist. In Frage kommen hier zwei verschiedene Stangenhalter. Der eine davon nimmt kaum Platz in Anspruch, bietet aber nur einen kleinen Bewegungsfreiraum der Stange nach oben und unten. Der andere ist spürbar länger und ist aufgrund des Langlochs freier in der Fixierung auf der Lineareinheit und die Stange kann bei diesem doppelt so hoch justiert werden. Falls eine höhenverstellbare Lineareinheit gewählt wird, kann jedoch auf einen Stangenhalter verzichtet werden.

Auf jedem Fall muss die Linse fest mit der Lochplatte verbunden sein. Im Falle der Nutzung einer Lineareinheit, kann diese auf einer Adapterplatte montiert werden, welche wiederum auf der Platte fixiert wird. So kann auch eine größere Höhe überbrückt und dadurch eine kürzere Stange verwendet werden. Alternativ kann die Lineareinheit auch direkt ohne Adapterplatte mit vier M2,5 Schrauben an der Lochplatte befestigt werden. Die Linsenkonstruktion kann auch an die Platte geschweißt oder gelötet werden, wobei die benötigten Freiheitsgrade dadurch nicht eingeschränkt werden dürfen.

Der nächste Schritt zur Konzeptfindung ist das Festlegen verschiedener realisierbarer Konzepte, welche mithilfe des morphologischen Kastens ermittelt werden. Abschließend werden diese kritisch gegenübergestellt, um das zu den Anforderungen passende Konzept zu finden. Möglich sind auch hybride Lösungen. In Tabelle 6 sind drei ausgewählte Konzepte zu sehen.

Bei der Erstellung wurde bereits beachtet, dass alle Forderungen bei allen Konzepten erfüllt werden.

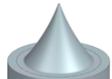
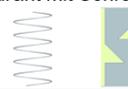
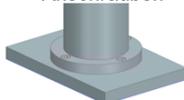
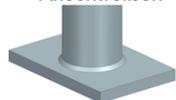
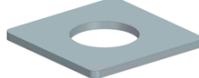
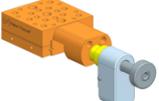
| Morphologischer Kasten         |                                    |   |   |   |
|--------------------------------|------------------------------------|---|---|---|
| Flüssigkeitsstrahlquelle       |                                    |   |   |   |
| Parameter                      |                                    | Mögliche Konzepte   |   |   |
| Ebene 1                        | Ebene 2                            | Konzept 1   | Konzept 2   | Konzept 3   |
| Auffang-<br>vorrichtung        | Werkstoff                          | Edelstahl (z.B. 1.4429)   | Aluminium (z. B. 3.3547)  | Aluminium (z. B. 3.3547)  |
|                                | Höhenjustierbar                    | Manuell   | Nicht Justierbar  | Nicht Justierbar  |
|                                | Geometrie                          | Zylindrisch<br>                                    | Zylindrisch<br>   | Viereckig<br>                      |
|                                | Verbindung Wellbalg                | Stoffschlüssig<br>                                 | KF-Klemme<br>   | KF-Kette<br>                       |
|                                | Befestigung Skimmer                | Einschweißen<br>                                   | Anschraubdeckel<br>                                       | Anschraubdeckel<br>                |
|                                | Vermeidung vertikale<br>Eisbildung | Chopper mit Erwärmung<br>außen durch Heizdraht<br> | Erwärmung außen durch<br>Heizdraht mit Schrägen innen<br> | Anbringen Wärmegitter<br>innen<br> |
|                                | Befestigung Platte                 | Schrauben anklemmen<br>                           | Anschrauben<br>  | Anschweißen<br>                   |
| Platte                         | Werkstoff                          | Edelstahl (z.B. 1.4429)   | Aluminium   | Aluminium   |
|                                | Höhenjustierbar                    | Nicht Justierbar  | Manuell   | Manuell   |
|                                | Geometrie                          | Kreisförmig<br>                                  | Kontur mit Radien<br>                                   | Viereckig<br>                    |
|                                | Befestigung Kammer                 | CF250 Flansch unten   | Kragenverbindung  | CF250 Flansch oben  |
|                                | Art der Befestigung                | Gewindebolzen<br>                                | Anschweißblaschen<br>                                   | Gewindebolzen<br>                |
| Diagnostik<br>Innen<br>(Linse) | Höhenverstellung                   | Lineareinheit mit Piezomotor<br>                 | Manuell über Stangenhalter<br>                          | Manuell über Stangenhalter<br>   |
|                                | Befestigung<br>Lineareinheit       | Kein Stangenhalter<br>                           | Großer Stangenhalter<br>                                | Kleiner Stangenhalter<br>        |
|                                | Befestigung Platte                 | Anschrauben<br>                                  | Adapterplatte<br>                                       | Adapterplatte<br>                |

Tabelle 6: Konzeptvarianten

Die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten sind aus dem morphologischen Kasten bereits bekannt. Wichtig ist hier die Änderung, dass bei Konzept 1 und Konzept 2 die Teilfunktion

„Vermeidung vertikale Eisbildung“ aus jeweils zwei Lösungen besteht. Diese Entscheidung wurde getroffen, da eine Maßnahme alleine nicht ausreichend ist, um den Forderungen gerecht zu werden.

### 3.6 Konzeptbewertung

Zur Bewertung der Konzepte wird eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Hierbei wird die technische Wertigkeit der drei erstellten Konzepte ermittelt und verglichen. Dazu müssen im nächsten Schritt Bewertungskriterien ausgewählt werden, wobei die Anforderungen aus der Anforderungsliste mit einbezogen werden. Da diese aber nicht alle gleichermaßen wichtig für das Konzept sind, werden sie entsprechend ihrer Priorität unterschiedlich stark gewichtet. Während die W1-Wünsche einen Faktor von 1 erhalten, erhält W2 einen Faktor von 2. Analog dazu ist auch die Gewichtung von W3 und W4. Die Forderungen F erhalten einen Gewichtungsfaktor von 5.

Es ist nicht sinnvoll, alle Forderungen und Wünsche bei den Konzepten zu bewerten. Ein Beispiel dafür wäre die Anforderung 7.2 (Fehlervermeidung durch *Poka-Yoke*), da sich diese Methodik auf alle drei Konzepte anwenden lässt. Auch viele Anforderungen der Kategorie Montage sind auf alle Konzepte anwendbar. Die Anforderungen an die Umgebung haben auf die verschiedenen Konzepte keinen Einfluss und können daher für die Konzeptbewertung entfallen. Übrig bleiben die Anforderungen, welche einen unmittelbaren Einfluss auf die Funktionen und die Konstruktion haben. Obwohl die Forderungen von allen Konzepten erfüllt werden, fließen trotzdem zwei von ihnen in die Bewertung mit ein, da die einzelnen Konzepte diese unterschiedlich gut erfüllen. Mithilfe dieser unterschiedlich gewichteten Kriterien kann eine Nutzwertanalyse durchgeführt werden (Tabelle 7). Sie legt dar, welches Konzept weiterverfolgt werden soll, da es die Anforderungen und Bewertungskriterien am besten erfüllt.

Je nachdem wie gut die Konzepte die einzelnen Kriterien erfüllen, erhalten sie eine Bewertung zwischen 0 (sehr schlecht) und 9 (sehr gut). Unter Berücksichtigung des Gewichtungsfaktors kommt für jedes Konzept eine Nutzwertsumme zustande. Eine technische Wertigkeit von 100 % entspricht der maximalen Nutzwertsumme von 315. Für eine ausreichende Qualität und Eignung eines Konzeptes, sollte die technische Wertigkeit mindestens 80 % betragen.

| Nutzwertanalyse             |  |        | 0 = sehr schlecht<br>9 = sehr gut |        |           |        |           |        |
|-----------------------------|--|--------|-----------------------------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|
|                             |  |        | Konzept 1                         |        | Konzept 2 |        | Konzept 3 |        |
| Kriterien zur Bewertung     |  | Faktor | Bewertung                         | Gesamt | Bewertung | Gesamt | Bewertung | Gesamt |
| W2                          | Platzsparende Bauweise                             | 2      | 7                                 | 14     | 9         | 18     | 8         | 16     |
|                             | Fertigungsfreundliche Gestaltung                   |        | 9                                 | 18     | 8         | 16     | 8         | 16     |
|                             | Bequemes Justieren                                 |        | 9                                 | 18     | 7         | 14     | 7         | 14     |
|                             | Fertigungsfreundlicher Werkstoff                   |        | 4                                 | 8      | 9         | 18     | 9         | 18     |
| W3                          | Effizientes Abpumpen gewährleisten (Design)        | 3      | 7                                 | 21     | 9         | 27     | 4         | 12     |
|                             | Unkomplizierter Versuchsaufbau                     |        | 6                                 | 18     | 9         | 27     | 7         | 21     |
|                             | Einfaches Ausrichten und Einstellen der Diagnostik |        | 7                                 | 21     | 8         | 24     | 5         | 15     |
| W4                          | Justierung der Höhe der Auffangvorrichtung         | 4      | 6                                 | 24     | 8         | 32     | 8         | 32     |
|                             | Justierung der Höhe der Linse (auf Lineareinheit)  |        | 7                                 | 28     | 9         | 36     | 5         | 20     |
| F                           | Vakuumgeeignete Werkstoffe                         | 5      | 9                                 | 45     | 8         | 40     | 8         | 40     |
|                             | Einfrieren und vertikale Eisbildung verhindern     |        | 9                                 | 45     | 9         | 45     | 8         | 40     |
| Nutzwertsumme (maximal 315) |  |        | 260                               |        | 297       |        | 244       |        |
| Platzierung                 |  |        | 2                                 |        | 1         |        | 3         |        |
| Technische Wertigkeit       |  |        | 82,54%                            |        | 94,29%    |        | 77,46%    |        |

Tabelle 7: Nutzwertanalyse

Aus Tabelle 7 ist ersichtlich, dass Konzept 2 mit 94,29 % die höchste technische Wertigkeit aufweist. Konzept 1 folgt als zweites mit 82,54 % und Konzept 3 bildet mit 77,46 % das Schlusslicht. Die Vorteile von Konzept 2 sind vielfältig. Durch die platzsparende Bauweise der Platte ist ein effizientes Abpumpen möglich. Da die Hauptkomponenten aus einer vakuumgeeigneten Aluminiumlegierung gefertigt werden, ist die Fertigung im trennenden Bereich sehr einfach und unkompliziert. Der Edelstahl aus Konzept 1 ist dagegen mit deutlich mehr Werkzeugverschleiß und Zeit bearbeitbar.

Auch der Versuchsaufbau von Konzept 2 ist simpel gestaltet. Es gibt einfache Schraubverbindungen und es muss innerhalb der Auffangvorrichtung keine Elektrik, wie bei der Lösung mit dem *Chopper*, installiert werden. Das Einstellen der Flüssigkeitsstrahldiagnostik ist bei Konzept 2 auch am einfachsten, da hier der große Stangenhalter verwendet wird, welcher es ermöglicht, die darin eingespannte Stange um bis zu 20 mm in der Höhe zu justieren. Der Stangenhalter aus Konzept 3 hingegen erreicht nur eine Höhe von 5 mm. Die Stangen gibt es zwar in mehreren Größen, da es aber Sprünge zwischen den Größen gibt, welche 5 mm übersteigen, sind dann nicht alle Höhen einstellbar. Beim größeren Stangenhalter lässt sich zudem der Abstand der Linse zur Kammermitte grob justieren, was zusätzlich zur Feinjustierung durch die Lineareinheit sehr vorteilhaft ist. So kann beispielsweise der ungefähre, ideale Brennweitenabstand zur Kammermitte direkt eingestellt werden. Von dieser Position aus kann dann die Feinjustierung mittels der Lineareinheit in eine positive oder negative Richtung bewegt werden.

Bei Konzept 3 ist der Nutzer durch den kleinen Stangenhalter auf eine der drei M6 Gewindebohrungen in der Lineareinheit (siehe die drei in der Mitte liegenden Gewinde in Abbildung 14) begrenzt. In Konzept 1 werden alle Bewegungen der Linse mithilfe einer Lineareinheit realisiert, dementsprechend kann keine Grobjustierung vorgenommen werden. Hinzu kommt, dass diese Lineareinheit deutlich mehr Platz in Anspruch nimmt als die Lineareinheit der anderen Konzepte. Für den Zweck der Höhenjustierung reicht die manuelle und unkomplizierte

Justierung durch Stange und Stangenhalter (Konzepte 2 und 3) vollkommen aus (Wahl der Lineareinheit), da das *Liquid Flatjet System* in der Höhe (Z-Richtung) sehr fein justierbar ist.

Die vertikale Eisbildung wird in allen drei Konzepten erfolgreich verhindert, jedoch verspricht die kombinierte Methode aus Konzept 2 den größten Erfolg. Neben der effizienten Erwärmung von außen durch einen Heizdraht (unterstützt durch die sehr gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums) bietet das Design den Vorteil, dass die Probe bei Kontakt mit einer der Schrägen in der Auffangvorrichtung sehr schnell verdunstet und gut abgepumpt werden kann. In Konzept 1 ist die Realisierung des *Choppers* schwierig. Zum einen aufgrund der kleinen Struktur, damit er ins Innere passt, zum anderen, weil die Befestigung von Innen schwierig zu gestalten ist. Die Option mit dem Wärmegitter ist zwar denkbar, jedoch ist es schwierig, das in der Größe begrenzte Gitter zu erwärmen. Es ist wirtschaftlicher die Auffangeinheit von außen zu erwärmen.

Ein Vorteil von Konzept 1 gegenüber Konzept 2 und 3 ist, dass dort die Auffangvorrichtung selbst in der Höhe justierbar ist, da diese in verschiedenen Höhen festgeklemmt werden kann. Im Hinblick auf die Ergonomie ist dies bequemer zu justieren als die Verschiebung der Platte über die Gewindestangen in Konzept 2 und 3. Andererseits wird angestrebt, dass diese Höhe möglichst nur ein bis zweimal neu eingestellt werden muss (vor und bei der Versuchsdurchführung), und dieser Nachteil in Kauf genommen werden kann.

Entsprechend der Nutzwertanalyse wird Konzept 2 weiterverfolgt, da dieses sowohl in der Funktion des Auffangsystems, als auch in der Geschwindigkeit der Fertigung und Versuchsvorbereitung am effizientesten ist.

## 4. Konstruktion

Mithilfe des ausgewählten Konzepts kann im Folgenden die Konstruktion umgesetzt werden. Die einzelnen Komponenten werden dabei schrittweise weiter ausgearbeitet, vereinfacht und optimiert. Der Leitgedanke bei der Erstellung der Konstruktion ist, diese so simpel wie möglich zu gestalten, um eine schnelle und unkomplizierte Fertigung und Montage zu ermöglichen. Die Herausforderung bei der Vereinfachung und Optimierung besteht darin, alle Anforderungen, sofern möglich weiterhin zu erfüllen oder sogar zu übertreffen. Alle Teile müssen so schnell wie möglich gefertigt werden, um eine rechtzeitige Inbetriebnahme zu gewährleisten.

### 4.1 Auffangvorrichtung

Bei der Konstruktion der Vorrichtung werden die Lösungen aus Konzept 2 umgesetzt. Um beispielsweise die Schrägen im Inneren fertigungstechnisch realisieren zu können, wird die Auffangeinheit in mehrere Teile aufgeteilt und anschließend miteinander verschweißt. Damit der in diesem Konzept zu verwendende Heizdraht seine Funktion möglichst effektiv erfüllen kann, wird in die bereits zusammengeschweißte Auffangvorrichtung eine Spiralnute eingearbeitet, in die der Heizdraht platziert werden kann.

Es sind drei Haupteinheiten geplant, die zusammen die Auffangvorrichtung ergeben (inklusive Skimmer). Die erste Komponente, der obere Teil der Vorrichtung, hat eine Hauptaufgabe: Er muss das Gegenstück zum Anschraubdeckel liefern, damit der zu verwendende Skimmer daran befestigt werden kann. Dieser Bestandteil der Auffangeinheit ist in isometrischer Ansicht in Abbildung 18 dargestellt.

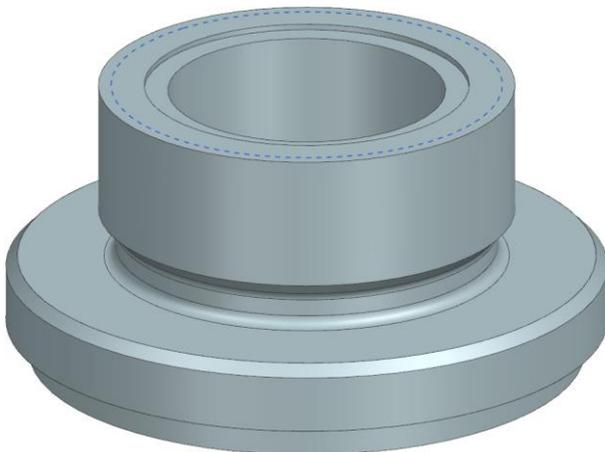


Abbildung 18: Oberer Teil Auffangvorrichtung

An der oberen Fläche ist eine kreisförmige Vertiefung von 0,5 mm mit einem Durchmesser von 28,1 mm für den Skimmer vorgesehen. Dieser weist laut Spezifikation (Abbildung 8) einen Durchmesser von 27,94 mm auf. Es ist daher sichergestellt, dass trotz Fertigungsungenauigkeiten der Skimmer in die Vertiefung eingesetzt werden kann und dabei nur geringfügig verrutschen kann. Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist das M36 x 2 (Außen-) Feingewinde und der dazu passende Gewindefreistich nach DIN76-1B. Der kleinere Absatz an der unteren Seite

wird im weiteren Verlauf wichtig, wenn es um die Zusammenfügung mit dem mittleren Teil der Vorrichtung geht.

Passend zu dem hier gewählten Außengewinde ist der konstruierte Anschraubdeckel im Schnitt in Abbildung 19 zu sehen.



Abbildung 19: Anschraubdeckel im Schnitt

Dieser weist, analog zum Gegenstück, ein M36 x 2 Innengewinde mit einem Gewindefreistich (DIN76-1D) auf. Damit der Skimmer effektiv festgeklemmt werden kann, hat der Deckel an der oberen Innenseite einen Absatz mit einem Durchmesser von 27,6 mm.

Wie es aussieht, wenn der Skimmer zwischen den beiden Komponenten fixiert ist, wird in Abbildung 20 in einer Schnittdarstellung gezeigt.

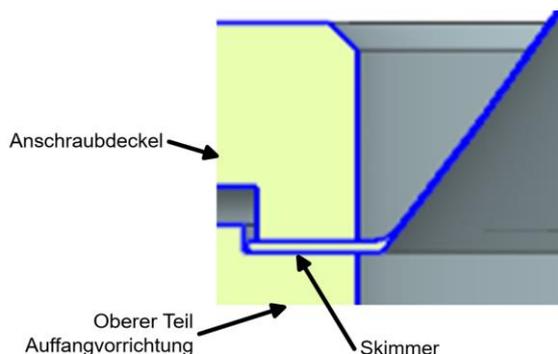


Abbildung 20: Befestigung Skimmer im Schnitt

Beide Teile werden aus Aluminium gefertigt und können jeweils an einer Drehmaschine hergestellt werden.

Der mittlere Teil der Auffangeinheit weist eine der zwei Schrägen innerhalb der Vorrichtungskonstruktion auf (Abbildung 21).

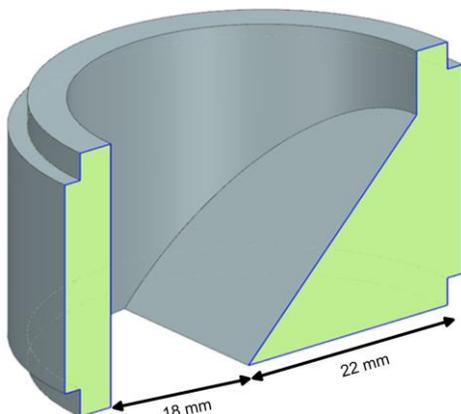


Abbildung 21: Mittlerer Teil Auffangvorrichtung im Schnitt

Die Schräge im Bauteil, die direkt in das Bauteil eingefräst wird, misst einen Winkel von 45° und endet 2 mm über der Hälfte des Innendurchmessers von 40 mm. Der Spalt durch den später abgepumpt werden kann, ist in der Mitte des Bauteils 18 mm breit.

An der Ober- und Unterseite ist erneut ein kleiner Absatz, der wie beim oberen Teil der Vorrichtung zur Zusammenfügung der Teile dient, damit die am Ende eingefräste Spiralnut nicht durch die Schweißnaht führt. Zusätzlich wird bei diesem Teil die *Poka-Yoke*-Methodik angewendet, um Ausrichtungsfehler beim Schweißen auszuschließen. Die zwei platzierten, extrudierten Halbkreise sind am unteren Ende des Bauteils in Abbildung 22 zu erkennen. Sie sorgen für eine zwangsläufig richtige Ausrichtung des mittleren und des noch folgenden unteren Teils der Vorrichtung. Die zwei Bauteile werden ineinandergesteckt und anschließend verschweißt. Durch die Anordnung ist keine andere Orientierung möglich. An der anderen Seite des Bauteils ist diese Methodik nicht nötig, da dort die Ausrichtung bezüglich der Verdrehung keine Bedeutung hat.



Abbildung 22: Mittlerer Teil Auffangvorrichtung mit Poka-Yoke-Prinzip (um 180° gedreht)

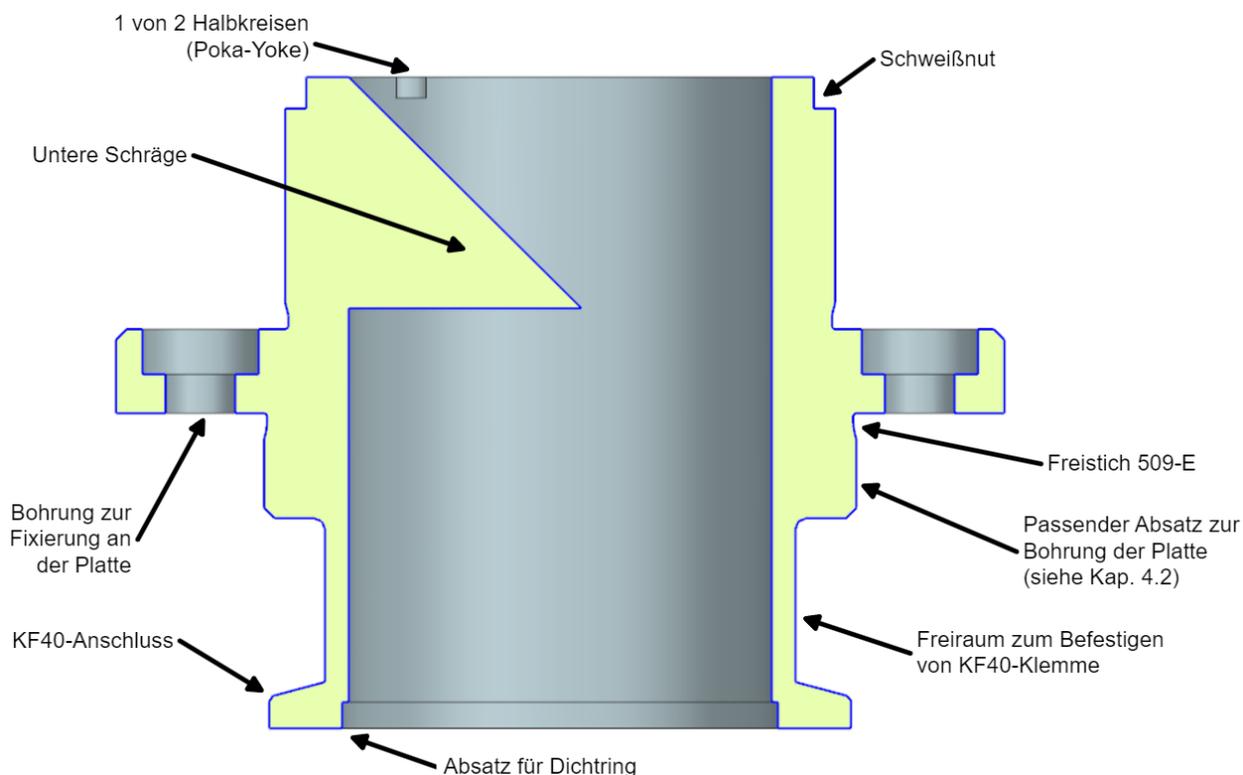


Abbildung 23: Unterer Teil Auffangvorrichtung im Schnitt

Das untere Drittel der Auffangeinheit (Abbildung 23) weist, wie der mittlere Teil, eine Schräge sowie die zwei Gegenstücke zu den zwei Halbkreisen auf. Die Dimensionen von diesem Teil der Vorrichtung (Durchmesser und Tiefe) sind etwas größer als die Gegenstücke. Damit ist trotz Fertigungstoleranzen sichergestellt, dass die Teile ineinanderpassen. Dieses Teil weist außerdem einen vom Durchmesser recht großen Absatz auf ( $\varnothing$  84 mm). Mithilfe von diesem wird die Auffangeinheit mit vier M6 Zylinderkopfschrauben (DIN 7984) auf der Platte montiert. Der Absatz unterhalb der Bohrungen wird später passend durch die Platte gesteckt. Der dort eingebrachte Freistich nach DIN 509-E trägt dazu bei, dass das Durchstecken bis zum Ende gelingt und zugleich die auftretenden Kerbspannungen aufgrund der geometrischen Unstetigkeiten reduziert. Deshalb gibt es noch einen zweiten Freistich beim Absatz darüber.

Der nächste Absatz darunter reduziert sich erneut im Durchmesser, da an der Unterseite eine KF40-Verbindung vorhanden sein muss, die bei der Montage die Verbindung mit einem Wellbalg mittels einer KF-Klemme sicherstellen soll. Die Abmaße für eine KF40-Verbindung sind somit fest vorgegeben. Für die Gewährleistung einer dichten Verbindungsstelle, um ein erfolgreiches Abpumpen innerhalb der Auffangvorrichtung sicherzustellen, wird ein passender O-Ring (Dichtring) verwendet. Abbildung 9 zeigt die zusammengebaute Verbindung.

Für eine bessere Veranschaulichung wird das gesamte beschriebene Bauteil erneut in der isometrischen Ansicht in Abbildung 24 gezeigt. Der mittlere und untere Teil der Auffangeinheit lassen sich nicht so leicht wie der obere Teil und der Anschraubdeckel herstellen, da sie mit einer Fräsmaschine gefertigt werden müssen (oder mit einer Drehmaschine, welche die Möglichkeit bietet ebenfalls zu fräsen).

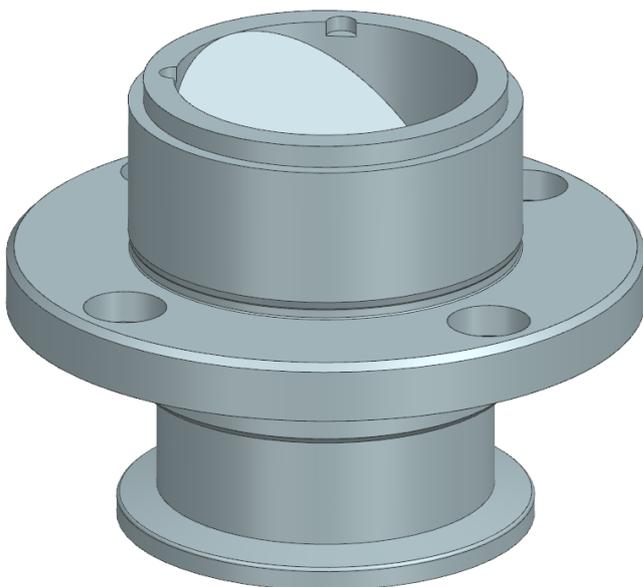


Abbildung 24: Unterer Teil Auffangvorrichtung

Der Zusammenbau der drei Einheiten, ist in Abbildung 25 dargestellt. Die zwei Schweißnähte werden bei den zwei Vertiefungen eingebracht. Empfehlenswert ist hier das Wolfram-Inertgas-schweißen (WIG) mit Wechselstrom (aufgrund des Aluminiums) oder das Laserschweißen.

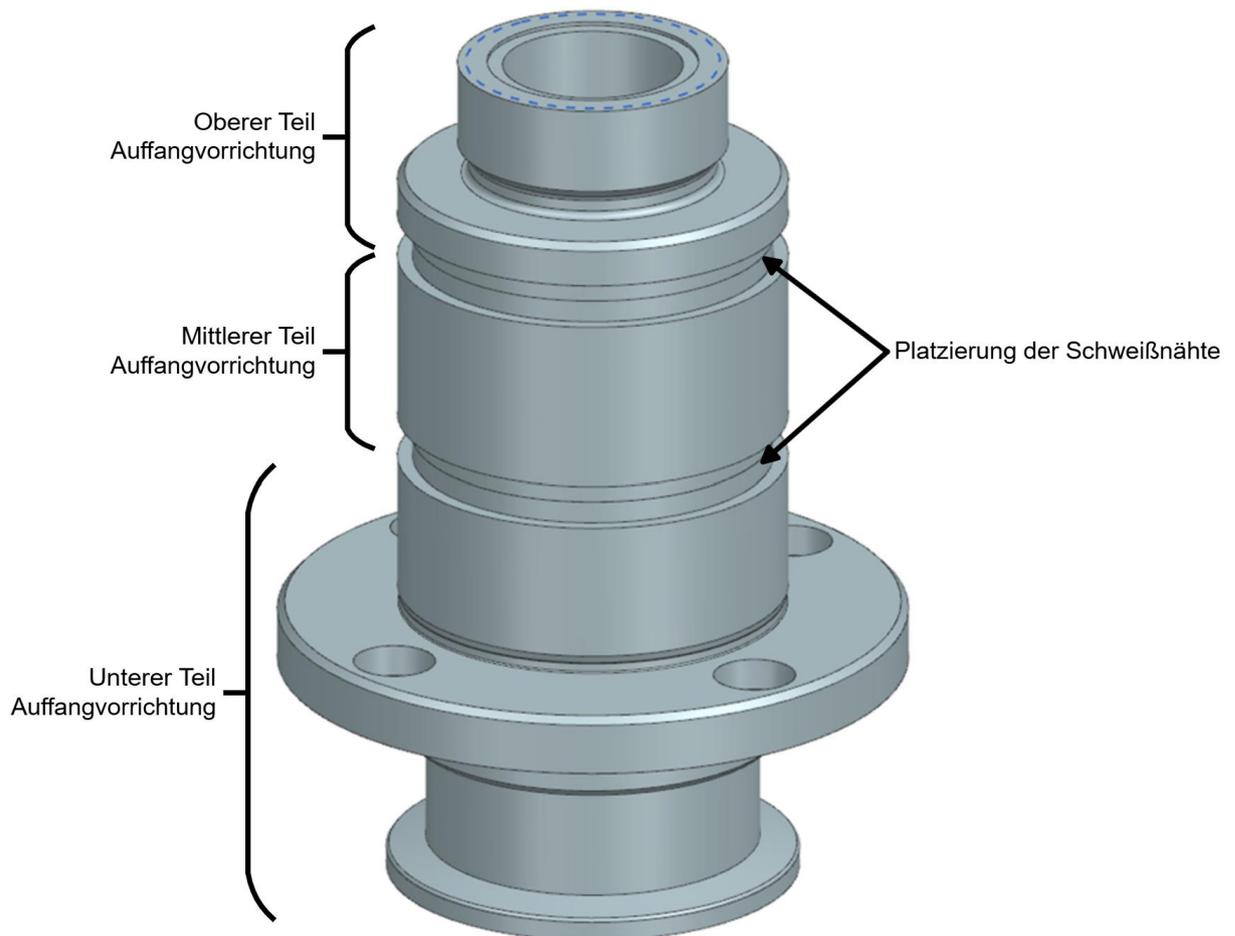


Abbildung 25: Zusammenbau der Auffangvorrichtung vor dem Schweißen

Nach dem Zusammenbau der Auffangvorrichtung kann die Spiralnut in das Bauteil eingebracht werden. Für die Modellierung sind dafür mehrere Schritte notwendig. Zunächst muss die gewünschte Spirale skizziert werden und anschließend muss ein Werkzeugkörper erstellt werden (Abbildung 26), um die gewünschte Nutgeometrie herzustellen (damit sich der Heizdraht in diese gut einlegen lässt). Dieser kann dann mit der Funktion in NX „Extrudiertes Volumen“ an der Spiralskizze entlanggeführt werden und extrudiert so das Material weg (Boolesche Operation subtrahieren), welches er durchquert.

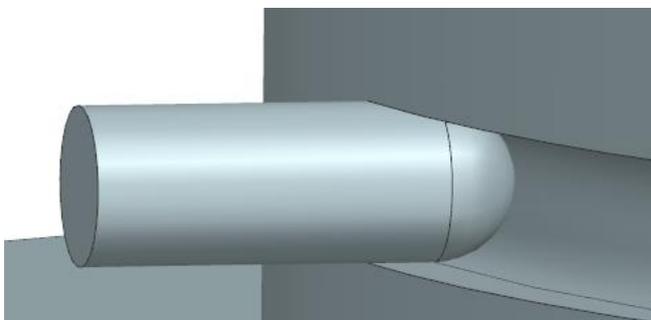


Abbildung 26: Werkzeugkörper

Der Fräser-ähnliche Werkzeugkörper hat am Kopf einen Radius von 0,55 mm und dringt 1 mm tief in das Material ein. Da der zu verwendende Heizdraht einen Durchmesser von 1 mm

aufweist, hat dieser in der Nut etwas Freiraum. Tiefer als 1 mm soll der Draht nicht gelangen, damit dieser später für die effektive Beheizung von außen angedrückt werden kann. Die Steigung der Spirale wird so ausgelegt, dass der effektive Heizbereich des Drahtes die Vorrichtung möglichst zum ganzen Teil unmittelbar berührt. Diese Länge beträgt 2 Meter. Mithilfe von Gleichung (1), welche die Anzahl der Windungen (Höhe der Spirale  $h_{Spirale}$  dividiert durch die Steigung der Spirale  $p_{Spirale}$ ) und den Umfang eines Kreises beinhaltet, lässt sich die ungefähre, vereinfachte gestreckte Länge des Drahtes in der Spiralnute berechnen. Beim Einsetzen einer Steigung von 4 mm erhält man eine Lösung sehr nahe an 2.000 mm.

$$l = \frac{h_{Spirale}}{p_{Spirale}} \cdot (D_{Catcher,au\beta en} - d_{Draht}) \cdot \pi = \frac{50 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} \cdot (52 \text{ mm} - 1 \text{ mm}) \cdot \pi = \mathbf{2002,8 \text{ mm}} \quad (1)$$

In Abbildung 27 ist die in die Auffangvorrichtung eingebrachte Spiralnute zu sehen.



Abbildung 27: Endergebnis der Auffangvorrichtung mit Spiralnute

Damit der Heizdraht nach dem Einlegen in der Nut im dichten Kontakt zum Werkstoff bleibt, um möglichst effektiv die Wärme übertragen zu können, wird eine Hülse aus Aluminium entworfen, welche über den benötigten Bereich gestülpt wird. Der Innendurchmesser ist dabei so gewählt, dass dieser inklusive Fertigungstoleranzen geringfügig größer ist als der Außendurchmesser der Auffangvorrichtung. Damit der Draht eingeführt werden kann, gibt es an der Unterseite ein kleines eingefrästes Fenster mit einer Breite von 10 mm (siehe Abbildung 28).

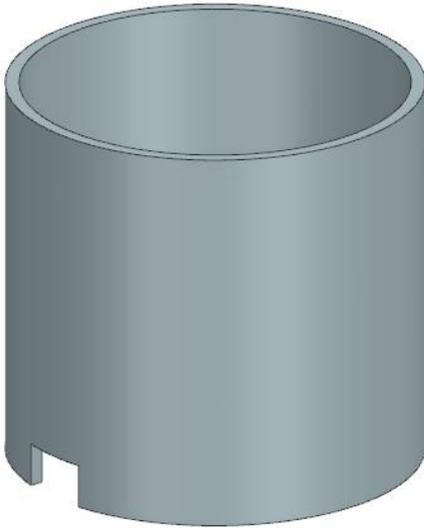


Abbildung 28: Hülse für die Auffangvorrichtung

## 4.2 Lochplatte zur Halterung der Probenumgebung

Um die Dimensionen der zu konstruierenden Platte einschätzen zu können, werden zunächst die Anschweißlaschen designed. Davon gibt es vier Stück, welche innerhalb des Kragens um je 90° versetzt sind. Es ist sehr wichtig, dass bei der Positionierung der Laschen die Verdrehung des Lochkreises eingeplant wird. Wird die Kragenkonstruktion an den Vakuumwürfel geschraubt, müssen die vier Laschen mittig zu den vier Außenkanten des Würfels stehen. Die Abbildung 29 macht dies deutlich.

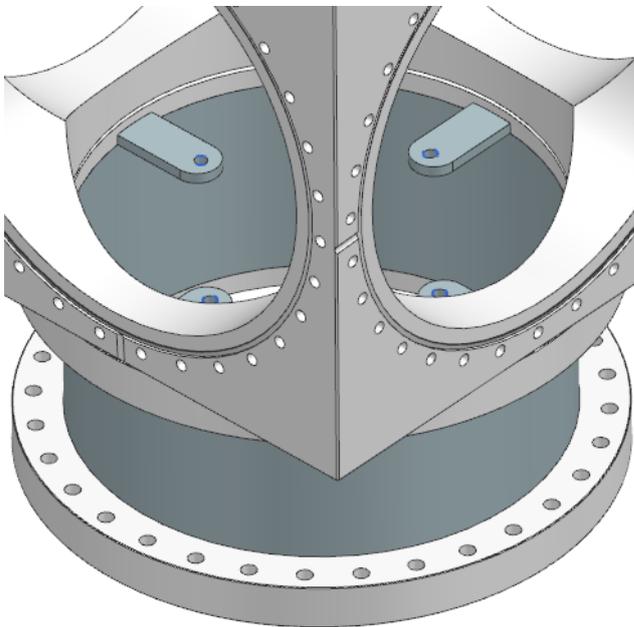


Abbildung 29: Korrekte Ausrichtung der Anschweißlaschen an die Kragenkonstruktion

Die Laschen sind aus einem vakuumtauglichen und schweißgeeigneten Edelstahl, um eine gute Verbindung mit dem Kragen zu ermöglichen. An der Außenkante haben sie einen Radius von 125 mm, entsprechend des Innendurchmessers von einem CF250-Anschweißflansch. Die

Laschen besitzen ein M8 Gewinde, welches jeweils 80 mm von der Kammermitte entfernt ist. Hier werden Gewindebolzen eingeschraubt.

Mit diesen Informationen lässt sich nun die Lochplatte, mithilfe der Vorgaben aus Konzept 2 konstruieren. Der Konturvorschlag der Platte aus dem morphologischen Kasten wird annähernd umgesetzt. Lediglich an einer Seite ist eine konvexe Wölbung, damit hier die Lineareinheit positioniert werden kann (siehe Abbildung 30).



Abbildung 30: Lochplatte

Die M8 Gewindebolzen aus den Anschweißlaschen werden durch die vier  $\varnothing 10$  mm Durchgangslöcher durchgesteckt. Nach DIN EN 20273 wird für die Durchgangslöcher die Reihe „grob“ gewählt, um potentielle Ungenauigkeiten der Laschen auszugleichen.

Die Auffangvorrichtung wird durch die  $\varnothing 52$  mm Bohrung in der Mitte durchgesteckt und mithilfe der vier M6 Gewindebohrungen nahe der Plattenmitte angeschraubt. Die vier Flachsenkungen dienen der Positionierung und Befestigung der Lineareinheit im späteren Schritt. Die gedankliche Linie zwischen der Plattenmitte und der Mitte der vier Bohrungen ist dabei um  $22,5^\circ$  gedreht (von der  $\varnothing 10$  mm Bohrung aus). Somit liegt diese Linie genau auf der Achse von zwei gegenüberliegenden CF63-Flanschen der beiden Diagnostikflanschen. Im nächsten Unterkapitel wird dies geprüft.

Wie in Konzept 2 vorgegeben ist diese Platte (mit einer Blechstärke von 10 mm) aus Aluminium zu fertigen. Die Platte lässt sich aufgrund des Werkstoffs und der Geometrie gut an einer CNC-Fräsmaschine herstellen.

### 4.3 Lineareinheit und Diagnostik

Auf die Platte soll eine Lineareinheit geschraubt werden. Zwischen diesen beiden Komponenten wird aber, wie in Konzept 2 festgelegt, eine Adapterplatte dazwischengesetzt. Dies hat drei Gründe. Zum einen wird dadurch der störende  $\varnothing 84$  mm Absatz der Auffangeinheit überwunden, der die Bewegung der Lineareinheit stark einschränkt. Eine Vergrößerung der Platte bzw. die Versetzung der Lineareinheit weiter nach außen ist nicht zielführend, da der Piezomotor dann mit dem Vakuumwürfel kollidiert. Zum anderen bewirkt die Adapterplatte, dass sich der Abstand zwischen der Lineareinheit und dem Skimmer verringert, sodass eine kleinere Stange genutzt werden kann, was bei auftretenden Vibrationen vorteilhaft ist. Der dritte Grund für die Nutzung einer Adapterplatte ist, dass sich die Wärme aufgrund des verwendeten Heizdrahtes und Aluminiums schnell von der Auffangvorrichtung auf die Platte und von dieser auf die Lineareinheit ausbreiten kann. Die Lineareinheit soll aber möglichst nicht zu stark erwärmt werden, da ansonsten das Fett im Inneren verdunstet und in die Vakuumumgebung gelangt. Es wird außerdem die Funktionalität des Piezomotors gefährdet. Um dies zu verhindern kann für die Adapterplatte ein Werkstoff verwendet werden, welcher als schlechter Wärmeleiter gilt. Dazu ist die Wahl auf Peek gefallen, der sich außerdem gut spanend bearbeiten lässt.

Die konstruierte Adapterplatte mit einer Stärke von 12 mm ist in Abbildung 31 zu sehen. Damit die Gewindebohrungen beider Seiten erkennbar sind, ist die Darstellung dort in einer transparenten Ansicht. An einer Unterseite sind vier M4 Gewinde angebracht. In diesen werden die Zylinderkopfschrauben enden, welche durch die Durchgangslöcher mit den Flachsenkungen in der Platte geführt werden. An der Oberseite der Adapterplatte befinden sich vier M2,5 Gewinde mit denen die Lineareinheit mit ihr verschraubt werden kann.

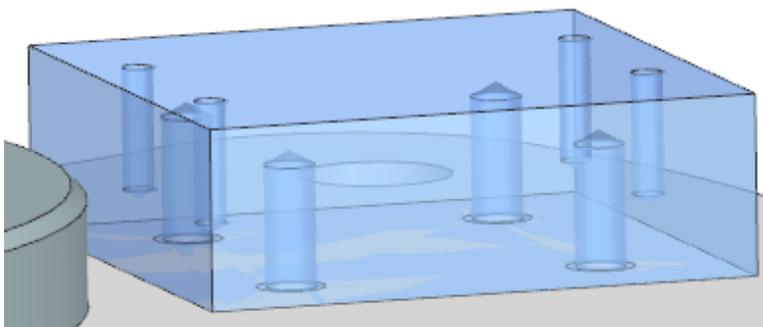


Abbildung 31: Adapterplatte (transparent)

Der Zusammenbau der Lineareinheit für die Fixierung und Positionierung der Linse ist in Abbildung 32 dargestellt. In dieser Einstellung ist die Lineareinheit mittig ausgerichtet und kann in Richtung der Kammermitte (oder ihr entgegen) um bis zu  $\pm 6,35$  mm verfahren. Mithilfe des

Langloches im Stangenhalter kann der Abstand der Linse zur Kammermitte zusätzlich noch grob justiert werden. Die Höheneinstellung der Linse erfolgt, wie in Konzept 2 bereits festgelegt, über die Einspannung der Stange auf der gewünschten Höhe. Ist die Stange in der untersten Position, kann diese bis zu 20 mm höher eingespannt werden. Da es Stangen in 10 mm-Längenschritten gibt, ist die Justierbarkeit ausreichend.

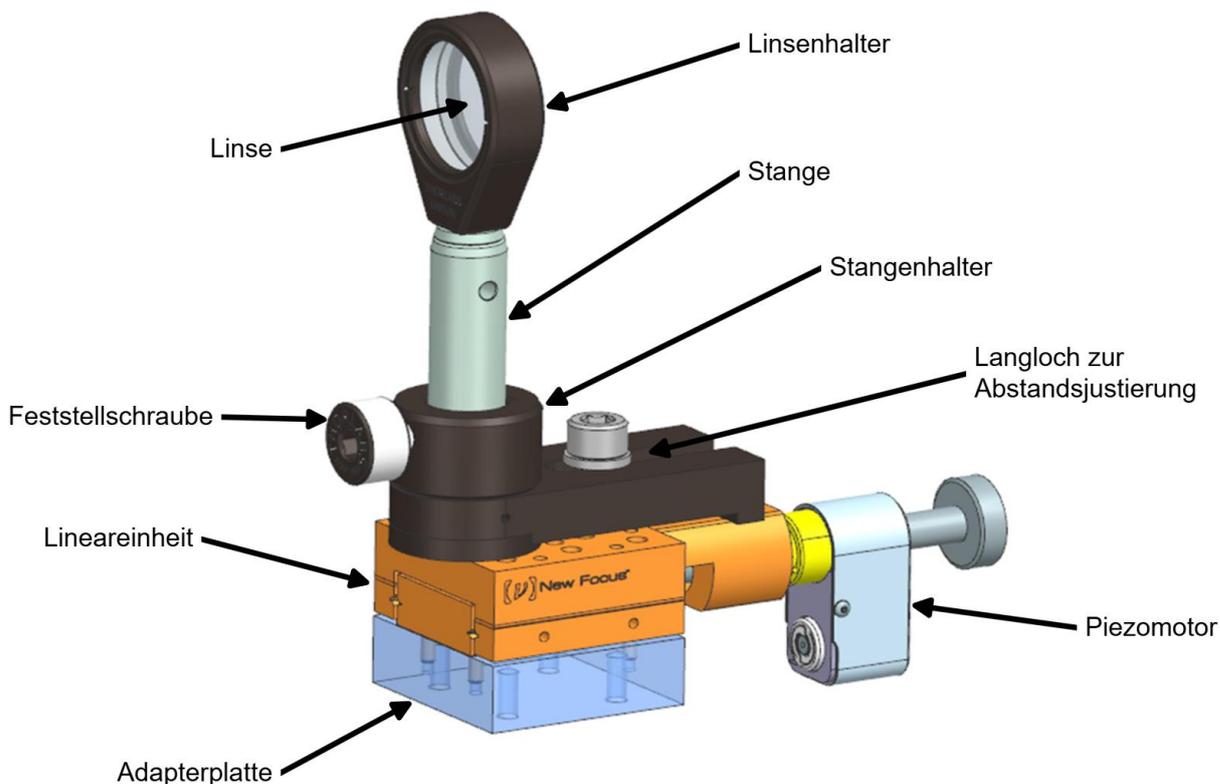


Abbildung 32: Aufbau auf der Lineareinheit

Abbildung 33 zeigt die an dem Kragen befestigte Konstruktion mit den bisher angesprochenen Komponenten. An den Anschweißlaschen ist sichtbar, wie die Gewindebolzen von einer Seite mit einer Mutter gekontert werden. Die Platte wird von beiden Seiten mit Muttern fixiert. Anschließend wird der Vakuumwürfel auf diese Konstruktion draufgesetzt und festgeflanscht. Dann erfolgt die Fixierung des vollständig bestückten Würfels mit dem Gestell.

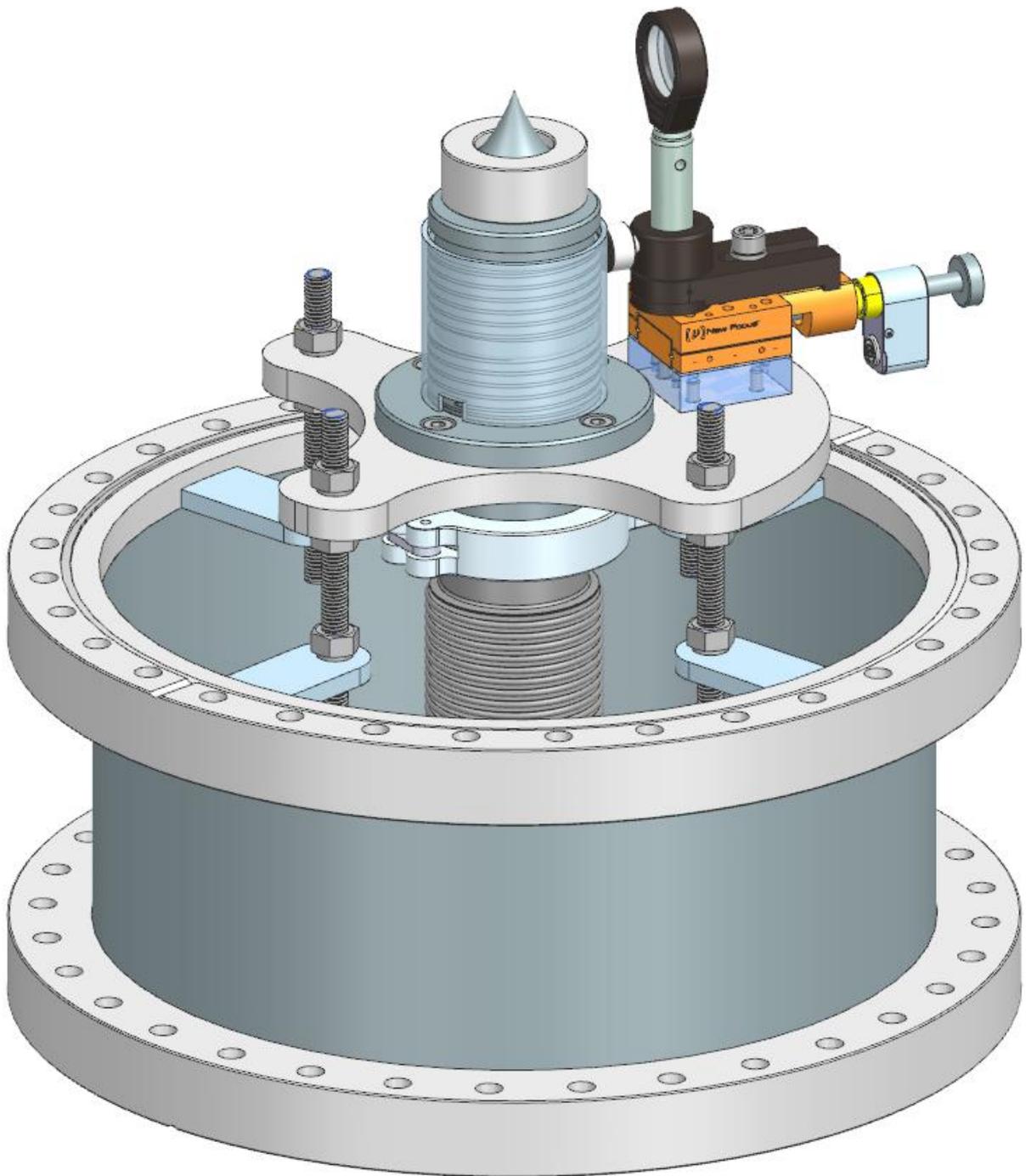


Abbildung 33: Fortschritt der am Kragen geschweißten Konstruktion

#### 4.4 Austrittsweg der Probe

Die Flüssigkeit soll in der Auffangvorrichtung verdampfen, welches durch den Heizdraht erreicht wird, und aus der Vakuumkammer befördert werden. Dazu wird der Wellbalg an einen CF100-Flansch auf KF40-Adapterflansch befestigt. Dieser Adapterflansch ist wiederum an einen CF250 auf CF100 Adapterflansch montiert, welcher an die Unterseite der Kragenkonstruktion geschraubt werden kann.

Damit der Wellbalg am Adapterflansch befestigt werden kann, muss dieser modifiziert werden. Dazu müssen vier M6 Gewinde (Sackloch) eingebracht werden. Mithilfe von M6 Schrauben ist

es möglich, den Wellbalg mit einer KF40-Klemme und einem O-Ring fest und dicht einzuspannen. Am KF40-Anschluss außerhalb der Kammer kann erneut ein Wellbalg festgespannt werden, welcher zu einer Wälzkolben-Vakuumpumpe führt. Zu sehen ist die vorgestellte Lösung im Schnitt in Abbildung 34 (mit Saugrichtung).

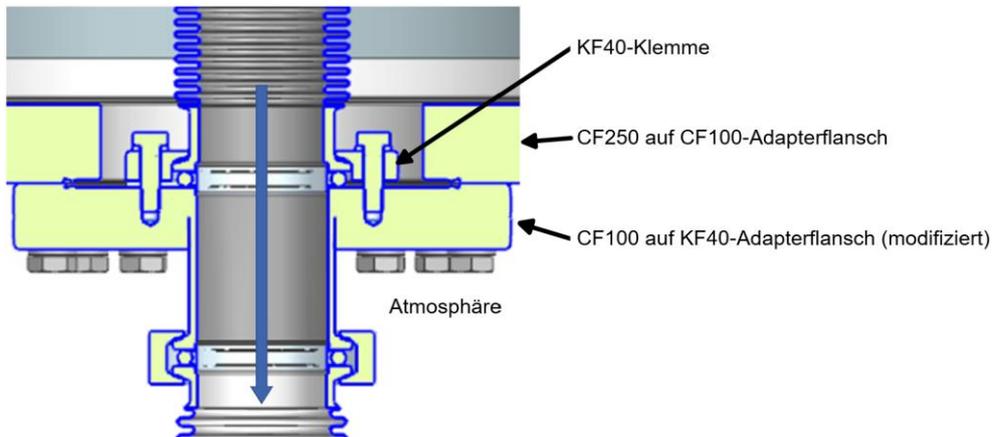


Abbildung 34: Konzept 2, Auffangvorrichtung

Abbildung 35 zeigt im Schnitt die am Vakuumwürfel angeflanschte Kragenkonstruktion, d. h. den kompletten Aufbau von Konzept 2.

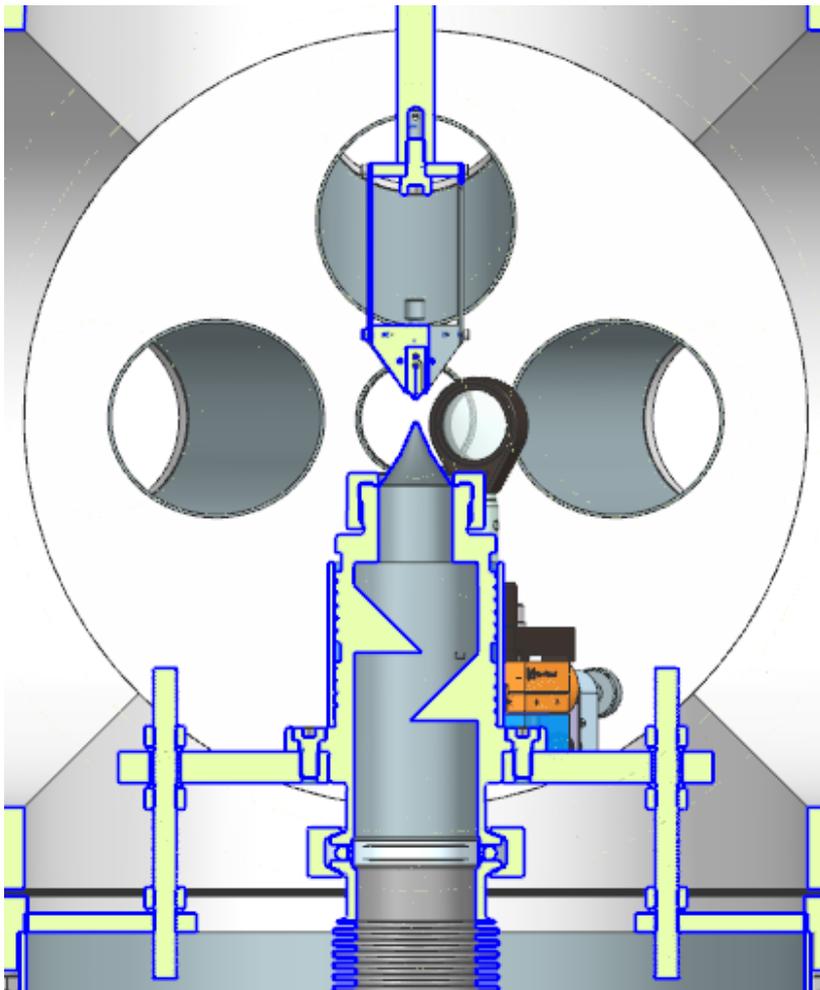


Abbildung 35: Konzept 2, Zusammenbau im Schnitt

Wird in dieser Ansicht nun  $22,5^\circ$  um die Z-Achse rotiert, ist erkennbar wie die optische Achse der Linse genau auf der Achse vom abgeneigten CF63-Flansch des Diagnostikflansches liegt und die Flächen des Linsenhalters und des Schweißrohres parallel zueinander sind (Abbildung 36). Neben der Höhenausrichtung vom Skimmer, dem *Liquid Flatjet System* und der Linse, muss später bei der Inbetriebnahme auch das Abstandsverhältnis zwischen der Düse vom *Liquid Flatjet System* und der Skimmerspitze (unter Beachtung der Linsenhöhe) stimmen. Dieser sollte im Verlauf des Experiments möglichst klein sein, um bessere Druckergebnisse zu erreichen.

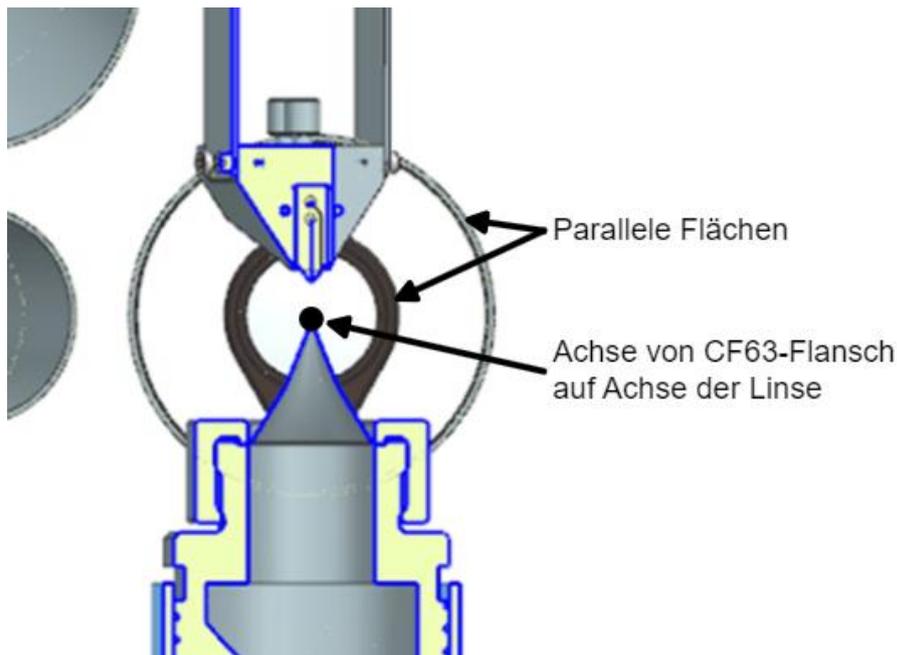


Abbildung 36: Prüfen der Lage der Linse

Nachdem die Optimierungen an den Komponenten vorgenommen und der Zusammenbau des Modells abgeschlossen sind, folgt die Erstellung der technischen Zeichnungen zu allen zu fertigenden Bauteilen. Zudem werden benötigte Norm- und Kaufteile bestellt. Da Fertigungsmängel und andere Komplikationen nicht auszuschließen sind, muss genügend Zeitpuffer eingeplant sein, um eine Inbetriebnahme im Projektverlauf realisieren zu können. Wichtig ist außerdem, dass alle Vakuumkomponenten nach der Fertigung vakuumgereinigt und eingebrachte Schweißnähte einem Leckagetest unterzogen werden.

## 5. Validierung des Modells

Im nächsten Schritt erfolgt die Validierung des Modells, um sicherzugehen, dass die Konstruktion auftretenden Belastungen standhält.

### 5.1 FEM-Simulation

Kommt es zum Berstfall der Turbomolekularpumpe, muss das Gestell für kurze Zeit einen Moment von 6.500 Nm standhalten. Tut es dies nicht oder wurde die Pumpe nicht fachgerecht montiert, kann es zu schweren Unfällen kommen. Um eine Gefährdung im Berstfall auszuschließen, wird eine FEM-Analyse mit ANSYS Mechanical durchgeführt. Da der Berstfall einen Ausnahmefall darstellt und eine extrem höhere Belastung als der Normalbetrieb aufweist, dürfen auftretende Spannungen in den Komponenten die Streckgrenze des Werkstoffs überschreiten, jedoch nicht die Zugfestigkeit. D. h. es darf beim Berstmoment zu plastischen Verformungen kommen, aber es muss eine Sicherheit gegen den Bruch der Bauteile vorliegen. Für die Simulation wird vereinfacht die konservative Annahme getroffen, dass das Berstmoment im vollen Ausmaß auf die Konstruktion wirkt, nicht wie in der Realität nur 5 ms. Es handelt sich daher um eine vereinfachte Simulation im *Worst-Case-Fall*, um eine Aussage zur Betriebssicherheit treffen zu können.

#### 5.1.1 Simulation des Vakuumschalters

Im ersten Schritt wird der Vakuumschalter unter der herrschenden Belastung simuliert. Zur Vorbereitung ist es nötig, das Modell des Schalters so weit zu vereinfachen, dass der Berechnungsaufwand der Software möglichst geringgehalten wird, und dass auftretende Singularitäten durch beispielsweise scharfe Kanten vermieden werden. Deshalb werden alle Kanten mit R5 Radien versehen, insbesondere die Kanten der M12 Bohrungen (R1), welche im vereinfachten Modell durch  $\varnothing 12$  mm Bohrungen ersetzt werden (Abbildung 37). Die M12 Gewinde für die Kranösen werden in diesem Modell entfernt.

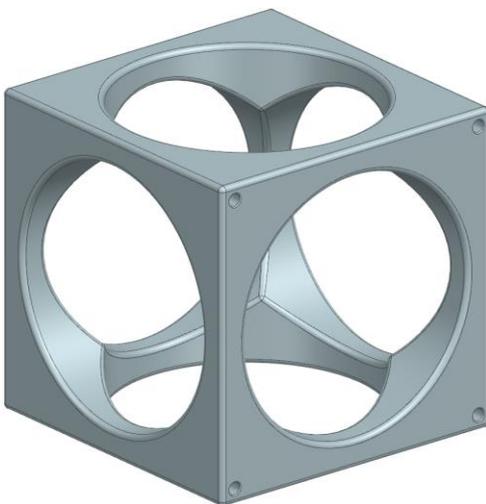


Abbildung 37: Modifiziertes Vakuumschalter-Modell

Anschließend wird die Geometrie des Schalters in ANSYS importiert.

Vor der Durchführung der Simulation, wird das Modell einem Werkstoff zugeordnet und es müssen die Stützen und Lasten definiert werden. Als Werkstoff wird entsprechend der Realität „Stainless Steel, 316L, annealed“ gewählt (siehe Materialkennwerte Anhang K). Als Stütze (Fixed Support, keine Freiheitsgrade) dienen die zylindrischen Flächen der Bohrungen. Unter die anfallenden Lasten zählen das Berstmoment der Turbomolekularpumpe, die Gewichtskräfte der Komponenten, die an den Würfel angeflanscht werden (Angriffspunkt ist der Massenschwerpunkt, ermittelt aus CAD), und die Erdgravitation ( $g = 9,8066 \frac{m}{s^2}$ ). Zu sehen ist das Modell mit den definierten Stützen und Lasten in Abbildung 38. Die Stützen sind dabei so benannt, dass sie im folgenden Kontext zugeordnet werden können.

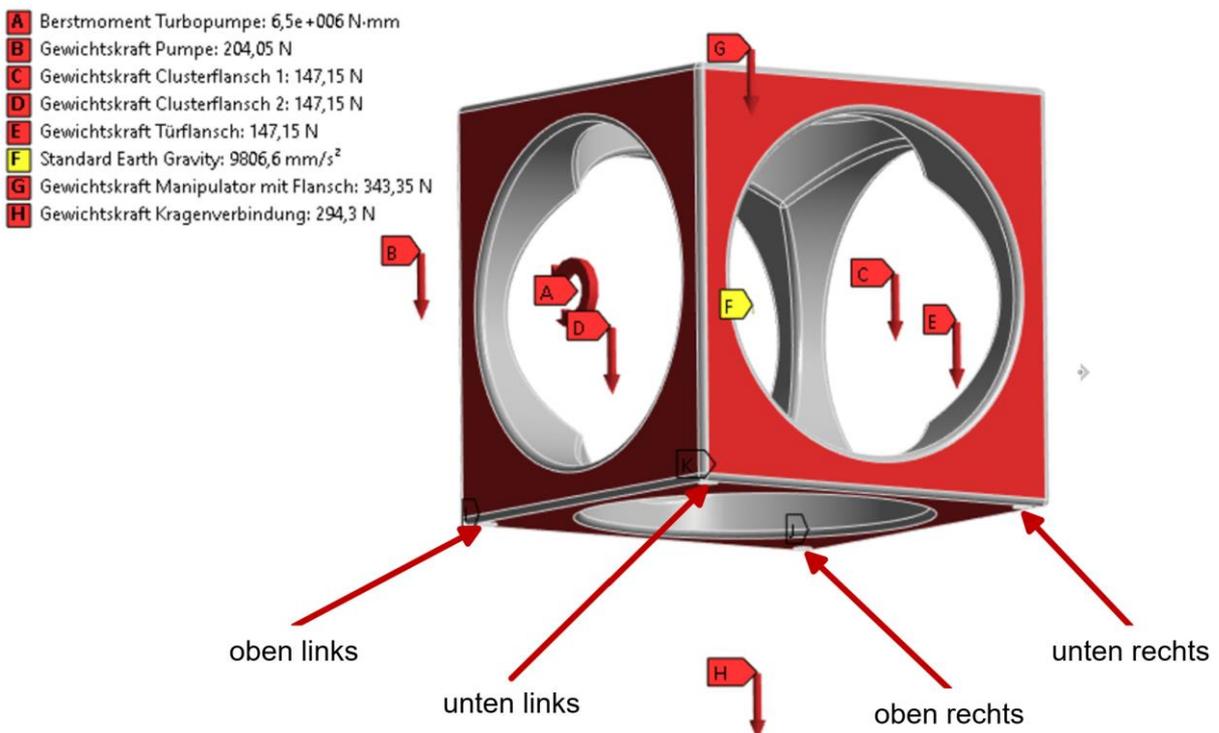


Abbildung 38: Vakuumwürfel-Modell mit Stützen und Lasten

Um die Belastung im Material des Würfels zu sehen, ist in Abbildung 39 der Ergebnisplot für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  (von-Mises / Gestaltänderungshypothese (GEH)) dargestellt. Nach drei automatischen Netzverfeinerungen (siehe Abbildung 40) konvergiert der Maximalwert (Änderung  $< 2\%$ ) der Vergleichsspannung oszillierend und erreicht 299,58 MPa. Die höchsten Spannungswerte befinden sich in beiden Bohrungen auf der Seite wo das Berstmoment eingebracht wird („oben links“ und „unten links“). Bei den beiden gegenüberliegenden Stützen sind die Spannungen deutlich geringer. Beim konvergierenden Ergebnis kommt es zu 618.656 Knoten und 415.470 quadratischen Elementen. Die Verformungen am Vakuumwürfel sind vernachlässigbar klein ( $< 0,15$  mm), der Plot dazu befindet sich, wie auch die Netzentwicklung der Konvergenzstudie in Anhang D.

Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1 s  
 14.08.2024 09:43

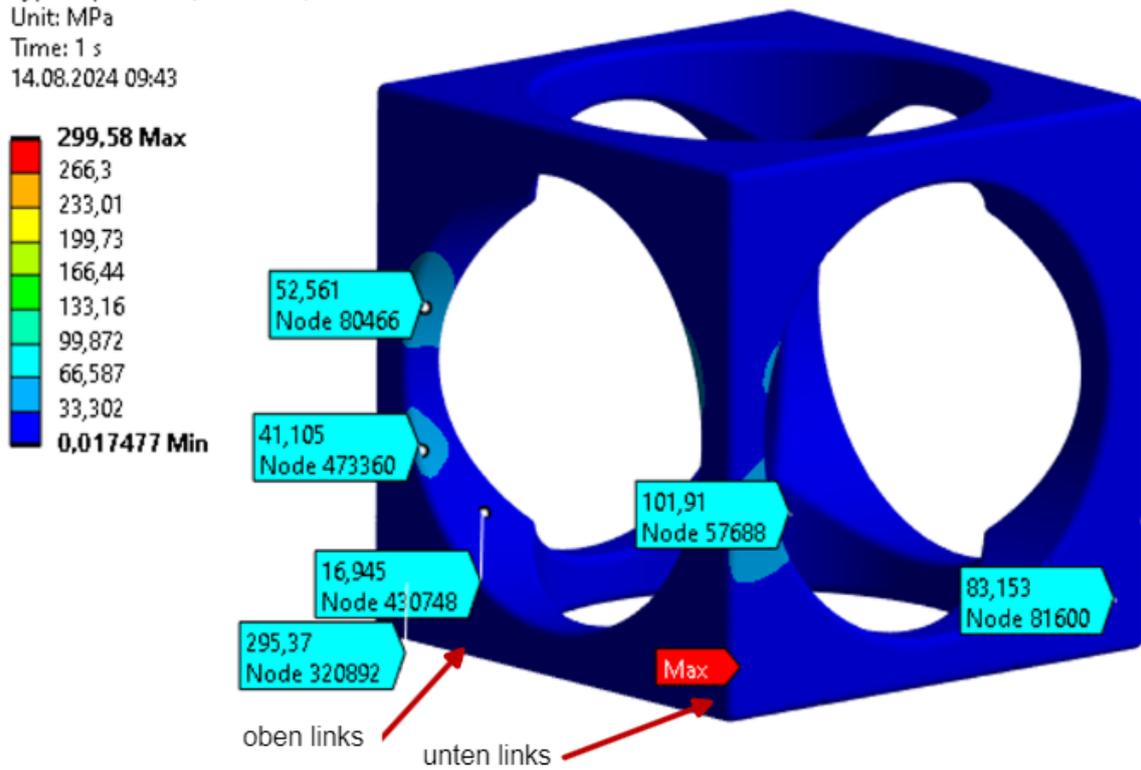
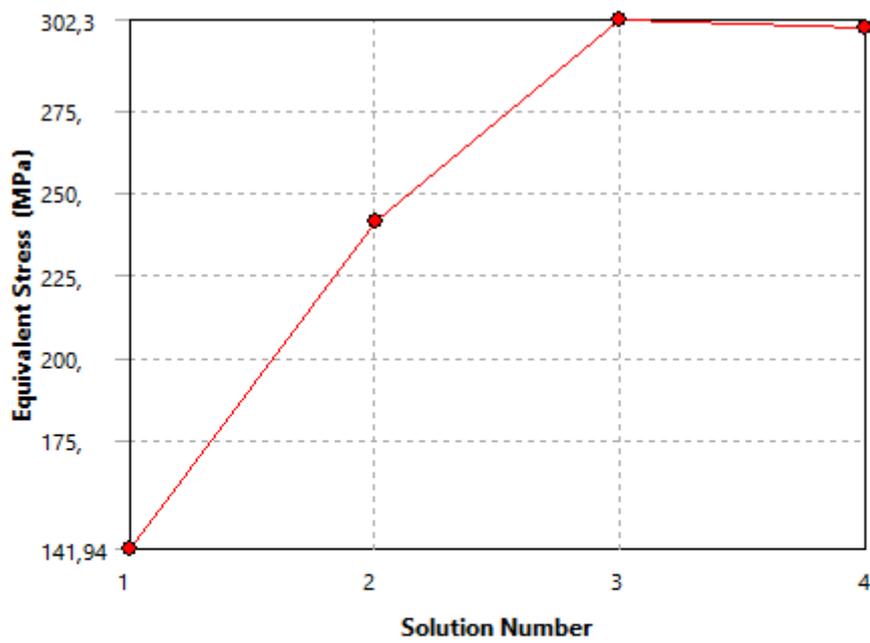


Abbildung 39: Vergleichsspannung im Vakuumwürfel



|   | Equivalent Stress (MPa) | Change (%) | Nodes  | Elements |
|---|-------------------------|------------|--------|----------|
| 1 | 141,94                  |            | 103786 | 58070    |
| 2 | 241,13                  | 51,788     | 131175 | 77013    |
| 3 | 302,3                   | 22,512     | 308346 | 199303   |
| 4 | 299,58                  | -0,90468   | 618656 | 415470   |

Abbildung 40: Konvergenzverlauf der Vergleichsspannung

Um zu ermitteln, welche Kräfte und Momente die Schraubverbindungen des Vakuumpfandes aufnehmen, werden in der Simulation für die einzelnen Stützen die Lagerreaktionen bestimmt. Die Lagerreaktionen der vier Stützen sind in Tabelle 8 dargestellt.

| Lagerreaktionen            | oben links | oben rechts | unten links | unten rechts |
|----------------------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| Force-Reaction-X [kN]      | 0,95       | 1,69        | -0,94       | -1,69        |
| Force-Reaction-Y [kN]      | -1,27      | 1,31        | -1,31       | 1,27         |
| Force-Reaction-Z [kN]      | 18,17      | 4,91        | -17,21      | -4,16        |
| Force-Reaction-Total [kN]  | 18,24      | 5,35        | 17,28       | 4,66         |
| Moment-Reaction-X [Nm]     | -131,6     | -61         | -134        | -62,9        |
| Moment-Reaction-Y [Nm]     | 56,8       | 38,8        | -56,5       | -43          |
| Moment-Reaction-Z [Nm]     | -10,2      | 1,8         | -8,7        | 1            |
| Moment-Reaction-Total [Nm] | 143,7      | 72,3        | 145,7       | 76,2         |

Tabelle 8: Ergebnisse der Lagerreaktionen

Die Kräfte in Z-Richtung (Belastung in Schrauben-Achsrichtung) sind bei allen vier Stützen am größten, die vergleichsweise geringen Querkräfte werden daher vernachlässigt. Zur Überprüfung, ob die A2-70 M12 Schrauben der Zugkraft standhalten, wird für die am stärksten belastete Schraube (oben links) eine vereinfachte Berechnung durchgeführt.

Als erstes erfolgt in Gleichung (2) die Bestimmung der zulässigen Zugspannung  $\sigma_{zul}$  mithilfe der Streckgrenze der Schraube ( $R_e = 450 \text{ MPa}$ ) und des festgelegten Sicherheitsfaktors ( $S = 2$ ). Dieser wurde so gewählt, dass Vereinfachungen in der Rechnung berücksichtigt werden. [31]

$$\sigma_{zul} = \frac{R_e}{S} = \frac{450 \text{ MPa}}{2} = 225 \text{ MPa} \quad (2)$$

Im nächsten Schritt kann in Gleichung (3) der Mindest-Spannungsquerschnitt  $A_{S,min}$  mit der vorliegenden Betriebskraft  $F_B = 18.170 \text{ N}$  (siehe Tabelle 8) und der berechneten Spannung  $\sigma_{zul}$  bestimmt werden.

$$A_{S,min} = \frac{F_B}{\sigma_{zul}} = \frac{18.170 \text{ N}}{225 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 80,76 \text{ mm}^2 \quad (3)$$

Die metrische Schraube mit dem nächstgrößeren Spannungsquerschnitt ( $> A_{S,min}$ ) ist eine M12 Schraube ( $A_S = 84,3 \text{ mm}^2$ ).

Aus Tabellenwerten wird für eine M12 Schraube eine Vorspannung von  $\sigma_{vor}$  von  $280 \text{ MPa}$  angenommen. Das Ergebnis der Gleichung (3) zeigt, dass die gewählte Schraube eine für die Vorspannung ausreichende Streckgrenze aufweist. [31]

$$R_{e,erf} \geq 1,5 \cdot \sigma_{vor} = 1,5 \cdot 280 \text{ MPa} = 420 \text{ MPa} (< R_e = 450 \text{ MPa}) \quad (4)$$

Die vereinfachte Berechnung belegt somit, dass eine A2-70 M12 Schraube genutzt werden kann. Der verwendete Sicherheitsfaktor  $S$  berücksichtigt die ungenauere Gesamtschraubkraft (z. B. durch Vernachlässigung der Kerbwirkung). Hinzu kommt noch die Sicherheit, dass im Berstfall die Spannung in der Schraube die Streckgrenze überschreiten darf und die

Zugfestigkeit mit  $R_m = 700 \text{ MPa}$  noch signifikant höher liegt und es sich insgesamt um eine konservative Annahme handelt. [31]

### 5.1.2 Simulation des Gestells

Im zweiten Schritt werden die Folgen simuliert, wenn die Kräfte und Momente aus den Lagerreaktionen (Tabelle 8) auf die Viertelplatten des Gestells übertragen werden. Dafür müssen die Modelle der Viertelplatten (Blechstärke 10 mm), auf die gleiche Art wie der Vakuumwürfel modifiziert werden. Alle scharfen Kanten werden durch R3 Radien ersetzt (Bohrungskanten durch R1). Das modifizierte Modell ist in Abbildung 41 zu sehen.

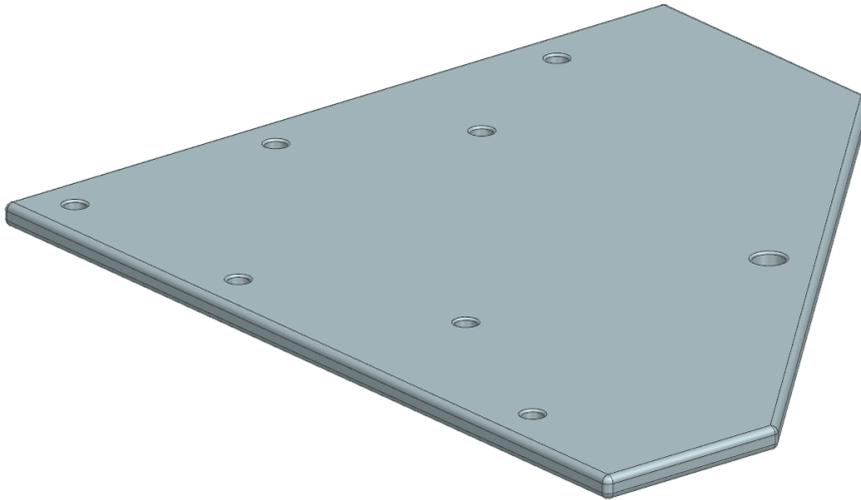


Abbildung 41: Modifiziertes Viertelplatten-Modell

Auch diesem Modell wird ein Werkstoff zugeordnet. Da es aufgrund des weichen Materials (Aluminium) und der großen wirkenden Kräfte in der Realität zu größeren Verformungen kommt, wird in diesem Lastfall nichtlinear simuliert werden und die Einstellung *Large Deflection* aktiviert. Dies setzt ein bilineares plastisches Materialmodell voraus, welches mithilfe des Werkstoffdatenblattes (Anhang F) eingestellt wird. Ein solches Materialmodell berücksichtigt die nichtlineare Eigenschaft von duktilen Werkstoffen bei plastischer Verformung. Während die Steigung des elastischen Bereiches durch das Elastizitätsmodul  $E$  eines Werkstoffs beschrieben wird, wird die Steigung des plastischen Bereiches durch das Tangentenmodul  $E_t$  dargestellt. Die Ermittlung von  $E_t$  ist dem Anhang G zu entnehmen. Nach Einstellen und Zuordnen des Werkstoffs werden in das Modell die Stützen und Lasten eingefügt (Abbildung 42). Als Stützen dienen in diesem Modell die jeweils sieben M8 Durchgangsbohrungen der vier Viertelplatten. Die Befestigung der Schrauben unterhalb der Viertelplatten sowie das restliche Gestell werden vereinfacht als gänzlich starr in dieser Simulation angenommen. Die Lagerreaktionen aus der Simulation mit dem Vakuumwürfel wirken in ihren einzelnen Richtungskomponenten auf die jeweils zugeordneten M12 Durchgangsbohrungen.

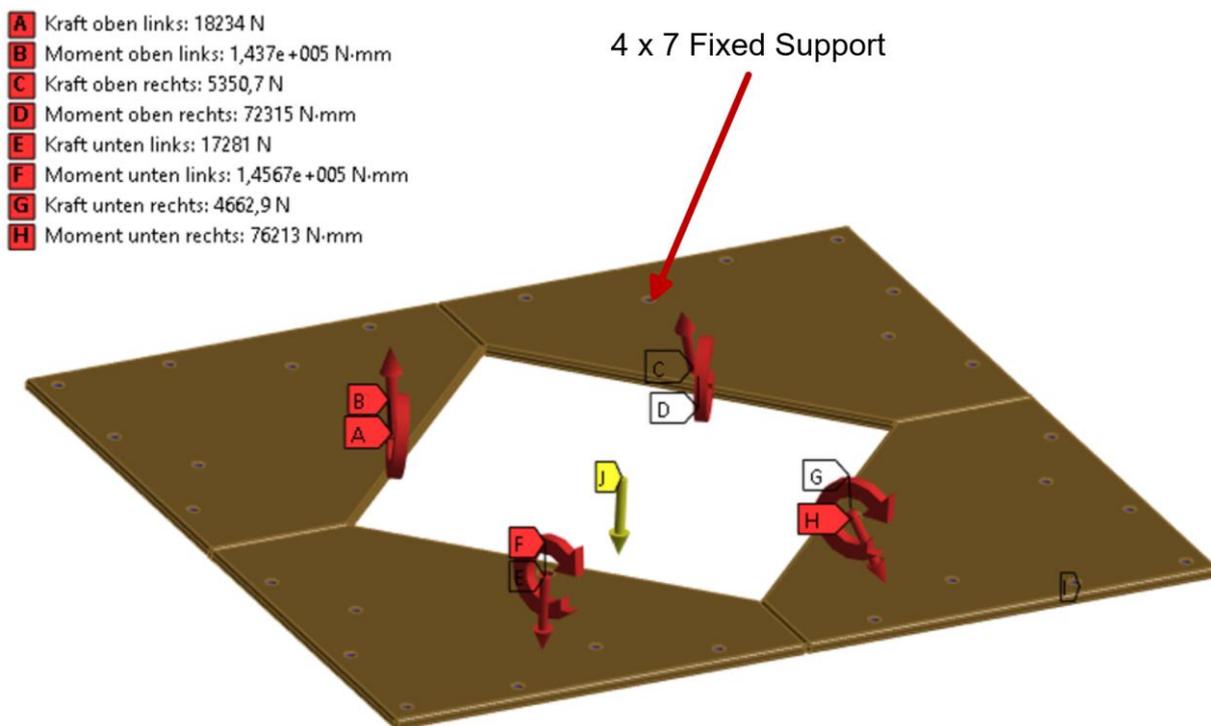


Abbildung 42: Viertelplatten-Modell mit Stützen und Lasten

Für die Kontaktflächen zwischen den Viertelplatten wird als Kontakteinstellung vereinfacht *Frictionless* im Programm ausgewählt, d. h. die Teile können ohne Reibung aneinander gleiten.

Es wird erneut eine Konvergenzstudie durchgeführt, zu Beginn dienen erneut 5 mm große, quadratische Elemente als Netz. Das Ergebnis der Vergleichsspannung mit der ersten Netzverfeinerung der Viertelplatten ist in Abbildung 43 zu sehen.

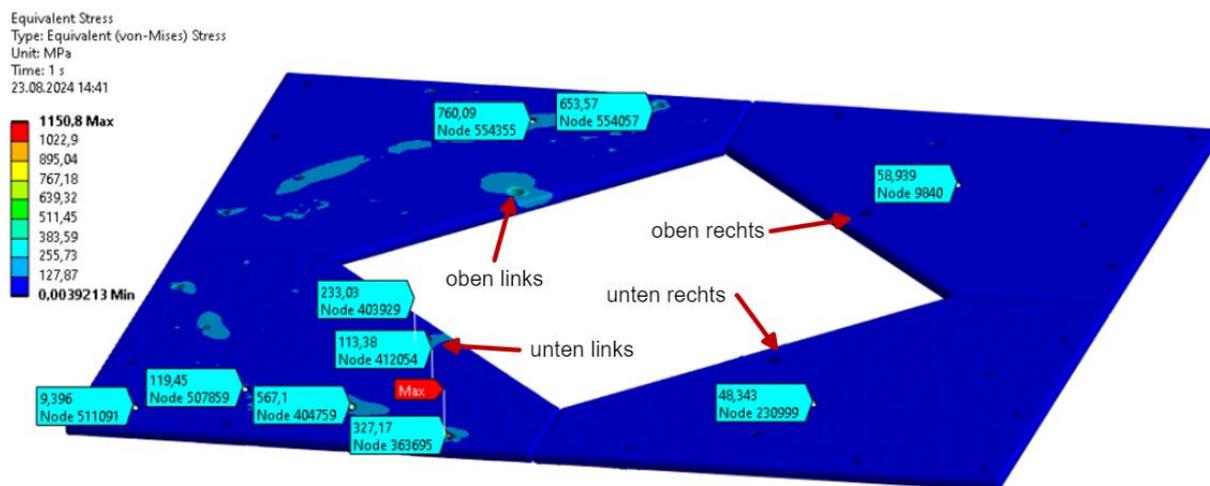


Abbildung 43: Vergleichsspannung in Viertelplatten

Die Spannungsspitzen von bis zu 1.150,8 MPa kommen aufgrund von Singularitäten in den am meisten belasteten M8 Bohrungen zustande, an der Kante zwischen Beginn des Radius und der Bohrung. Dies zeigen noch extremere Spannungswerte in der dritten Netzverfeinerung (siehe Abbildung 44). Es handelt sich daher um ein divergierendes Ergebnis. Auch mit

größeren Radien, feinerem Netz und der Nutzung der *Sizing*-Option bleiben die Singularitäten erhalten. Die Ergebnisse dieses Plots sind deshalb mit Vorsicht zu betrachten. Es fällt abseits der Singularitäten auf, dass die Spannungen nur in kleinen Bereichen der Bohrungen, bzw. Einspannung über 600 MPa hinausgehen. Sollte eine der stark belasteten M8 Schrauben infolge der Last beginnen sich zu dehnen, geht die Spannung auf die anderen Schrauben über, die bis dahin nur wenig Spannung tragen mussten. Ggf. wird der Hebel zwar größer, dafür ist aber auch bereits Spannung abgefangen worden.

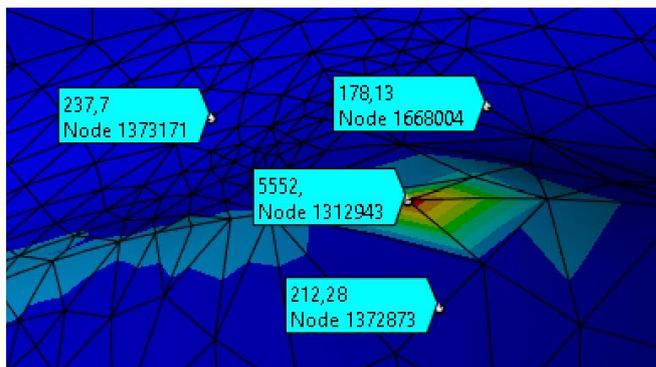


Abbildung 44: Singularität an einer Bohrung nach zwei Netzverfeinerungen

Aufgrund des nichtlinearen Verhaltens des Materials, ist für die Viertelplatten außerdem die totale Verformung interessant, das entsprechende Ergebnis ist in Abbildung 45 zu sehen. Betroffen von der Verformung sind vordergründig die Bereiche rund um die M12 Durchgangsbohrungen auf der Seite der Turbomolekularpumpe (bis zu 28,95 mm). Daraus erschließt sich, dass die weiche und duktile Aluminium-Legierung sämtliche Spannungen durch die Verformung absorbiert, wodurch nur noch ein kleinerer Teil der Spannung auf die Schrauben wirkt. Es ist außerdem zu erkennen, dass der Verformungsbereich vor den Bohrungen aufhört, die Schrauben werden daher nicht durch die Bewegung der Platte gedehnt.

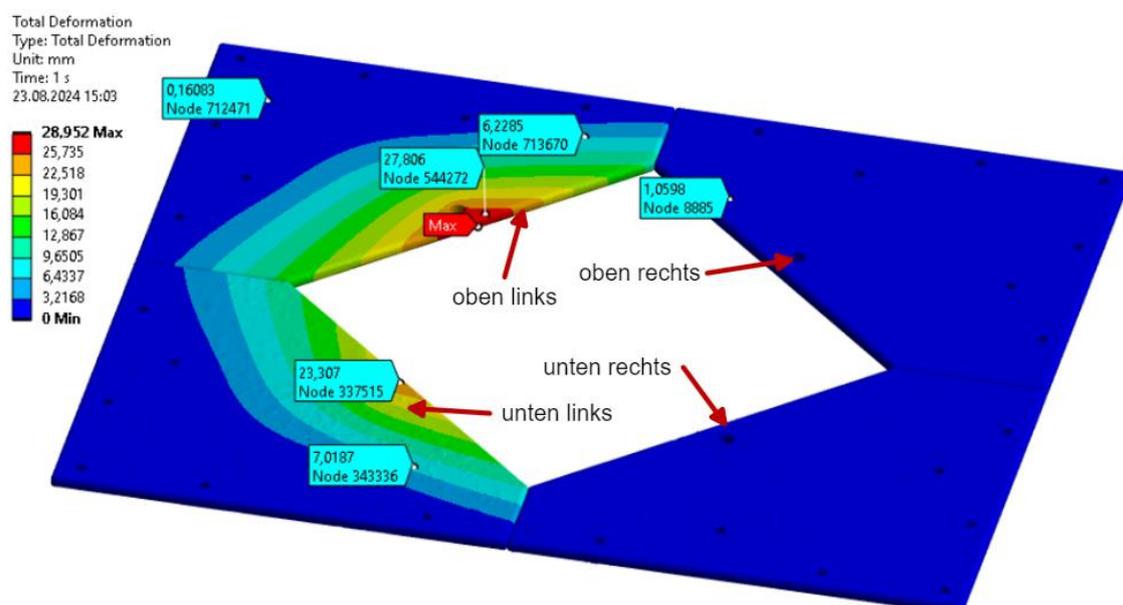
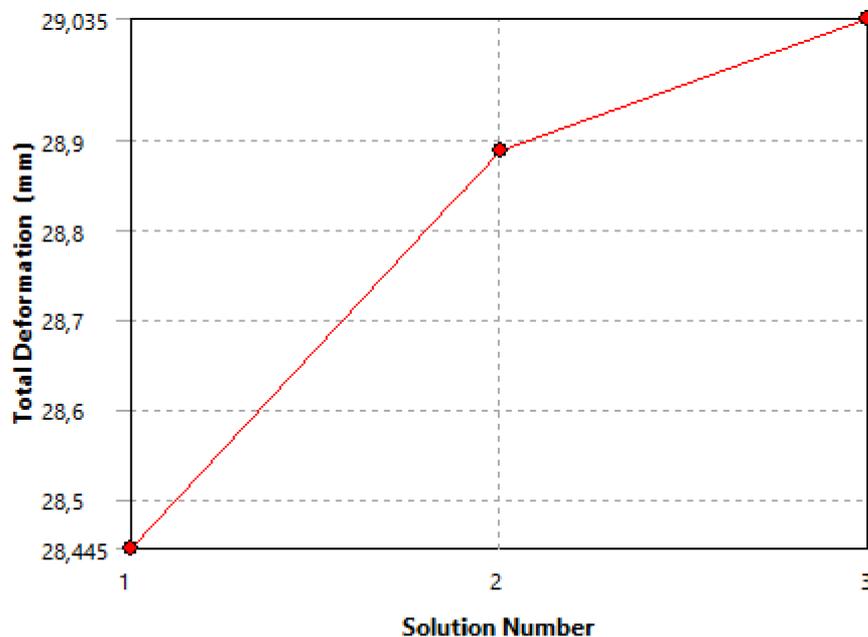


Abbildung 45: Totale Verformung der Viertelplatten

Auch hier wird mit einer automatischen Netzverfeinerung gearbeitet. Der Konvergenz-Verlauf ist der Abbildung 46 zu entnehmen. Begonnen wird mit einer Elementgröße von 5 mm. Nach einer Verfeinerung ist mit einer Wertveränderung von unter 1 % das Ergebnis als konvergiert anzunehmen, dabei kommt es zu 598.768 Knoten und 368.430 Elementen. Die Netze für die Viertelplatten (Vergleichsspannung und Verformung) sind in Anhang E wiederzufinden.



|   | Total Deformation (mm) | Change (%) | Nodes   | Elements |
|---|------------------------|------------|---------|----------|
| 1 | 28,445                 |            | 219268  | 120816   |
| 2 | 28,889                 | 1,5488     | 598449  | 368204   |
| 3 | 29,035                 | 0,50132    | 1387319 | 909562   |

Abbildung 46: Konvergenzverlauf der totalen Verformung

Im Hinblick auf die Ergebnisse ist nochmals zu betonen, dass es sich um eine äußerst konservative Parametrisierung des *Worst-Case* handelt. Selbst wenn in diesem Fall davon ausgegangen wird, dass die am meisten belasteten M8 Schrauben der Last nicht standhalten können, sind noch genug andere M8 Schrauben vorhanden, welche ein plötzliches Wegschleudern der Viertelplatten oder des Würfels verhindern. Auch wenn eine der Viertelplatten durch Überschreiten der Bruchgrenze nachgibt, beispielsweise am Steg der M12 Durchgangsbohrung, sind zusätzlich die zwei der Pumpe gegenüberliegenden Platten vorhanden, bei denen zuvor nur eine geringe Belastung auftrat. Es kann daher nach bestem Wissen und Gewissen angenommen werden, dass sich niemand aufgrund eines eventuellen Berstmoments in der Nähe der Apparatur in Gefahr befindet. Im Folgenden wird der Aspekt des Umkippen der Konstruktion aufgrund des plötzlich auftretenden Drehimpulses studiert.

## 5.2 Berechnungen zum Drehimpuls

Wenn es zum Berstmoment ( $M_{Berst} = 6.500 \text{ Nm}$ ) der Turbomolekularpumpe kommt, wird ein Drehimpuls auf die Konstruktion übertragen. Daher muss im Folgenden geprüft werden, ob dies zum Umkippen des Gestells inklusive des Aufbaus führen kann. Das Berstmoment der Turbomolekularpumpe übersteigt das Kippmoment des Aufbaus in einer statischen Betrachtung. Allerdings wirkt das Berstmoment nur auf einer sehr kurzen Zeitskala von etwa 5 ms, so dass auch die Dynamik der Situation betrachtet werden muss. Eine ergänzende Skizze zur folgenden Berechnung ist Anhang J zu finden.

Grundlage der Rechnung bildet die Funktion der Winkelbeschleunigung  $\alpha(t)$ , welche sich aus einem Drehmoment  $M$  und Massenträgheitsmoment  $J$  zusammensetzt (siehe Gleichung (5)).

$$\alpha(t) = \frac{M}{J} \quad (5)$$

Durch Integration erhält man in Gleichung (6) die Funktion der Winkelgeschwindigkeit  $\omega(t)$ . Die Integrationskonstante bildet dabei die Anfangswinkelgeschwindigkeit  $\omega_0$ .

$$\omega(t) = \int \alpha(t) \cdot dt = \alpha \cdot t + \omega_0 = \frac{M}{J} \cdot t + \omega_0 \quad (6)$$

Infolge des Berstmoments wirken zwei verschiedene Drehmomente. Das erste ist das Berstmoment  $M_{Berst}$  selbst, im Folgenden als  $M_1$  bezeichnet. Die dazugehörige Zeitkonstante  $t_1$  beträgt ca. 5 ms. Dies ist die Zeit, welche das Drehmoment  $M_1$  in Höhe von 6.500 Nm wirkt. Das zweite Moment  $M_2$  wirkt entgegen von  $M_1$ . Dieses Drehmoment lässt sich aus der Gewichtskraft der Konstruktion und der halben Länge des horizontalen Abstands von der Pumpenachse bis zum Fuß vom Gestell ( $l/2$ ) bestimmen (siehe Gleichung (7)) und entspricht dem Kippmoment des Aufbaus bei einer statischen Betrachtung.

$$M_2 = (m \cdot g) \cdot \frac{l}{2} = \left( 285 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \right) \cdot \frac{0,58 \text{ m}}{2} = 810,8 \text{ Nm} \quad (7)$$

Da  $|M_1| > |M_2|$ , wird der Aufbau in den ersten 5 ms anfangen zu kippen und dabei eine bestimmte Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$  erreichen. Das hier beschleunigend wirkende Drehmoment beträgt  $M_1 - M_2$ . Danach verzögert  $M_2$  diese Rotation bis zum Stillstand, an dem die maximale Auslenkung des Aufbaus von der nominalen Lage erreicht wird. Danach wird die Kammer wieder auf die Füße zurückfallen. Ob die Annahme eines konstanten  $M_2$  (wegen einer geringen maximalen Auslenkung) gerechtfertigt ist, muss im Ergebnis geprüft werden. Die maximale Auslenkung wird erreicht, wenn die Summe der Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  aufgrund der Beschleunigung durch  $M_1 - M_2$  und dem Wert der Winkelgeschwindigkeit aufgrund der Beschleunigung durch das gegenläufige Moment  $M_2$  alleine nach Ablauf der ersten 5 ms Null insgesamt erreicht (siehe Gleichung (8)). Die Anfangsgeschwindigkeit  $\omega_0$  entfällt, da diese vor dem Berstmoment null beträgt und die Massenträgheitsmomente kürzen sich raus. [34]

$$\omega_1(t) + \omega_2(t) = 0 \leftrightarrow \left( \frac{(M_1 - M_2)}{J} \cdot t_1 \right) + \left( \frac{-M_2}{J} \cdot t_2 \right) = 0 \leftrightarrow (M_1 - M_2) \cdot t_1 = M_2 \cdot t_2 \quad (8)$$

Aus der Beziehung zueinander lässt sich nach Umstellen die noch unbekannte Zeitkonstante  $t_2$  berechnen (siehe Gleichung (9)).

$$t_2 = \frac{(M_1 - M_2) \cdot t_1}{M_2} = \frac{(6.500 \text{ Nm} - 810,8 \text{ Nm}) \cdot 5 \text{ ms}}{810,8 \text{ Nm}} = 35,08 \text{ ms} \quad (9)$$

Um die Winkelbeschleunigungen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  für beide Momente zu erhalten, muss zunächst ein geeignetes Massenträgheitsmoment bestimmt werden. Da die Rotation nicht durch den Schwerpunkt sondern um die Standfüße des Aufbaus erfolgt, trägt das Trägheitsmoment nach dem Satz von Steiner  $J = J_s + m \cdot s^2$ . Die Größe  $m$  ist dabei die Masse des Gesamtaufbaus,  $s$  der Abstand zwischen dem Schwerpunkt und der Drehachse.  $J_s$  bildet das Trägheitsmoment um die Schwerpunktsachse und ist von der genauen Massenverteilung im Aufbau abhängig. Als konservative Abschätzung wird  $J_s$  vernachlässigt. Dies hat zur Folge, dass das reale Trägheitsmoment größer und die Verkipfung folglich kleiner ist, als hier abgeschätzt. Die Berechnung stellt eine obere Grenze dar (siehe Gleichung (10)). [34]

$$J = m \cdot s^2 = 285 \text{ kg} \cdot (1 \text{ m})^2 = 285 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (10)$$

Damit lassen sich nun die Winkelbeschleunigungen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bestimmen. Die Berechnung von  $\alpha_1$  ist in Gleichung (11) zu sehen, analog dazu das Ergebnis von  $\alpha_2$  in Gleichung (12).

$$\alpha_1 = \frac{M_1 - M_2}{J} = \frac{6.500 \text{ Nm} - 810,8 \text{ Nm}}{285 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{5.689,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{285 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2} = 19,96 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (11)$$

$$\alpha_2 = \frac{M_2}{J} = \frac{810,8 \text{ Nm}}{285 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = 2,85 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (12)$$

Mithilfe der zwei Winkelbeschleunigungen lassen sich nun die zwei Drehwinkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  bestimmen. Die Funktion des Drehwinkels erhält man durch Integrieren der Winkelgeschwindigkeit  $\omega(t)$  (siehe Gleichung (13)).

$$\varphi(t) = \int \omega(t) \cdot dt = \varphi_0 + \omega_0 \cdot t + \frac{\alpha}{2} \cdot t^2 \quad (13)$$

Da der Anfangsdrehwinkel  $\varphi_0$  sowie die Anfangswinkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  null betragen, fallen diese zur Bestimmung der gesuchten Drehwinkel weg, siehe Gleichung (14).

$$\varphi_1 = \frac{\alpha_1}{2} \cdot t_1^2 = \frac{19,96 \text{ rad}}{2 \text{ s}^2} \cdot (0,005 \text{ s})^2 = 0,25 \text{ mrad} \quad (14)$$

Die Berechnung von  $\varphi_2$  erfolgt analog dazu (siehe Gleichung (15)).

$$\varphi_2 = \frac{\alpha_2}{2} \cdot t_2^2 = \frac{2,85 \text{ rad}}{2 \text{ s}^2} \cdot (0,03508 \text{ s})^2 = 1,75 \text{ mrad} \quad (15)$$

Aus der Summe der zwei Drehwinkel lässt sich der gesamte Drehwinkel bestimmen (siehe Gleichung (16)).

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 0,25 \text{ mrad} + 1,75 \text{ mrad} = 2 \text{ mrad} \quad (16)$$

Mithilfe des gesamten Drehwinkels  $\varphi$  lässt sich nun mit dem Fußabstand die Kipphöhe  $h_{Kipp}$  bestimmen (siehe Gleichung (17)).

$$h_{Kipp} = \varphi \cdot l = 0,002 \text{ rad} \cdot 580 \text{ mm} = \mathbf{1,16 \text{ mm}} \quad (17)$$

Analog dazu bewegt sich der Schwerpunkt in 1 m Höhe um 2 mm zur Seite. Die dadurch hervorgerufene Verringerung von  $M_2$  (durch Verkürzung des wirksamen Hebels, an dem die Gewichtskraft angreift) beträgt damit weniger als 1 % ( $2 \text{ mm} \div 290 \text{ mm} = 0,007$ ). Dies rechtfertigt nachträglich die angenommene zeitliche Konstanz von  $M_2$ .

Das Ergebnis zeigt, dass das Gestell im *Worst-Case* nur bis zu 1,16 mm kippen kann, und daher die Turbomolekularpumpe in Betrieb genommen werden darf. Erwähnenswert ist, dass in dieser Berechnung die komplette Konstruktion als ideal starr angenommen wurde. Wie im vorherigen Kapitel zur FEM-Analyse zu sehen, nehmen die Viertelplatten bei der Verformung im Berstfall sämtliche Energie auf. In der Realität führt dies zu einer weiteren Verringerung des maximal wirkenden Drehmoments und reduziert zusätzlich die mögliche Verkippung der Apparatur im Berstfall der Turbomolekularpumpe.

### 5.3 Vakuumtechnische Berechnungen

Um sicherzustellen, dass die an der Vakuumkammer angebrachten Vakuumpumpen und Komponenten hinsichtlich der Wärmeleitung die Anforderungen für die Inbetriebnahme des Experiments erfüllen, werden im Folgenden verschiedene Berechnungen hinsichtlich der vakuumrelevanten Eigenschaften durchgeführt.

#### 5.3.1 Vorvakuumpumpen

Zur Kontrolle, ob die Vorvakuumpumpen der Auffangvorrichtung und der Kammerumgebung das eingebrachte Gas und Wasser abpumpen können, wird geprüft, ob die eingebrachte Menge (Gaslast) das Saugvermögen der Pumpe überschreitet.

Das stündlich eingebrachte Volumen des Wassers ( $Q_{H_2O,1h}$ ), welches verdunstet (daher Wasserdampf), ergibt sich aus dem Produkt der Stoffmengenkonzentration  $c_{H_2O,1h}$  des Wassers pro Stunde und des Molvolumens  $V_{m,H_2O}$  von Wasserdampf. Vereinfacht wird hierfür das molare Volumen eines idealen Gases nach Avogadro verwendet ( $V_{m,ideal} = 22,4 \frac{l}{mol}$ ). Mithilfe des eingebrachten Wassers in die Kammer ( $Q_{H_2O,1h} = 21 \frac{ml}{h}$ ) und der Stoffmengenkonzentration von Wasser ( $c_{H_2O} = 55,5 \frac{mol}{l}$ ) wird die Konzentration pro Stunde ermittelt (siehe Gleichung (18)). [26]

$$c_{H_2O,1h} = Q_{H_2O,1h} \cdot c_{H_2O} = 0,021 \frac{l}{h} \cdot 55,5 \frac{mol}{l} = 1,17 \frac{mol}{h} \quad (18)$$

Mit dem Ergebnis von  $1,17 \frac{mol}{h}$  und dem Molvolumen  $V_{m,ideal}$  folgt die Berechnung des Volumenstroms ( $Q_{H_2O,1h}$ ) in Gleichung (19), welcher die stündliche Gaslast des Wassers darstellt.

$$Q_{H_2O,1h} = c_{H_2O,1h} \cdot V_{m,ideal} = 1,17 \frac{mol}{h} \cdot 22,4 \frac{l}{mol} = 26,21 \frac{l}{h} \quad (19)$$

Der Volumenstrom beträgt  $26,21 \frac{l}{h}$ . Als nächstes wird das Gasvolumen berechnet, welches stündlich durch das *Liquid Flatjet System* eingebracht wird. Geplant ist bei der ersten Inbetriebnahme Stickstoff ( $N_2$ ) als Gas zu nutzen. Mithilfe der Erfahrungswerte aus vorangegangenen Experimenten mit einem *Liquid Flatjet System*, kann für die minütliche Gasmenge  $50 \frac{ml}{min}$  angenommen werden, was  $3 \frac{l}{h}$  ( $Q_{N_2,1h}$ ) entspricht. Die maximale Gasmenge  $Q_{Gas,max,1h}$  ergibt sich aus der Summe der zwei bestimmten Volumenströme (siehe Gleichung (20)).

$$Q_{Gas,max,1h} = Q_{H_2O,1h} + Q_{N_2,1h} = 26,21 \frac{l}{h} + 3 \frac{l}{h} = 29,21 \frac{l}{h} \left( = 0,029 \frac{m^3}{h} \right) \quad (20)$$

Für die Auffangvorrichtungs- und Vakuumkammerumgebung wird  $Q_{Gas,max,1h}$  als maximal auszupumpende Gasmenge pro Stunde angenommen. Für beide Umgebungen (Kammer und Auffangvorrichtung) wird eine Wälzkolbenpumpe „nXR60i“ (siehe Anhang C) verwendet. Aus den Spezifikationen lässt sich ein Saugvermögen von maximal  $60 \frac{m^3}{h}$  entnehmen. Die bisher berechnete, maximale Gasmenge gilt aber nur für einen Umgebungsdruck von  $1.013 \text{ mbar}$ . Nach der idealen Gasgleichung gilt, dass das Produkt aus Volumen und Druck konstant bleibt. D. h. mit sinkendem Druck steigt der Volumenstrom  $Q_{Gas,max,1h}$  an.

Aus dieser Erkenntnis lässt sich mithilfe der Leistungskurve zur Vorvakuumpumpe (modifizierte Abbildung 47) der Enddruck (logarithmische X-Achse) in *mbar* und das dann vorhandene Saugvermögen (lineare Y-Achse) in  $\frac{m^3}{h}$  ermitteln. Dafür muss das Diagramm mit einem Graphen des berechneten Volumenstrom  $Q_{Gas,max,1h}$  (der Gaslast) für die verschiedenen Druckbereiche erweitert werden. Die einzutragenden Wertepaare aus denen sich der Graph zeichnen lässt, ist in Tabelle 9 zu sehen. [25, 26]

| Druck [mbar] | Saugvermögen / Gaslast [l/s] |
|--------------|------------------------------|
| 1.000        | 0,029                        |
| 100          | 0,29                         |
| 10           | 2,9                          |
| 1            | 29                           |
| 0,5          | 58                           |

Tabelle 9: Gaslast (Achse Saugvermögen) der Vorvakuumpumpe

## nXR60i-Leistungskurve

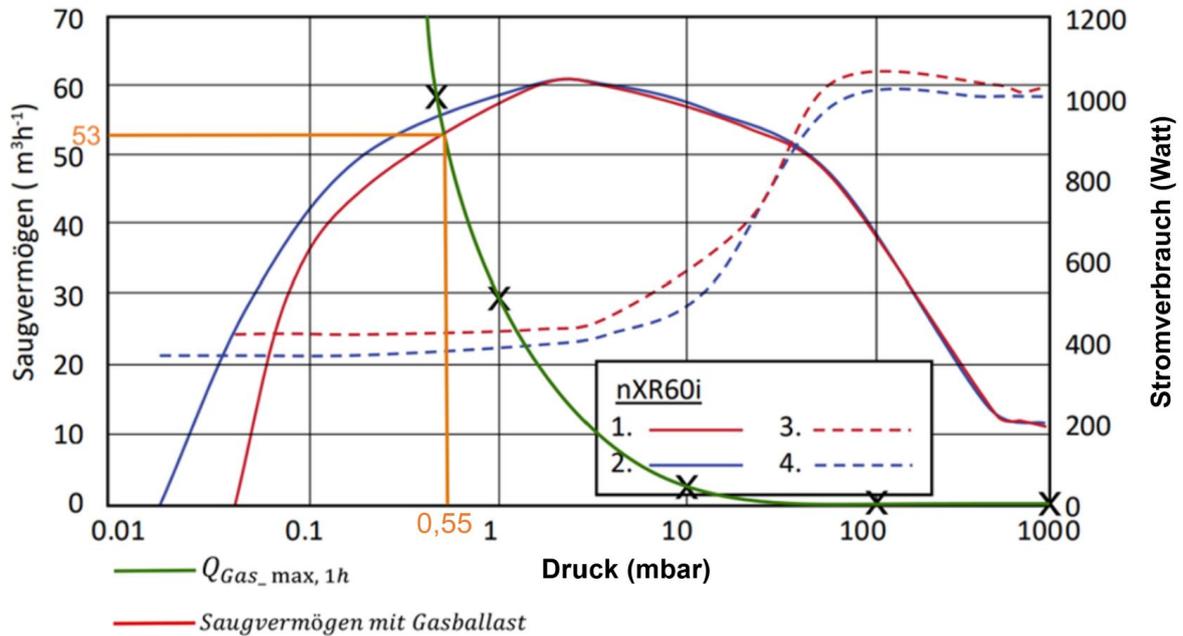


Abbildung 47: Leistungskurve der Vorvakuumpumpe (modifiziert von [25])

Nach Einzeichnen des Volumenstroms  $Q_{Gas\_max,1h}$  (grüner Graph) in Abbildung 47, wird der Schnittpunkt mit der roten Linie (Saugvermögen mit Gasballast) ermittelt. Das Einschalten des Gasballasts einer Vakuumpumpe verhindert die Kondensation von Gasen wie z. B. Wasserdampf. Dafür wird Luft in die Pumpe eingelassen, was die Verdichtung der betroffenen Gase verringert und somit das Risiko von Leistungsverlusten und Schäden reduziert. Ausgehend von diesem Punkt, lässt sich der Enddruck an der Abszisse und das maximale Saugvermögen an der Ordinate ablesen. Der Druck wird sich bei ca.  $0,55 \text{ mbar}$  bei einem Saugvermögen von etwa  $53 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  einstellen (die nicht benannten Graphen können ignoriert werden).

Die ermittelten Werte beziehen sich dabei auf das *Worst-Case*-Szenario. D. h. in diesem Fall wird davon ausgegangen, dass eine der beiden Vorvakuumpumpen die gesamte Gaslast abpumpen muss. Im Idealfall soll die Wälzkolbenpumpe der Auffangvorrichtung den Wasserdampf dort abpumpen und die Pumpe der Probenkammer das aus dem *Liquid Flatjet System* strömende Gas (Stickstoff). Ausgehend vom *Worst-Case*, reicht der zu erreichende Enddruck mit der Vorvakuumpumpe trotzdem aus, um die Turbomolekularpumpe für die Kammerumgebung einschalten zu können, da der Druck deutlich geringer als  $8 \text{ hPa}$  ( $= 8 \text{ mbar}$ ) ist (siehe Anhang B). [24, 25]

### 5.3.2 Turbomolekularpumpe

Ähnlich wie bei den Vorvakuumpumpen, wird auch die Turbomolekularpumpe hinsichtlich ihrer Leistung bei vorliegender Gaslast geprüft.

Die vorliegende Leistungskurve (modifizierte Abbildung 48) ist ähnlich aufgebaut, wie die der Vorvakuumpumpe. Lediglich die Einheiten der Achsen sind verschieden ( $1 \text{ hPa} = 1 \text{ mbar}$ ). Die

eingezeichneten Graphen beziehen sich auf verschiedene Gase und der angegebene Druckbereich liegt nun nicht mehr zwischen 0,01 und 1.000 mbar, sondern zwischen  $10^{-5}$  und 1 mbar (hPa).

Geprüft wird als erstes der *Worst-Case*, d. h. es wird davon ausgegangen, dass die Turbomolekularpumpe die volle Gaslast abpumpen muss. Nach Umrechnen der Einheiten bei 1 hPa

$\left(\frac{29 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3,6} = 8,06 \frac{\text{l}}{\text{s}}\right)$  und Bestimmung der Gaslast bei niedrigeren Drücken, ergeben sich für das

Diagramm folgende Wertepaare (Tabelle 10).

| Druck [hPa] | Saugvermögen / Gaslast [l/s] |
|-------------|------------------------------|
| 1           | 8,06                         |
| 0,1         | 80,6                         |
| 0,05        | 161,2                        |
| 0,02        | 403                          |
| 0,01        | 806                          |

Tabelle 10: Volle Gaslast (Achse Saugvermögen)

Aus den Wertepaaren ergibt sich der Graph für  $Q_{Gas,max,1s}$  (orange) in Abbildung 48. Im geplanten FLASH-Experiment wird Helium als Gas genutzt, weil Stickstoff das Röntgenlicht von FLASH stark absorbieren würde. Dies rechtfertigt es, die Heliumkurve als *Worst-Case* anzunehmen. D. h. der Enddruck stellt sich unter voller Gaslast bei ca. 0,023 hPa und einem Saugvermögen von ungefähr  $350 \frac{\text{l}}{\text{s}}$  ein. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Turbomolekularpumpe unter voller Gaslast ihr Leistungspotential nicht entfalten kann (möglicher Enddruck weit entfernt, siehe Anhang B). Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der Verwendung des Skimmers im Experiment, da dieser eine differentielle Druckstufe ermöglicht.

Es ist sehr unwahrscheinlich, dass das Wasser den Skimmer während des Experiments komplett verfehlt, wenn die Turbomolekularpumpe im Betrieb ist. Zu diesem Zeitpunkt soll das *Liquid Flatjet System* bereits korrekt eingestellt sein und die Turbomolekularpumpe muss im Idealfall nur noch die Gaslast des eingebrachten Stickstoffs abpumpen. Nach Umrechnung der Einheiten für die Stickstoff-Gaslast bei 1 hPa  $\left(\frac{3 \frac{\text{l}}{\text{h}}}{3.600} \cdot 10^3 = 0,83 \frac{\text{l}}{\text{s}}\right)$  ergeben sich die weiteren Wertepaare bei niedrigeren Drücken (siehe Tabelle 11).

| Druck [hPa] | Saugvermögen / Gaslast [l/s] |
|-------------|------------------------------|
| 1           | 0,83                         |
| 0,1         | 8,3                          |
| 0,01        | 83                           |
| 0,002       | 415                          |
| 0,001       | 830                          |

Tabelle 11:  $N_2$ -Gaslast der Turbomolekularpumpe

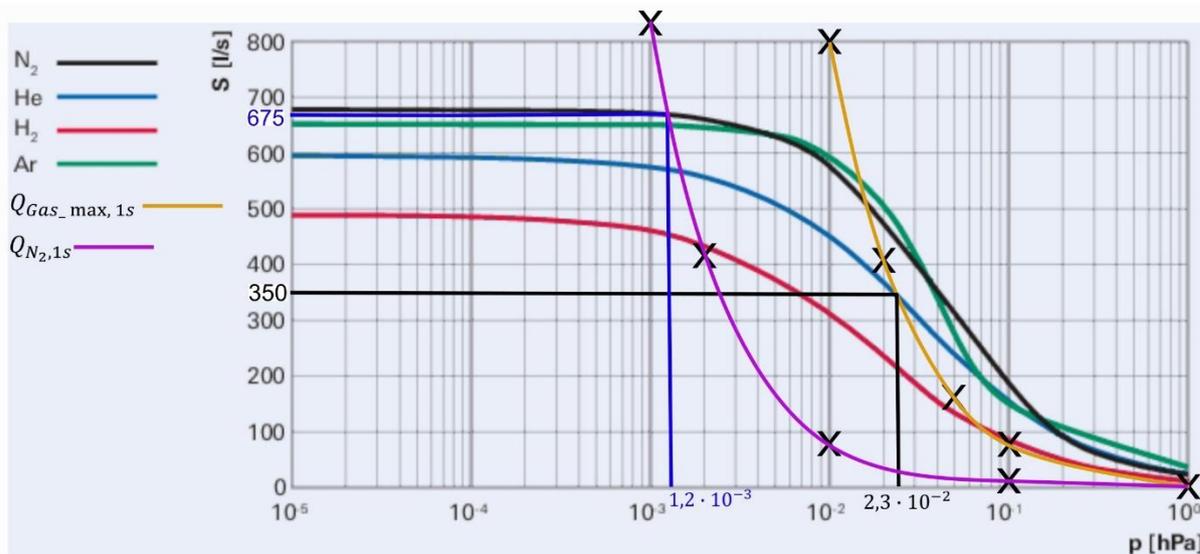


Abbildung 48: Leistungskurve der Turbomolekularpumpe (modifiziert von [27])

Der aus Tabelle 11 resultierende Graph  $Q_{N_2, 1s}$  (lila) ist ebenfalls in Abbildung 48 zu sehen. Anhand des Schnittpunktes des lila Graphen mit dem schwarzen Graphen ( $N_2$ ) ist ersichtlich, dass die Turbomolekularpumpe bei gesamter Stickstoff-Gaslast einen Enddruck von  $1,2 \cdot 10^{-3} hPa$  erreicht bei einem Saugvermögen von  $675 \frac{l}{s}$ . Realistisch für das Experiment ist ein geringfügig höherer Enddruck, da auch bei sehr guter Justierung des *Liquid Flatjet Systems* kleine Teile des Wasserdampfes in die Kammerumgebung gelangen werden.

Für den Test in der Laborumgebung sind die Ergebnisse der Vakuumpumpen ausreichend (siehe Anforderungsliste Tabelle 2, Lfd. Nr. 1.2). Da der Vakuumschrank am FLASH auf eine andere deutlich größere Vakuumkammer gesetzt wird, können dort zwei größere Turbomolekularpumpen ( $2.300 \frac{l}{s}$ ) eingesetzt werden, um noch niedrigere Enddrücke zu erreichen. [27]

### 5.3.3 Wärmeleitung

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist die Pumpleistung der Vorvakuumpumpe ausreichend, um einen Druck unter 1 mbar innerhalb der Auffangvorrichtung zu erreichen. Dies liegt deutlich unter dem Dampfdruck von Wasser bei Raumtemperatur (ca. 23,4 mbar), so dass das Wasser dort siedet. Dabei wird die Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  dem Wassers selbst entzogen, was eine starke Abkühlung und evtl. Gefrieren des Restwassers zur Folge hat, welches zu diesem Zeitpunkt noch nicht verdunstet ist. Dies muss durch eine entsprechende Wärmezufuhr verhindert werden, was in Konzept 2 die Aufgabe des Heizdrahtes ist. Im Folgenden wird überprüft ob die Heizleistung des Heizdrahtes von 50 Watt dafür ausreicht.

Mithilfe der Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  (Verdampfungswärme) ist die Energie bekannt, welche nötig ist, um Wasser zu verdampfen. Aus Tabellenwerten erhält man für Wasser bei Raumtemperatur eine molare Verdampfungsenthalpie  $\Delta H_v$  von  $43,99 \frac{kJ}{mol}$ , welche sich durch

Teilen mit der molaren Masse von Wasser ( $M_{mol,H_2O} = 18,02 \frac{g}{mol}$ ) in die spezifische Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_v$  formen lässt, siehe Gleichung (21). [28, 29]

$$\Delta h_v = \frac{\Delta H_v}{M_{mol,H_2O}} = \frac{43,99 \frac{kJ}{mol}}{0,01802 \frac{kg}{mol}} = 2.256,2 \frac{kJ}{kg} \quad (21)$$

Um im nächsten Schritt die erforderliche Heizleistung zu erhalten, muss die spezifische Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_v$  mit dem Massenstrom des eingebrachten Wassers  $q_{m,H_2O}$  multipliziert werden (siehe Gleichung (22)).

$$P_{Heizdraht} = \Delta h_v \cdot q_{m,H_2O} = 2.256,200 \frac{J}{kg} \cdot \left( \frac{0,021 \frac{kg}{h}}{3.600} \right) = 13,16 \frac{J}{s} = \mathbf{13,16 W} \quad (22)$$

Aus der Rechnung ergibt sich, dass um das Wasser gänzlich zu verdampfen, der Heizdraht eine Heizleistung von 13,16 W benötigt. Dieser Wert ist weit von den maximal möglichen 50 W entfernt und daher ausreichend dimensioniert.

## 6. Inbetriebnahme

Nach der Fertigung und Qualitätskontrolle aller Bauteile, kann mit dem entscheidenden Abschlussstest, der Inbetriebnahme, begonnen werden.

### 6.1 Vorbereitung

Vor der Inbetriebnahme, wird der innere Aufbau der Konstruktion endmontiert. Die Endmontage muss unter möglichst sauberen Bedingungen geschehen und es müssen dabei geeignete Einweghandschuhe getragen werden. Es ist außerdem zu kontrollieren, ob die später im Vakuum befindlichen Teile vakuumgereinigt worden sind. Zunächst werden die Vakuumpumpen angebracht und die Turbomolekularpumpe wird direkt an den Vakuumwürfel geflanscht. Eine Vorvakuumpumpe wird unterhalb der Kragenverbindung über den KF40-Anschluss mit einem Wellbalg angebaut und sorgt beim Einschalten für den Vorvakuumdruck der Umgebung unterhalb des Skimmers. Eine weitere Vorvakuumpumpe wird ebenfalls über eine KF-Verbindung an die Turbomolekularpumpe angeschlossen. Sie wird für den Vorvakuumdruck in der Probenkammer sorgen. Zur Druckmessung werden drei Druckmessköpfe angebracht. Jeweils einer an die Vorvakuumpumpen (Pirani-Vakuummeter) und einer direkt an die Kammer (Pirani-Heißkathode-Vakuummeter). Wichtig ist außerdem das Anbringen einer Berstscheibe. Diese dient als Sollbruchstelle, falls es ungeplant zu einem plötzlichen Druckanstieg in der Kammer kommt. Durch den resultierenden Überdruck könnte das Fenster des Türflansches zerbersten, was eine große Gefahr für den Betrieb darstellen würde. Dies wird durch die Berstscheibe verhindert, da diese als erste nachgibt, und der Druck dann entweichen kann.

Zur Überprüfung, dass die Kammer keine Lecks aufweist, wird über die Vorvakuumpumpe der Probenkammer das erste Mal ohne externe Gaslast abgepumpt. Nachdem der Enddruck erreicht ist (0,043 mbar), wird das Pumpenventil zuge dreht, um zu beobachten, in welcher Geschwindigkeit der Druck ansteigt. Geschieht dies zu schnell, könnte ein Leck vorliegen. Häufige Ursachen von Undichtigkeiten liegen bei den Dichtungen, da diese entweder bereits fehlerhaft gefertigt wurden, bei der Montage verrutscht sind oder mit einem falschen Drehmoment montiert wurden. Ist die Kammer dicht, werden mithilfe eines Durchführungsflansches die Anschlüsse des Heizdrahtes, eines Temperatursensors und des Piezomotors nach außen geführt. Anschließend wird die Technik auf ihre Funktionen überprüft. Dazu gehört, dass der Manipulator sich in alle Richtungen mit hoher Präzision bedienen lässt. Die Lineareinheit soll sich um die geplanten Weiten verfahren lassen und die Heizleistung des Heizdrahtes muss sich einstellen und verändern lassen. Dann wird die Höhe der Lochplatte richtig eingestellt, unter Berücksichtigung des zu verwendenden Skimmers. Auch die Position des Stangenhalter, welche sich über das Langloch händisch grob einstellen lässt, wird so vorjustiert, dass die Brennweite der genutzten Linse bei neutraler Einstellung der Lineareinheit ungefähr eingehalten wird. Das *Liquid Flatjet System* wird ebenfalls vorjustiert, damit die Probe direkt beim Start des Experiments die Öffnung des Skimmers trifft. Um dies zu testen, wird für kurze Zeit der

Jet eingeschaltet. Die Höhe des Jets wird dabei so eingestellt, dass sich die Austrittsöffnung des Flüssigkeitsstrahls knapp über der Kammermitte befindet.

Im Abbildung 49 ist der Aufbau im Kammerinneren zu sehen. Die Auffangeinheit samt Heizdraht und Hülse sieht etwas anders aus, als es im Modell geplant war. Dies hat mehrere Gründe. Da der ursprünglich angedachte Heizdraht defekt ist, musste auf einen alternativen Draht umgestiegen werden, der statt 2 m nur noch 0,5 m lang ist. Um das Einsetzen und Einspannen des Heizdrahtes zu erleichtern, wurde die Hülse an einer Seite aufgesägt. Damit der Anpressdruck dadurch nicht reduziert wird, wurden nach der Installation des Heizdrahtes und des Temperatursensors zwei Schellen um die Hülse gespannt. Da der Heizdraht auf der Höhe der Schrägen im Inneren der Auffangvorrichtung liegt und sie eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit hat, ist davon auszugehen, dass die verkürzte Länge den gewünschten Effekt des Heizens nicht einschränkt.

Im direkten Vergleich zum erstellten *Brickworld*-Konzept (Abbildung 16) wird eine Analogie zwischen der ungefähren Konzeptvorstellung und des Ist-Zustandes deutlich. Die Anordnung der Hauptkomponenten ist sehr ähnlich, an der Grundidee musste nichts geändert ändern.

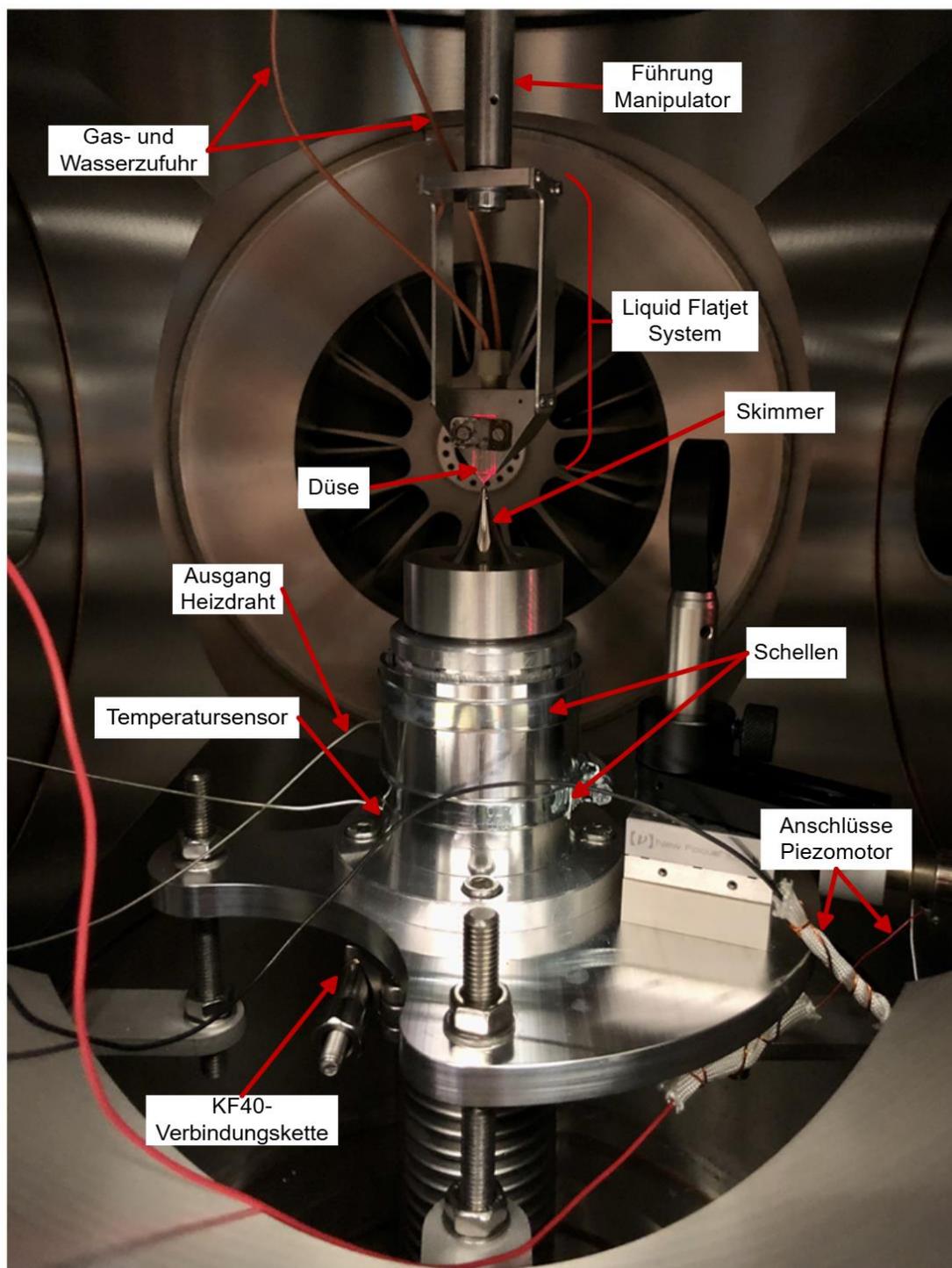


Abbildung 49: Experimentaufbau im Kammerinneren

## 6.2 Durchführung

Mit der Versuchsdurchführung im Labor soll festgestellt werden, ob die Konstruktion die Anforderungen für ein Flüssigkeitsstrahl-Experiment in einer Vakuummehrkammer erfüllt. Dabei entfällt hierbei die Verwendung eines Lasers, da dieser keinen unmittelbaren Einfluss auf die Erfüllung der Anforderungen hat. Diese erste Labor-Inbetriebnahme ist äußerst wichtig, da das Experiment, wenn es am FLASH-Beschleuniger durchgeführt werden soll, hinsichtlich der Konstruktion fehlerfrei und problemlos funktionieren muss. Der Aufbau wird daher bei diesem

Test äußerst kritisch unter Aufsicht mehrerer Anwesender geprüft. Es wird außerdem während der Inbetriebnahme eine Checkliste mit definierten Zielen geführt, um sicherzustellen, dass alle wichtigen Aufgaben geprüft und erfüllt werden (siehe Tabelle 12).

| Checkliste Inbetriebnahme |  |           |
|---------------------------|--|-----------|
| Lfd. Nr.                  | Ziel   | Ja / Nein |
| 1                         | Turbomolekularpumpe erreicht Nenndrehzahl ohne Flatjet |           |
| 2                         | Präzise Fernsteuerung der Düsen / Motorposition        |           |
| 3                         | Kamera-Diagnostik betriebsbereit                       |           |
| 4                         | Auffangen des Wassers mit Skimmer                      |           |
| 5                         | Liquid Flatjet-Präparation unter Atmosphäre            |           |
| 6                         | Liquid Flatjet-Präparation im Vakuum                   |           |
| 7                         | Eisbildung am Skimmer verhindern                       |           |
| 8                         | Heizleistung vom Heizdraht steuern                     |           |
| 9                         | Vorvakuumdruck unter dem Skimmer < 2 mbar              |           |
| 10                        | Vorvakuumdruck in der Probenkammer < 2 mbar            |           |

Tabelle 12: Checkliste Inbetriebnahme

Das erste Ziel besteht darin, dass die Turbomolekularpumpe (*Flatjet*-Betrieb) ihre Nenndrehzahl erreicht. Ist dies der Fall, so ist die Vakuumkammer dicht genug für die Inbetriebnahme. Im Vakuumbetrieb müssen sich die Motoren des Manipulators und der Lineareinheit präzise von außen steuern lassen. Es ist erforderlich, dass sämtliche Kameras präzise in der Höhe und in Richtung zur Kammermitte eingestellt sind und die *Flat-Sheets* dabei scharf abbilden. Das *Liquid Flatjet System* muss sowohl unter Atmosphärendruck als auch unter Vakuum richtig im Raum ausgerichtet sein (und bleiben), um durchgehend die Öffnung des Skimmers zu treffen. Dabei ist die Einstellung des passenden Gas- und Wasserdrucks für eine gute *Flat-Sheet* Bildung von Bedeutung. Wichtig ist den Heizdraht von Anfang an mit einer Mindestleistung von 13 Watt zu erwärmen und mithilfe des Temperatursensors die Temperatur der Auffangvorrichtung im Blickfeld zu haben. Falls unter geringerem Druck die Temperatur fällt, muss die Heizleistung entsprechend erhöht werden, um kontinuierlich eine Eisbildung zu verhindern. Sobald sich in der Probenkammer und der Auffangvorrichtung ein Vorvakuum-Enddruck mithilfe der zwei Vorvakuumpumpen eingestellt hat, sollte sich der Druck unterhalb von 2 mbar befinden. Ein geringer Druck unterhalb der Auffangeinheit ermöglicht es, aufgrund der Funktion als differentielle Druckstufe, ein besseres Vakuum in der Probenkammer zu erreichen. Ein geringer Vorvakuumdruck ist hier vor allem wichtig, um die Turbomolekularpumpe in Betrieb nehmen zu können.

Es sind zwei unterschiedliche Inbetriebnahmen geplant. In der ersten wird zunächst der Skimmer mit dem größten Öffnungsdurchmesser ( $\varnothing$  1 mm) verwendet, um die Justage der Düse auf die Skimmeröffnung zu vereinfachen. Da bei einem größeren Öffnungsdurchmesser die Effizienz der differentiellen Druckstufe abnimmt, ist mit schlechteren Enddrücken in der Probenkammer zu rechnen. Daher wird in dieser Versuchsdurchführung auf das Einschalten der

Turbomolekularpumpe verzichtet, da die Gaslast unter diesen Bedingungen zu groß wäre, was das Heißlaufen und Ausschalten der Pumpe zufolge hätte.

Im zweiten Anlauf wird ein Skimmer mit einem deutlich kleineren Öffnungsdurchmesser verwendet ( $\varnothing$  0,5 mm). Dies macht es deutlich schwieriger das *Liquid Flatjet System* korrekt zu justieren, gerade in der Zeit, bis der Enddruck der Vorvakuumpumpen erreicht ist, da sich die Auffangvorrichtung leicht zusammendrückt bzw. ausdehnt. Dieser Effekt kann etwas reduziert werden, indem die Ventile beider Vorvakuumpumpen in möglichst gleicher Geschwindigkeit geöffnet werden. Der Vorteil dieses Versuchs ist, dass mit einem erheblich besseren Vorvakuumdruck in der Probenkammer zu rechnen ist, so dass die Turbomolekularpumpe in Betrieb genommen werden kann.

Um die Gewissheit zu haben, dass dieser Versuchsaufbau auch für eine Messzeit bei FLASH geeignet ist, soll die Inbetriebnahme jeweils eine Stunde ohne Komplikationen ablaufen. Ist es bis dahin zu keiner Eisbildung gekommen, kann aufgrund ähnlicher Experimente in der Vergangenheit davon ausgegangen werden, dass es auch nach längerer Zeit zu keiner Eisbildung kommen wird.

In Inbetriebnahme 1 entfällt das erste Ziel der Checkliste, da in der Vorbereitung schon mithilfe einer Vorvakuumpumpe getestet wurde, ob die Kammer dicht genug ist. Es kann direkt mit dem Abpumpen im *Flatjet*-Betrieb angefangen werden. Die Motoren lassen sich wie geplant verfahren und die Diagnostik kann die *Flat-Sheets* richtig abbilden (siehe Abbildung 50).

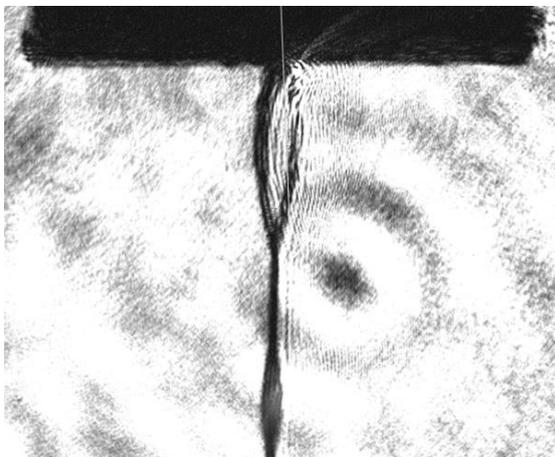


Abbildung 50: *Flatjet* Inbetriebnahme 1

Durch den Skimmer mit der größeren Öffnung fällt es leicht, dass die Probe die Öffnung trifft, bis der Enddruck erreicht ist. Während der gesamten Stunde kann keine Eisbildung beobachtet werden, der Heizdraht hält kontinuierlich eine Temperatur von rund 40°C. Die Heizleistung wurde von vorneherein etwas höher eingestellt als in Kapitel 5.3.3 berechnet, um kein Risiko einzugehen. Der von den Druckmessköpfen (unter Auffangvorrichtung und Probenkammer) ermittelte Druck der beiden Inbetriebnahmen ist in Tabelle 13 dargestellt.

| Druckmessung     |   |                               |                              |
|------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
|                  | Vorvakuum unter Auffangvorrichtung [mbar] | Vorvakuum Probenkammer [mbar] | Enddruck Probenkammer [mbar] |
| Inbetriebnahme 1 | 1,04                                      | 1,05                          | 1,05                         |
| Inbetriebnahme 2 | 0,88                                      | 0,12                          | 0,000515                     |

Tabelle 13: Ergebnisse Druckmessung

In der ersten Inbetriebnahme wird sowohl in der Probenkammer als auch unter der Auffangvorrichtung ein Druck von etwas über 1 mbar erreicht. Punkt neun und zehn der Checkliste sind damit erfüllt. Nach dem ermittelten Enddruck aus Kapitel 5.3.1 wäre im theoretischen Worst-Case-Fall der ungünstigste Druck von ungefähr 0,55 mbar für das Vorvakuum zu erwarten gewesen. Der Ist-Druck liegt aber mit Faktor 2 über dem theoretischen Wert. Es muss jedoch bei den Messergebnissen die Messgenauigkeit der Messköpfe beachtet werden (siehe Anhang H und I), welche 15 % beträgt. Außerdem wurde die Montage nicht unter Reinraumbedingungen durchgeführt. Trotzdem ist die erste Inbetriebnahme bereits ein Erfolg, da fast alle Forderungen an die Konstruktion erfüllt worden sind. Lediglich Anforderung 1.2 aus Tabelle 2, dass sich der Druck in der Kammer unter 0,1 mbar befinden soll, gilt es in der zweiten Inbetriebnahme unter Zuhilfenahme der Turbomolekularpumpe zu erfüllen.

Bei der zweiten Inbetriebnahme wird die Nenndrehzahl der Turbomolekularpumpe erreicht. Dies bedeutet, dass die Kammer dicht genug ist und die Turbomolekularpumpe effizient betrieben werden kann. Bei diesem Versuch muss der *Flatjet* aufgrund des Skimmers mit der kleineren Öffnung deutlich genauer justiert werden. Ansonsten sind die zu prüfenden Punkte wie in der ersten Inbetriebnahme schnell und ohne Komplikationen erfüllt. Diesmal wird zur Optimierung des Versuchs der Jet näher an die Skimmeröffnung bewegt (Abstand ca. 0,25 mm), dargestellt in Abbildung 51. Dies hat zur Folge, dass ein Großteil der gesamten Gaslast in den Skimmer eingebracht, und ein besserer Enddruck der Probenkammer erreicht wird. Verstärkt wird der Effekt durch den kleinen Öffnungsdurchmesser des Skimmers.

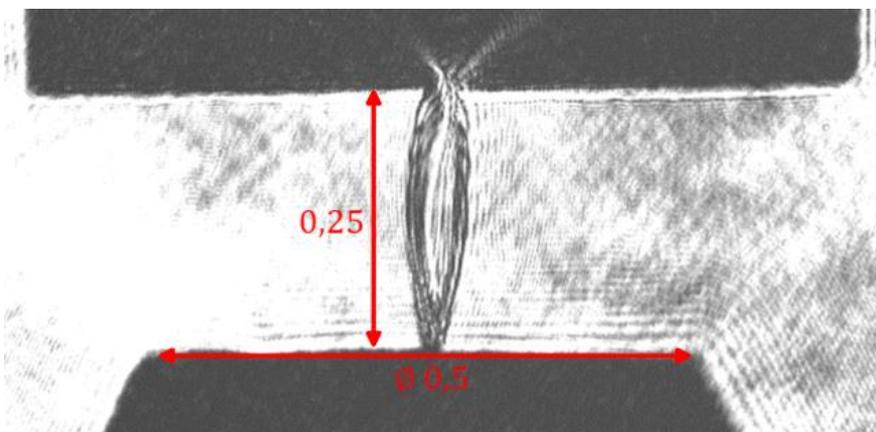


Abbildung 51: Flatjet Inbetriebnahme 2

Sobald sich der Vorvakuumumpfen-Enddruck einstellt, wird die Turbomolekularpumpe zugeschaltet. Auch im *Flatjet*-Betrieb kann die Nenndrehzahl erreicht werden und den Druck effektiv senken. Die Turbomolekularpumpe kann ohne Weiteres für diese Tests eine Stunde lang betrieben werden.

Die Messungen von Inbetriebnahme 2 zeigen, wie in Tabelle 13 dargestellt, dass der hier verwendete Skimmer und der kleine Abstand zwischen Düse und Skimmer bereits zu einem deutlich besseren Vorvakuum-Enddruck in der Probenkammer führt (0,12 mbar). Mit Dazuschalten der Turbomolekularpumpe kann nach etwa 25 weiteren Minuten ein Enddruck von  $5,15 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$  erreicht werden. Der erreichte Druck liegt mit ca. Faktor 2 unter dem zuvor mithilfe der Leistungskurve der Turbomolekularpumpe in Abbildung 48 berechneten Enddruck ( $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$ ). Jener Enddruck ergibt sich jedoch unter der Annahme, dass die Turbomolekularpumpe die ganze Stickstoff-Gaslast abpumpen muss. In dieser Position des Jets in Bezug zu dem Skimmer gerät jedoch nur ein kleiner Teil der Gaslast in die Kammer. Der erreichte Enddruck der Probenkammer in Inbetriebnahme 2 erfüllt eindeutig die Anforderung 1.2 aus der Anforderungsliste.

## 7. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Versuchsaufbau für ein Flüssigkeitsstrahl-Experiment realisiert und in Betrieb genommen. Zunächst wurde der innere Versuchsaufbau methodisch konzipiert. Mithilfe eines Gantt-Diagramms wurde der Prozess dieser Arbeit geplant. Mit der Erstellung einer Anforderungsliste konnten verschiedene Wünsche und Forderungen an die Konstruktion definiert werden. Die Erstellung eines stark vereinfachten *Brickworld*-Konzepts und eines Kontextdiagramms halfen dabei den Versuchsaufbau besser zu verstehen, die Anforderungen greifbarer zu machen und die Hauptkomponenten festzulegen. Mithilfe der erhaltenen Informationen konnte ein morphologischer Kasten erstellt werden, in dem zu bestimmten Teilfunktionen verschiedene Lösungsmöglichkeiten bildlich dargestellt wurden. Aus diesen konnten im Folgenden drei verschiedene Konzepte erstellt werden, die anschließend in einer Nutzwertanalyse gegenübergestellt wurden.

Ein Konzept erreichte dabei ein besonders gutes Ergebnis für die technische Wertigkeit. Dieses wurde im nächsten Schritt konstruktiv umgesetzt. Ein wichtiges Nebenziel dabei war, jede Komponente so einfach wie möglich zu halten, um eine möglichst schnelle Fertigung zu bewerkstelligen.

Da eine Turbomolekularpumpe Teil des experimentellen Aufbaus ist, musste sichergestellt werden, dass niemand verletzt wird, wenn die Pumpe blockiert und ein großes Drehmoment für eine kurze Zeit auf die Konstruktion wirkt und es zum Berstfall kommt. Daher wurde eine konservative FEM-Analyse durchgeführt, um die Folgen in einem *Worst-Case*-Szenario abschätzen zu können. Das Ergebnis zeigte, dass es bei diesem technischen Defekt zu plastischen Verformungen von zwei der Viertelplatten kommen wird, was einen Großteil der wirkenden Spannungen auf die Konstruktion absorbiert. Die sieben M8 Schrauben welche jeweils die Platten am Gestell befestigen, bilden redundante Sicherheitsmaßnahmen, falls es doch zum Versagen der am stärksten belasteten Verbindungen kommt. Es ist daher auszuschließen, dass Bauteile der Konstruktion infolge des Berstmoments der Turbomolekularpumpe eine Gefahr für die Experimentatoren darstellen. Des Weiteren wurde eine analytische Berechnung zum auftretenden Drehimpuls durchgeführt, um zu bestimmen, ob das Gestell infolge des Drehimpulses umkippen kann. Das Ergebnis ergab, dass das Gestell um nur 1,16 mm kippen kann, was keine Gefahr darstellt. Um die Vakuumkammer und den inneren Aufbau auf die vakuumtechnischen Anforderungen zu prüfen, wurden verschiedene Berechnungen durchgeführt. Es wurde die Gaslast ermittelt, um den theoretischen Enddruck der Vorvakuum pumpen und der Turbomolekularpumpe zu bestimmen. Dabei ergaben sich Enddrücke, welche die Anforderungen erfüllen. Außerdem musste überprüft werden, ob die Heizleistung des Heizdrahtes ausreicht, um durchgängig das eingebrachte Wasser zum Verdunsten zu bringen, bevor es gefrieren kann. Auch dabei kam es zu positiven Ergebnissen.

Nach erfolgreicher Validierung der Konstruktion und Montage konnte die Inbetriebnahme unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Mithilfe einer Checkliste, wurde der Versuchsaufbau

erfolgreich erprobt. Die Vorvakuumumpumpen haben dabei die geforderten Vordrücke erreicht. Die Turbomolekularpumpe sorgte dafür, dass der Umgebungsdruck von 0,1 mbar in der Probenkammer unterschritten werden konnte. Der Heizdraht sowie die zwei Schrägen in der Aufangvorrichtung haben die unerwünschte Eisbildung während des Experiments verhindert.

## 8. Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel wird ein Fazit für die Konstruktion und den Versuchsaufbau gezogen und aufgezeigt wie es im Hinblick auf das Experiment weitergeht.

Um im Nachgang auszuwerten, ob und welche Anforderungen erfüllt worden sind, ist in Tabelle 14 erneut die Anforderungsliste zu sehen. In dieser verrät die Farbe den jeweiligen Erfüllungsgrad.

Es fällt auf, dass ein großer Teil der Anforderungen mit „sehr gut“ erfüllt worden ist. Es gibt Abzüge für die fertigungsfreundliche Gestaltung, da die Auffangvorrichtung aufgrund der Schrägen im Inneren und der Spiralnut, welche nach dem Schweißen eingebracht wurde, viel Fertigungszeit in Anspruch genommen hat. Ansonsten waren die meisten Teile aber sehr leicht zu fertigen. Die Justierung der Höhe der Auffangeinheit funktionierte, war jedoch aufgrund der vier Gewindestangen im Kammerinneren nicht praktisch, insbesondere wenn die Lochplatte genau ausgerichtet werden sollte. Der Zweck wurde aber erfüllt, da die Platte nur bei einem Skimmerwechsel in der Höhe leicht angepasst werden musste. Die bequeme Justierung des Manipulators und der Lineareinheit mithilfe der Motoren war sehr hilfreich, da sie im Experimentbetrieb regelmäßig notwendig wurde. Um aufgrund des strengen Zeitplans, die Fertigungszeit gering zu halten und Lieferzeiten zu umgehen, sollten möglichst alle zu fertigenden Teile intern beim DESY in Auftrag gegeben werden. Dies wurde nur bedingt realisiert, was aber im Wesentlichen an den internen Werkstattprozessen lag bzw. eine Entscheidung der Arbeitsvorbereitungsgruppe war. Im Punkt Montagefreundlichkeit gab es zum Teil Schwierigkeiten. Dies ist dem geschuldet, dass auf bestimmte Teile in der Fertigung länger als gedacht gewartet werden musste. Dadurch wurde aus Zeitgründen die geplante Montagereihenfolge verändert, was zur Folge hatte, dass der Kragen und die darunterliegenden schweren Flansche über Kopf montiert werden mussten, was nicht im Sinne der Ergonomie ist. Verbesserungspotential gibt es in Bezug auf die Montage unter Reinraumbedingung. Der Schutz gegen das Versagen der Konstruktion im Berstfall ist ausreichend erfüllt, da die statische FEM-Analyse den *Worst-Case* gut darstellt. Was im Detail während der kurzen Wirkdauer von 5 ms des realen Berstmoments passiert, wird Gegenstand weiterer Simulationen sein, welche den Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit deutlich gesprengt hätten. Aufgrund der erzielten Ergebnisse unter konservativen Annahmen kann mit ausreichender Sicherheit gewährleistet werden, dass keine Platten, Flansche oder gar der Würfel selbst infolge des Drehmoments vom Gestell abreißen.

| W1 = nicht wichtig<br>W2 = wenn möglich<br>W3 = wichtig<br>W4 = sehr wichtig<br>F = Forderung |       | <b>Anforderungsliste</b><br>Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme<br>einer Flüssigkeitsstrahlquelle<br>in einer Vakuumkammer |            |
|---|-------|--|------------|
| Lfd. Nr.  | F / W | Anforderung  | Werte      |
| <b>1</b>  |       | <b>Funktionalität</b>  |            |
| 1.1   | F     | Vakuumgeeignete Werkstoffe   |            |
| 1.2   | F     | Maximaler Druck in der Kammer  | < 0,1 mbar |
| 1.3   | F     | Auffangen der Flüssigkeit knapp unter Würfelmitte  |            |
| 1.4   | F     | Flüssigkeit aus der Kammer befördern   |            |
| 1.5   | F     | Eiskristallbildung der Probe verhindern  |            |
| <b>2</b>  |       | <b>Geometrie / Design</b>  |            |
| 2.1   | W3    | Effizientes Abpumpen gewährleisten (Design)  |            |
| 2.2   | W2    | Freie Sicht auf Wechselwirkungszone Laser - Probe  |            |
| 2.3   | W2    | Platzsparende Bauweise   |            |
| 2.4   | W2    | Fertigungsfreundliche Gestaltung   |            |
| 2.5   | F     | Nutzung eines Skimmers als Auffangvorrichtung  |            |
| 2.6   | W3    | Unkomplizierter Versuchsaufbau   |            |
| 2.7   | W2    | 2,81° Verdrehung der Lochkreise berücksichtigen  |            |
| <b>3</b>  |       | <b>Kinematik</b>   |            |
| 3.1   | W4    | Justierung der Höhe der Auffangvorrichtung   |            |
| 3.2   | F     | Lineareinheit zum Verfahren der Linse nutzen   |            |
| 3.3   | W4    | Justierung der Höhe der Linse (auf Lineareinheit)  |            |
| 3.4   | W4    | Lineareinheit Verfahrensweg frei   | 12,7 mm    |
| <b>4</b>  |       | <b>Diagnostik</b>  |            |
| 4.1   | W4    | Einbau von genügend Kameras  |            |
| 4.2   | W3    | Einfaches Ausrichten und Justage der Diagnostik  |            |
| 4.3   | W4    | Überhitzen von Komponenten vermeiden   | < 150°C    |
| <b>5</b>  |       | <b>Ergonomie</b>   |            |
| 5.1   | W3    | Plug & Play Prinzip für Experimentdurchführung   |            |
| 5.2   | W2    | Bequemes Justieren   |            |
| <b>6</b>  |       | <b>Fertigung</b>   |            |
| 6.1   | W2    | Fertigung beim DESY  |            |
| 6.2   | W2    | Nutzung von Kaufteilen   |            |
| 6.3   | W4    | Vakuumreinigung nach Fertigung   |            |
| 6.4   | W2    | Fertigungsfreundlicher Werkstoff   |            |
| <b>7</b>  |       | <b>Montage</b>   |            |
| 7.1   | W2    | Montagefreundliche Konstruktion  |            |
| 7.2   | W1    | Fehlervermeidung durch Poka-Yoke   |            |
| 7.3   | W2    | Keine schweren Bauteile  |            |
| 7.4   | W4    | Tragen von Einweghandschuhen   |            |
| 7.5   | W4    | Fettfreie und saubere Komponenten im Vakuum  |            |
| 7.6   | W2    | Montage unter Reinraumbedingungen  |            |
| <b>8</b>  |       | <b>Sicherheit</b>  |            |
| 8.1   | F     | Schutz gegen Verformung im Betriebsfall  |            |
| 8.2   | F     | Schutz gegen Versagen im Berstfall   |            |
| <b>9</b>  |       | <b>Umgebung</b>  |            |
| 9.1   | W3    | Saubere Umgebung   |            |
| 9.2   | W1    | Trockene Umgebung  |            |
| 9.3   | W3    | Gleichbleibende Lichtverhältnisse  |            |
| 9.4   | W1    | Raumtemperatur   |            |

sehr gut erfüllt  
gut erfüllt  
ausreichend erfüllt  
nicht erfüllt

Tabelle 14: Anforderungsliste mit Bewertung

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Konstruktion gemäß Konzept 2 sehr gut abschneidet und sich die hohe technische Wertigkeit von 94,29 % bestätigt hat.

Im Hinblick auf das Gantt-Diagramm (wirkliche Zeitdauer) in Anhang A zeigt sich, dass das gesamte Projekt eine Woche weniger gedauert hat, als zu Beginn geplant. Während Meilenstein 1 noch genau im Zeitplan realisiert wurde, konnte Meilenstein 2 eine Woche früher erreicht werden. Im dritten Meilenstein konnten zwar die vakuumtechnischen Berechnungen etwas schneller als geplant erledigt werden, jedoch nahm die FEM-Analyse deutlich mehr Zeit (zwei Wochen) in Anspruch als gedacht, da sehr viel ausprobiert wurde, gerade auch in Bezug auf den Versuch, die Singularitäten zu entfernen. Da aber parallel zu Meilenstein 3 bereits mit der Planung und Vorbereitung der Inbetriebnahme begonnen wurde, konnte auch diese ohne zeitliche Verzögerung beendet werden. Gleiches gilt für die Dokumentation im letzten Meilenstein. Die Qualitätskontrolle hat bereits mehrere Wochen früher angefangen als ursprünglich gedacht, da die fertigen Teile über einen größeren Zeitraum aus der Fertigung eingetroffen waren.

Die einzelnen Resultate der Inbetriebnahme zeigen, dass der Versuchsaufbau funktioniert und für eine Messzeit in vollem Umfang bei FLASH geeignet ist. Alle Punkte der Checkliste (Tabelle 12) konnten abgehakt werden, was daher keinen Optimierungsbedarf der Konstruktion zufolge hat. Da bei FLASH strengere Druckbedingungen herrschen, um die Beschleuniger zu schützen, werden dort während der Messzeit deutlich größere und leistungsfähigere Turbomolekularpumpen genutzt. Da der Vakuumwürfel samt Kragen und Auffangeinheit für die geplanten FLASH-Experimente auf eine deutlich größere Kammer umzieht (ohne Gestell), muss das Gestell dieser Arbeit nicht nachgerüstet werden. Meine Ergebnisse zeigen, dass während einer Messzeit bei FLASH (voraussichtlich bereits Ende 2025) das Absorptionsverhalten der Aminosäure Glycin erfolgreich mithilfe dieses Versuchsaufbaus untersucht werden kann.

## Literaturverzeichnis

- [1] DESY, „Deutsches Elektronen-Synchrotron“ [Online]  
Available: [https://www.desy.de/ueber\\_desy/desy/index\\_ger.html](https://www.desy.de/ueber_desy/desy/index_ger.html).  
[Zugriff am 17.06.2024]
- [2] DESY, R. Schaaf und B. Liebaug, „DESY Hamburg“ [Online]  
Available: [https://photon-science.desy.de/about\\_us/how\\_to\\_reach\\_petra\\_iii\\_flash/index\\_eng.html](https://photon-science.desy.de/about_us/how_to_reach_petra_iii_flash/index_eng.html)  
[Zugriff am 17.06.2024]
- [3] DESY, „FLASH“ [Online]  
Available: [https://www.desy.de/forschung/anlagen\\_\\_projekte/flash/index\\_ger.html](https://www.desy.de/forschung/anlagen__projekte/flash/index_ger.html)  
[Zugriff am 17.06.2024]
- [4] Dr. W. Umrath (und weitere), Grundlagen der Vakuumtechnik, Köln: Leybold GmbH, 2016  
  
Available: <https://www.leybold.com/de-de/download-center/download-documents/brochures/general-brochures>
- [5] K. Jousten, Handbuch Vakuumtechnik, Berlin: Springer Vieweg, 2018
- [6] Pfeiffer Vacuum, „Werkstoffe“ [Online]  
Available: <https://know-how-book.pfeiffer-vacuum.com/de/mechanische-komponenten-im-vakuum/werkstoffe/index.html>  
  
[Zugriff am 03.07.2024]
- [7] DESY, „Technische Spezifikation Nr.: Vakuum 005/2008“, 2010
- [8] Courtesy of Dian Diaman (oder „Mit freundlicher Genehmigung von“)
- [9] Stahlportal, „1.4429“ [Online]  
  
Available: <https://www.stahlportal.com/lagervorrat/14429-x2crnimon17-13-3/>  
  
[Zugriff am 03.07.2024]
- [10] Stahlportal, „1.4435“ [Online]  
  
Available: <https://www.stahlportal.com/lagervorrat/14435-x2crnimo18-14-3-loesungsgeglueht-und-abgeschreckt/>  
  
[Zugriff am 03.07.2024]

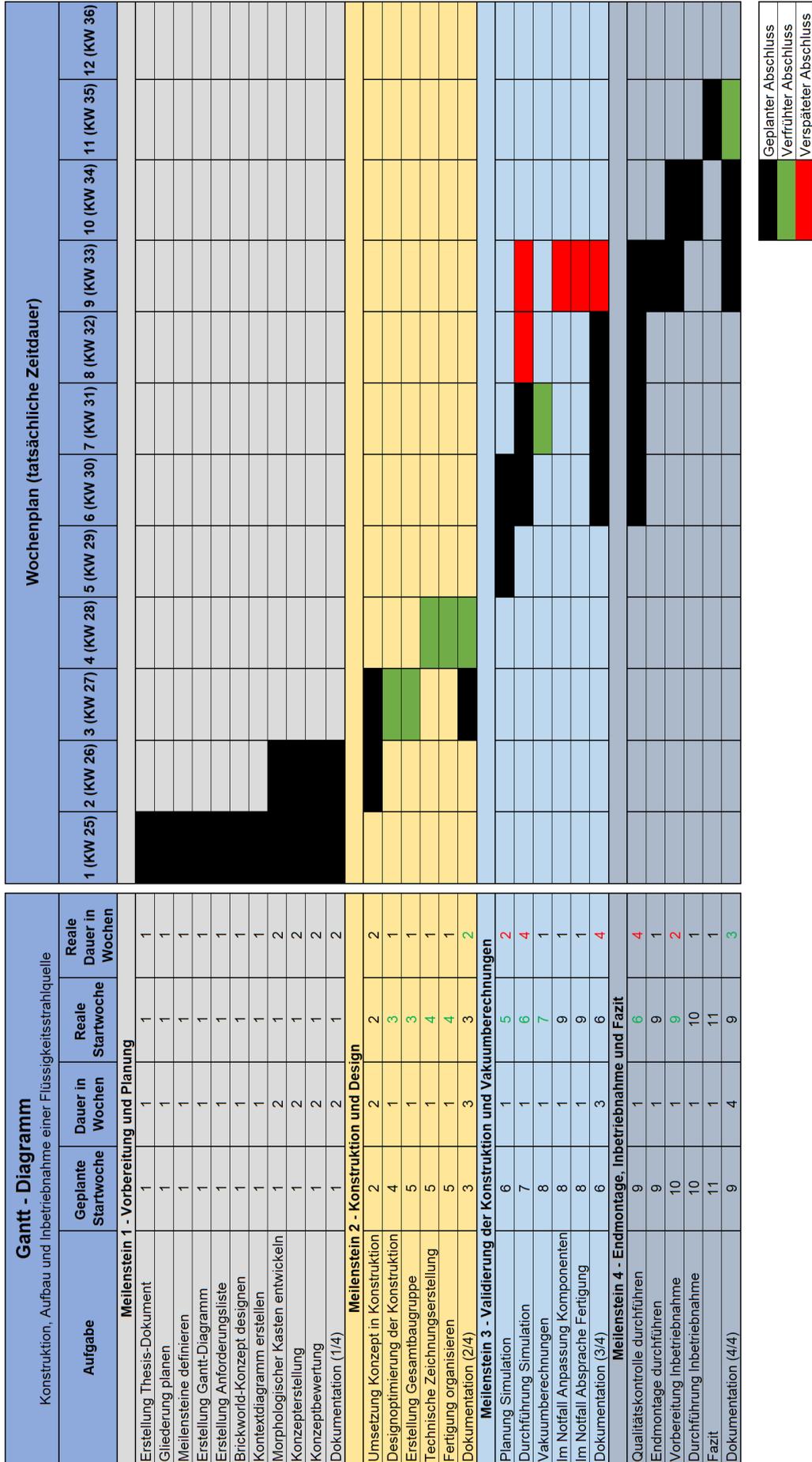
- [11] Wikimedia Commons, Frank, Phrood, Anony, „Elektromagnetisches Spektrum“ [Online]  
Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum\\_de\\_c.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_de_c.svg)  
[Zugriff am 09.07.2024]
- [12] DocCheck Flexikon, „Röntgenstrahlen“ [Online]  
Available: <https://flexikon.doccheck.com/de/R%C3%B6ntgenstrahlen>  
[Zugriff am 09.07.2024]
- [13] LEIFIPhysik, „RÖNTGEN-Strahlung“ [Online]  
Available: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/roentgen-strahlung/grundwissen/erzeugung-von-roentgen-strahlung>  
[Zugriff am 09.07.2024]
- [14] PlastFormance, „Strahlenschutzmaßnahmen“ [Online]  
Available: <https://www.plastformance.com/abschirmung-gammastrahlung>  
[Zugriff am 09.07.2024]
- [15] studyflix, „Photoeffekt“ [Online]  
Available: <https://studyflix.de/ingenieurwissenschaften/photoeffekt-1695>  
[Zugriff am 09.07.2024]
- [16] Chemie.de, „Austrittsarbeit“ [Online]  
Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Austrittsarbeit.html>  
[Zugriff am 09.07.2024]
- [17] Dr. Scholz und Weber, Fotoeffekt, Leibniz Universität Hannover, 2015  
Available: [https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktikumphysik/Versuche/HF/D-Optik/D07\\_HF.pdf](https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktikumphysik/Versuche/HF/D-Optik/D07_HF.pdf)
- [18] Britannica, „photoelectric effect“ [Online]  
Available: <https://www.britannica.com/science/photoelectric-effect>  
[Zugriff am 10.07.2024]

- [19] MKS Newport, „Linear Stage“ [Online]  
Available: <https://www.newport.com/p/9066-X-M>  
[Zugriff am 21.06.2024]
- [20] Spezifikation Skimmer [Online]  
Available: <https://www.beamdynamicsinc.com/specifications>  
[Zugriff am 21.06.2024]
- [21] Chemie.de, „Absorption (Physik)“ [Online]  
Available: [https://www.chemie.de/lexikon/Absorption\\_%28Physik%29.html](https://www.chemie.de/lexikon/Absorption_%28Physik%29.html)  
[Zugriff am 11.07.2024]
- [22] Spektrum.de, „Absorption“ [Online]  
Available: <https://www.spektrum.de/lexikon/optik/absorption/50>  
[Zugriff am 11.07.2024]
- [23] LEIFlphysik, „Spektren“ [Online]  
Available: <https://www.leiflphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/grundwissen/spektren>  
[Zugriff am 11.07.2024]
- [24] Pfeiffer Vacuum GmbH, „Betriebsanleitung HIPACE 700 M Turbopumpe“, Aslar, 2017
- [25] EDWARDS, „Trockenlaufende Vakuumpumpen nXR30i, nXR40i, nXR60i, nXR90i und nXR120i Betriebsanleitung“, Großbritannien, 2022
- [26] Chemie.de, „Thermische Zustandsgleichung idealer Gase“ [Online]  
Available: [https://www.chemie.de/lexikon/Thermische\\_Zustandsgleichung\\_ideal\\_Gase.html](https://www.chemie.de/lexikon/Thermische_Zustandsgleichung_ideal_Gase.html)  
[Zugriff am 02.08.2024]
- [27] Pfeiffer Vacuum GmbH, „HiPace 700 M with TM 700, DN 160 CF-F“ [Online]  
Available: [https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/de/shop/products/PM\\_P04\\_452](https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/de/shop/products/PM_P04_452)  
[Zugriff am 03.08.2024]

- [28] Wikipedia, „Verdampfungsenthalpie“ [Online]  
Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Verdampfungsenthalpie>  
[Zugriff am 06.08.2024]
- [29] Internetchemie.info, „Wasser Dampfdruck-Tabelle“ [Online]  
Available: <https://www.internetchemie.info/chemie-lexikon/daten/w/wasser-dampfdruck.php>  
[Zugriff am 07.08.2024]
- [30] Leichtmetall, „EN AW-5083“ [Online]  
Available: [https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/sites/2/Leichtmetall\\_Datenblatt\\_EN-AW-5083.pdf](https://www.leichtmetall.eu/app/uploads/sites/2/Leichtmetall_Datenblatt_EN-AW-5083.pdf)  
[Zugriff am 09.08.2024]
- [31] R. Gomeringer (und weitere), Tabellenbuch Metall (Auflage 49), Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, S. 234, 2022.
- [32] Leybold, „Thermovac TTR RN“ [Online]  
Available: [https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/52/a4/bb/THERMOVAC-TTR-RN\\_3610-0331-02\\_May2021.pdf](https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/52/a4/bb/THERMOVAC-TTR-RN_3610-0331-02_May2021.pdf)  
[Zugriff am 22.08.2024]
- [33] Leybold, „Vakuum-Messung“ [Online]  
Available: [https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/c6/3a/76/3610019801\\_Sensoren\\_1799101\\_DE.pdf](https://www.leyboldproducts.de/media/pdf/c6/3a/76/3610019801_Sensoren_1799101_DE.pdf)  
[Zugriff am 22.08.2024]
- [34] D. Gross, W. Hauger (und weitere), Technische Mechanik 3, Berlin: Springer Vieweg, 2021
- [35] Team Edelstahl „1.4404“ [Online]  
Available: <https://www.teamedelstahl.de/wp-content/uploads/2021/04/1.4404.pdf>  
[Zugriff am 24.07.2024]

# Anhang

# Anhang A: Gantt-Diagramm



## Anhang B: Auszug Betriebsanleitung HiPace 700 M [24]

## 5 Installation


**WARNUNG**
**Lebensgefahr durch Abreißen der Turbopumpe im Störfall**

Plötzliches Blockieren des Rotors erzeugt gemäß ISO 27892 zerstörende Drehmomente im Berstfall bis zu 6500 Nm. Diese führen bei **nicht** ordnungsgemäßer Befestigung zum Abreißen der Turbopumpe. Die dabei freigesetzte Energie kann die gesamte Pumpe oder Bruchstücke aus deren Inneren durch den Raum schleudern. Es besteht die Gefahr von schwersten Verletzungen, evtl. mit Todesfolge und großen Sachschäden.

→ Installationsanweisungen dieser Betriebsanleitung genau befolgen.

→ Nur zugelassene Originalbauteile von Pfeiffer Vacuum (Zubehör) für die Installation verwenden.

## 13.2 Technische Daten

| Parameter                                       | HiPace <sup>®</sup> 700 M                   | HiPace <sup>®</sup> 700 M                   | HiPace <sup>®</sup> 700 M                   |
|---|---|---|---|
| Anschlussflansch (Eingang)                      | DN 160 ISO-K                                | DN 160 CF-F                                 | DN 160 ISO-F                                |
| Anschlussflansch (Ausgang)                      | DN 25 ISO-KF                                | DN 25 ISO-KF                                | DN 25 ISO-KF                                |
| Saugvermögen für Ar                             | 660 l/s                                     | 660 l/s                                     | 660 l/s                                     |
| Saugvermögen für H <sub>2</sub>                 | 480 l/s                                     | 480 l/s                                     | 480 l/s                                     |
| Saugvermögen für He                             | 600 l/s                                     | 600 l/s                                     | 600 l/s                                     |
| Saugvermögen für N <sub>2</sub>                 | 685 l/s                                     | 685 l/s                                     | 685 l/s                                     |
| Kompressionsverhältnis für Ar                   | > 1 · 10 <sup>11</sup>                      | > 1 · 10 <sup>11</sup>                      | > 1 · 10 <sup>11</sup>                      |
| Kompressionsverhältnis für H <sub>2</sub>       | 2 · 10 <sup>5</sup>                         | 2 · 10 <sup>5</sup>                         | 2 · 10 <sup>5</sup>                         |
| Kompressionsverhältnis für He                   | > 1 · 10 <sup>7</sup>                       | > 1 · 10 <sup>7</sup>                       | > 1 · 10 <sup>7</sup>                       |
| Kompressionsverhältnis für N <sub>2</sub>       | > 1 · 10 <sup>11</sup>                      | > 1 · 10 <sup>11</sup>                      | > 1 · 10 <sup>11</sup>                      |
| Gasdurchsatz bei Enddrehzahl für Ar             | 8 hPa l/s                                   | 8 hPa l/s                                   | 8 hPa l/s                                   |
| Gasdurchsatz bei Enddrehzahl für N <sub>2</sub> | 13 hPa l/s                                  | 13 hPa l/s                                  | 13 hPa l/s                                  |
| Vorvakuum max. für N <sub>2</sub>               | 8 hPa                                       | 8 hPa                                       | 8 hPa                                       |
| Hochlaufzeit                                    | 4 min                                       | 4 min                                       | 4 min                                       |
| Enddruck gemäß PNEUROP                          | < 1 · 10 <sup>-7</sup> hPa                  | < 5 · 10 <sup>-10</sup> hPa                 | < 1 · 10 <sup>-7</sup> hPa                  |
| Drehzahl ± 2 %                                  | 49200 min <sup>-1</sup>                     | 49200 min <sup>-1</sup>                     | 49200 min <sup>-1</sup>                     |
| Drehzahl variabel                               | 20-100 %                                    | 20-100 %                                    | 20-100 %                                    |
| Schalldruckpegel                                | ≤ 45 dB (A)                                 | ≤ 45 dB (A)                                 | ≤ 45 dB (A)                                 |
| Relative Luftfeuchte                            | 5-85, nicht betauend %                      | 5-85, nicht betauend %                      | 5-85, nicht betauend %                      |
| Schutzart                                       | IP 54                                       | IP 54                                       | IP 54                                       |
| Anschlussdruck max. für Flut-/Sperrgasventil    | 1500 hPa                                    | 1500 hPa                                    | 1500 hPa                                    |
| Betriebsspannung                                | 48 (± 5 %) V DC                             | 48 (± 5 %) V DC                             | 48 (± 5 %) V DC                             |
| Betriebsspannung Netzteil                       | 90-265 V AC                                 | 90-265 V AC                                 | 90-265 V AC                                 |
| Bremszeit mit/ohne Fluten                       | < 1 - 10 min                                | < 1 - 10 min                                | < 1 - 10 min                                |
| Integrale Leckrate                              | < 1 · 10 <sup>-8</sup> Pa m <sup>3</sup> /s | < 1 · 10 <sup>-8</sup> Pa m <sup>3</sup> /s | < 1 · 10 <sup>-8</sup> Pa m <sup>3</sup> /s |
| Leistungsaufnahme max.                          | 300 W                                       | 300 W                                       | 300 W                                       |
| Stromaufnahme max.                              | 7,5 A                                       | 7,5 A                                       | 7,5 A                                       |
| Transport-und Lagertemperatur                   | -25-+55 °C                                  | -25-+55 °C                                  | -25-+55 °C                                  |
| Einbaulage                                      | Alllagen                                    | Alllagen                                    | Alllagen                                    |
| Flutanschluss                                   | G 1/8"                                      | G 1/8"                                      | G 1/8"                                      |
| Gewicht   | 15,7 kg                                     | 20,8 kg                                     | 16,4 kg                                     |
| Kühlart, Standard                               | Wasser                                      | Wasser                                      | Wasser                                      |
| Kühlart, optional                               | Luft, Konvektion                            | Luft, Konvektion                            | Luft, Konvektion                            |
| Kühlwassertemperatur                            | 15-35 °C                                    | 15-35 °C                                    | 15-35 °C                                    |
| Kühlwasserverbrauch                             | 80 l/h                                      | 80 l/h                                      | 80 l/h                                      |
| Zulässige eingestrahelte Wärmeleistung max.     | 2,4 W                                       | 2,4 W                                       | 2,4 W                                       |
| Zulässiges Magnetfeld max.                      | 5 mT  | 5 mT  | 5 mT  |
| Schnittstellen                                  | RS-485, Remote                              | RS-485, Remote                              | RS-485, Remote                              |

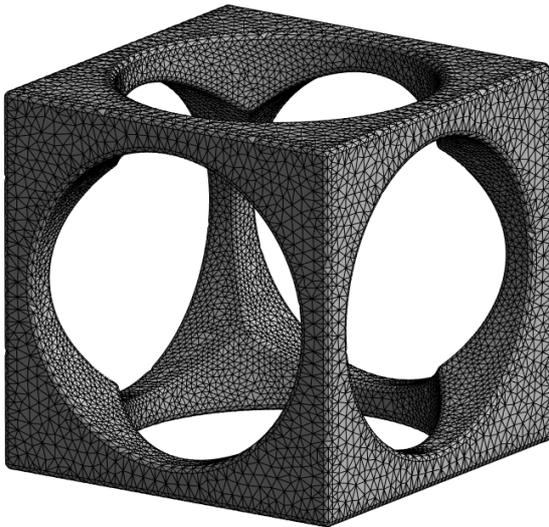
## Anhang C: Auszug Betriebsanleitung Wälzkolbenpumpe XR60i [25]

### 3.2 Leistung

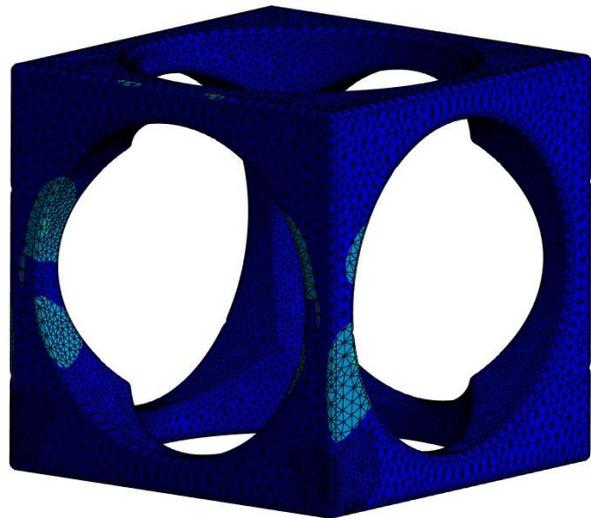
*Tabelle 7 Leistungsdaten*

| Parameter  | Einheiten         | nXR30i                          | nXR40i | nXR60i | nXR90i | nXR120i |
|--|-------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|---------|
| Maximales Saugvermögen *   | m <sup>3</sup> /h | 30                              | 40     | 60     | 90     | 120     |
| Enddruck   | mbar              | 0,03                            |        |        |        |         |
| Maximaler kontinuierlicher Einlassdruck                                      | mbar              | 1013                            |        |        |        | 20      |
| Maximaler kontinuierlicher Abgasdruck  | mbar (g)          | 200                             |        |        |        |         |
| Rückstromschutz  |                   | Konstruktion des Auslassventils |        |        |        |         |
| Maximaler Druckanstieg bei Stopp, kein Einlass- oder Gasballastfluss         | mbar              | 100                             |        |        |        |         |
| Maximal zulässiger Gasballasteinlassdruck (mit montiertem Gasballastadapter) | bar(g)            | 0,5                             |        |        |        |         |
| Gasballastdurchfluss   | l/min             | 25                              |        |        |        |         |
| Maximale Wasserdampf-Pumprate (mit angewendetem Gasballast)                  | kg/h              | 0,3                             |        |        |        |         |

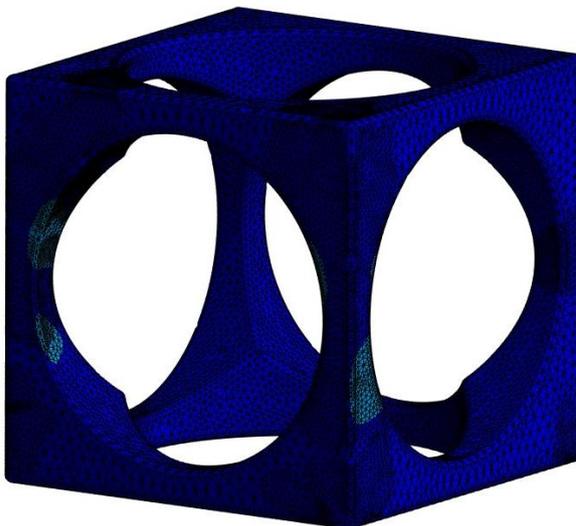
### Anhang D: Netze der FEM-Analyse und Verformungsplot (Vakuumbüchse)



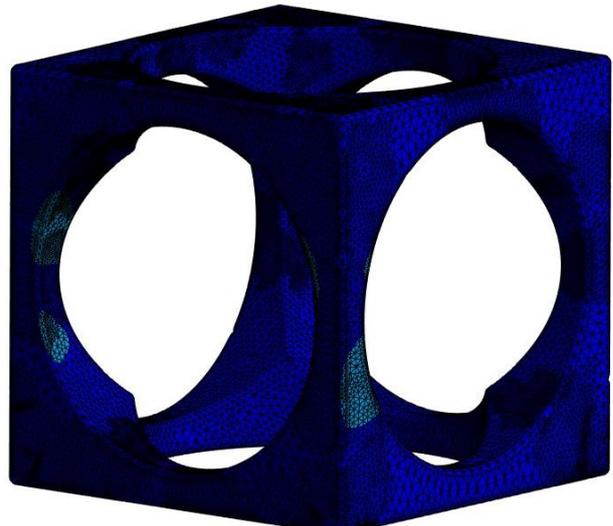
Netz ohne Verfeinerung



Erste Netzverfeinerung

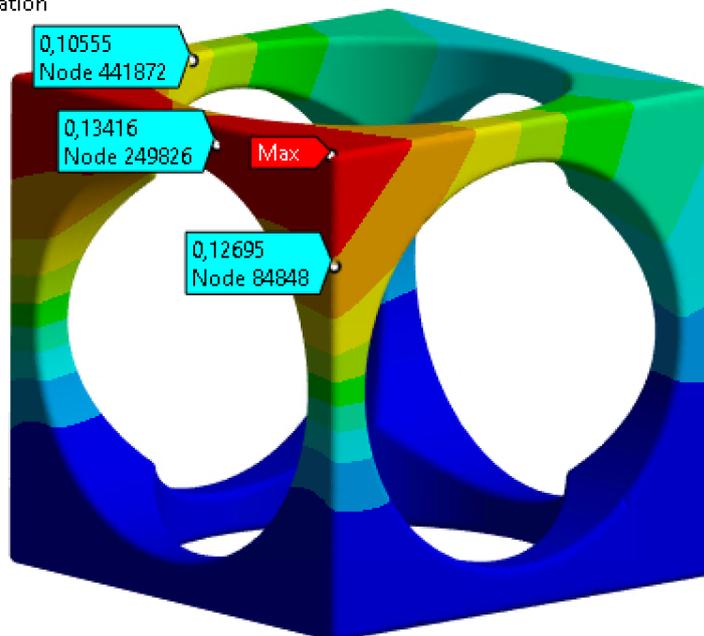
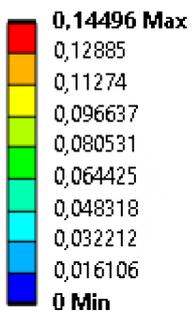


Zweite Netzverfeinerung

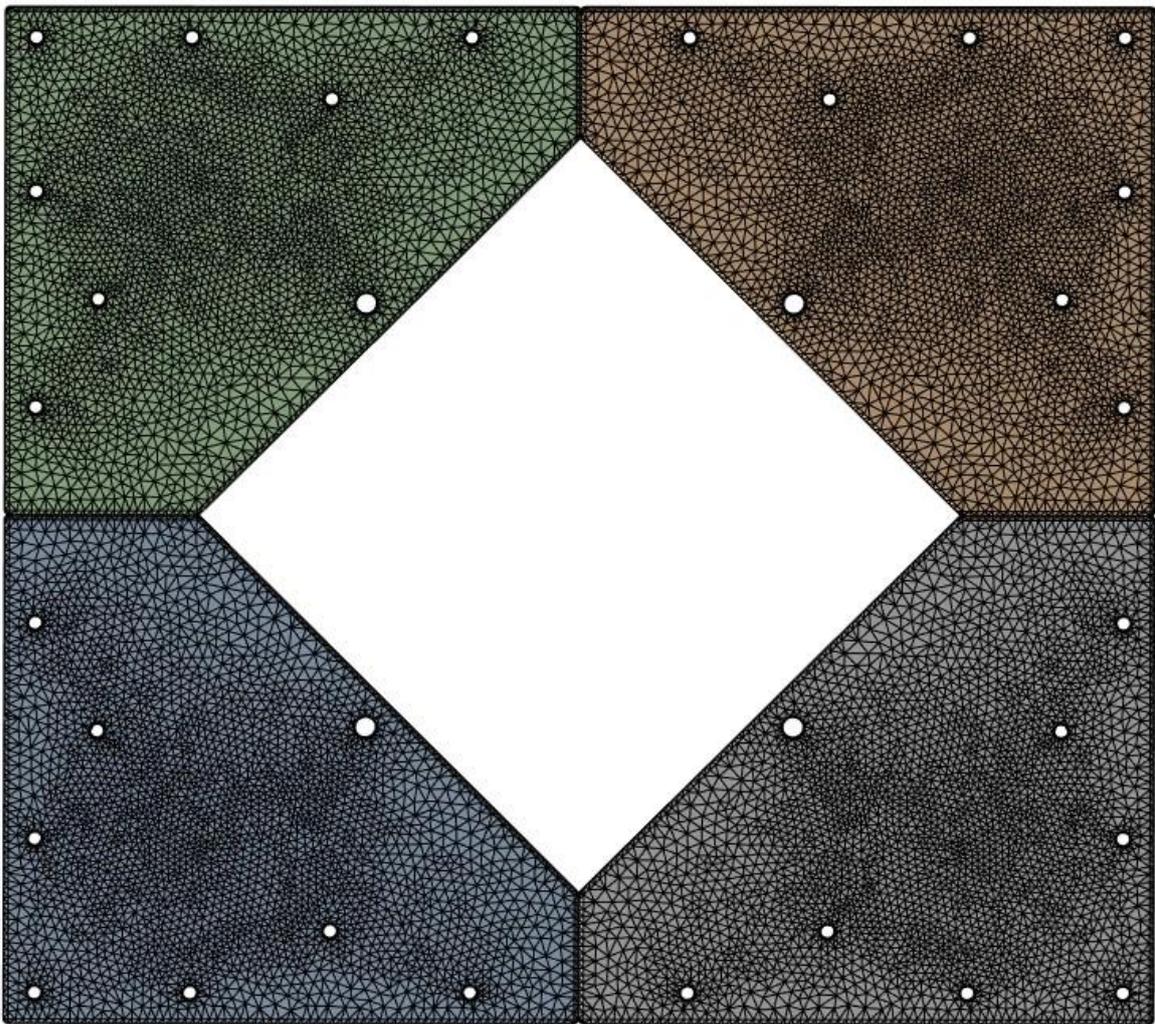


Dritte Netzverfeinerung

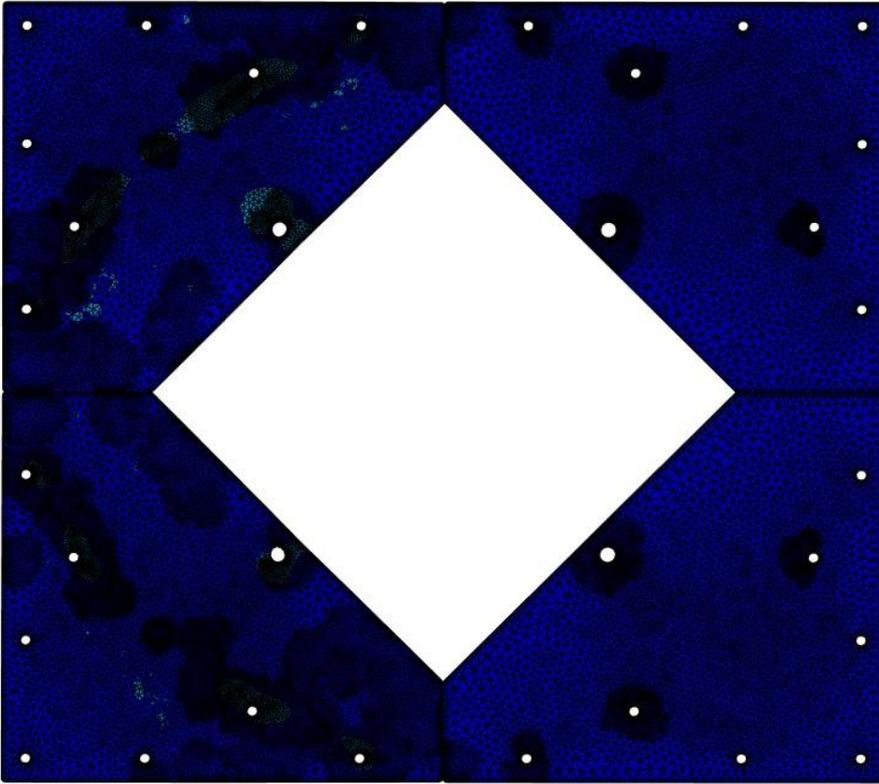
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1 s  
24.08.2024 16:50



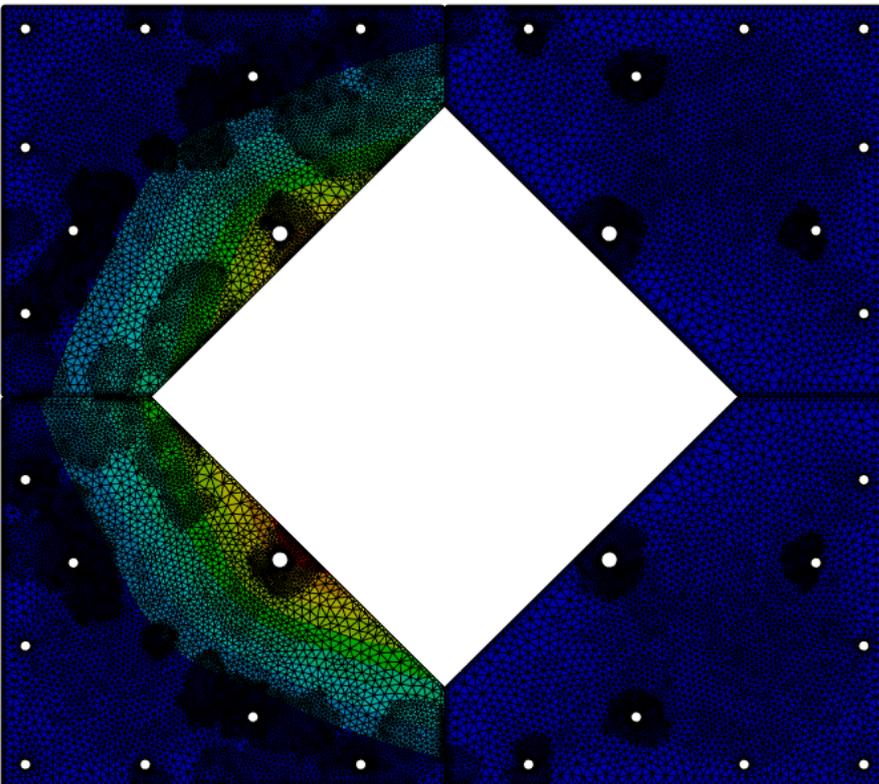
## Anhang E: Netze der FEM-Analyse (Viertelplatten)



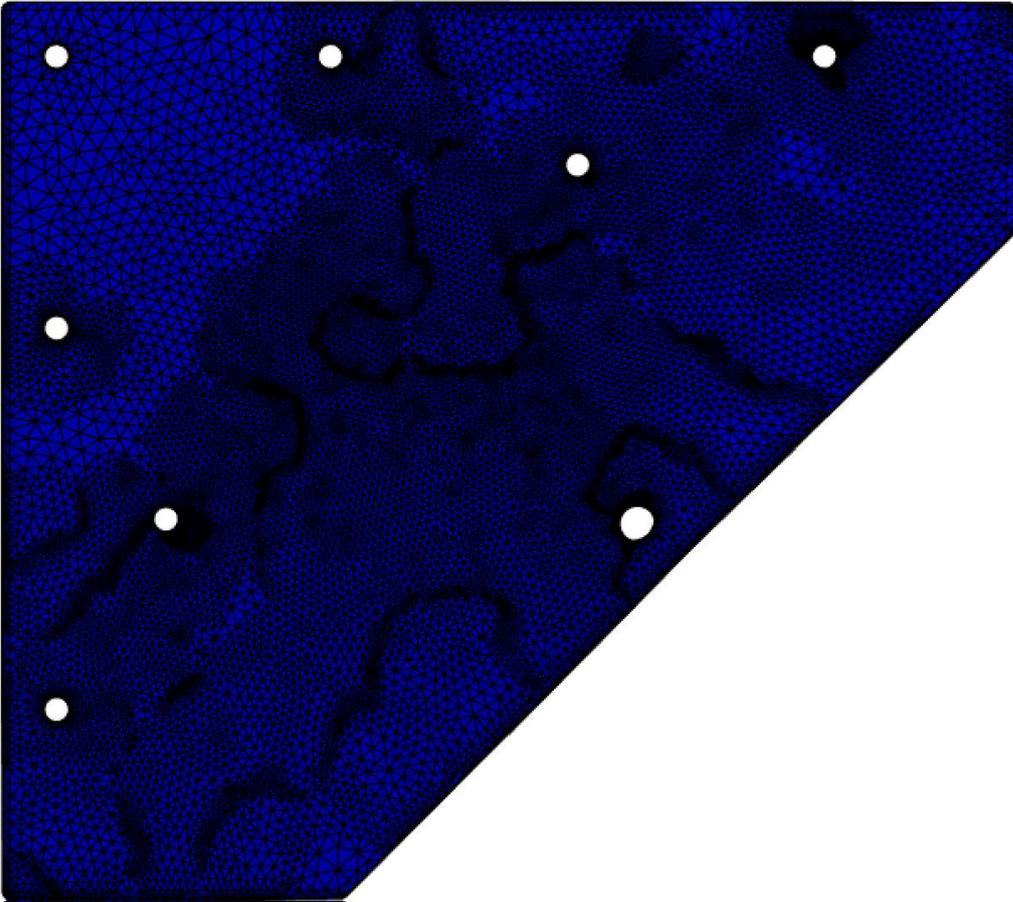
Netz ohne Verfeinerung



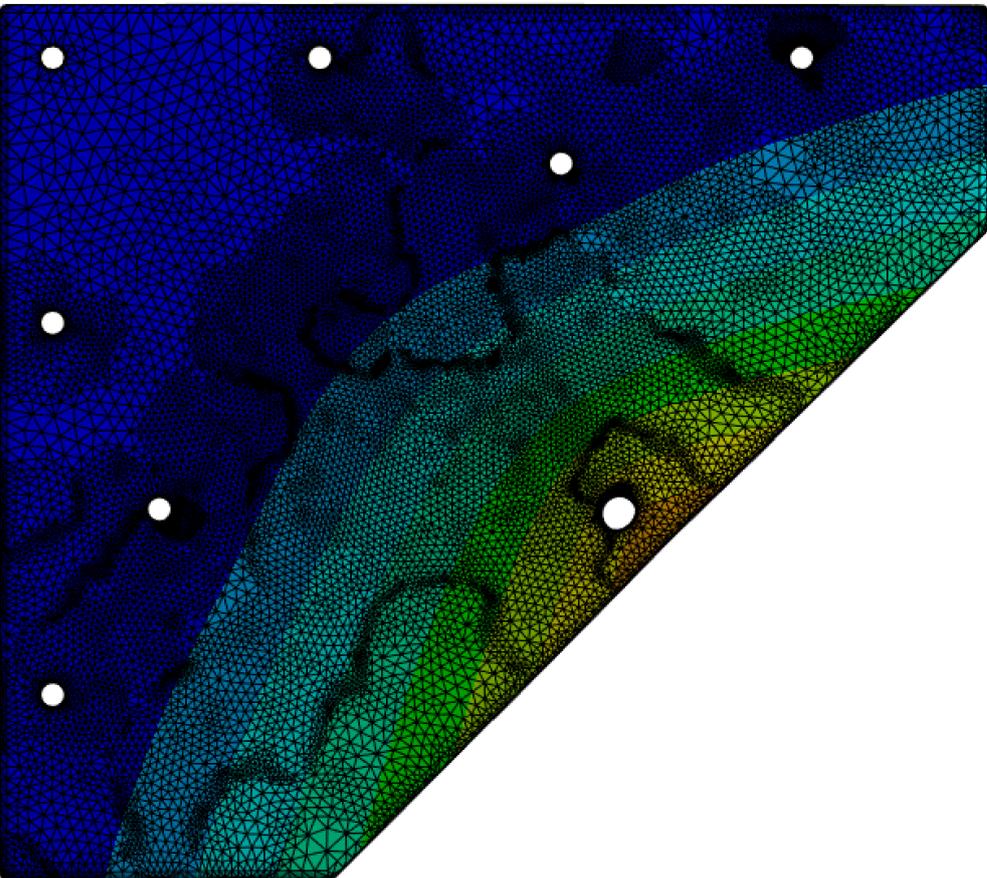
Erste Netzverfeinerung (Vergleichsspannung)



Erste Netzverfeinerung (Totale Verformung)



Ausschnitt zweite Netzverfeinerung (Vergleichsspannung)



Ausschnitt zweite Netzverfeinerung (Totale Verformung)

## Anhang F: Auszug Werkstoffdatenblatt EN AW-5083 (3.3547) [30]

### Physikalische Eigenschaften

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Dichte                    | 2,66 g/cm <sup>3</sup> |
| Erstarrungsbereich        | 574-638 °C             |
| Elektrische Leitfähigkeit | 16-19 MS/m             |
| Wärmeleitfähigkeit        | 110-140 W/(mK)         |
| Elastizitätsmodul         | 71.000 MPa             |
| Spezifische Wärme         | 900 J/(kgK)            |
| Schubmodul                | 26.800 MPa             |

### Wärmebehandlung

#### Weichglühen, Rekristallisationsglühen

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Glühtemperatur        | 380-420 °C |
| Aufheizzeit           | 1-2 h      |
| Abkühlungsbedingungen | 30-50 °C/h |

### Mechanische Kennwerte

| Zustand | R <sub>p0,2</sub> (MPa) | R <sub>m</sub> (MPa) | A (%) |
|---------|-------------------------|----------------------|-------|
| O       | 110                     | 270                  | 10    |
| H111    | 110                     | 270                  | 10    |
| H112    | 125                     | 270                  | 10    |

(alle angegebenen Werte für stranggepresste Rundstangen D < 200 mm)

### Technologische Eigenschaften\*

#### Schweißbarkeit

|                      |   |
|----------------------|---|
| Gas                  | o |
| WIG                  | + |
| MIG                  | + |
| Widerstandsschweißen | + |

#### Oberflächenbehandlung

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Schutzanodisieren     | + |
| Anodisieren dekorativ | o |
| Anstrich, Beschichten | o |

#### Kaltumformbarkeit

|              |               |
|--------------|---------------|
| Biegen       | +             |
| Drücken      | o             |
| Tiefziehen   | + (Zustand O) |
| Drücken      | + (Zustand O) |
| Fließpressen | o             |

#### Korrosionsbeständigkeit

|            |    |
|------------|----|
| Witterung  | ++ |
| Meerwasser | ++ |

#### Lötbarkeit

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| Hartlöten mit / ohne Flussmittel | - |
| Reiblöten                        | o |
| Weichlöten mit Flussmittel       | - |

#### Warmumformbarkeit

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Strangpressen               | - |
| Gesenk- / Freiformschmieden | o |

#### Spanbarkeit

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| Weichgeglüht                         | o  |
| Kaltverfestigt                       | +  |
| Einsatz in Kontakt mit Lebensmitteln | Ja |

\* ++ = sehr gut --- = nicht möglich

## **Anhang G: Bestimmung des Tangentenmoduls $E_t$ von EN AW-5083**

### **Benötigte Material-Kennwerte**

- Elastizitätsmodul  $E = 71.000 \text{ MPa}$
- Dehngrenze  $R_{p0,2} = 110 \text{ MPa}$
- Zugfestigkeit  $R_e = 270 \text{ MPa}$
- Bruchdehnung  $A = 10 \%$  ( $\varepsilon_A = 0,1$ )

### **Berechnung der Dehnung bei Dehngrenze**

$$\varepsilon_{R_{p0,2}} = \frac{R_{p0,2}}{E} = \frac{110 \text{ MPa}}{71.000 \text{ MPa}} = 0,00155$$

### **Berechnung der plastischen Dehnung**

$$\varepsilon_{\text{plastisch}} = \varepsilon_A - \varepsilon_{R_{p0,2}} = 0,1 - 0,00155 = 0,09845$$

### **Berechnung der Spannung im plastischen Bereich**

$$\Delta\sigma = R_e - R_{p0,2} = 270 \text{ MPa} - 110 \text{ MPa} = 160 \text{ MPa}$$

### **Berechnung des Tangentenmoduls**

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\varepsilon_{\text{plastisch}}} = \frac{160 \text{ MPa}}{0,09845} = \mathbf{1.625,19 \text{ MPa}}$$

## Anhang H: Auszug Spezifikation Pirani-Druckmesskopf [32]

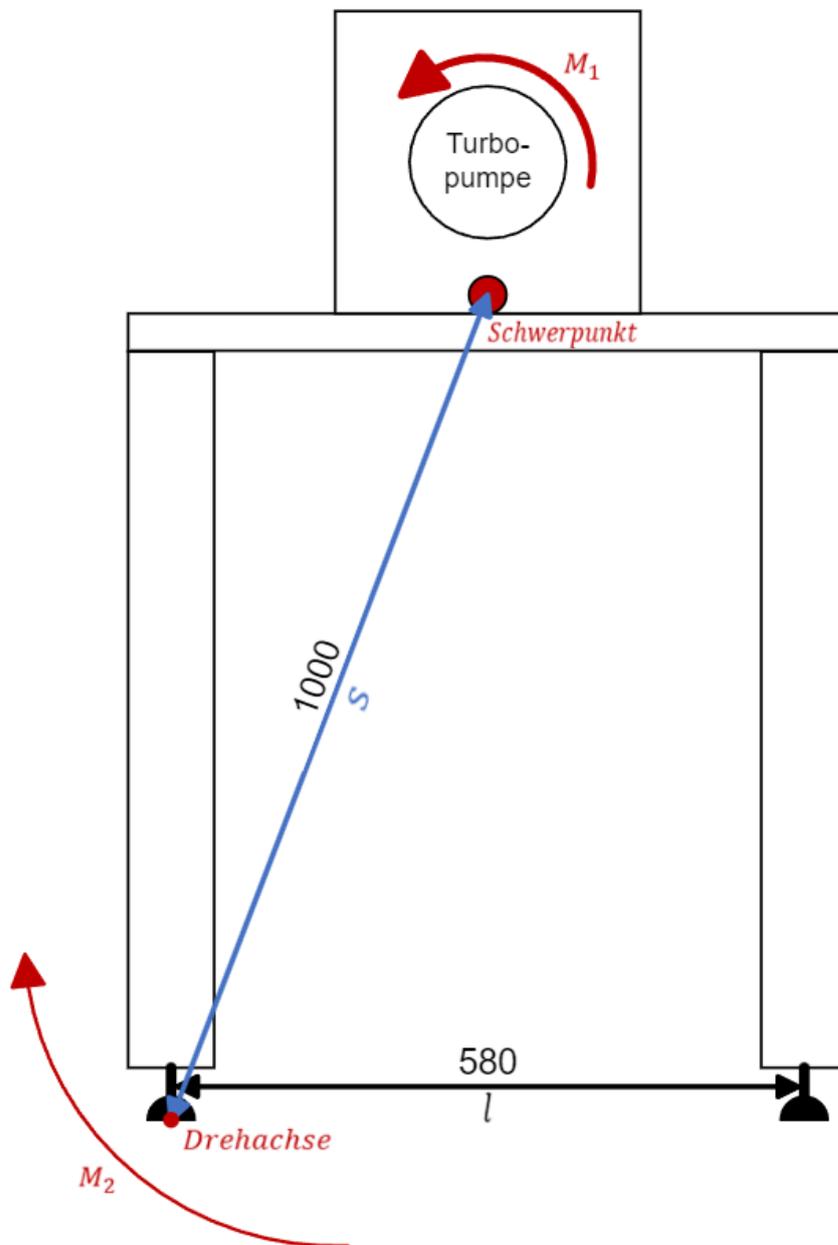
### Technical data

|  | TTR 91 RN/TTR 911 RN   |
|--|--|
| Measurement range                        | Atmosphere to $5e^{-4}$ mbar<br>(Atmosphere to $3.75e^{-4}$ torr)                        |
| Accuracy (mbar)                          | Atmosphere to 100 $\pm$ 50%  |
|  | 100 to $1e^{-3}$ $\pm$ 15%   |
|  | $1e^{-3}$ to $5e^{-4}$ $\pm$ 50%   |
| Repeatability                            | 2% of reading between 100 and $1e^{-3}$ mbar   |
| Supply voltage (V d.c.)                  | 15 to 48   |
| Electrical connection                    | RJ45/9 Pin D-sub   |
| Analogue output<br>(21L***1***)          | 0-10 V   |
| Serial output<br>(21L***5***/21L***0***) | RS232 or RS485   |
| Set point                                | 0, 1, or 2 depending on model  |
| Range                                    | 0.8 to 10.2 V  |
| Relay contact rating                     | 48V dc max, 500mA  |
| Status indicators                        | 360 Bright LED ring  |
| Max cable length (m)                     | 100  |
| Over pressure limit<br>(bar)             | 10   |
| Operating temperature range<br>(°C)      | 5 to 60  |
| Storage temperature<br>(°C)              | -30 to 70  |
| Max bake out<br>(electronics removed)    | 150  |
| Max relative humidity                    | 80% RH up to 31°C decreasing linearly to 50% RH at 40°C and above                        |
| Materials exposed to vacuum              | Tungsten/Rhenium, Stainless steel 316L and 304L, Glass, Ni, NiFe, Stainless steel 302S26 |
| Dead volume (CM <sup>3</sup> )           | 3.3  |
| Weight (DN 16 KF)                        | 130 grams  |
| Protection class                         | 40   |
| Certifications                           | CE, UKCA   |
| Compatible controllers                   | DISPLAY, GRAPHIX, IM540, TURBO.CONTROLi  |

## Anhang I: Auszug Spezifikation Pirani-Heißkathode-Druckmesskopf [33]

| Technische Daten                          |      | IONIVAC  |           |
|---|------|--|-----------|
| Vakuum Transmitter                        |      | ITR 90   | ITR 200 S |
| Messprinzip                               |      | Heißkathode und Pirani   |           |
| Mess- / Anzeigebereich                    | mbar | 5 · 10 <sup>-10</sup> - 1000   |           |
| Messunsicherheit                          | mbar | 15% bei 1 · 10 <sup>-8</sup> - 1 · 10 <sup>-2</sup> mbar<br>> 15% bei 10 <sup>-1</sup> - 1000 mbar |           |
| Statusanzeige                             |      | -  |           |
| Max. Ausheiztemperatur                    | °C   | 150<br>mit Ausheiz-<br>verlängerung  | 80        |
| Überdruckfestigkeit                       | bar  | 2  |           |
| Schutzklasse                              | IP   | 30   |           |
| Schaltpunkte                              |      | -  | 1 - 2     |
| Max. Kabellänge<br>Elektrischer Anschluss | m    | 100 (Typ C)<br>Sub-D, 15polig male   |           |
| Schnittstellen                            |      | RS 232 C<br>Profibus   |           |
| Anzeige- und<br>Betriebsgeräte            |      | GRAPHIX Serie  |           |

## Anhang J: Ergänzende Skizze zur Berechnung des Drehimpulses



## Anhang K: Auszug Werkstoffdatenblatt AISI 316L (1.4404) [35]

**1.4404 Werkstoff Datenblatt**

X2CrNiMo17-12-2

Austenitischer korrosionsbeständiger Edelstahl

**Kurzbeschreibung**

Der Werkstoff 1.4404 oder AISI 316L ist einer der am häufigsten eingesetzten korrosionsbeständigen Edelstähle. Bedingt durch den 2 – 2,5% Molybdän-Zusatz bietet dieser Werkstoff eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit als 1.4301/1.4307. Durch seinen geringeren Kohlenstoffgehalt im Vergleich zu 1.4401 zeichnet sich der Werkstoff 1.4404 außerdem durch gute Verarbeitungseigenschaften aus.

**Normen und Bezeichnungen**

|      |                 |
|------|-----------------|
| EN   | 1.4404          |
| DIN  | X2CrNiMo17-12-2 |
| AISI | 316L            |
| UNS  | S31603          |

**Chemische Zusammensetzung**

|      | C<br>(Kohlenstoff) | Mn<br>(Mangan) | Si<br>(Silicium) | P<br>(Phosphor) | S<br>(Schwefel) | Cr<br>(Chrom) | Ni<br>(Nickel) | Mo<br>(Molybdän) | N<br>(Stickstoff) |
|------|--------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|------------------|-------------------|
| min. | -                  | -              | -                | -               | -               | 16,5          | 10,0           | 2,0              | -                 |
| max. | 0,03               | 2,0            | 1,0              | 0,045           | 0,030           | 18,5          | 13,0           | 2,5              | 0,1               |

**Allgemeine Eigenschaften**

|                           |               |
|---------------------------|---------------|
| Korrosionsbeständigkeit   | sehr gut      |
| Mechanische Eigenschaften | mittel        |
| Schmiedbarkeit            | gut           |
| Schweißbarkeit            | ausgezeichnet |
| Zerspanbarkeit            | mittel        |

**Besondere Eigenschaften**

Polierfähig  
Für Tieftemperaturen geeignet  
Bis 550°C verwendbar  
Im Dauerbetrieb bis 300°C beständig gegen interkristalline Korrosion

**Korrosionsbeständigkeit**

In natürlichen Umweltmedien, in Medien mit mäßiger Chlor- und Salzkonzentration sowie im Bereich der Nahrungsmittelindustrie zeichnet sich der Werkstoff 1.4404 durch eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit aus. Der Werkstoff 1.4404 ist beständig gegen interkristalline Korrosion, was auf seinen niedrigen Kohlenstoffgehalt zurückzuführen ist. Diese Güte ist nicht meerwasserbeständig. (PREN = 23,1 – 28,5)

**Mechanische Eigenschaften bei 20°C**

| Härte<br>HB | Dehngrenze<br>R <sub>p0,2</sub><br>N / mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit<br>R <sub>m</sub><br>N / mm <sup>2</sup> | Dehnung<br>A <sub>5,65</sub> | Elastizitätsmodul<br>kN / mm <sup>2</sup> |
|-------------|--|--|------------------------------|---|
| ≤ 215       | ≥ 200  | 500 - 700  | ≥ 40%                        | 200                                       |

## Anhang L: Eidesstattliche Erklärung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

#### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Brockmann

Vorname: Marcel

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konstruktion, Aufbau und Inbetriebnahme einer Flüssigkeitsstrahlquelle in einer Vakuumkammer

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

04.09.2024

Datum

[Redacted Signature]  
Unterschrift im Original