

Fachhochschule Aachen

Campus Jülich

Fachbereich 10: Energietechnik

B. Eng. Maschinenbau PLuS

Konzeptionelle Ausarbeitung eines Analyseinstruments für neutroneninduzierte Gammastrahlung

Bachelorarbeit von Maxim Marzen

Jülich, 25.08.2021

Diese Arbeit ist von mir selbstständig angefertigt und verfasst. Es sind keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt worden.

Ort und Datum

Maxim Marzen

Die Arbeit wurde betreut von:

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Butzek
2. Prüfer: Dr. Johannes Baggemann

INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Kurzfassung	ix
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung der Neutronenforschung	1
1.2 Das HBS-Projekt	2
1.3 Der HBS-Prototyp	3
1.4 Funktionsweise eines PGNAA-Instruments	4
1.4.1 Neutronen	4
1.4.2 Kernreaktionen	5
1.4.3 PGNAA	5
1.4.4 DGNAA	6
2 Ein PGNAA-Instrument für den HBS-Prototyp	9
2.1 Geometrische Gegebenheiten	9
2.2 Anforderungsliste	9
3 Konzeptionierung und Konstruktionsoptionen	15
3.1 Probenkammer und Probenhalterkammer	15
3.1.1 Probenkammer	15
3.1.2 Probenhalterkammer	17
3.1.3 Technische Realisierung der Kammern	20
3.2 Abschirmung	25
3.2.1 Neutronenabschirmung	25

3.2.2	Abschirmung der induzierten Gammastrahlung	29
3.2.3	Beamstop	34
3.3	Probenhalter	35
3.3.1	Bewegungseinheit	36
3.3.2	Probentisch	38
3.4	Gamma-Detektor	39
3.4.1	Halter für Detektor und Dewar	41
3.4.2	Kollimator	41
4	Diskussion und Ausblick	43
4.1	Revision der Abschirmdicken	43
4.2	Vakuumkammer	44
4.2.1	Gestell	47
4.3	Bedienbarkeit und Sicherheit	48
4.3.1	Bedienbarkeit	48
4.3.2	Sicherheit	49
5	Anhang	55

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Grundriss des NESP am IKP mit dem HBS-Prototyp	3
1.2	Gegenüberstellung PGNAA und DGNAA [5]	7
2.1	Ausrichtung des Detektors zur Probe und zum Neutronenstrahl .	10
3.1	Zwei Optionen für die Manipulation der Probe	17
3.2	Vakuum-Membranbalg [6]	18
3.3	Vakuum-Rotationsdurchführung [8]	19
3.4	6-Wege Vakuumwürfel [9]	20
3.5	CAD-Modell der Vakuumkammern im Halbschnitt	22
3.6	Gegenüberstellung der Vakuumkammer-Dummys	23
3.7	Ergebnisse der FEM-Simulation des unberippten Kammerdummys	24
3.8	Ergebnisse der FEM-Simulation des berippten Kammerdummys .	24
3.9	Lithiumabsorber innerhalb der Probenkammer (Halbschnitt) . . .	28
3.10	Lithiumabsorber-Ringe innerhalb der Probenkammer (Halbschnitt)	29
3.11	Bleibausteine [19]	32
3.12	Schikane der Bleisegmente	33
3.13	Beispiel eines Hexapods [18]	36
3.14	3-Achsen Bewegungseinheit	38
3.15	Probentisch aus Teflon (gelb) und Aluminium	40
3.16	Kollimatorringe innerhalb der Detektorabschirmung (Halbschnitt)	42
4.1	Loch in der Kammerwand	47

TABELLENVERZEICHNIS

1.1	Klassifizierung von Neutronen nach E. B. Paul [4]	4
2.1	Funktionale Anforderungen	11
2.2	Randbedingungen	12
3.1	Mittlere freie Weglängen von freien Neutronen in verschiedenen Medien [1]	16
3.2	Eigenschaften von Neutronenabsorbern [1]	25

KURZFASSUNG

Neutronen sind für die Untersuchung von Materie ein wichtiges Werkzeug. In einer Vielzahl an analytischen Verfahren können so verschiedenste Objekte wie biologische Proben, technische Werkstücke oder historische Artefakte auf ihre Zusammensetzung und Beschaffenheit untersucht werden. Wegen ihrer physikalischen Eigenschaften erfolgt die Analyse von Objekten mittels Neutronen zerstörungsfrei. Für Werkstücke handelt es sich dabei lediglich um einen wirtschaftlichen Faktor, für biologische Proben oder historische Artefakte könnte die Untersuchung mittels Neutronen der einzige Weg sein, die Zusammensetzung zu ergründen.

Ein analytisches Verfahren ist die Prompte-Gamma-Neutronen-Aktivierungs-Analyse (PGNAA). Dabei wird die zu untersuchende Materie mit Neutronen eines gewissen Energieniveaus bestrahlt und die dabei frei werdende Gamma-Strahlung gemessen. Da jedes Nuklid bei dem sogenannten Neutroneneinfang Gammastrahlung einer spezifischen Wellenlänge emittiert und Neutronen eine relevante Eindringtiefe haben, können anhand des aufgenommenen Gammaspektrums Rückschlüsse über die Zusammensetzung der bestrahlten Probe gezogen werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein solches PGNAA-Instrument für den Prototyp der HBS-Neutronenquelle des Jülich Centre for Neutron Science (JCNS) am Forschungszentrum Jülich zu konzeptionieren. Unter Berücksichtigung der Anforderungen und Randbedingungen wird für jede Komponente des Instruments ein oder mehrere Entwicklungsansätze vorgestellt. Zu den Komponenten zählen die Proben- und Probenhalterkammer, die Abschirmung für Gamma- und Neutronenstrahlung, der Probenhalter, der Kollimator, der Gammadetektor und das Gestell.

Besonderes Augenmerk wird auf die mechanischen Eigenschaften und auf die Wahl von geeigneten Werkstoffen gelegt. Die Werkstoffwahl ist in Anbetracht

der vorhandenen Neutronen- und Gammastrahlung ein wichtiger Gesichtspunkt. Es wird stets versucht, eine Emission besagter Strahlungen innerhalb des Instruments und nach außen zu verhindern, sodass der Gammadetektor sowie andere Instrumente im Raum nicht beeinflusst werden. Zudem soll möglichst wenig Materie durch die Neutronenstrahlung aktiviert werden. Das ist vor allem innerhalb der Abschirmung wichtig, da eine Aktivierung und die damit einhergehende Strahlung den Gammadetektor beeinflussen würde. Da die Probe innerhalb der Probenkammer bewegt wird, müssen verschiedene Methoden aufgezeigt werden, um dies zu realisieren. Dabei wird zwischen der Bewegung innerhalb der Kammer und der Bewegung durch die Kammerwände unterschieden. Zudem soll eine benutzerfreundliche und sichere Bedienung des Instruments gewährleistet werden.

1. EINLEITUNG

1.1 Bedeutung der Neutronenforschung

“Die Lösung der großen Herausforderungen der Menschheit ist weitgehend vom Fortschritt der Materialforschung im Bereich der natürlichen und künstlichen Materie abhängig. Der Erfolg hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit leistungstarker Methoden zur Untersuchung der Struktur und den Eigenschaften von Materie ab.“ Ein mächtiges Werkzeug zur Untersuchung von Materie sind Neutronen. In vielen Disziplinen wie Medizin, Geowissenschaften, Umweltforschung, Materialwissenschaften und Informationstechnologie werden Neutronen verwendet, um unbekannte Sachverhalte zu ergründen und zu verstehen. [2]

Mit der PGNAA können Spurenelemente bis zum ppb-Bereich (Teile pro Millionarde) untersucht werden. Das hilft dabei, die Umwelt zu untersuchen und gibt Aufschluss darüber, welchen Einfluss die Menschheit auf die Natur hat. Es konnte mittels einer PGNAA der Einfluss von Holzkohleöfen auf die Umwelt charakterisiert werden. So wurde festgestellt, dass Flechten, welche Nährstoffe ausschließlich über die Luft aufnehmen, im Winter eine höhere Konzentration von Schwefel und Phosphor enthalten, als in anderen Jahreszeiten. Daraus lässt sich schließen, dass die Emissionen von Holzkohleöfen direkten Einfluss auf Organismen in näherer Umgebung haben können. [2] [3]

Neutronenquellen sind aufgrund der Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten weltweit zu finden. Zu den in Europa relevanten Quellen gehört das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) in Garching, das Institut Laue-Langevin (ILL) in Frankreich, die ISIS Neutronen- und Muonenquelle in Großbritannien, das Budapest Neutron Center (BNC), das Paul Scherrer Institut (PSI) in der Schweiz und die

im Bau befindliche European Spallation Source (ESS) in Schweden. Außerhalb Europas gibts es beispielweise die US-Amerikanischen Neutronenquellen SNS und NIST und den japanischen Neutronen-Forschungskomplex J-PARC. In Europa befindet sich die Forschungslandschaft rund um Neutronen im Umbruch. Viele der älteren, reaktorbasierten Neutronenquellen wurden oder werden in naher Zukunft abgeschaltet. [12] Deswegen müssen mögliche Alternativen zur Neutronenerzeugung untersucht werden.

1.2 Das HBS-Projekt

In Europa sinkt die Anzahl der Forschungsreaktoren stetig und damit auch die Menge an verfügbarer Strahlzeit. Daher entwickelt das JCNS im Rahmen des HBS-Projekts (High Brilliance Neutron Source) einen neuartigen Typ von Neutronenquelle. Ziel ist die Entwicklung einer kompakten beschleunigerbasierten Neutronenquelle (compact accelerator based neutron source, CANS). Anders als reaktorbasierte Neutronenquellen oder Spallationsquellen generiert die geplante Quelle die Neutronen durch Kernreaktionen in einem Target aus dem Metall Tantal. Um die Kernreaktionen im Target zu induzieren, werden beschleunigte Protonen benötigt. Diese Protonen stammen aus einer gepulsten Ionenquelle, die anschließend durch einen Linearen Beschleuniger (LINAC) bis zu einer Energie von 70 MeV beschleunigt werden. Im Referenzdesign ist die Targetkühlung auf 100 kW Wärmeleistung ausgelegt. Somit kann mit einem mittleren Protonenstrom von bis zu 1,43 mA gearbeitet werden. Dies entspricht einem Peakstrom von 71,5 mA bei einem geplanten Duty-Cycle von 2% pro Targetstation. Unter Duty-Cycle, oder auch Tastgrad genannt, ist bei einer periodischen Abfolge von Impulsen das Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer gemeint. Mittels Moderatoren werden dann die gewünschten Neutronenenergien für die Instrumente bereitgestellt. Eine Targetstation wird mehrere Instrumente mit Neutronen bedienen können.

1.3 Der HBS-Prototyp

Um die technische Machbarkeit des HBS-Projekts zu demonstrieren, wird in Kooperation mit dem Institut für Kernphysik (IKP) und dem Zentralinstitut für Engineering und Analytics (ZEA-1) im Forschungszentrum Jülich ein Prototyp der beschleunigerbasierten Neutronenquelle in Form einer Target-Moderator-Reflektor-Einheit (TMR) errichtet. Der Aufbauort für die TMR-Einheit wird der Niederenergie-Bestrahlungsplatz (NESP) am IKP sein. Die Abbildung 1.1 stellt den Grundriss vom NESP im IKP dar. Die TMR-Einheit befindet sich mittig im Bild (rot). Schräg von unten kommend ist die Beamline des Protonenbeschleunigers (lila) und rechts von der TMR-Einheit liegen drei Instrumente (grün), von denen das unterste Instrument das PGNAA-Instrument (blau) darstellt. Die Instrumente werden jeweils durch einen Neutronenleiter mit der TMR-Einheit verbunden.

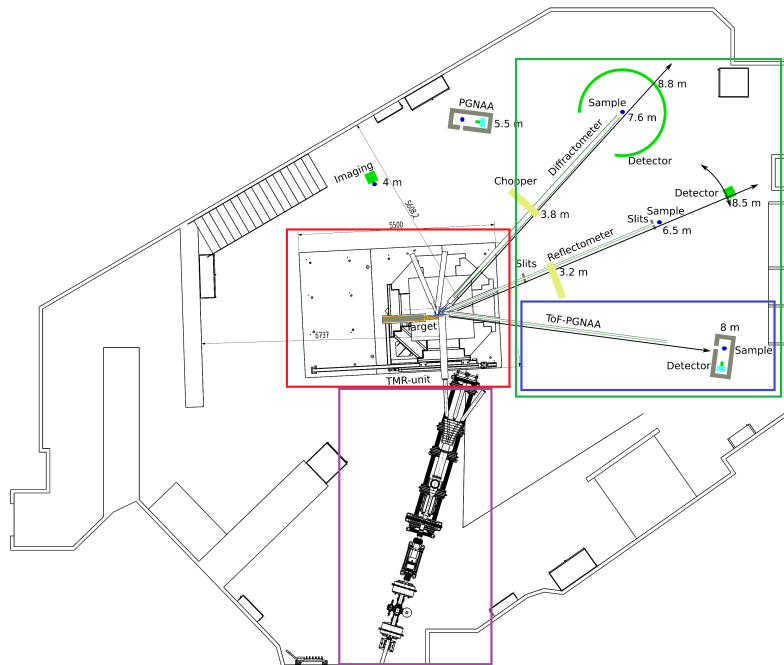


Abbildung 1.1: Grundriss des NESP am IKP mit dem HBS-Prototyp

Der Prototyp wird mit dem JULIC-Zyklotron betrieben, welcher einen Peakstrom an Protonen von bis zu 10 μA und eine Energie von 45 MeV bereitstellen kann. Das entspricht einer CW-Leistung (Continuous Wave) von 450 W. Die Quelle wird voraussichtlich in einem Duty-Cycle von 4% betrieben, was einer gemittelten Leistung von 18W entspricht. Es können Neutronen von wenigen meV bis hin zu 80 eV erzeugt werden.

1.4 Funktionsweise eines PGNAA-Instruments

1.4.1 Neutronen

Neutronen sind ungeladene Bestandteile eines Atomkerns. Sie haben eine Masse von $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und bei einer Temperatur von 293,16 K, was der Raumtemperatur entspricht, haben sie eine Energie von 25,26 meV und eine Geschwindigkeit von $2200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Neutronen dieser Energie werden auch thermische Neutronen genannt. Für alle auftretenden Energien in Neutronen gibt es eine Klassifizierung, welche in Tab. 1.1 dargestellt ist. Die Grenzen zwischen den Klassifizierungen gelten als fließend und können je nach Quellenlage voneinander abweichen.

Klassifizierung	kinetische Energie	Geschwindigkeit	Temperatur
Langsame Neutronen	bis 100 eV	bis 150 km/s	bis 800000 K
Ultrakalte Neutronen (UCN)	unter 0,05 bis 0,23 μeV	unter 3,2 bis 6,8 m/s	unter 0,4 bis 1,8 mK
Sehr kalte Neutronen (VCN)	$\sim 10\text{-}4 \text{ eV}$	$\sim 150 \text{ m/s}$	$\sim 1 \text{ K}$
Kalte Neutronen	unter 0,025 eV	unter 2,2 km/s	bis 200 K
Thermische Neutronen	etwa 0,025 eV	etwa 2,2 km/s	etwa 200 K
Epithermische Neutronen	0,025 bis 1 eV	2,2 bis 15 km/s	200 bis 8000 K
Resonanzneutronen	1 bis 100 eV	15 bis 150 km/s	8000 bis 800000 K
Mittelschnelle Neutronen	100 eV bis 500 keV	150 bis 10000 km/s	800000 K bis 4 Mrd. K
Schnelle Neutronen	ab 500 keV	ab 10000 km/s	über 4 Mrd. K

Tabelle 1.1: Klassifizierung von Neutronen nach E. B. Paul [4]

Aufgrund ihrer fehlenden elektrischen Ladung haben Neutronen die Eigenschaft, dass sie nicht von der Coulombbarriere eines Atoms beeinflusst werden.

Dadurch können Neutronen mit beliebigem Energieniveau jene Barriere überwinden und Kernreaktionen eingehen.

1.4.2 Kernreaktionen

Neutronen können eine Reihe von Kernreaktionen in Atomen induzieren. Dazu zählen die elastische Streuung ((n,n)-Reaktion), die inelastische Streuung ((n,n' γ)-Reaktion) und die Absorption. Zur Absorption zählen beispielsweise (n,p)-, (n, α)- oder (n, γ)-Reaktionen. In der Radiochemie werden Kernreaktionen üblicherweise mit folgender Notation

$${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H} \tag{1.1}$$

beschrieben. Links neben der Klammer steht der Eduktkern, rechts neben der Klammer der Produktkern. Innerhalb der Klammer steht zuerst das eintreffende Teilchen und dann, durch ein Komma getrennt, das austretende Teilchen. Ein- und austretendes Teilchen kann beispielsweise ein Neutron (n), Proton (p), Triton (t), Alpha-Teilchen (α) oder Gamma-Teilchen (γ) sein.

Ein wichtiges Maß für die Wahrscheinlichkeit von Kernreaktionen ist der Wirkungsquerschnitt, insbesondere der Einfangsquerschnitt. Der Einfangsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom ein Neutron einer gewissen Energie aufnimmt. Die Einheit ist in diesem Fall Barns [b] was 10^{-28} m^2 entspricht. Je niedriger der Einfangsquerschnitt, desto geringer die Wahrscheinlichkeit, dass Neutronen eingefangen werden.

1.4.3 PGNAA

Die PGNAA bedient sich maßgeblich der (n, γ)-Reaktion mit kalten und thermischen Neutronen. Diese Reaktion wird auch Neutroneneinfang genannt, da der Eduktkern das Neutron aufnimmt und zunächst einen Compoundkern bildet.

Dieser Compoundkern befindet sich in einem angeregten Zustand, dessen Energie sich aus der Bindungsenergie und der kinetischen Energie des Neutrons zusammensetzt. Innerhalb von Sekundenbruchteilen erreicht der Compoundkern wieder seinen Grundzustand und emittiert dabei Gammastrahlen. Diese Gammastrahlen werden dann als “prompt“ bezeichnet, wenn die Zerfallszeit wesentlich kürzer ist, als das zeitliche Auflösungsvermögen des Detektors. Zudem ist das Verfahren dadurch charakterisiert, dass die prompte Gammastrahlung während der Neutronenbestrahlung gemessen wird.

Mit der PGNAA können flüssige, feste und gasförmige Proben untersucht werden. Es können alle Elemente bis auf Helium nachgewiesen werden, da jedes Element, außer Helium, prompte Gammastrahlen emittiert. Die PGNAA ist vor allem nützlich um leichte Elemente zu untersuchen, da es dafür nur wenige alternative Methoden gibt. Wasserstoff kann in jeder Probe bis zu einer Konzentration im ppm-Bereich (Teile pro Millionen) und niedriger festgestellt werden. Des weiteren ist die Methode sehr sensitiv auf Elemente wie Bor, Kadmium, Quecksilber und seltene Erden und kann diese bis zu Konzentrationen im ppb-Bereich nachweisen. [1]

1.4.4 DGNAA

Die Delayed-Neutron-Activation-Analysis (DGNAA) unterscheidet sich von der PGNAA im wesentlichen durch die entstehenden Radioisotope. Jene Radioisotope haben Halbwertszeiten von Sekundenbruchteilen bis zu mehreren Tagen. Aus diesem Grund findet die Messung der Gammastrahlen erst nach einer gewissen Abklingzeit statt. Zur Untersuchung leichter Elemente ist die DGNAA weniger geeignet, da sie sich nicht gut aktivieren lassen. Jedoch ist die Methode gut geeignet, um Natrium, Mangan, Scandium, Kobalt, Gold und seltene Erden bis zum ppb-Bereich zu detektieren. In Abb. 1.2 sind die Verfahren PGNAA und DGNAA mit den jeweils auftretenden Kernreaktionen gegenübergestellt.

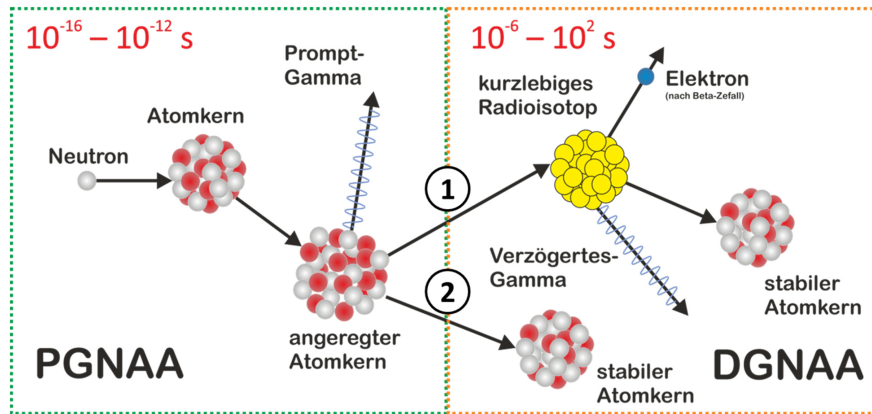


Abbildung 1.2: Gegenüberstellung PGNAA und DGNAA [5]

2. EIN PGNAA-INSTRUMENT FÜR DEN HBS-PROTOTYP

2.1 Geometrische Gegebenheiten

Die Positionierung des Instruments hängt von der Lage des Neutronenleiters ab. Der Neutronenleiter wird voraussichtlich auf einer Höhe von ca. 1,3 m (zwischen Mittelachse des Neutronenleiters und dem Boden) an die TMR-Einheit angeschlossen sein und die Distanz zwischen Instrument und TMR-Einheit soll 8 m betragen (siehe Abb. 1.1). Die zu bestrahlende Probe liegt verschiebbar im Neutronenstrahl. Die in der Probe induzierte Gammastrahlung wird in alle Raumrichtungen emittiert. Es steht also theoretisch frei, wo sich der Detektor befindet. Bei PGNAAs werden Detektoren in der Regel senkrecht zum Strahl ausgerichtet, um einer minimalen Neutronenhintergrundstrahlung ausgesetzt zu sein. Dabei steht es theoretisch frei, ob sich der Detektor über, unter oder neben dem Strahl befindet. Der Detektor ist jedoch zwecks Kühlung starr mit einem Stickstoffdewar von 30 L Fassungsvermögen verbunden. Da der Dewar aufrecht stehen muss, kann der Detektor mit Dewar nur horizontal neben dem Neutronenstrahl platziert werden. In der Abbildung 2.1 ist die Ausrichtung des Detektors zur Probe und zum Neutronenstrahl dargestellt. Außerdem werden die relevanten Freiheitsgrade der Probe mittels eines Koordinatensystems benannt.

2.2 Anforderungsliste

In Tabelle 2.1 und 2.2 sind die beiden Kategorien der Anforderungsliste dargestellt. Sie ist unterteilt in funktionale Anforderungen und Randbedingungen. Die funktionalen Anforderungen bestehen aus den Anforderungen des Instrumentverantwortlichen. Diese Anforderungen wurden in Hinblick auf einen möglichst

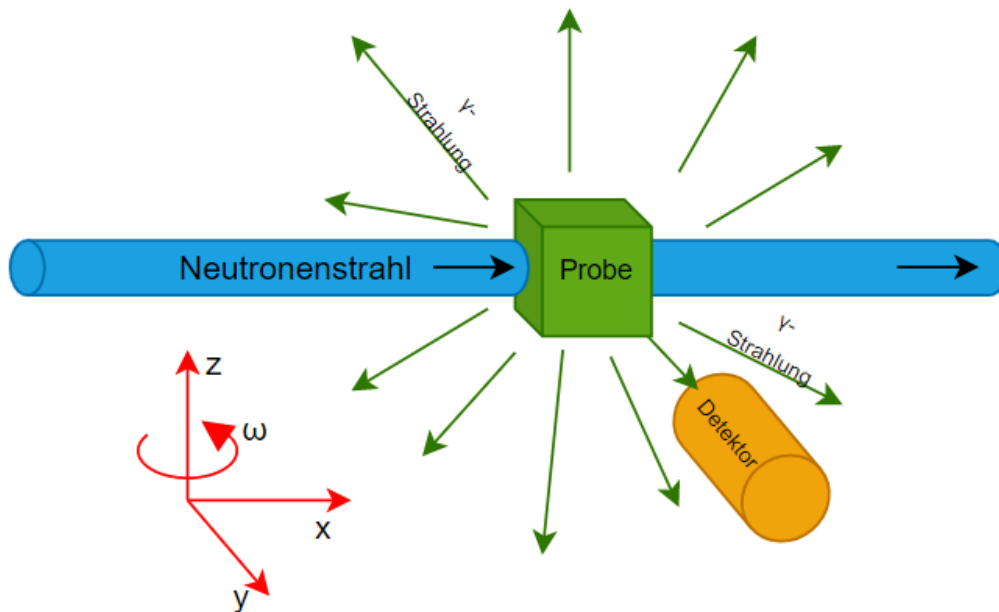


Abbildung 2.1: Ausrichtung des Detektors zur Probe und zum Neutronenstrahl

großen Nutzen und mögliche Probenvielfalt für die künftigen Anwender des Instruments erstellt.

Viele der verfügbaren PGNAA-Einrichtungen für Forschungszwecke haben nur die Möglichkeit sehr kleine (wenige mm^3) und sehr leichte (wenige Gramm) Proben zu untersuchen. Das PGNAA-Instrument für den HBS-Prototyp wird für Proben von bis zu 1 kg Masse und einem Volumen von $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ausgelegt (Nr. 1-2). Das Volumen ist nur ein Richtwert und ist das maximale Volumen mit dem eine Probe noch den vollständigen Bewegungsumfang des Probenhalters nutzen kann. Größere Proben, etwa lange, schmale Proben können auch untersucht werden, könnten dann jedoch eventuell nur eingeschränkt oder gar nicht manipuliert werden. Die maximalen Verfahrswege des Probenhalters betragen jeweils $(\pm)5 \text{ cm}$ in der X- und Y-Achse und 10 cm in der Z-Achse (Nr. 3-5). Sie wurden gewählt, sodass die Probe bei maximalem Probenvolumen und maximaler Ausnutzung eines oder mehrerer Verfahrswege noch mit den Außenkanten in der Strahlachse des Neutronenstrahls liegen. Die Rotation um 360° ermöglicht es, je-

Nr.	Funktionale Anforderungen	Werte/Daten	Bemerkung / Begründung	Quelle
1	maximale Probenabmessungen	10x10x10 cm ³	Limitierung für die Bemessung der Probenkammer	Vorgaben des Instrumentverantwortlichen
2	max. Probengewicht	1 kg	Limitierung für die Bemessung des Probenhalters	
3	Probenbewegung in X-Achse	(+/-)5 cm	automatische Manipulation der Probe	
4	Probenbewegung in Y-Achse	(+/-)5 cm		
5	Probenbewegung in Z-Achse	10 cm		
6	Probenrotation um Z-Achse	360°		
7	Deckel der Kammer abnehmbar		Möglichkeit den oberen Teil des Probenhalters zu wechseln	
8	Luke im Deckel für einfachen Zugang zur Probe		Probe wechseln, ohne den Deckel der Kammer zu demontieren	
9	Vakuum in Probenkammer	0,05 mbar	Neutronenstreuung verhindern	
10	Möglichkeit um die Kammer zu erweitern für Neutronenimaging			
11	Variabler Abstand zwischen Probe und Detektor	10 - 20 cm	Intensität der Gammastrahlung regulieren	
12	Gammastrahlung kollimieren	5, 10, 20, 30, 40 mm	Sichtfeld des Detektors verändern, Intensität der Gammastrahlung regulieren	
13	Abschirmung soll für Zugang am Deckel einfach entfernbar sein		Bestrahlungszeit ist begrenzt, Wechsel der Probe bzw. Korrektur und Justierung soll möglichst schnell verlaufen	

Tabelle 2.1: Funktionale Anforderungen

Nr.	Randbedingungen		
1	Abstand: Mittelachse Neutronenstrahl zu Hallenboden	1395 mm (+35 mm)	
2	Abmessungen Detektorgehäuse	Länge: 275,4 mm, Durchmesser: 95,3 mm	
3	Neutronenstrahl endet im Beamstop		Detektor und benachbarte Instrumente vor Strahlung schützen
4	Abschirmung von Neutronen		Detektor und benachbarte Instrumente vor Strahlung schützen
5	Abschirmung von Gammastrahlung		Hintergrund-Gammastrahlung minimieren

Tabelle 2.2: Randbedingungen

des Volumenelement der Probe optimal für eine Bestrahlung auszurichten (Nr.6). Dies dient dazu eine Neutronenselbstisolierung oder Gammaselbstabsorption zu minimieren. Neutronenselbstisolierung (frei übersetzt aus dem Engl.: neutron self-shielding) bezeichnet den Effekt, wenn nicht zu untersuchende Volumenelemente der Probe das zu untersuchende Volumenelement der Probe von der eintreffenden Neutronenstrahlung abschirmen. Gammaselbstabsorption (frei übersetzt aus dem Engl.: gamma ray self-absorption) ist ein ähnlicher Mechanismus, der dadurch auftritt, dass nicht relevante Volumenelemente der Probe die Gammastrahlung des zu untersuchenden Volumenelements absorbieren. Dabei liegen die absorbierenden Volumenelemente zwischen dem zu untersuchenden Volumenelement und dem Detektor. Sowohl Neutronenselbstisolierung als auch Gammaselbstabsorption verfälschen die Analyse. [1] An die Präzision des Probenhalters werden aufgrund des großen Neutronenstrahlquerschnitts von einigen Quadratcentimetern keine besondere Anforderungen gestellt. Es wird davon ausgegangen, dass übliche Genauigkeiten von Manipulatoren für optische Anwendungen ausreichend sind. Diese liegen typischerweise im Bereich von wenigen Mikrometern. [18] [20]

Die Nummern 7-10 der funktionalen Anforderungen betreffen die Gestaltung der Probenkammer. Der Deckel der Probenkammer soll entfernbar sein, um den oberen Teil des Probentischs zu demontieren bzw. zu wechseln. Es ist wahrscheinlich mit einem gewissen Aufwand verbunden, den Deckel der Kammer zu demonstrieren, da etwaige Verschraubungen gelöst werden müssen. Daher wird zusätzlich eine Luke im Deckel vorhanden sein, um einen schnellen und reibungslosen Wechsel der Probe vorzunehmen. Aus diesem Grund ist auch der obere Teil der Bleiabschirmung verschiebbar (Nr. 13). Ein Vakuum in der Probenkammer dient einer effizienten Neutronenleitung, da eine Neutronenstreuung an der Luft dadurch zu großen Teilen eliminiert ist (Nr. 9). Die Probenkammer soll auf der Rückseite erweiterbar sein, um eventuell einen weiteren Detektor inklusive Spiegel für Neutronenimaging zu installieren.

Die Nummern 11 und 12 betreffen den Detektor bzw. den Kollimator. Der Detektor soll linear verschiebbar sein, um den Abstand zwischen Detektor und Probe stufenlos variieren zu können. Das dient dazu die Intensität der Gammastrahlung zu regulieren, da sie mit zunehmender Distanz zwischen Detektor und Probe abnimmt. Die Gammastrahlen sollen zudem auf Kreisquerschnitte mit vorgegebenen Durchmessern kollimiert werden. Das heißt, dass die Gammastrahlen, welche von der Probe in alle Raumrichtungen emittiert werden, von verschiedenen großen Ringen aus Blei zwischen der Probe und dem Detektor auf einen gewissen Querschnitt beschnitten werden. Damit kann zum einen die Intensität der Gammastrahlung im Detektor reguliert werden. Außerdem wird dadurch das Sichtfeld des Detektors auf ein bestimmtes Volumenelement der Probe beschränkt.

Die Randbedingungen sind technische und geometrische Gegebenheiten von denen die Entwicklung des Instruments direkt abhängig ist. Die Nummern 1 und 2 sind geometrische Größen von denen die Abmessungen einzelner Komponenten abhängig sind. Die Nummern 3-5 sind für die sichere und technisch sinnvolle Ausführung des Konzepts unabdingbar. Eine Abschirmung von Neutronen- und Gammastrahlung sowie ein Beamstop wird zum einen durch die Strahlenschutz-

verordnung [11] gefordert und zum anderen durch die Betreiber anderer benachbarter Instrumente, deren Experimente und Messungen unter der Exposition von Gamma- und Neutronenstrahlung leiden könnten.

3. KONZEPTIONIERUNG UND KONSTRUKTIONSOPTIONEN

3.1 Probenkammer und Probenhalterkammer

3.1.1 Probenkammer

Die Probenkammer ist für das Instrument eine essentielle Komponente. In ihr soll der obere Teil des Probenhalters und die zu bestrahlende Probe Platz finden. Des weiteren soll sie die richtige Umgebung für die Bestrahlung mit Neutronen bereitstellen. Das bedeutet, dass die Atmosphäre und die mechanischen Bestandteile innerhalb der Probenkammer so wenig Wechselwirkung wie möglich mit Neutronen eingehen. Zum einen soll die Hintergrund-Gammastrahlung minimiert werden, um eine Verfälschung des gemessenen Gammaspektrums der Probe zu verhindern. Außerdem soll die Streuung von Neutronen minimiert werden. Hintergrundstrahlung entsteht einerseits durch Neutroneneinfang, wie bei der PGNA und DGNA. Dabei fängt ein Atom ein Neutron ein und wird auf ein höheres Energieniveau gehoben und emittiert prompte Gammastrahlen. Dabei kehrt das Atom entweder in seinen Grundzustand zurück und verbleibt als stabiler Atomkern oder es entsteht ein Radioisotop. Diese Radioisotope können Sekundenbruchteile bis zu Jahren bestehen bevor sie zerfallen. Dabei wird erneut Gammastrahlung emittiert, die das Signal im Dektortor überlagert.

Neutronenstreuung abseits der Probe kann ebenfalls Hintergrundgammastrahlung durch Anregung des Atomkerns induzieren und kann auch zur Ablenkung der Neutronen und im Falle der inelastischen Streuung auch zur Veränderung des Energiespektrums des Neutronenstrahls führen. Sobald unerwünschte Gammastrahlung im Sichtfeld des Detektors liegt, wird die Messung verfälscht. In

diesem Kapitel wird nur die Streuung und Aktivierung an der Atmosphäre innerhalb der Kammer betrachtet. Die Wechselwirkungen mit dem Probenhalter werden im entsprechenden Kapitel behandelt.

Um die Streuung und Aktivierung an der Atmosphäre innerhalb der Kammer zu minimieren, muss die Dichte an Atomen, welche Wechselwirkungen mit Neutronen eingehen, verringert werden. Dazu gibt es zwei gängige Methoden. Beide Methoden haben das Ziel, so wenig Luft wie möglich in der Kammer verbleiben zu lassen. Dazu kann das Volumen klassischerweise evakuiert werden oder alternativ mit Helium geflutet werden. Ein entscheidender Parameter bei der Auswahl der Methode ist die mittlere freie Weglänge, welche der Kehrwert des makroskopischen Wirkungsquerschnittes ist. Da der makroskopische Wirkungsquerschnitt von der Energie der Neutronen abhängig ist, kann keine pauschale Aussage über die mittlere freie Weglänge von Neutronen in einem bestimmten Medium gemacht werden. Für Neutronen mit einer Geschwindigkeit von $2200 \frac{m}{s}$ können jedoch folgende mittlere freie Weglängen angegeben werden. [1]

Medium	Wasser	Helium (1 bar)	Luft (1 bar)	Luft (0,05 mbar)
mittlere freie Weglänge in m	0,002	280	20	400000

Tabelle 3.1: Mittlere freie Weglängen von freien Neutronen in verschiedenen Medien [1]

Mit einem relativ niedrigem Vakuum von 0,05 mbar kann eine erhebliche Verbesserung der mittleren freien Weglänge im Gegensatz zu Helium erreicht werden. Um in der Kammer ein Vakuum von 0,05 mbar zu erreichen, ist der technische Aufwand größer, als im Falle der Flutung mit Helium. In beiden Fällen müssen die Öffnungen der Kammer gasdicht sein. Im Falle des Vakuums muss jedoch auch die Statik der Kammer betrachtet werden, da durch den Druckunterschied Spannungen und damit einhergehende Verformungen in der Kammerwand ent-

stehen. Diese treten insbesondere bei würfel- oder quaderförmigen Kammern auf. Die Mitte einer Seitenwand von würfel- bzw. quaderförmigen Kammern erfährt typischerweise die größte Verformung, da sie zum Zentrum des Volumens hingezogen wird. Dadurch entstehen Spannungen, welche typischerweise in den Kanten der Kammer maximal sind.

3.1.2 Probenhalterkammer

Eine Kammer für den Probenhalter ist nicht zwingend notwendig. Der Probenhalter bzw. die Bewegungseinheiten des Probenhalters müssen nicht im Vakuum bzw. im Helium liegen. Der Probenhalter muss lediglich den Zweck erfüllen, die Probe in den gewünschten Freiheitsgraden (x,y,z,ω) manipulieren zu können. Die folgende Abbildung zeigt zwei Optionen, wie eine Manipulation der Probe innerhalb einer Kammer realisiert werden kann.

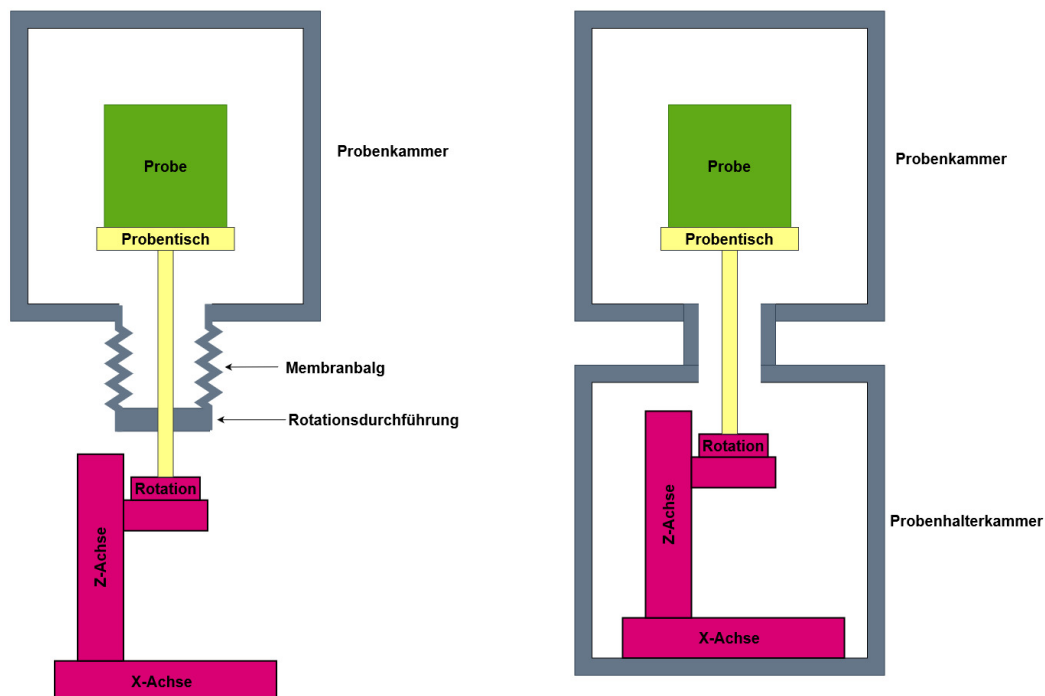


Abbildung 3.1: Zwei Optionen für die Manipulation der Probe

Im linken Teil der Abbildung ist die Konstruktionsoption dargestellt, in der die Bewegungseinheiten des Probenhalters außerhalb der Kammer liegen. Mit dieser Option wird der Bau einer weiteren Kammer vermieden, die dann auch mit der Atmosphäre der Probenkammer verbunden sein müsste. Für diese Option muss jedoch eine Lösung gefunden werden, um die Bewegungseinheiten durch die Kammerwand zu führen, ohne dass eine Leckage des Heliums oder des Vakuums entsteht. Um dies technisch zu realisieren, könnte beispielsweise ein Membranbalg in Kombination mit einer Vakuum-Rotationsdurchführung verwendet werden. In der folgenden Abbildung ist ein Vakuum-Membranbalg dargestellt.



Abbildung 3.2: Vakuum-Membranbalg [6]

Mittels des Membranbalgs können axiale, laterale und angulare Bewegungen realisiert werden. Für den Probenhalter wäre die axiale und die laterale Bewegung relevant. Mit der axialen Bewegung kann die Probe in der vertikalen Achse (z-Achse) bewegt werden. Mit der lateralen Bewegung können die beiden horizontalen Achsen (x-, y-Achse) bedient werden. Für die Rotation um die z-Achse kann eine Rotationsdurchführung verwendet werden. Diese besteht aus einem Flansch, durch den eine rotierbare Achse durchgeführt ist. Die rotierbare Achse ist dabei speziell abgedichtet. In folgender Abbildung ist eine Rotationsdurchführung dargestellt.



Abbildung 3.3: Vakuum-Rotationsdurchführung [8]

Es ist jedoch aufwändiger die Probe durch einen Membranbalg zu manipulieren, da dieser eine gewisse Steifigkeit und dadurch eine genaue und reproduzierbare Probenmanipulation erschwert. Somit müssen die Bewegungseinheiten stärker bemessen werden, als wenn sie nur die Probe verschieben müssten. Jedoch können dafür Bewegungseinheiten verwendet werden, die für den Betrieb unter Umgebungsdruck ausgelegt sind, wohingegen für die Anwendung im Vakuum spezielle Komponenten benötigt werden. Dies sieht vor, dass die Bauteile dem Druck des Vakuums standhalten. Außerdem dürfen die Komponenten nicht Ausgasen. Das bedeutet, dass sie keine flüchtigen Stoffe enthalten dürfen, welche sich durch den Unterdruck in der Atmosphäre innerhalb der Kammer lösen könnten. Ob der Effekt des Ausgasens bei einem schwachen Vakuum von 0,05 mbar eine Rolle spielt, bleibt noch zu untersuchen. Für beide Konstruktionsoptionen der Kammergestaltung werden direkt oder indirekt, im Falle des Probenhalters, besondere Vakuumkomponenten benötigt. Somit ist vorerst nicht klar, welche Lösung wirtschaftlicher ist. Es wird sich jedoch für die Lösung der Probenmanipulation innerhalb der Kammer entschieden, da die Probenmanipulation in diesem Fall nicht durch äußere Kräfte, wie die Federkräfte eines Membranbalgs, beeinflusst wird.

3.1.3 Technische Realisierung der Kammern

Für die technische Realisierung der Proben- und Probenhalterkammer werden zwei Optionen in Erwägung gezogen. Die erste Option sieht die Verwendung von zylindrischen Standardvakuumbauteilen vor. Dies hätte den Vorteil, dass der Großteil der Kammerkomponenten “von der Stange” gekauft werden könnte, wodurch etwaige Verzögerung und Mehrkosten durch Konstruktion und Fertigung der Bauteile vermieden werden könnte. Außerdem könnte ein etabliertes System von Flanschverbindungen verwendet werden, wodurch eine Erweiterung des Systems ohne hohen Aufwand erfolgen könnte. Ein Beispiel für eine Probenkammer bestehend aus einem Flanschwürfel ist in folgendem Bild dargestellt.

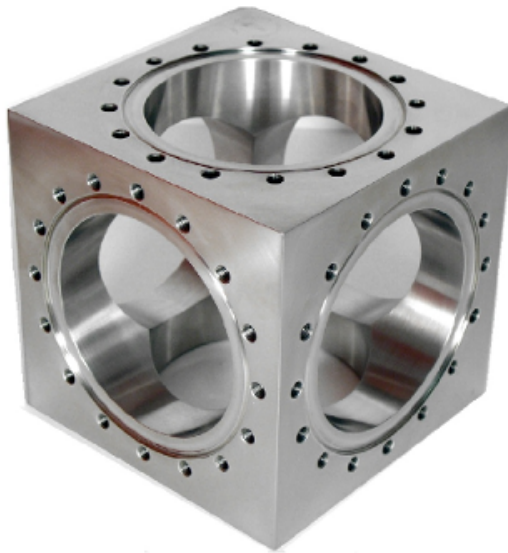


Abbildung 3.4: 6-Wege Vakuumwürfel [9]

Nachteil dieser Bauweise der Kammer wäre die komplexe Geometrie der Innenwände, welche eine Abschirmung innerhalb der Kammer mittels Neutronenabsorber erheblich erschweren würde. Dazu kommt noch, dass solche Bauteile nicht in beliebigen Größen angeboten werden. Oft werden Vakuumbauteile anhand von Standardnennweiten der Flanschöffnungen bemessen. Dazu kommt, dass der Flanschwürfel eine einheitliche Flanschgröße an allen Seiten besitzt. Für

das Instrument sind jedoch Öffnungen von verschiedenen Größen notwendig. Die Öffnung in Strahlrichtung hinter der Probe soll beispielweise möglichst groß sein, um den Anschluss einer weiteren Kammer für das geplante Neutronenimaging zu gewährleisten. Die Öffnung nach unten in Richtung Probenhalter soll jedoch relativ klein sein um eine praktikable Neutronenabsorption zu realisieren. Diese Tatsachen stellen weitere Limitierungen dar. Die zweite Option für die Kammern ist eine Eigenkonstruktion aus würfelförmigen, dünnwandigen Aluminiumkammern. In Abbildung 3.5 ist die Proben- und die Probenhalterkammer im Halbschnitt dargestellt. Die Kammern sind durch eine Rohr von 200 mm Länge miteinander verbunden, damit die Probenkammer effektiv mit Blei abgeschirmt werden kann. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer Gammaabschirmung um die Probenhalterkammer, was im entsprechenden Kapitel aufgegriffen wird. Die gestrichelte blaue Linie ist die Mittelachse des Neutronenstrahls. Die flachen Innenwände der Vakuumkammer erlauben eine einfache Montage von Neutronenabsorbern innerhalb der Kammer. Außerdem besteht dabei völlige Entscheidungsfreiheit beim verwendeten Werkstoff. Dieser Aspekt spielt bei Neutroneninstrumenten eine wichtige Rolle, denn es sollten Werkstoffe gewählt werden, deren Einfangsquerschnitt gering ist und deren etwaige Aktivierungs- und Zerfallsprodukte eine kurze Halbwertszeit haben. Eisenmetalle haben in dieser Hinsicht schlechte Eigenschaften, da Eisen (^{56}Fe) bei thermischen Neutronen einen Einfangsquerschnitt von 2,59 b hat, während Aluminium einen Einfangsquerschnitt von 231 mb hat. Somit ist der Einfangsquerschnitt von thermischen Neutronen in Aluminium ungefähr um den Faktor 10 kleiner als bei Eisen. [1] Dazu kommt noch, dass durch den Neutroneneinfang das erste Radioisotop von Eisen (^{59}Fe) entsteht, welches eine Halbwertszeit von 44 Tagen hat, während das erste Radioisotop von Aluminium (^{28}Al) eine Halbwertszeit von nur 2,24 Minuten hat. [10] Diese Eigenschaften machen Aluminium, im Gegensatz zu Eisen, zu dem bevorzugten Werkstoff für Neutroneninstrumente. Aus diesem Grund ist für den Werkstoff des ersten Kammerentwurfs Aluminium vorgesehen.

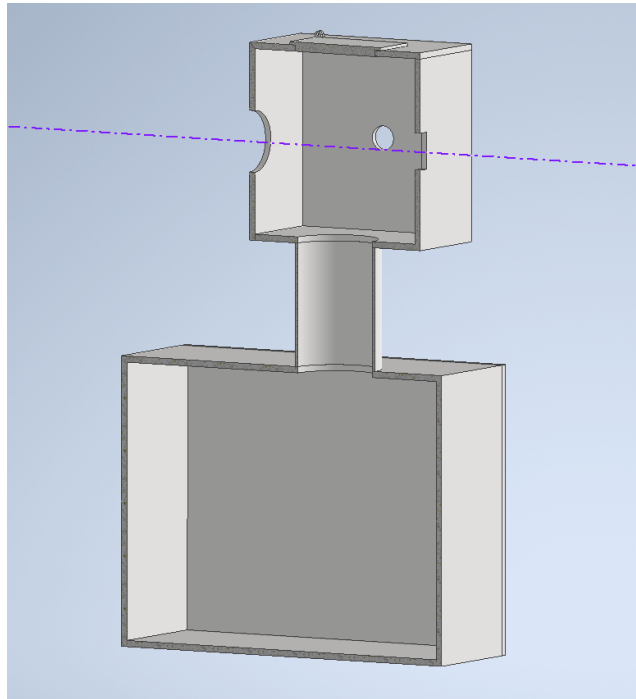


Abbildung 3.5: CAD-Modell der Vakuumkammern im Halbschnitt

Zuletzt muss noch die Stabilität der Vakuumkammer betrachtet werden. Zu diesem Zweck wurde eine FEM-Analyse mittels Autodesk Inventor 2022 durchgeführt. Dafür wurde ein Dummy des Kammermodells erstellt. Der Dummy besteht aus einer Probenhalterkammer (LxHxB: 600mmx470mmx400mm) mit darüberliegender, würfelförmigen Probenkammer (Seitenlänge: 320 mm). Durch ein Rohr von 150 mm Außerndurchmesser sind die Kammern miteinander verbunden. Die Wandstärke beträgt 10 mm und als Werkstoff wurde Aluminium (EN AW-6061) gewählt. Zur vorläufigen Konstruktion der Kammern unterscheidet sich der Dummy insofern, dass er aus einem einzigen Teil besteht und die Öffnungen in den Kammerwänden nicht berücksichtigt, da sie für die Simulation hinderlich wären. Um den Einfluss von Versteifungen auf die Stabilität der Seitenwände zu untersuchen, wurde ein weiterer Dummy erstellt, dessen Seitenwände mit Rippen versehen sind. Die Rippen haben einen Querschnitt von 20 mm x 20 mm. In Abb. 3.6 sind die beiden Dummies der Probenkammer gegenübergestellt.

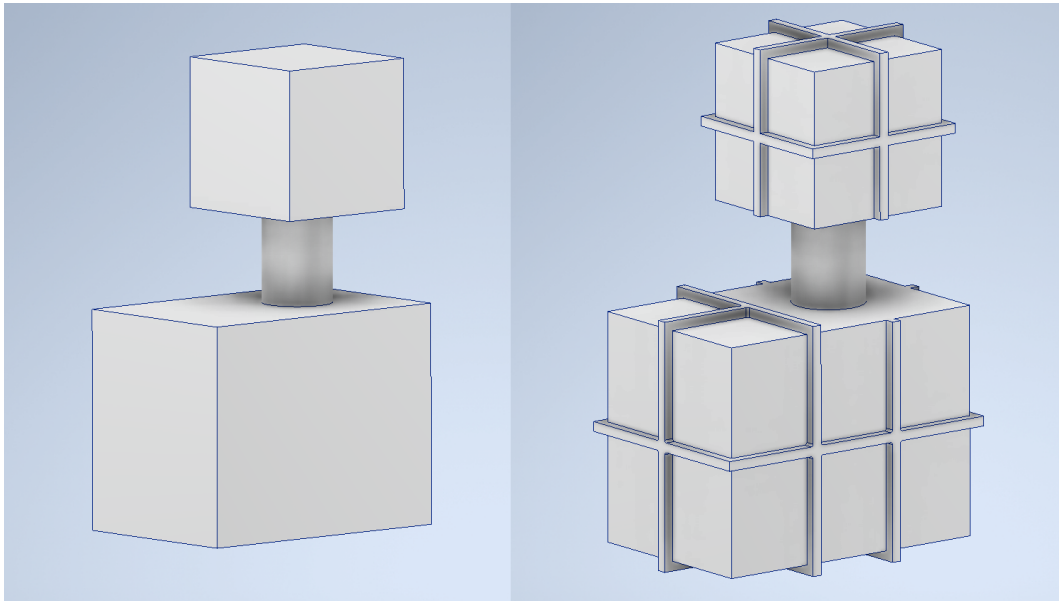


Abbildung 3.6: Gegenüberstellung der Vakuumkammer-Dummys

Als Umgebungsdruck in der Simulation wurde 1 bar angenommen und als Innendruck 0,05 mbar. In Autodesk Inventor werden jedoch kleine Drücke auf 0 bar abgerundet, da es für die wirkenden Kräfte vernachlässigbare Auswirkungen hat. Deswegen wird bei Vakuumanwendungen üblicherweise von einer Druckdifferenz von einem bar ausgegangen. Die FEM-Analyse des unberippten Kammerdummys hat eine maximale Von-Mises-Spannung von 83,33 MPa und eine maximale Verschiebung von 1,48 mm berechnet (siehe Abb. 3.7). Für den berippten Kammerdummy wurde eine maximale Von-Mises-Spannung von 69,32 MPa und eine maximale Verschiebung von 0,64 mm berechnet (siehe Abb. 3.8). Die maximale Verschiebung tritt jedoch im oberen Bereich der Probenkammer auf. Um die Ergebnisse mit denen des unberippten Modells vergleichen zu können, wurde die Verschiebung im Zentrum der Seitenwand der Probenhalterkammer gemessen. Dort beträgt sie 0,43 mm. Es zeigt sich, dass das berippte Kammermodell eine geringere Maximalspannung und eine geringe maximale Verschiebung aufweist, als das unberippte Modell. Die maximalen Spannungen in beiden Ausführungen sind in Anbetracht der Streckgrenze von AL-6061 von 275 MPa unproblematisch.

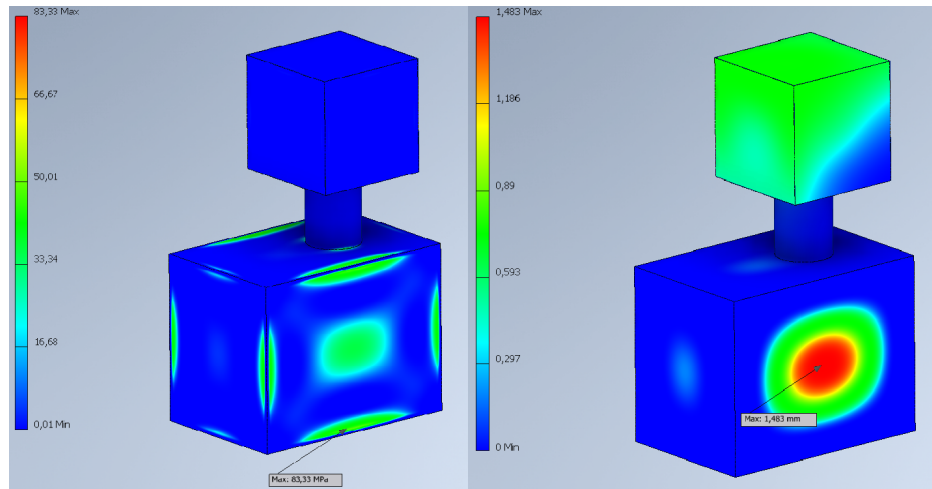


Abbildung 3.7: Ergebnisse der FEM-Simulation des unberippten Kammerdummys

Die Verformung von 1,48 mm, welche in der Mitte der großen Seitenwände entsteht, könnte jedoch zum Problem werden. Die Verformung könnte im Zweifel die Dichtigkeit der Kammer beeinflussen, falls Dichtflächen der Kammeröffnungen durch die Verschiebung beeinflusst werden. Außerdem könnte die Durchbiegung der Seitenwand die innenliegenden Neutronenabsorber verschieben. Die detaillierten Ergebnisse der FEM-Analyse sind in Anhang 2 zu finden.

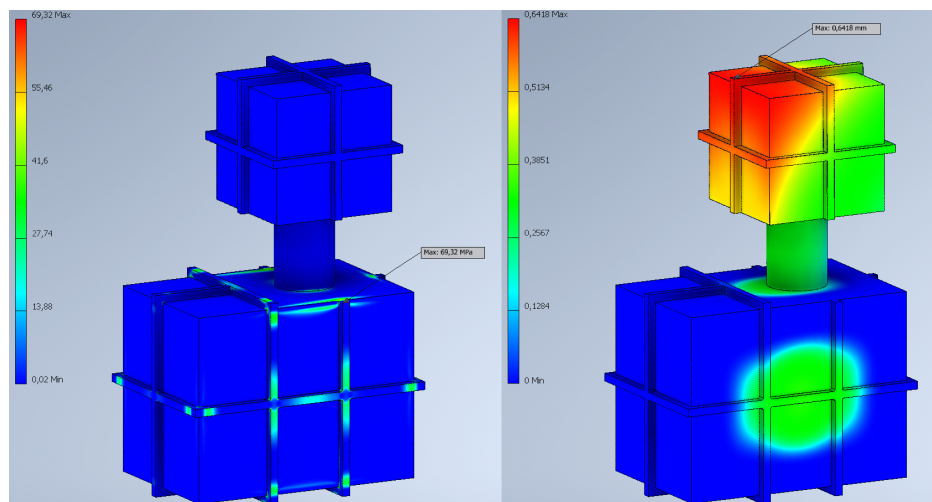


Abbildung 3.8: Ergebnisse der FEM-Simulation des berippten Kammerdummys

Nuklid	totaler Wirkungsquerschnitt [b]	Reaktion	Halbwertszeit des Produkts und Zerfall
${}^6\text{Li}$	941	$(n, \alpha){}^3\text{H}$	12 a, ${}^{-\beta}$
${}^{10}\text{B}$	3838	$(n, \alpha\gamma){}^7\text{Li}$	stabil
${}^{113}\text{Cd}$	20600	$(n, \gamma){}^{114}\text{Cd}$	stabil

Tabelle 3.2: Eigenschaften von Neutronenabsorbern [1]

3.2 Abschirmung

Im folgenden Kapitel wird die Abschirmung betrachtet. Dabei wird zwischen der Absorption bzw. Abschirmung von Neutronen und der Abschirmung von Gammastrahlung unterschieden. Zusätzlich wird die Gestaltung des Beamstops betrachtet.

3.2.1 Neutronenabschirmung

Eine ideale Neutronenabschirmung absorbiert Neutronen aller Energien mit einer möglichst geringen Materialstärke. Um mit einer minimalen Materialstärke Neutronen zu absorbieren, ist ein großer Einfangsquerschnitt gefordert. Zudem soll dabei keine ionisierende Strahlung entstehen, wobei im Fall der PGNAA besonders die Emission von Gammastrahlung vermieden werden soll, um Hintergrundstrahlung zu minimieren. Die am häufigsten verwendeten Nuklide zur Absorption von Neutronen sind ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ und ${}^{113}\text{Cd}$. In der Tabelle 3.2 sind die Eigenschaften dieser Nuklide dargestellt.

${}^{10}\text{B}$ und ${}^{113}\text{Cd}$ besitzen wesentlich höhere Einfangsquerschnitte als ${}^6\text{Li}$, weswegen eine effiziente Neutronenabsorption bei geringen Materialstärken gegeben ist. Zusätzlich entstehen bei dem Bor und Cadmiumisotop keine radioaktiven Produkte durch Neutroneneinfang. Jedoch emittieren sie, im Gegensatz zu ${}^6\text{Li}$, Gammastrahlen beim Neutroneneinfang. ${}^6\text{Li}$ und ${}^3\text{He}$ sind die einzigen Nuklide,

die Neutronen absorbieren, ohne dabei Gammastrahlen zu emittieren. ^3He kommt jedoch nur sehr selten vor (relative Häufigkeit: 0,00014 %) und ist daher wegen der hohen Kosten nur Spezialanwendungen vorbehalten. Zumal die Anwendung von ^3He als Neutronenabsorber problematisch ist, da es als Gas nicht ohne Gefäß verwendet werden kann. Wegen der genannten Gründe wird ^3He als Neutronenabsorber nicht in Betracht gezogen. Ebenfalls ^{10}B und ^{113}Cd sind wegen der Emission von Gammastrahlen ausgeschlossen. Somit verbleibt ^6Li als einziges Material zur Neutronenabsorption, wenn der Vermeidung von Hintergrundstrahlung besondere Priorität zugewiesen wird. Die Abschirmung mit angereichertem Lithium birgt jedoch auch unerwünschte Nebeneffekte. Das Produkt beim Neutroneneinfang ist Tritium und dessen Atomkern, Triton genannt, kann auch Reaktionen mit anderen Atomen eingehen. Unter einer (t,n)-Reaktion können so mit leichten Elementen wie Sauerstoff, Fluor oder Lithium schnelle Sekundärneutronen entstehen. Die Anzahl an Sekundärneutronen ist um den Faktor 10^{-4} geringer als die Anzahl an absorbierten Neutronen. Dieser Effekt kann in Anbetracht des geringen Neutronenflusses der verwendeten Neutronenquelle vernachlässigt werden, sollte jedoch bei höheren Neutronenflüssen erneut betrachtet werden.

Da reines Lithium mit der Feuchtigkeit in der Luft reagiert, muss es chemisch gebunden werden. Gängige Verbindungen sind beispielweise Lithiumcarbonat oder Lithiumfluorid. Stand der Technik sind jedoch Polymere oder Glas mit einer Mischung aus ^6Li und ^7Li . Im Falle der Polymere wird häufig Polyethylen oder Silikon verwendet. Mit Lithium versetztes Polyethylen ist meist mit 7,5 % Lithium versetzt, welches sich zu 92,6 % aus ^7Li und zu 7,4 % aus ^6Li zusammensetzt. Es ist in Form von festen Platten, Blöcken und Zylindern unter den Handelsnamen Polythium-7 oder JC215 erhältlich. Mit Lithium versetztes Silikon bietet den Vorteil, dass es elastisch ist und sich somit komplexen Geometrien anschmiegen kann. Es ist unter dem Handelsnamen Silithium-25/79 erhältlich und ist mit 25 % Lithium versetzt welches sich aus 79 % ^6Li und 21 % ^7Li zusammensetzt. [13][14]

Für die Neutronenabsorption des PGNAA-Instruments wird das mit Lithium versetzte Polyethylen gewählt. Um eine Aktivierung der Probenkammer und der weiteren Umgebung durch Neutronen zu verhindern, wird der Neutronenabsorber auf der Innenseite der Probenkammer angebracht. Da die Kammer auf der Innenseite plane Flächen aufweist, eignen sich feste Platten besser als flexible Silikonplatten. Da die Seitenwände der Probenkammer zum Teil Öffnungen von verschiedener Form und Größe haben, ist es notwendig, den Neutronenabsorber maschinell bearbeiten zu können. Zur maschinellen Bearbeitung eignet sich Polyethylen ebenfalls besser als Silikon. In Abbildung 3.9 ist die Probenkammer mit innenliegendem Neutronenabsorber (nicht maßstabsgetreu) dargestellt. Im Datenblatt des Polythium-7 ist dessen makroskopischer Wirkungsquerschnitt für thermischen Neutronen von $0,51 \frac{1}{cm}$ gegeben. Durch Kehrwertbildung lässt sich wie folgt ein Orientierungswert für die Dicke des Neutronenabsorbers berechnen.

$$t_{min,n} = \frac{1}{\mu_n} = \frac{1}{0,51 \frac{1}{cm}} = 1,96cm \quad (3.1)$$

In der späteren Detailkonstruktion des Instruments muss die Abschirmdicke des Neutronenabsorbers durch weitere Berechnungen oder Simulationen verifiziert werden.

Die Luke auf der Oberseite der Probenkammer wird ebenfalls mit einem Neutronenabsorber ausgekleidet. Die Öffnungen vom Ein- und Austritt des Neutronenstrahls bleiben offen und müssen somit auch im Neutronenabsorber ausgespart werden. Die Öffnung zum Detektor wird jedoch nicht ausgespart, da Neutronenstreuung in Richtung Detektor zu vermeiden ist. Die Öffnung nach unten zum Probenhalter muss ebenfalls mit einem Neutronenabsorber versehen werden, um zu verhindern, dass dort Neutronen austreten und Materie aktivieren oder die Elektronik des Probenhalters beeinflussen. Da durch diese Öffnung die mechanische Verbindung zwischen Probe und Probenhalter durchgeführt wird, darf

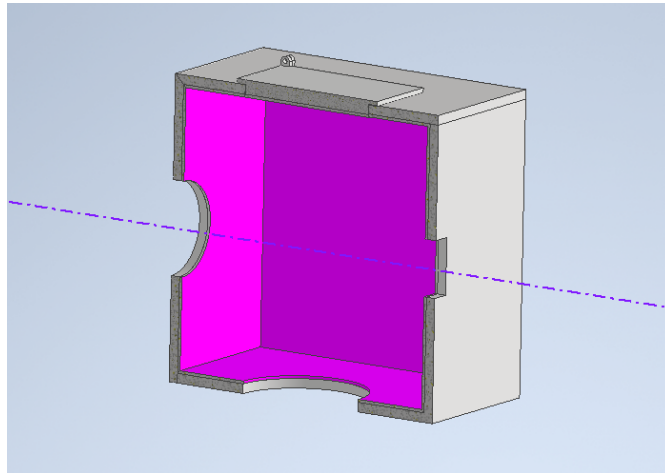


Abbildung 3.9: Lithiumabsorber innerhalb der Probenkammer (Halbschnitt)

der Neutronenabsorber diesen nicht in seiner horizontalen und vertikalen Bewegung behindern. Aus diesem Grund sind für diese Öffnung zwei unterschiedliche ringförmige Platten (Abb. 3.10) vorgesehen, welche sich mit der Stange des Probenstischs mitbewegen können und sie durch ausreichende Toleranz nicht in der Auf- und Abwärtsbewegung beschränken. Die gleiche Funktion wäre auch mittels einer großen Ringplatte realisierbar, sie würde jedoch mit Seitenwänden der Probenkammer kollidieren. Ebenfalls wäre eine Neutronenabsorption auch auf der Innenseite der Probenhalterkammer möglich, jedoch müsste die Platte in diesem Fall durch einen Mechanismus an die obere Innenseite gepresst werden. Zudem müsste die Innenseite der Verbindung zwischen Probenkammer und Probenhalterkammer ausgekleidet werden. Wegen der genannten Gründe wurde sich für die Lösung innerhalb der Probenkammer mit zwei ringförmigen Neutronenabsorbern entschieden.

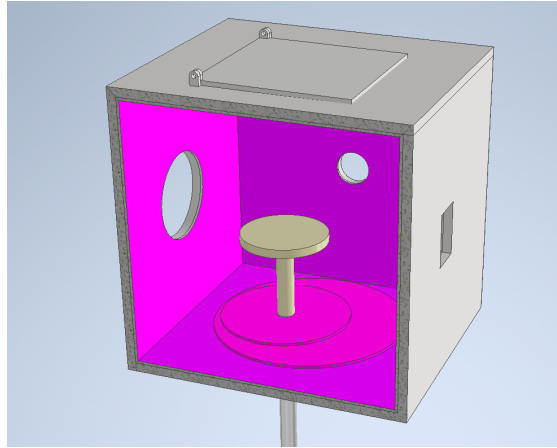


Abbildung 3.10: Lithiumabsorber-Ringe innerhalb der Probenkammer (Halbschnitt)

3.2.2 Abschirmung der induzierten Gammastrahlung

Durch die Bestrahlung der Probe entsteht die zu messende Gammastrahlung. Dabei erfährt der Detektor nur einen kleinen Ausschnitt der ansonsten in alle Raumrichtungen streuenden Gammastrahlung. Aus Gründen des Strahlenschutzes und zum Schutz anderer benachbarter Instrumente, muss diese Gammastrahlung abgeschirmt werden. Die zuvor vorgestellten Neutronenabsorber erfüllen diesen Zweck nicht, da sowohl Wasserstoff und Kohlenstoff als Bausteine des Polyethylens, als auch das enthaltene Lithium keinen signifikanten Absorptionskoeffizienten besitzen. Der Absorptionskoeffizient μ eines Materials ist ein Maß für sein Abschwächungsvermögen von elektromagnetischer Strahlung und wird in der Einheit cm^{-1} angegeben. Durch Kehrwertbildung kann nun, analog zum makroskopischen Wirkungsquerschnitt, die mittlere freie Weglänge der Gammastrahlung angegeben werden. Der Absorptionskoeffizient hängt von der Energie der Strahlung und der Ordnungszahl bzw. Atomkerngröße des abschirmenden Materials ab. Je geringer die Energie ist und je größer die Ordnungszahl des abschirmenden Materials ist, desto höher ist der Absorptionkoeffizient. Wasserstoff, Lithium und Kohlenstoff haben mit Ordnungszahlen von 1, 3 und 6 verhältnismäßig klei-

ne Ordnungszahlen und somit auch kleine Atomkerne. Blei eignet sich aufgrund seiner Ordnungszahl von 82 gut für die Abschirmung von Gammastrahlen und ist daher in allen PGNAA-Instrumenten zu finden. Es bietet zudem den Vorteil, dass es, im Gegensatz zu anderen Elementen mit großen Atomkernen, nicht radioaktiv und verhältnismäßig kostengünstig ist. Außerdem lässt es sich durch Zerspanung, Umformen oder Gießen leicht in die gewünschte Form bringen. Aus genannten Gründen wird Blei für die Gammaabschirmung des PGNAA-Instruments verwendet.

In diesem Konzept wird zunächst eine sinnvolle vorläufige Abschirmdicke ermittelt. Da mit Blei nun ein Element für die Gammaabschirmung gewählt wurde, hängt die Dicke der Abschirmung noch von der Energie der auftretenden Gammastrahlen ab. Werden alle Elemente betrachtet, können beim Neutroneneinfang von thermischen Neutronen Gammastrahlen mit Energien von wenigen keV bis hin zu etwa 12 MeV entstehen. [1] Für Blei sind die Massenschwächungskoeffizienten (Quotient aus dem Absorptionskoeffizienten und der Dichte, Formelzeichen: $\frac{\mu}{\rho}$) für Photonenenergien von 0.01 MeV bis 20 MeV gegeben ([15], S.175 Tab. 4.1-3) Die Absorptionskoeffizienten bzw. Massenschwächungskoeffizienten nehmen nicht strikt linear mit zunehmender Strahlungsenergie ab, sondern unterliegen Schwankungen. So hat Blei den niedrigsten Massenschwächungskoeffizienten von $0,0415 \frac{cm^2}{g}$ bei einer Gammastrahlung von 4 MeV. Daraus wird wie folgt eine mindeste Abschirmdicke $t_{min,\gamma}$ ermittelt.

$$t_{min,\gamma} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho} \quad (3.2)$$

$$t_{min,\gamma} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0,0415 \frac{cm^2}{g} \cdot 11,34 \frac{g}{cm^3}} = 2,125 \text{ cm} \quad (3.3)$$

Die errechnete mindeste Abschirmdicke verringert die anfängliche Strahlungsintensität I_0 per Definition um den Faktor $\frac{I}{I_0} = \frac{1}{e} = 0,36788$. Das bedeutet, dass etwa 37 % der Gammastrahlen von 4 MeV die Bleiabschirmung von 2,125

cm durchdringen. Wird diese Abschirmdicke nun um einen bestimmten Faktor, beispielweise zwei, vervielfacht, so erhöht sich wie folgt die Abschwächung des Strahls um die zweite Potenz.

$$2 \cdot t_{min,\gamma} \rightarrow \frac{I^2}{I_0} = \frac{1^2}{e} = 0,1353 \quad (3.4)$$

So durchdringen bei einer Abschirmdicke von 4,25 cm etwa 14 % der Gammastrahlen die Abschirmung. Um eine hinreichende Abschwächung zu gewährleisten und einen praktischen Wert für die Abschirmdicke festzulegen, wird eine Abschirmdicke von 10 cm gewählt. Dies ist um den Faktor 4,7 höher als die mindeste Abschirmdicke. Bei dieser Dicke durchdringen 0,909 % der Gammastrahlen die Abschirmung. Diese Berechnung dient zunächst als Abschätzung für die Größenordnung der Abschirmdicke bei einer geforderten Abschwächung und muss in der Phase der Detailkonstruktion durch weitere Berechnungen oder Simulationen überprüft werden.

Für die technische Ausführung der Gammaabschirmung werden zwei Optionen vorgestellt. Dabei wird die Lösung mittels genormter Bleibausteine und alternativ eine Lösung mit großen Bleisegmenten (siehe Anhang 1) vorgestellt. Die Verwendung von Bleibausteinen (siehe Abb. 3.11) für die Abschirmung von Gammaemittern ist gängige Praxis. Diese Bausteine sind nach der DIN 25407-1 [16] genormt und in verschiedenen Formen erhältlich. Ähnlich wie bei Holzverbindungen, beispielweise Laminat, gibt es bei diesen Bausteinen eine Feder- und eine Nutseite, sodass die Bausteine ineinander gesteckt werden können. Durch diesen Formschluss, welcher im übrigen keine kraftübertragende Verbindung darstellt, bilden sich sogenannte Schikanen, welche den Strahlendurchgang, im Gegensatz zu geradlinigen Schlitten, unterbinden. Durch die verschiedenen Formen, wie Fußsteine, Kopfsteine oder Winkelsteine lassen sich unterschiedliche Konstruktionen mit einer oder mehreren Kammern realisieren.

Vorteil dieser Art von Abschirmung ist die hohe Variabilität im Aufbau. Ände-

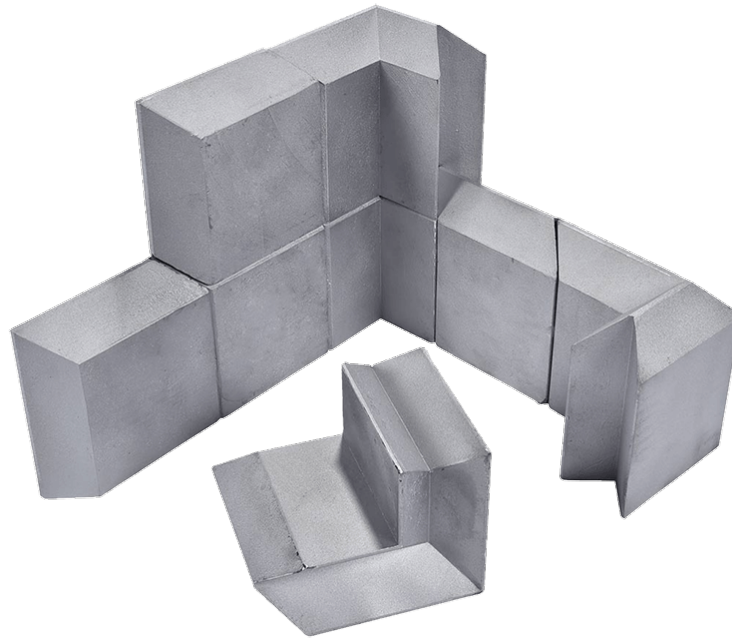


Abbildung 3.11: Bleibausteine [19]

rungen am Instrument, welche Einfluss auf die Form der Abschirmung haben, können einfach realisiert werden. Werden jedoch Instrumente oder Teile von Instrumenten abgeschirmt, welche häufig zugänglich sein müssen, so stellt eine Abschirmung aus Bleibausteinen einen hohen zeitlichen Aufwand dar, da die Abschirmung Stein für Stein von oben nach unten abgebaut werden muss. Ein weiterer Nachteil von Bleibausteinen ist die häufig verwendete Legierungen, Hartblei genannt. Hartblei enthält zwischen 2 % und 13 % Antimon und weist eine höhere Härte und bessere Gießbarkeit als reines Blei auf [17]. Jedoch wird Antimon durch Neutroneneinfang aktiviert und emittiert mit einer Halbwertszeit von 60 Tagen charakteristische Gammastrahlung. Dies trägt zur Hintergrundstrahlung bei und ist vor allem im Bereich der Detektorabschirmung unerwünscht. Die Verwendung von Bleisegmenten bringt Nachteile mit sich, bietet aber auch entscheidende Vorteile. So müssen sie zwar eigens für das Instrument gefertigt werden. Dies ist mit hohem Aufwand verbunden, da die Segmente durch Gießen gefertigt werden und für jedes unterschiedliche Segment eine Gussform hergestellt werden muss.

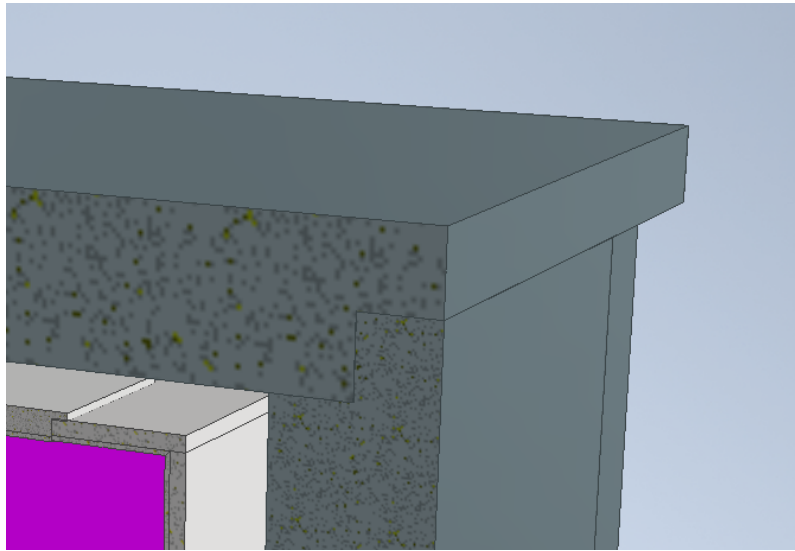


Abbildung 3.12: Schikane der Bleisegmente

Jedoch steht in diesem Fall die Wahl der verwendeten Legierung frei, sodass eine Verwendung von Hartblei ausgeschlossen werden kann. Dazu kommt, dass große Segmente an einem Stück mit dem Kran bewegt werden können oder verschiebbar gelagert werden können, wodurch in kurzer Zeit eine Seite des Instruments freigelegt werden kann. Die Verbindung zweier angrenzender Bleisegmente muss so gestaltet werden, dass ein Strahlendurchgang verhindert wird. Ein Feder-Nut-System wie bei Bleibausteinen ist jedoch für große Segmente ungeeignet, da es dazu führen könnte, dass die Segmente verkanten oder nur durch eine komplexe Bewegung entfernt werden können. Eine stufenförmige Geometrie (Abb. 3.12) würde die Entfernung eines Segments auf eine geradlinige Bewegung reduzieren.

Die Bleisegmente müssen gegen Umfallen gesichert werden. Dazu können die Bleisegmente beispielsweise miteinander verschraubt werden. In Blei geschnittene Gewinde haben aufgrund der hohen Duktilität eine geringe Traglast und Haltbarkeit. Daher ist es üblich Schraubverbindungen in Blei mittels Gewindeeinsätzen zu realisieren. Dafür wird im Blei eine Bohrung gefertigt, in die ein Gewindeeinsatz mit hohem Übermaß geschraubt wird. Durch das hohe Übermaß wird das Blei rund um den Gewindeeinsatz komprimiert und kaltverformt wodurch

es lokal eine höhere Festigkeit aufweist. In die Gewindeeinsätze können dann Schrauben mit passendem Gewinde eingeführt werden. Diese Schraubverbindung ist langlebig und kann, im Gegensatz zum geschnittenen Gewinde, beliebig oft gelöst und geschlossen werden. Da Gewindeeinsätze oft aus Stahl bestehen und Eisenmetalle in Neutronenanwendungen grundsätzlich zu vermeiden sind, sollten alternative Methoden zur Fixierung der Segmente in Betracht gezogen werden. Strebenprofile aus Aluminium, auch bekannt unter den Handelsnamen Item-Profil oder Bosch-Profil, sind dafür geeignet. Sofern das Gestell des Instruments mittels Strebenprofilen realisiert wird, könnte die Fixierung der Abschirmung mittels Strebenprofil eine einfache Lösung sein.

Um einen schnellen Wechsel der Probe zu gewährleisten, muss das Instrument einfach von oben zugänglich sein, da dort die Luke der Probenkammer sitzt. Zu diesem Zweck ist der Deckel der Bleiabschirmung verschiebbar auf Schienen gelagert (siehe Anhang 1). In Anbetracht der hohen Masse des Deckels von knapp 800 kg ist es erforderlich, eine adäquate Lagerung zu entwickeln. Praktikabler und anwenderfreundlicher ist es jedoch, den Deckel mittels Motorisierung oder Kraftübersetzung zu verschieben.

Besonderes Augenmerk muss auf die Abschirmung des Detektors gelegt werden. Da auch außerhalb des Instruments von einer Hintergrundstrahlung auszugehen ist, wird der Detektor zusätzlich zur Bleiabschirmung der Kammern, durch eine eigene Bleiumhausung abgeschirmt. Diese Bleiumhausung besitzt zusätzlich eine mindeste Wandstärke von 50 mm. Die Detektorabschirmung ist ein rechteckiger Block aus Blei mit einer Bohrung, in der der Detektor Platz findet. In dieser Detektorabschirmung befinden sich ebenfalls die Kollimatorringe aus Blei.

3.2.3 Beamstop

Bei der Bestrahlung einer Probe wird nur ein Bruchteil der Neutronen von der Probe absorbiert. Die nicht absorbierten Neutronen, welche sich noch in ihrer

ursprünglichen Flugbahn befinden, müssen somit hinter der Probe gestoppt und absorbiert werden. Für den Beamstop wird typischerweise Bor in unterschiedlichen Verbindungen als Neutronenabsorber verwendet. Gängig sind dabei z.B. Borcarbid oder boriertes Polyethylen. Beim Beamstop ist es nicht wichtig, ob der Neutronenabsorber aktiviert wird und Gammastrahlen emittiert, da der Beamstop geometrisch vom Detektor abgeschottet wird, sodass er nicht zur Hintergrundgammastrahlung beiträgt. Aus diesem Grund liegt der Beamstop für dieses PGNAA-Instrument ungefähr einen halben Meter hinter der Probenkammer in der Strahlachse. Durch ein Rohr, welches ebenfalls mit dem Vakuum der Probenkammer verbunden wird, ist gewährleistet, dass der Neutronenstrahl zwischen der Probenkammer und dem Beamstop nicht an den Atomen der Luft streuen kann. Da ein Beamstop mit Neutronenabsorber aus Bor Gammastrahlen emittiert, muss dieser mit einer Bleiabschirmung versehen werden, um den Detektor und andere benachbarte Instrumente vor der Gammastrahlung zu schützen. In einem Beispiel aus der Literatur wird angenommen, dass ein Neutronenstrahl mit einem Querschnitt von 10 cm^2 und einem Fluss von $10^7 \frac{1}{\text{cm}^{-2}\text{s}^1}$ auf einen Beamstop aus Bor trifft. Mit Hilfe weiterer Annahmen und Vereinfachungen wird für diesen Fall eine mindeste Abschirmdicke von 2,3 cm Blei vorgesehen. [1] Unter der Annahme, dass es sich in dem Beispiel um übliche Neutronenenergien für die Verwendung in einer PGNAA handelt, kann die angegebene Abschirmdicke als Orientierung für die Gammaabschirmung des Beamstops verwendet werden. Da an der Stelle des Beamstops ohnehin eine Gammaabschirmung von 10 cm für die in der Probe induzierte Gammastrahlung existiert, wird der Beamstop darüber hinaus nicht mehr gesondert abgeschirmt.

3.3 Probenhalter

Der Probenhalter soll die Probe linear in drei Achsen verschieben und zusätzlich in der vertikalen Achse drehen können. Er besteht aus zwei Unterbaugruppen. Zum einen gibt es die Bewegungseinheit, welche sich in der Probenhalterkammer



Abbildung 3.13: Beispiel eines Hexapods [18]

befindet und andererseits gibt es den Probenstisch, welcher mit der Bewegungseinheit verbunden ist und bis in die Probenkammer hineinragt.

3.3.1 Bewegungseinheit

Für die Bewegungseinheit werden zwei Lösungsoptionen untersucht. Zunächst wird die Manipulation mittels eines Hexapoden vorgestellt und anschließend wird anhand Linearaktuatoren eine Alternative aufgezeigt. Ein Hexapod (siehe Abb. 3.13) besteht aus zwei parallelen, horizontalen Platten. Eine starre Bodenplatte ist durch sechs Linearaktuatoren mit einer beweglichen, oberen Platte verbunden. Die Aktuatoren sind an jeweils drei Punkten auf den jeweiligen Platten angebracht. Durch eine komplexe, gleichzeitige Ansteuerung aller Aktuatoren kann die obere Platte in sechs Freiheitsgraden bewegt werden.

Hexapoden bringen jedoch für die Anwendung als Probenhalter eine Reihe an Nachteilen mit sich. Aufgrund der Bauweise eines Hexapoden ist eine Rotation der oberen Platte nur um wenige Grad, typischerweise 20° - 40° , möglich. Dies mag zwar ein Ausschlusskriterium in Anbetracht der geforderten Rotation

von 360° sein, jedoch ließe sich diese Funktion durch einen zusätzlichen Rotationstisch auf dem Hexapoden realisieren. Als weiterer Nachteil ist die geringe Verfügbarkeit passender Fahrwege anzuführen. Oft besitzen Hexapoden einen geringeren Fahrweg in der vertikalen Achse, als in den horizontalen Achsen, was auf die Bauweise zurückzuführen ist. [18] Dies ist für die Anwendung im PGNAA-Instrument ungeeignet, da in allen Achsen ein Fahrweg von 100 mm gefordert ist. Die zweite Option für die Bewegungseinheit ist ein 3-achsiges System aus Linearaktuatoren mit einem Rotationstisch. Diese Konstruktion hat den Vorteil, dass jede Achse auf den geforderten Fahrweg angepasst werden kann. So kann eine „maßgeschneiderte“ Bewegungseinheit konstruiert werden, die jeden Punkt der Anforderungsliste erfüllt, aber dennoch nicht überdimensioniert ist.

Die Bewegungseinheit muss vakuumtauglich sein, da in der Probenhalterkammer ebenfalls ein Vakuum herrscht. Im Kapitel der Probenhalterkammer wurde bereits erwähnt, dass an Bauteile für Vakuumanwendungen hohe Anforderungen gestellt werden. Diese sehen Primär vor, dass die Bauteile nicht ausgasen dürfen. Das Ausgasen flüchtiger Stoffe birgt folgende Risiken. Zum einen verzögert es die Bildung des Vakuums, da während des Auspumpens stetig gasförmige Substanzen abgegeben werden. Dies kann mehrere Stunden oder Tage in Anspruch nehmen. Zudem kann das Ausgasen dazu führen, dass Feststoffe porös werden. Kunststoffe können beispielsweise durch Ausgasen ihre Weichmacher verlieren, wodurch es eher zum Bruch kommt. Metalle enthalten auch flüchtige Substanzen und können durch Ausgasung an Belastbarkeit verlieren. Zuletzt ist das Ausgasen zu vermeiden, da es zur Hintergrundstrahlung innerhalb der Probenkammer beiträgt. Dem Ausgasen wird durch verschiedene technische Vorkehrungen entgegengewirkt. Zum einen werden Materialien verwendet, in denen natürlicherweise keine oder wenig flüchtige Stoffe gelöst sind. Das Metall der Wahl ist dabei üblicherweise eine Edelstahllegierung. Zudem spielt die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile eine Rolle. Je rauer eine Oberfläche ist, desto eher lagern sich flüchtige Substanzen an, welche sich erst im Vakuum wieder vom Bauteil lösen. So besitzen

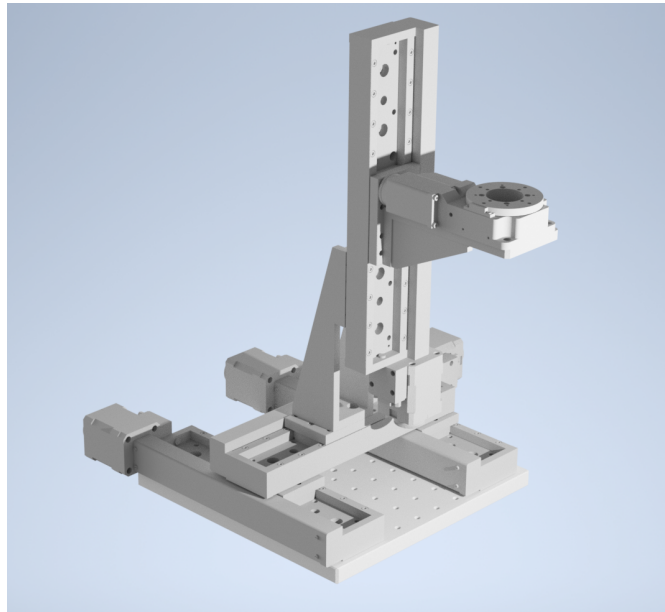


Abbildung 3.14: 3-Achsen Bewegungseinheit

Vakuumbauteile oft eine sehr glatte oder gar polierte Oberfläche. Eine Lackierung ist ebenfalls zu vermeiden, da sie auch flüchtige Stoffe enthalten kann. [21] Des Weiteren ist zu beachten, dass vakuumtaugliche Komponenten keine Gefäße oder Schläuche beinhalten dürfen, die dem Unterdruck nicht standhalten. Da die Vakuumtauglichkeit von Bewegungskomponenten in der Forschung und Industrie nicht unüblich ist, existieren geeignete Produkte. Für die Bewegungseinheit (Abb. 3.14) des PGNAA-Instruments werden Komponenten der Firma Standa gewählt. [20] Diese Auswahl ist nicht final, dient jedoch der Ermittlung geeigneter Dimensionen für die Probenhalterkammer.

3.3.2 Probentisch

Die Bewegungseinheit kommt in eine separate Kammer, die Probenhalterkammer, um sie effektiv vor streuenden Neutronen zu schützen. Dies ist notwendig, da die Bewegungseinheit aus Materialien besteht, welche bei Neutronenbestrahlung prompte Gammastrahlen emittieren. Um die Probe nun mit der Bewegungsein-

heit verbinden zu können, ist ein Probenstisch (Abb. 3.15) vorgesehen. Auf diesem Tisch wird die Probe Platz finden. Dieser Tisch ist über eine zylindrische Stange mit der Rotationseinheit der Bewegungseinheit verbunden. Der Teil des Tisches, welcher sich bei maximaler Auslenkung der Z-Achse in der Probenkammer befindet, sollte idealerweise keine Neutronen einfangen oder streuen. Solch ein Material existiert nicht, jedoch kann diese Eigenschaft annähernd erreicht werden. Polytetrafluorethylen, auch bekannt unter dem Handelsnamen Teflon, geht besonders wenig Reaktionen mit Neutronen ein. Aus diesem Grund ist es das Material der Wahl für Probenhalter oder Probenbefestigung in Neutronenanwendungen. [1] Allerdings besitzt Teflon eine sehr geringe Steifigkeit, daher besteht lediglich der Teller des Probenstischs und der obere Teil der zylindrischen Stange aus Teflon. Der untere Teil der Stange, welcher stets außerhalb der Probenkammer liegt, besteht aus Aluminium, welches eine höhere Steifigkeit als Teflon aufweist. Dies soll trotz der großen Länge der Stange und der etwaigen Reibung zwischen den ringförmigen Neutronenabsorbern eine genaue Positionierung der Probe ermöglichen. Die Platte und die zwei Teile der Stange des Probenstischs werden jeweils durch Gewinde miteinander verbunden. Dies ermöglicht zusätzlich einen Wechsel der Platte, was für spezielle Probenformen erforderlich ist.

3.4 Gamma-Detektor

Der zu verwendende Gamma-Detektor ist vorgegeben. In Anhang 3 befindet sich eine Zeichnung des Detektors und eine Zeichnung des Dewars inklusive Detektor. Von Interesse ist jedoch nur letzteres, da nur die äußeren Abmessungen der Baugruppe einen Einfluss auf die mechanische Konstruktion des Instruments haben. Im folgenden Unterkapitel wird die Bewegung des Detektors bzw. Dewars behandelt. Im darauffolgenden Unterkapitel wird die Konstruktion des Kollimators beleuchtet.

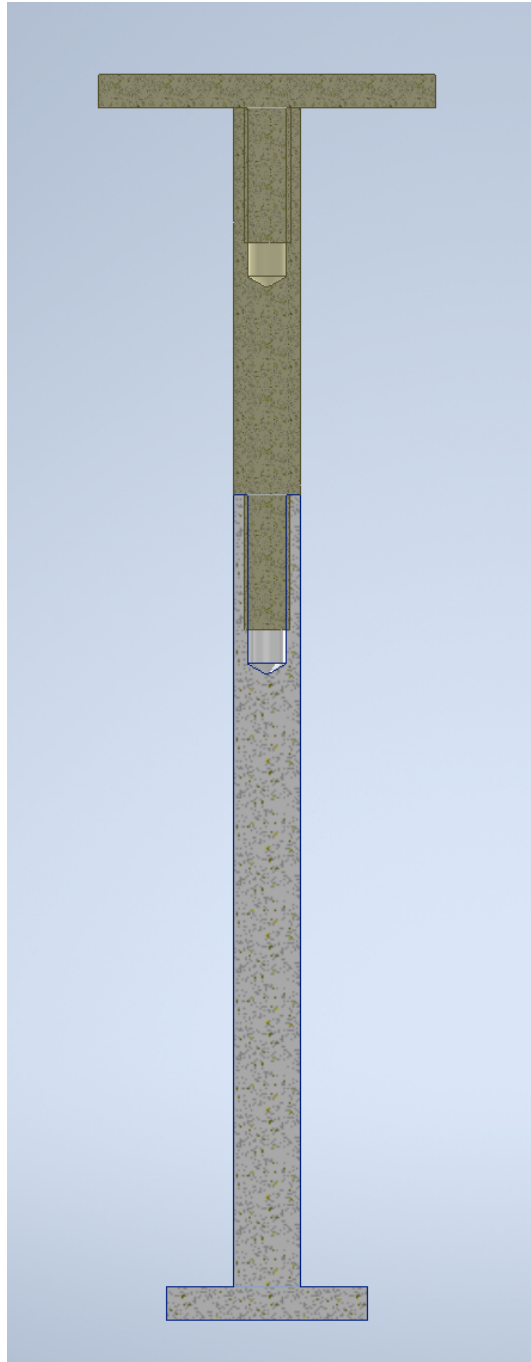


Abbildung 3.15: Probentisch aus Teflon (gelb) und Aluminium

3.4.1 Halter für Detektor und Dewar

Bei dem verwendeten Detektor handelt es sich um einen Germaniumdetektor. Diese Art von Detektor muss auf die Temperatur von siedendem Stickstoff (77 K) gekühlt werden, um Leckströme zu vermeiden, welche zur Zerstörung des Detektors führen könnten. Für die Kühlung ist der Detektor starr mit einem Stickstoffdewar verbunden. Der Detektor ist während den Messungen stets von einer Bleiabschirmung umgeben, wohingegen der Dewar zu jedem Zeitpunkt frei zugänglich ist. Aus diesem Grund geschieht die Bewegung des Detektors durch Manipulation des Dewars. Die Bewegung des Detektors ist erforderlich, um die Strahlungsintensität im Detektor regulieren zu können. Je weiter ein Detektor von der Strahlungsquelle entfernt ist, desto weniger Strahlung erfährt er. Außerdem ist eine Bewegung des Detektor notwendig, um Zugang zum Kollimator zu erhalten, damit dessen Kollimatorquerschnitt geändert werden kann. Um die erforderliche Bewegung zu ermöglichen, ist der Dewar auf einem Gestell mit zwei parallelen Führungsschienen gelagert.

3.4.2 Kollimator

Ein Kollimator ist eine Vorrichtung aus abschirmenden Material zur geometrischen Beschneidung eines Teilchen- oder Wellenstrahls. Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Kollimator für den Gammadetektor vorgesehen und muss daher das Gammastrahlenfeld beschneiden. Aus diesem Grund besteht auch der Kollimator aus Blei. Die Beschneidung der Gammastrahlen hat mehrere Zwecke. Zum einen lässt sich mittels verschieden großer Kollimatoröffnungen die Intensität der Gammastrahlung im Detektor regulieren. Dies wird vor allem bei homogenen Proben genutzt. Für inhomogene Proben besteht die Aufgabe des Kollimators primär darin, den Detektor auf ein bestimmtes Volumenelement der Probe zu fokussieren, ohne die Gammastrahlung anderer, irrelevanter Volumenelemente aufzunehmen. Die Gammastrahlung soll auf Kreisquerschnitte von 5, 10, 20, 30 und 40

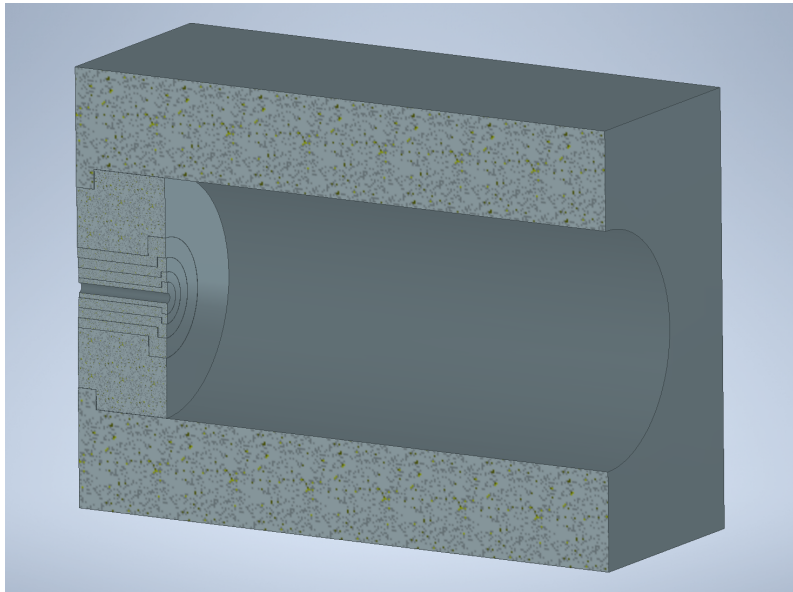


Abbildung 3.16: Kollimatorringe innerhalb der Detektorabschirmung (Halbschnitt)

mm beschnitten werden können. Um nicht für jede Kollimatoröffnungen einen eigenen massiven Bleiblock fertigen zu müssen, wird der Kollimator mittels verschachtelter Kollimatorringe (Abb 3.16) realisiert. Um Strahlendurchgang in den ringförmigen Schlitzen zwischen den Bleiringen zu verhindern, ist jeder Bleiring mit einer Stufe über den gesamten Umfang versehen. Die verschachtelten Ringe befinden sich in der Detektorabschirmung am nächsten Punkt zur Probe. Direkt dahinter liegt der Detektor. Um die Kollimatoröffnungen zu ändern, sprich einen oder mehrere Ringe zu entnehmen oder hinzuzufügen, muss der Detektor aus der Detektorabschirmung gezogen und zur Seite verschoben werden. Dann können mittels einer Lanze die Kollimatorringe entnommen oder eingesetzt werden.

4. DISKUSSION UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine konzeptionelle Ausarbeitung eines PGNAA Instruments für einen Strahlplatz an einer HBS Quelle erstellt worden. Sämtliche relevanten Anforderungen für dieses Instrument sind zusammengetragen und auf dieser Grundlage ist die Probenkammer mit einer grundlegenden Abschirmung dimensioniert worden. Für technische Anforderungen wie das Probenhandling, den Zugang zur Probe oder die Minimierung von Streuung innerhalb der Kammer sind verschiedene Konzepte erarbeitet und gegenübergestellt worden. Darüber hinaus sind erste Überlegungen für einen zweckmäßigen Aufbau einer Abschirmung und eines geeigneten Gestells erarbeitet und beschrieben. Diese Arbeit bildet somit eine umfassende Grundlage für eine mögliche nachfolgende Detailkonstruktion der PGNAA.

Im folgenden Kapitel werden Themen behandelt, welche bei der Detailkonstruktion des Instruments erneut untersucht werden müssen. Dabei handelt es sich um Sachverhalte, die innerhalb einer konzeptionellen Ausarbeitung nicht in ausreichender Tiefe betrachtet wurden. Dies beinhaltet beispielsweise das Prüfen errechneter Werte oder Abschirmgeometrien durch Simulationen. Des Weiteren müssen einige Komponenten untersucht werden, die aufgrund offener Parameter noch nicht oder nicht ausreichend beleuchtet wurden. Dazu zählt unter anderem das Gestell, aber auch die Gestaltung der Vakuumkammer inklusive der Dichtungen, Anschlüssen und Durchführungen. Schließlich werden Aspekte betrachtet, die einen sicheren und anwenderfreundlichen Betrieb des Instruments gewährleisten sollen.

4.1 Revision der Abschirmdicken

Die errechneten Materialstärken für den Neutronenabsorber und für Gammastrahlenabschirmung müssen erneut untersucht werden. Die Dicke des Neutronen-

absorbers wurde anhand gegebener Werte des Datenblatts berechnet und liefert dadurch eine hinreichende Belastbarkeit unter der Annahme eines homogenen, rein thermischen Neutronenstrahls. Sobald das tatsächliche Neutronenspektrum der Neutronenquelle bekannt ist, sollten die Berechnungen revidiert werden. Dies ist insbesondere wichtig, falls der Neutronenstrahl in realer Anwendung einen signifikanten Anteil an schnellen Neutronen besitzt, da unter diesen Umständen nicht mehr mit dem gegebenen makroskopischen Wirkungsquerschnitt gerechnet werden kann. Im Falle der Bleiabschirmung ist ebenfalls zu überprüfen, ob die berechnete Abschirmdicke ausreichend ist. Sie wurde so dimensioniert, dass etwa 99,1 % der Gammastrahlung abgeschirmt wird. Dies stellt für benachbarte Instrumente kein Problem dar, kann jedoch für den Detektor eine zu hohe Hintergrundstrahlung bedeuten. Dem wurde Rechnung getragen, indem der Detektor zusätzlich von seiner eigenen Abschirmung umgeben ist. In diesem Fall könnten jedoch geometrische Faktoren ins Gewicht fallen, die in der Berechnung nicht berücksichtigt wurden. Für diese Zwecke, aber auch für die Revision der Neutronenabsorberdicke ist eine Simulation zielführend. Um das Verhalten von Teilchen wie Neutronen oder Photonen zu untersuchen werden üblicherweise Simulationsalgorithmen wie MCNP oder FLUKA verwendet. Beide Algorithmen zählen zu der sogenannten Monte Carlo Simulation. Die MC-Simulation ist ein stochastisches Verfahren, in dem eine große Anzahl an zufälligen Reaktionen durchgeführt wird, um auf Grundlage des Gesetzes der großen Zahlen eine Vorhersage für den wahrscheinlichsten Ausgang der verketteten Reaktionen zu treffen. Dies liefert unter anderem präzise Information darüber, welchen Effekt Abschirmdicken und Abschirmgeometrien auf den Strahlendurchgang haben. [22]

4.2 Vakuumkammer

In der Detailkonstruktion der Vakuumkammern sollte erneut die Gestaltung der Seitenwände betrachtet werden. Die FEM-Simulation hat gezeigt, dass das Vakuum zu vernachlässigbaren Spannungen im Material führt. Jedoch entste-

hen Verschiebungen von ca. 1,5 mm. Eine Berippung aller Seitenwände ist nicht nötig, da die höchsten Durchbiegungen lediglich in den langen Seitenwänden der Probenhalterkammer vorkommen. Ob es relevant ist, diese Durchbiegung zu vermeiden und welchen Einfluss das auf die Dichtigkeit und den Schließmechanismus der Kammer hat, muss in der Detailkonstruktion untersucht werden. Jedoch ist eine Durchbiegung der Bodenplatte zu vermeiden, da sie die Basis für den Probenhalter bildet und eine möglichst gleich bleibende Position des Probenhalters zielführend ist. Wie eine Berippung der Wände realisiert werden kann, bleibt ebenfalls offen. Es ist üblich, Rippen zur Versteifung eines Bauteils aufzuschweißen. Dies kann aber durch die punktuelle Hitze des Schweißens zu Verformungen und Spannungen in den Seitenwänden führen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Seitenwände inklusive Rippen aus einer massiven Platte zu fräsen. Somit wird die Problematik durch Spannungen und Verformungen durch Schweißnähte umgangen, jedoch hat dieses Verfahren einen hohen Materialverlust zur Folge. In diesem Kontext könnten die relevanten Seitenwände auch direkt aus einem dickeren Material gefertigt sein. Nachteil dieser Option ist lediglich, dass sie zu einem höherem Gewicht führt. Dies ist jedoch in Anbetracht der schweren Bleiabschirmung von einigen Tonnen vernachlässigbar.

Eine geeignete Dichtung der Kammeröffnungen muss ebenfalls konstruiert werden. Für das schwache Vakuum eignen sich Elastomerdichtungen. Die Alternative sind Metalldichtungen, die bei einem schwachen Vakuum nicht notwendig sind. Metalldichtungen müssen plastisch verformt werden, um eine Dichtwirkung zu erzielen. Daher können sie auch nur einmal verwendet werden und müssen beim Öffnen der Dichtung getauscht werden. Dies widerspricht der Anforderung, einen schnellen Probenwechsel zu gewährleisten. Zudem benötigen Metalldichtungen wegen der benötigten plastischen Verformung einen hohen Anpressdruck des Schließmechanismus. Elastomerdichtungen werden schon bei geringen Anpressdrücken elastisch verformt, sodass sie eine dichtende Fläche bilden. Durch die

elastische Verformungen sind sie mehrfach verwendbar. Es müssen jedoch Nuten in den Bauteilen gefertigt werden, um die Dichtung dort einzusetzen.

Ein Schließmechanismus für die zu öffnenden Kammerwände muss ebenfalls innerhalb der Detailkonstruktion erarbeitet werden. Dazu zählt der Deckel der Probenkammer inklusive der Luke für den Probenwechsel und eine Seitenwand der Probenhalterkammer die Zwecks Wartung und Kalibrierung des Probenhalters entferntbar sein muss. Eine naheliegende Lösung ist beispielsweise, die Bauteile miteinander zu verschrauben. Dies ist jedoch im Fall der Probenkammer zu vermeiden, da sich dadurch Eisenmetalle innerhalb der Bleiabschirmung befinden, was zur Hintergrundstrahlung beitragen könnte. Durch das Vakuum werden die Wände der Öffnungen an die Kammer gepresst; dieser Effekt kann für den Verschluss der Seitenwände genutzt werden. Wird von einem Differenzdruck von 1 bar bzw. 100000 Pa ausgegangen, kann der Anpressdruck exemplarisch für die lange Seite (600 mm x 470 mm) der Probenhalterkammer berechnet werden:

$$F_{Anpress} = \Delta p \cdot A = 100000 \frac{N}{m^2} \cdot 0,6 m \cdot 0,47 m = 28000 N \quad (4.1)$$

Dies entspricht einem Gewicht von etwa 2800 kg. Somit hat das Vakuum das Potenzial, die Seitenwände durch den Anpressdruck in Position zu halten. Bei den Seitenwänden ist dies jedoch nicht praktikabel, da die Seitenwände bei nicht vorhandenem Vakuum nicht halten. Für den Deckel der Probenkammer könnte dies jedoch ein geeignetes Mittel sein, da sie ohnehin liegen.

Ein weiterer zu beachtender Punkt ist die Öffnung in der Seitenwand der Probenkammer (siehe Abb. 4.1), die zum Kollimator bzw. Detektor zeigt. Dort ist im aktuellen Konzept ein Loch in der Wand. Es muss untersucht werden, mit welchem Material und welcher Wandstärke dieses Loch zu schließen ist, damit die Kammern gasdicht sind. Dabei soll der Durchgang der Gammastrahlung nicht

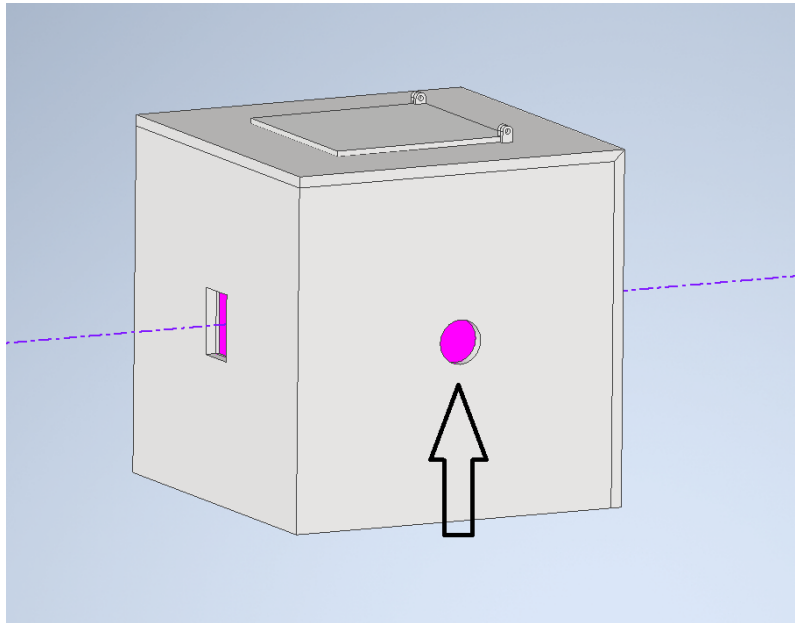


Abbildung 4.1: Loch in der Kammerwand

oder so wenig wie möglich beeinflusst werden. Möglicherweise ist es auch ausreichend die Wandstärke der Vakuumkammer an dieser Stelle zu reduzieren, sodass die Kammer an dieser Stelle gasdicht bleibt und trotzdem genügend Gammastrahlung durchgelassen wird.

4.2.1 Gestell

Das Gestell wurde in dieser Arbeit aufgrund der hohen Variabilität anderer Komponenten nicht in ausreichender Tiefe behandelt. Dazu zählt unter anderem das Gewicht und die Geometrie der Bleiabschirmung. Sollte sich in der Detailkonstruktion herausstellen, dass die Bleiabschirmung beispielsweise nur die Hälfte der berechneten Materialstärke benötigt, so reduziert sich auch das Gewicht um die Hälfte. Bei einem aktuellen Gewicht der Bleikonstruktion von etwa 2,6 Tonnen, hätte dies Auswirkungen auf die Gestalt des Gestells. Zudem hängt die Gestaltung des Gestells davon ab, welche Anschlüsse und Durchführungen an welcher Stelle der Kammern benötigt werden. Eine Konstruktion des Gestells ließe sich

auf verschiedene Arten realisieren. Beispielweise wäre eine Schweißkonstruktion, oder eine Konstruktion mittels Strebenprofil-Baukasten möglich. Die Strebenprofilkonstruktion hat den Vorteil, dass Änderungen an der Konstruktion leicht vorgenommen werden können. Ein rudimentärer Aufbau eines Gestells aus Strebenprofil für das Instrument ist in Anhang 1 abgebildet. Zudem bieten viele Anbieter von Strebenprofilkonstruktionen, wie Item oder Bosch-Rexroth, eine Reihe an kompatiblen mechanischen und elektrischen Bauteilen an. Damit ist beispielsweise die Konstruktion der Detektormanipulation einfach zu implementieren.

4.3 Bedienbarkeit und Sicherheit

Im folgenden Unterkapitel werden Sachverhalte diskutiert, die eine Auswirkung auf die Bedienbarkeit und Sicherheit des Instruments haben. Für die Bedienbarkeit steht im Vordergrund, dass den künftigen Experimentatoren wegen der begrenzten Strahlzeit ein schneller und reibungsloser Wechsel der Probe gewährleistet wird. Zudem soll der Detektor mit geringem Aufwand verschoben bzw. aus seiner Abschirmung gezogen werden können. Im Kontext der Sicherheit werden mögliche Risiken durch bewegende und fallende Lasten, z.B. Teile der abnehmbaren bzw. beweglichen Abschirmung, sowie die Risiken durch die Verwendung und Befüllung des Stickstoffdewars beleuchtet.

4.3.1 Bedienbarkeit

Um einen schnellen Wechsel der Probe zu gewährleisten, sollte das innere der Probenkammer schnell und werkzeuglos zugänglich sein. Für den Zugang muss zunächst der Deckel der Bleiabschirmung verschoben werden. Zu diesem Zweck ist er auf Schienen gelagert. Je nach Reibungskoeffizient der Lagerung kann es notwendig sein, die Bewegung durch eine Kraftübersetzung, z.B. mit Hilfe einer manuellen Kurbel oder Winde, zu realisieren. Alternativ kann die Bewegung auch durch einen Motor geschehen. Im gleichen Zug muss jedoch auch beachtet

werden, wie der Deckel gebremst wird. Aufgrund der hohen Masse besitzt der Deckel selbst bei geringen Geschwindigkeiten einen hohen Impuls. Sind die Begrenzungen der Schiene zu schwach dimensioniert, könnte der Deckel diese bei einer Kollision durchbrechen und im schlimmsten Fall vom Gestell fallen. Dieser Impuls könnte beispielsweise durch Dämpfer oder Bremsen an den Enden der Schienen absorbiert werden. Sobald der Deckel der Bleiabschirmung verschoben ist, ist die Probenkammer zugänglich. Da diese mit einer Luke ausgestattet ist, ist eine werkzeuglose Öffnung gewährleistet.

Um den Kollimator wechseln zu können, ist es notwendig einen Zugang zum inneren der Detektorabschirmung zu schaffen. Dazu muss der Detektor zunächst rückwärts aus seiner Abschirmung gezogen werden. Danach befindet sich der Detektor direkt vor der Öffnung der Detektorabschirmung. Deswegen muss der Dewar samt Detektor noch seitlich verschoben werden. Dies ließe sich mit zwei senkrecht zueinander liegenden Lineareinheiten realisieren. Alternativ könnte auch eine Lineareinheit in Kombination mit einer Rotationseinheit verwendet werden. Dafür liegt die Lineareinheit auf der Rotationseinheit und wird nach dem Herausfahren des Detektors aus der Abschirmung um 90° gedreht. Anschließend kann dann die lineare Bewegung in der zweiten Achse erfolgen. Der Detektor soll dabei nach dem Kollimatorwechsel an seine ursprüngliche Position zurückkehren. Grund dafür ist, dass nach einem Kollimatorwechsel alle anderen Parameter der Messung üblicherweise gleich bleiben sollen.

4.3.2 Sicherheit

Die Risiken durch den beweglichen Deckel der Bleiabschirmung wurden zuvor beleuchtet. Die übrigen Bestandteile der Bleiabschirmung müssen jedoch noch betrachtet werden. Bei einigen Teilen der Bleiabschirmung kann es ebenfalls notwendig werden, dass diese bewegt werden müssen. Dies kann wegen der hohen Masse nur durch einen Kran geschehen. Dazu muss eine belastbare Verbindung

zwischen Bleisegment und Kran entstehen. Dafür werden üblicherweise Ösen an der Last angebracht. Diese können beispielweise verschraubt werden. So ist es naheliegend, dass die Gewindeeinsätze für die Fixierung der Abschirmung auch für die Befestigung von Kranösen verwendet werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Gewindeeinsätze ausreichend Tief im Blei verschraubt sind, denn für die Fixierung der Bleisegmente ist keine hohe Belastbarkeit gefordert.

Ein weiteres Risiko birgt die Verwendung von flüssigem Stickstoff zur Kühlung des Detektors. Zum einen muss sichergestellt sein, dass der Dewar nicht vom Gestell fallen kann. Dazu ist vorgesehen, eine adäquate Einspannung zu konstruieren, die es auch ermöglicht den Dewar zu arretieren. Zudem muss der Stickstoffdewar regelmäßig nachgefüllt werden. Die Öffnung des Dewars liegt knapp 2 m über dem Boden, daher ist es sinnvoll für die Befüllung auf die gleiche Ebene wie der Dewar zu gelangen. Da der Detektor schon in zwei Achsen verfahren muss, ist es mit hohem Aufwand verbunden, einen zusätzlichen senkrechten Fahrweg zu implementieren. Eine einfache Lösung wäre die Verwendung einer erhöhten Plattform für die befüllende Person. Je nach Lage der Plattform könnte diese auch für den Probenwechsel benutzt werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Molnár, G.,Belgya, T., Révay, Z. (2004). *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers

- [2] T. Brückel, T. Gutberlet (2020). *Conceptual Design Report Jülich High Brilliance Neutron Source (HBS)*. Jülich: Forschungszentrum Jülich, S. 7-45, 134-135, Verfügbar auf: <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/JCNS/JCNS-2/EN/Conceptual-Design-Report-HBS.html> [abgerufen am 06.07.2021]

- [3] Canha, N., Justino, A.R., Galinha, C. et al. *Elemental characterisation of native lichens collected in an area affected by traditional charcoal production*. J Radioanal Nucl Chem 325, 293–302 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07224-3>

- [4] E. B. Paul (1969) *Nuclear and particle physics*. Amsterdam, Netherlands: North-Holland Pub. Co.

- [5] Havenith, A. et al.(2020). *QUANTOM - Non-destructive scanning of waste packages for material characterization*. EPJ Web of Conferences. 225. 06013. [10.1051/epjconf/202022506013](https://doi.org/10.1051/epjconf/202022506013).

- [6] designworldonline.com (2011) *BellowsTech Defines Edge Welded Bellows Technology [online]*. Verfügbar auf: <https://www.designworldonline.com/bellowstech-defines-edge-welded-bellows-technology/> [abgerufen am 19.07.2021]

-
- [7] VACOM *Produktkatalog* (2021) Verfügbar auf: <https://www.vacom.de/downloads/vacom-produktkatalog?download=3241:vacom-produktkatalog-komplett> [abgerufen am 19.07.2021]
- [8] beamtec.de *Vacuum Rotary Feedthroughs* [online] Verfügbar auf: <https://www.beamtec.de/en/vacuum-feedthroughs/> [abgerufen am 20.07.2021]
- [9] apexvacuum.com *6-Way Cube Conflat Flangeds* [online] Verfügbar auf: <https://apexvacuum.com/product/6-way-cube-conflat-flanged/> [abgerufen am 20.07.2021]
- [10] einsatzleiterwiki.de *Karlsruher Nuklidkarte* [online] Verfügbar auf: https://sync.einsatzleiterwiki.de/lib/exe/fetch.php?media=cbrn:atomar:nuklidkarte_deutsch.png [abgerufen am 20.07.2021]
- [11] gesetze-im-internet.de *Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung* [online] Verfügbar auf: https://www.gesetze-im-internet.de/strlschv_2018/ [abgerufen am 30.07.2021]
- [12] ESFRI Physical Sciences and Engineering Strategy Working Group - Neutron Landscape Group (2016) *Neutron scattering facilities in Europe Present status and future perspectives Vol. 1* [online] Mailand: Dipartimento di Fisica Verfügbar auf: https://www.esfri.eu/sites/default/files/NGL_CombinedReport_230816_Complete%20document_0209-1.pdf [abgerufen am 05.08.2021]
- [13] lemerpax.com *NEUTRON-ABSORBING MATERIALS MATERIALS FOR THERMALISATION AND CAPTURE OF DIFFERENT RANGES OF NEUTRON ENERGIES* [online] Verfügbar auf: https://www.lemerpax.com/web/wp-content/uploads/2017/03/2018-06_neutron-absorbing-materials-catalogue-uk.pdf [abgerufen am 03.08.2021]

- [14] johncaunt.com *Lithium Polyethylene JC215* [online] Verfügbar auf: <https://johncaunt.com/products/lithium-polyethylene/> [abgerufen am 03.08.2021]
- [15] Jaeger R.G. et al. (1968). *Engineering Compendium on Radiation Shielding* Volume I Shielding Fundamentals and Methods. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag
- [16] DIN 25407-1:2011-06 *Abschirmwände gegen ionisierende Strahlung – Teil 1: Bausteine*
- [17] DIN 17640-1:2004-02 *Bleilegierungen für allgemeine Verwendung*
- [18] physikinstrumente.com *H-850.V Vacuum-Compatible 6-Axis Hexapod* [online] Verfügbar auf: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/parallel-kinematic-hexapods/h-850v-vacuum-compatible-6-axis-hexapod-412418501/> [abgerufen am 15.08.2021]
- [19] strahlungstechnik.melit.ch *Bleibausteine nach DIN 25407* [online] Verfügbar auf: <https://strahlungstechnik.melit.ch/produkte-detail/bleibausteine/> [abgerufen am 20.08.2021]
- [20] standa.lt *Vacuum series 7 - Vacuum Compatible Manual Stages* [online] Verfügbar auf: https://www.standa.lt/products/catalog/translation_rotation?item=368&prod=Vacuum-Compatible-Manual-Stages [abgerufen am 20.08.2021]
- [21] Diels K., Jaeckel R. (1962). *Leybold Vakuum-Taschenbuch* Zweite neubearbeitete und erweiterte Auflage, S. 234 ff, Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag
- [22] Elimelech M., Gregory J., Jia X., Williams R.A. (1995). *Particle Deposition and Aggregation / Measurement, Modelling and Simulation* Kapitel 7 und 8, Woburn (MA), Vereinigte Staaten: Butterworth Heinemann

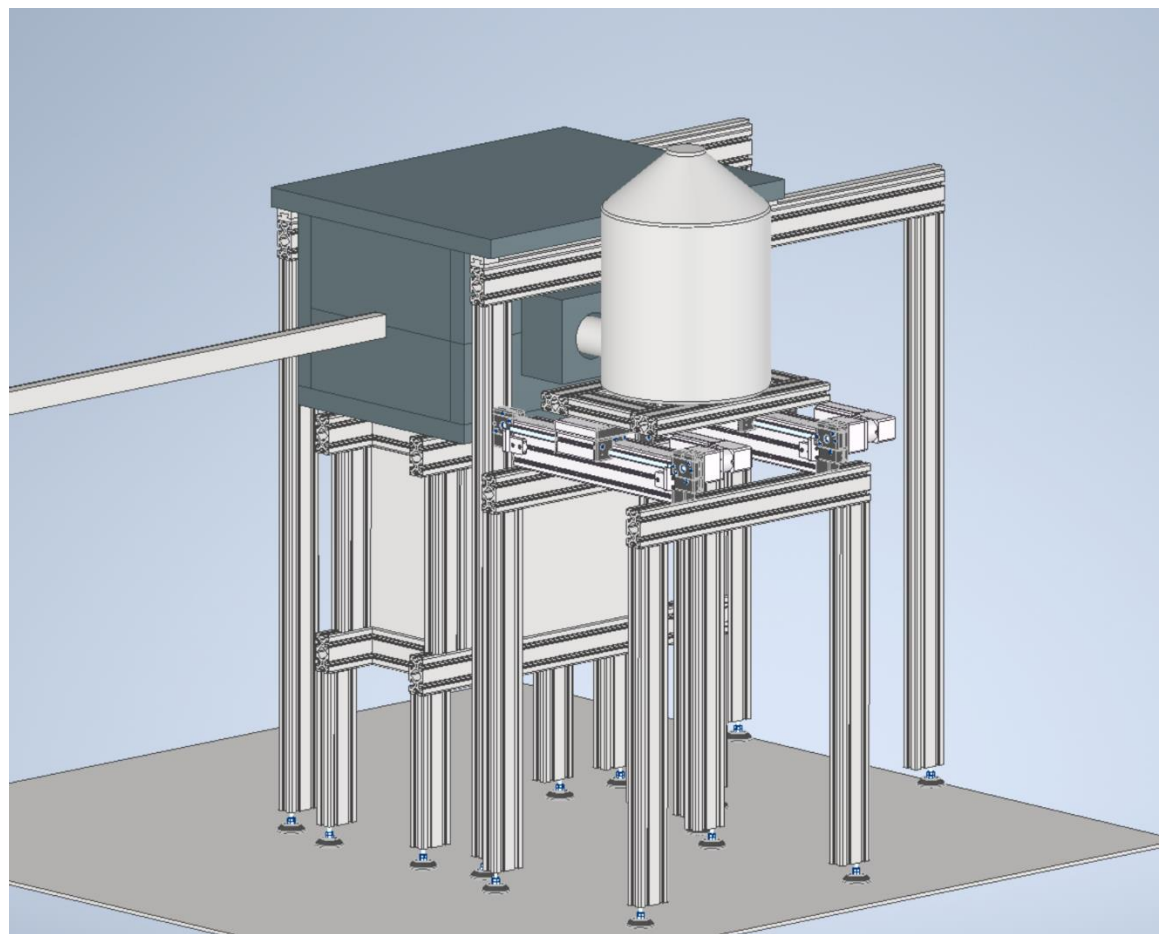
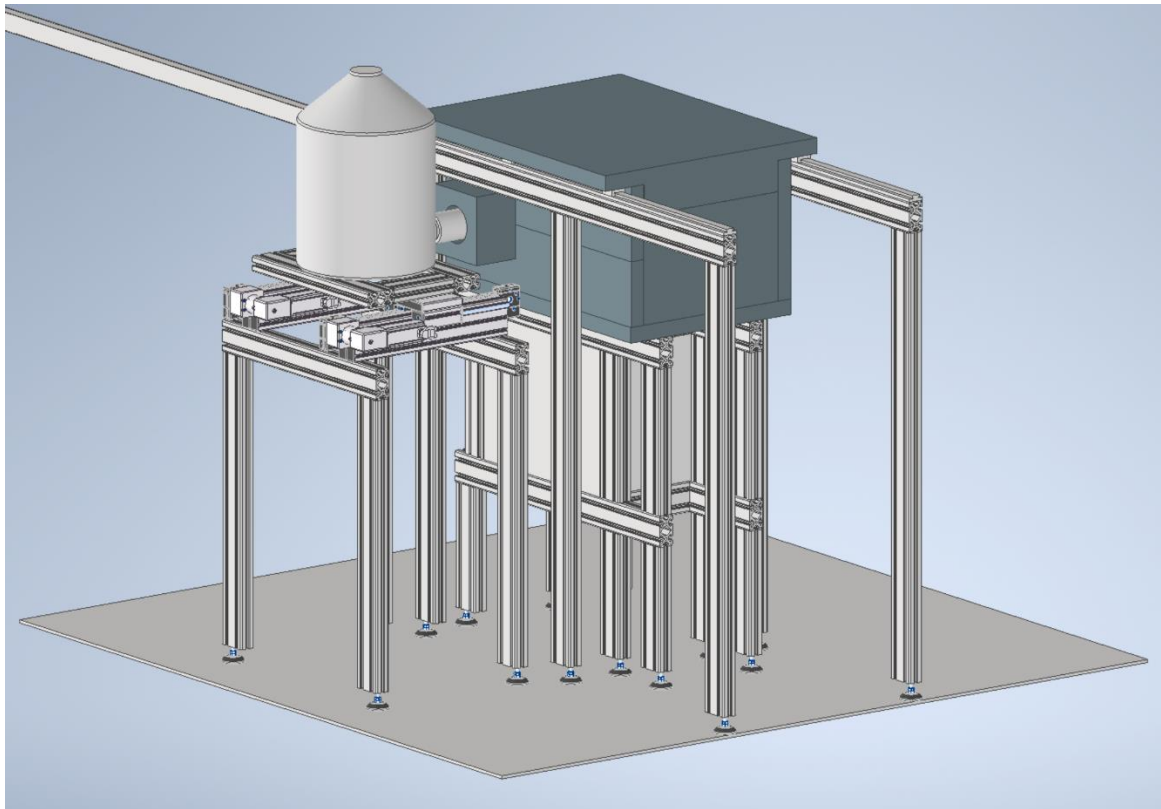
5. ANHANG

Anhang 1: Abbildungen der CAD-Konstruktion

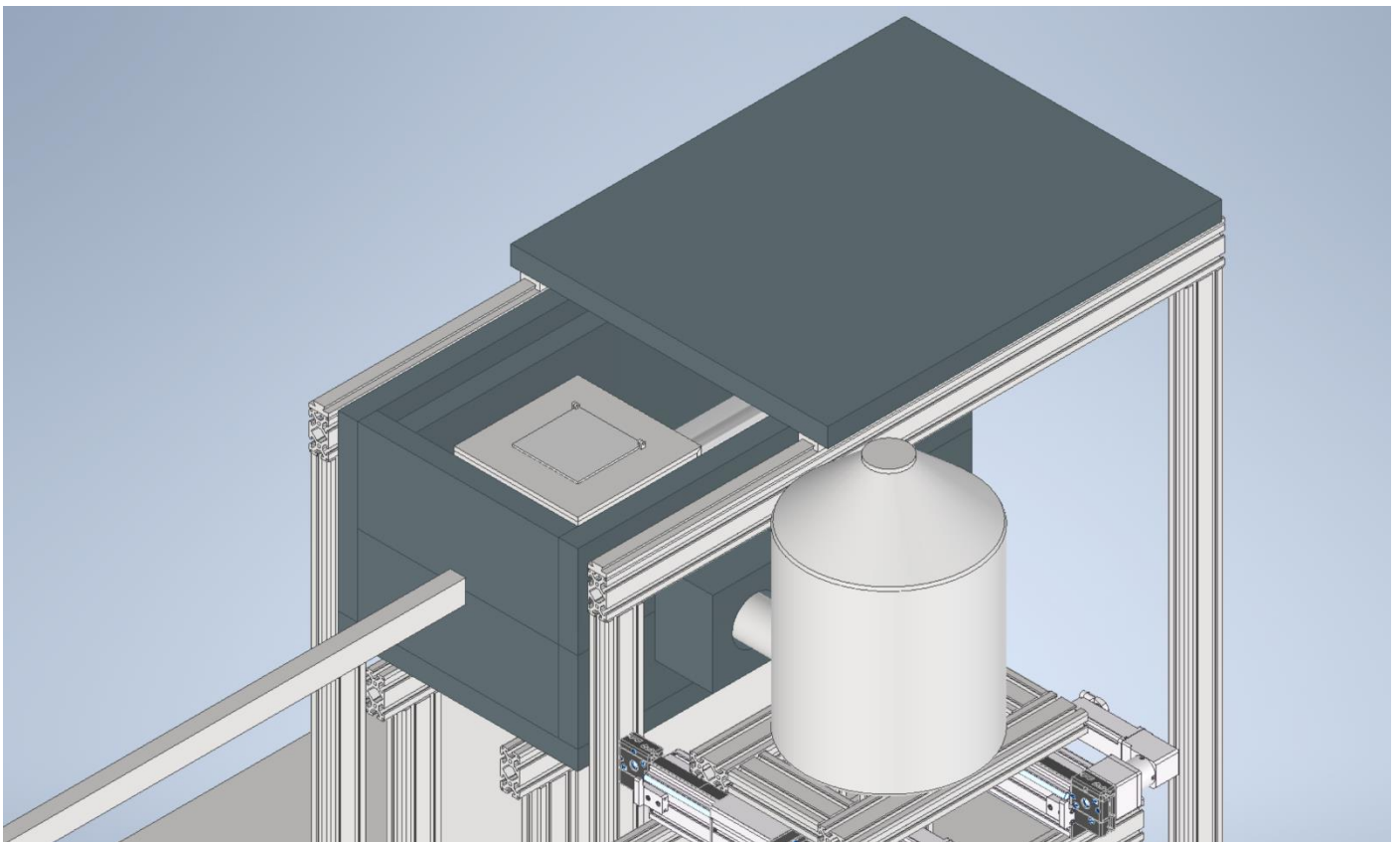
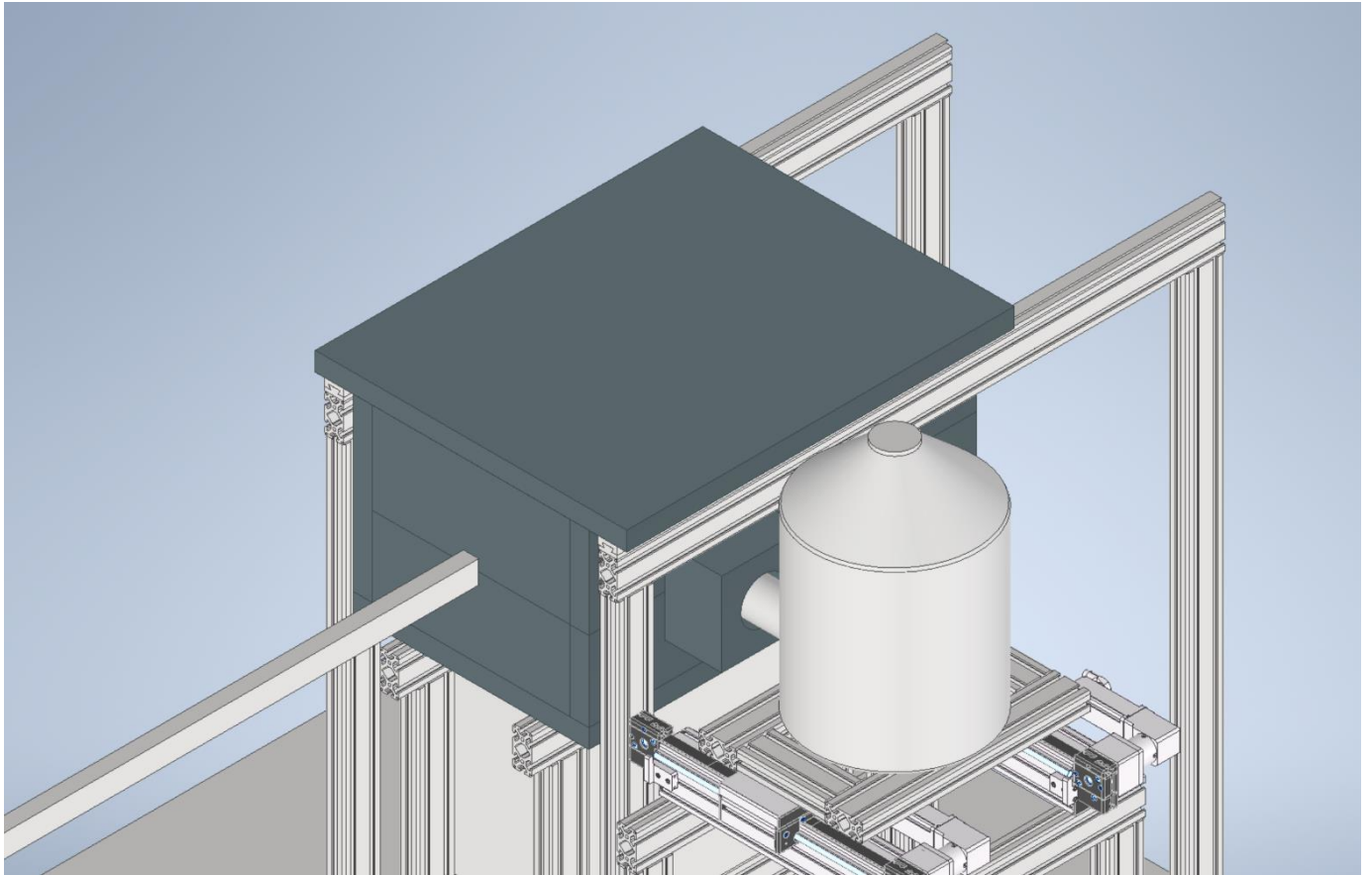
Anhang 2: Stress Analysis Reports

Anhang 3: Technische Zeichnungen des Detektors

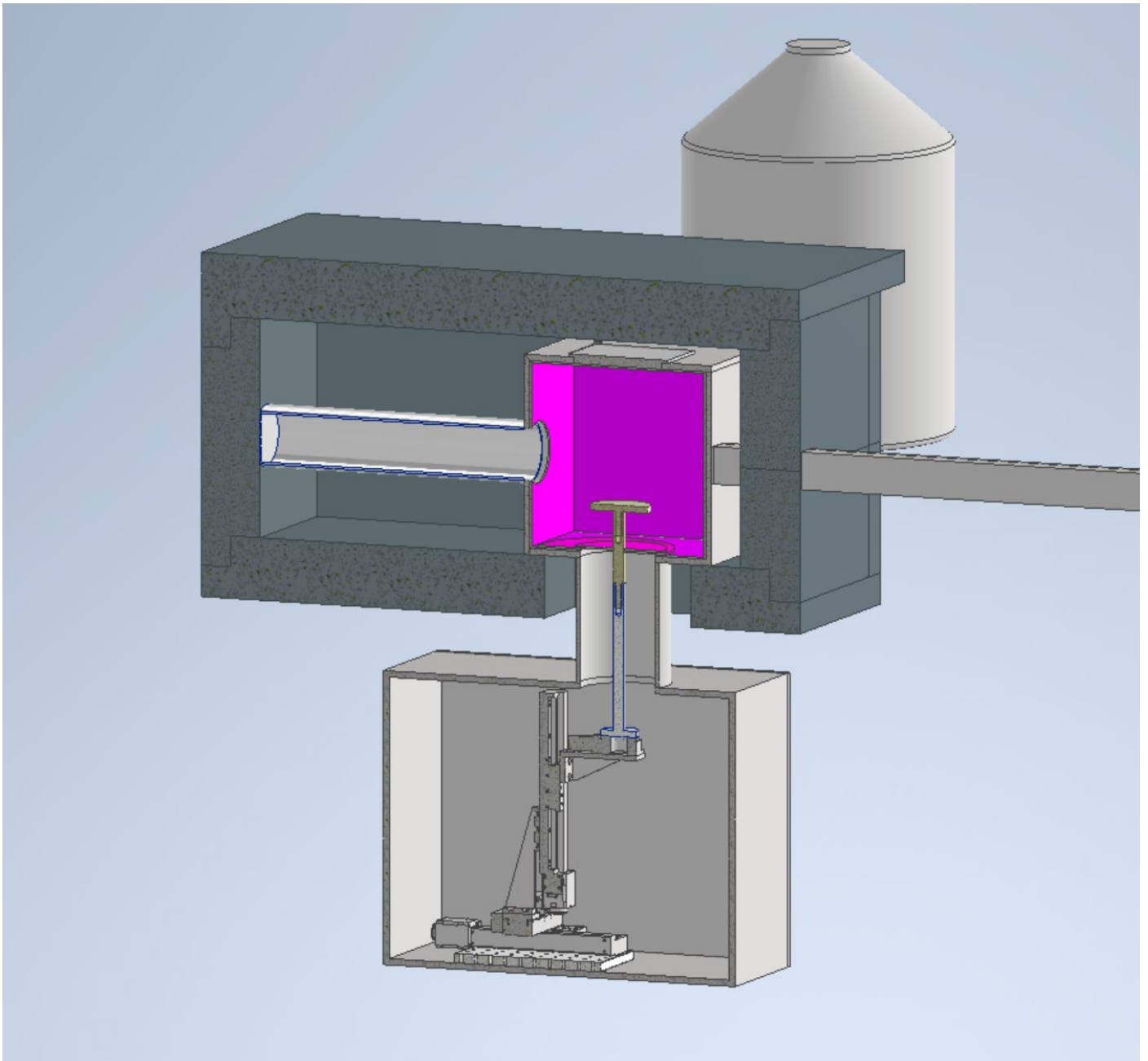
Rudimentärer Aufbau des Gestells aus Aluminium-Strebenprofil



Verschiebbarer Deckel der Bleiabschirmung, geschlossen und geöffnet



Abschirmung des Instruments im Halbschnitt



Stress Analysis Report - Kammer Dummy unberippt



Analyzed File:	Kammer_Dummy_2_unberippt.ipt
Autodesk Inventor Version:	2022 (Build 260153070, 153G)
Creation Date:	23.08.2021, 18:44
Study Author:	Maxim Marzen
Summary:	

Static Analysis:1

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Study Type	Static Analysis
Last Modification Date	22.08.2021, 21:47
Model State	Master
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

iProperties

Physical

Material	Aluminum 6061
Density	2,7 g/cm ³
Mass	54,0059 kg

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,01
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,02
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Material(s)

Name	Aluminum 6061	
General	Mass Density	2,7 g/cm ³
	Yield Strength	275 MPa
	Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Stress	Young's Modulus	68,9 GPa

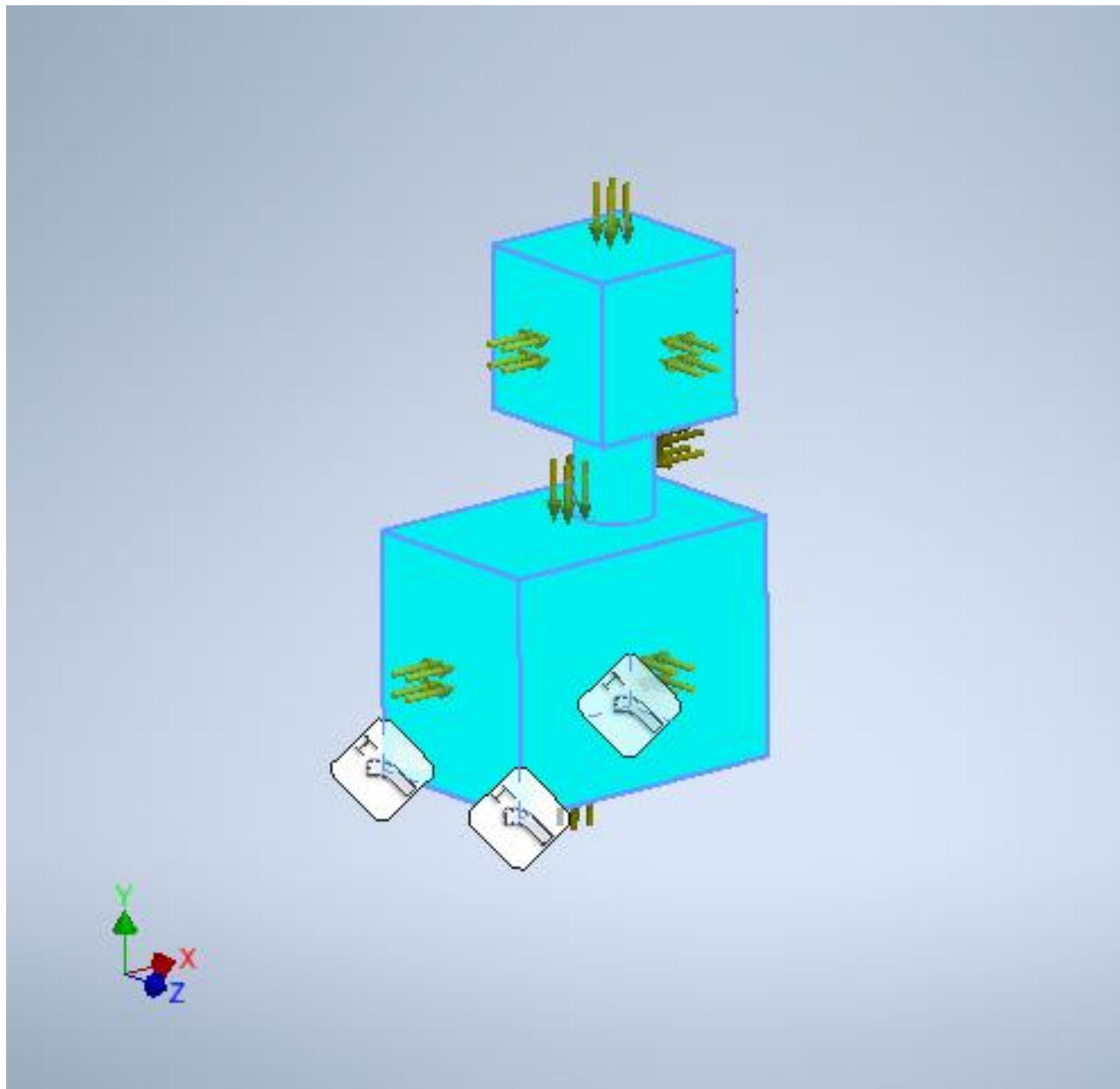
	Poisson's Ratio	0,33 ul
	Shear Modulus	25,9023 GPa
Part Name(s)	Kammer_Dummy_2_unberippt.ipt	

Operating conditions

Pressure:1

Load Type	Pressure
Magnitude	0,100 MPa

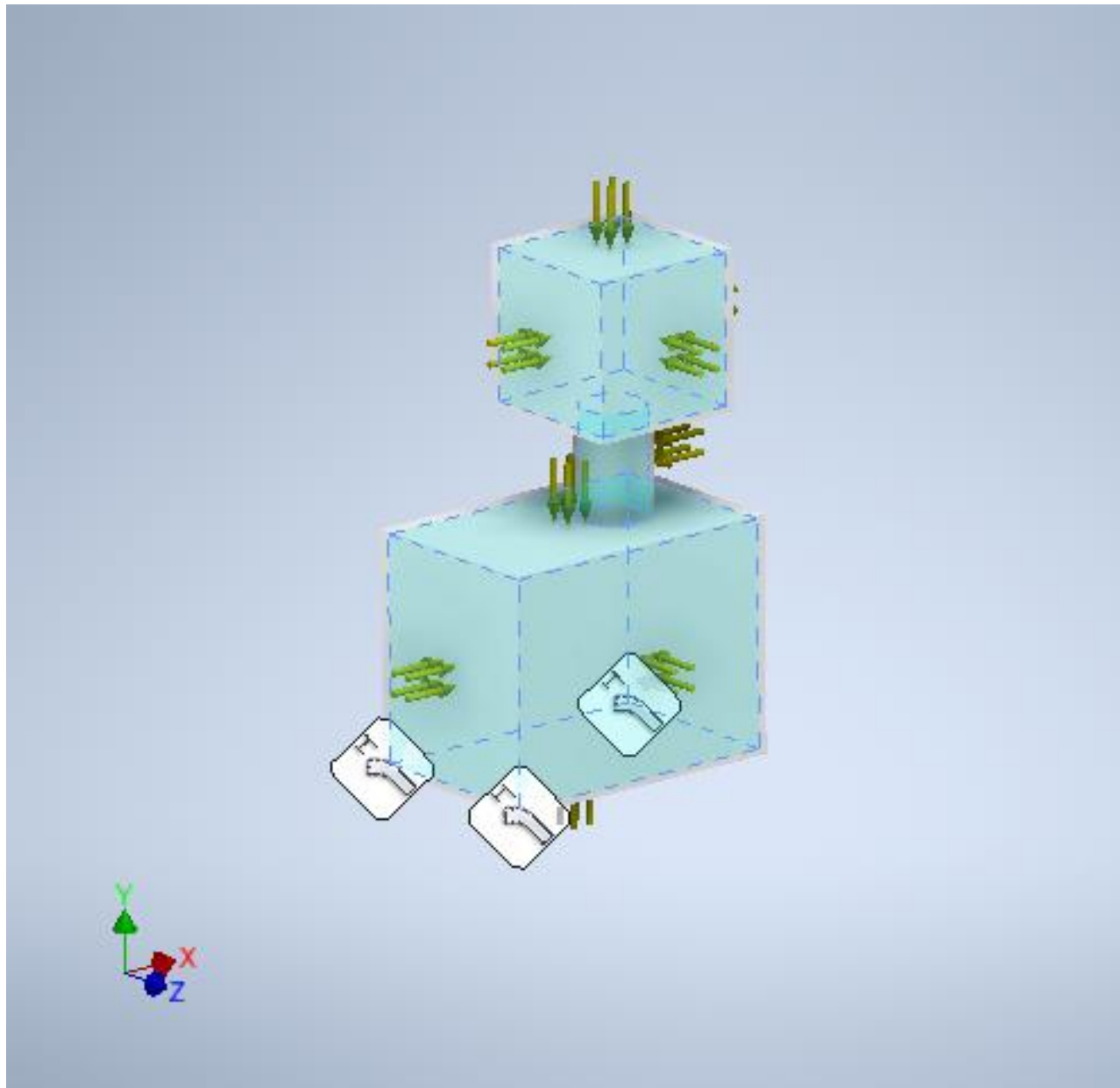
Selected Face(s)



Pressure:2

Load Type	Pressure
Magnitude	0,000 MPa

Selected Face(s)



Results

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	20002200 mm ³	
Mass	54,0059 kg	
Von Mises Stress	0,0137187 MPa	83,3339 MPa
Displacement	0 mm	1,48275 mm

Figures

Von Mises Stress

Type: Von Mises Stress

Unit: MPa

23.08.2021, 18:44:01

83,33 Max



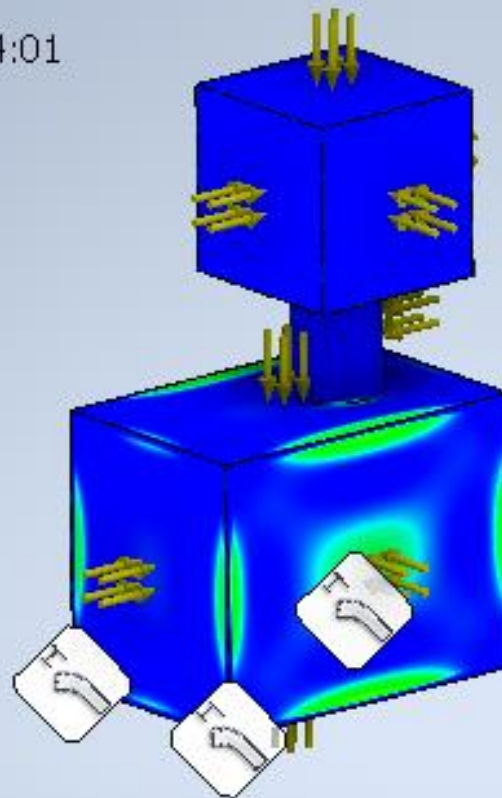
66,67

50,01

33,34

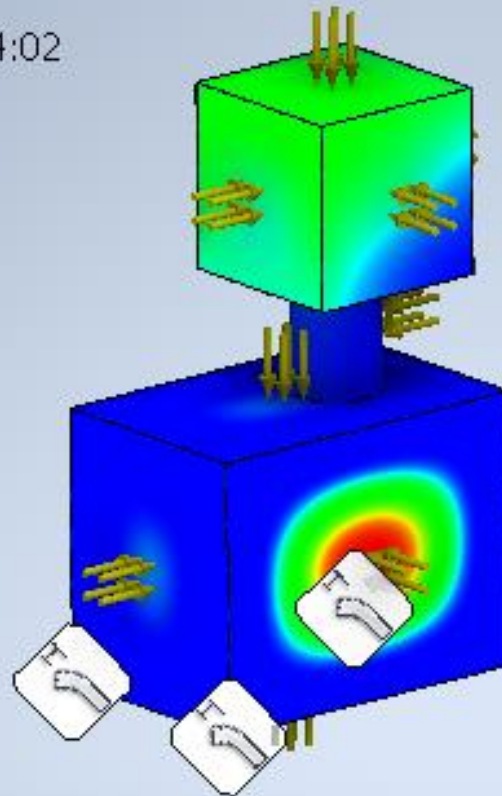
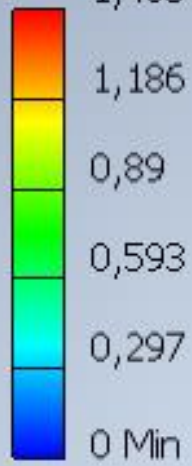
16,68

0,01 Min



Displacement

Type: Displacement
Unit: mm
23.08.2021, 18:44:02
1,483 Max



C:\Users\maxim\OneDrive - Fachhochschule Aachen\FZ\JCNS\Winter
2021\PGAA\Konstruktion\FEM\Kammer_Dummy_2_unberippt.ipt

Stress Analysis Report - Kammer Dummy berippt



Analyzed File:	Kammer_Dummy_2_berippt.ipt
Autodesk Inventor Version:	2022 (Build 260153070, 153G)
Creation Date:	23.08.2021, 18:45
Study Author:	Maxim Marzen
Summary:	

Static Analysis:1

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Study Type	Static Analysis
Last Modification Date	22.08.2021, 22:33
Model State	Master
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

iProperties

Physical

Material	Aluminum 6061
Density	2,7 g/cm ³
Mass	64,9993 kg

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

Mesh settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,01
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,02
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Material(s)

Name	Aluminum 6061	
General	Mass Density	2,7 g/cm ³
	Yield Strength	275 MPa
	Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Stress	Young's Modulus	68,9 GPa
	Poisson's Ratio	0,33 ul

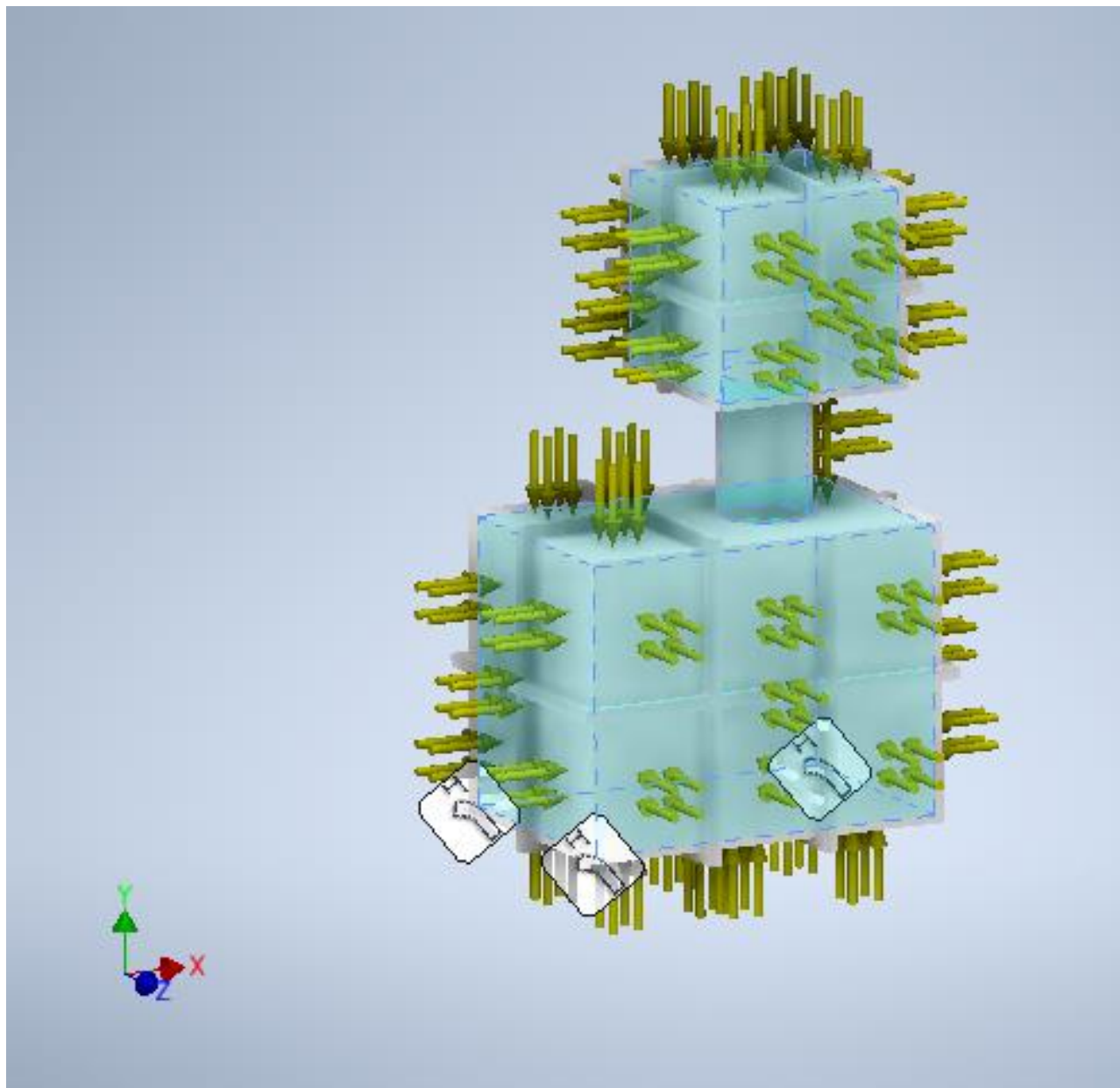
	Shear Modulus	25,9023 GPa
Part Name(s)	Kammer_Dummy_2_berippt.ipt	

Operating conditions

Pressure:2

Load Type	Pressure
Magnitude	0,000 MPa

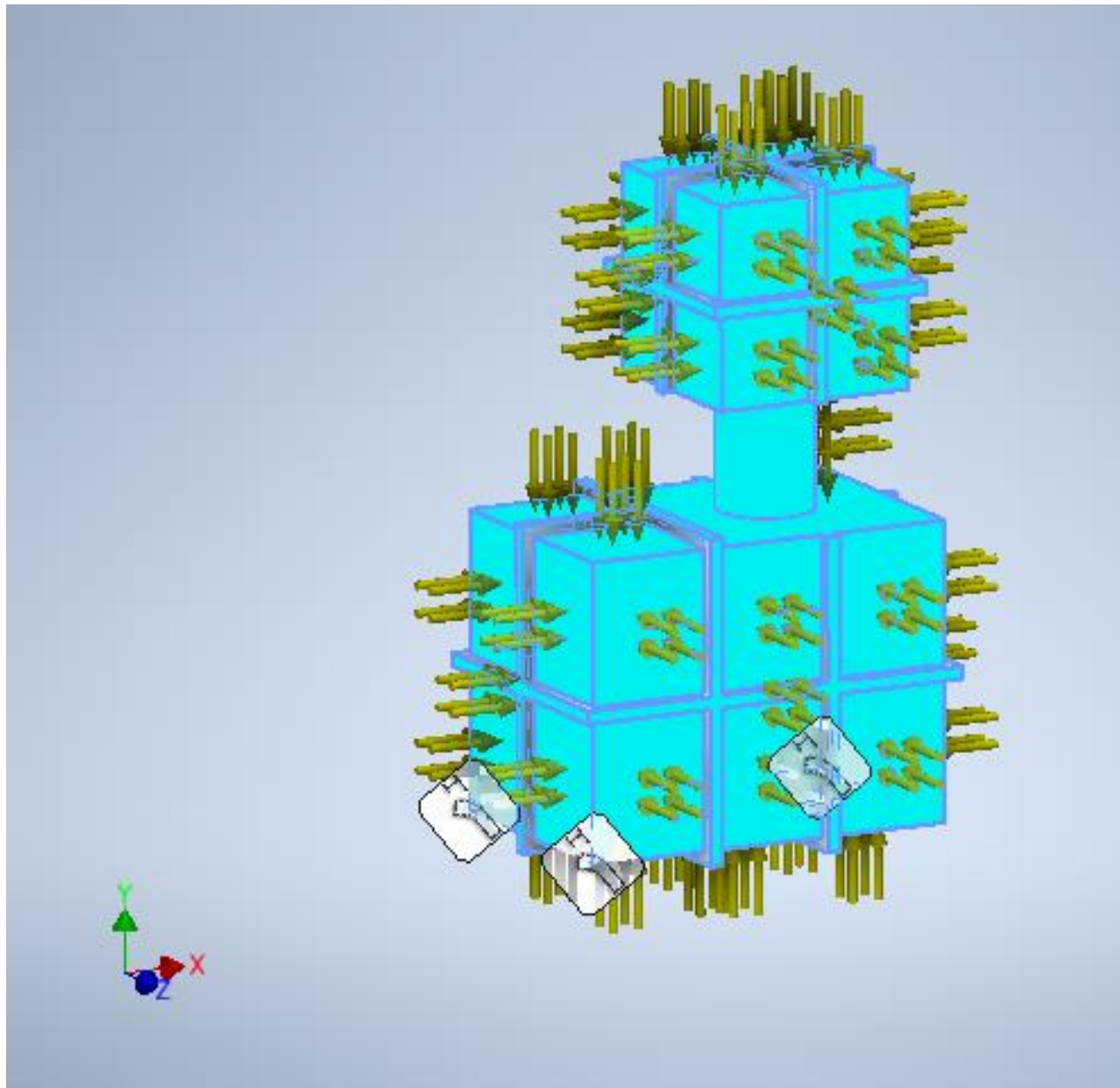
Selected Face(s)



Pressure:1

Load Type	Pressure
Magnitude	0,100 MPa

Selected Face(s)



Results

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	24073800 mm ³	
Mass	64,9993 kg	
Von Mises Stress	0,0156213 MPa	69,3247 MPa
Displacement	0 mm	0,641782 mm

Figures

Von Mises Stress

Type: Von Mises Stress

Unit: MPa

23.08.2021, 18:45:09

69,32 Max



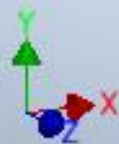
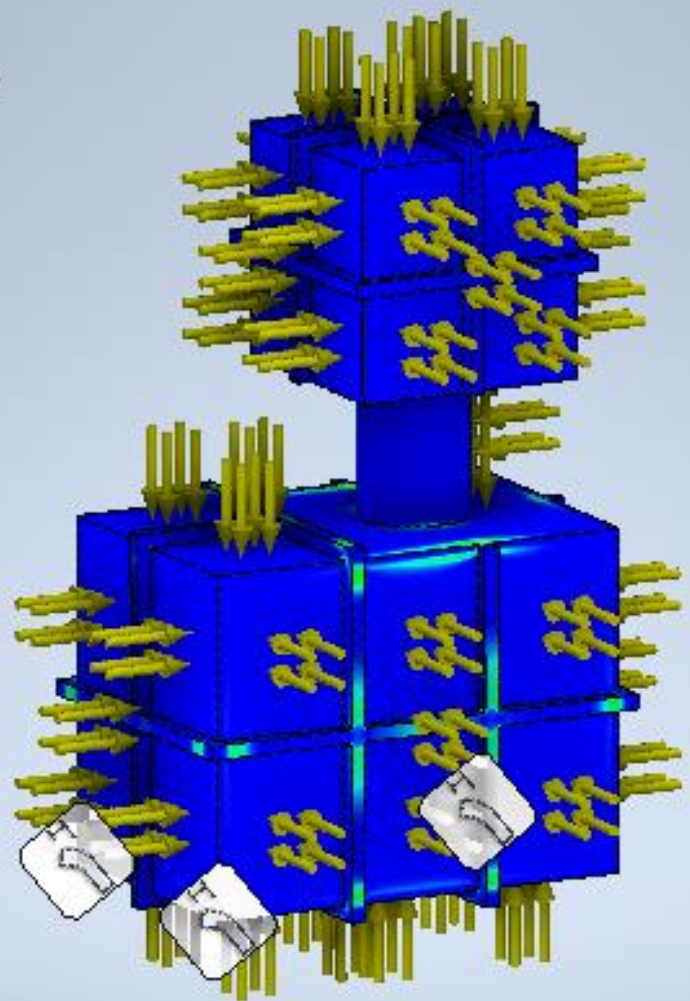
55,46

41,6

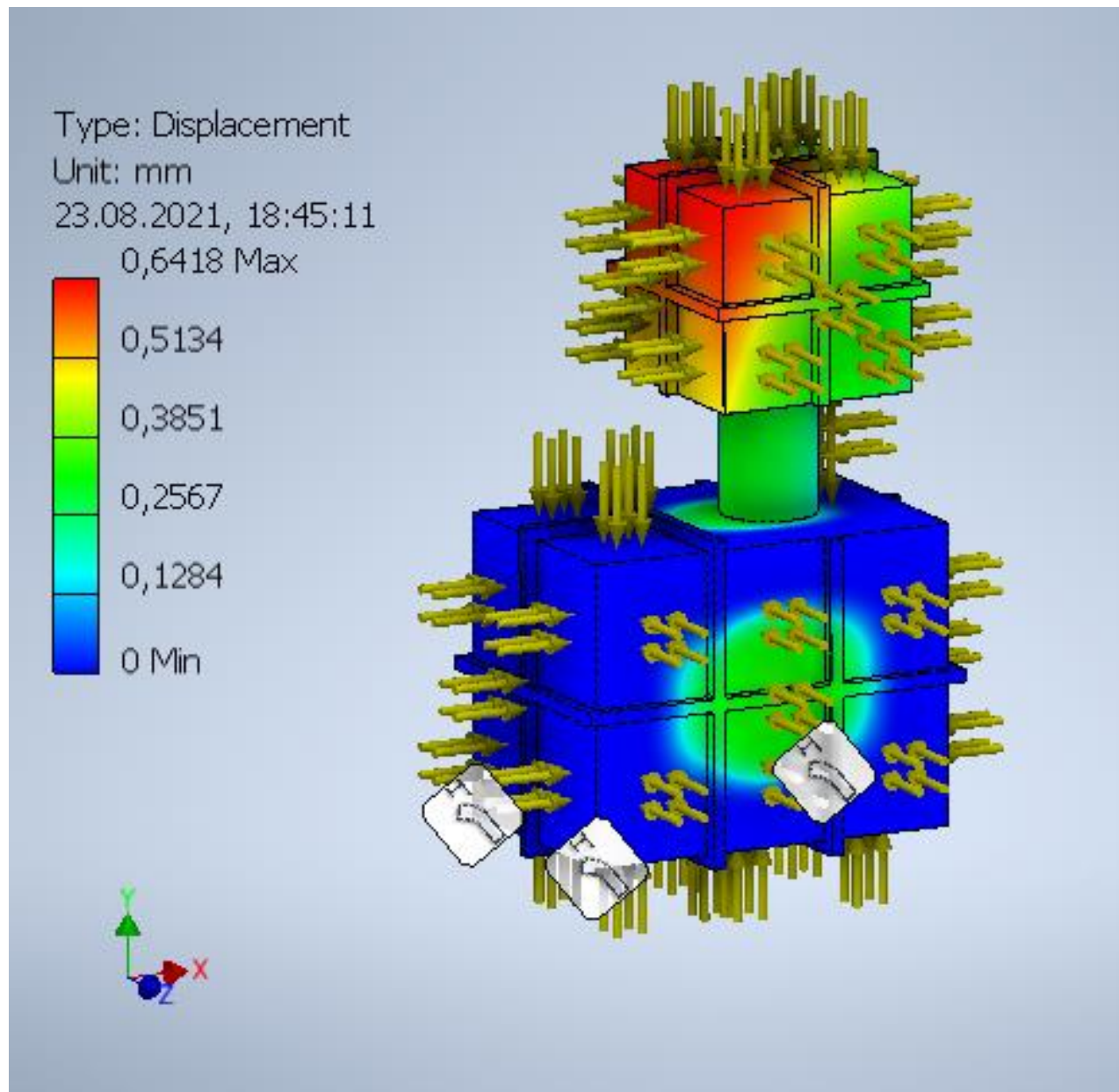
27,74

13,88

0,02 Min

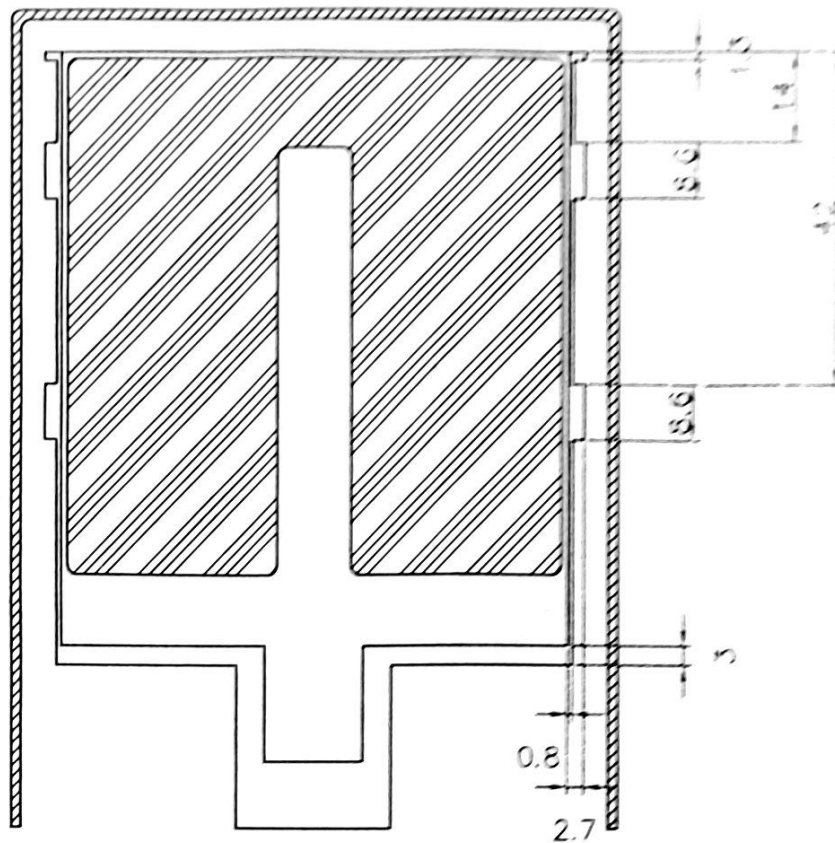


Displacement



C:\Users\maxim\OneDrive - Fachhochschule Aachen\FZ\JCNS\Winter
2021\PGAA\Konstruktion\FEM\Kammer_Dummy_2_berippt.ipt

S/N 08535



Ge Crystal Details

Outer Electrode Thickness: 0.3 μm

Inner Electrode Thickness: 0.6 mm

Crystal Diameter: 78.5 mm

Crystal Length: 79 mm

Core Hole Diameter: 14 mm

Core Hole Depth: 66 mm

Detector Chamber Material Details

Ge front to inside of endcap distance: 5 mm

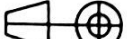
Cryostat Window Material: Al Thickness: 1.5 mm

Endcap Material: Al Thickness: 1.5 mm

Crystal Holder Material: Al

CONFIDENTIAL

Unauthorized duplication of information
herein is strictly prohibited.

INNER DRAWING N - TYPE			Appr.:
Date: 01/03/12		Doc: MCNPP-type	
MAT:		Auth.: Mar	
SCALE: not to scale	Ra: 	Bestelnr: b 08535	
TOL:		Aantal:	

18.10.2007 12:03 06142836288
 18/10/2007 10:57 06142836288
 17/10 2007 WED 15:48 FAX 333 CED

CANBERRA GMBH

S. 02/02

002/002

ORDER CONFIRMATION Your Reference: B7781-709961 Our Reference: GOR 4292 Model: GR10023/S-7905SL-30		MATERIALS ----- window : Al endcap : Al holder : Al	
		Canberra Semiconductor N.V. Lammerdries 25 B-2550 Dlen Belgium Tel: +32-014/221975 Fax: +32-014/221991 A	
OUTLINE DRAWING MODEL 7905SL-30		DO NOT TEMPLATE DRAWING	

Ref. File : 007SL71-7906SL-30

Checked :
 DATE : 15-10-2007

DRAWN : Marc Verreydt