

**FH Aachen**

**Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik**

Studiengang Produktentwicklung im Maschinenbau

Masterarbeit

**Konstruktion eines justierbaren Detektor- und  
Probentisches für ein Neutronenreflektometer**

vorgelegt von

**Robin Jürgen Similon**

Matrikel-Nr. **3064159**

**In Kooperation mit:**

**Institut für Kernphysik (IKP) und  
Jülich Centre for Neutron Science (JCNS)  
im Forschungszentrum Jülich**

Betreuender Professor: Prof. Dr.-Ing. Michael Butzek  
Externer Betreuer: Dr.-Ing. Johannes Baggemann

Aachen, April 2021

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Quellenverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Aachen, 03.2021

---

Ort, Datum



---

Robin Similon

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer Teilkonstruktion eines Neutronenreflektometers im Rahmen des HBS-Projektes. Dieses Forschungsinstrument stellt eine Komponente der im Forschungszentrum Jülich geplanten kompakten, beschleunigerbasierten Neutronenquelle dar.

Ziele dieser Arbeit sind die Konstruktion der mechanischen Bewegungskomponenten sowie weiterführende Angaben zur Ausführung und Nutzen des konstruierten Produktes. Es werden sowohl Bauteile einzeln mit ihrer Funktion als auch die Zusammenstellung aller Baugruppen beschrieben.

Zu Beginn dieser Arbeit wird auf die Methodik der Konstruktion in Form der VDI-Richtlinie 2221 eingegangen. An diese wird nachfolgend der Aufbau der Arbeit angelehnt. Durch die Aufgabenstellung werden Vorgaben an die Konstruktion gestellt, die sich auf die benötigten Bewegungsmöglichkeiten und allgemeine Randbedingungen beziehen. Auf Basis dieser Anforderungen an das Produkt werden zunächst drei Lösungsprinzipien erstellt. Im Anschluss daran wird das Lösungsprinzip ausgewählt, welches das größte Potential für eine zielführende Konstruktion bietet. Es folgt eine detaillierte Beschreibung der Konstruktion sowie die rechnerische Überprüfung und Validierung einzelner Konstruktionselemente und Baugruppen. Zu den ausgeführten Nutzungsangaben zählt eine Bewegungsgleichung zur Steuerung der Detektorbewegung, um vorgegebene Streuwinkel erreichen zu können. Es wird eine Montageanweisung aller Module gegeben, die eigenständig den Aufbau des Produktes beschreibt. Abschließend werden mechanische Sicherheitsaspekte erläutert, die während der Konstruktion berücksichtigt worden sind.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG</b>	<b>II</b>
<b>1 EINLEITUNG UND GRUNDLAGEN</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVATION	1
1.2 ZIEL DER ARBEIT	3
1.3 KONSTRUKTIONSMETHODIK	3
1.4 AUFBAU DER ARBEIT	6
<b>2 KONSTRUKTIVE ANFORDERUNGEN</b>	<b>8</b>
2.1 SYSTEMDEFINITION	8
2.2 FUNKTIONSSTRUKTUR	9
2.2.1 FUNKTIONSSTRUKTUR DER HORIZONTALER MESSUNG	9
2.2.2 FUNKTIONSSTRUKTUR DER VERTIKALER MESSUNG	10
2.3 MECHANISCHE ANFORDERUNGEN	10
<b>3 LÖSUNGSPRINZIPIEN</b>	<b>13</b>
3.1 LÖSUNGSPRINZIP 1: SCHIENENFÜHRUNG	13
3.1.1 SCHIENENFÜHRUNG MIT HORIZONTALER MESSUNG	14
3.1.2 SCHIENENFÜHRUNG MIT VERTIKALER MESSUNG	15
3.2 LÖSUNGSPRINZIP 2: DETEKTORARM	16
3.2.1 DETEKTORARM MIT HORIZONTALER MESSUNG	16
3.2.2 DETEKTORARM MIT VERTIKALER MESSUNG	18
3.3 LÖSUNGSPRINZIP 3: LINEARTISCH	18
3.3.1 LINEARTISCH MIT HORIZONTALER MESSUNG	18
3.3.2 LINEARTISCH MIT VERTIKALER MESSUNG	20
3.4 BEWERTUNG UND VERGLEICH	21
3.4.1 ABSOLUTE UND RELATIVE BEWERTUNGSKRITERIEN	21
3.4.2 GEWICHTETE RELATIVE BEWERTUNG	23

<b>4</b>	<b>KONSTRUKTION</b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>MODULGLIEDERUNG</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>MODULGESTALTUNG</b>	<b>26</b>
4.2.1	PROBENGESTELL	26
4.2.2	PROBENBEWEGUNG	28
4.2.3	PROBENAUFNAHME	31
4.2.4	OBERBAUGRUPPE PROBENTISCH	32
4.2.5	DETEKTORGESTELL	33
4.2.6	DETEKTORBEWEGUNG	34
4.2.7	DETEKTORARM	38
4.2.8	OBERBAUGRUPPE DETEKTORTISCH	39
<b>4.3</b>	<b>GESAMTGESTALTUNG</b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>ÜBERPRÜFUNG DER KONSTRUKTION</b>	<b>43</b>
4.4.1	GEWICHTSKRÄFTE DER PROBENTISCHKOMPONENTEN	43
4.4.2	MAXIMALER VERFAHRWEG DES PROBENLINEARTISCHES	47
4.4.3	GEWICHTSKRÄFTE DER DETEKTORTISCHKOMPONENTEN	49
4.4.4	KIPPMOMENT DER DETEKTORABSCHIRMUNG AUF DAS ROTATIONSLAGER	51
4.4.5	MINIMALES ROTATIONSINTERVALL DES DETEKTORS	53
4.4.6	DURCHBIEGUNG DES DETEKTORTISCHES	55
4.4.7	BENÖTIGTER HUB IM VERTIKALEN MESSAUFBAU	58
4.4.8	HORIZONTALE BELASTUNG	59
<b>5</b>	<b>AUSFÜHRUNGS- UND NUTZUNGSANGABEN</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>GEOMETRIE DES VERFAHRWEGES</b>	<b>60</b>
5.1.1	POSITIONIERUNG DES DETEKTORTISCHES	60
5.1.2	WINKELABHÄNGIGKEIT DES VERFAHRWEGES	63
<b>5.2</b>	<b>MONTAGEANWEISUNG</b>	<b>66</b>
5.2.1	MONTAGEREIHENFOLGE DES PROBENGESTELLS	66
5.2.2	MONTAGEREIHENFOLGE DER PROBENBEWEGUNG	67
5.2.3	MONTAGEREIHENFOLGE DES DETEKTORGESTELLS	69
5.2.4	MONTAGEREIHENFOLGE DER DETEKTORBEWEGUNG	70
5.2.5	MONTAGEREIHENFOLGE DES DETEKTORARMS	72
<b>5.3</b>	<b>SICHERHEITSASPEKTE</b>	<b>73</b>
5.3.1	RISIKO DES VERLUSTES DER STANDSICHERHEIT	74

5.3.2	BRUCHRISIKO BEIM BETRIEB	74
5.3.3	RISIKEN DURCH HERABFALLENDE ODER HERAUSGESCHLEUDERTE GEGENSTÄNDE	75
5.3.4	RISIKEN DURCH OBERFLÄCHEN, KANTEN UND ECKEN	75
5.3.5	RISIKEN DURCH MEHRFACH KOMBINIERTER MASCHINEN	75
5.3.6	RISIKEN DURCH ÄNDERUNG DER VERWENDUNGSBEDINGUNGEN	75
5.3.7	RISIKEN DURCH BEWEGTE TEILE	76
5.3.8	RISIKO UNKONTROLLIERTER BEWEGUNGEN	76
<b>6</b>	<b><u>BEWERTUNG UND AUSBLICK</u></b>	<b>77</b>
<b>6.1</b>	<b>BEWERTUNG ANHAND DER ANFORDERUNGSERFÜLLUNG</b>	<b>77</b>
<b>6.2</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>78</b>
<b>6.3</b>	<b>WEITERE REALISIERUNGEN IM AUSBLICK</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b><u>QUELLENVERZEICHNIS</u></b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b><u>VERZEICHNISSE</u></b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b><u>ANHANG</u></b>	<b>86</b>

# 1 Einleitung und Grundlagen

Zu Beginn dieser Arbeit soll deren Hintergrund sowie weitere einführende Informationen gegeben werden. Dazu zählen eine Erklärung des Ziels sowie des Aufbaus der vorliegenden Arbeit. Es wird zudem bereits auf die theoretischen Grundlagen der Konstruktionsmethodik eingegangen, da diese essenziell für den Aufbau der Arbeit sind.

## 1.1 Motivation

Zu den großen Herausforderungen unserer Gesellschaft zählen die Energieversorgung, Gesundheit, Umwelt sowie Verkehrs- und Informationstechnologie. Die Neutronenforschung leistet entscheidende Beiträge zu all diesen Bereichen und ist somit in der derzeitigen Forschung kaum zu ersetzen. Durch die Prüfung, Entwicklung und Optimierung neuer Werkstoffe kann beispielsweise die Forschung an neuen Energiespeichern sowie die Kraftwerkstechnologie vorangetrieben werden. Ebenso sind bereits Fortschritte durch die Neutronenforschung im Bereich Gesundheit und Medizin verzeichnet worden, wie beispielsweise neue Erkenntnisse in der Alzheimerforschung. Ein weiteres Beispiel eines Einsatzgebietes ist die Strahlentherapie. Neutronen bieten hier die Möglichkeit Tumore in Oberflächennähe besser behandeln zu können, als es mit konventionellen Therapien möglich ist. [1]

Einrichtungen, die Forschung an Neutronen betreiben, sind weltweit zu finden. Dazu zählen beispielsweise das Institut Laue-Langevin (ILL) in Frankreich, das Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) in Deutschland und die im Bau befindliche European Spallation Source (ESS) in Schweden. [2]

Aufgrund der Abschaltung vieler benötigter Forschungsreaktoren in Europa sinkt die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit zu diesen Neutronenquellen. Dieser Trend wird sich auch weiterhin fortsetzen. [3]

Um diesem Trend dauerhaft entgegenzuwirken und die Verfügbarkeit von Neutronen für das breite Feld von Anwendungen nachhaltig sicherstellen zu können, wird im Rahmen des HBS-Projektes (High Brilliance Neutron Source) am Forschungszentrum Jülich eine neue, kompakte, beschleunigergetriebene Neutronenquelle (compact accelerator based neutron source) entwickelt.

Der aktuelle Entwicklungsstand des Prototyps einer Target-Moderator-Reflektor-Einheit im Rahmen des HBS-Projektes ist deren Konstruktion und anschließender Aufbau mit dem Ziel, die erfolgreiche Funktion zu demonstrieren. Abbildung 1-1 zeigt den geplanten Prototypen am Aufbauort. Es ist die Einheit der Neutronenquelle mit ihrer Abschirmung (blau) zusammen mit drei Forschungsinstrumenten (orange) dargestellt. Eines dieser Forschungsinstrumente ist ein Neutronenreflektometer (rot). In einem Neutronenreflektometer wird ein Neutronenstrahl auf eine zu untersuchende Probe geleitet und an deren Oberfläche gespiegelt. Der gespiegelte Strahl wird anschließend von einem Detektor erfasst. Es kann durch dieses Instrument eine Aussage über Material- und Oberflächenbeschaffenheit der Probe getätigt werden. Von der Neutronenquelle aus gelangt der Neutronenstrahl durch angepasste Slits (geschlitzte Abschirmungen) und einen Neutronenleiter zum jeweiligen Instrument.

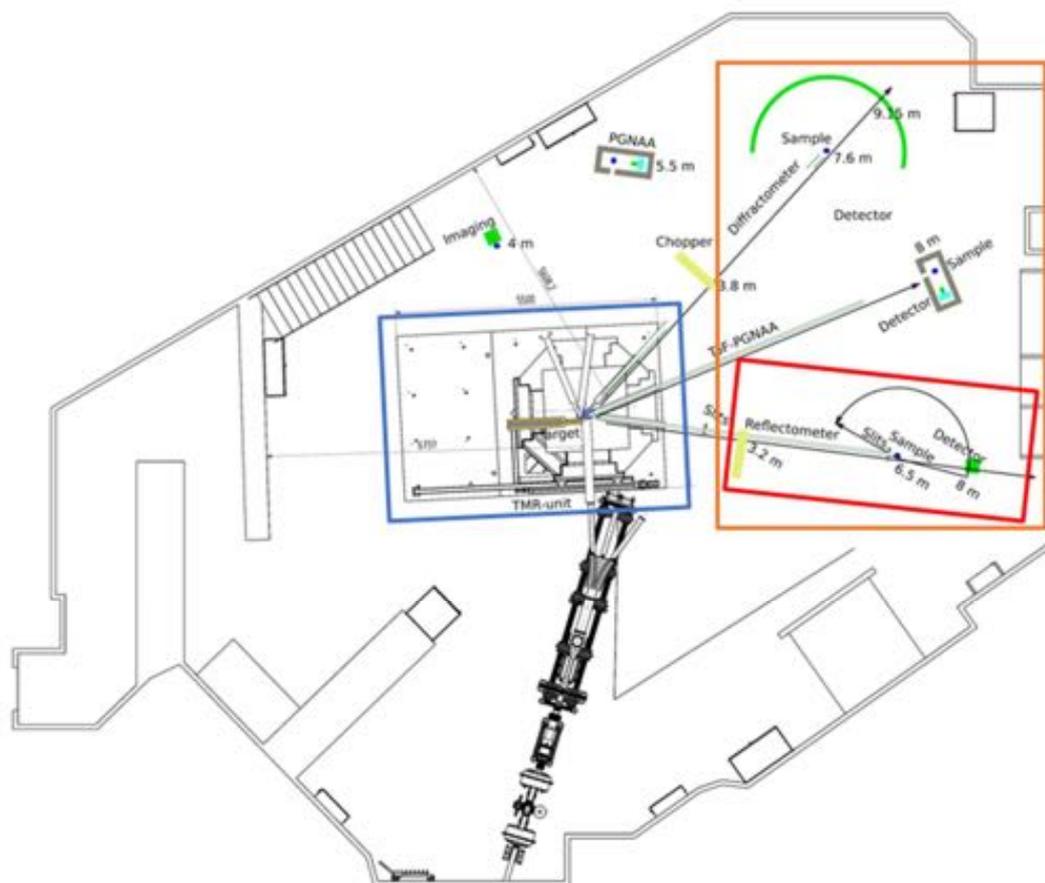


Abbildung 1-1: Produktaufbauort mit Instrumentenverteilung [4]

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Aufbau dieses Neutronenreflektometers. Im Rahmen der Arbeit soll die Konstruktion aller mechanischen Komponenten stattfinden und sicherstellen, dass alle wissenschaftliche Anforderun-

gen des Neutronenreflektometers erfüllt werden. Das Produkt dieser Konstruktion umfasst einen justierbaren Detektor- und Probentisch. Auf eine detailliertere Beschreibung der Funktionsweise des Reflektometers mit physikalischem Hintergrund muss unter Beachtung des Umfangs dieser Arbeit verzichtet werden. Alle durch die wissenschaftliche Anwendung des Instrumentes erzeugten Anforderungen an das Produkt werden später genauer erläutert.

## **1.2 Ziel der Arbeit**

Das Ziel der Arbeit ist die Konstruktion eines justierbaren Detektor- und Probentisches für ein räumlich kleines Flugzeit-Neutronenreflektometer unter Berücksichtigung der als Aufgabenstellung formulierten Anforderungen und des begrenzten Budgets. Es wird eine detaillierte Beschreibung von Komponenten, Baugruppen und deren Zusammensetzung erarbeitet, die einerseits eine Hilfestellung bei der Montage des Produktes darstellt, andererseits aber auch Angaben für den ersten Einsatz und zum regulären Betrieb erstellt. Eine ausführliche Beschreibung aller an das Produkt dieser Arbeit gestellten Anforderungen befindet sich in Kapitel 2.3.

Ihre Anwendung findet diese Arbeit in den Phasen der Fertigung, des Aufbaus, der Inbetriebnahme und des Nutzens des Produktes.

## **1.3 Konstruktionsmethodik**

Das Vorgehen bei der Erstellung dieses Produktes wird nach der Richtlinie 2221 Entwicklung technischer Systeme und Produkte des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) gestaltet. Diese Richtlinie dient der generellen Gliederung der Arbeit und wird in Detailbetrachtungen durch weitere Richtlinien unterstützt.

Das generelle Vorgehen in der Konstruktion und Entwicklung eines Produktes lässt sich abstrahieren und ist im allgemeinen Modell der Produktentwicklung dargestellt. Dieses „bietet hierbei eine hilfreiche Orientierung, erleichtert eine durchgängige Begründung und Dokumentation der Prozessgestaltung und ermöglicht es internen und externen Projektbeteiligten, in kurzer Zeit Verständnis des spezifischen Produktentwicklungsprozesses zu erlangen.“ [5, S. 6]. Abbildung 1-2 fasst dieses Modell zusammen. Der Ablauf ist auf der rechten Seite der Abbildung in vier Phasen unterteilt. Diese Phasen gruppieren die Arbeitsschritte grob in die vier Themenbereiche Aufgabenstellung (Phase 1), Vorarbei-

ten (Phase 2), Gestaltung (Phase 3) und Nacharbeiten (Phase 4). Diese Arbeitsschritte werden zusammen mit weiteren Realisierungen in sieben Aufgaben mit den ihnen zugehörigen Arbeitsergebnissen aufgeteilt, welche im Folgenden genauer beschrieben werden. Das strikte aufeinanderfolgende Abarbeiten der Aufgaben ist jedoch in den meisten Fällen nicht möglich, wodurch ein Vor- und Zurückspringen zwischen den Aufgaben und das häufige Auftreten von mehreren Iterationen üblich ist. [6]

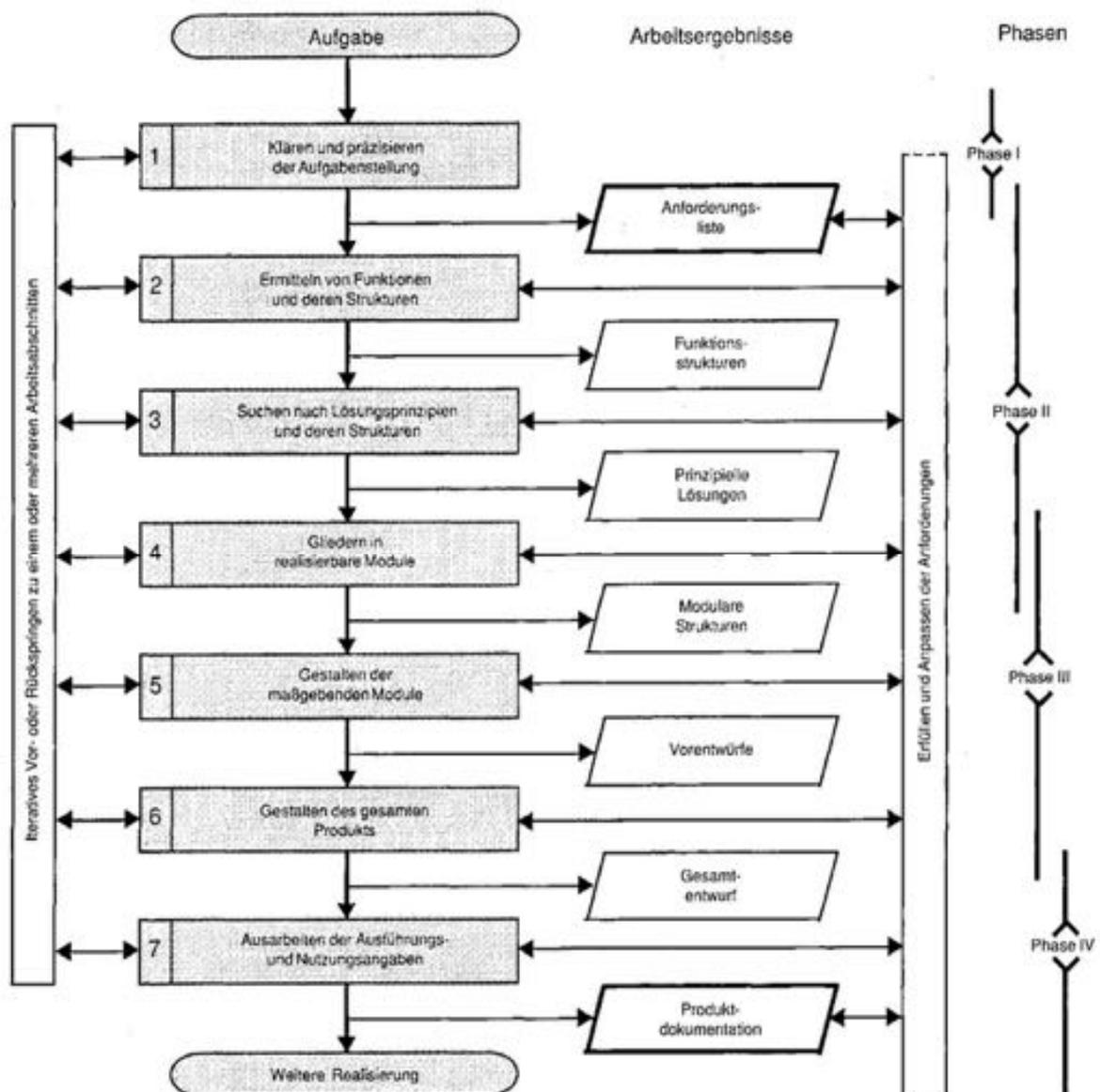


Abbildung 1-2: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [6, S. 3]

Die erste Aufgabe aus Abbildung 1-2 nimmt Bezug auf die Aufgabenstellung. Hier soll eine klare und präzise Formulierung geschaffen werden, die alle an das Produkt gestellten Anforderungen enthält. Eine sich anbietende Gestaltungsform ist die Anforderungsliste. Auf diese Anforderungsliste ist im Verlauf der

folgenden Aufgaben immer wieder einzugehen, dementsprechend ist sie ein durch Auftraggeber und -nehmer durchgehend an den aktuellen Entwicklungs- und vor allem auch Kenntnisstand anzupassendes Hilfsmittel.

Meist schon simultan wird die zweite Aufgabe bearbeitet. Zur Verdeutlichung der Anforderungen ist eine grobe Übersicht der Funktionsstruktur hilfreich und kann schon zeitgleich mit dem ersten Schritt erstellt werden. In der zweiten Aufgabe liegt der Fokus auf der Gesamtheit der Funktionen und deren Beziehungen zueinander. Das hier erstellte Arbeitsergebnis kann eine schriftliche Beschreibung oder eine schaubildhafte Darstellung aller Anforderungen oder spezieller Anforderungsgruppen sein.

In der dritten Aufgabe werden Konzepte entwickelt, die der zuvor bestimmten Funktionsstruktur folgen. Besonders in diesem Schritt ist eine häufige Aktualisierung der vorherigen Arbeitsergebnisse möglich. Durch konzeptionelle Lösungsprinzipien können neue Anforderungen und Randbedingungen entstehen, die nicht in der bisherigen Funktionsstruktur enthalten sind. Als Ergebnis dieser Aufgabe entsteht eine in den folgenden Schritten zu realisierende prinzipielle Lösung. Das Realisieren und Detaillieren dieser Lösung finden nicht in einem Schritt statt, sondern verteilt sich auf die Aufgaben vier, fünf und sechs.

Die Aufgabe vier gliedert das gesamte zu betrachtende Produkt in einzelne Module. Ein Modul kann dabei je nach Komplexität des Projektes eine Baugruppe oder ein einzelnes Bauteil sein. Eine Gliederung entlang der Funktionsstruktur bietet sich hier an. In dieser Aufgabe ist darauf zu achten, dass das Modul einen realisierbaren Umfang besitzt. Ist dies nicht der Fall kann eine zweite tiefergehende Gliederung erfolgen. Das Arbeitsergebnis der vierten Aufgabe ist eine Beschreibung der Struktur der Module.

Nachdem zuvor einzelne Module definiert worden sind, werden diese in der fünften Aufgabe ausgestaltet. Dabei können die Module aufeinanderfolgend oder gleichzeitig bearbeitet werden. Mehrere verschiedene Module gleichzeitig zu gestalten bietet sich dann an, wenn mehrere Entwickler an einem Projekt arbeiten und die Entwicklungszeit verkürzt werden soll. Die Methoden Simultaneous Engineering und Concurrent Design können hier zum Einsatz kommen. Das Simultaneous Engineering bietet die Möglichkeit, dass sich die Phasen der Konzept- und Produktentwicklung sowie die Phasen der Produktionsplanung und der Fertigung so weit wie möglich überschneiden und nicht rein nacheinander ablaufen. Das Concurrent Design lässt das gleichzeitige Konstruieren an mehreren Stellen

im Projekt zu und zieht schon die ersten Fertigungsschritte nach vorne in den Konstruktionszeitraum. Durch beide Methoden kann eine Zeitersparnis erreicht werden.

Anschließend an die Gestaltung der einzelnen Module ist nun die Gestaltung des gesamten Produktes in der sechsten Aufgabe vorgesehen. Die Module werden entsprechend ihrer zuvor definierten Schnittstellen zusammengefügt. Zu den Arbeitsergebnissen zählen der Gesamtentwurf und Entwürfe der einzelnen Module.

Die Aufgabe sieben bildet den Abschluss des generellen Vorgehens des Entwickelns und Konstruierens. Anhand der bei der Konstruktion erhaltenen Informationen werden Ausführungs- und Nutzungsangaben formuliert. Diese Angaben werden in der Produktdokumentation zusammengefasst. Je nach Aufgabenstellung kann an diesem Punkt die Aufgabe und somit das Projekt abgeschlossen sein oder es sind noch weitere Tätigkeiten nötig, die aber nicht direkt dem Entwickeln und Konstruieren zugeordnet sind.

## **1.4 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 1.3 ist das Vorgehen bei der Entwicklung eines Produktes nach Norm dargestellt worden. Der Übersichtlichkeit halber ist der Aufbau dieser Arbeit an Abbildung 1-2 angelehnt und wird in ausgewählten Bereichen erweitert.

Abbildung 1-3 stellt den Aufbau der Arbeit zusammen mit den Kapitelnummern dar. Die vorherigen Aufgaben eins und zwei werden im ersten Schritt in Kapitel 2 zusammengefasst, da das Erstellen einer Funktionsstruktur stark zum Verständnis der Anforderungen beiträgt. Die dritte Aufgabe, die Suche nach Lösungsprinzipien, unterteilt sich in dieser Arbeit auf die Kapitel 3.1 bis 3.3. Jeweils ein Kapitel befasst sich mit der Vorstellung eines Lösungsprinzips. Im Anschluss daran erfolgt die begründete Auswahl eines Lösungsprinzips in Kapitel 3.4. Aufgabe vier gliedert das gesamte Produkt in einzelne Module und wird in Kapitel 4.1 abgebildet. Es folgt darauf eine Aufspaltung der fünften Aufgabe in die Unterkapitel des Kapitels 4.2. Jedes dieser Unterkapitel behandelt die Gestaltung eines Moduls. Im Anschluss daran kann die Gestaltung des gesamten Produktes stattfinden, welche als Aufgabe sechs in Kapitel 4.3 zu finden ist. Bei der Konstruktion getätigte Annahmen über Tragfähigkeiten und Weiteres werden in Kapitel 4.4 durch händische Abschätzungen mittels Bestimmung von Kräftegleichgewichten und Sicherheiten rechnerisch überprüft. Analog zu Abbildung

1-3 ist auch in dieser Arbeit der letzte Schritt der Entwicklung und Konstruktion das Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben. In Kapitel 5 erfolgt dies neben Steuerungsangaben und einer Montageanweisung durch eine Betrachtung der in der Konstruktion berücksichtigten Sicherheitsaspekte. Es wird hier die Maschinenrichtlinie von 2006 als Grundlage verwendet.

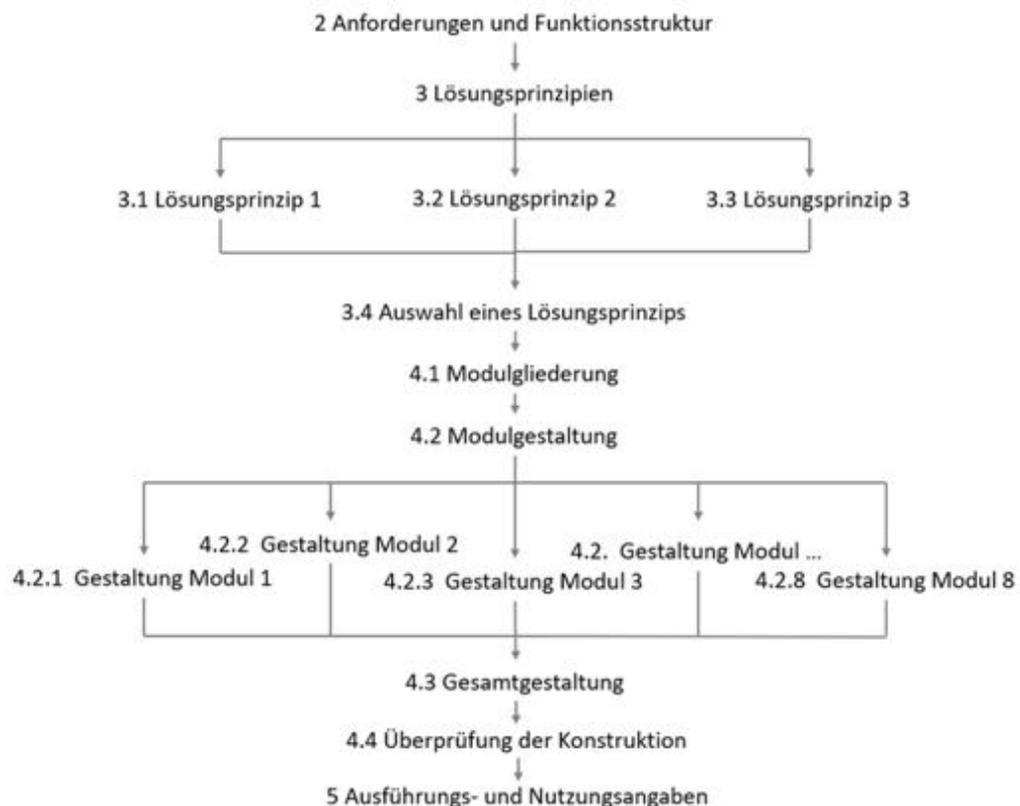


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit analog zum Vorgehen nach VDI 2221

Im Laufe der Bearbeitung jeder der zuvor beschriebenen Aufgaben entstehen häufig erneuerte Versionen von Dokumenten, Abbildungen und Konstruktionsmodellen. Durch das Zurückgehen auf vorangegangene Abschnitte und deren iterativer Bearbeitung können bessere Lösungen erreicht werden. [7, S. 35]

Im Sinne der Übersichtlichkeit und Lesbarkeit wird in dieser Arbeit durchgehend der endgültige Stand der Ergebnisse einer Aufgabe sowie die letzte Iteration von Berechnungen und Konstruktionsmodellen angegeben.

Ohne den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnik ist die Bearbeitung der gestellten Aufgabe nicht zielführend [7, S. 50]. Dementsprechend wird in dieser Arbeit ein rechnerunterstütztes Vorgehen verwendet. Zum Einsatz kommt die Konstruktionssoftware Autodesk Inventor (V2021).

## 2 Konstruktive Anforderungen

Wie in Abbildung 1-3 dargestellt, ist der erste Arbeitsschritt des Entwickelns und Konstruierens das Aufstellen aller Anforderungen und einer Funktionsstruktur. Die Anforderungen gleichen in dieser Arbeit der Aufgabenstellung und werden somit als gegeben vorausgesetzt. Als weitere Vorgabe dient die Definition des Systems, in dem sich das zu konstruierende Produkt befindet.

### 2.1 Systemdefinition

Zunächst wird das verwendete System definiert, da es eine wichtige Grundlage für das Entwickeln eines Produktes darstellt. Ein System hebt sich von seiner Umgebung durch eine Systemgrenze mit festgelegten Schnittstellen ab. Es beinhaltet eine abgegrenzte Menge von Elementen sowie deren Relationen zueinander. [7, S. 12]

Die wesentlichen Elemente des Systems dieser Arbeit sind, wie in Abbildung 2-1 zu sehen, die Probe (gelb) und der Detektor (blau). Der Neutronenstrahl (grün) sowie der Boden (grau) sind als räumliche Referenz eingefügt worden. In der verwendeten Blickrichtung der Abbildung wird der Neutronenstrahl von rechts auf die Probe geleitet, dort unter einem definierten Winkel gespiegelt und danach vom Detektor erfasst. In Abbildung 2-1 wird zudem das in dieser Arbeit verwendete Koordinatensystem definiert. Die X-Achse ist in Richtung des eingehenden Strahls und die Z-Achse als Normale zum Boden gewählt worden. Die Y-Achse wird entsprechend des Rechtssystems der Koordinaten festgelegt. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Auftreffpunkt des Strahls auf der Probe, im Beleuchtungspunkt.

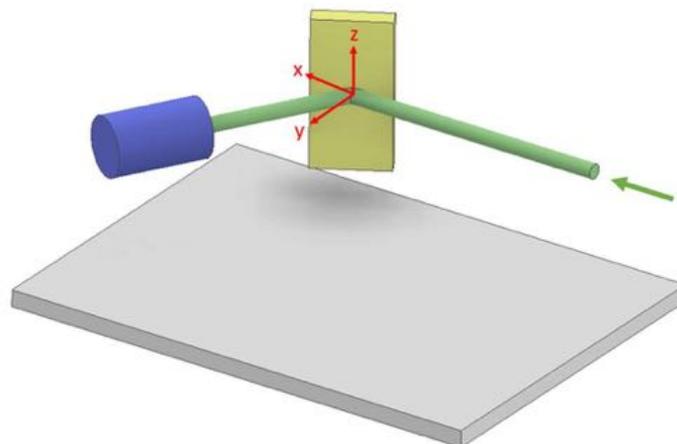


Abbildung 2-1: System mit Hauptkomponenten und Koordinatensystem

Innerhalb der Systemgrenzen befinden sich die Mechanik der Bewegung, die für die Probe und den Detektor notwendig ist, sowie alle konstruktiven Objekte zu deren Unterstützung. Nicht Teil des Systems ist beispielsweise die Strahlerzeugung oder die Abschirmung am Strahlerzeugungspunkt.

## 2.2 Funktionsstruktur

Um ein besseres Verständnis der aufzustellenden Anforderungen an das Produkt zu erlangen, soll zunächst die Funktionsstruktur mit den essenziellen Komponenten beschrieben werden. Es sollen zwei unterschiedliche Messabläufe ermöglicht werden, welche nachfolgend beschrieben werden. Beide Messungen sollen ohne einen Umbau der mechanischen Bewegungseinheiten realisiert werden können. Die an die beiden Messabläufe angepassten Varianten des Produktes besitzen einen größtenteils ähnlichen Aufbau, jedoch unterscheidet sich ihre Funktionsstruktur. Ein horizontaler Messaufbau ermöglicht das Erreichen großer Winkel und bietet ausreichend Platz für den Verfahrensweg des Detektors, während eine vertikale Messung der erste Schritt zu einem zukünftigen Messaufbau ist, mit dem eine größere Vielfalt von Proben verwendet werden kann. Durch den prinzipiellen Einsatz einer vertikalen Streuebene in der vertikalen Messung wird beispielsweise das Verwenden von Proben in flüssiger Form durch einen von oben einfallenden Neutronenstrahl ermöglicht.

### 2.2.1 Funktionsstruktur der horizontalen Messung

Die erste Messung findet ausschließlich in der horizontalen Ebene statt, bezogen auf die Systemdefinition aus Abbildung 2-1. Sie verwendet auch für die Spiegelung des Strahls ausschließlich die horizontale Streuebene. Der geometrische Aufbau ist schematisch in Abbildung 2-2 in einer Draufsicht auf das System dargestellt. Der von rechts in das Bild eintretende Neutronenstrahl (grün) trifft unter einem Winkel  $\theta$  auf die Probe (gelb), wird dort gespiegelt und verlässt die Probe mit dem Austrittswinkel  $\theta$ . Anschließend wird der gespiegelte Strahl im Detektor (blau) erfasst. Der Messablauf sieht nicht nur eine stationäre Messung vor, sondern eine Reihe von Messungen über einen sich ändernden Winkel  $\theta$ . Rotiert die Probe um ihre Z-Achse mit einem Winkel  $\theta$ , so muss der Detektor eine Rotation um eben diese Achse mit doppeltem Winkel ausführen, um die Position des gespiegelten Strahls zu erreichen. Zusätzlich zu dieser Rotationsbewegung sind für den Messbetrieb weitere Bewegungen erforderlich, welche als Anforderungen in Kapitel 2.3 genauer erläutert werden.

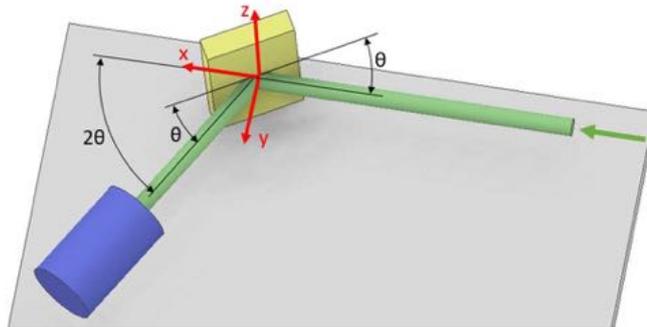


Abbildung 2-2: Funktionsstruktur der horizontalen Messung

### 2.2.2 Funktionsstruktur der vertikalen Messung

Der zweite zu realisierende Messablauf sieht eine Spiegelung des Neutronenstrahls ausschließlich in der Vertikalen vor. Es entsteht somit eine vertikale Streuebene. Wie in Abbildung 2-3 dargestellt wird die Probe (gelb) aus dem bisherigen Mittelpunkt (rosa) nach oben entlang der Z-Achse verschoben. Es wird im neuen Strahlauftrittspunkt ein neues Koordinatensystem definiert (rot).

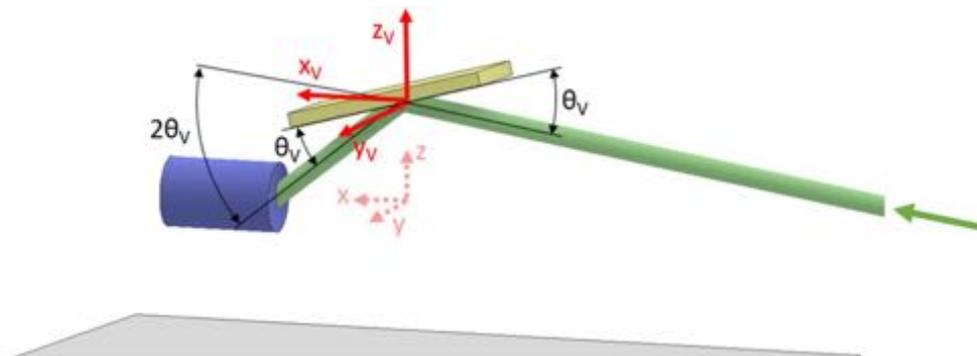


Abbildung 2-3: Funktionsstruktur der vertikalen Messung

Der Neutronenstrahl (grün) wird im geplanten Prototypenaufbau der Neutronenquelle durch eine entsprechende Abschirmung außerhalb des Systems ab dem Strahlursprung leicht nach oben geneigt. Er trifft auf die Probe und wird am Auftreffpunkt unter einem Winkel  $\theta_v$  gespiegelt. Der Detektor (blau) erfasst den Neutronenstrahl, ohne seine Position und Ausrichtung zu ändern. Analog zum horizontalen Messaufbau wird auch hier eine Reihe von Messpunkten angefahren.

## 2.3 Mechanische Anforderungen

Um eine Strukturierung aller mechanischen Anforderungen, die unter anderem durch die benötigten Bewegungsmöglichkeiten von Probe und Detektor entstehen, zu gewährleisten, werden diese in dieser Arbeit in Anlehnung an ein Lasten-

bzw. Pflichtenheft dargestellt. Ein Lastenheft ist die „Zusammenstellung aller Anforderungen des Auftraggebers hinsichtlich Liefer- und Leistungsumfang“ [8, S. 2], während das Pflichtenheft eine „Beschreibung der Realisierung aller Anforderungen des Lastenheftes“ [8, S. 3] beschreibt.

Um ein Lasten- oder Pflichtenheft zu erstellen, wird eine detaillierte Liste aller Anforderungen benötigt [8, S. 3]. Die Anforderungen sind nach definierten Eigenschaften aufzustellen, welche im Folgenden erläutert werden. Das Ziel ist, eine Problemstellung möglichst präzise zu beschreiben, ohne eine Lösung vorzugeben. Die Problemstellung ist allgemein gültig, während eine mögliche vorgegebene Lösung durch sich ändernde Rahmenbedingungen hinfällig werden kann. Das fortlaufende Präzisieren von Anforderungen steigert deren Qualität. Bei diesem Vorgang ist jedoch darauf zu achten, dass keine Informationen verloren gehen. Anforderungen können auf verschiedenen Ebenen des Produktes erstellt werden. Sie können sowohl allgemeingültig sein und für das gesamte System gelten als auch speziell für eine Unterbaugruppe oder eine bestimmte Anwendung definiert werden. Die Einteilung trägt nicht nur zu einer besseren Übersicht bei, sondern kann selbst zu einer Erfüllung von Anforderungen beitragen. [9, S. 38] Die Ausführung eines Lastenheftes wird an dieser Stelle eingekürzt, da sich dessen geforderte Inhalte nach der Richtlinie [8, S. 4] mit den Inhalten dieser Arbeit überschneiden. Dazu zählen die Hauptpunkte Projekteinführung mit Beschreibung der Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Schnittstellen (vergleiche dazu die Kapitel 1.1 und 1.2 sowie 2.1 und 2.2). In Anhang 1 findet sich eine zusammenfassende Darstellung der Anforderungen in tabellarischer Form mit entsprechender Zugehörigkeit zu den Baugruppen Proben- und Detektortisch. Im nachfolgenden Text werden die Informationen aus diesen drei Tabellen näher erläutert. Zum Zwecke des späteren Referenzierens wird eine laufende Nummer für jede Anforderung eingeführt.

Zu den allgemein gültigen Anforderungen zählt der Umbau zwischen den beiden Messaufbauten, der ohne eine erneute Montage der Hauptkomponenten erfolgen soll und somit im Betrieb ohne großen Zeitaufwand erreicht werden kann (1.1). Es ist zudem auf eine Handsteuerung während des Betriebs aufgrund des beschränkten Zugangs zum Produktort zur Einhaltung des örtlichen Strahlenschutzes zu verzichten (1.2). Es muss eine Abschirmung der Detektormessfläche mit einer mindestens 50 mm dicken Bleiwand oder einer 70 mm dicken Stahlwand gegeben sein (1.3). Die Abschirmung dient in diesem Produkt dazu,

die Detektormessfläche vor störender Streustrahlung aus der Umgebung zu schützen. Der maximal mögliche Bauraum ist Abbildung 1-1 zu entnehmen (1.6). Als weitere allgemeine Vorgaben sind die maximalen Massen des Detektors (1.5) mit 8 kg und einer Probe (1.4) mit 25 kg angegeben.

Es werden verschiedene Anforderungen an die horizontale Messung gestellt, die sich auf die Bewegungsmöglichkeiten der Probe beziehen. Es ist eine Rotation der Probe (2.1) und simultan des Detektors (2.3) um die Z-Achse des Produktes in einem Winkelbereich von  $-5^\circ \leq 2\theta \leq 20^\circ$  zu realisieren. Als Wunschanforderung ist dieser Winkelbereich auf  $-5^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$  zu erweitern (2.2). Es sollen dabei Messpunkte nacheinander von einer Seite mit einer Genauigkeit von  $0,02^\circ$  durch den Detektor erreicht werden können (2.5). Der minimale Verfahrweg der Translationen der Probe ist auf 90 mm in Z-Richtung (2.6) und 50 mm in Y-Richtung (2.7) zur Ausrichtung und Positionierung der Probe festgelegt worden. Es ist für diese beiden Anforderungen eine Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm gefordert. Es ist zudem eine Rotation der Probe mit einem Winkelbereich von  $\pm 5^\circ$  um die Achse, die tangential zur Probenoberfläche im Beleuchtungspunkt in der XY-Ebene liegt, erforderlich (2.8). Bei einem Streuwinkel  $\theta$  von  $0^\circ$  entspricht diese Achse der X-Achse. Hierbei wird eine Genauigkeit von  $\pm 0,1^\circ$  gefordert. Als letzte Anforderung an den horizontalen Messaufbau ist der Abstand der Detektormessfläche zur Rotationsachse definiert auf konstant 1500 mm mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm (2.4).

Für den vertikalen Messaufbau werden die beiden folgenden Anforderungen zur Probenbewegung definiert. Es ist eine Rotation der Probe um die  $Y_V$ -Achse mit einem Winkelbereich von  $\theta_V \leq 2,5^\circ$  und einer Genauigkeit von  $\pm 0,1^\circ$  erforderlich (3.1). Zudem wird eine Translation der Probe entlang der  $X_V$ -Achse mit einem Verfahrweg von 50 mm und einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm benötigt (3.2).

Neben den hier aus der Aufgabenstellung abgeleiteten mechanischen Anforderungen werden zusätzlich Kriterien vorgegeben, die bei der Bewertung von Lösungsprinzipien anzuwenden sind. Diese werden mit einer zugehörigen relativen Gewichtung in Kapitel 3.4 erläutert und angewandt.

Eine allgemein gültige Anforderung ist die Reduzierung der Produktkosten aufgrund des begrenzt zur Verfügung stehenden Budgets. Auf die Kostenreduzierung ist bei der Auswahl eines Lösungsprinzips und im Laufe der Modul- sowie der Gesamtkonstruktion einzugehen.

## 3 Lösungsprinzipien

Nachdem die Anforderungen aufgestellt und das System mit seinen Grenzen definiert worden ist befasst sich dieses Kapitel mit der Auswahl eines Lösungsprinzips. Dazu werden zunächst drei Lösungsprinzipien beschrieben. Im Anschluss werden diese bewertet, um das am besten geeignete auszuwählen. Das ausgewählte Lösungsprinzip ist somit aufgrund des Vergleichs mit alternativen Konzepten als allgemein gute Lösung der Aufgabenstellung anzusehen.

Die Umsetzung der Anforderungen nach Bewegungsmöglichkeiten in und um mehrere Achsen wird nach Stand der Technik häufig durch einen Hexapod erzielt. Bei diesem sorgen in einer kompakten Baueinheit sechs Linearantriebe mit einer entsprechenden Steuerung für sechs Freiheitsgrade. Unter Beachtung des begrenzten Budgets für dieses Produkt ist ein Hexapod jedoch keine Option. Die im Folgenden beschriebenen Lösungsprinzipien eins und zwei sind an die Funktionsweise vieler bestehender Aufbauten angelehnt. Das dritte Lösungsprinzip stellt eine Neukonstruktion unter Verwendung vorhandener Lagerkomponenten dar.

### 3.1 Lösungsprinzip 1: Schienenführung

Im Folgenden wird das Lösungsprinzip *Schienenführung* beschrieben. Der Name bezieht sich auf die Komponente, die einen deutlichen Unterschied im Vergleich zu den anderen beiden Lösungsprinzipien darstellt. Im Falle des ersten Lösungsprinzips ist es eine Schienenführung.

Eine der Hauptkomponenten des gesamten Aufbaus ist der Probenstisch. In den bisherigen Abbildungen, siehe beispielsweise Abbildung 2-1, befindet sich die Probe an einem definierten Punkt mit einer definierten Ausrichtung im Raum. Um dies im realen Aufbau umsetzen zu können, wird ein Gestell mit darauf aufgebrauchten Bewegungseinrichtungen konstruiert. Eine weitere Hauptkomponente ist der Detektortisch. Dieser dient analog zum Probenstisch zur Unterstützung des Detektors und dessen Bewegung.

Wie zuvor beschrieben sollen zwei verschiedene Messabläufe realisiert werden können. Es folgt zunächst eine Beschreibung für den prinzipiellen Aufbau des horizontalen Messablaufs. Das erste Lösungsprinzip *Schienenführung* ist mit seinem horizontalen Aufbau in Abbildung 3-1 dargestellt und soll zusammen mit

den eingezeichneten, für diesen Messaufbau benötigten, Bewegungsrichtungen als Grundlage für die folgenden Erläuterungen dienen.

### **3.1.1 Schienenführung mit horizontaler Messung**

Im Folgenden wird der Probenstisch (rechts in Abbildung 3-1) beschrieben, beginnend mit seiner untersten Komponente. Auf dem Boden wird ein Gestell an einem definierten Punkt fixiert, welches den folgenden Aufbau auf die Höhe der Strahlachse hebt. Auf der oberen Seite des Gestells befindet sich ein Drehtisch, welcher den Winkel des Detektors relativ zur Ausgangslage bestimmt. Auf dem ersten Drehtisch befindet sich ein Hubtisch, dessen Hub genutzt wird, um den Beleuchtungspunkt auf der Probe in seiner Höhe zu verschieben. Darauf befestigt ist ein zweiter Drehtisch, welcher den Winkel der Probe relativ zum Detektor bestimmt. Eine Lineareinheit wird auf dem oberen Drehtisch angebracht, um unterschiedliche Dicken der zu bestrahlenden Probe ausgleichen zu können. Ein Goniometer auf dem beweglichen Schlitten der Lineareinheit ermöglicht das Neigen der Probe. Als oberste Komponente wird eine Probenhalterung angebracht, in welche eine Probe eingespannt werden kann.

Die zweite Hauptkomponente dieses Lösungsprinzips ist der Detektortisch (in Abbildung 3-1 links). Auch hier erfolgt die Beschreibung von unten nach oben. Auf dem Boden fixiert wird eine Schienenführung, deren Positionierung und Radius so gewählt werden, dass die Z-Achse des Probenstisches ebenfalls die Rotationsachse der Führung ist. Auf der Schienenführung beweglich angebracht wird ein Gestell, welches den Detektor auf die Höhe des Neutronenstrahls bringt. Dieses Gestell ist mit dem im vorherigen Absatz erwähnten unteren Drehtisch des Probenstisches starr verbunden. Dies sichert einerseits die Rotation der Komponenten Probe und Detektor um die gleiche Achse, andererseits kann der aktuelle Winkel des Detektors relativ zur Ausgangsposition bestimmt werden. Auf dem Gestell befinden sich der Detektor und dessen Abschirmung. Die Abschirmung ist möglichst nah am Detektor und dessen Messfläche angebracht. Somit wird der Materialeinsatz für die Abschirmung minimiert und eine Gewichtseinsparung erreicht. Die Gewichtseinsparung führt zu geringeren Trägheitskräften der Systemkomponenten und begünstigt somit die Positioniergenauigkeit des Detektors.

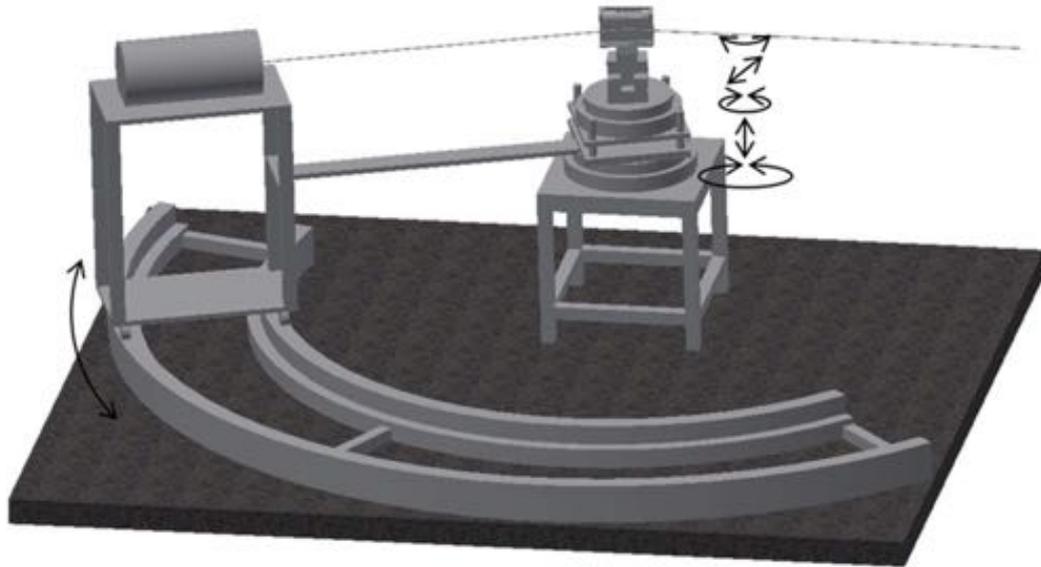


Abbildung 3-1: Schienenführung mit horizontaler Messung

### 3.1.2 Schienenführung mit vertikaler Messung

Der Aufbau zur Erfüllung der vertikalen Messung unterscheidet sich nur geringfügig vom horizontalen Aufbau. Dieser ist mit den für diesen Messaufbau benötigten Bewegungseinrichtungen in Abbildung 3-2 dargestellt. Der Proben­tisch bleibt mit seinen, in Kapitel 3.1.1 beschriebenen, Bewegungseinrichtungen unverändert. Es wird lediglich die bisherige Probenhalterung demontiert und eine Alternative montiert. Das Goniometer lässt die Probe um den Beleuchtungspunkt herum rotieren, sodass der - in diesem Messablauf nach oben geneigte - Neutronenstrahl dort gespiegelt und anschließend vom Detektor aufgenommen werden kann (siehe Kapitel 2.2.2).

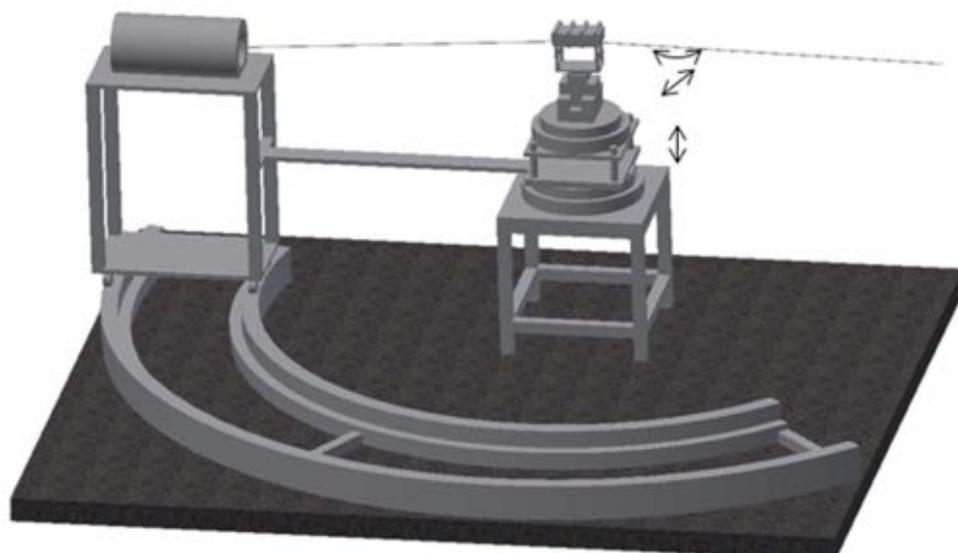


Abbildung 3-2: Schienenführung mit vertikaler Messung

Eine Bewegung des Detektors ist trotz schräg einfallendem Neutronenstrahl nicht notwendig. Mit Hilfe des Hubtisches erreicht die Probe die benötigte Höhe. Ein Umbau des Detektortisches ist nicht nötig. Er wird lediglich in Ausgangsstellung gebracht.

## **3.2 Lösungsprinzip 2: Detektorarm**

Als zweites Lösungsprinzip wird nun der *Detektorarm* beschrieben. Auch hier orientiert sich der Name des Lösungsprinzips an der maßgebenden Komponente, der Verbindung des Detektors zum Probenstisch über einen starren Arm. Es findet eine Aufteilung der Komponente Detektortisch in einzelne Unterkomponenten anhand deren spezifischen Anforderungen statt. Es ist eine hohe Positioniergenauigkeit des Detektors gefordert, welche aber nicht für die Abschirmung gilt. Eine hohe Positioniergenauigkeit einer so großen Masse wie der gesamten Abschirmung ist kostenintensiv. Aus diesen Gründen bietet das zweite Lösungsprinzip eine Lösung basierend auf der Aufteilung von Anforderungen. Der Detektor kann mit einer geringeren Masse aufgrund von Drehtisch und Detektorarm die geforderte Positioniergenauigkeit erreichen, während auf eine überflüssige Erfüllung dieser Anforderung für die Abschirmung verzichtet wird.

### **3.2.1 Detektorarm mit horizontaler Messung**

Eine Beschreibung des Probenstisches findet sich in Kapitel 3. Alle dort beschriebenen Komponenten finden auch im zweiten Lösungsprinzip Einsatz. Die prinzipielle Darstellung der Baugruppe Probenstisch spiegelt in ausreichendem Maße die geforderte Funktionsstruktur wider, weshalb eine Suche nach Alternativen des Probenstisches zu diesem Zeitpunkt nicht zielführend ist.

Lediglich die Verbindung zwischen Probenstisch und Detektor wird verändert. Wie in Abbildung 3-3 dargestellt ist, wird der Verbindungsarm am unteren Drehtisch des Probenstisches fixiert. Zur Gewichtsreduzierung trägt der Detektorarm lediglich die Abschirmung unmittelbar an der Detektormessfläche. Ob diese Gewichtseinsparung zusammen mit einem möglichen Gegengewicht ausreicht, um auf eine Unterstützung innerhalb des Detektortisches zu verzichten, ist im Falle einer Auswahl dieses Lösungsprinzips noch zu prüfen. Die Abschirmung in die übrigen Raumrichtungen befindet sich auf einem auf vier Rollen gelagertem Gestell.

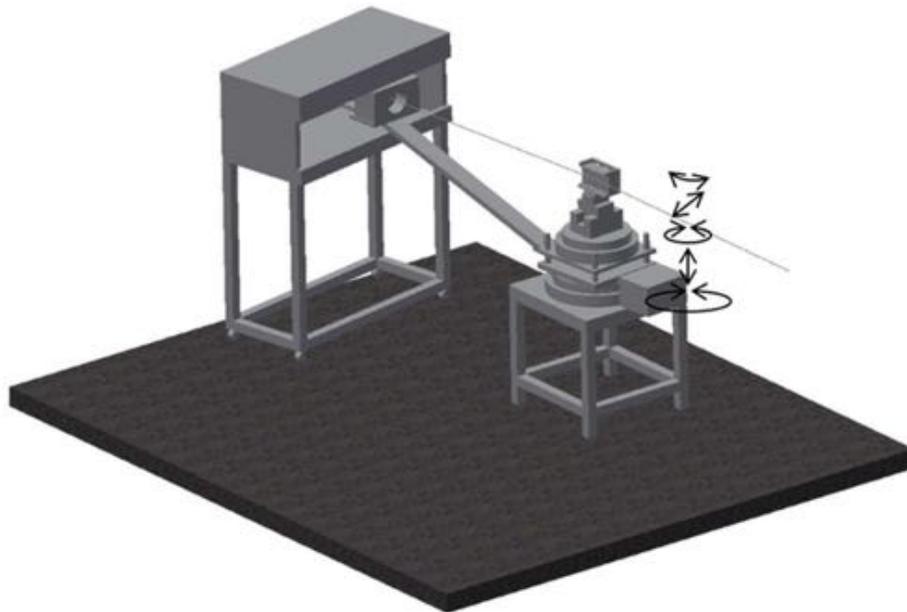


Abbildung 3-3: Detektorarm mit horizontaler Messung

Im Laufe der horizontalen Messung kann der Detektor um die Z-Achse des Probenstückes rotieren. Die Bewegung findet auf einer Kreisbahn statt, deren Radius durch die Länge des Detektorarms definiert wird. Während dieses Messverlaufs ist keine Bewegung der großen Abschirmung nötig, da aufgrund einer ausreichend großen Aussparung an der Vorderseite der Abschirmung beide Endlagen des Detektors innerhalb der Abschirmung erreicht werden können. In Abbildung 3-4 wird links die erste und rechts die zweite Endlage für den horizontalen Messverlauf erreicht. Für das Erreichen großer Winkel kann die Abschirmung von Hand verschoben werden. Eine genaue Positionierung ist hier nicht erforderlich.

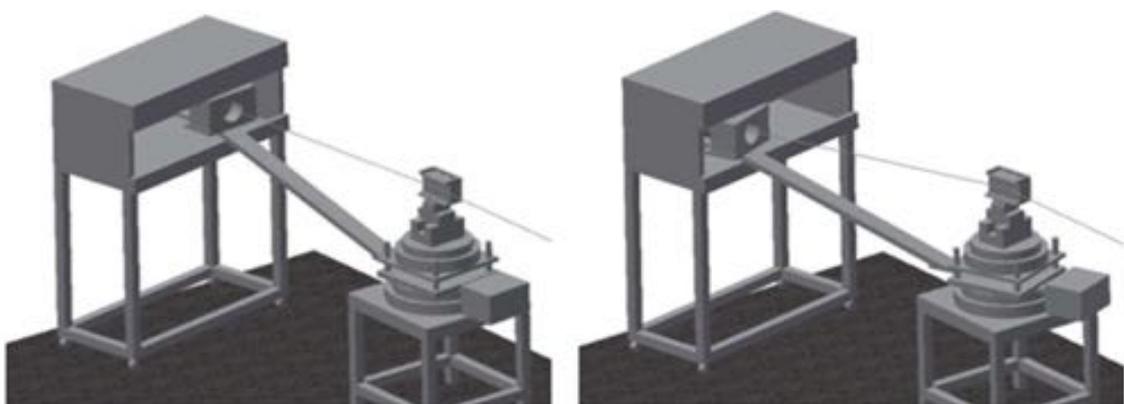


Abbildung 3-4: Detektorarm in Endlagen

### 3.2.2 Detektorarm mit vertikaler Messung

Die vertikale Messung des zweiten Lösungsprinzips (siehe Abbildung 3-5) gestaltet sich ähnlich der vertikalen Messung des Lösungsprinzips *Schienerführung* aus Kapitel 3.1.2.

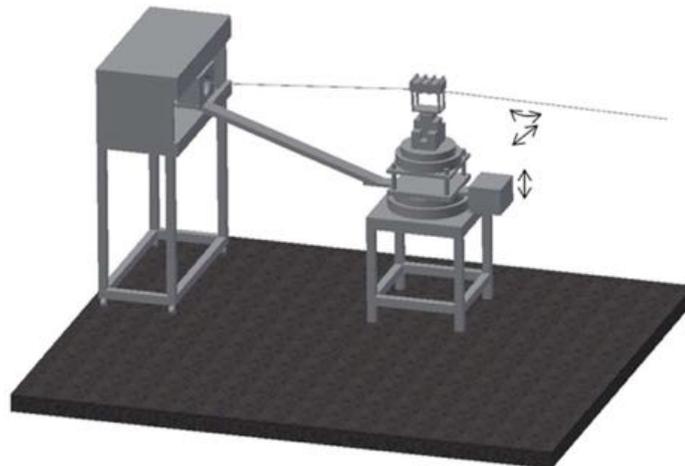


Abbildung 3-5: Detektorarm mit vertikaler Messung

Der Detektortisch wird hierzu in Ausgangsstellung gebracht. Der zuvor erklärte Umbau der Probenhalterung findet als einzige konstruktive Änderung des Produktes statt. Durch die Manipulatoren Hubtisch und Goniometer kann nun der geforderte Messablauf erreicht werden.

## 3.3 Lösungsprinzip 3: Lineartisch

Die maßgebende Komponente im dritten Lösungsprinzip ist der Lineartisch. Dieser ersetzt die bisherige rotatorischen Antriebe einer gebogenen Schienenführung und eines Drehtisches durch eine translatorische Linearführung des Detektors.

### 3.3.1 Lineartisch mit horizontaler Messung

Wie in Abbildung 3-6 zu sehen ist, findet auch im dritten Lösungsprinzip der in Kapitel 3.1.1 beschriebene Proben Tisch Anwendung. Lediglich die Verbindungseinheit vom Proben Tisch zum Detektortisch ändert sich.

Der Detektortisch ist beispielsweise auf Luftkissenfüßen oder Rollenfüßen gelagert, die einerseits über dem Hallenboden bewegt, andererseits aber auch auf dem Boden in ihrer Position fixiert werden können. Analog zum Aufbau der bisher beschriebenen Lösungsprinzipien befindet sich darauf ein Gestell zum Höhenausgleich. Auf diesem Gestell wird eine angetriebene untere Lineareinheit

fixiert. Senkrecht dazu wird eine frei bewegliche obere Lineareinheit angebracht. Auf dieser befindet sich ein frei beweglicher Drehtisch, auf welchem der Detektor mit seiner lokalen Abschirmung fixiert wird. Die Verbindungseinheit vom unteren Drehtisch des Probestisches wird ebenfalls am Detektor befestigt.

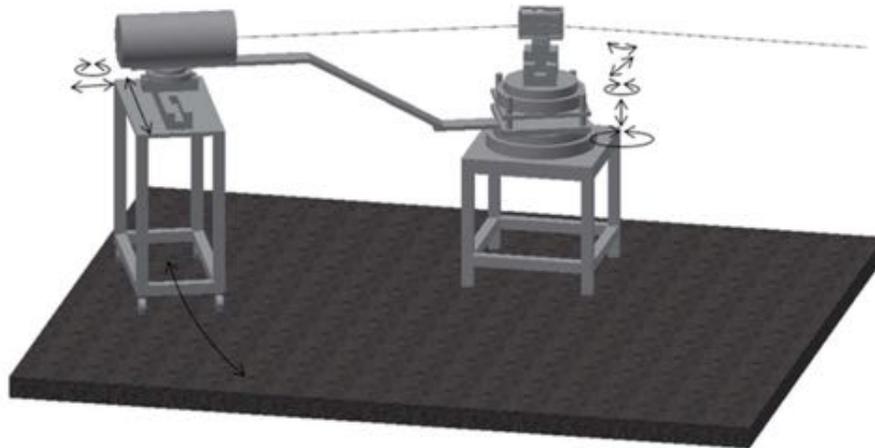


Abbildung 3-6: Lineartisch mit horizontaler Messung

Für den regulären horizontalen Messverlauf ist eine Bewegung des Detektors über die auf dem Detektortisch angebrachten Bewegungseinheiten möglich. Für das Erreichen großer Winkel kann der Detektortisch mittels der Rollen über den Boden bewegt werden. Diese grobe Bewegung erfolgt zunächst händisch. Die genaue Positionierung wird im Betrieb nach der händischen Bewegung wie in der Ausgangsstellung durch den Lineartisch des Detektors erreicht. Die oberen Bewegungseinheiten werden während der händischen Bewegung fixiert, um eine ungewollte Bewegung des Detektors durch die beiden Lager zu vermeiden. Erst nach der Fixierung des Detektortisches auf dem Boden nimmt der obere Bewegungsapparat wieder seine Funktion auf.

Der Detektor bewegt sich trotz der linearen Führung weiterhin auf einer Kreisbahn mit konstantem Radius. Dies wird durch die zusätzliche Verwendung der oberen passiven Lineareinheit und des Drehtisches ermöglicht. Der Austausch der Rotationsbewegung in den ersten beiden Lösungsprinzipien durch die Kombination zweier Linearbewegungen wird in Abbildung 3-7 verdeutlicht. Die untere Lineareinheit (orange) bewegt die oberen Komponenten zunächst entlang der Y-Achse. Um den Verlauf der Kreisbahn einzuhalten wird die zweite Lineareinheit (blau) benötigt. Durch sie kann der Detektor zum Ausgleich quer zur unteren Lineareinheit entlang der X-Achse bewegt werden. Ein sich darauf be-

findender Drehtisch (schwarzer Rotationspunkt) sorgt zusammen mit der starren Detektorarmverbindung beider Baugruppen dafür, dass der Detektor (gelb) immer zur Rotationsachse des Probenisches ausgerichtet ist. In der Abbildung werden die Endlagen sowie die Ausgangsstellung dargestellt. Es ist zudem das Koordinatensystem aus dem Produktursprung als Referenz eingezeichnet.

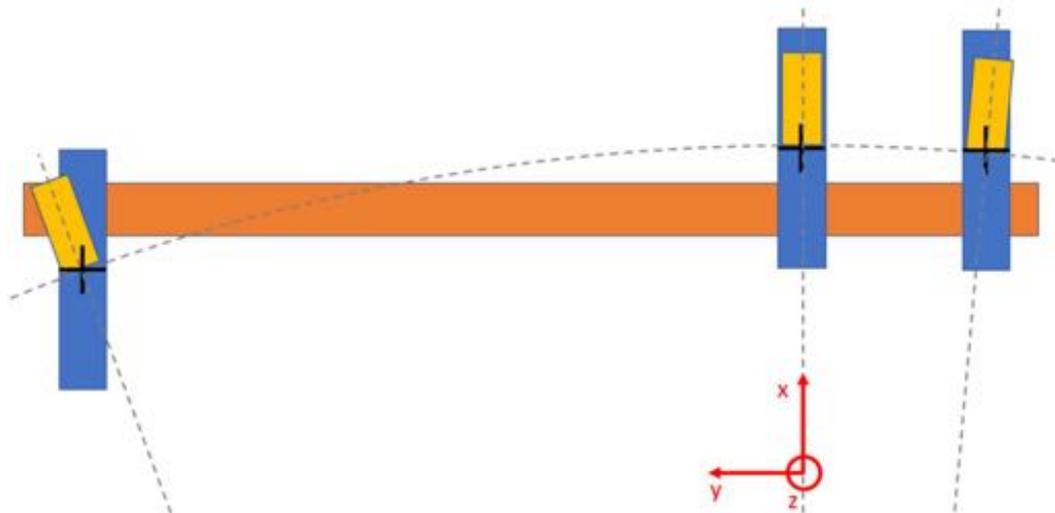


Abbildung 3-7: Modelldarstellung zum Austausch von Rotation durch Translation

### 3.3.2 Lineartisch mit vertikaler Messung

Die vertikale Messung des dritten Lösungsprinzips gestaltet sich ähnlich der vertikalen Messung aus Kapitel 3.1.2. Der Detektortisch wird hierzu in Ausgangsstellung gebracht. Der zuvor erklärte Umbau der Probenhalterung findet als einzige konstruktive Änderung des Produktes statt.

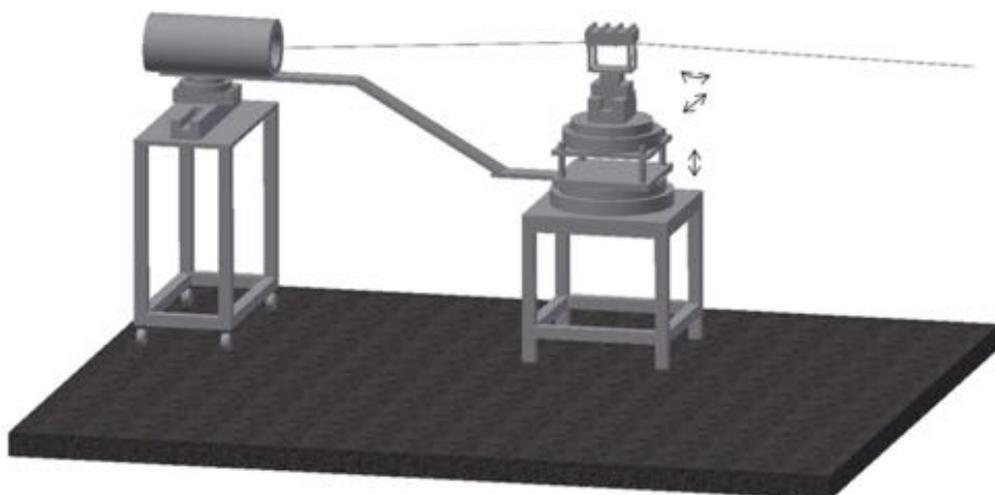


Abbildung 3-8: Lineartisch mit vertikaler Messung

Durch die Manipulatoren Hubtisch und Goniometer kann nun der geforderte Messablauf erreicht werden. Anschaulich dargestellt wird der vertikale Messablauf des dritten Lösungsprinzips in Abbildung 3-8.

### **3.4 Bewertung und Vergleich**

Ziel dieses Kapitels ist eine begründete Auswahl eines Lösungsprinzips zur weiteren Konstruktion. Es soll das Prinzip ausgewählt werden, welches sowohl alle verpflichtenden Anforderungen erfüllt als auch das größte Potential für eine zielführende Konstruktion bietet.

#### **3.4.1 Absolute und relative Bewertungskriterien**

Als eine erste Grundlage einer Bewertung der Lösungsprinzipien kann die Erfüllung der in Kapitel 2.3 beschriebenen Anforderungen dienen. Da es sich bei diesen Anforderungen um absolut verpflichtende Anforderungen handelt, führt eine Nichterfüllung zu einem direkten Ausschluss des Lösungsprinzips. Somit können nicht akzeptable Lösungsprinzipien vor einer weiteren Bewertung ausgeschlossen werden. In den Kapiteln 3 bis 3.3 sind Lösungsprinzipien beschrieben worden, die bereits jeweils Möglichkeiten bieten, alle beschriebenen Anforderungen in der Konstruktion zu erfüllen. Im Laufe der Suche nach Lösungsprinzipien konnten jedoch früherer Iterationen und Versionen aufgrund der absoluten Bewertungskriterien ausgeschlossen werden. Diese sind in der Arbeit nicht dargestellt.

Im zweiten Schritt findet nun eine Bewertung der Lösungsprinzipien anhand relativer Bewertungskriterien mit dem Ziel statt, einen quantitativ messbaren Vergleich zu erstellen. Der Fokus liegt bei dieser Methode auf dem Grad der Erfüllung einer Anforderung. Es findet kein absoluter Ausschluss eines Lösungsprinzips statt, vielmehr wird eine Rangfolge der drei Lösungsprinzipien entsprechend dem Grad der Anforderungserfüllung erstellt. Hierbei ist zu beachten, dass nicht das Lösungsprinzip im zuvor dargestellten Zustand bewertet wird, sondern dessen Potential für die in Kapitel 4 stattfindende Konstruktion.

Es werden sechs von der Aufgabenstellung abgeleitete Kriterien definiert. Diese Kriterien sind Herstellungskosten, Betriebssicherheit, Bedienungskomplexität, Fertigungsaufwand und -zeit, Recyclingfähigkeit und Inbetriebnahmeaufwand (siehe Tabelle 1). In den drei weiteren Spalten der Tabelle werden die drei Lösungsprinzipien aufgeführt. Die Zahlenwerte sind Werte zwischen eins und zehn, wobei zehn das höchste und eins das geringste Potential zur Realisierung eines

Bewertungskriteriums darstellt. Eine kurze Beschreibung jedes Kriteriums der Lösungsprinzipien befindet sich unten.

Tabelle 1: Bewertung der Lösungsprinzipien

Möglichkeit zur Realisierung von ...	Schienenführung	Detektorarm	Lineartisch
... geringen Herstellungskosten	4	5	8
... hoher Betriebssicherheit	4	3	8
... geringer Bedienungskomplexität	8	7	5
... geringem Fertigungsaufwand und -zeit	5	3	7
... hoher Recyclingfähigkeit	2	5	7
... geringem Inbetriebnahmeaufwand	7	3	5

Zu den Herstellungskosten zählen sowohl Kosten für Aufträge an die instituts-eigene Werkstatt als auch für Kaufteile, welche von externen Unternehmen erworben werden müssten. Die Schienenführung bildet als Hauptkomponente des ersten Lösungsprinzips ebenso wie die große Abschirmung des *Detektorarms* einen hohen Kostenpunkt. Durch die Verwendung vieler Lagerteile und massen-angefertigter Katalogware erhält das Lösungsprinzip *Lineartisch* die höchste Wertung für das erste Kriterium.

Durch die großflächige niedrige Schienenführung entsteht eine Stolper- und Sturzgefahr, während beim *Detektorarm* das Potential zum Quetschen zwischen beweglichem Detektor und feststehender Abschirmung gegeben ist. Somit ist die Möglichkeit zur Realisierung einer hohen Betriebssicherheit der beiden ersten Lösungsprinzipien eher gering zu bewerten. Der *Lineartisch* dagegen weist diese Merkmale nicht in diesem Umfang auf und erhält somit eine höhere Bewertung.

Die Bedienungskomplexität bezieht sich auf regelmäßige Tätigkeiten, die beim vorgesehenen Einsatz von Detektor- und Probenstisch auftreten. Dazu zählt beispielsweise das Bewegen von Objekten per Hand. Die *Schienenführung* benötigt keine Handsteuerung und erhält somit eine hohe Bewertung. Für die Messung von größeren Winkeln als den üblichen ist beim *Detektorarm* und *Lineartisch* eine Bewegung von Hand nötig, was die Bewertung senkt. Durch die Geometrie des *Lineartischs* gestaltet sich die Positionierungssteuerung komplexer, was ebenfalls die Bewertung senkt.

Ein hoher Fertigungsaufwand bietet ein Risiko für Zeitverluste in der Produktherstellung oder sogar nötige Neukonstruktionen bei unvorhersehbaren Problemen.

Der *Detektorarm* beispielsweise mit seiner großen Abschirmung bietet dieses Potential und erhält somit eine geringe Bewertung. Die häufige Verwendung von Lager- und Fertigteilen des *Lineartisches* führt zu einem geringeren Fertigungsaufwand und somit zu einer höheren Bewertung.

Das Recyclen von Komponenten des Detektor- und Probenstisches steht am Ende des Lebenszyklus dieses Produktes im Vordergrund. Der *Lineartisch* mit der zuvor bereits erwähnten großen Anzahl an Standardprodukten und Lagerteilen lässt sich gut in wiederverwendbare Einzelteile zerlegen. Für einen Aufbau speziell angepasste Komponenten wie beispielsweise die Schienenführung oder die große Abschirmung des *Detektorarms* ist die Wahrscheinlichkeit einer Wiederverwendung in einem zukünftigen Projekt geringer.

Der einmalige Inbetriebnahmeaufwand stellt das letzte Kriterium dar und beinhaltet alle notwendigen Tätigkeiten, die nach der Montage aller Bauteile bis zum ersten vollständigen Betrieb anfallen. Eine der Hauptaufgaben dafür stellt die Justage von Detektor und Probe dar. Der Umfang dieser Aufgabe ist beim Lösungsprinzip *Schienenführung* gering. Die Ausrichtungen von Hand für Lösungsprinzipien *Lineartisch* und *Detektorarm* erhöht den Aufwand. Zusätzlich kommt eine mögliche Justage des Detektors innerhalb der Abschirmung im zweiten Lösungsprinzip hinzu.

### 3.4.2 Gewichtete relative Bewertung

Als dritter Schritt der Bewertung folgt eine Gewichtung der relativen Kriterien untereinander. Es wird somit die Möglichkeit gegeben, dass die Relevanz der Kriterien an die Aufgabenstellung angelehnt werden kann. In diesem Projekt haben die geringen Herstellungskosten einen hohen Stellenwert, während der einmalige Inbetriebnahmeaufwand zwar nicht zu vernachlässigen ist, jedoch spielt dieser eine eher untergeordnete Rolle.

Die Gewichtung der Kriterien wird als Aufgabenstellung vorgegeben. Diese ist in Tabelle 2 in der zweiten Spalte als Wert zwischen 1 und 10 angegeben, wobei 10 der höchsten und 1 der geringsten Relevanz entspricht. Die Zahlenwerte der Bewertung aus Tabelle 1 werden mit der Gewichtung des entsprechenden Kriteriums multipliziert. Die Ergebnisse werden aufsummiert und sind ebenfalls in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Aufsummierte gewichtete Bewertung der Lösungsprinzipien

Möglichkeit zur Realisierung von ...	Gewichtung	Schienerführung	Detektorarm	Lineartisch
... geringen Herstellungskosten	10	40	50	80
... hoher Betriebssicherheit	8	32	24	64
... geringer Bedienungskomplexität	6	48	42	30
... geringem Fertigungsaufwand und -zeit	5	25	15	35
... hoher Recyclingfähigkeit	4	8	20	28
... geringem Inbetriebnahmeaufwand	3	21	9	15
	Summe:	174	160	252

Der *Lineartisch* ist mit einer Bewertung von 252 als das beste Lösungsprinzip im Vergleich zu den Lösungsprinzipien *Schienerführung* (Bewertung 174) und *Detektorarm* (Bewertung 160) ermittelt worden. Der Punkteabstand zwischen dem besten und zweitbesten Lösungsprinzip beträgt 78 Punkte. Dies entspricht ungefähr 31% der Bestbewertung. Dieser deutliche Unterschied zeigt, dass keine weitere Auswahlmethode erforderlich ist. Der *Lineartisch* wird als Lösungsprinzip gewählt.

## 4 Konstruktion

Wie dem Aufbau der Arbeit aus Abbildung 1-3 zu entnehmen ist, ist nach der Auswahl eines geeigneten Lösungsprinzips nun die nächste Aufgabe die Ausgestaltung. Das Lösungsprinzip *Lineartisch* ist als geeignetes Lösungsprinzip in Kapitel 3 beschrieben und ausgewählt worden. Ziel dieses Kapitels ist eine Beschreibung der Konstruktion mit ihren wesentlichen Kenndaten. Weitere detaillierte Informationen zum 3D-Objekt befinden sich im Anhang. Vor der Produktkonstruktion wird zunächst eine Gliederung des Produktes in einzelne Module erstellt, die sowohl das Konstruieren als auch die Konstruktionsbeschreibung übersichtlicher gestaltet und spätere Referenzierungen ermöglicht. Im Anschluss an die Konstruktionsbeschreibung werden zuvor getätigte Annahmen und dargestellte Informationen rechnerisch überprüft und validiert.

Analog zu Kapitel 3 gehen auch in diesem Kapitel dem abgebildeten Stand der Konstruktion im Laufe des Arbeitsvorganges eine Vielzahl von Revisionen und Iterationen voraus. Im Sinne der Übersichtlichkeit wird jedoch wie bisher darauf verzichtet diese aufzuzeigen. Es wird der fertige Endzustand der Konstruktion dargestellt.

### 4.1 Modulgliederung

Für das Verständnis der Gliederung sind zunächst die verwendeten Begriffe Produkt, Ober- und Unterbaugruppe sowie Modul zu definieren. Das Produkt ist die Gesamtheit aller konstruktiven Bauteile, welches in dieser Arbeit „justierbarer Detektor- und Proben Tisch“ genannt worden ist. Ein Produkt lässt sich zunächst in Oberbaugruppen gliedern. Diese werden wiederum in weitere Unterbaugruppen aufgeteilt. Der Begriff Modul stellt allgemein den Oberbegriff für Produkt, Ober- und Unterbaugruppe dar und beschreibt diese somit unabhängig ihrer Strukturebene.

Eine Gliederung des Produktes in dessen Module findet sich in Abbildung 4-1. Dem Proben Tisch zugehörig werden die Unterbaugruppen Probenbewegung, Probenaufnahme und Probengestell definiert. Dem Detektortisch untergeordnet sind die Unterbaugruppen Detektorbewegung, Detektorgestell und Detektorarm.

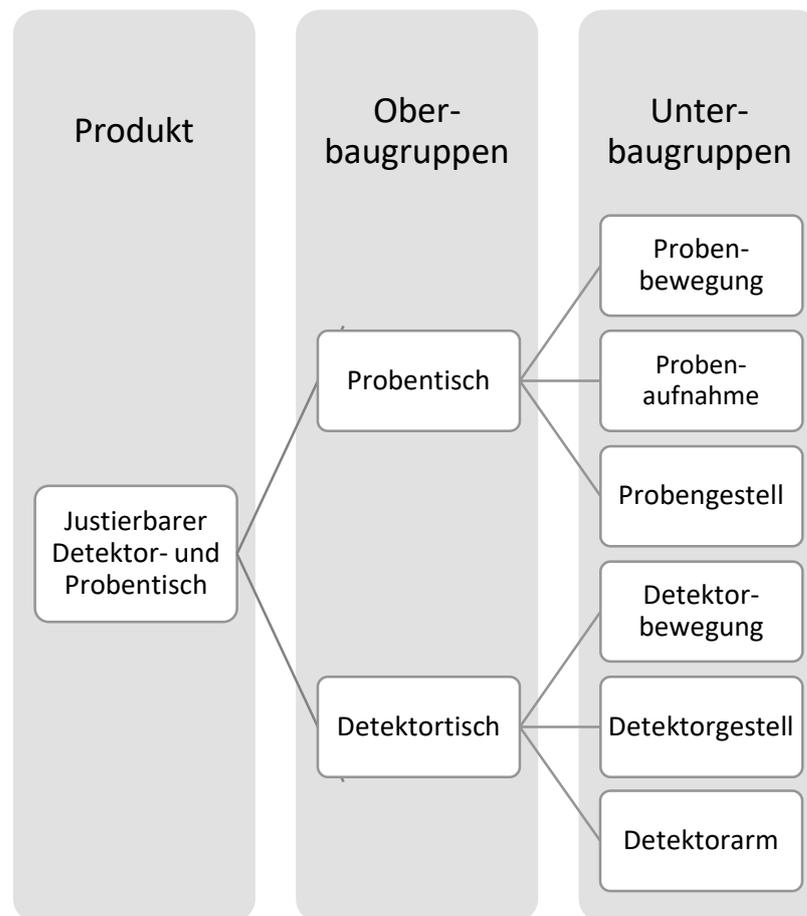


Abbildung 4-1: Modulgliederung des Produktes

## 4.2 Modulgestaltung

Dieses Kapitel beschreibt die Gestaltung der Module für den horizontalen Messaufbau. Eine Darstellung des Produktes im vertikalen Messaufbau findet sich in Kapitel 4.3. Es werden für die beiden Oberbaugruppen Proben- und Detektortisch zunächst die jeweiligen Unterbaugruppen dargestellt. Darauf folgt dann eine Beschreibung der entsprechenden Oberbaugruppe. Es sind die aus konstruktionstechnischer Sicht relevanten Informationen dargestellt.

### 4.2.1 Probengestell

Ein Gestell wird als Unterkonstruktion für die Probe genutzt. Die Hauptaufgabe liegt in der unbeweglichen Positionierung der Unterbaugruppen Probenbewegung und -aufnahme. Der Höhenunterschied zwischen der Unterseite des Moduls Probenbewegung und dem Boden wird überbrückt.

Abbildung 4-2 zeigt die Unterbaugruppe Probengestell in isometrischer Ansicht mit einer Bauteilbenennung. Die nachfolgende Beschreibung der Komponenten nimmt in Form der Bauteilnummern Bezug auf diese Abbildung.

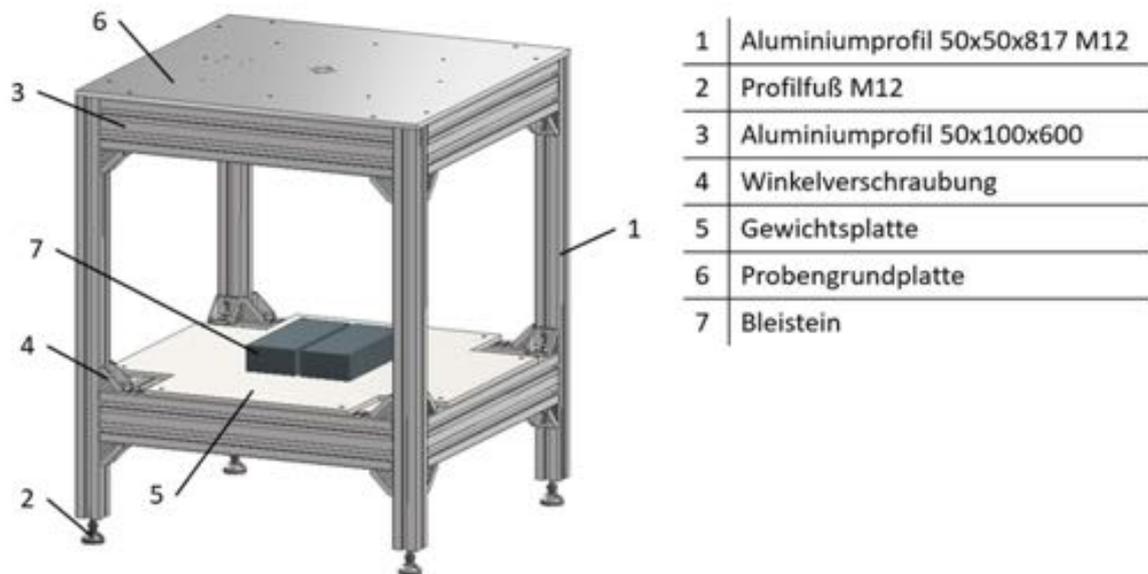


Abbildung 4-2: Probengestell

Für eine schnelle Montage, ein hohes Maß an Recyclingfähigkeit und ausreichende Stabilität besteht das Probengestell zum großen Teil aus Aluminiumprofilen.

Das Aluminiumprofil 50x50x817 M12 (1) dient als vertikale Stütze. Vier Profilfüße M12 (2) werden als Kontaktpunkt zum Boden in die Aluminiumprofile eingeschraubt. Es werden Aluminiumprofile 50x100x600 (3) als horizontale Querstreben zwischen den vertikalen Stützen eingesetzt. Die breitere Ausführung sorgt zusammen mit den Winkelverschraubungen für eine höhere Steifigkeit des gesamten Moduls bei horizontaler Belastung, die bei einer Bewegung des Detektortisches nicht auszuschließen ist. Die Verbindung der Aluminiumprofile erfolgt über Winkelverschraubungen (4). Um die Position des Probengestells auf dem Boden bei einer horizontalen Kraftaufbringung zu sichern, wird eine Gewichtsplatte (5) aus Stahl auf die unteren Aluminiumprofile geschraubt. Auf dieser Ebene können die vor Ort vorhandenen Bleisteine (7) als zusätzliches Gewicht gestapelt werden. Diese Lösung der Positionssicherung ist einer Verankerung mit einer notwendigen Bohrung im Boden vorzuziehen, da der Boden des Aufbauortes mit einem dekontaminierbaren Anstrich versehen ist und somit maßgeblich zum örtlichen Strahlenschutz beiträgt. Dieser soll nicht beeinflusst werden. Die Probengrundplatte (6) aus Aluminium mit einer Dicke von 10 mm

sorgt für ausreichende Tragfähigkeit auf der Oberseite. Die Grundplatte wird über Nutensteine mit den Aluminiumprofilen verschraubt. Auf der Oberseite der Probengrundplatte befindet sich das Modul Probenbewegung.

Alle Aluminiumprofile samt Zubehör sind Zukaufteile des Herstellers Bosch, während die Fertigung der Grund- und Gewichtplatte in der institutseigenen Werkstatt möglich ist. Die einlegbaren Bleisteine befinden sich im Lager des Aufbauortes.

#### 4.2.2 Probenbewegung

Die Aufgabe dieses Moduls ist die Bewegung der Probe samt Probenaufnahme. Laut Anforderungen 2.6 und 2.7 aus Kapitel 2.3 sind Translationen in Z- und Y-Richtung sowie laut Anforderung 2.1 eine Rotation um die Z-Achse für den horizontalen Aufbau notwendig. Gemäß Anforderung 2.8 ist eine weitere Rotation der Probe um die horizontale Oberflächentangente der Probenvorderseite notwendig. Für den vertikalen Messaufbau wird eine Rotation um die Y-Achse sowie eine Translation entlang der X-Achse benötigt (siehe Anforderungen 3.1 und 3.2). Die Bewegungen in diesen vier Achsen werden gemäß Anforderung 1.2 ferngesteuert bedient. Die Hauptkomponenten der Unterbaugruppe Probenbewegung sind in Abbildung 4-3 mit ihrer Benennung und dem Koordinatensystem dargestellt. Der Hubzylinder ist unterhalb der Grundplatte angebracht und aus diesem Grund in der Abbildung zum Großteil verdeckt.

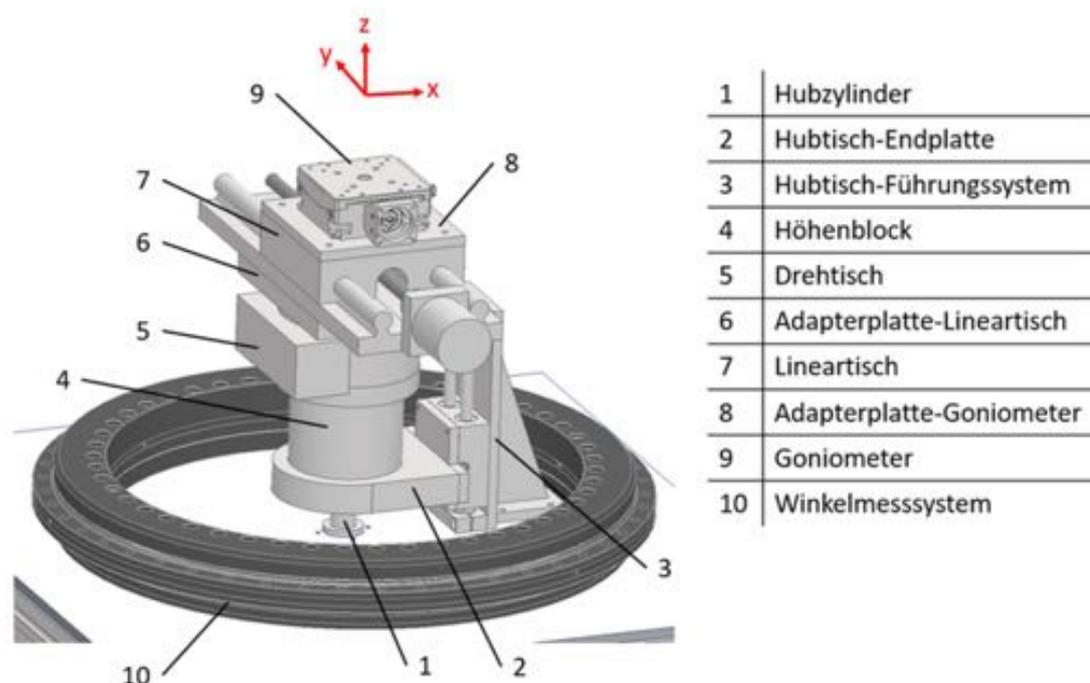


Abbildung 4-3: Probenbewegung

Die beiden Adapterplatten (6) und (8) sowie der Höhenblock (4) sind mit an den Bauteilen angepassten Bohrmustern als Verbindung zwischen diesen und als Überbrückung von Höhenunterschieden eingefügt worden.

Im Folgenden werden Hubzylinder, Drehtisch, Lineartisch, Goniometer und Winkelmesssystem mit ihren zugehörigen Komponenten näher erläutert. Um die Anforderung 1.2 zu erfüllen werden diese Komponenten ferngesteuert betrieben.

### Hubzylinder mit Hubtischführung

Auf einen Neukauf eines Hubtisches kann verzichtet werden, da in dieser Arbeit ein Hubzylinder (1) zusammen mit einer linearen Führung (3) genutzt wird. Diese beiden Komponenten werden von ausgedienten Aufbauten recycelt und aus dem institutseigenen Lager bezogen. Sie verursachen somit keine zusätzlichen Kosten. Abbildung 4-4 stellt den Aufbau des Ersatz-Hubtisches aus Hubzylinder, Linearführung und Strebe dar. Es wird ein elektrischer Hubzylinder des Herstellers Parker genutzt, mit dem in vorherigen Aufbauten schon Erfahrungen gesammelt werden konnten und der aus diesem Grund ausgewählt worden ist.

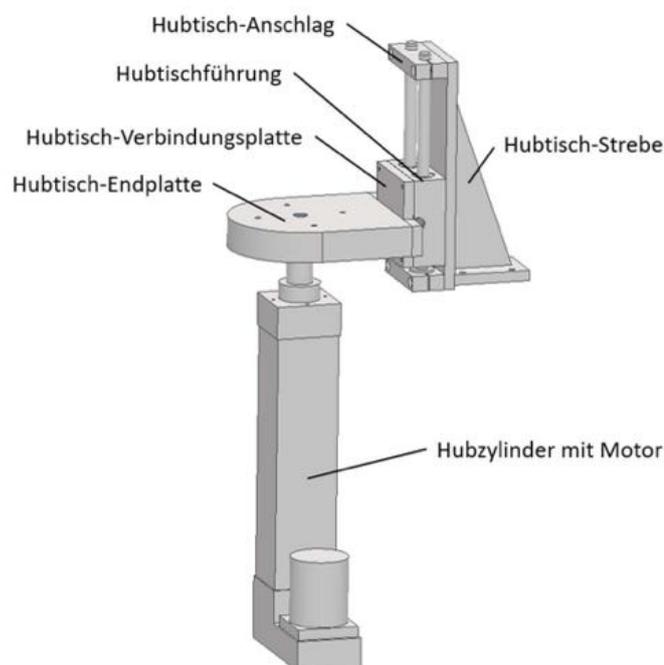


Abbildung 4-4: Hubzylinder mit Hubtischführung

Ein Servomotor ist parallel neben dem Zylinder über einen Riementrieb angebracht. Das Gehäuse des Hubzylinders wird auf dessen Oberseite mit der Grundplatte des Proben­tisches verschraubt. Das Gewinde am Ende der beweglichen

Zylinderstange wird in die Hubtisch-Endplatte (2) eingeschraubt, wodurch diese eine Bewegung in Z-Richtung ausführen kann. Um die Freiheitsgrade auf eben diese Z-Translation zu beschränken wird zusätzlich eine lineare Führung (3) eingesetzt. Das Führungssystem setzt sich aus einem über Führungsstangen gleitenden Block und einer Strebe zusammen. Die Führungsstangen samt Block werden recycelt und aus dem institutseigenen Lager bezogen. Eine mechanische Fertigung der übrigen Komponenten sowie notwendige Schweißarbeiten sind in der institutseigenen Werkstatt möglich. Der maximale Hub der Konstruktion aus Linearführung und Hubzylinder wird durch die Länge der Linearführung auf 111,75 mm beschränkt.

### Drehtisch

Auf der Endplatte des Hubtisches (2) und dem Höhenblock (4) befindet sich der elektrisch angetriebene Drehtisch (5) (vergleiche Abbildung 4-3), welcher recycelt und aus den institutseigenen Lagerbeständen verwendet wird und daher Anschaffungskosten einspart. Auf Grund des Alters des Bauteils werden keine 3D-Daten von Seiten des Herstellers bereitgestellt, weshalb in den Abbildungen eine Nachkonstruktion mit den für diesen Aufbau relevanten Maßen zu sehen ist. Der Drehtisch ist uneingeschränkt in seiner Bewegung und somit 360° verfahrbar.

### Lineartisch

Auf dem Drehtisch (5) und einer angepassten Adapterplatte (6) befindet sich ein Lineartisch (7) (vergleiche Abbildung 4-3). Dieser bewegt über einen Motor einen Schlitten entlang einer linearen Führung. Der Lineartisch stammt aus dem institutseigenen Lager und wird recycelt. Er verursacht somit keine zusätzlichen Kosten. Ähnlich dem Drehtisch sind auch hier keine 3D-Daten verfügbar, weshalb in den Abbildungen eine Nachkonstruktion zu sehen ist. Der Lineartisch verfügt über integrierte Endschalter in beiden Endlagen. Es ist insgesamt ein Fahrweg von 250 mm zu erreichen.

### Goniometer

Auf dem Schlitten des Lineartisches (7) befindet sich ein elektrisch angetriebenes Goniometer (9), das über eine Adapterplatte (8) mit dem Lineartisch verschraubt ist (vergleiche Abbildung 4-3). Charakteristisch für ein Goniometer ist

eine Drehachse, die in einem definierten Abstand über der Oberfläche liegt. Es wird somit eine Rotation um eine Achse in einem definierten Abstand, in diesem Fall der Y-Achse im Beleuchtungspunkt der Probe, ermöglicht. Dieser Abstand bietet in diesem Anwendungsfall ausreichend Platz für eine Probenhalterung. Es ist ein Neukauf eines Goniometers nötig.

#### Winkelmesssystem

Das Winkelmesssystem (10) ist unabhängig vom restlichen Aufbau der Probenbewegung auf der Grundplatte des Probengestells fixiert. Ähnlich einem Kugellager besitzt es zwei gegeneinander drehbare Ringe. Der innere ist mit der Grundplatte verschraubt, während der äußere mit dem Detektorarm verbunden wird. Ein integriertes Winkelmesssystem kann den Relativwinkel zwischen den beiden Ringen bestimmen. In dieser Arbeit wird ein Winkelmesssystem des Herstellers Schaeffler verwendet, welches über einen Messkopf mit einer SSI 1 Vss Schnittstelle zum Auslesen der Daten verfügt. Diese Schnittstelle ist bereits in bisherigen Aufbauten erfolgreich verwendet und aus diesem Grund ausgewählt worden. Das gewählte Messsystem verfügt über eine Winkelauflösung von  $\pm 1,1''$  [10]. Für diese Komponente ist ein Neukauf notwendig.

#### Schnittstellen der Probenbewegung

Diese Unterbaugruppe besitzt jeweils eine Schnittstelle zu den Unterbaugruppen Probengestell, Probenaufnahme und Detektorarm. Die Komponenten Winkelmesssystem und Adapterplatte auf der Unterseite der Baugruppe Probenbewegung werden auf das Probengestell montiert. Auf der Oberseite der Komponente Goniometer der Probenbewegung wird die Baugruppe Probenaufnahme angebracht. Am äußeren Ring des Winkelmesssystems wird die Baugruppe Detektorarm montiert.

### **4.2.3 Probenaufnahme**

Die Konstruktion der Probenaufnahme ist stark abhängig von den zu verwendenden Proben. Die bisher dargestellte Konstruktion des Produktes stellt eine Basis für die Probenaufnahme dar und gewährt somit eine große Freiheit für deren Gestaltung. Nachfolgend wird eine Probenaufnahme mit beispielhafter Probe dargestellt, wie sie in vorhergegangenen Aufbauten Anwendung fand.

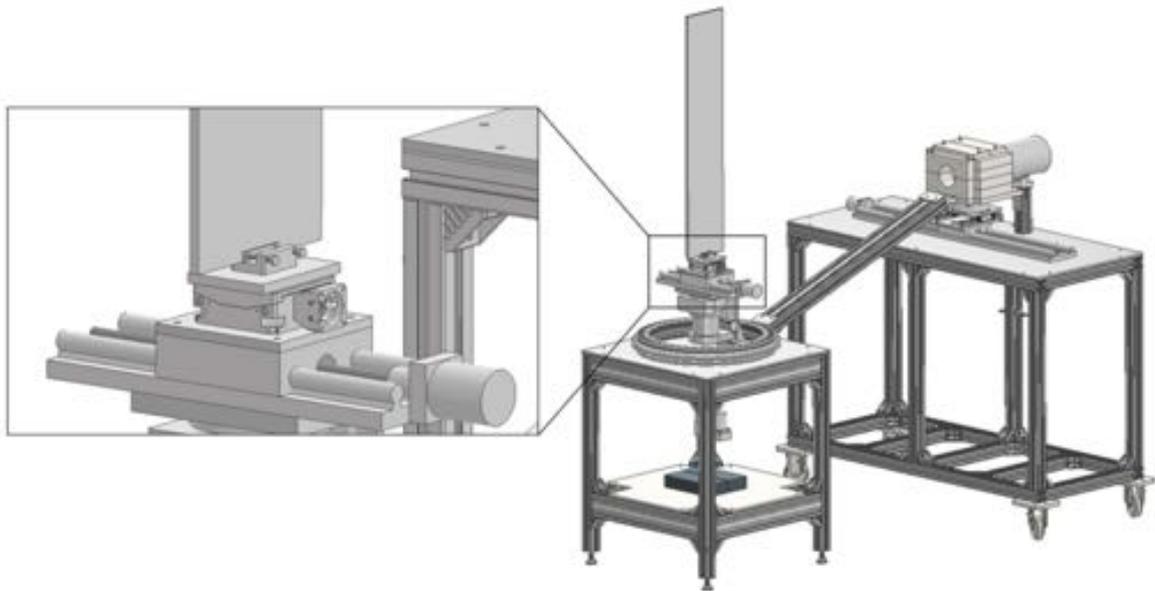


Abbildung 4-5: Produkt mit beispielhafter Probenaufnahme im Detail

Die im realen Aufbau zu verwendende Probenaufnahme ist an die Probe anzupassen. Zu diesem Zeitpunkt sind deren Abmaße noch nicht festgelegt, daher stellt dieser Arbeitsschritt eine spätere Tätigkeit dar, die nicht Teil dieser Arbeit ist.

#### 4.2.4 Oberbaugruppe Probentisch

Abbildung 4-6 stellt das Modul Probentisch mit den zuvor beschriebenen Unterbaugruppen Probengestell und Probenbewegung dar. Links in der Abbildung wird die Ausgangsstellung der Probenbewegung dargestellt. Rechts in der Abbildung werden zwei beispielhafte Einsatzpositionen dargestellt.

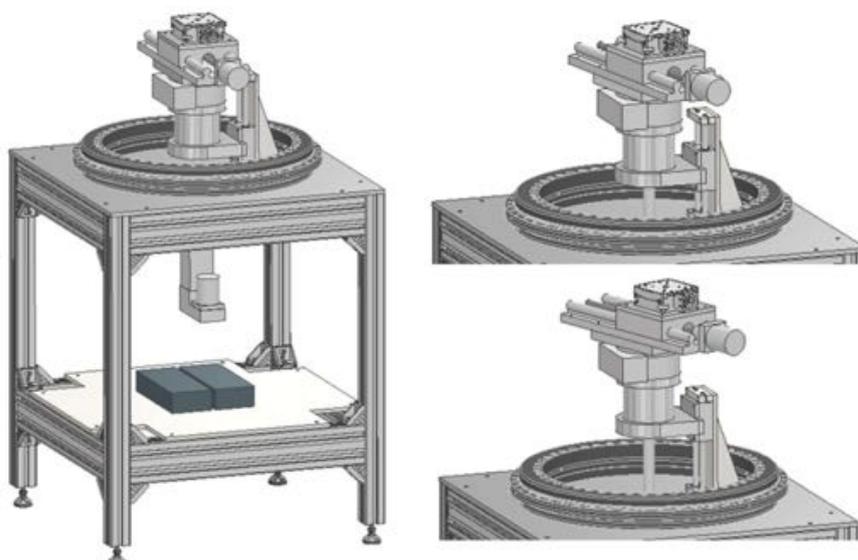


Abbildung 4-6: Probentisch in Einsatzpositionen

Daten zu den maximalen Verfahrwegen sind bereits in Kapitel 4.2.2 genannt worden. Die Montage des Probengestells und der Probenaufnahme haben darauf keinen Einfluss.

#### 4.2.5 Detektorgestell

Analog zum Gestell des Probentisches ist auch beim Detektorgestell die Hauptaufgabe die Positionssicherung des sich darauf befindenden Moduls, in diesem Fall die Detektorbewegung. Das Gestell des Detektortisches muss als weitere Aufgabe sowohl eine Fixierung der Position gegenüber dem Boden als auch zeitweise eine Rotationsbewegung um die Z-Achse des Produktes ermöglichen.

Die Anforderung 1.2, welche die regelmäßige Komponentenbewegung von Hand verbietet, wird hierdurch nicht verletzt.

Die Abbildung 4-7 zeigt das Detektorgestell mit einer Benennung der Komponenten. Die nachfolgende Beschreibung verweist mit den gegebenen Bauteilnummern auf diese Abbildung.

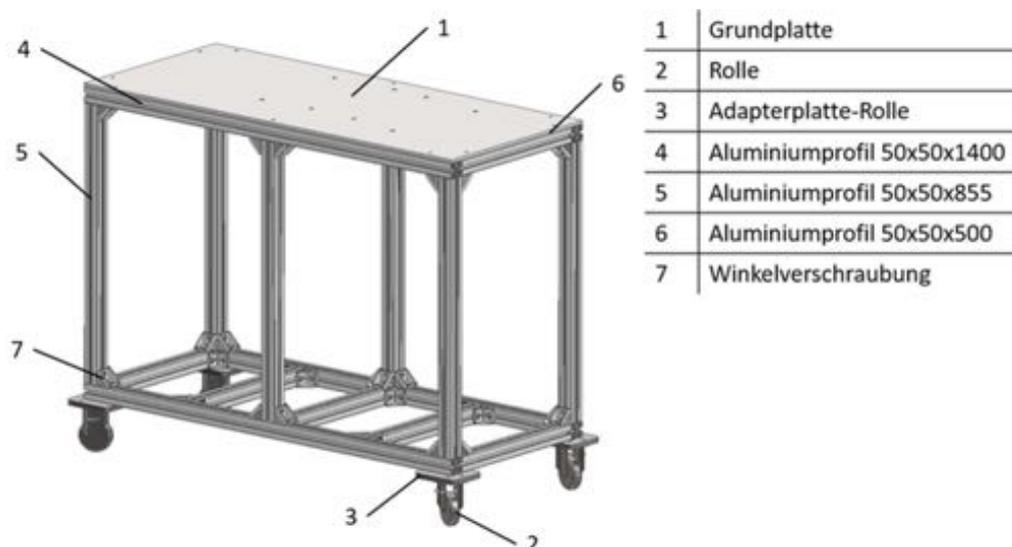


Abbildung 4-7: Detektorgestell

Analog zum Probengestell besteht das Detektorgestell im Wesentlichen aus einem System von Aluminiumprofilen. Auf der Oberseite ist eine 10 mm dicke Aluminiumgrundplatte (1) fixiert, auf der Unterseite befinden sich vier Rollen (2). Diese sind in ihrer Position starr und nicht drehbar, wodurch eine genauere Positionierung des Moduls ermöglicht wird. Der Winkel der Rollen relativ zu ihren Adapterplatten (3) ist jeweils so gewählt, dass der Detektortisch bei einer Bewegung von Hand nicht einer geraden Bewegungsbahn folgt, sondern die geforderte Rotation um die Z-Achse des Produktes ausführt. Es ist an dieser Stelle

zu erwähnen, dass nicht allein die Rollen für diese Bewegungsrichtung eingesetzt werden, sondern dies im Wesentlichen durch den Detektorarm erreicht wird. Die Anbringung der Rollen unter den definierten Winkeln unterstützt die händische Bewegung lediglich. Für den regulären Betrieb ist eine fixierte Positionierung des Detektortisches gewünscht, weshalb die Rollen über ein Bremsystem verfügen und somit in diesem Fall eine Bewegung verhindern.

Die längeren, unter der Grundplatte horizontal angebrachten Aluminiumprofile 50x50x1400 (4) erstrecken sich über die gesamte Länge der Grundplatte. Es wird dadurch eine gleichmäßigere Lastverteilung über alle vertikalen Aluminiumprofile 50x50x855 (5) des Gestells erreicht. Eine Erhöhung der Steifigkeit des Detektorgestells wird durch die, innerhalb des Profilrahmens angebrachten, Aluminiumprofile 50x50x500 (6) bereitgestellt. Der Einsatz von Aluminiumprofilen mit einer höheren Breite (siehe Probengestell) ist im Detektorgestell nicht notwendig, da dessen Positionierung nicht durch eine erhöhte Steifigkeit gesichert werden muss. Alle Verschraubungen werden analog zum Probengestell über Winkelstücke (7) realisiert. Dieses Modul besitzt lediglich eine Schnittstelle auf der Oberseite der Grundplatte. Dort wird der Lineartisch des Moduls Detektorbewegung fixiert.

#### **4.2.6 Detektorbewegung**

Die Aufgabe des Moduls Detektorbewegung ist die gesteuerte Bewegung des Detektors entlang einer Achse, während eine zur Bewegung senkrecht ausgerichtete Translation sowie eine Rotation als uneingeschränkte Freiheitsgrade erhalten bleiben. Die daraus resultierende Rotation um den Probenmittelpunkt definieren die Anforderungen 2.1 und 2.3. Das Modul Detektorbewegung enthält zudem die Abschirmung (siehe Anforderung 1.3). Abbildung 4-8 zeigt die Baugruppe samt der Benennung der Bauteile. Die Sperrstange (15) befindet sich nur während der händischen Tischbewegung im Aluminiumprofil (14), da sie dort eine starre Verbindung zur Grundplatte herstellt. Während des regulären Betriebs befindet sie sich in ihrer Halterung (siehe Abbildung 4-13).

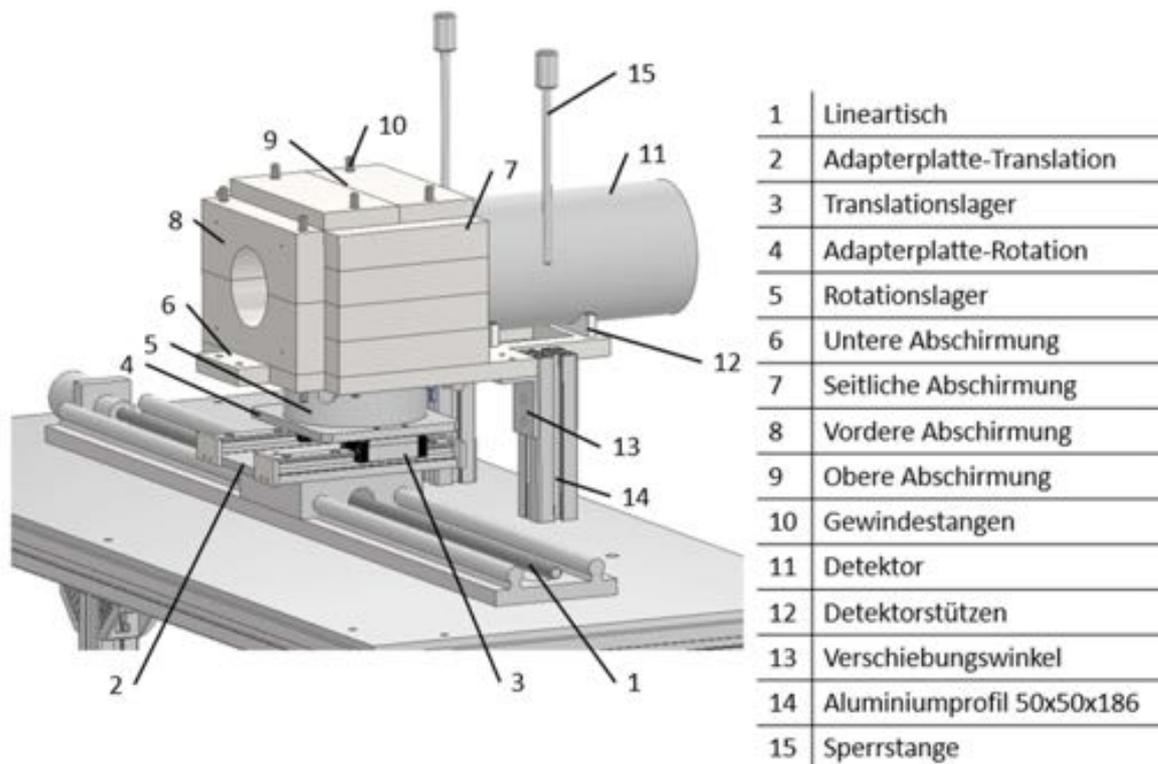


Abbildung 4-8: Detektorbewegung

Die Detektorbewegung ist zusätzlich in Abbildung 4-9 im Schnitt dargestellt. Die blau dargestellte Ebene zeigt die Position der Messfläche innerhalb des Detektors an, die es vor störender Streustrahlung aus der Umgebung abzuschirmen gilt.

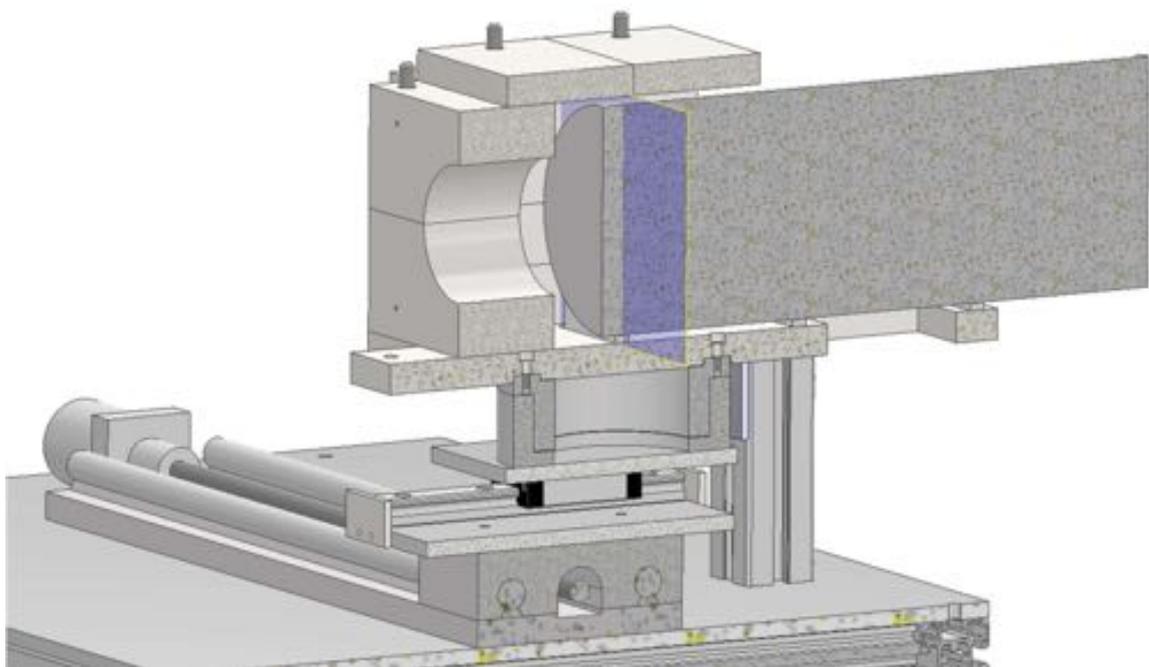


Abbildung 4-9: Detektorbewegung im Schnitt

Die Unterbaugruppe Detektorbewegung besteht aus den folgenden wesentlichen Komponenten: Lineartisch, Translations- und Rotationslager, Abschirmung und Detektor. Nachfolgend findet eine Beschreibung dieser Komponenten statt.

### Lineartisch

Der angetriebene Lineartisch (1) wird auf der Grundplatte des Detektortisches befestigt und bewegt den folgenden Aufbau auf einem Schlitten entlang seiner linearen Führung. Der Lineartisch wird aus dem institutseigenen Lager bezogen und verfügt über einen Hub von 950 mm. In beiden Endlagen verfügt er über integrierte Endschalter. Ähnlich wie der Lineartisch des Probenstisches handelt es sich hier ebenfalls um ein Bauteil einer älteren Modellreihe, weshalb auch hier im 3D-Modell eine Nachkonstruktion mit den relevanten Maßen zu sehen ist.

### Translationslager

Auf dem Schlitten des Lineartisches (1) und einer Adapterplatte (2) aus Aluminium werden zwei Translationslager (3) angebracht. Es werden zwei Stück mit einem Abstand zueinander eingesetzt, um das Risiko eines zu hohen Kippmomentes des darüberliegenden Aufbaus beim Anfahren oder Abbremsen des Lineartisches zu minimieren. Zusätzlich werden an die Adapterplatte vier Anschlagplatten aus Stahl angebracht, um den Verfahrweg zu begrenzen und ein Herunterfallen des darüberliegenden Aufbaus zu verhindern. Die Länge des Verfahrweges eines Translationslagers beträgt 137 mm und liegt somit über dem minimal benötigten Wert von 77,515 mm (siehe Kapitel 5.1.1). Die Translationslager sind Zukaufteile.

### Rotationslager

Das Rotationslager (5) wird auf einer weiteren Adapterplatte (4) aus Aluminium angebracht. Die Verwendung des Rotationslagers in dieser Arbeit sieht vor, dass die Stellschraube für die händische Rotation des Lagers gelöst ist und somit eine freie Drehung gewährleistet wird. Das Rotationslager wird aus dem institutseigenen Lager bezogen.

### Abschirmung und Detektor

Die untere Abschirmung (6) dient gleichzeitig als Grundplatte des darüber liegenden Aufbaus. Es werden an ausgewählten Stellen Taschen zur Gewichtsreduzierung in die Konstruktion eingefügt. In die untere Abschirmung werden Gewindestangen (10) eingeschraubt, die bei der Aufstapelung der seitlichen (7), vorderen (8) und oberen Abschirmung (9) helfen und diese in ihrer Position sichern. Da die Abschirmung in Richtung des Bodens und der Raumdecke als nicht kritisch angesehen werden kann, ist hier eine Dicke der stählernen Abschirmung von 20 mm ausreichend. Die seitliche und vordere Abschirmung wird entsprechend der Anforderung (1.3) hingegen als 70 mm dicke Abschirmung aus Stahl ausgeführt. Im Sinne einer geringeren Fertigungskomplexität durch die Vermeidung toxischer Materialien wird der Werkstoff Stahl anstatt Blei verwendet. Die Bauteile der seitlichen, vorderen und oberen Abschirmung sind in ihren Abmaßen so konstruiert, dass das maximal anzuhebende Gewicht möglichst gering ist. Es wird eine Masse der mehrfach aufzustapelnden Bauteile von 7 kg nicht überschritten. Ein Großteil des Detektors (11) überragt zwar die Abschirmung, jedoch wird die Messfläche des Detektors in ausreichendem Maße abgeschirmt (siehe Abbildung 4-9). Der Detektor kann selbst bei aufgebauter Abschirmung an seine Position gebracht werden. Er wird von drei Detektorstützen (12) aus Kunststoff auf der unteren Abschirmung platziert.

### Bewegungssperre

Die bisher beschriebenen Komponenten der Detektorbewegung reichen aus, um den regulären Betrieb des Produktes zu ermöglichen. Mit Hilfe der Komponenten der Bewegungssperre kann jedoch auch der in Anforderung 2.2 beschriebene Fall eines großen Streuwinkels erreicht werden. Die aus einem Winkel (13) und einem Aluminiumprofil (14) bestehende Führung beinhaltet eine Sperrstange (15), die in eine Bohrung in der Grundplatte abgesenkt werden kann. In diesem Zustand werden die durch die beweglichen Lager gegebenen Freiheitsgrade gesperrt. Es wird verhindert, dass der Detektor-Abschirmung-Aufbau bei einer ungenauen händischen Bewegung des Detektortisches gegen die Anschläge des Translationslagers stößt. Im regulären Betrieb befinden sich die Sperrstangen nicht in ihrer starren Führung aus Winkel und Aluminiumprofil, sondern in dafür vorgesehene Halterungen, die am Gestell befestigt sind.

### Schnittstellen

Die erste Schnittstelle dieses Moduls befindet sich auf der Unterseite des Lineartisches. Der Lineartisch wird auf der Oberseite des Detektorgestells fixiert. Eine zweite Schnittstelle stellt die Befestigung des Detektorarms an der Unterseite der Abschirmung dar.

#### 4.2.7 Detektorarm

Der Detektorarm (siehe Abbildung 4-10) stellt eine starre mechanische Verbindung zwischen den Oberbaugruppen Proben Tisch und Detektortisch her. Er definiert den horizontalen Abstand beider Module zueinander, welcher durch die Anforderung 2.4 definiert wird. Zudem verbindet der Detektorarm den Detektor mit dem Winkelmesssystem.

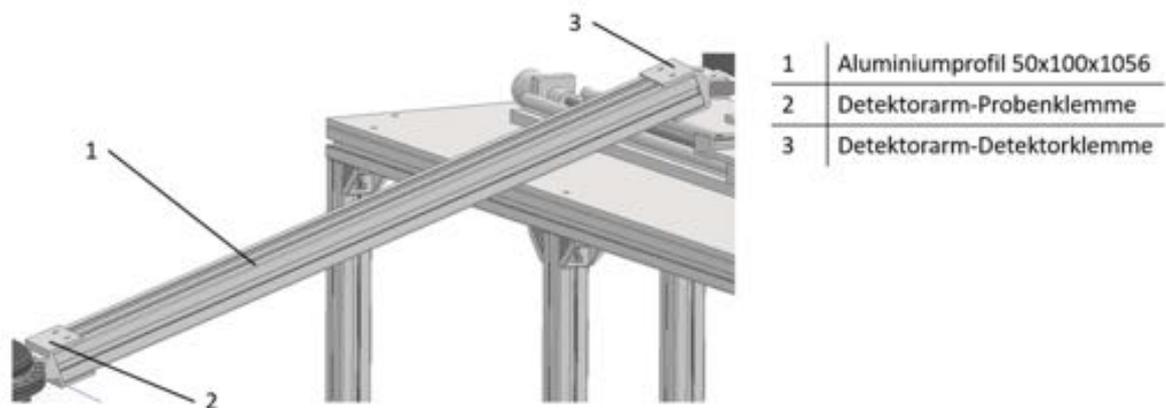


Abbildung 4-10: Detektorarm

Die Hauptkomponente des Detektorarms ist das Aluminiumprofil 50x100x1056 (1). Die Breite sorgt für eine erhöhte Steifigkeit des Moduls bei den Bewegungsabläufen. Erfahrungswerte aus vorherigen Aufbauten zeigen, dass eine zu geringe Steifigkeit erhöhte Messfehler bei der Detektorpositionierung hervorrufen kann, da die Bewegung des Detektors aufgrund einer Verformung des Detektorarms nicht am Winkelmesssystem aufgezeichnet werden kann.

An beiden Enden des Moduls befindet sich ein Adapterstück, welches die Fixierung am Winkelmesssystem und an der Detektorabschirmung ermöglicht. In der Abbildung links dargestellt ist die an das Winkelmesssystem angeschraubte Probenklemme (2). Auf der rechten Seite wird die Detektorklemme (3) an die untere Abschirmung der Detektorbewegung geschraubt.

#### 4.2.8 Oberbaugruppe Detektortisch

In Abbildung 4-11 wird das Modul Detektortisch dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung befindet sich der Detektor mittels Sperrstange gesichert in der Mitte des Lineartisches, in der so genannten Mittelstellung. Auf der rechten Seite der Abbildung ist in gleicher Ansicht der für das Produkt relevante Ausgangszustand dargestellt, bei dem der Detektortisch um die Z-Achse des Produktes um einen Winkel von  $7,5^\circ$  rotiert worden ist. Eine Herleitung dieser Positionierung findet sich in Kapitel 5.1.1. In der Ausgangsstellung (rechts im Bild) befindet sich die Sperrstange in ihrer Halterung am Gestell.

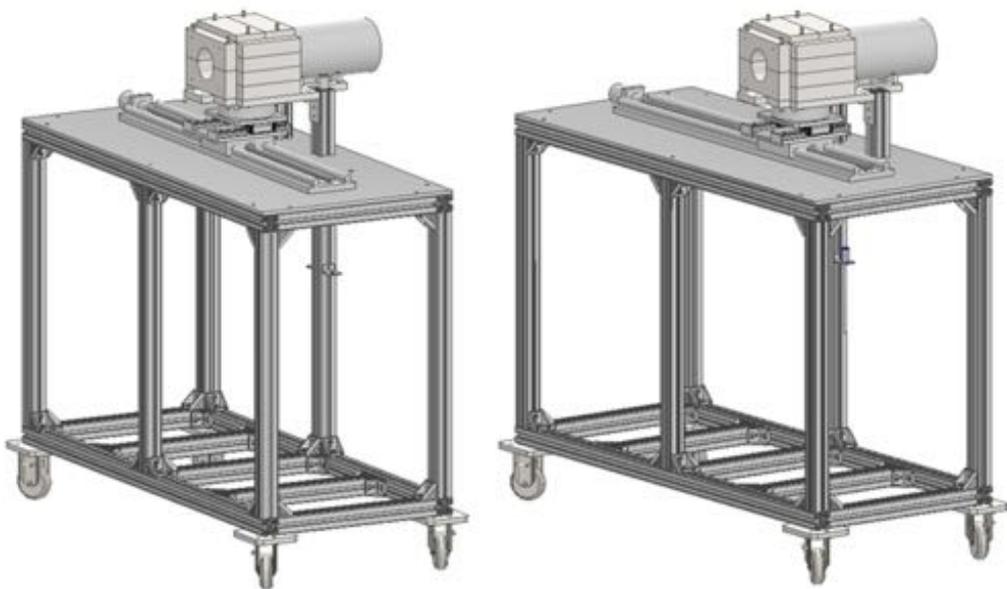


Abbildung 4-11: Detektortisch in Mittel- (links) und Ausgangsstellung (rechts)

### 4.3 Gesamtgestaltung

Nachdem nun die Konstruktion aller Module abgeschlossen ist, wird im Folgenden zusammenfassend die Gesamtgestaltung dargestellt. In Abbildung 4-12 ist links der Probenstisch mit dem Modul Probenbewegung zu sehen. Auf der rechten Seite befindet sich der Detektortisch samt Detektorbewegung, Abschirmung und Detektorarm.

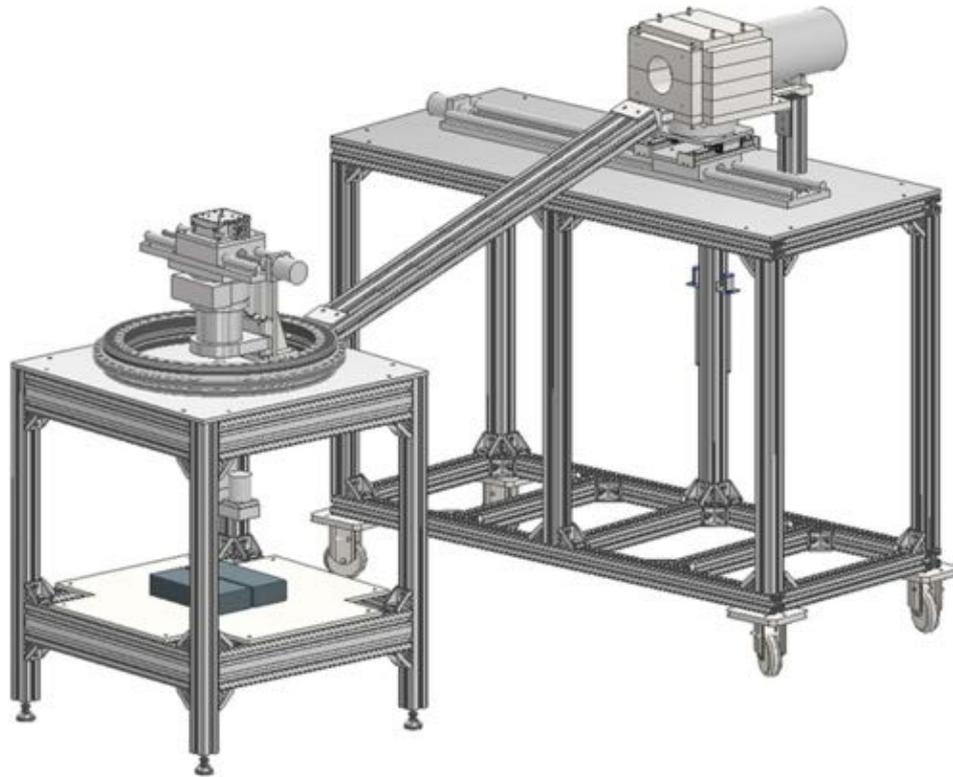


Abbildung 4-12: Produkt in Ausgangsstellung

In Abbildung 4-13 ist das Produkt in einem beispielhaften Arbeitspunkt dargestellt. Der aus Hubzylinder und Linearführung konstruierte Hubtisch ermöglicht einen Verfahrweg von 111 mm (1). Der 360° rotierbare (2) Drehtisch bewegt einen Lineartisch, der einen maximalen Hub von 158 mm (3) besitzt (siehe Kapitel 4.4.2). Auf einem Goniometer kann eine Probe samt Probenhalterung um  $\pm 14^\circ$  (4) geneigt werden. Der Detektor führt eine Rotation um die Rotationsachse der Probe durch, wobei dessen Antrieb über einen Lineartisch erfolgt. Es kann somit ein Streuwinkel von  $-10^\circ \leq 2\theta \leq 25^\circ$  (5) bei einem minimalen Rotationsintervall des Detektors von  $0,00035^\circ$  (siehe Kapitel 4.4.5) durch das Produkt erreicht werden. Durch ein händisches Bewegen des Detektortisches, zusätzlich geführt durch die angewinkelten Rollenlagerung, kann der Winkelbereich auf  $-10^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$  (6) vergrößert werden. Proben- und Detektortisch besitzen zunächst ungefähr die gleiche Masse. Um die Probentischmasse zu erhöhen und somit eine unerwünschte Bewegung des Probentisches bei dem händischen Verfahren des Detektortisches auszuschließen, können auf der Gewichtsplatte Bleisteine gestapelt werden. Eine Überbelastung der Profilfüße ist nicht zu erwarten, da die Traglast eines Fußes bei 10000 N [11] liegt. Ein zusätzliches Unterlegen von Gummimatten unter die Profilfüße unterstützt die Positionssicherung.

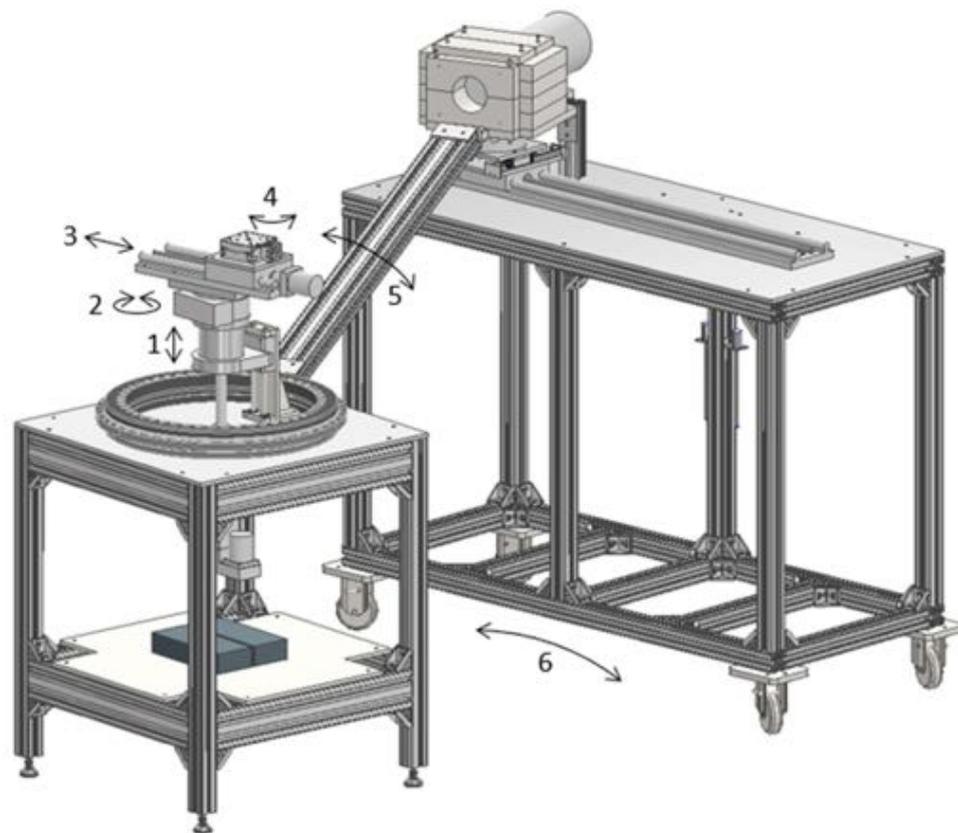


Abbildung 4-13: Produkt in Arbeitspunkt

Die bisherige Beschreibung und Konstruktion des Produktes bezieht sich auf den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen horizontalen Messaufbau. Im Folgenden wird der vertikale Messaufbau dargestellt. Es sind keine Montageschritte nötig, um das Produkt vom horizontalen in den vertikalen Messaufbau zu bringen. In Abbildung 4-14 sind neben einer beispielhaften Probe (gelb) samt Halterung (schwarz) die X-Achse (grau) sowie der Neutronenstrahl (grün) unmaßstäblich eingezeichnet. Zum Erreichen des vertikalen Messaufbaus wird die Probe mittels Hubtisch angehoben. Um den maximalen Streuwinkel von  $\theta_v = 2,5^\circ$  zu erreichen, wird eine Hublänge von 108 mm benötigt (Berechnung erfolgt in Kapitel 4.4.7). Dieser Hub kann durch den verwendeten Hubtisch samt Linearführung erreicht werden. Der Fahrweg des Hubes von 0 mm bis 108 mm lässt mit der zugehörigen Bewegung des Goniometers somit eine Messung verschiedener Messpunkte zu. Durch die vorgegebene Geometrie wird die Neigung der Probe auf  $1,62^\circ$  bestimmt.

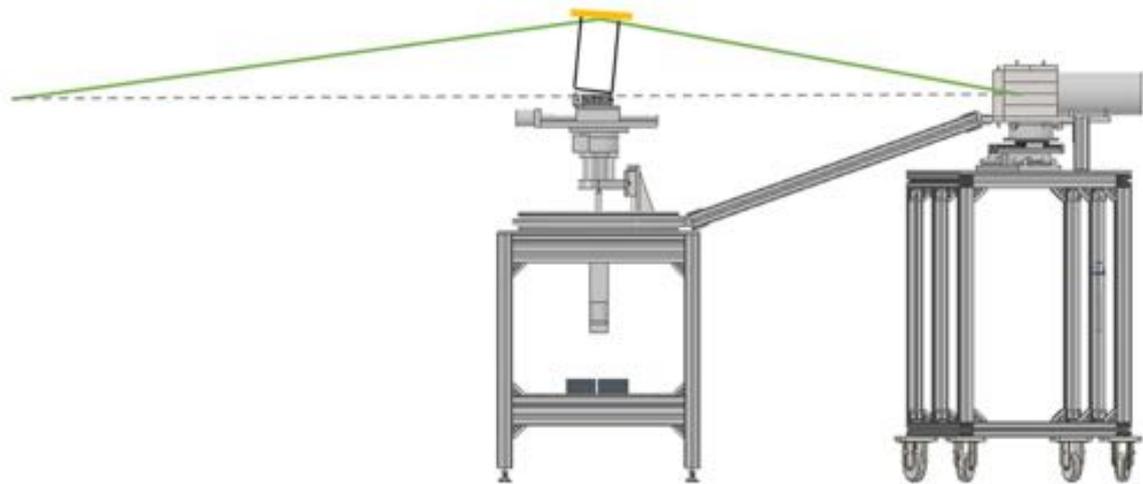


Abbildung 4-14: Produkt mit vertikalem Messaufbau

Das Produkt ist mit seinen beiden Messaufbauten für eine Strahlhöhe von 1360 mm konstruiert worden. Zu diesem Zeitpunkt ist diese Strahlhöhe nicht eindeutig festgelegt worden, sondern es ist eine alternative Strahlhöhe von 1430 mm ebenfalls möglich [4]. In diesem Falle wäre eine Anpassung der Konstruktion vorzunehmen, indem die vertikalen Aluminiumprofile gegen 70 mm längere Profile auszutauschen sind. Es ist keine weitere als diese konstruktive Änderung notwendig. Eine Änderung der Strahlhöhe hat keinen Einfluss auf die Berechnungen in Kapitel 4.4.

Durch die speziell auf die Wiederverwendung von Lagerbeständen ausgelegte Konstruktion reduziert sich die Menge an Zukaufteilen deutlich. Neben dem Aluminiumprofilsystem und den Rollen sind lediglich das Winkelmesssystem, die Translationslager und das Goniometer von externen Herstellern zu erwerben. Alle übrigen Komponenten können durch die institutseigene Werkstatt gefertigt werden oder sind bereits als Lagerbestände vorhanden.

Eine Abschätzung der Kosten, basierend auf unverbindlichen Preisempfehlungen seitens der Hersteller, für die extern zu erwerbenden Bauteile ergibt:

Tabelle 3: Kosten externer Komponenten

Komponentengruppe	Kosten [€]
Winkelmesssystem mit Lesekopf [10]	7150,00
Goniometer mit Antrieb [12]	2863,80
Translationslager [13]	153,68
Aluminiumprofilsystem [14]	1458,10
Rollen [15]	135,48

Es ist somit eine Summe der Kosten von ungefähr 12.000 € zu erwarten, die durch den Erwerb der oben aufgeführten Komponenten entsteht.

## 4.4 Überprüfung der Konstruktion

Dieses Kapitel beinhaltet die Berechnung verschiedener Konstruktionselemente, die während der Konstruktion in den Kapiteln 4.2 und 4.3 beschrieben wurden. Während der Arbeitsphase der Konstruktion sind sowohl vorab Abschätzungen getätigt als auch iterativ Aufbauten erstellt und rechnerisch überprüft worden. Die nachfolgenden Kalkulationen nehmen Bezug auf den zuvor dargestellten Endzustand des Produktes. Das Vernachlässigen von Schrauben und Muttern vereinfacht die händische und computergestützte Massenberechnung deutlich und erzeugt dabei einen zu vernachlässigenden geringen Fehler.

Es werden die auf den Probenstisch und den Detektortisch wirkenden Gewichtskräfte berechnet und mit den Belastungsgrenzen der tragenden Bauteile verglichen. Zudem wird der maximale Verfahrweg des Probenlineartisches sowie der minimal mögliche Winkel  $\beta_{Min}$  eines Bewegungsintervalls des Detektors berechnet. Zudem wird die maximale Durchbiegung berechnet, die durch die Gewichtskräfte der Detektorbewegung auf die längsten Aluminiumprofile des Detektortisches entsteht. Neben einer Überprüfung des maximal benötigten Hubes im vertikalen Aufbau befindet sich eine Analyse der auf die Eckverschraubungen wirkenden Momente, welche durch horizontale Kräfte hervorgerufen werden können.

### 4.4.1 Gewichtskräfte der Probenstischkomponenten

Die größte Belastung der Komponenten des Probenstisches wird durch die Gewichtskräfte aller jeweils darüberliegenden Komponenten erreicht. Im Folgenden finden eine Abschätzung dieser Gewichtskräfte und eine Berechnung der Sicherheiten der potenziell kritischen Komponenten statt. Betrachtet werden dabei die potenziell kritischen Bauteile: Lineartisch, Drehtisch, Rotationslager und Translationslager. Auf eine Überprüfung der Stützensysteme aus den Aluminiumprofilen wird an dieser Stelle verzichtet, da die Gesamtlast klein gegenüber der Traglast der Profile ist. Die Berechnung einer Sicherheit mit  $s \geq 1$  soll beweisen, dass die bauteileigenen Sicherheiten nicht unterschritten werden, sondern um den Faktor  $s$  zusätzlich erreicht werden. Die bauteileigenen Sicherheiten der Hersteller berücksichtigen bereits Einflüsse durch Durchbiegung.

Tabelle 4 zeigt die für die Belastungsanalyse des Probenstisches relevanten Gewichtskräfte. Als Grundlage dafür dienen sowohl Herstellerangaben als auch computergestützte Berechnungen für die neukonstruierten Komponenten. Es fassen teilweise hier aufgelistete Elemente jeweils Bauteile zusammen, die für die Berechnung als eine Einheit betrachtet werden können. Zu diesen zusammenfassenden Elementen gehören „Hubtisch mobil“, „Hubtisch starr“ und „Aluminiumprofilssystem“. Ebenso fasst das Element Detektorarm die drei einzelnen Bauteile des Detektorarms zusammen. Die Gewichtskraft des Detektorarms wird zu gleichen Teilen auf den Probenstisch und auf den Detektortisch aufgeteilt. Die Gewichtskräfte sind in der Tabelle jeweils für die Summe gleicher Komponenten angegeben.  $F_{Pro,17}$  gibt beispielsweise die Gewichtskraft der vier Profilfüße mit insgesamt 1,66 N an.

Tabelle 4: Gewichtskräfte der Probenstischkomponenten

Komponente	Formelzeichen	Gewichtskraft [N]
Probe	$F_{Pro,1}$	245,25
Probenhalter	$F_{Pro,2}$	2,94
Goniometer [12]	$F_{Pro,3}$	39,24
Adapterplatte Goniometer	$F_{Pro,4}$	5,89
Lineartisch Probenstisch	$F_{Pro,5}$	79,46
Adapterplatte Lineartisch	$F_{Pro,6}$	15,70
Drehtisch	$F_{Pro,7}$	39,24
Höhenblock	$F_{Pro,8}$	27,98
Hubtisch mobil	$F_{Pro,9}$	23,04
Hubtisch starr	$F_{Pro,10}$	31,65
Hubzylinder	$F_{Pro,11}$	38,26
Winkelmesssystem	$F_{Pro,12}$	439,49
Grundplatte Probenstisch	$F_{Pro,13}$	129,20
Aluminiumprofilssystem	$F_{Pro,14}$	296,75
Gewichtsplatte	$F_{Pro,15}$	316,58
Detektorarm	$F_{Pro,16}$	27,75
Profilfüße [11]	$F_{Pro,17}$	1,66

Im Folgenden werden die Gewichtskräfte auf die potenziell kritischen Bauteile durch Aufsummieren der Gewichtskräfte der entsprechenden Komponenten aus Tabelle 4 berechnet. Für die Belastungsrechnung der FüÙe wird die konservative Annahme getroffen, dass sich die Last auf nur zwei FüÙe verteilt. Dies kann der Fall sein, wenn der Boden unter dem Detektortisch uneben ist oder sich der Probenstisch aufgrund von Horizontalkräften während der Detektortischbewegung neigt.

Die Gesamtlast  $F_{Gon}$  auf das Goniometer beträgt:

$$F_{Gon} = \sum_{i=1}^2 F_{Pro,i} = 248,19 \text{ N} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Gesamtlast  $F_{LinP}$  auf den Lineartisch des Probenstisches beträgt:

$$F_{LinP} = \sum_{i=1}^4 F_{Pro,i} = 293,32 \text{ N} \quad \text{Gl. 2}$$

Die Gesamtlast  $F_{Dre}$  auf den Drehtisch beträgt:

$$F_{Dre} = \sum_{i=1}^6 F_{Pro,i} = 388,48 \text{ N} \quad \text{Gl. 3}$$

Die Gesamtlast  $F_{Hub}$  auf den Hubtisch beträgt:

$$F_{Hub} = \sum_{i=1}^9 F_{Pro,i} = 478,74 \text{ N} \quad \text{Gl. 4}$$

Die Gesamtlast  $F_{FuÙ}$  auf einen der beiden berücksichtigten FüÙe beträgt:

$$F_{FuÙ} = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^{16} F_{Pro,i} = 879,21 \text{ N} \quad \text{Gl. 5}$$

Die maximal zulässige Traglast des Drehtisches ist abhängig vom horizontalen Abstand der Drehachse zum Schwerpunkt der zu tragenden Komponenten. Die Traglast des Drehtisches ist unter der Beachtung der Anforderungen 2.7 und 3.2 für einen Abstand von 50 mm der Krafteinleitung zur Mittelachse bestimmt worden. Abbildung 4-15 ist ein Auszug aus dem Datenblatt des verwendeten Drehtisches mit vertikaler Achse und stellt die Abhängigkeit der maximalen Traglast vom Abstand des Kraftangriffspunktes dar. Es ist der abzulesende Wert von 440 N eingezeichnet.

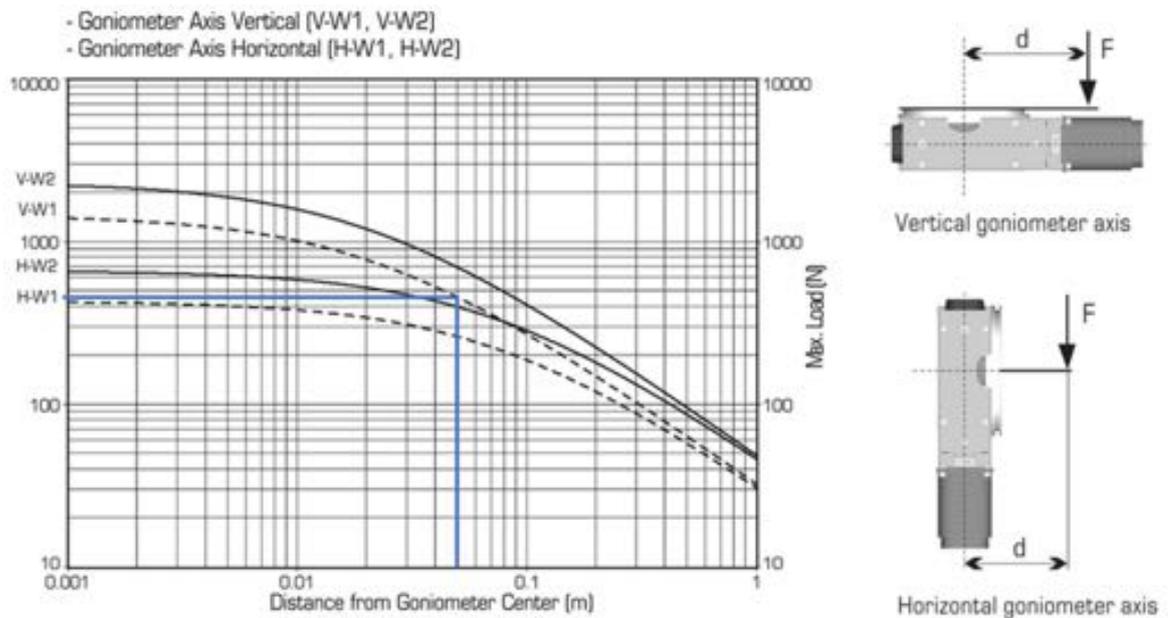


Abbildung 4-15: Maximale Traglast des Drehtisches [16, S. 2]

Tabelle 5 zeigt die maximal zulässige Traglast der potenziell kritischen Komponenten nach Herstellerangaben.

Tabelle 5: Maximal zulässige Komponententraglast in der Probenbewegung

Komponente	Formelzeichen	Zulässige Tragkraft [N]
Goniometer [12]	$F_{MaxGon}$	500
Lineartisch Probenstisch [17]	$F_{MaxLinP}$	981
Drehtisch [16]	$F_{MaxDre}$	440
Hubtisch [4]	$F_{MaxHub}$	1000
Profilfuß [11]	$F_{MaxFuß}$	10000

Die Sicherheit einer Komponente bildet sich aus dem Verhältnis aus maximal zulässiger zu tatsächlicher Last. Es werden im Folgenden die Sicherheiten für die potenziell kritischen Komponenten des Probenstisches berechnet.

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Gon}$  des Goniometers beträgt:

$$s_{Gon} = \frac{F_{MaxGon}}{F_{Gon}} = 2,01 \quad \text{Gl. 6}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{LinP}$  des Probenlineartisches beträgt:

$$s_{LinP} = \frac{F_{MaxLinP}}{F_{LinP}} = 3,34 \quad \text{Gl. 7}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Dre}$  des Drehtisches beträgt:

$$s_{Dre} = \frac{F_{MaxDre}}{F_{Dre}} = 1,13 \quad \text{Gl. 8}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Hub}$  des Hubtisches beträgt:

$$s_{Hub} = \frac{F_{MaxHub}}{F_{Hub}} = 2,09 \quad \text{Gl. 9}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Fu\beta}$  eines Profilfußes beträgt:

$$s_{Fu\beta} = \frac{F_{MaxFu\beta}}{F_{Fu\beta}} = 11,37 \quad \text{Gl. 10}$$

Es gilt für alle zusätzlichen Sicherheiten  $s \geq 1$ . Dies bedeutet, dass der konstruierte Proben Tisch der Belastung standhält, welche durch die Aufgabenstellung vorgegeben wird. Bei einer von diesem Anwendungsfall abweichenden Belastung ist vor allem eine erneute Überprüfung der geringen zusätzlichen Sicherheit  $s_{Dre}$  des Drehtisches notwendig.

#### 4.4.2 Maximaler Verfahrweg des Probenlineartisches

Nachfolgend soll der maximal mögliche Verfahrweg  $h_{max}$  des Lineartisches bestimmt werden, ohne dass die vom Verfahrweg abhängige zulässige Traglast des Drehtisches überschritten wird. Die zu betrachtenden Komponenten sind die Probe mit ihrer Halterung, das Goniometer mit seiner Adapterplatte und der Schlitten des Lineartisches. Diese Komponenten werden nachfolgend als bewegliche Komponenten zusammengefasst. Die beiden Komponenten Lineartischführung und zugehörige Adapterplatte werden starre Komponenten genannt.

Abbildung 4-16 stellt den Zusammenhang zwischen den Gewichtskräften der starren und beweglichen Komponenten  $F_{Sta}$  und  $F_{Bew}$  und den zugehörigen Hebelarm der beweglichen Komponenten  $h_{Bew}$  bezogen auf die Rotationsachse des Drehtisches dar. Der Hebelarm der beweglichen Komponenten entspricht dabei dem Verfahrweg und soll nachfolgend bestimmt werden. Der Angriffspunkt der starren Komponenten liegt auf der Rotationsachse, daher gilt für den Hebelarm der starren Komponenten:  $h_{Sta} = 0$ . Es ist zusätzlich die aus den Gewichtskräften der beweglichen und starren Komponenten resultierende Kraft  $F_{res}$  mit deren Hebelarm  $h_{res}$  eingezeichnet.

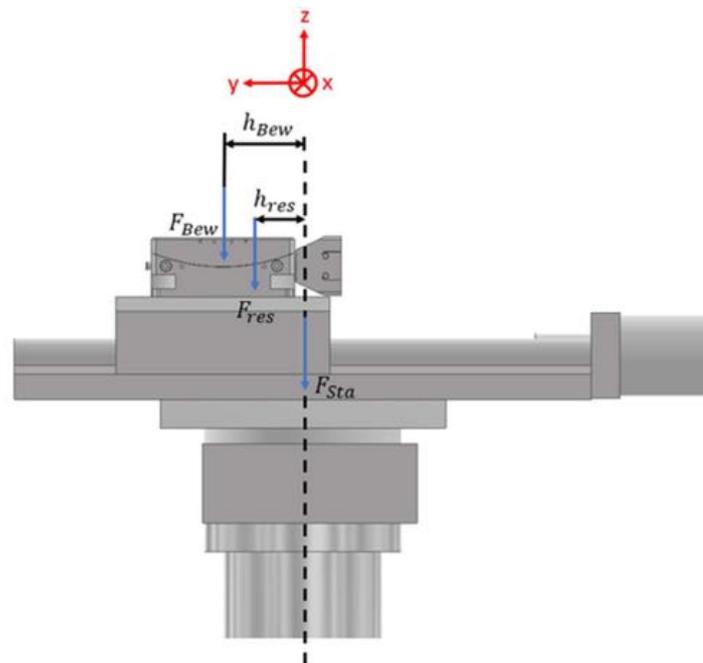


Abbildung 4-16: Gewichtskräfte auf den Drehtisch

Aus der Abbildung 4-16 ergibt sich für die Summe der Momente  $\sum M$ :

$$\sum M = h_{Bew} \times F_{Bew} + h_{Sta} \times F_{Sta} = h_{res} \times (F_{Bew} + F_{Sta}) \quad \text{Gl. 11}$$

Durch Umstellung der Gl. 11 nach dem gesuchten Hebelarm der beweglichen Komponenten  $h_{Bew}$  und für  $h_{Sta} = 0$  ergibt sich:

$$h_{Bew} = h_{res} \times \left(1 + \frac{F_{Sta}}{F_{Bew}}\right) \quad \text{Gl. 12}$$

In Kapitel 4.4.1 wurde die gesamte auf den Drehtisch wirkende Gewichtskraft  $F_{Dre}$  zu 338,48 N bestimmt. Der Abstand der Krafteinleitung wird durch Abbildung 4-15 bei dieser Belastung zu 64 mm bestimmt und entspricht dem resultierenden Hebelarm  $h_{res}$ .

Für den maximal zulässigen Verfahrenweg  $h_{max}$  gilt somit:

$$h_{max} = h_{Bew} = h_{res} \times \left(1 + \frac{F_{Sta}}{F_{Bew}}\right) \quad \text{Gl. 13}$$

$$h_{max} = 64 \text{ mm} \times \left(1 + \frac{7,60 \text{ N}}{31,90 \text{ N}}\right) \quad \text{Gl. 14}$$

$$h_{max} = 79,25 \text{ mm} \quad \text{Gl. 15}$$

Der maximale Verfahrenweg, der durch die maximale Traglast des Drehtisches begrenzt ist, ist somit zu 79,25 mm je Verfahrriichtung ausgehend von der Mittelstellung bestimmt worden. Bei dessen Überschreitung besteht keine zusätzliche Sicherheit mehr der verwendeten Komponenten.

#### 4.4.3 Gewichtskräfte der Detektortischkomponenten

Im Folgenden finden, analog zu Kapitel 4.4.1, eine Abschätzung der Gewichtskräfte der Detektortischkomponenten und eine Berechnung der zusätzlichen Sicherheiten der potenziell kritischen Komponenten statt.

Tabelle 6 zeigt die Gewichtskräfte der Komponenten des Moduls Detektortisch. Als Grundlage dafür dienen sowohl Herstellerangaben als auch computergestützte Berechnungen für die neukonstruierten Komponenten. Die hier aufgelisteten Elemente Abschirmung, Gewindestangen, Bewegungssperre und Aluminiumprofilsystem fassen jeweils Bauteile zusammen, die für die Berechnung als eine Einheit gesehen werden können. Ebenso wird analog zu Kapitel 4.4.1 die Gewichtskraft des zusammengefassten Detektorarms zu gleichen Teilen auf den Probentisch und auf den Detektortisch aufgeteilt.

Tabelle 6: Gewichtskräfte der Detektortischkomponenten

Komponente	Formelzeichen	Gewichtskraft [N]
Detektor [4]	$F_{Det,1}$	78,48
Abschirmungen	$F_{Det,2}$	652,78
Gewindestangen	$F_{Det,3}$	8,06
Detektorstützen	$F_{Det,4}$	0,18
Bewegungssperre	$F_{Det,5}$	12,58
Detektorarm	$F_{Det,6}$	27,75
Rotationslager	$F_{Det,7}$	49,05
Adapterplatte Rotationslager	$F_{Det,8}$	8,46
Translationslager [13]	$F_{Det,9}$	23,50
Adapterplatte Translationslager	$F_{Det,10}$	10,07
Translationslager Anschlag	$F_{Det,11}$	2,28
Lineartisch Detektortisch	$F_{Det,12}$	217,59
Grundplatte Detektortisch	$F_{Det,13}$	222,24
Aluminiumprofilsystem [18]	$F_{Det,14}$	380,78
Adapterplatte Rolle	$F_{Det,15}$	90,72
Rolle [15]	$F_{Det,16}$	31,39

Die Gewichtskraft ist in der Tabelle jeweils für die Summe gleicher Komponenten angegeben.  $F_{Det,4}$  gibt beispielsweise die Gewichtskraft der drei Detektorstützen mit insgesamt 0,18 N an.

Im Folgenden werden die Gewichtskräfte auf die potenziell kritischen Bauteile des Detektortisches durch Aufsummieren der Gewichtskräfte der entsprechenden Komponenten aus Tabelle 6 berechnet. Es kann angenommen werden, dass die Last annähernd mittig auf das Rotationslager wirkt und daher dessen Traglast, ähnlich des Verhaltens des Drehtisches, nicht eingeschränkt wird (vergleiche Abbildung 4-15). Der Beweis dazu folgt in Kapitel 4.4.4. Für die Berechnung der Rollenlast wird die konservative Annahme getroffen, dass sich die Last auf nur zwei der vier Rollen verteilt. Dieser Fall kann durch eine von Horizontalkräften verursachte geringe Kippung des Detektortisches während der händischen Bewegung entstehen.

Die Gesamtlast  $F_{Rot}$  auf das Rotationslager beträgt:

$$F_{Rot} = \sum_{i=1}^6 F_{Det,i} = 779,82 \text{ N} \quad \text{Gl. 16}$$

Die Gesamtlast  $F_{Tra}$  auf eins der beiden Translationslager beträgt:

$$F_{Tra} = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^8 F_{Det,i} = 418,67 \text{ N} \quad \text{Gl. 17}$$

Die Gesamtlast  $F_{LinD}$  auf den Lineartisch des Detektortisches beträgt:

$$F_{LinD} = \sum_{i=1}^{11} F_{Det,i} = 873,18 \text{ N} \quad \text{Gl. 18}$$

Die Gesamtlast  $F_{Rol}$  auf eine der zwei berücksichtigten Rollen beträgt:

$$F_{Rol} = \frac{1}{2} \times \sum_{i=1}^{15} F_{Det,i} = 892,25 \text{ N} \quad \text{Gl. 19}$$

Tabelle 7 zeigt die maximal zulässige Traglast für die potenziell kritischen Bauteile nach Herstellerangaben.

Tabelle 7: Maximal zulässige Traglast der Detektortischkomponenten

Komponente	Formelzeichen	Zulässige Tragkraft [N]
Rotationslager [19]	$F_{MaxRot}$	800
Translationslager [13]	$F_{MaxTra}$	20200
Lineartisch Detektortisch [17]	$F_{MaxLinD}$	981
Rolle [15]	$F_{MaxRol}$	1500

Die Sicherheit einer Komponente bildet sich aus dem Verhältnis aus maximal zulässiger zu tatsächlicher Last. Es werden im Folgenden die zusätzlichen Sicherheiten für die potenziell kritischen Komponenten des Detektortisches berechnet.

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Rot}$  des Rotationslagers beträgt:

$$s_{Rot} = \frac{F_{MaxRot}}{F_{Rot}} = 1,03 \quad \text{Gl. 20}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Tra}$  des Translationslagers beträgt:

$$s_{Tra} = \frac{F_{MaxTra}}{F_{Tra}} = 48,25 \quad \text{Gl. 21}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{LinD}$  des Detektorlineartisches beträgt:

$$s_{LinD} = \frac{F_{MaxLinD}}{F_{LinD}} = 1,12 \quad \text{Gl. 22}$$

Die zusätzliche Sicherheit  $s_{Rol}$  einer Rolle beträgt:

$$s_{Rol} = \frac{F_{MaxRol}}{F_{Rol}} = 1,68 \quad \text{Gl. 23}$$

Es gilt für alle zusätzlichen Sicherheiten  $s \geq 1$ . Dies bedeutet, dass der konstruierte Detektortisch der Belastung standhält, welche durch die Aufgabenstellung vorgegeben wird. Bei einer von diesem Anwendungsfall abweichenden Belastung ist vor allem eine erneute Überprüfung der geringen zusätzlichen Sicherheiten  $s_{Rot}$  des Rotationslagers und des Detektorlineartisches  $s_{LinD}$  notwendig.

#### 4.4.4 Kippmoment der Detektorabschirmung auf das Rotationslager

Es ist aufgrund unvollständiger Herstellerangaben des älteren Drehtisches davon auszugehen, dass die maximale Traglast des Rotationslagers ähnlich wie

der des Drehtisches mit steigendem Abstand des Schwerpunkts abnimmt (vergleiche Abbildung 4-15). Deshalb ist zunächst zu beweisen, dass der gesamte Schwerpunkt nah an der Mittelachse des Rotationslagers liegt, um ein zu großes Kippmoment auf das Rotationslager zu verhindern. Der Beweis, dass dieser Abstand gering ist, wird für die Berechnung der Gewichtskräfte im Detektortisch in Kapitel 4.4.3 benötigt.

Im Folgenden wird der Schwerpunkt der Komponenten ermittelt, deren Gewichtskraft vom Rotationslager zu tragen ist. In Abbildung 4-17 sind die wesentlichen Komponenten dieser Betrachtung im Schnitt und deren Gewichtskräfte in ihrem Kraftangriffspunkt dargestellt. Dazu gehören die untere  $F_{Unt}$ , vordere  $F_{Vor}$ , seitliche  $F_{Sei}$  und oberen  $F_{Obe1}$ ,  $F_{Obe2}$  Abschirmungen sowie der Detektor  $F_{Det}$ .

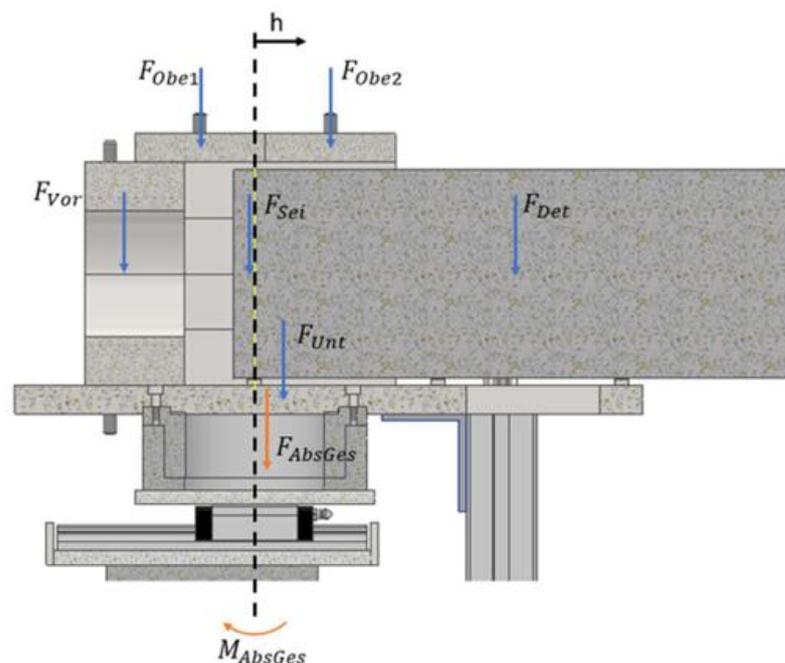


Abbildung 4-17: Gewichtskräfte der Detektorabschirmung

Die Mittelachse des Rotationslagers ist zusammen mit der Definition des positiven Abstandes  $h$  eingezeichnet.  $F_{AbsGes}$  und  $M_{AbsGes}$  geben die aus den betrachteten Abschirmungselementen resultierende Kraft und das daraus resultierende Moment an. Die Massen und Schwerpunktsabstände sind der 3D-Datei der Konstruktion entnommen. Es wird bei der Gewichtskraft der vorderen und seitlichen Abschirmung die aufsummierte Gewichtskraft aller baugleichen Bauteile ange-

geben. Das resultierende Moment je Komponente berechnet sich aus dem Produkt aus der Gewichtskraft und dem zugehörigen Abstand zur Mittelachse als Hebelarm und ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Resultierende Momente der Detektorabschirmung

Komponente	Gewichtskraft [N]	Schwerpunkt- abstand h [mm]	Resultierendes Moment [Nmm]
Untere Abschirmung	143,28	31,13	4460,15
Seitliche Abschirmung	313,53	-2,50	-783,82
Vordere Abschirmung	131,08	-98,65	-12931,29
Obere Abschirmung 1	32,42	-48,75	-1580,57
Obere Abschirmung 2	32,42	43,75	1418,46
Detektor [4]	78,48	185,00	14518,80

Die Summe  $F_{AbsGes}$  der gesamte Gewichtskraft der Detektorabschirmung ist:

$$F_{AbsGes} = 391,33 \text{ N} \quad \text{Gl. 24}$$

Die Summe  $M_{AbsGes}$  der gesamten resultierenden Momente der Detektorabschirmung ist:

$$M_{AbsGes} = 5101,73 \text{ Nmm} \quad \text{Gl. 25}$$

Für den Schwerpunkt  $h_s$  der Detektorabschirmung gilt:

$$h_s = \frac{M_{AbsGes}}{F_{AbsGes}} = 13,04 \text{ mm} \quad \text{Gl. 26}$$

Der Schwerpunktabstand der Gewichtskräfte auf das Rotationslager beträgt 13,04 mm und ist als zu vernachlässigend gering für die Berechnung der Gewichtskräfte in Kapitel 4.4.3 zu betrachten.

#### 4.4.5 Minimales Rotationsintervall des Detektors

Es soll der minimal mögliche Verfahrweg als Winkel  $\beta_{Min}$  berechnet werden, der durch die konstruierte Detektorbewegung möglich ist. Laut Anforderung 2.5 ist ein minimales Bewegungsintervall von  $\beta_{Min} = 0,02^\circ$  zu erreichen. Die Rotationsbewegung wird durch den angetriebenen Lineartisch erreicht. Somit ist dessen

geringster Verfahrensweg in Kombination mit der Geometrie des Detektortischaufbaus ausschlaggebend für diese Berechnung.

### Lineartisch

Die Bewegung wird über einen Schrittmotor am Lineartisch initiiert. Dieser dreht die Spindel des Lineartisches, welche eine, über ihre Steigung definierte, lineare Bewegung des Detektors auslöst. Der Messablauf sieht vor, die Messpunkte nacheinander anzufahren. Durch ein Anfahren aller Punkte ausgehend von der gleichen Seite kann auf die Berücksichtigung des Spiels der Spindel verzichtet werden.

Der vorgesehene Schrittmotor dreht im Standardbetrieb mit 200 Schritten pro vollständiger Umdrehung [20]. Dies entspricht einem Schrittwinkel  $\alpha_{Schritt}$  des Schrittmotors von:

$$\alpha_{Schritt} = \frac{360^\circ}{200} = 1,8^\circ \quad \text{Gl. 27}$$

Die Gewindespindel des Lineartisches besitzt eine Steigung  $s_{Gewinde}$  von:

$$s_{Gewinde} = \frac{2 \text{ mm}}{360^\circ} \quad \text{Gl. 28}$$

Die lineare Bewegung des Detektors bei einem Schritt des Schrittmotors berechnet sich somit zu:

$$l_{Schritt} = \alpha_{Schritt} \times s_{Gewinde} = 0,01 \text{ mm} \quad \text{Gl. 29}$$

### Geometrie des Detektortisches

Der durch diese lineare Bewegung erzeugte Winkel ist abhängig von der aktuellen Position des Detektors. Jedoch ist diese Abhängigkeit in dieser Betrachtung vernachlässigend gering. Der Verfahrensweg von 0,01 mm und die damit verbundene Winkeländerung ist deutlich kleiner als der Rotationsradius von 1500 mm. In Abbildung 4-18 ist der Verfahrensweg eines Schrittes  $l_{Schritt}$  des Lineartisches (orange) ausgehend von der Mittelstellung mit dem dadurch erzeugten minimalen Winkel  $\beta_{Min}$  dargestellt. Der Abstand von 1470 mm zwischen dem Rotationspunkt des Produktes und dem Lineartisch wird in Kapitel 5.1.1 berechnet.

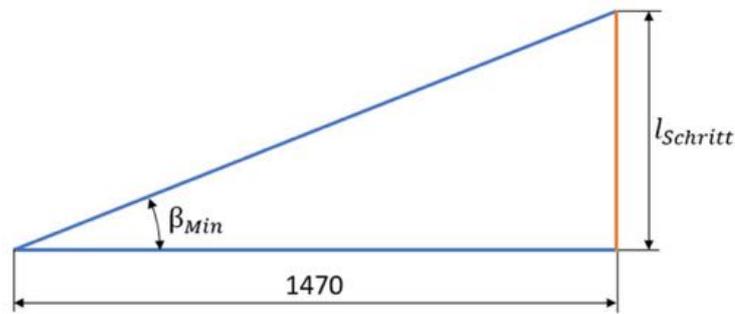


Abbildung 4-18: Minimaler Verfahrweg des Detektor-Linearstisches

Aus Abbildung 4-18 ergibt sich für den Winkel  $\beta_{Min}$ :

$$\beta_{Min} = \arctan\left(\frac{l_{Schritt}}{1470 \text{ mm}}\right) = 0,00035^\circ = 3,5^\circ \times 10^{-4} \quad \text{Gl. 30}$$

Der errechnete minimale Winkel eines Bewegungsintervalls des Detektors von  $0,00035^\circ$  liegt deutlich unter dem laut Anforderung 2.5 geforderten minimalen Winkel von  $0,02^\circ$ . Durch hier nicht betrachtete Einflüsse wie Temperaturschwankungen sowie Fertigungs- und Montageungenauigkeiten kann das tatsächliche minimale Bewegungsintervall vom hier berechneten abweichen. Da aber ungefähr 57 Schritte des Schrittmotors mit jeweils einem Bewegungsintervall von  $0,00035^\circ$  nötig sind, um einen Winkel von  $0,02^\circ$  zu erreichen, kann trotz unberücksichtigter Einflüsse davon ausgegangen werden, dass der minimal geforderte Winkel von  $0,02^\circ$  erreicht wird.

#### 4.4.6 Durchbiegung des Detektortisches

Nachfolgend wird die Durchbiegung berechnet, die durch die Gewichtsbelastung bei den längsten Aluminiumprofilen des Detektortisches auftritt. Abbildung 4-19 zeigt die betroffenen Aluminiumprofile des Detektortisches sowie eine Abstraktion für die nachfolgende Berechnung. Es sind die Gewichtskraft  $F$  der Detektorbewegung, die Lagerkräfte  $A$  und  $B$ , die in den Schnitten auftretenden Momente  $M_1$  und  $M_2$  sowie die maximale Durchbiegung  $w_{Max}$  eingezeichnet. Es wird zudem die Wegkoordinate  $x$  definiert.

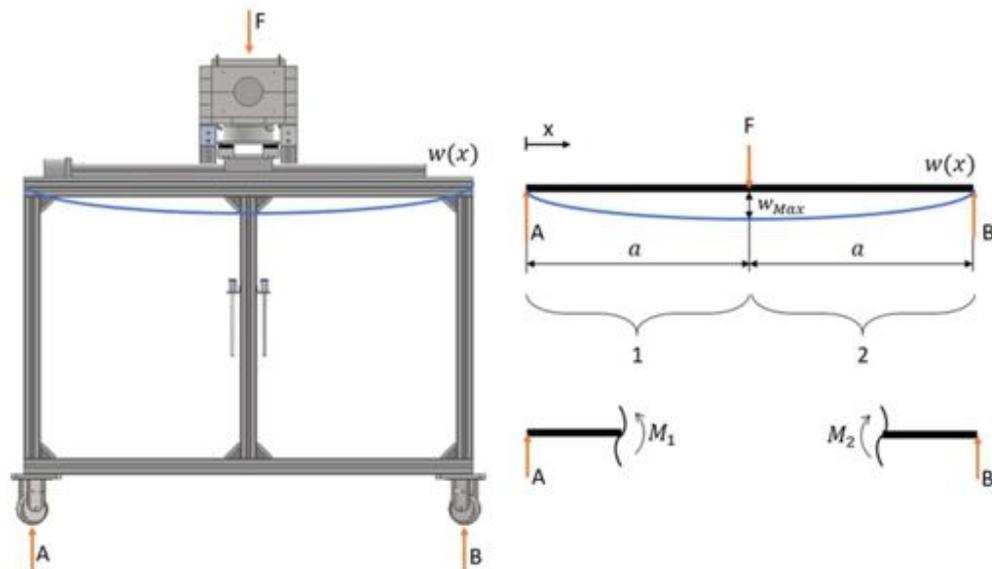


Abbildung 4-19: Durchbiegung der Aluminiumprofile am Detektorgestell

Die Differentialgleichung der Biegelinie stellt den Zusammenhang zwischen einer Deformationsgröße  $w$ , einem wirkenden Moment  $M$ , dem Elastizitätsmodul  $E$  und dem Flächenträgheitsmoment  $I$  dar [21, S. 110]. Es gilt:

$$w'' = -\frac{M}{EI} \quad \text{Gl. 31}$$

Die vom Weg  $x$  abhängigen Momente  $M_1$  und  $M_2$  sind die Biegemomente in den entsprechenden Bereichen der Abbildung. Für diese gelten:

$$M_1 = \frac{F}{2}x \quad \text{Gl. 32}$$

$$M_2 = \frac{F}{2} \times (2a - x) \quad \text{Gl. 33}$$

Durch Einsetzen der Momente in die Differentialgleichung der Biegelinie und der anschließenden Integration erhält man die Neigung  $w_1'$  und die Durchbiegung  $w_1$  im ersten Bereich.

$$EIw_1'' = -\frac{F}{2}x \quad \text{Gl. 34}$$

$$EIw_1' = -\frac{F}{4}x^2 + c_1 \quad \text{Gl. 35}$$

$$EIw_1 = -\frac{F}{12}x^3 + c_1x + c_2 \quad \text{Gl. 36}$$

Analog gilt für die Neigung  $w_2'$  und die Durchbiegung  $w_2$  im zweiten Bereich:

$$EIw_2'' = \frac{F}{2}x - Fa \quad \text{Gl. 37}$$

$$EIw_2' = \frac{F}{4}x^2 - Fax + d_1 \quad \text{Gl. 38}$$

$$EIw_2 = \frac{F}{12}x^3 - \frac{Fa}{2}x^2 + d_1x + d_2 \quad \text{Gl. 39}$$

Um die Integrationskonstanten  $c_1, c_2, d_1, d_2$  eliminieren zu können, werden folgende Randbedingungen definiert. Es darf keine Durchbiegung am linken ( $w_1(x=0) = 0$ ) und am rechten Ende ( $w_2(x=2a) = 0$ ) stattfinden. Im Überschneidungspunkt beider Bereiche müssen die Neigung ( $w_1'(x=a) = w_2'(x=a)$ ) und Durchbiegung ( $w_1(x=a) = w_2(x=a)$ ) übereinstimmen. Durch Einsetzen dieser Randbedingungen und anschließendem Sortieren erhält man die Gleichungen der Durchbiegung beider Bereiche.

$$EIw_1 = -\frac{F}{12}x^3 + \frac{Fa^2}{4}x \quad \text{Gl. 40}$$

$$EIw_2 = \frac{F}{12}x^3 - \frac{Fa}{2}x^2 + \frac{3Fa^2}{4}x - \frac{Fa^3}{6} \quad \text{Gl. 41}$$

Die Kraft wird anhand der Gewichtskraftberechnung in Kapitel 4.4.3 bestimmt.

$$F = \sum_{i=1}^{13} F_{Det,i} = 1291,63 \text{ N} \quad \text{Gl. 42}$$

Die maximale Durchbiegung  $w_{Max}$  befindet sich aus Gründen des symmetrischen Aufbaus in der Mitte des Profils ( $x = a$ ). Das Flächenträgheitsmoment  $I$  beträgt im betrachteten Anwendungsfall das Vierfache des Flächenträgheitsmomentes eines einzelnen Aluminiumprofils, da vier dieser Aluminiumprofile in entsprechender Ausrichtung verwendet werden.

Mit den Parametern  $E = 70.000 \frac{N}{mm^2}$ ,  $I = 4 \times 21,2 \times 10^4 \text{ mm}^4$  [18, S. 4] und  $a = 700 \text{ mm}$  erhält man:

$$w_{Max}(x=a) = \frac{1}{EI} \times \left( -\frac{F}{12}a^3 + \frac{Fa^2}{4}a \right) = \frac{Fa^3}{6EI} \quad \text{Gl. 43}$$

$$w_{Max}(x=a) = \frac{1291,63 \text{ N} \times (700 \text{ mm})^3}{6 \times 70.000 \frac{N}{mm^2} \times 4 \times 21,2 \times 10^4 \text{ mm}^4} \quad \text{Gl. 44}$$

$$w_{Max}(x=a) = 1,24 \text{ mm} \quad \text{Gl. 45}$$

Die maximale Durchbiegung  $w_{Max}$  beträgt 1,24 mm und ist während des Betriebs konstant. Es entsteht somit keine Störung der Messung durch ein Durchbiegen des Detektortisches.

#### 4.4.7 Benötigter Hub im vertikalen Messaufbau

Es wird die Höhenverstellung berechnet, die für das Erreichen des maximalen Streuwinkels im vertikalen Messaufbau notwendig ist. Abbildung 4-20 stellt die gegebene Geometrie aus Neutronenstrahl (grün) und Probe (gelb) dar. Es sind unmaßstäblich der Strahlursprung-Proben-Abstand (7000 mm), Proben-Detektor-Abstand (1500 mm) maximal geforderter Streuwinkel ( $2\theta_V = 5^\circ$ ) sowie der benötigte Hub  $x_V$  eingezeichnet.

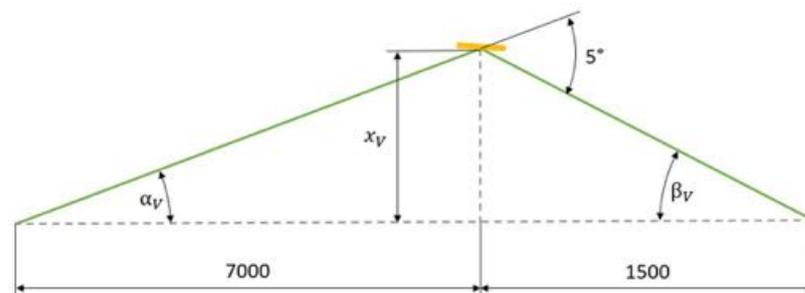


Abbildung 4-20: Herleitung zum Hub des vertikalen Aufbaus

Aus der Abbildung ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$\tan(\alpha_V) = \frac{x_V}{7000 \text{ mm}} \quad \text{Gl. 46}$$

$$\tan(\beta_V) = \frac{x_V}{1500 \text{ mm}} \quad \text{Gl. 47}$$

$$\alpha_V + \beta_V = 5^\circ \quad \text{Gl. 48}$$

Durch Auflösen der Gleichungen Gl. 46 und Gl. 47 nach den Winkeln  $\alpha_V$  und  $\beta_V$  und Einsetzen in Gleichung Gl. 48 erhält man:

$$\arctan\left(\frac{x_V}{7000 \text{ mm}}\right) + \arctan\left(\frac{x_V}{1500 \text{ mm}}\right) = 5^\circ \quad \text{Gl. 49}$$

Durch Auflösen nach  $x_V$  erhält man:

$$x_V = \frac{21000}{17} \text{ mm} \times \tan(5^\circ) = 108 \text{ mm} \quad \text{Gl. 50}$$

Die für den vertikalen Messaufbau benötigte Höhenverstellung ist somit zu 108 mm bestimmt worden.

#### 4.4.8 Horizontale Belastung

Durch eine geringe Fehlstellung der Rollen können bei einer händischen Bewegung des Detektortisches radiale Kräfte über den Detektorarm auf den Proben-tisch übertragen werden. Es wird die dadurch entstehende Belastung auf die Eckverschraubung der Aluminiumprofile geprüft. Die maximal auftretende horizontale Kraft ist in diesem Fall durch die Reibung der Detektortischrollen gegenüber dem Boden begrenzt. Bei einem Überschreiten dieser Kraft würden die Rollen die Haftung verlieren und verrutschen, wodurch sich die radiale Kraft wieder senkt.

Bei einem konservativ angenommenen Reibungskoeffizienten von  $\mu = 1$  der Kunststoffrollen und der Gewichtskraft des Detektortisches  $F_{Ver}$  gilt für die horizontale Kraft  $F_{Hor}$ :

$$F_{Hor} = F_{Ver} \times \mu = 1816 \text{ N} \quad \text{Gl. 51}$$

Daraus ergibt sich mit den mittleren Hebelarmen  $h_{pro} = 0,4 \text{ m}$  und  $h_{Det} = 0,65 \text{ m}$  vom jeweiligen Kraftangriffspunkt zu den Eckverschraubungen für die wirkenden Momentenbelastung des Proben- und Detektortisches:

$$M_{Pro} = F_{Hor} \times h_{pro} = 726 \text{ Nm} \quad \text{Gl. 52}$$

$$M_{Det} = F_{Hor} \times h_{Det} = 1180 \text{ Nm} \quad \text{Gl. 53}$$

Unter Beachtung der Anordnung und Ausrichtung der Winkelverschraubungen im Proben- und Detektortisch ergibt sich für die unter Druck-, Zug- und Torsionsbelastung beanspruchten Winkelverschraubungen ein gemeinsames maximal zulässiges Moment von [22, S. 3]:

$$M_{Pro,zul} = 2706 \text{ Nm} > M_{Pro} \quad \text{Gl. 54}$$

$$M_{Det,zul} = 4074 \text{ Nm} > M_{Det} \quad \text{Gl. 55}$$

Es gilt sowohl für den Proben- als auch für den Detektortisch, dass die zulässige Belastung höher ist als die tatsächlich wirkende. Die Belastung durch horizontale Kräfte kann somit vom konstruierten Produkt aufgenommen werden.

## 5 Ausführungs- und Nutzungsangaben

Dieses Kapitel gibt Informationen zum Einsatz des Produktes, die über die Konstruktionsinformationen in Kapitel 4 hinausgehen. Es wird zunächst die optimale Positionierung des Detektortisches berechnet, worauf basierend das mathematische Verhältnis von Streuwinkel zu Verfahrweg des Lineartisches ermittelt wird. Im Anschluss daran wird eine detaillierte Montageanleitung aufgeführt, mit deren alleinistehender Hilfe ein Aufbau des Produktes vor Ort ermöglicht werden soll. Zuletzt werden sicherheitsrelevante Aspekte analysiert und bewertet.

### 5.1 Geometrie des Verfahrweges

Im Folgenden wird der mathematische Zusammenhang zwischen dem Verfahrweg  $x$  des Lineartisches des Detektors und dem Streuwinkel  $\theta$  ermittelt. Dieser Zusammenhang soll dem Zwecke einer Vorpositionierung des Detektors dienen, in deren Anschluss dann inkremental Messschritte aufeinanderfolgend angefahren werden. Aufgrund der Ungenauigkeit der händischen Positionierung des Detektortisches relativ zum Probenstisch ist eine alleinige Positionierung des Detektors durch diesen mathematischen Zusammenhang ohne Korrektur durch einen Operateur nicht möglich und somit auch nicht Ziel dieses Kapitels.

#### 5.1.1 Positionierung des Detektortisches

Als erstes wird die Positionierung des Detektortisches festgelegt. Das Ziel einer optimalen Positionierung ist die Minimierung des Kippmoments, welches durch eine exzentrische Massenverteilung der Detektorabschirmung gegenüber der Detektorbewegung verursacht wird (siehe  $M_{AbsRes}$  in Abbildung 4-17).

Eine erste graphische Herleitung der Positionierung ist in Abbildung 5-1 in einer Draufsicht auf das System dargestellt. Es ist zunächst die Ausgangsgeometrie des Verfahrweges des Detektors als Kreisausschnitt mit einem Radius von 1500 mm und eine Mittelachse als graue gestrichelte Linie eingezeichnet. Die grauen durchgezogenen Linien auf der linken und rechten Seite symbolisieren die maximalen Winkel, die der Detektor in seinen Endlagen erreichen soll. Eine blaue gestrichelte Linie verbindet diese beiden Endlagen. Die sich somit in der Mitte des Bildes ergebende kurze grüne Strecke bildet den insgesamten Hub des

Translationslagers ab. Der orange dargestellte Lineartisch befindet sich dementsprechend in der Mitte der grünen Strecke, um die zuvor genannten maximalen Hebelarme eines Kippmoments möglichst klein zu halten.

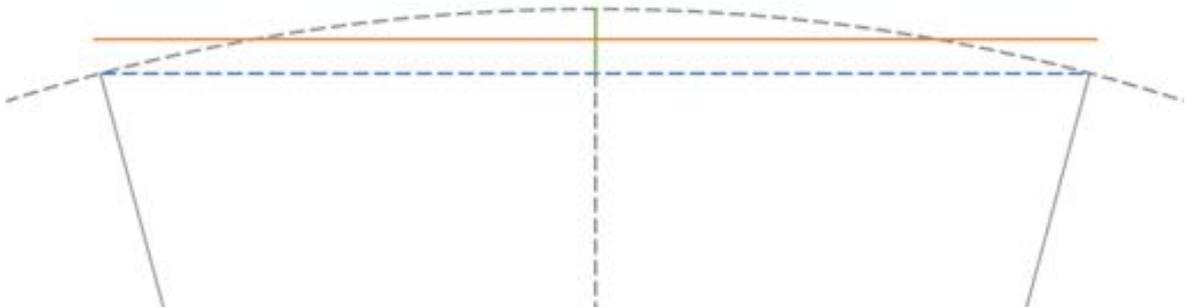


Abbildung 5-1: Symmetrische Positionierung des Lineartisches

In Kapitel 2.3 sind die Anforderungen 2.1 und 2.4 definiert worden. Diese beschreiben die zu erreichenden Endlagen des Detektors. Im Gegensatz zu den in Abbildung 5-1 symmetrisch dargestellten Endlagen werden diese nun durch den maximalen und minimalen Winkel  $\alpha_{Max}$  und  $\alpha_{Min}$  definiert, welche von der Länge des Lineartisches abhängen. Um eine optimale Positionierung des Detektortisches, wie zuvor beschrieben, zu erhalten, rotiert der Detektortisch um den Tischwinkel  $\alpha_{Tisc}$  relativ zur Mittelachse, wie in Abbildung 5-2 zu sehen ist. Die Strecken  $a$  und  $b$  sowie der Radius der Detektorbewegung  $R_{Det}$  enden außerhalb des dargestellten Bereichs im Mittelpunkt des Kreises des Detektorverfahrweges. Die Strecke  $l$  definiert die minimal benötigte Länge des Translationslagers.

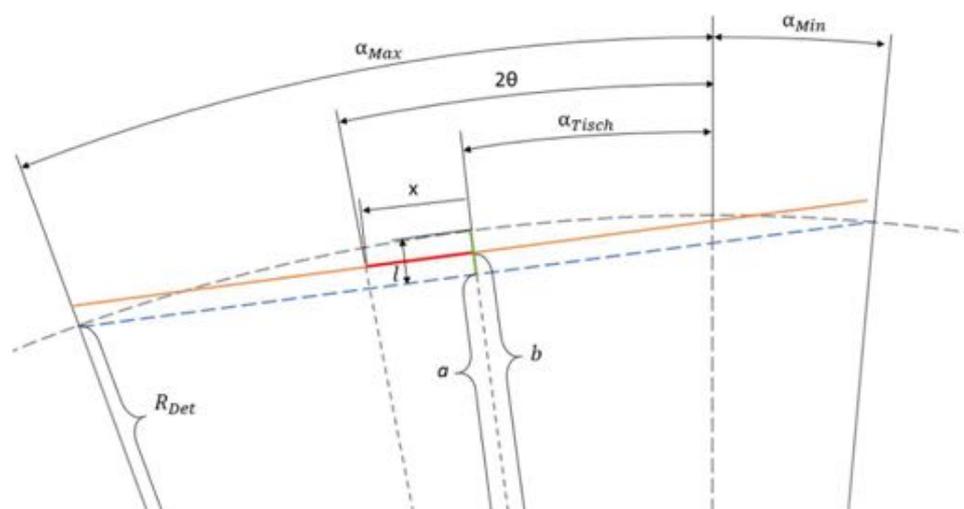


Abbildung 5-2: Reale Positionierung des Lineartisches und zugehöriger Geometrien

Die Hublänge des verwendeten Lineartisches sorgt zusammen mit dem in Anforderung 2.1 definierten Winkel ( $-5^\circ \leq 2\theta \leq 20^\circ$ ) dafür, dass ein maximaler

Streuungswinkel am Detektortisch von  $\alpha_{Max} = 26^\circ$  und ein minimaler Streuungswinkel am Detektortisch von  $\alpha_{Min} = -11^\circ$  erreicht werden können.

### Rotation des Detektortisches

Der Wert des Tischwinkels  $\alpha_{Tisch}$ , mit dem der Detektortisch um die Z-Achse des Produkts rotiert, wird zunächst berechnet. Das Ergebnis wird in der Montageanweisung in Kapitel 5.2.5 zur Winkelausrichtung des Detektortisches benötigt. Der Verfahrensweg  $\alpha_{Tisc}$  ist in Abbildung 5-12 dargestellt.

Für den Tischwinkel  $\alpha_{Tisch}$  gilt:

$$\alpha_{Tisch} = \alpha_{Max} - \frac{\alpha_{Max} - \alpha_{Min}}{2} \quad \text{Gl. 56}$$

$$\alpha_{Tisch} = 26^\circ - \frac{26^\circ - (-11^\circ)}{2} \quad \text{Gl. 57}$$

$$\alpha_{Tisch} = 7,5^\circ \quad \text{Gl. 58}$$

### Länge des Translationslagers

Als nächstes wird die Länge  $l$  des Translationslagers (grün im Bild) des Detektortisches berechnet, die mindestens notwendig ist, um die Bewegung des Detektors zu ermöglichen.

Aus der in Abbildung 5-2 gegebenen Geometrie ergibt sich:

$$\cos(\alpha_{Max} - \alpha_{Tisch}) = \frac{a}{R_{Det}} \quad \text{Gl. 59}$$

Für die Strecke  $a$  ergibt sich daraus:

$$a = R_{Det} \times \cos(\alpha_{Max} - \alpha_{Tisch}) \quad \text{Gl. 60}$$

$$a = 1500 \text{ mm} \times \cos(26^\circ - 7,5^\circ) \quad \text{Gl. 61}$$

$$a = 1422,485 \text{ mm} \quad \text{Gl. 62}$$

Für die minimale Länge  $l$  des Translationslagers gilt:

$$l = R_{Det} - a \quad \text{Gl. 63}$$

$$l = 1500 \text{ mm} - 1422,485 \text{ mm} \quad \text{Gl. 64}$$

$$l = 77,515 \text{ mm} \quad \text{Gl. 65}$$

Das in Kapitel 4.2.6 beschriebene Translationslager verfügt über einen Verfahrensweg von 137 mm und besitzt somit auch den minimal benötigten Verfahrensweg.

### Abstand von Detektorgestell zu Proben Tisch

Die Strecke  $b$  beschreibt den Abstand des Lineartisches zum Rotationspunkt, wodurch sich der Abstand zwischen den Frontseiten beider Tische ableiten lässt. Dieses Ergebnis wird in der Montageanweisung in Kapitel 5.2.5 zur Einhaltung des Abstandes von Detektortisch zum Proben Tisch benötigt.

Für die mittig zwischen  $a$  und  $R_{Det}$  endende Strecke  $b$  gilt nach Abbildung 5-2:

$$b = \frac{a + R_{Det}}{2} \quad \text{Gl. 66}$$

$$b = \frac{1422,485 \text{ mm} + 1500 \text{ mm}}{2} \quad \text{Gl. 67}$$

$$b = 1461,243 \text{ mm} \quad \text{Gl. 68}$$

Es wird hier ein gerades Maß unter der Berücksichtigung der leicht unsymmetrischen Geometrie des Schlittens des Lineartisches gewählt:

$$b_1 = 1470 \text{ mm} \quad \text{Gl. 69}$$

Es sind nun alle benötigten Parameter berechnet und somit die optimale Positionierung des Detektortisches festgelegt worden.

### **5.1.2 Winkelabhängigkeit des Fahrweges**

Auf der Grundlage der festgelegten Positionierung kann nun der Zusammenhang zwischen dem Streuungswinkel  $\theta$  und dem Fahrweg  $x$  des Lineartisches ermittelt werden. Zu achten ist dabei auf die Definition des Fahrweges. Der Nullpunkt des Fahrweges ist aus Gründen der Symmetrie in der Mitte des Lineartisches gewählt worden. Es wird somit eine starke Vereinfachung der geometrischen Beschreibung erreicht. In Abbildung 5-3 wird die positive Richtung des Fahrweges entlang des Lineartisches nach links definiert. Der Fahrweg des Translationslagers  $\overline{AB}$  ist senkrecht zum Lineartisch, während der radiale Abstand vom Detektor zum Drehpunkt  $\overline{BC}$  nicht immer senkrecht zum Lineartisch ist. Dieser Unterschied sorgt dafür, dass eine Differenz  $\overline{AC}$  zwischen dem in Abbildung 5-2 dargestellten Fahrweg  $x$  und dem tatsächlich notwendigen Fahrweg  $y$  entsteht.

Nun soll die Abhängigkeit für den tatsächlich notwendigen Fahrweg vom gewünschten Streuungswinkel hergestellt werden. Dazu wird im verwendeten 3D-Modell der Lineartisch inkremental aus der Mitte heraus bewegt, während der Streuungswinkel zwischen dem Detektor und dem Mittelpunkt des Lineartisches

jeweils aufgezeichnet wird. Diese Messwerte werden in Abbildung 5-4 dargestellt.

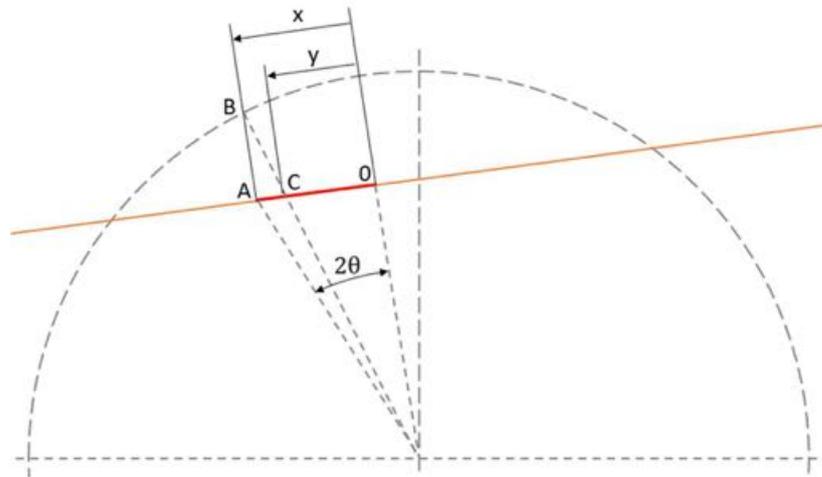


Abbildung 5-3: Geometrie des Verfahrensweges im Detail

Der nächste Schritt ist eine Annäherung des tatsächlich notwendigen Verfahrensweges über eine polynomische Funktion. Es wird geprüft, welcher Grad der Polynomfunktion notwendig ist, um den Verfahrensweg dem Zwecke einer Vorpositionierung entsprechend genau abzubilden. Dazu werden folgende polynomische Näherungen mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel erstellt, unter der Voraussetzung, den Nullpunkt zu beinhalten:

Polynomische Näherung ersten Grades:

$$x_1 = 25,931 \times 2\theta \quad \text{Gl. 70}$$

Polynomische Näherung zweiten Grades:

$$x_2 = -0,0308 \times (2\theta)^2 + 26,334 \times 2\theta \quad \text{Gl. 71}$$

Polynomische Näherung dritten Grades:

$$x_3 = -0,0013 \times (2\theta)^3 - 0,0003 \times (2\theta)^2 + 26,18 \times 2\theta \quad \text{Gl. 72}$$

Polynomische Näherung vierten Grades:

$$x_4 = -3 \times 10^{-6} \times (2\theta)^4 - 0,0012 \times (2\theta)^3 - 0,0011 \times (2\theta)^2 + 26,183 \times 2\theta \quad \text{Gl. 73}$$

Polynomische Näherung fünften Grades:

$$x_5 = -3 \times 10^{-9} \times (2\theta)^5 - 3 \times 10^{-6} \times (2\theta)^4 - 0,0012 \times (2\theta)^3 - 0,0011 \times (2\theta)^2 + 26,183 \times 2\theta \quad \text{Gl. 74}$$

Die maximale relative Abweichung der fünf Näherungen vom inkremental aufgezeichneten tatsächlichen Verfahrensweg wird in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Abweichungen der Trendlinien

Näherungsgleichung	Relative Abweichung [%]
$x_1$	1,48
$x_2$	0,80
$x_3$	0,52
$x_4$	0,51
$x_5$	0,51

Die Abweichungen sinken mit steigendem Grad der Näherungsgleichung. Die Zunahme der Genauigkeit ist jedoch ab dem dritten Grad der Näherung zu vernachlässigen. Aus diesem Grund wird die polynomische Gleichung dritten Grades  $x_3$  als Näherungsgleichung ausgewählt.

Die Näherungsgleichung für den vom Streuwinkel  $\theta$  abhängigen Verfahrensweg  $x$  ist somit:

$$x = x_3 = -0,0013 \times (2\theta)^3 - 0,0003 \times (2\theta)^2 + 26,18 \times 2\theta \quad \text{Gl. 75}$$

Beispielhaft ergibt sich für einen Streuwinkel von  $\theta = 5^\circ$  ein Verfahrensweg des Lineartisches von der Mitte aus von  $x = 260,47 \text{ mm}$ . Nach Gleichung Gl. 29 sind dafür 26.047 Schritte des Schrittmotors nötig. Es ist hier keine Bewegung des gesamten Detektortisches notwendig.

In Abbildung 5-4 wird der Verlauf der Näherungsgleichung  $x_3$  zusammen mit den aufgezeichneten Messwerten dargestellt.

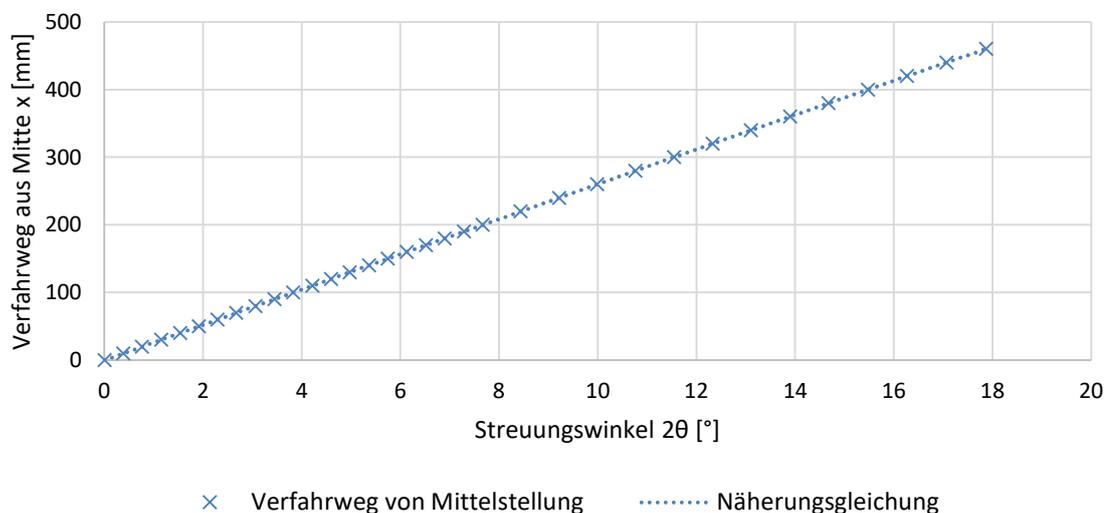
Verfahrensweg  $x$  über dem Streuwinkel  $2\theta$ 

Abbildung 5-4: Graphische Aufzeichnung des Verfahrensweges

## 5.2 Montageanweisung

Im Folgenden wird schrittweise eine Anleitung für die einzelnen Module gegeben. Es ist auf die Einhaltung der Reihenfolge der Montageschritte zu achten. Weitere detaillierte Informationen zu den hier kurz genannten Komponenten befinden sich in Kapitel 4.2 unter dem entsprechenden Modul. Die Montageanweisung soll als eigenständige Anleitung der Montagearbeiten vor Ort genutzt werden können.

### 5.2.1 Montagereihenfolge des Probengestells

Der Aufbau des Probentischgestells mit den in diesem Kapitel beschriebenen Komponenten ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Um die Standfestigkeit des Moduls während der Montage zu gewährleisten, wird das Gestell teilweise zunächst kopfüber aufgebaut. Im Anschluss daran wird es gedreht, auf die Füße gestellt und die Montage der restlichen Teile wird fortgesetzt.

1. Die Grundplatte mit den Aluminiumprofilen 50x100x600 (4 Stk.) händisch verschrauben (M8x20, Nutenstein).
2. Die Aluminiumprofile 50x50x817 M12 (4 Stk.) über Winkel mit den bisherigen Aluminiumprofilen 50x100x600 händisch verschrauben. Dabei auf die Ausrichtung des Gewindes (gegenüber der Grundplatte) achten.
3. Die übrigen Aluminiumprofile 50x100x600 (4 Stk.) über Winkel mit den bisherigen Aluminiumprofilen 50x50x817 M12 fest verschrauben. Der Abstand der Oberseite des Profils zur Unterseite der Grundplatte beträgt 570 mm.
4. Alle bisherigen Verschraubungen festziehen.
5. Die Profilfüße (4 Stk.) in die Enden der Aluminiumprofile 50x50x817 M12 schrauben und mit Muttern sichern. Der Abstand von Fuß- zu Profilunterseite beträgt 50 mm.
6. Jetzt kann der Probentisch gedreht und auf seine Füße gestellt werden. Im aktuellen Zustand wiegt der Probentisch 44 kg und sollte von zwei Personen gedreht werden.
7. Die Gewichtsplatte auf die unteren Aluminiumprofile 50x100x600 legen und fest verschrauben (M8x20, Nutenstein). Aufgrund der Plattenmasse von 32 kg sollte dies durch zwei Personen erfolgen.

8. Zur Sicherung der Position des Probenstisches kann dieser nach seiner Ausrichtung am Strahl mit Bleisteinen beschwert werden, die auf der Gewichtsplatte zu stapeln sind.

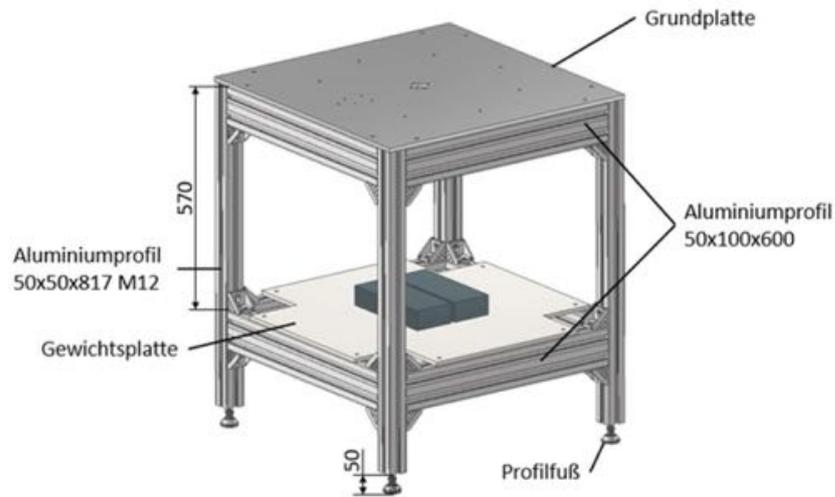


Abbildung 5-5: Montagebeschreibung des Probengestells

### 5.2.2 Montagereihenfolge der Probenbewegung

Eine notwendige Bedingung für die Montage der Probenbewegung ist der fertig montierte und grob ausgerichtete Probenstisch. Dessen exakte Ausrichtung ist nicht notwendig, da diese durch die Bewegungseinheiten der Baugruppe Probenbewegung erreicht wird. Es ist keine Positionssicherung des Winkelmesssystems oder der Hubtischführung beispielsweise über Passstifte notwendig, da eine erneute Montage oder Demontage selbst für den Wechsel zum vertikalen Messaufbau nicht notwendig ist. Eine einmalige Verschraubung der Komponenten reicht in Kombination mit den Bewegungseinheiten aus, um die Genauigkeitsanforderungen erfüllen zu können. In Abbildung 5-6 und Abbildung 5-7 ist das Modul Probenbewegung im fertig montierten Zustand dargestellt.

1. Das Winkelmesssystem mit der Grundplatte fest verschrauben (M8x70). Aufgrund der Masse dieser Komponente von 44 kg sollte dieser Schritt durch zwei Personen erfolgen.
2. Den Hubzylinder in Mittelstellung bringen und mit der Grundplatte fest verschrauben (M4x20).
3. Die Hubtischendplatte auf die Gewindestange des Hubtisches schrauben und mit einer Mutter (M16) sichern.
4. Die Hubtischverbindungsplatte an die Hubtischendplatte händisch anschrauben (M5x25).

5. Die Hubtischverbindungsplatte an die Hubtischführung händisch anschrauben (M5x30).
6. Die Hubtischstrebe an die Hubtischführung (M6x30) und die Grundplatte (M6x20) händisch anschrauben.
7. Den Hubtischanschlag an die Hubtischstrebe fest anschrauben (M6x30).  
Der Abstand der beiden Anschläge beträgt 201 mm.

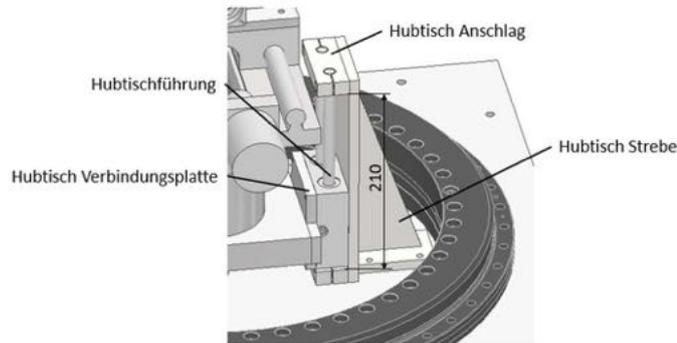


Abbildung 5-6: Montagebeschreibung der Probenaufnahme im Detail

8. Alle bisherigen Verschraubungen festziehen.
9. Den Hubtischhöhenblock mit der Hubtischendplatte fest verschrauben (M5x45).
10. Den Drehtisch mit dem Hubtischhöhenblock fest verschrauben (M5x30).
11. Die Adapterplatte-Lineartisch mit dem Drehtisch fest verschrauben (M5x25).
12. Den Lineartisch mit der Adapterplatte-Lineartisch fest verschrauben (M6x25).
13. Die Adapterplatte-Goniometer mit dem Lineartisch fest verschrauben (M6x25).
14. Das Goniometer mit der Adapterplatte-Goniometer fest verschrauben (M6x16).

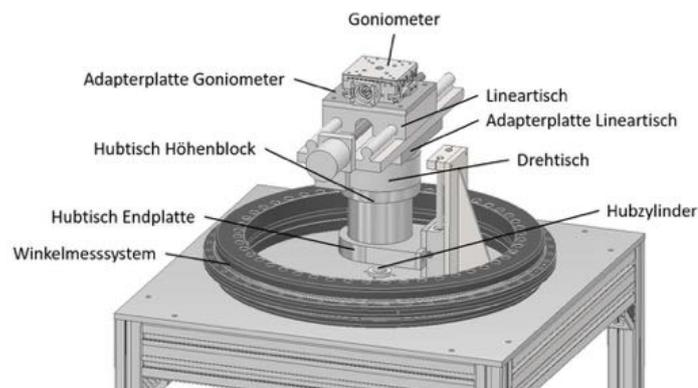


Abbildung 5-7: Montagebeschreibung der Probenaufnahme

### 5.2.3 Montager Reihenfolge des Detektorgestells

Das Detektorgestell wird ähnlich wie das Probengestell mit der Grundplatte nach unten zusammengebaut und erst im Anschluss umgedreht. Abbildung 5-8 zeigt das fertig montierte Probengestell.

1. Die Aluminiumprofile 50x50x500 (2 Stk.) an der Außenseite mit der Grundplatte händisch verschrauben (M8x20, Nutenstein).
2. Die Aluminiumprofile 50x50x1400 (2 Stk.) mit der Grundplatte händisch verschrauben (M8x20, Nutenstein).
3. Die Aluminiumprofile 50x50x500 (3 Stk.) innerhalb des Profilrahmens über Winkel mit den Aluminiumprofilen 50x50x1400 (2 Stk.) händisch verschrauben. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Bohrungen von den Profilen verdeckt werden.
4. Alle bisherigen Verschraubungen festziehen.
5. Die Aluminiumprofile 50x50x821 (6 Stk.) mit den bisherigen Aluminiumprofilen 50x50x1400 über Winkel fest verschrauben.
6. Die übrigen Aluminiumprofile 50x50x1400 (2 Stk.) mit den Aluminiumprofilen 50x50x821 über Winkel fest verschrauben.
7. Die übrigen Aluminiumprofile 50x50x500 (5 Stk.) mit den Aluminiumprofilen 50x50x1400 über Winkel zunächst alle händisch, danach fest verschrauben.
8. Die Adapterplatten-Rolle (2 Stk.) und Adapterplatten-Rolle 2 (2 Stk.) wie in der Abbildung 5-8 dargestellt mit den Aluminiumprofilen fest verschrauben (M8x25, Nutenstein).
9. Die Rollen (4 Stk.) mit den Adapterplatten-Rolle und Adapterplatten-Rolle 2 fest verschrauben (M10x16). Bei der Montage ist auf die Einhaltung der Winkel ( $29,5^\circ$  für Adapterplatte-Rolle und  $21,15^\circ$  für Adapterplatte-Rolle 2) zu achten. Die Bremse der Rollen muss vor dem nächsten Schritt betätigt sein.
10. Das Detektorgestell kann jetzt umgedreht und auf seine Rollen gestellt werden. Aufgrund der Masse des Gestells von 74 kg sollte dies von zwei Personen ausgeführt werden.

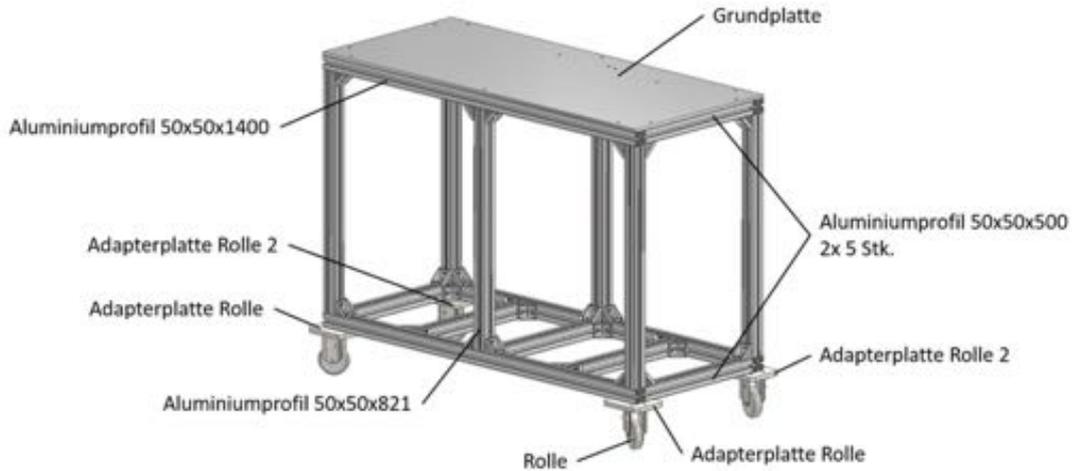


Abbildung 5-8: Montagebeschreibung des Detektorgestells

#### 5.2.4 Montager Reihenfolge der Detektorbewegung

Die Montage der Detektorbewegung kann erst nach Fertigstellung des Detektorgestells erfolgen. Es ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass das Produkt auf die hier geforderten Anforderungen ausgelegt worden ist. Bei einer höheren Belastung beispielsweise durch weitere Abschirmungen ist eine erneute Betrachtung der Traglasten erforderlich.

Abbildung 5-9 zeigt den Endzustand der Montage der Detektorbewegung.

1. Den Lineartisch in Mittelstellung bringen und mit der Grundplatte des Detektorgestells fest verschrauben (M6x20).
2. Die Translationslager-Platte mit dem Schlitten des Lineartisches fest verschrauben (M6x20).
3. Die beiden Translationslager samt Schlitten mit der Translationslager-Platte fest verschrauben (M6x16).
4. Die Rotationslagerplatte mit den beiden Schlitten des Translationslagers fest verschrauben (M6x16).
5. Das Rotationslager mit der Rotationslager-Platte fest verschrauben (M6x20).
6. Die Translationslager-Anschläge (4 Stk.) mit der Translationslager-Platte fest verschrauben (M4x20).
7. Die untere Abschirmung mit dem Rotationslager fest verschrauben (M6x16).
8. Die Detektorstützen (3 Stk.) mit der unteren Abschirmung fest verschrauben (M4x35).

9. Die Gewindestangen M10 (4 Stk.) und die Gewindestangen M10 kurz (2 Stk.) wie in Abbildung 5-9 gezeigt mit der unteren Abschirmung fest verschrauben und mit jeweils einer Mutter (M10) auf der Unterseite der Abschirmung sichern.
10. Die Blöcke der seitlichen Abschirmung (8 Stk.) nacheinander auf die untere Abschirmung, durch die Gewindestangen geführt, aufstapeln.
11. Die beiden Bauteile der vorderen Abschirmung auf die untere Abschirmung, durch die beiden kurzen Gewindestangen geführt, aufstapeln und auf der Oberseite mit jeweils einer Mutter (M10) sichern.
12. Die Kabelführung mit der unteren Abschirmung fest verschrauben (M4x10).
13. Den Detektor in die Detektorstützen einlegen.
14. Die beiden Bauteile der oberen Abschirmung auf der seitlichen Abschirmung mittels Gewindestangen positionieren und mit jeweils einer Mutter (M10) sichern.
15. Die beiden Verschiebungswinkel fest mit der unteren Abschirmung verschrauben (M8x25).
16. Die beiden Aluminiumprofile 50x50x186 mit den beiden Verschiebungswinkeln fest verschrauben (M8x12, Nutenstein). Auf einen Abstand von 4 mm zwischen den Aluminiumprofilen und der Grundplatte achten.
17. Zur vorübergehenden Positionssicherung die beiden Detektorsperrstangen entlang der Mittelbohrung der Aluminiumprofile in die Bohrungen auf der Grundplatte einführen.
18. Die Halterungen der Sperrstangen werden am Detektorgestell festgeschraubt (M8x12, Nutenstein) (siehe Abbildung 4-12).

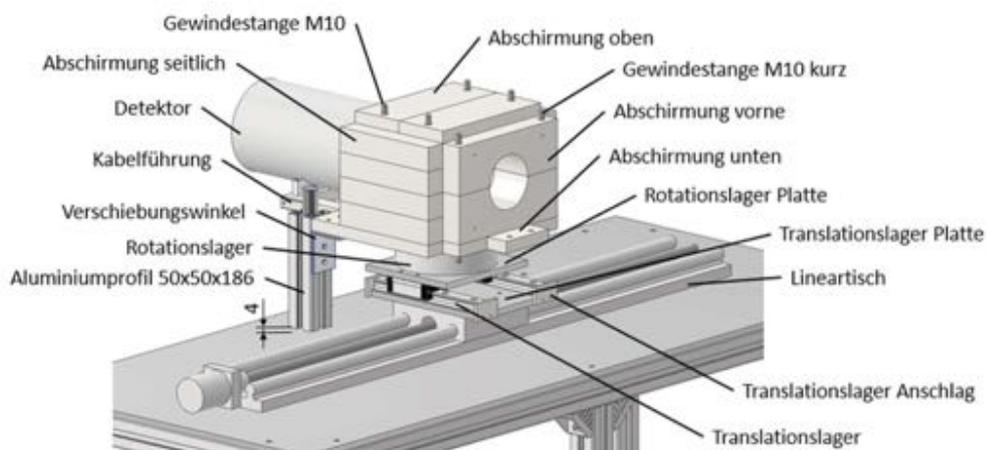


Abbildung 5-9: Montagebeschreibung der Probenbewegung

### 5.2.5 Montager Reihenfolge des Detektorarms

Die Montage des Detektorarms kann erst nach Fertigstellung aller anderen Module erfolgen. Abbildung 5-11 zeigt den Endzustand der Montage des Detektorarms.

1. Die Detektorarm-Probenzange mit dem Aluminiumprofil 50x100x1056 fest verschrauben (M8x12, Nutenstein).
2. Die Detektorarm-Detektorzange mit dem Aluminiumprofil 50x100x1056 fest verschrauben (M8x12, Nutenstein).
3. An dieser Stelle ist eine erste Positionierung des Detektortisches relativ zum Probenstisch erforderlich. Wie in Abbildung 5-10 dargestellt, ist der Detektortisch parallel zum Probenstisch mit einem Abstand der sich gegenüberliegenden Seiten beider Module von 820 mm auszurichten. Dieser Wert basiert auf den Ergebnissen der Positionsberechnung des Kapitels 5.1.1.

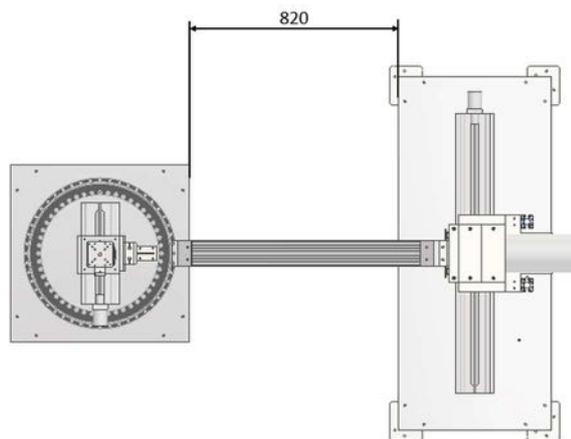


Abbildung 5-10: Vorpositionierung des Detektortisches

4. Die Detektorarm-Probenzange mit dem Winkelmesssystem des Probenstisches fest verschrauben (M8x35).
5. Die Detektorarm-Detektorzange mit der unteren Abschirmung des Detektortisches fest verschrauben (M8x30).
6. Um das gesamte Produkt in seinen Endzustand zu bringen, muss der Detektortisch nun um  $7,5^\circ$  um die Z-Achse des Probenstisches in positive Rotationsrichtung bewegt werden (siehe Abbildung 5-12). Danach ist die Bremse jeder Rolle zu aktivieren. Die optimale Tischposition ist in Kapitel 5.1.1 berechnet worden.
7. Nachdem nun sowohl Proben- als auch Detektortisch ihre Position erreicht haben, kann die vorübergehende Positionssicherung entfernt werden.

Dazu werden die beiden Detektorsperrstangen aus den Aluminiumprofilen entfernt und in ihre Halterungen am Detektorgestell gesteckt.

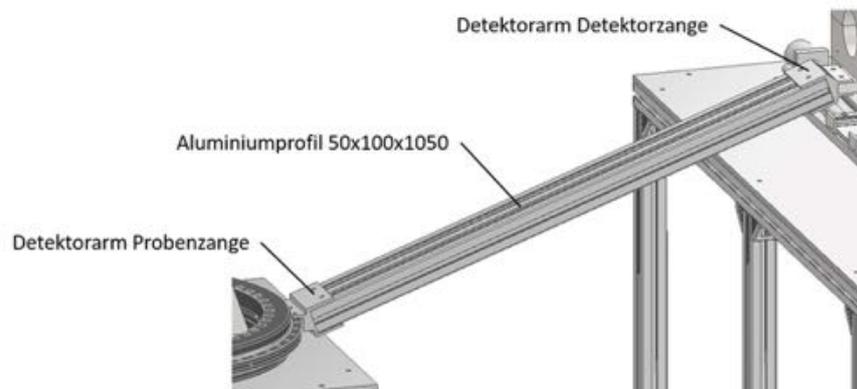


Abbildung 5-11: Montagebeschreibung des Detektorarms

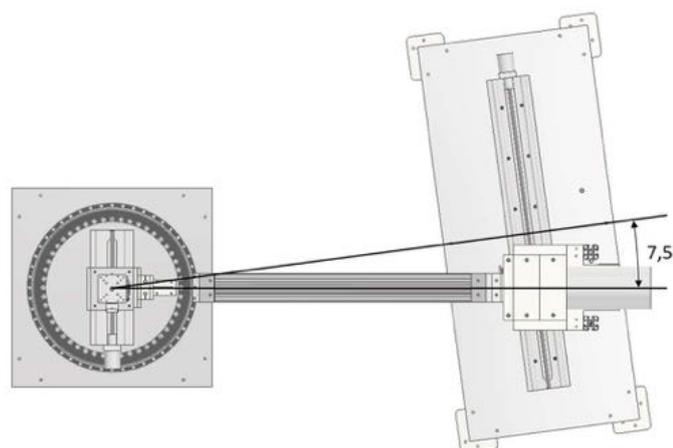


Abbildung 5-12: Einstellung des Tischwinkels

### 5.3 Sicherheitsaspekte

Dieses Kapitel befasst sich mit der Analyse möglicher Sicherheitsrisiken insbesondere durch mechanische Gefährdungen. Es soll nicht der Umfang einer Betriebsanweisung erreicht werden. Es werden die während der Konstruktion auftretenden sicherheitsrelevanten Aspekte zusammen mit den verschiedenen Bereichen der möglichen Gefährdungsherkunft betrachtet, die an die Maschinenrichtlinie von 2006 angelehnt sind. Aus dieser Richtlinie werden zwar Maschinen wie dieses Produkt ausgeschlossen, die für den vorübergehenden Einsatz für Forschungszwecke bestimmt sind [23, S. 27], jedoch dient die Richtlinie hier

trotzdem als Grundlage, da ein umfangreicher Überblick über die möglichen Risiken gegeben wird. Auf eine Betrachtung der Strahlenschutzsicherheit ist im Rahmen dieser Arbeit zu verzichten.

Es werden in der Maschinenrichtlinie drei Grundsätze genannt, die in der angegebenen Reihenfolge zu beachten sind. Risiken sind während der Konstruktion so weit wie möglich zu beseitigen oder zu minimieren. Nicht zu beseitigende Risiken erfordern notwendige Schutzmaßnahmen. Bei weiterhin bestehenden Restrisiken durch nicht ausreichende Schutzmaßnahmen ist eine Unterrichtung der Benutzer erforderlich. [23, S. 36]

Im Folgenden werden die betrachteten Aspekte durch mechanische Gefährdungen genauer dargestellt.

### **5.3.1 Risiko des Verlustes der Standsicherheit**

Die Standsicherheit muss sowohl bei der Montage, der Demontage sowie im Betrieb gewährleistet werden. In der Konstruktion ist dieser Aspekt zweifach berücksichtigt worden. Der Probenstisch besitzt dank der Gewichtsplatte und den Bleisteinen zur Beschwerung einen sehr niedrigen Massenmittelpunkt. Selbst bei Erreichen aller Endlagen der Bewegungsmodule befindet sich der Schwerpunkt innerhalb der Grundfläche. Ein Umkippen wird dadurch ausgeschlossen. Der Detektortisch besitzt eine größere Breite, als für die Befestigung des Lineartisches erforderlich wäre. Dadurch wird ein Umkippen durch den hohen Schwerpunkt des Moduls verringert. Zusätzlich sorgt die starre Verbindung des Detektorarms zum Probenstisch selbst bei einer händischen Bewegung des Detektortisches für ein reduziertes Risiko des Verlustes der Standsicherheit. Die händische Bewegung des Detektortisches ist trotzdem langsam und nur von unterrichteten Personen auszuführen. Die Reihenfolge der Montageschritte in Kapitel 5.2 berücksichtigt eine durchgehend gewährleistete Standsicherheit.

### **5.3.2 Bruchrisiko beim Betrieb**

Es müssen unter Berücksichtigung der vorgesehenen Beanspruchung eine ausreichende Festigkeit und Beständigkeit vorhanden sein. Ein Überschreiten der werkstoffeigenen Festigkeit der neu konstruierten Bauteile ist unter den hier auftretenden geringen Belastungen nicht zu erwarten. Es wird in Kapitel 4.4 ausführlich auf die Belastung der Bewegungsmodule eingegangen und eine ausreichend hohe Sicherheit berechnet. Auf eine entsprechende Beständigkeit wird vor allem bei der Auswahl des Rollenwerkstoffes des Detektortisches geachtet.

### **5.3.3 Risiken durch herabfallende oder herausgeschleuderte Gegenstände**

Herabfallende oder herausgeschleuderte Gegenstände können unter Umständen ein sehr hohes Sicherheitsrisiko darstellen. Deshalb ist auch dieser Aspekt bereits in der Konstruktion betrachtet worden. Beispielsweise wird dem Herabfallen beim Stapeln der seitlichen Abschirmungsblöcke durch die mehrfache Führung durch Gewindestangen vorgebeugt. Durch eine fehlerhafte Positionierung des Detektortisches können die Translationslager trotz Reserven des Fahrweges in ihre Endlagen stoßen. Um ein Entgleisen der Lager und ein Herabfallen der gesamten Detektorabschirmung an dieser Stelle zu verhindern, sind verstärkte Anschlagplatten in beiden Endlagen eingesetzt worden. Ein Herausgeschleudern von Gegenständen ist bei den hier vorgesehenen geringen Bewegungsgeschwindigkeiten zu vernachlässigen.

### **5.3.4 Risiken durch Oberflächen, Kanten und Ecken**

Es sind in diesem Produkt keine scharfen Kanten und Ecken sowie keine rauen Oberflächen vorgesehen. Es ist davon auszugehen, dass in der Fertigung eine fachgerechte Entgratung erfolgt.

### **5.3.5 Risiken durch mehrfach kombinierte Maschinen**

Das Produkt kann zwei Teilfunktionen erfüllen, indem es für die beiden unterschiedlichen Messaufbauten (siehe Kapitel 2.2) ausgelegt ist. Jedoch ist ein mögliches Risiko durch einen gleichzeitigen Betrieb dieser Teilfunktionen auszuschließen. Da nur die Probenhalterung bei einem Wechsel des Messaufbaus ausgetauscht werden muss und keine sonstigen Montageschritte erforderlich sind, stellen Gegenstände eines aktuell nicht verwendeten Teilsystems keine zusätzliche Gefährdung dar.

### **5.3.6 Risiken durch Änderung der Verwendungsbedingungen**

Das Produkt ist für diesen speziellen Verwendungszweck konstruiert worden und wird in absehbarer Zeit auch nur für diesen eingesetzt werden. Um eine Verwendung nach einer Änderung des Verwendungszwecks gewährleisten zu können, ist eine erneute Betrachtung und Bewertung der Konstruktion zu diesem Zeitpunkt erforderlich.

### **5.3.7 Risiken durch bewegte Teile**

Es besteht grundsätzlich ein Gefährdungspotential bei der Verwendung von bewegten Bauteilen. Im Rahmen dieses Produktes wird dieses Potential jedoch durch verschiedene Faktoren ausreichend minimiert. Es treten unter der vorhergesehenen Verwendung nur geringe Bewegungsgeschwindigkeiten auf. Bei einer Relativbewegung zweier Bauteile zueinander kann es jedoch zum Quetschen kommen, wie beispielsweise bei der feststehenden Führung und dem beweglichen Schlitten des Lineartisches. In diesem Fall sind die Bewegungsgeschwindigkeiten jedoch gering. Zudem sind die sich aufeinander zubewegende Flächen des Lineartisch-Schlittens und der Antriebshalterung klein. Wenn der Hubzylinder des Probenstisches in seine untere Endlage bewegt wird, bleibt ein Spalt zwischen den sich aufeinander zu bewegend Flächen der Hubtisch-Endplatte und der Probengrundplatte erhalten. Ein Quetschen ist an dieser Stelle nicht möglich. Ein Abschirmen der Bereiche, die ein Restrisiko darstellen, ist nicht notwendig, da der reguläre Betrieb ferngesteuert erfolgt und sich entsprechend der lokalen Sicherheitsbestimmungen am Aufbauort während des Betriebs keine Personen in der Nähe des Produktes aufhalten dürfen.

### **5.3.8 Risiko unkontrollierter Bewegungen**

Ein Risiko einer unkontrollierten Bewegung, das beispielsweise durch ein Bauteil verursacht wird, welches sich auf einer schrägen Oberfläche befindet, ist in diesem Produkt auszuschließen. Sowohl der Boden am Aufbauort als auch alle verwendeten Grundplatten in der Konstruktion sind horizontal ausgerichtet.

## 6 Bewertung und Ausblick

Es wird zuletzt neben einer kurzen Zusammenfassung der Arbeit eine Bewertung der beschriebenen Konstruktion und damit auch gleichzeitig der vorliegenden Arbeit erstellt. Es werden alle zuvor gestellten Anforderungen auf ihre Erfüllung geprüft. Die in Kapitel 1.4 angekündigten weiteren Realisierungen stellen in dieser Arbeit den Ausblick über Tätigkeiten dar, die im Anschluss an diese Arbeit noch auszuführen sind.

### 6.1 Bewertung anhand der Anforderungserfüllung

Die konstruktiven Anforderungen aus Kapitel 2.3 werden nachfolgend referenziert und ihre Art der Erfüllung wird beschrieben. Zudem werden über die spezielle Konstruktion hinausgehende Anforderungen an das Produkt aufgeführt. Dazu zählt die Ermöglichung zweier Messaufbauten, die ohne größeren Aufwand von Umbauarbeiten zu erreichen sein sollen (Anforderung 1.1). Diese Anforderung ist als erfüllt anzusehen, da lediglich die an die Probe angepasste Probenhalterung ausgetauscht werden muss. Alle übrigen Komponenten bedürfen keiner weiteren Montagen. Eine Handsteuerung ist nicht im regelmäßigen Betrieb notwendig, sondern wird nur in Einzelfällen außerhalb des Betriebes für eine Bewegung des Detektortisches notwendig sein (1.2). Es ist eine Abschirmung in die relevanten Richtungen realisiert worden, die aus mindestens 50 mm Stahl besteht (1.3).

Die zentralen Anforderungen an den horizontalen Messaufbau sind die der Probenrotation um ihre Z-Achse. Die Aufteilung zwischen dem verpflichtenden (2.1) und dem gewünschten Verfahrensweg (2.2) spiegelt sich in der Konstruktion wider. Der verpflichtend geforderte Verfahrensweg von  $-5^\circ \leq 2\theta \leq 20^\circ$  wird vom Lineartisch des Detektortisches übertroffen. Dieser bietet die Möglichkeit, einen Streuwinkel von  $-10^\circ \leq 2\theta \leq 25^\circ$  zu erreichen. Der als Wunschanforderung beschriebene größere Verfahrensweg von  $-5^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$  wird durch eine zusätzliche händische Bewegung des gesamten Detektortisches erzielt. Dank der Antriebskombination von Schrittmotor und Gewindespindel kann ein minimales Rotationsintervall von  $0,00035^\circ$  erzielt werden, wodurch das geforderte Rotationsintervall von  $0,02^\circ$  erfüllt wird (2.5). Für die Übereinstimmung der Rotationsachsen (2.3) von Probe

und Detektor sorgt einerseits die ausgewählte Reihenfolge der Bewegungsmodule der Probenbewegung; andererseits wird dies durch die starre Verbindung des Detektorarms forciert, welche gleichzeitig für einen gleichbleibenden Abstand (2.4) zwischen Probe und Detektor sorgt. Mithilfe geeigneter Messmittel kann über die Verschraubungen am Detektorarm die geforderte Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm erreicht werden. Die geforderte Translation der Probe entlang ihrer Z-Achse von 90 mm (2.6) kann durch den aus Hubzylinder und Linearführung konstruierten Hubtisch erreicht werden. Hier ist ein Hub von 111 mm möglich. Für die Translation entlang der Y-Achse von 50 mm (2.7) wird ein Lineartisch eingesetzt, der einen Hub von 158 mm erreichen kann. Das Goniometer verfügt über einen Verfahrweg von  $\pm 14^\circ$  und ermöglicht somit die letzte geforderte Rotation von  $\pm 5^\circ$  (2.8). Die Translations- und Rotationsbewegung der zuvor dargestellten Anforderungen werden ähnlich des Lineartisches des Detektortisches über einen Schrittmotor samt Gewindespindel angetrieben. Es ist somit davon auszugehen, dass eine Genauigkeit erreicht werden kann, die der des Detektorlineartisches gleicht und deshalb die geforderte Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm bzw.  $\pm 0,1^\circ$  erzielen kann. Die Bewegungseinrichtung der Probe ist dadurch abgeschlossen.

Im vertikalen Messaufbau erfüllt das genannte Goniometer die Funktion der Rotation um die Y-Achse (3.1), während der beschriebene Lineartisch so ausgerichtet werden kann, dass er die geforderte Translation entlang der X-Achse von 50 mm ermöglicht (3.2).

Der konstruierte justierbare Detektor- und Proben Tisch eines Neutronenreflektometers erfüllt somit alle an dieses Produkt gestellten Anforderungen und ist somit als allgemein gute konstruktive Lösung der Aufgabenstellung zu sehen. Eine Beschreibung der Verfahrwege samt graphischer Darstellung befindet sich in Kapitel 4.3 (siehe Abbildung 4-13).

## 6.2 Zusammenfassung

Nach der Definition der Anforderungen in Kapitel 2 werden entsprechend dem in Kapitel 1 beschriebenen Vorgehen nach VDI-Norm in Kapitel 3 drei prinzipielle Lösungen für die gestellten Anforderungen beschrieben. Nach einer Bewertung wird ein Lösungsprinzip als allgemein gute Lösung ausgewählt. Bei diesem steht das maximale Kosteneinsparen durch die Wiederverwendbarkeit von Lagerteilen im Vordergrund.

Im Anschluss wird der Endzustand der auf diesem Lösungsprinzip basierenden Konstruktion in Kapitel 4 beschrieben, wobei der geplante großteilige Einsatz von Lagerteilen und die damit einhergehende Kosteneinsparung erfolgreich umgesetzt werden. Neben dem Aluminiumprofilsystem kann die Menge der Zukaufteile auf das Messsystem, ein Goniometer, den beiden Translationslagern und vier Rollen beschränkt werden. Alle übrigen Komponenten können aus dem institutseigenen Lager oder der Werkstatt bezogen werden, was die Kosten durch Zukaufteile reduziert. Die Beschreibung der Produktgestaltung in Kapitel 4 vermittelt sowohl ein generelles Verständnis der Konstruktion als auch einen detaillierten Überblick über die Bauteilinformationen. Zuvor getätigte Annahmen über Tragfähigkeiten von einzelnen Bauteilen sowie die zu berechnenden minimalen und maximalen Verfahrenswegen werden im Anschluss an die Beschreibung erfolgreich überprüft.

In Kapitel 5.1 wird der Verfahrensweg in Abhängigkeit vom Streuungswinkel analysiert. Gleichung Gl. 75 gibt die ausgewählte Näherungsgleichung an. Im Anschluss daran wird eine detaillierte Montageanweisung gegeben. Diese kann während des Zusammenbaus des Produktes alleinstehend den Montageprozess unterstützen.

Im letzten Kapitel geht diese Arbeit auf Sicherheitsaspekte durch mechanische Gefährdungen ein. Es wird deren Auswirkung auf die Konstruktion beschrieben und dargestellt, welche konstruktiven Maßnahmen zur Minderung der Sicherheitsrisiken getätigt werden.

### **6.3 Weitere Realisierungen im Ausblick**

Zu diesem Zeitpunkt ist die Konstruktion des justierbaren Detektor- und Probenhalters abgeschlossen. Es können im Anschluss kleine konstruktive Änderungen notwendig werden, um die Fertigung in einer ausgewählten Werkstatt zu optimieren und an die dortigen Möglichkeiten und Fertigungsmaschinen anzupassen. Sobald die Fertigung und Lieferung aller Bauteile abgeschlossen sind, sollte ein Testaufbau der Bewegungsmodule des Produktes stattfinden, um den mechanischen Bewegungsmechanismus und dessen elektronische Steuerung zu testen. Zudem steht die Konstruktion einer Probenhalterung noch aus. Diese sollte geschehen, sobald zukünftig die Abmessungen der zu verwendenden Probe festgelegt worden sind. Die zu diesem Zeitpunkt von den Herstellern angegebenen Lieferzeiten sind zwar nicht kritisch für den Zeitplan des Aufbaus des

Produktes, jedoch sollte trotzdem eine Bestellung der Komponenten externer Hersteller für den Testaufbau im Anschluss an die Fertigstellung dieser Arbeit getätigt werden. Die 3D-Daten und technischen Zeichnungen sind an die instituteigene Werkstatt weiterzuleiten, um ebenfalls zeitnah mit der Fertigung beginnen zu können.

Die Konstruktion des justierbaren Detektor- und Probenstisches in dieser Arbeit liefert einen wichtigen Beitrag für das Neutronenreflektometer im Rahmen des Jülicher HBS-Projektes. Der Aufbau des Prototyps einer Neutronenquelle mit Standort Jülich schreitet somit weiter voran.

Es wird dazu beigetragen, dass zukünftig die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit zur Neutronenforschung erhalten und somit die Forschung in den Bereichen Energieversorgung, Gesundheit, Umwelt sowie Verkehrs- und Informationstechnologie erweitert wird.

## 7 Quellenverzeichnis

- [1] Perspektiven der Neutronenforschung in Deutschland. Im Licht der kommenden neuen Europäischen Neutronenquelle, Brückel, T., Eckold, G., Griewatsch, K., Link, P., Steitz, R., Voit, A.u.Zabel, H., 2011
- [2] Gutberlet, T. u. Rücker, U.: Accelerator Based High Brilliance Neutron Sources. In: Angst, M., Brückel, T., Förster, S., Friese, K. u. Zorn, R. (Hrsg.): Scattering! Soft, Functional and Quantum Materials. Schlüsseltechnologien / Key Technologies, Bd. 190. 2019, S. 318–333
- [3] ESFRI Physical Sciences and Engineering Strategy Working Group - Neutron Landscape Group: Neutron scattering facilities in europe. present status and future perspectives. Italy: University of Milan 2016
- [4] Rücker, U., Zakalek, P.u.Baggemann, J.: Informationen zur Aufgabenstellung sowie weitere Vorgaben zur Produktausführung. 2021, abgerufen am: 03.2021
- [5] VDI 2221 Blatt 2:2019. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse*
- [6] VDI 2222 Blatt 1:1997. *Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*
- [7] VDI 2221 Blatt 1:2019. *Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Modell der Produktentwicklung*
- [8] VDI 2519 Blatt 1:2001-12. *Vorgehensweise bei der Erstellung von Lasten-/Pflichtenheften*
- [9] Rupp, C.: Requirements-Engineering und -Management. Aus der Praxis von klassisch bis agil. München: Hanser 2014
- [10] Martin Härtelu.Schaeffler Technologies AG & Co. KG: Anfrage zum Messsystem. E-Mail. 2021, abgerufen am: 16.03.2021
- [11] Leveling foot D44, D58, D90, Bosch Rexroth AG, 2021
- [12] Datenblatt 1-Kreis-Segment 5202.60, HUBER Diffraktionstechnik GmbH & Co. KG, 2021

- [13] Datenblatt Profilschienenführungen für schwere Lasten, MISUMI Europa GmbH, 2021
- [14] Stephanie Kueppersu.Bosch Rexroth AG: Angebot zu einer Auswahl an Produkten. E-Mail. 2021, abgerufen am: 16.03.2021
- [15] Datenblatt KBZ Type Medium load fixed fitting with stopper, MISUMI Europa GmbH, 2021
- [16] Datenblatt Goniometer 410/410A, HUBER Diffraktionstechnik GmbH & Co. KG, 2021
- [17] Stefan Griesslu.HUBER Diffraktionstechnik GmbH & Co. KG: Anfrage zum Lineartisch. E-Mail. 2021
- [18] Strut profiles. technical data, Bosch Rexroth AG, 2021
- [19] Datenblatt Rotationstische aus Edelstahl. Serie M-UTR, Direct Industrie by Virtual Expo Group, 2021
- [20] Präzisions-Schrittmotor mit optimaler Geometrie und Magnetisierung für weiches Laufverhalten. Technische Details, Phytron GmbH, 2021
- [21] Gross, D., Hauger, W., Schröder, J.u.Wall, W. A.: Elastostatik. Lehrbuch, Bd. 2. Berlin: Springer Vieweg 2017
- [22] Datenblatt Winkel 50/50. Produktbeschreibung, Bosch Rexroth AG, 2021
- [23] Europäische Union: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG. 2006

# 8 Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: PRODUKTAUFBAUORT MIT INSTRUMENTENVERTEILUNG [4] .....	2
ABBILDUNG 1-2: GENERELLES VORGEHEN BEIM ENTWICKELN UND KONSTRUIEREN NACH VDI 2221 [6, S. 3] .....	4
ABBILDUNG 1-3: AUFBAU DER ARBEIT ANALOG ZUM VORGEHEN NACH VDI 2221 .....	7
ABBILDUNG 2-1: SYSTEM MIT HAUPTKOMPONENTEN UND KOORDINATENSYSTEM .....	8
ABBILDUNG 2-2: FUNKTIONSSTRUKTUR DER HORIZONTALER MESSUNG .....	10
ABBILDUNG 2-3: FUNKTIONSSTRUKTUR DER VERTIKALER MESSUNG .....	10
ABBILDUNG 3-1: SCHIENENFÜHRUNG MIT HORIZONTALER MESSUNG .....	15
ABBILDUNG 3-2: SCHIENENFÜHRUNG MIT VERTIKALER MESSUNG .....	15
ABBILDUNG 3-3: DETEKTORARM MIT HORIZONTALER MESSUNG .....	17
ABBILDUNG 3-4: DETEKTORARM IN ENDLAGEN .....	17
ABBILDUNG 3-5: DETEKTORARM MIT VERTIKALER MESSUNG .....	18
ABBILDUNG 3-6: LINEARTISCH MIT HORIZONTALER MESSUNG .....	19
ABBILDUNG 3-7: MODELLDARSTELLUNG ZUM AUSTAUSCH VON ROTATION DURCH TRANSLATION ...	20
ABBILDUNG 3-8: LINEARTISCH MIT VERTIKALER MESSUNG .....	20
ABBILDUNG 4-1: MODULGLIEDERUNG DES PRODUKTES .....	26
ABBILDUNG 4-2: PROBENGESTELL .....	27
ABBILDUNG 4-3: PROBENBEWEGUNG .....	28
ABBILDUNG 4-4: HUBZYLINDER MIT HUBTISCHFÜHRUNG .....	29
ABBILDUNG 4-5: PRODUKT MIT BEISPIELHAFTER PROBENAUFNAHME IM DETAIL .....	32
ABBILDUNG 4-6: PROBENTISCH IN EINSATZPOSITIONEN .....	32
ABBILDUNG 4-7: DETEKTORGESTELL .....	33
ABBILDUNG 4-8: DETEKTORBEWEGUNG .....	35
ABBILDUNG 4-9: DETEKTORBEWEGUNG IM SCHNITT .....	35
ABBILDUNG 4-10: DETEKTORARM .....	38
ABBILDUNG 4-11: DETEKTORTISCH IN MITTEL- (LINKS) UND AUSGANGSSTELLUNG (RECHTS) .....	39
ABBILDUNG 4-12: PRODUKT IN AUSGANGSSTELLUNG .....	40
ABBILDUNG 4-13: PRODUKT IN ARBEITSPUNKT .....	41
ABBILDUNG 4-14: PRODUKT MIT VERTIKALEM MESSAUFBAU .....	42
ABBILDUNG 4-15: MAXIMALE TRAGLAST DES DREHTISCHES [16, S. 2] .....	46
ABBILDUNG 4-16: GEWICHTSKRÄFTE AUF DEN DREHTISCH .....	48
ABBILDUNG 4-17: GEWICHTSKRÄFTE DER DETEKTORABSCHIRMUNG .....	52
ABBILDUNG 4-18: MINIMALER VERFAHRWEG DES DETEKTOR-LINEARTISCHES .....	55
ABBILDUNG 4-19: DURCHBIEGUNG DER ALUMINIUMPROFILE AM DETEKTORGESTELL .....	56

ABBILDUNG 4-20: HERLEITUNG ZUM HUB DES VERTIKALEN AUFBAUS.....	58
ABBILDUNG 5-1: SYMMETRISCHE POSITIONIERUNG DES LINEARTISCHES .....	61
ABBILDUNG 5-2: REALE POSITIONIERUNG DES LINEARTISCHES UND ZUGEHÖRIGER GEOMETRIEN ..	61
ABBILDUNG 5-3: GEOMETRIE DES VERFAHRWEGES IM DETAIL .....	64
ABBILDUNG 5-4: GRAPHISCHE AUFZEICHNUNG DES VERFAHRWEGES.....	65
ABBILDUNG 5-5: MONTAGEBESCHREIBUNG DES PROBENGESTELLS .....	67
ABBILDUNG 5-6: MONTAGEBESCHREIBUNG DER PROBENAUFNAHME IM DETAIL .....	68
ABBILDUNG 5-7: MONTAGEBESCHREIBUNG DER PROBENAUFNAHME .....	68
ABBILDUNG 5-8: MONTAGEBESCHREIBUNG DES DETEKTORGESTELLS .....	70
ABBILDUNG 5-9: MONTAGEBESCHREIBUNG DER PROBENBEWEGUNG.....	71
ABBILDUNG 5-10: VORPOSITIONIERUNG DES DETEKTORTISCHES.....	72
ABBILDUNG 5-11: MONTAGEBESCHREIBUNG DES DETEKTORARMS.....	73
ABBILDUNG 5-12: EINSTELLUNG DES TISCHWINKELS.....	73

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: BEWERTUNG DER LÖSUNGSPRINZIPIEN.....	22
TABELLE 2: AUFSUMMIERTE GEWICHTETE BEWERTUNG DER LÖSUNGSPRINZIPIEN.....	24
TABELLE 3: KOSTEN EXTERNER KOMPONENTEN .....	42
TABELLE 4: GEWICHTSKRÄFTE DER PROBENTISCHKOMPONENTEN.....	44
TABELLE 5: MAXIMAL ZULÄSSIGE KOMPONENTENTRAGLAST IN DER PROBENBEWEGUNG.....	46
TABELLE 6: GEWICHTSKRÄFTE DER DETEKTORTISCHKOMPONENTEN.....	49
TABELLE 7: MAXIMAL ZULÄSSIGE TRAGLAST DER DETEKTORTISCHKOMPONENTEN .....	51
TABELLE 8: RESULTIERENDE MOMENTE DER DETEKTORABSCHIRMUNG.....	53
TABELLE 9: ABWEICHUNGEN DER TRENDLINIEN .....	65

## 9 Anhang

Anhang 1: Anforderungsliste

Anhang 2: Stückliste und technische Zeichnungen der Fertigungsteile

Anhang 3: Datenträger mit Konstruktionsmodell als Inventor- und stp-Datei

Die folgenden Tabellen beinhalten eine Auflistung an mechanischen Anforderungen als Auszug eines Lastenheftes. Zusätzlich ist eine laufende Nummer als Referenz, die Einteilung in Pflicht- und Wunschanforderung sowie die Einordnung der Anforderung in die entsprechende Baugruppen Proben- und Detektortisch eingefügt. Es findet eine Aufteilung nach der Gültigkeit der Anforderungen wie folgt statt. Die Anforderungen in der ersten Tabelle gelten für das ganze System, während die zweite nur für die horizontale Messung und die dritte Tabelle nur für die vertikale Messung gelten.

Tabelle A-1: Allgemeine Anforderungen basierend auf der Aufgabenstellung

Lfd. Nr.	Anforderungsbeschreibung	Pflicht / Wunsch	Baugruppe
1.1	Einfacher Wechsel zwischen horizontalem und vertikalem Messablauf	P	Probe
1.2	Keine Handsteuerung im Betrieb	P	Allgemein
1.3	Ausreichende Abschirmung der Detektormessfläche	P	Detektor
1.4	Maximale Masse der Probe 25 kg	P	Probe
1.5	Masse des Detektors 8 kg	P	Detektor
1.6	Bauraumbegrenzung ist Abbildung 1-1 zu entnehmen	P	Allgemein

Tabelle A-2: Anforderungen der horizontalen Messung basierend auf der Aufgabenstellung

Lfd. Nr.	Anforderungsbeschreibung	Pflicht / Wunsch	Baugruppe
2.1	Z-Rotation von Probe und Detektor mit $-5^\circ \leq 2\theta \leq 20^\circ$	P	Allgemein
2.2	Z-Rotation von Probe und Detektor mit $-5^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$	W	Allgemein
2.3	Übereinstimmung der Rotationsachsen von Probe und Detektor	P	Allgemein
2.4	Detektorabstand zum Probenmittelpunkt 1500 mm $\pm 1$ mm	P	Allgemein
2.5	Erreichbare Rotationsintervalle des Detektors von $0,02^\circ$	P	Detektor
2.6	Z-Translation der Probe um 90 mm $\pm 0,1$ mm	P	Probe
2.7	Y-Translation der Probe um 50 mm $\pm 0,1$ mm	P	Probe
2.8	X-Rotation der Probe um $\pm 5^\circ$ ; Genauigkeit: $\pm 0,1^\circ$	P	Probe

Tabelle A-3: Anforderungen der vertikalen Messung basierend auf der Aufgabenstellung

Lfd. Nr.	Anforderungsbeschreibung	Pflicht / Wunsch	Bau- gruppe
3.1	Y <sub>v</sub> -Rotation der Probe um $\theta_v \leq 2,5^\circ$ ; Genauigkeit: $\pm 0,1^\circ$	P	Probe
3.2	X <sub>v</sub> -Translation der Probe um 50 mm $\pm 0,1$ mm	P	Probe

Baugruppe 01: Probengestell						
Position	Name	Kauf/Lager/Fertigung	Information	Beschaffungsangabe	Stk.	Zeichnungsnr.
1.1	Probengrundplatte	Fertigung	Aluminium	Maße 700x700x10	1	1 002-01-01
1.2	Gewichtsplatte	Fertigung	Stahl	Maße 700x700x10	1	1 002-01-02
1.3	Aluminiumprofil 50x50x817 M12	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993158	4	
1.4	Aluminiumprofil 50x100x600	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993163	8	
1.5	Profilfuß D44 M12x85	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842352061	4	

Baugruppe 02: Probenbewegung						
Position	Name	Kauf/Lager/Fertigung	Information	Beschaffungsangabe	Stk.	Zeichnung
2.1	Goniometer	Kaufteil	Huber	5202.60	1	
2.2	Adapterplatte-Goniometer	Fertigung	Aluminium	Maße 150x150x10	1	1 002-02-01
2.3	Lineartisch Probe	Lagerteil	L=404mm; inkl. Antrieb	Büro/Labor	1	
2.4	Adapterplatte-Lineartisch	Fertigung	Aluminium	Maße 200x150x20	1	1 002-02-02
2.5	Drehtisch	Lagerteil	inkl. Antrieb	Büro/Labor	1	
2.6	Hubtisch-Höhenblock	Fertigung	Aluminium	Maße $\varnothing$ 138x100	1	1 002-02-03
2.7	Hubtisch-Endplatte	Fertigung	Aluminium	Maße 160x140x30	1	1 002-02-04
2.8	Hubzylinder	Lagerteil	inkl. Antrieb	Büro/Labor	1	
2.9	Hubtisch-Verbindungsplatte	Fertigung	Aluminium	Maße 140x85x10	1	1 002-02-05
2.10	Hubtischführung	Lagerteil	Stangen, 1 Anschlag, Block	Büro/Labor	1	
2.11	Hubtisch-Anschlag	Fertigung	Stahl	Maße 85x32x15	1	1 002-02-06
2.12	Hubtisch-Strebe	Fertigung	Stahl	Schweißkonstruktion	1	1 002-02-07
2.13	Winkelmesssystem	Kaufteil	Schaeffler	YRTCMA460-03-1760-XL	1	

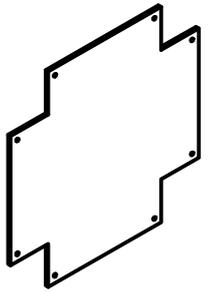
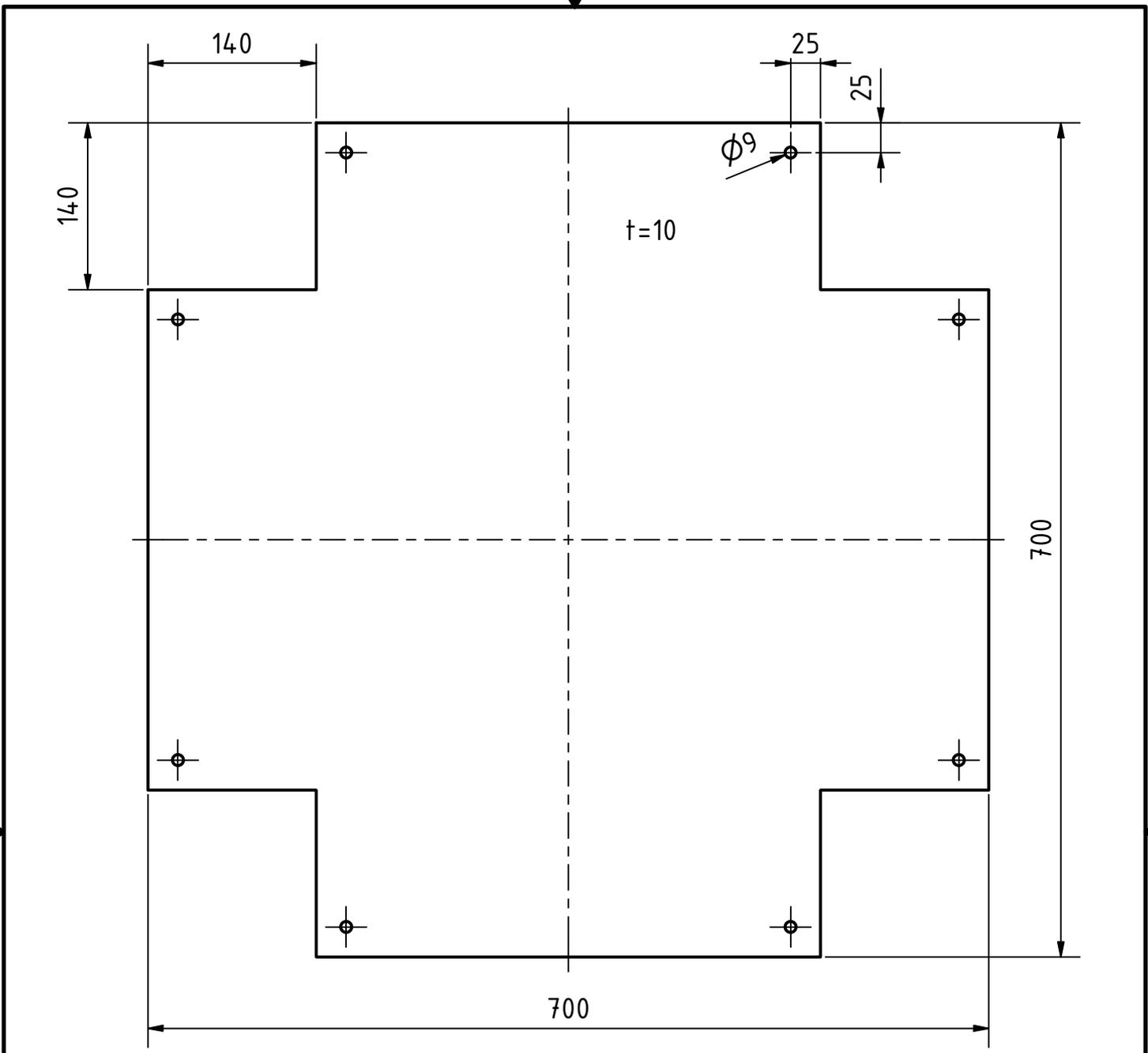
Baugruppe 03: Detektorgestell					
Position	Name	Kauf/Lager/Fertigung	Information	Beschaffungsangabe	Stk. Zeichnung
3.1	Detektorgrundplatte	Fertigung	Aluminium	Maße 1400x600x10	1 002-03-01
3.2	Aluminiumprofil 50x50x500	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993156	10
3.3	Aluminiumprofil 50x50x821	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993156	6
3.4	Aluminiumprofil 50x50x1400	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993156	4
3.5	Adapterplatte-Rolle	Fertigung	Aluminium	Maße 155x130x15	2 002-03-02
3.6	Adapterplatte-Rolle 2	Fertigung	Aluminium	Maße 155x130x15	2 002-03-03
3.7	Rolle	Kaufteil	Misumi	PNUKBZ-100	4
3.8	Sperrplattenhalter	Fertigung	Aluminium	Maße 58x40, t=2	2 002-03-04

Baugruppe 04: Detektorbewegung					
Position	Name	Kauf/Lager/Fertigung	Information	Beschaffungsangabe	Stk. Zeichnung
4.1	Abschirmung Oben	Fertigung	Stahl	Maße 230x92,5x20	2 002-04-01
4.2	Abschirmung Seite	Fertigung	Stahl	Maße 185x70x40	8 002-04-02
4.3	Abschirmung Vorne	Fertigung	Stahl	Maße 230x80x70	2 002-04-03
4.4	Abschirmung unten	Fertigung	Stahl	Maße 445x300x20	1 002-04-04
4.5	Gewindestangen M10	Fertigung	Stahl	L=230	4 002-04-05
4.6	Gewindestangen M10 kurz	Fertigung	Stahl	L=210	2 002-04-06
4.7	Detektorstütze	Fertigung	Kunststoff	Maße 130x25x10	3 002-04-07
4.8	Verschiebungswinkel	Fertigung	Aluminium	Maße 70x45x50	2 002-04-08
4.9	Aluminiumprofil 50x50x186	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993156	2
4.10	Detektorsperrstange	Fertigung	Aluminium	Maße $\varnothing$ 25x240	2 002-04-09
4.11	Kabelblech	Fertigung	Aluminium	Maße 72x15, t=2	1 002-04-10
4.12	Rotationslager	Lagerteil		Büro/Labor	1
4.13	Rotationslager-Platte	Fertigung	Aluminium	Maße 190x170x10	1 002-04-11
4.14	Translationslager	Kaufteil	Misumi	SXR33-220-TMC	2
4.15	Translationslager-Anschlag	Fertigung	Stahl	Maße 50x30x5	4 002-04-12
4.16	Translationslager-Platte	Fertigung	Aluminium	Maße 225x170x10	1 002-04-13
4.17	Lineartisch Detektor	Lagerteil	L=1104; inkl. Antrieb	Büro/Labor	1

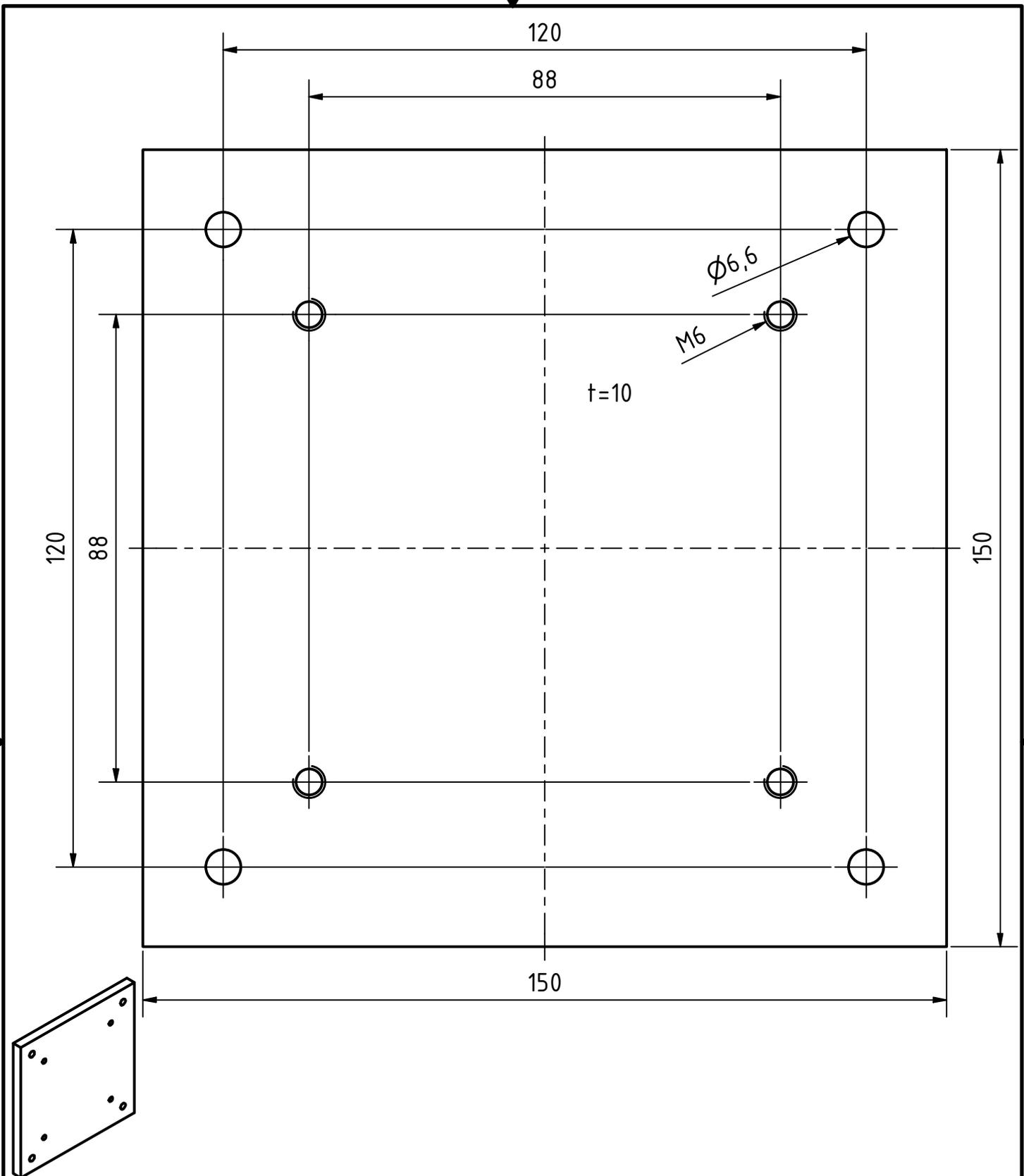
<b>Baugruppe 05: Detektorarm</b>					
<b>Position</b>	<b>Name</b>	<b>Kauf/Lager/Fertigung</b>	<b>Information</b>	<b>Beschaffungsangabe</b>	<b>Stk. Zeichnung</b>
5.1	Aluminiumprofil 50x100x1056	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842993163	1
5.2	Detektorarm-Detektorzange	Fertigung	Aluminium	Maße 100x100x60	1 002-05-01
5.3	Detektorarm-Probenzange	Fertigung	Aluminium	Maße 100x100x60	1 002-05-02

<b>Montageartikel</b>					
<b>Position</b>	<b>Name</b>	<b>Kauf/Lager/Fertigung</b>	<b>Information</b>	<b>Beschaffungsangabe</b>	<b>Stk. Zeichnung</b>
6.1	Winkel 50 mit Befestigungssatz	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842530259	84
6.2	Nutenstein	Kaufteil	Bosch Rexroth	3842536603	48
6.3	Zylinderkopfschraube M4x10	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	2
6.4	Zylinderkopfschraube M4x20	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	12
6.5	Zylinderkopfschraube M4x35	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	6
6.6	Zylinderkopfschraube M5x25	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	6
6.7	Zylinderkopfschraube M5x30	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	8
6.8	Zylinderkopfschraube M5x45	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	4
6.9	Zylinderkopfschraube M6x16	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	20
6.10	Zylinderkopfschraube M6x20	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	24
6.11	Zylinderkopfschraube M6x25	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	8
6.12	Zylinderkopfschraube M6x30	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	4
6.13	Zylinderkopfschraube M8x12	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	14
6.14	Zylinderkopfschraube M8x20	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	26
6.15	Zylinderkopfschraube M8x25	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	12
6.16	Zylinderkopfschraube M8x30	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	2
6.17	Zylinderkopfschraube M8x35	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	3
6.18	Zylinderkopfschraube M8x70	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	8
6.19	Zylinderkopfschraube M10x16	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	16
6.20	Mutter M10	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	12
6.21	Mutter M16	Lagerteil	Edelstahl/Stahl	Werkstatt	1

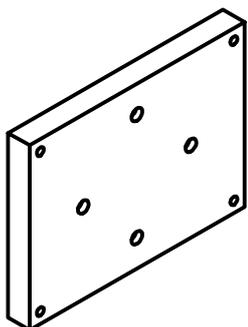
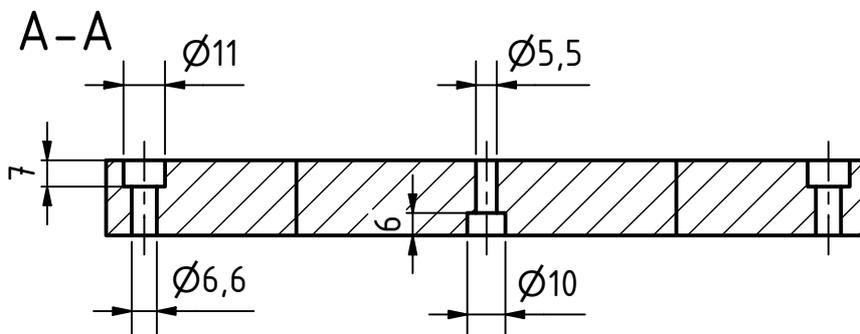
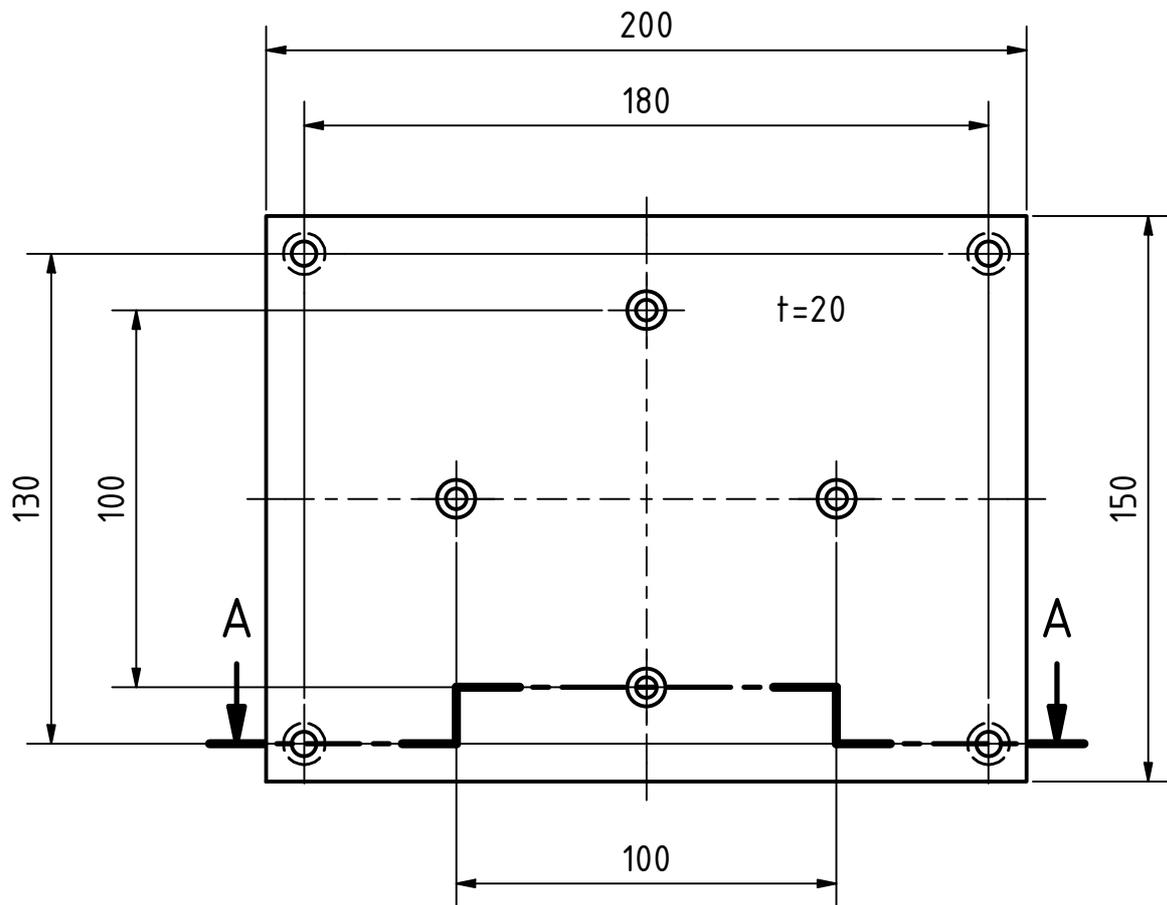




Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel:  002-01-02 Gewichtsplatte		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:5
		Blatt: 1	



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Aluminium</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-02-01 Adapterplate-Goniometer		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 1	



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

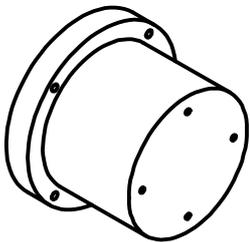
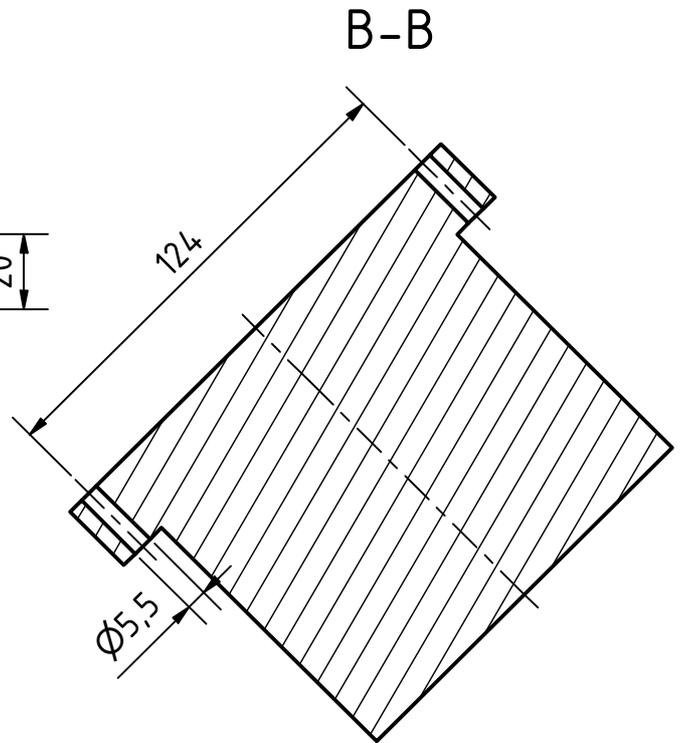
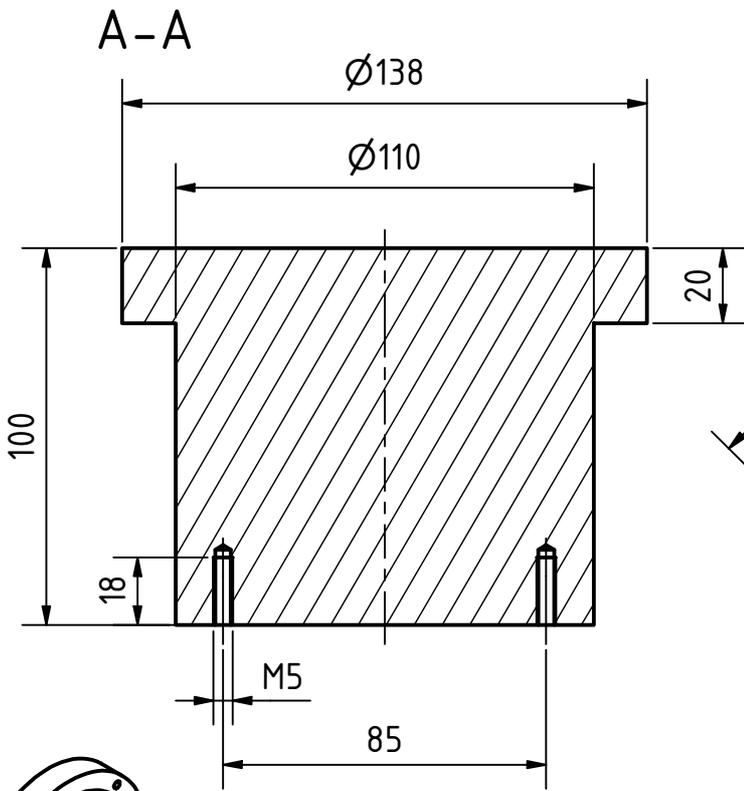
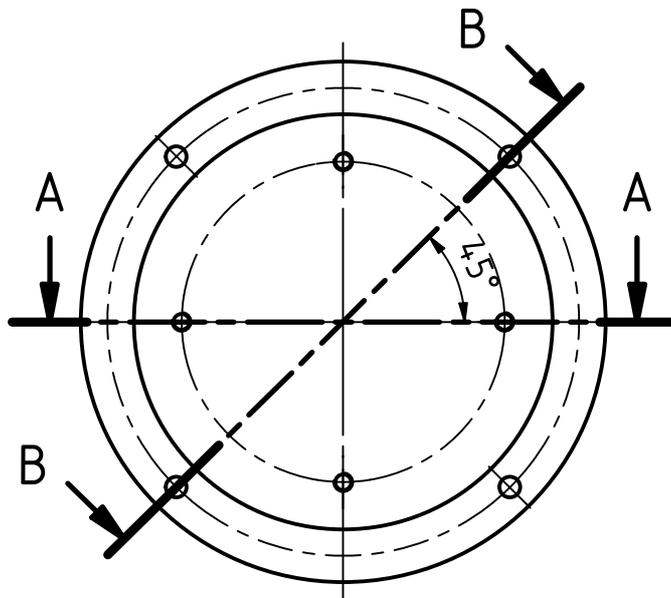
Titel:

002-02-02  
Adapterplate-Lineartisch

Datum: 22.03.2021

Maßstab: 1:2

Blatt: 1



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

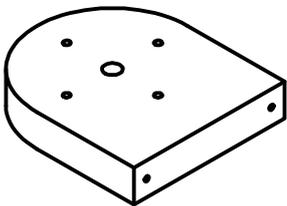
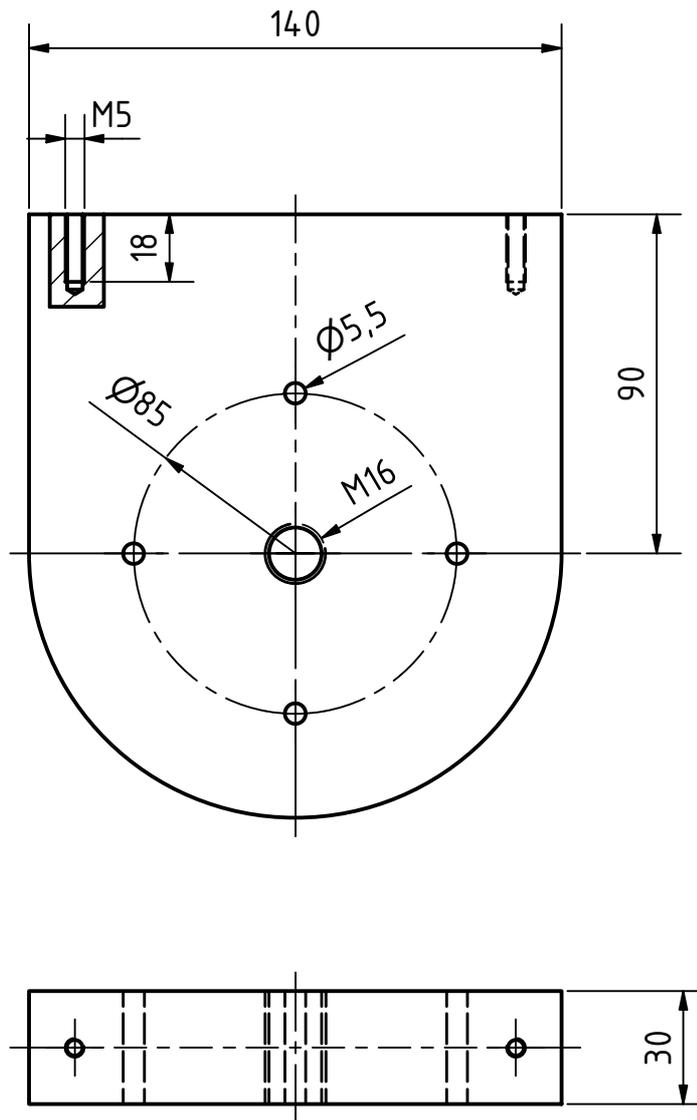
Titel:

002-02-03  
Hubtisch-Höhenblock

Datum: 22.03.2021

Maßstab: 1:2

Blatt: 1



Oberfläche: Oberflächenangaben nach  
DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

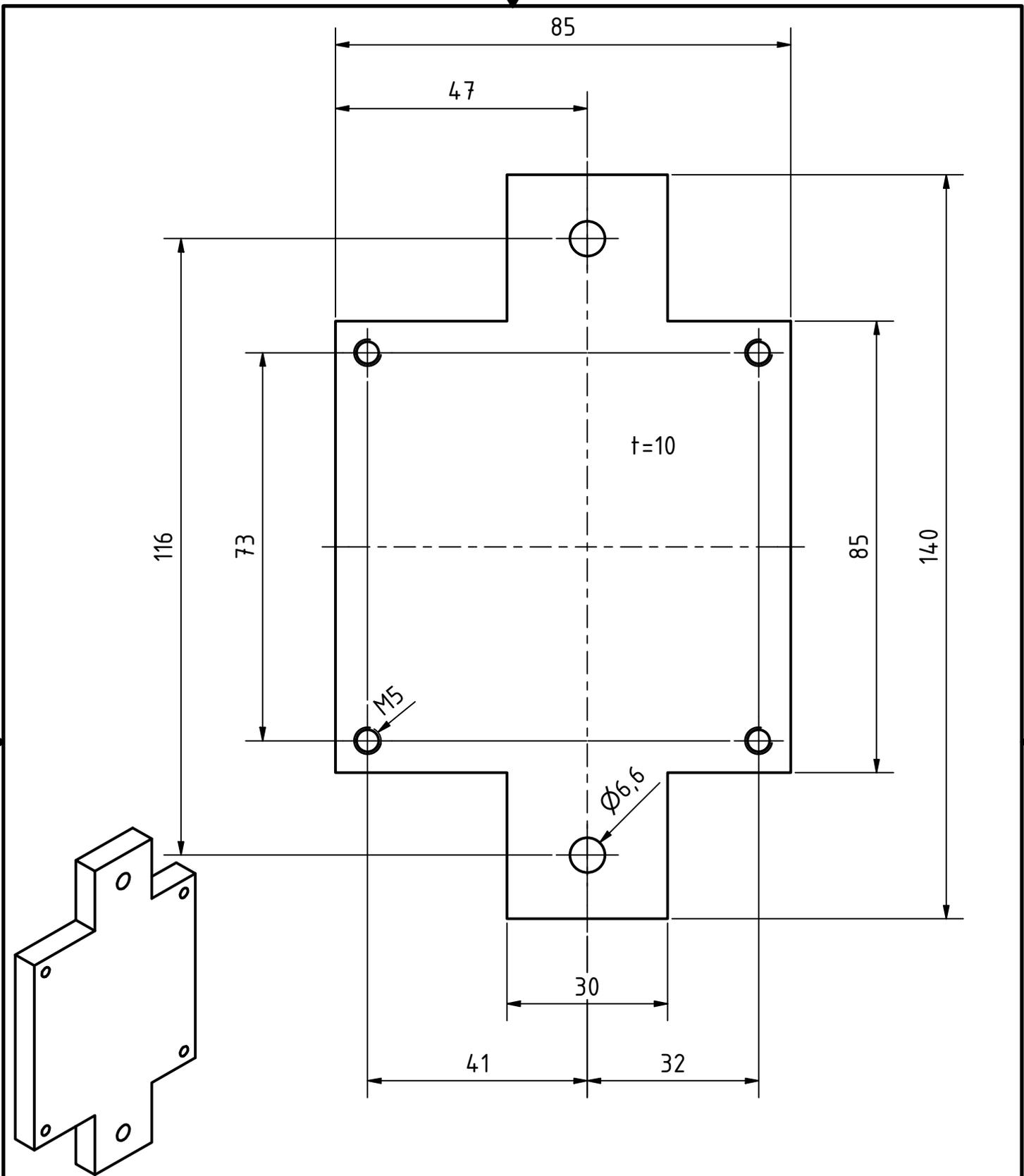
Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:  
002-02-04  
Hubtisch-Endplatte

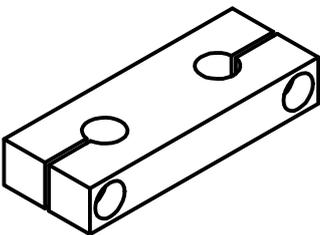
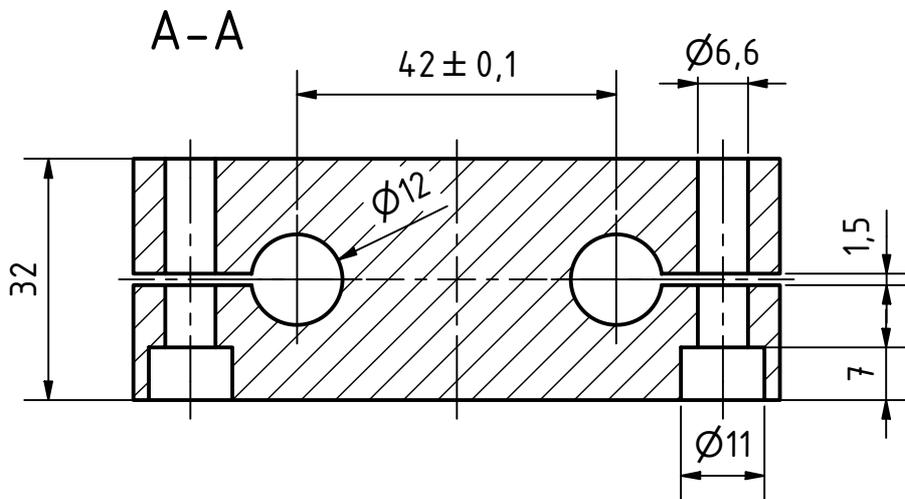
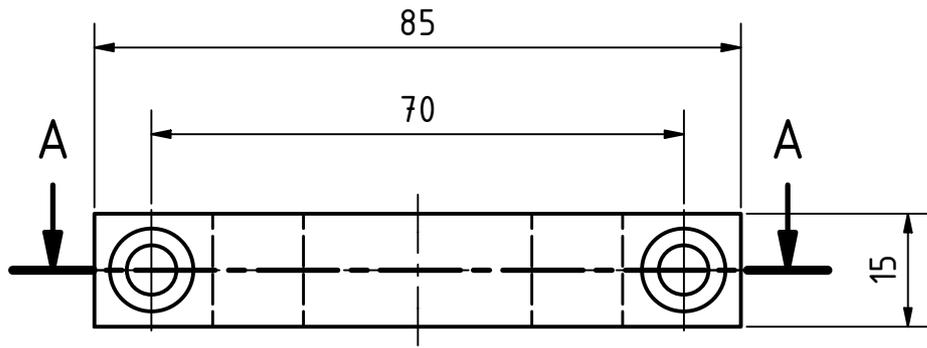
Datum: 22.03.2021

Maßstab: 1:2

Blatt: 1



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Aluminium</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-02-05 Hubtisch-Verbindungsplatte		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:1
		Blatt: 1	



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Stahl



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:  
002-02-06  
Hubtisch-Anschlag

Datum: 22.03.2021

Maßstab: 1:1

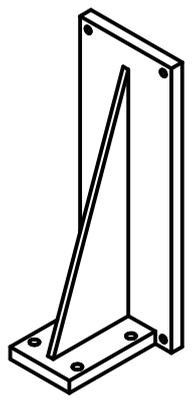
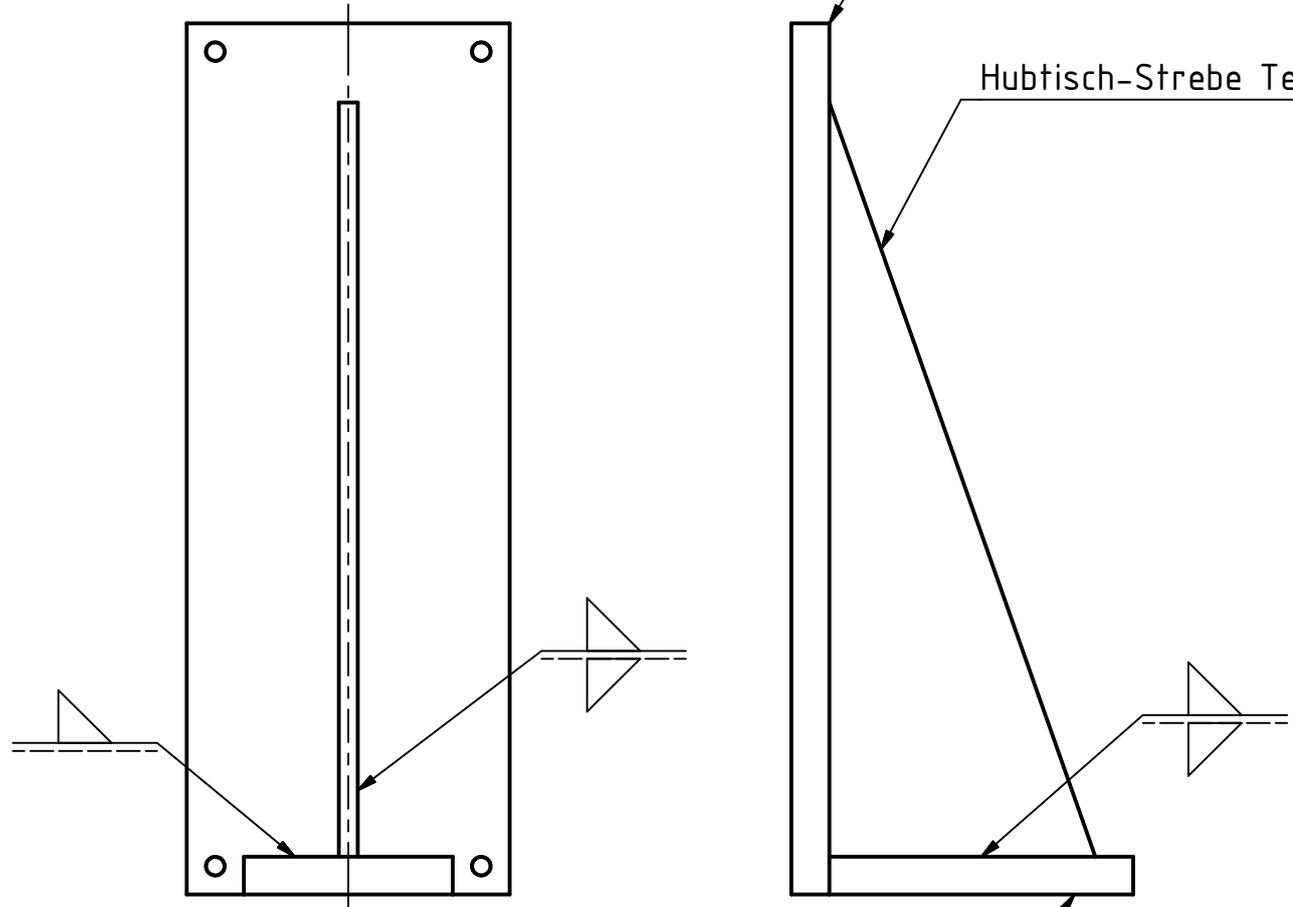
Blatt: 1



Hubtisch-Strebe Teil 1

Hubtisch-Strebe Teil 3

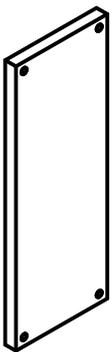
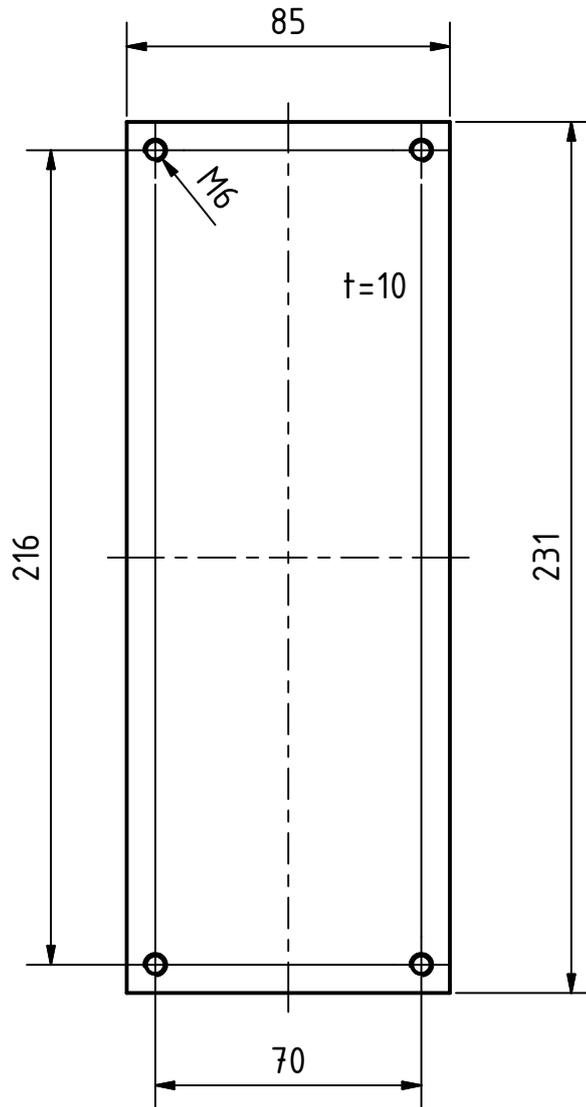
Hubtisch-Strebe Teil 2



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-02-07 Hubtisch-Strebe		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 1	

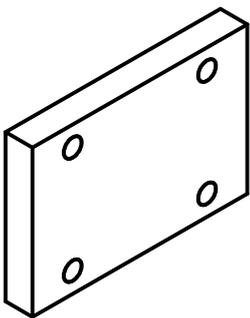
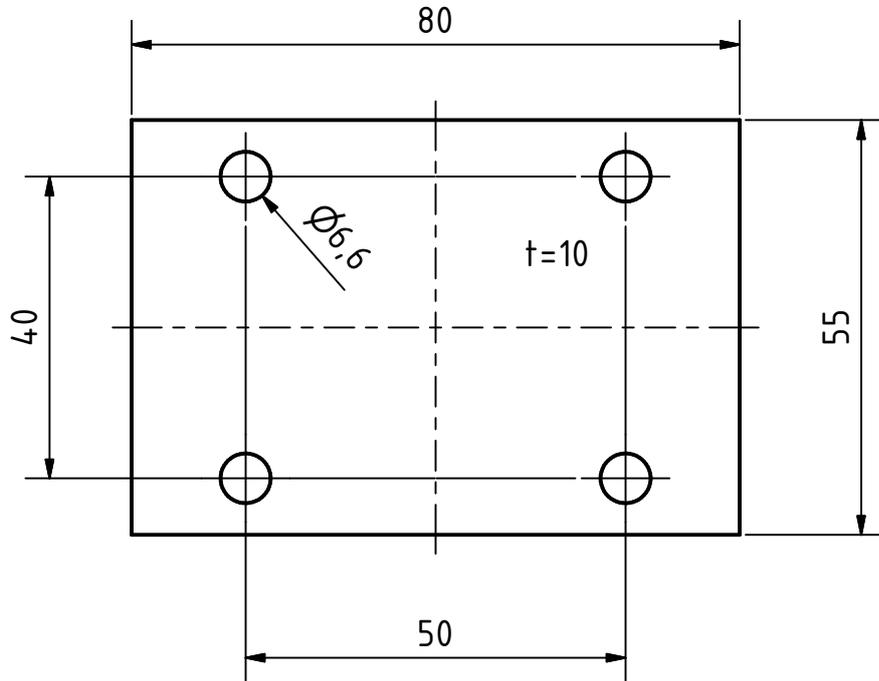


# Hubtisch-Strebe Teil 1



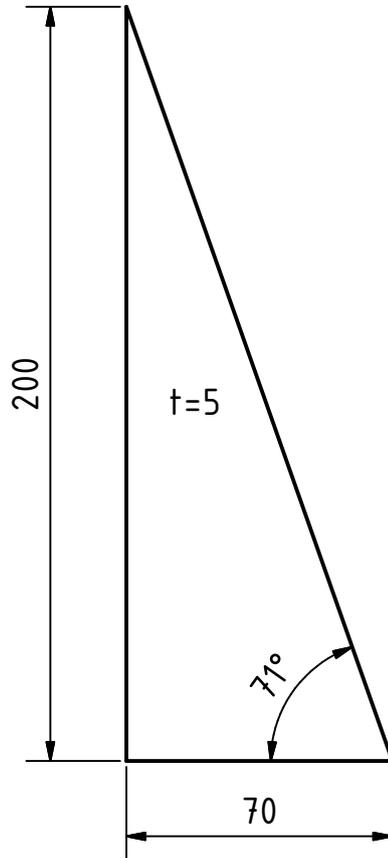
Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Proben- tisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-02-07 Hubtisch-Strebe		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 2	

# Hubtisch-Strebe Teil 2



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Proben- tisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-02-07 Hubtisch-Strebe		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:1
		Blatt: 3	

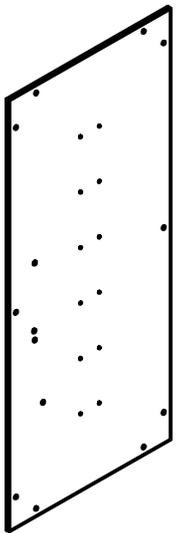
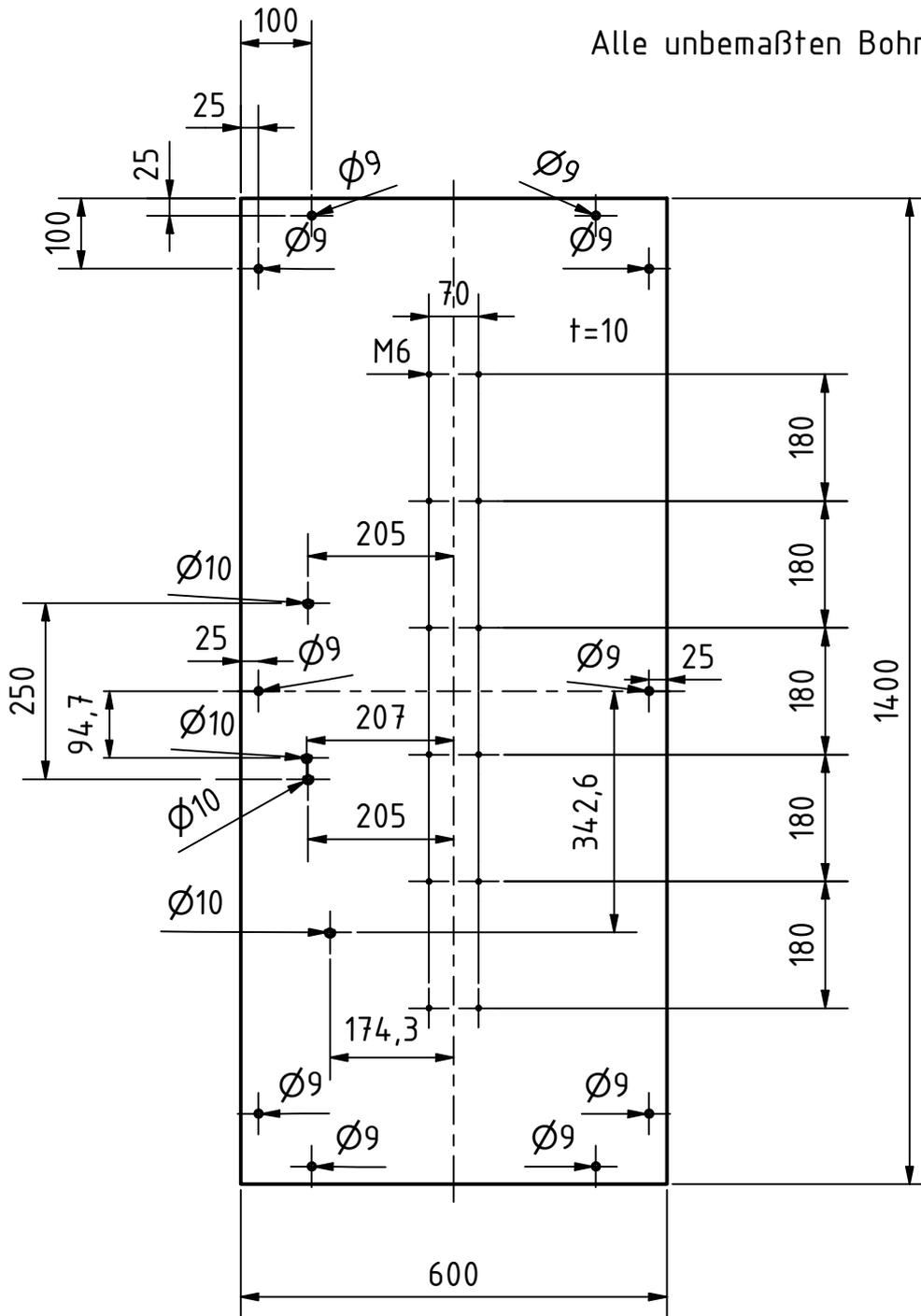
# Hubtisch-Strebe Teil 3



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Proben- tisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-02-07 Hubtisch-Strebe		Datum: 22.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 4	



Alle unbemaßten Bohrungen M6



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:

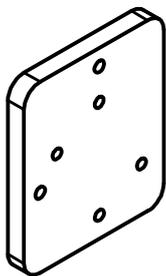
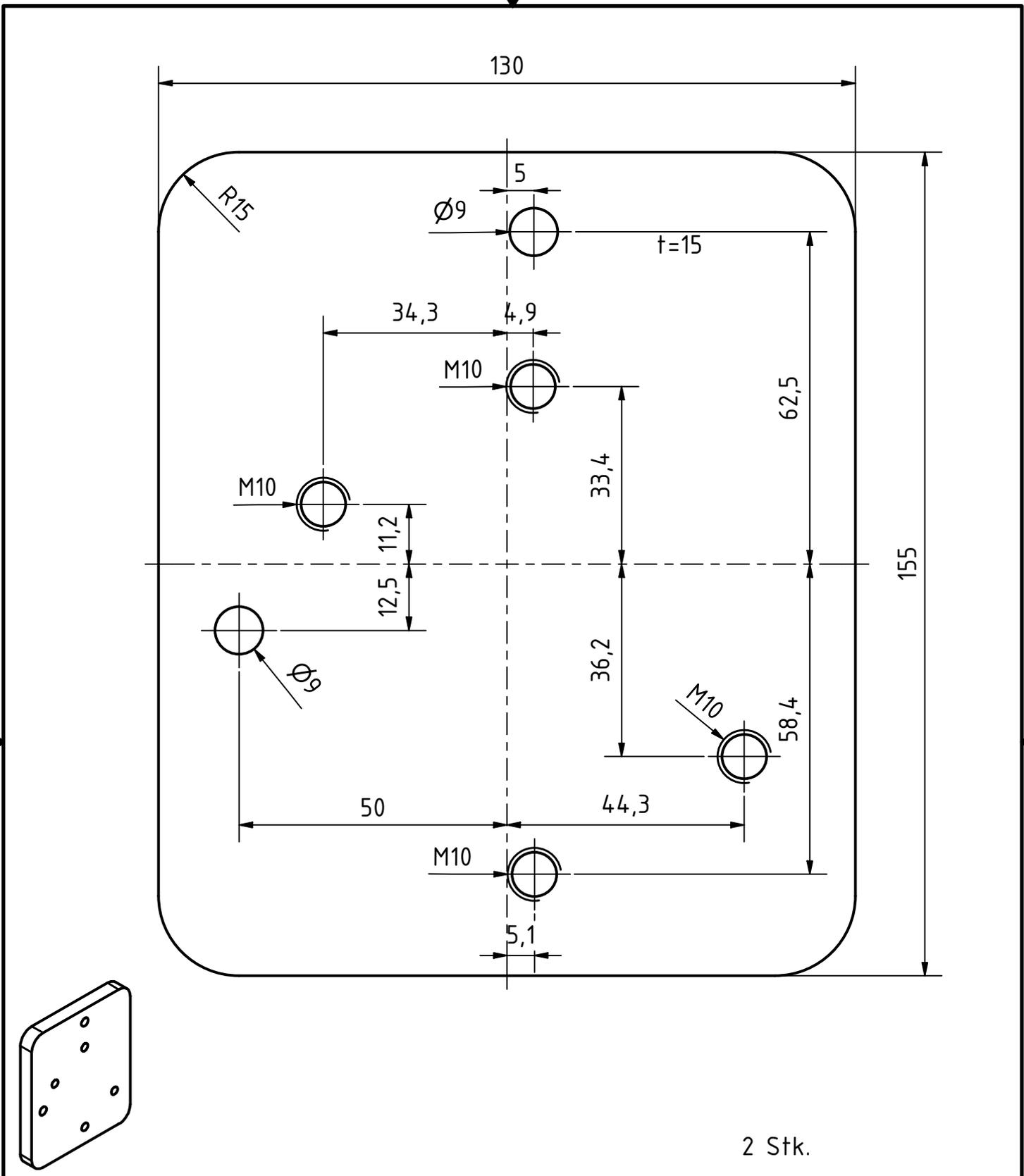
002-03-01  
Detektorgrundplatte

Datum: 24.03.2021

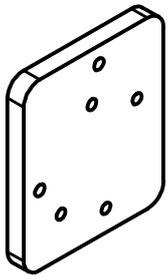
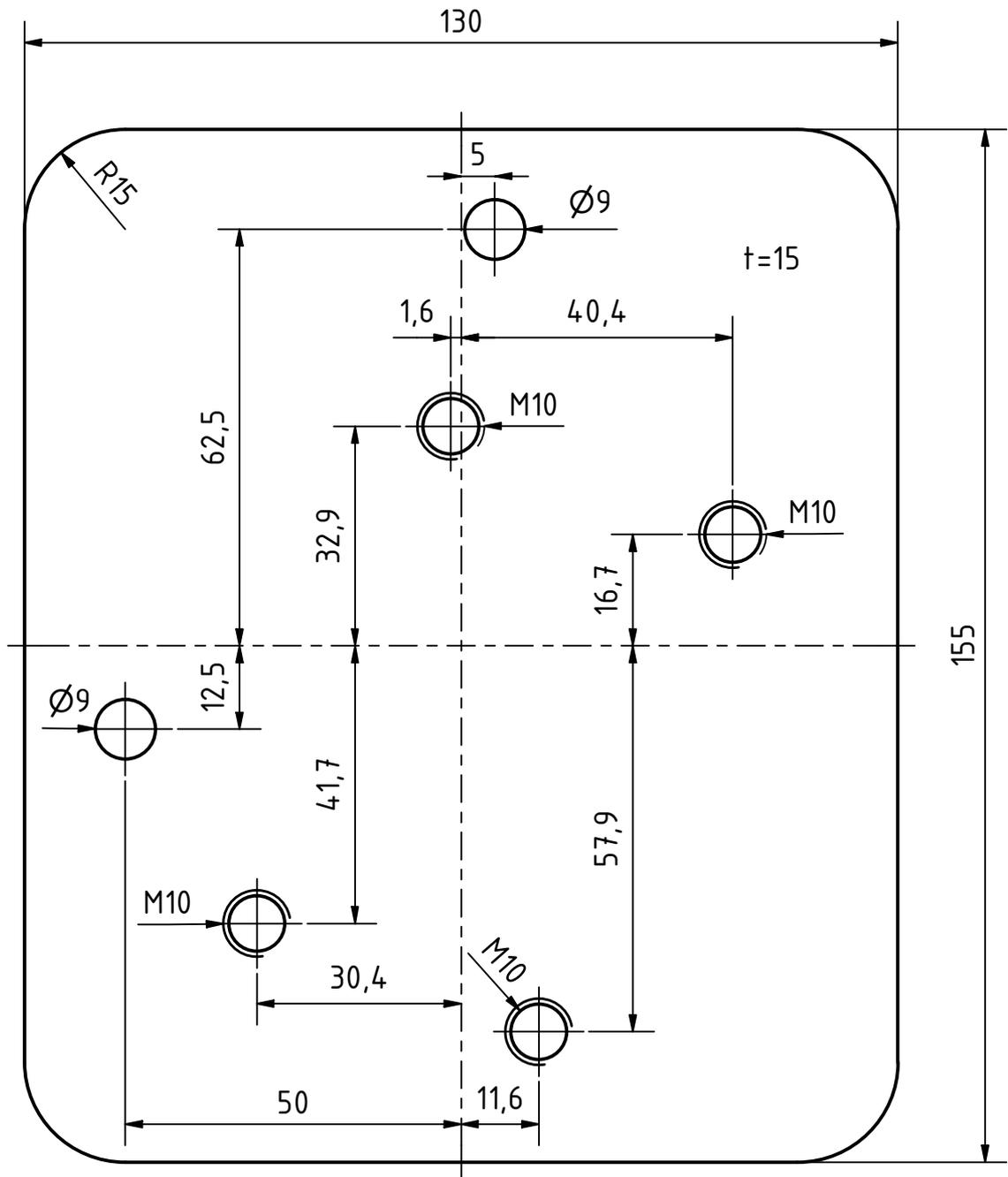
Maßstab: 1:10

Blatt: 1



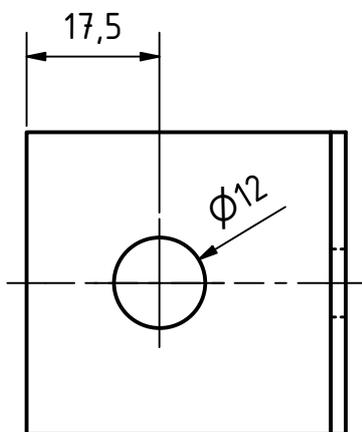
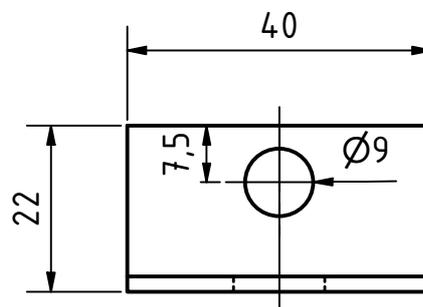
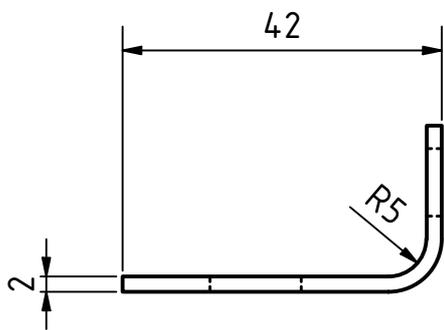


Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Aluminium</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-03-02 Adapterplatte Rolle		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:1
			Blatt: 1

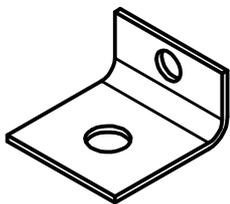


2 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Aluminium</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-03-03 Adapterplatte Rolle 2		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:1
		Blatt: 1	

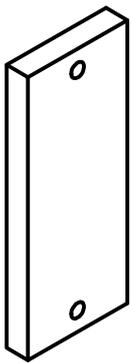
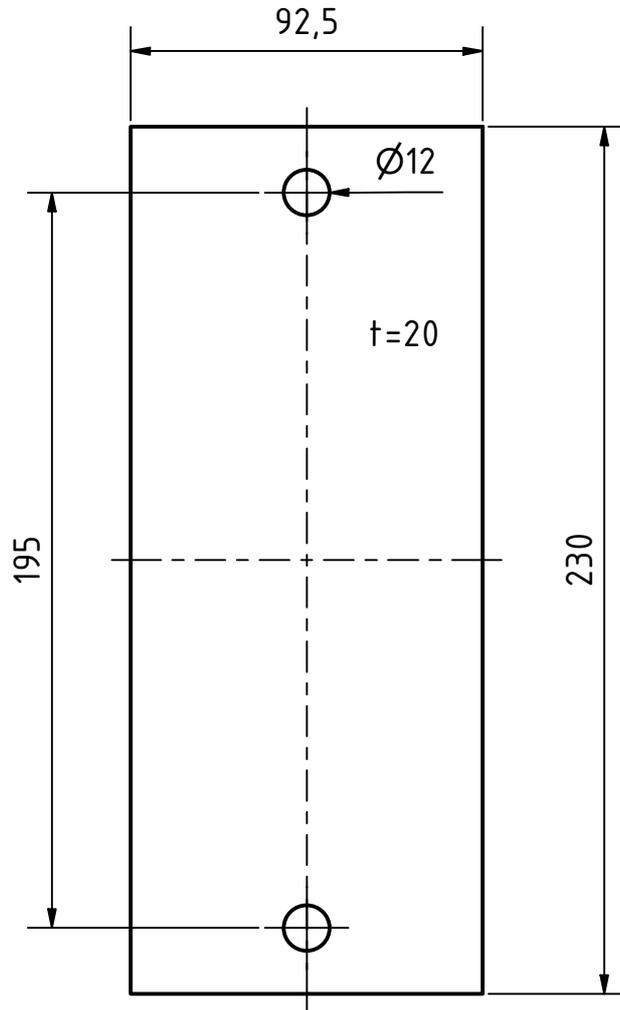


Ungebogene Länge: 60



2 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: Aluminium
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-03-04 Sperrplattenhalter		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:1
		Blatt: 1	



2 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach  
DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
**Stahl**



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

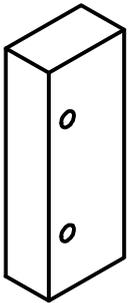
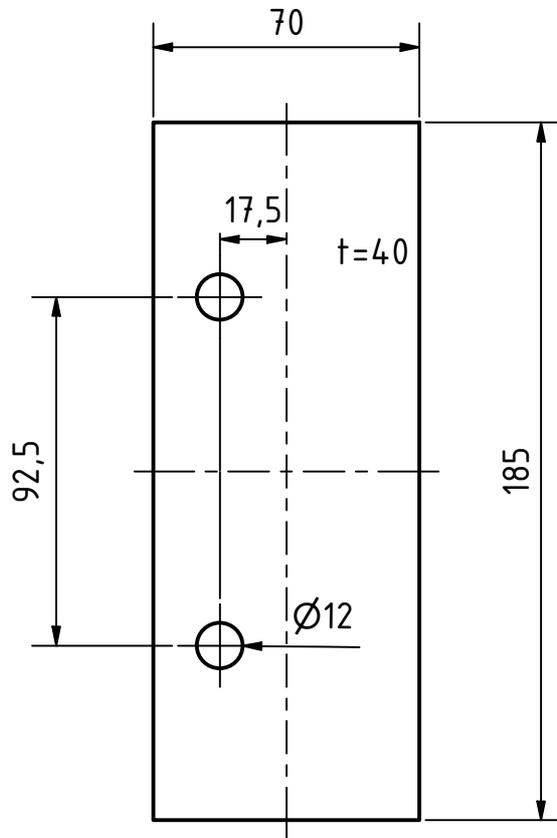
Titel:

002-04-01  
Abschirmung oben

Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:2

Blatt: 1



8 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Stahl



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

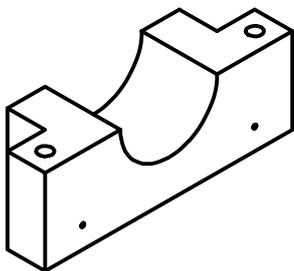
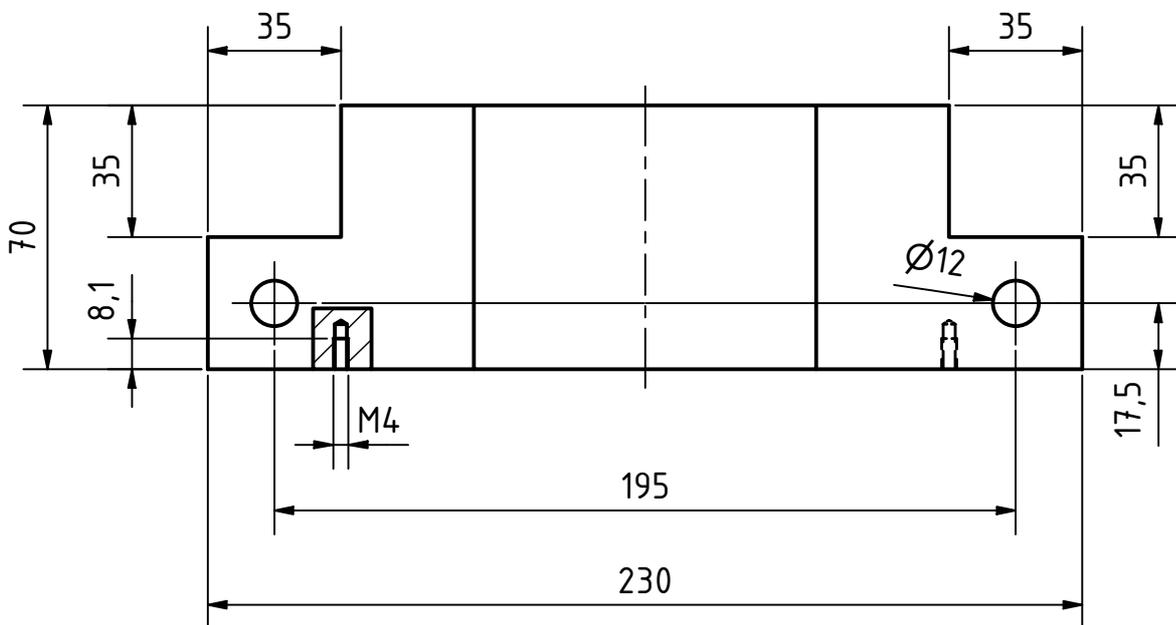
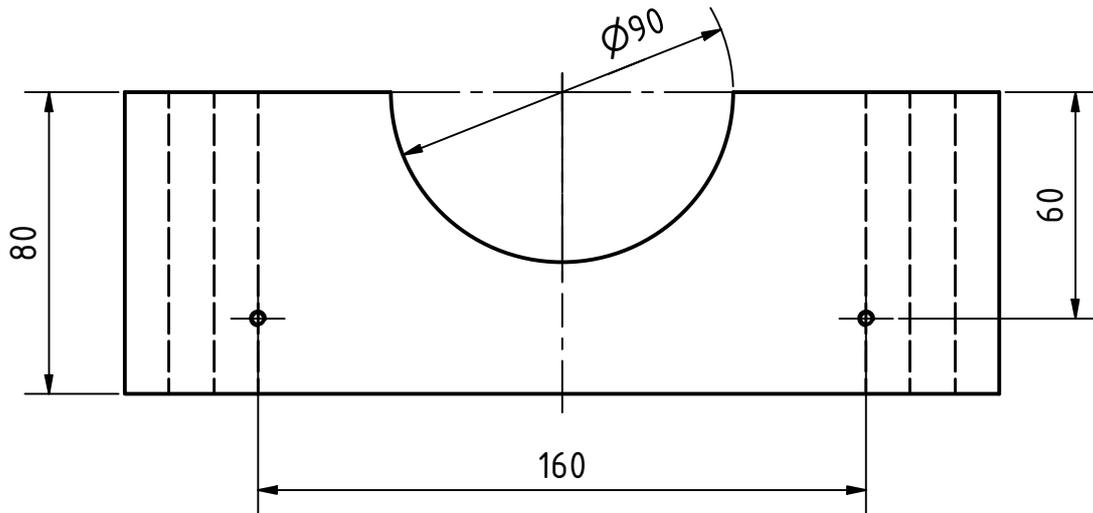
Titel:

002-04-02  
Abschirmung Seite

Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:2

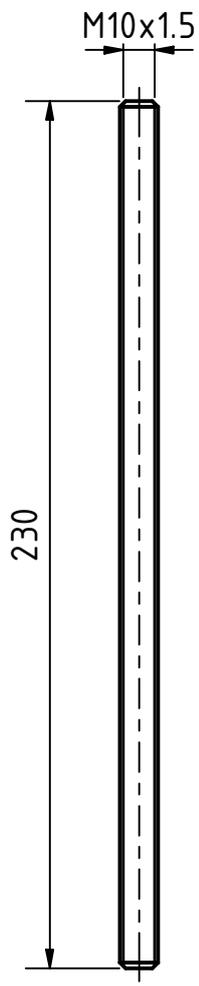
Blatt: 1



2 Stk.

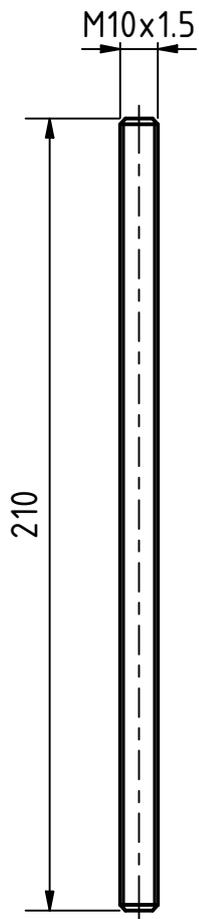
Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-04-03 Abschirmung vorne		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 1	





4 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-04-05 Gewindestange M10		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 1	

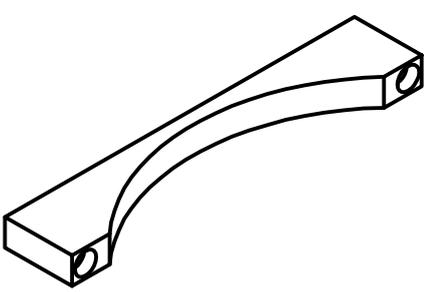
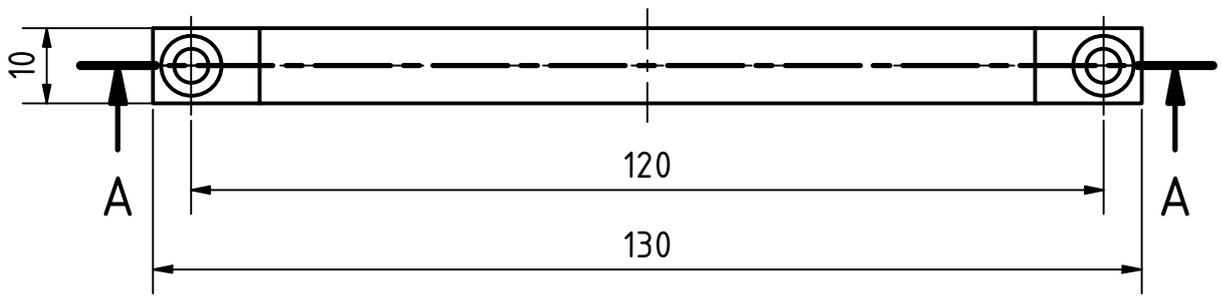
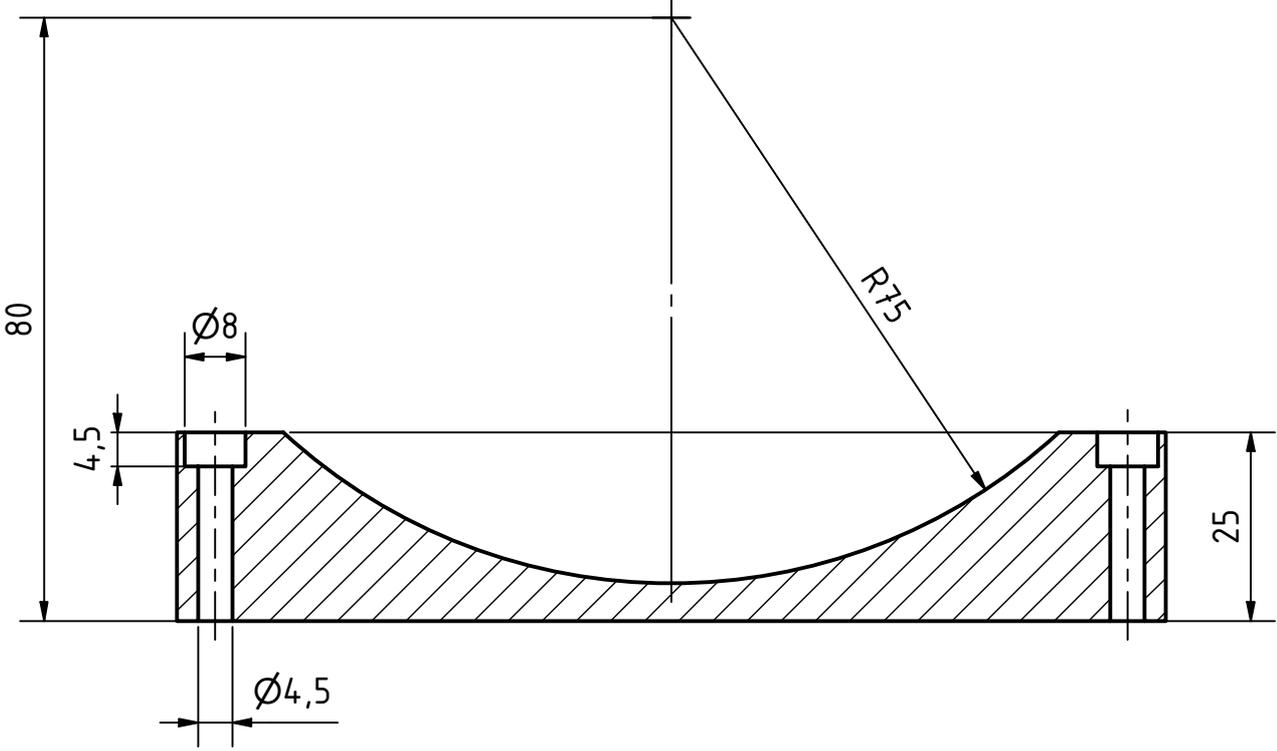


2 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probentisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-04-06 Gewindestange M10 kurz		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 1	



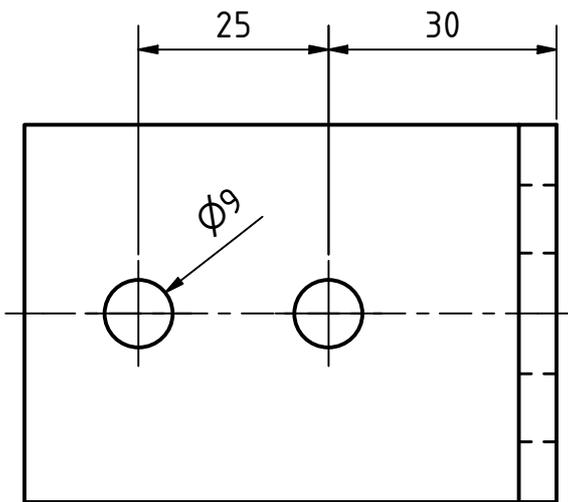
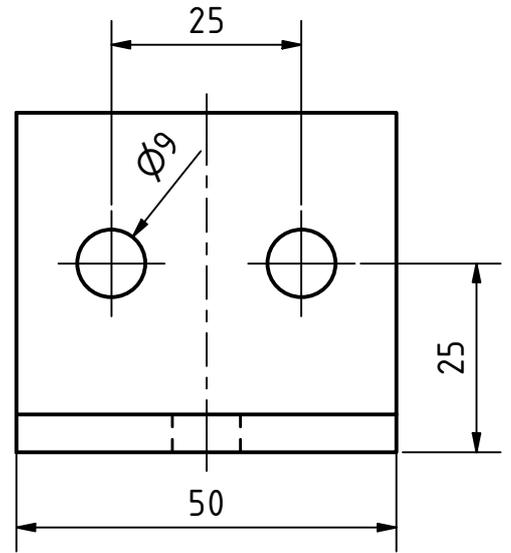
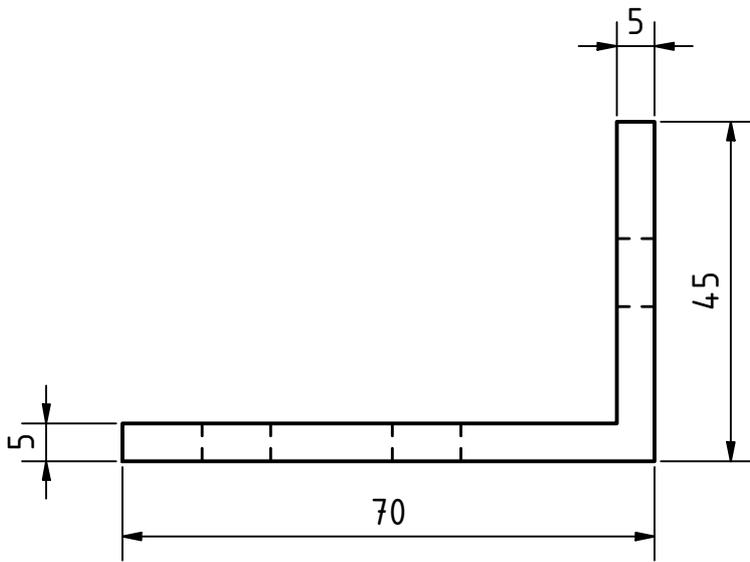
A-A



3 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Kunststoff</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-04-07 Detektorstütze		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:1
		Blatt: 1	





2 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach  
DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:  
002-04-08  
Verschiebungswinkel

Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:1

Blatt: 1



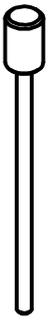
Alle Fasen 2 mm

240

40

Ø25

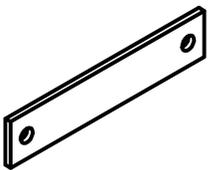
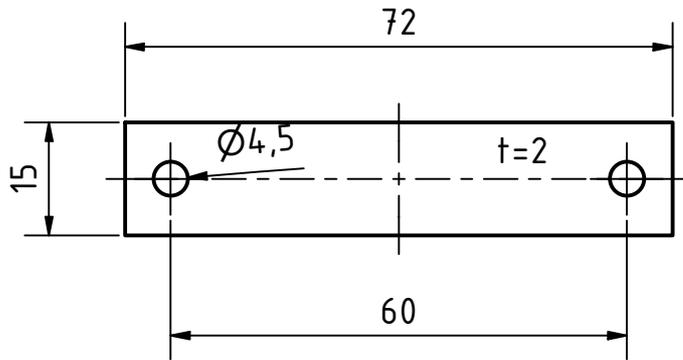
Ø10



2 Stk.

Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Aluminium</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-04-09 Detektorsperrstange		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:2
		Blatt: 1	





Oberfläche: Oberflächenangaben nach  
DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

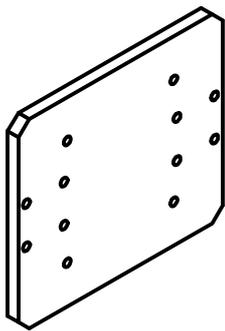
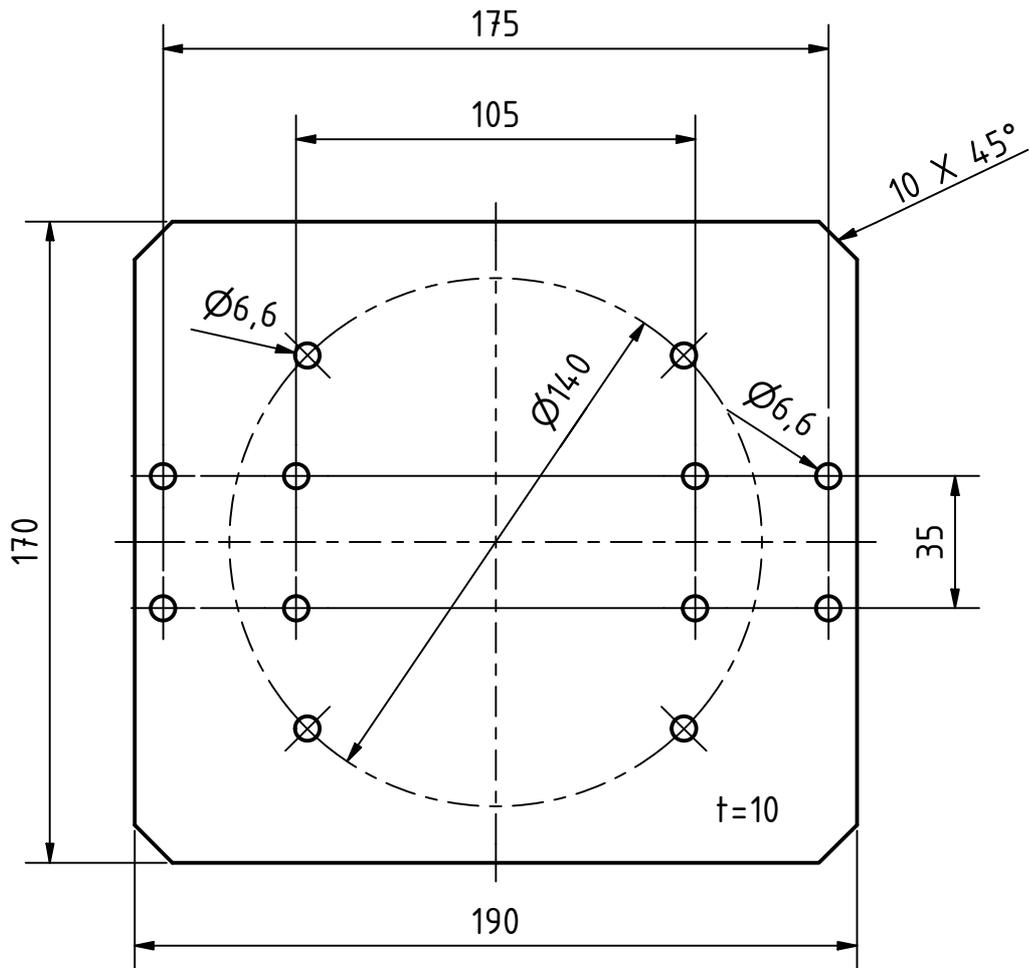
Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:  
002-04-10  
Kabelblech

Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:1

Blatt: 1



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

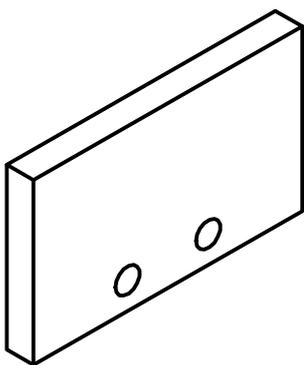
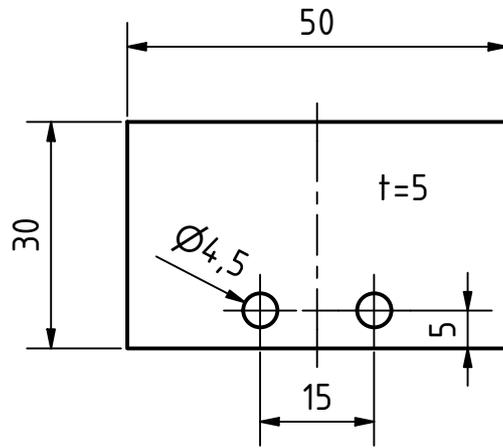
Titel:

002-04-11  
Rotationslagerplatte

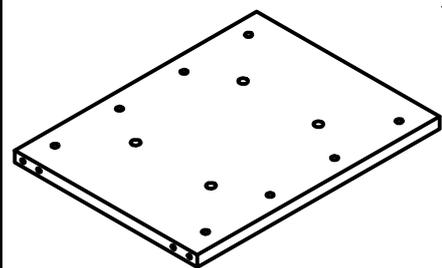
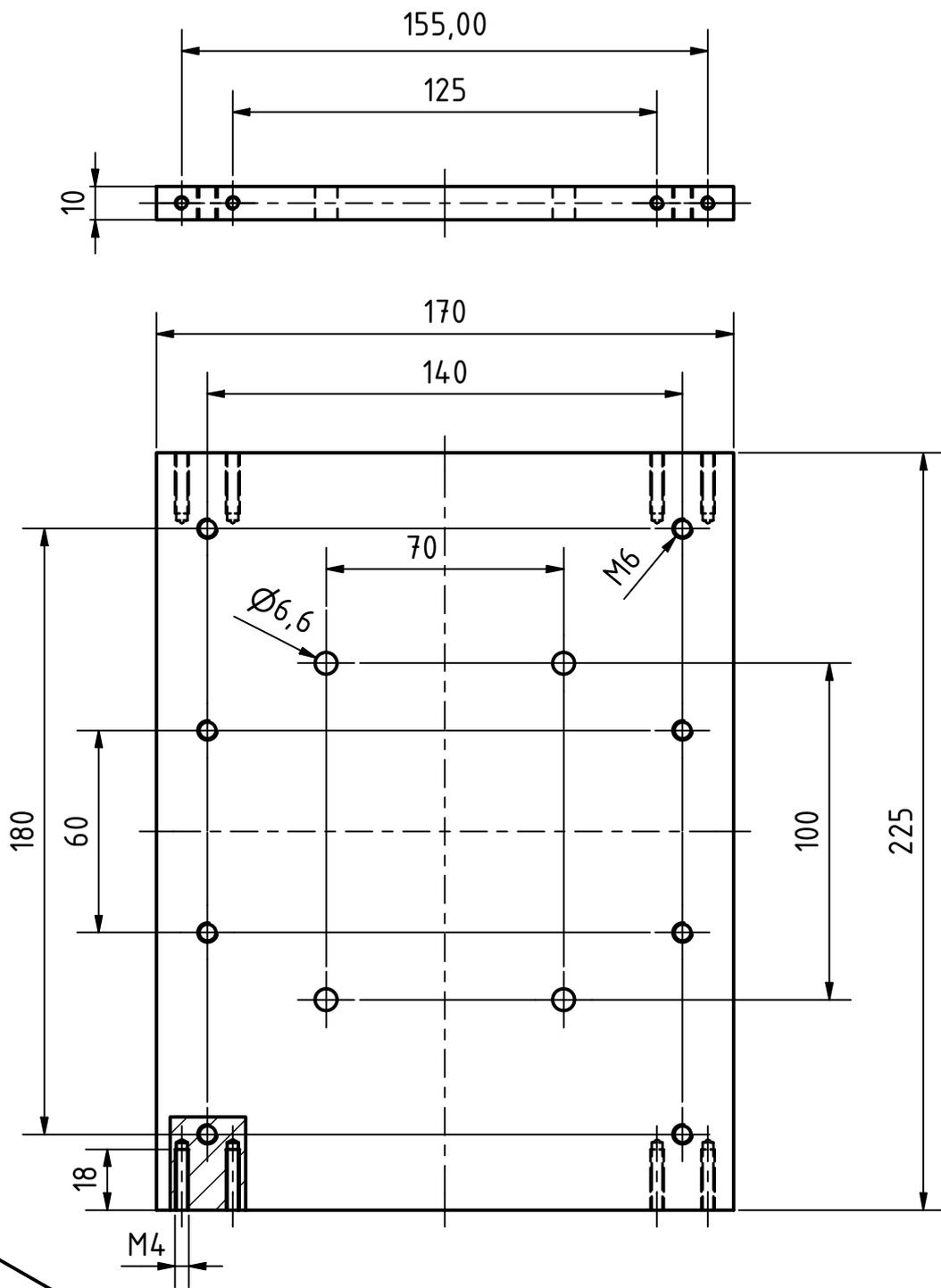
Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:2

Blatt: 1



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302	Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768-mH, DIN 13920-AF		Werkstoff: <b>Stahl</b>
	Erstellt von: Robin Similon	Genehmigt von:	Justierbarer Detektor- und Probenstisch eines Neutronenreflektometers
	Titel: 002-04-12 Translationlager-Anschlag		Datum: 24.03.2021
			Maßstab: 1:1
		Blatt: 1	



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

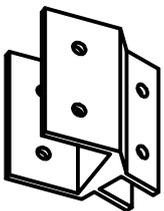
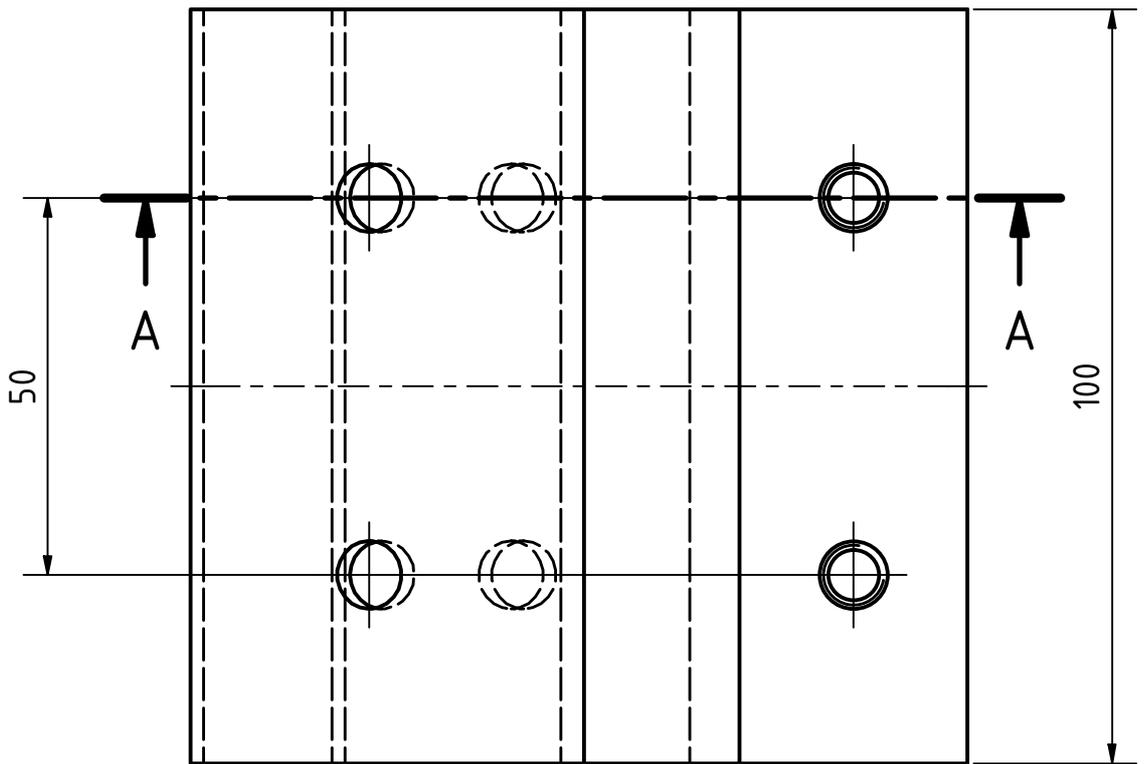
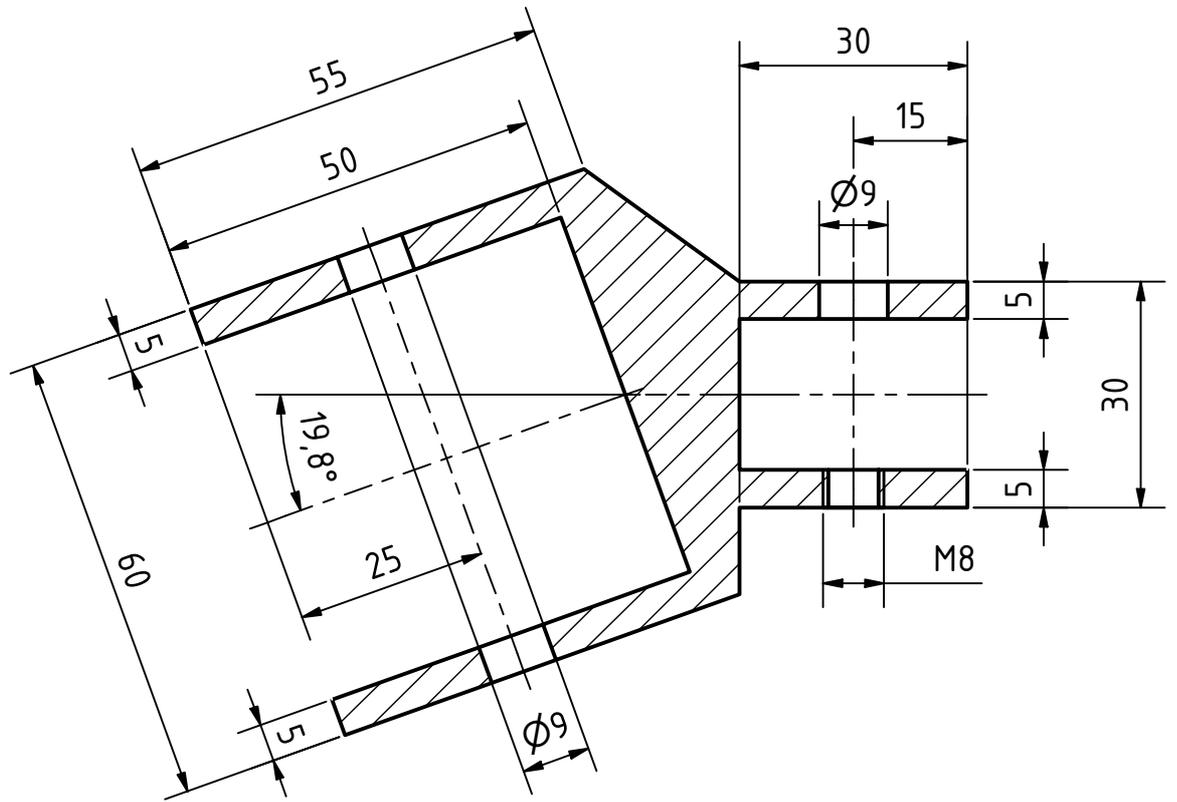
Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:  
002-04-13  
Translationlagerplatte

Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:2

Blatt: 1



Oberfläche: Oberflächenangaben nach DIN EN ISO 1302

Allg. Toleranzen: Werkstückkanten nach DIN ISO 13715  
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH,  
DIN 13920-AF

Werkstoff:  
Aluminium



Erstellt von:  
Robin Similon

Genehmigt von:

Justierbarer Detektor- und  
Probentisch eines  
Neutronenreflektometers

Titel:

002-05-01

Detektorarm-Detektorzange

Datum: 24.03.2021

Maßstab: 1:1

Blatt: 1

