



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Jan Stehlmann-Polewicz

Designkonzept für eine Röntgenapparatur zur Erforschung von historischen Artefakten

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Jan Stehlmann-Polewicz
Designkonzept für eine
Röntgenapparatur zur Erforschung von
historischen Artefakten

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Elektronen Synchrotron
Abteilung: FS-PETRA
Notkestraße 85
22607 Hamburg

Zusammenfassung

Jan Stehlmann-Polewicz

Thema der Bachelorthesis

Designkonzept für eine Röntgenapparatur zur Erforschung von historischen Artefakten

Stichworte

Röntgenstrahlung, Computertomographie, Strahlenschutz, morphologischer Kasten, Ionisierende Strahlung, CAD

Kurzzusammenfassung

Die Arbeit befasst sich mit der morphologische Designfindung einer Röntgenapparatur zur Untersuchung von archäologischen Artefakten. Ziel ist es, eine Apparatur zu entwickeln, die es ermöglicht, diese Untersuchungen in Museen und archäologischen Instituten durchzuführen.

Jan Stehlmann-Polewicz

Title of the paper

Design concept for an X-ray apparatus for the research of historical artefacts

Keywords

X-rays, Computed Tomography, Radiation Protection, Morphological Box, Ionizing Radiation, CAD

Abstract

The thesis deals with the morphological design of an X-ray apparatus for the investigation of archaeological artefacts. The aim is to develop such an apparatus that makes it possible to carry out such investigations in museums and archaeological institutes.

Motivation und Danksagung

Idee und Motivation ist die Konstruktion einer mobilen Röntgenapparatur, mit der vor Ort der Inhalt von Tontafeln sichtbar gemacht werden kann und dabei die Artefakte beschädigungsfrei erhält.

In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Elektron-Synchrotron wird mir die Gelegenheit gegeben, einen mobilen CT "taXi" zu Designen und so bei der Entwicklung dieses Gerätes einen großen Beitrag zu leisten.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meiner Erstprüferin Prof. Dr.-Ing. Schorbach für die Betreuung meiner Abschlussarbeit bedanken.

Besonders dankbar bin ich dem Ingenieursteam von FS-PETRA, unter der Leitung meines Zweitprüfer Dipl. Ing. Ralph Döhrmann. Für die fordernde Aufgabenstellung und das interessante Thema standen sie mir jederzeit für Hilfestellungen und Informationen zur Verfügung.

Weiter möchte ich mich bei meiner Arbeitsgruppe am DESY für das kollegiale Umfeld bedanken.



Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn **Jan Stehlmann-Polewicz**

Matrikel-Nummer: **████████**

Thema: Designkonzept für eine Röntgenapparatur zur Erforschung von historischen Artefakten

Bei den Untersuchungen von archäologischen Artefakten, insbesondere Tontafeln mit Keilschriften, sollen zerstörungsfrei verborgene Details und Schriftfragmente sichtbar gemacht und rekonstruiert werden. Ziel ist es, eine Röntgenapparatur zu entwickeln, die sich unter kontrollierten Bedingungen in archäologischen Instituten oder Museen vor Ort einsetzen lässt. Diese soll modular und mobil aufgebaut sein und es ermöglichen die Untersuchungen zeit- und sachgerecht durchzuführen. Im Rahmen der Arbeit ist dafür ein Design zu entwickeln, konzeptionell auszulegen und vorzukonstruieren.

Schwerpunkte:

- Beschreibung der physikalischen Wirkungsweise von Röntgentomographie
- Erstellen einer Anforderungsliste
- Literatur- und Gesetzrecherche
- Berechnungen zur Schirmungsdicke
- morphologische Designfindung
- Ausarbeitung eines Sicherheitskonzeptes
- Vorkonstruktion des favorisierten Designs

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik, Grundlagen und Gesetzgebung	2
2.1 Allgemeines zur Röntgentechnik.....	2
2.2 Anmerkungen zu den Literatur- und Grafikverweisen	2
2.3 Wellen und Strahlen	3
2.3.1 Aufbau von Materie.....	3
2.3.2 Strahlungsarten	3
2.3.3 Ausbreitung von Strahlung in Materie	6
2.4 Computertomographie	8
2.4.1 Funktionsprinzip	8
2.4.2 Bildergeneration am Tomographen.....	9
2.5 Strahlenschutz.....	11
2.5.1 Gesetze und Vorschriften	11
2.5.2 Abschirmung nach DIN EN 54113 [1]	12
2.5.3 Berechnung der erforderlichen Schutzschichten aus Blei	12
3 Von der Idee zum Design	14
3.1 Klären und Präzisieren der Aufgabe	14
3.2 Planung des Konstruktionsprozesses	17
3.3 Suche nach Lösungen	18
3.3.1 Werkstoffe	18
3.3.2 Mantelgeometrie und Segmentierungsgrad	20
3.3.3 Strahlungssicheres Fügen der Bauteile	22
3.3.4 Rahmen und Aufhängung der Hardware.....	26
3.3.5 Strahlungssichere Stoßkanten.....	27
3.3.6 Design des Probenraumes	28
3.4 Bewertung der Lösungen und deren Auswahl.....	32
3.4.1 Erläuterung des Bewertungsschemas	32

3.4.2	Definition der Funktionen	32
3.4.3	Bewertung der Fügемöglichkeiten.....	36
3.4.4	Einschätzung der Optimierungsmöglichkeiten	36
3.4.5	Bewertung der Rahmenkonstruktion.....	38
3.4.6	Auswertung und Zusammenfassung.....	39
3.4.7	Rahmenbedingungen zur freien Konstruktion	42
3.5	Sicherheitskonzept	43
4	Freie Konstruktion und CAD Simulation	46
4.1	Ergebnis der freien Konstruktion.....	46
4.2	Dimensionen der freien Konstruktion	47
4.3	Teile der Anlage	48
4.4	Montage der Anlage	51
4.5	Integration des Sicherheitskonzepts	61
5	Bewertung- und Schlussfolgerung	62
5.1	Vergleich der Ergebnisse mit der Anforderungsliste.....	63
5.2	Individuelle Einschätzung und Bewertung.....	64
5.3	Anmerkungen	65
Anhang		A
Literaturverzeichnis.....		A
A. Strahlungsquellen (Röntgenröhren)		B
B. Röntgendetektor		C

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
Mathematische Symbole		
U	V	elektrische Spannung
c	$\frac{m}{s}$	Lichtgeschwindigkeit
λ	m	Wellenlänge
f	Hz	Frequenz
H	Sv	der Grenzwert der effektiven Dosis je Jahr
$\dot{H}_{spez,N}$	$\frac{\mu Sv \ m^2}{h \ mA}$	spezifische Dosisleistung für Nutzstrahlung
I	A	elektrische Stromstärke
a_N	m	Abstand vom Brennfleck bis zum zu schützenden Aufenthaltsplatz
t_E	h	die maximale jährliche Einschaltzeit der Röntgenröhre
b	m	Breite
l	m	Länge
h	m	Höhe

Si - Präfixe

M	10^6	Million
k	10^3	Tausend
h	10^2	Hundert
da	10^1	Zehn
d	10^{-1}	Zehntel
c	10^{-2}	Hundertstel
m	10^{-3}	Tausendstel
μ	10^{-6}	Millionstel
n	10^{-9}	Milliardenstel
p	10^{-12}	Billionstel

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DESY	Deutsches E lektronen- S ynchrotron
PETRA	P ositron- E lektron- T andem- R ing- A nlage
X-FEL	X -ray F ree- E lectron L aser
taXi	transportable a pparatuses for X -ray investigation
eV	E lektronen V olt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Luftaufnahme DESY Gelände Hamburg.....	1
Abbildung 2-1 * Schematische Darstellung eines Atoms mit seinen Elementarteilchen.....	3
Abbildung 2-2 * Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle	4
Abbildung 2-3 * Prinzipskizze der Funktionsweise einer Röntgenröhre	5
Abbildung 2-4 * einfaches Modell Photo-Effekt	6
Abbildung 2-5 * einfaches Modell Compton-Effekt	7
Abbildung 2-6 * Prinzipskizze der Verteilung von Strahlungsfeldern	8
Abbildung 2-7 * vereinfachtes Funktionsprinzip eines Röntgen-CT.....	9
Abbildung 2-8 * Erzeugung verschiedener Bildmuster auf der Kamera	10
Abbildung 2-9 Steintafel mit Keilschrift	10
Abbildung 3-1 * Anordnung der Module zur Einhaltung des Funktionsprinzips.....	16
Abbildung 3-2 * Segmentierter Quader	20
Abbildung 3-3 * Schema eines Aufbaus bei einer stark segmentierten Schirmungsfläche ...	21
Abbildung 3-4 * Säule	21
Abbildung 3-5 * Kasten liegend.....	21
Abbildung 3-6 * Kasten stehend.....	21
Abbildung 3-7 * Rohr liegend	21
Abbildung 3-8 * Kegel	22
Abbildung 3-9 * Pyramide	22
Abbildung 3-10 * schematische Schnittdarstellung einer Steckverbindung.....	22
Abbildung 3-11 * schematischer Schnitt mit Klemmelement.....	23
Abbildung 3-12 * schematischer Schnitt durch eine doppelte Schraubverbindung	23
Abbildung 3-13 * schematischer Schnitt durch eine Schweißverbindung	24
Abbildung 3-14 * schematischer Schnitt durch eine Lötverbindung.....	24

Abbildung 3-15 * schematischer Schnitt durch eine Klebverbindung.....	25
Abbildung 3-16 * schematische Darstellung einer Nietverbindung	25
Abbildung 3-17 * Schematischer Schnitt durch eine beispielhafte Kombination	26
Abbildung 3-18 * Umlenkungsprinzip von Röntgenstrahlung.....	27
Abbildung 3-19 * Prinzipskizze eines horizontalen Tischaufbaus	29
Abbildung 3-20 * Möglichkeit des Aufbaus einer diagonalen Probenumgebung.....	30
Abbildung 3-21 * Probenschale für einen horizontalen Aufbau.....	30
Abbildung 3-22 * mögliche vertikale Probenhalterung.....	31
Abbildung 3-23 * Parameterverschiebung und Optimierungsmöglichkeit	37
Abbildung 3-24 * Sortierung der Geometrien nach Oberflächengröße	37
Abbildung 3-25 * Arbeitsposition des Benutzers.....	40
Abbildung 3-26 * Stufenplan des Sicherheitskonzepts	44
Abbildung 3-27 * logic plan electrical safe.....	45
Abbildung 4-1 * Arbeitsposition der Anlage	46
Abbildung 4-2 * Transportposition der Anlage.....	46
Abbildung 4-3 * Seitenplatte des Probenraums mit angeschraubten Rahmenprofilen	51
Abbildung 4-4 * Boden- und Seitenplatte für den Probenraum	51
Abbildung 4-5 * Vergrößerung der Kantenleiste einer Schirmungsplatte	52
Abbildung 4-6 * Prinzipskizze der Verzerrung einer Geometrie.....	52
Abbildung 4-7 * eingesetzte Seitenteile in die Rahmenprofile	53
Abbildung 4-8 * aufgeschraubte zweite Seitenplatte	53
Abbildung 4-9 * Schnitt durch einen Stoß von Rahmenprofil und Seitenwand.....	54
Abbildung 4-10 * Probenraum mit Aufhängung	54
Abbildung 4-11 * Transportgestell mit Vormontierter Anlage	55
Abbildung 4-12 * fest montierte Rahmenprofile für die Kamera- und die Röhrenumgebung.	55
Abbildung 4-13 * hintere Ansicht nach der Montage	56
Abbildung 4-14 * eingeschobene Schirmungsplatten für die Kameraumgebung	56
Abbildung 4-15 * eingeschobene Schirmungsplatten für die Röntgenkamera	57
Abbildung 4-16 * Transportposition der Anlage mit Schutzabdeckungen	57
Abbildung 4-17 * Verschlussdeckel mit der Hardwareaufhängung für die Röntgenröhre.....	58
Abbildung 4-18 * Vormontierte Röntgenröhre auf der Bodenplatte.....	58
Abbildung 4-19 * Bodenplatte mit Kamera	59
Abbildung 4-20 * Probenturm mit Bewegungseinheiten	59
Abbildung 4-21 * Hardware in eingebauten Positionen	60
Abbildung 4-22 * eingeschobener Probendeckel.....	60
Abbildung 4-23 * Benötigte Sensorik an der Anlage.....	61
Abbildung 5-1 * Darstellung der Gegenläufigkeit von Kosten und Gewicht.....	64

Abbildung 0-1 Aufnahme Microfocus X-ray Tube XWT-160-THE	B
Abbildung 0-2 Seitenansichten mit Maßen Röntgenröhre	B
Abbildung 0-3 Seitenansicht eines Lambda 750K	C

1 Einleitung

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron ist ein Forschungszentrum der Helmholtzgemeinschaft, welches 1959 gegründet wurde. Nach Information des Instituts (Stand 2019), gibt es in den Standorten Hamburg und Zeuthen etwa 2300 Mitarbeiter, von denen etwa 650 Wissenschaftler in den Bereichen Beschleunigerbetrieb, Forschung und Entwicklung tätig sind. Gleichzeitig sind noch jährlich 3000 Gastforscher aus 40 Nationen in den verschiedenen Bereichen involviert. Die derzeit betriebenen Beschleuniger sind der Ringbeschleuniger PETRAIII, und die Linearbeschleuniger Flash und European X-FEL. [4]

Das folgende Bild zeigt das Ausmaß und die Anordnung der Forschungsanlagen.



Abbildung 1-1 Luftaufnahme DESY Gelände Hamburg [Quelle: www.helmholtz.de]

Ältere Ringbeschleuniger dienen dem PETRAIII derzeit als Vorbeschleuniger. Ein Beispiel für die Forschungsleistung ist die Entdeckung des Gluons (1979), dessen Spurenbild am damaligen PETRA dargestellt werden konnte. Diese Entdeckung war der Durchbruch für das Standardmodell der Teilchenphysik und Grundlage für die Quantenchromodynamik. „DESY zählt derzeit zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Mit den DESY Großgeräten erkunden Forscher den Mikrokosmos in seiner ganzen Vielfalt.“ [4]

2 Stand der Technik, Grundlagen und Gesetzgebung

2.1 Allgemeines zur Röntgentechnik

Röntgenapparate sind heutzutage sehr verbreitet. Eingesetzt werden sie in vielen unterschiedlichen Bereichen. Beispiele sind vielfach zu finden, angefangen von der Medizin bis hin zur Materialprüfung in verschiedenen Industriezweigen. Als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode bekannt, bietet sie viele Vorteile. Leider gibt es auch erhebliche Nachteile, die den Einsatz dieser Technik begrenzen. In zu hohen Strahlendosen eingesetzt, kann Röntgenstrahlung massive Schäden verursachen. Die Problematik in der Röntgentechnik liegt in der Abwägung zwischen dem Minimum an Energie, die eingesetzt werden muss, um ein gutes Ergebnis zu erreichen und dem Maximum an Energie, welche eingesetzt werden darf, um mögliche Schäden und Gesundheitsgefährdung zu vermeiden. Da Röntgenstrahlung für das menschliche Auge nicht sichtbar ist, sind aktive und passive Schutzeinrichtungen und Richtlinien notwendig, um einen sicheren Umgang mit dieser Technik zu gewährleisten.

2.2 Anmerkungen zu den Literatur- und Grafikverweisen

Grafiken die mit einem " * " versehen sind, wurden innerhalb dieses Projektes durch den Verfasser erstellt. Zitate und externe Quellen sind nach den formellen Regeln gekennzeichnet. Durch Gespräche mit dem Auftraggeber, werden zum Zeitpunkt dieser Arbeit die Referenzdaten einer Röntgenröhre der Firma X-WorX und einer Röntgenkamera von Spectrum gesetzt. Daten zu dieser Hardware sind dem Anhang zu entnehmen.

Allgemeine Recherche hat ergeben, dass es eine Vielzahl an Produkten gibt, welche eingesetzt werden können. Auf weitere Literatur und Quellen wird innerhalb der Arbeit hingewiesen und im Quellenverzeichnis angegeben.

2.3 Wellen und Strahlen

2.3.1 Aufbau von Materie

Die Abbildung 2-1 zeigt das Modell eines Atoms nach Bohr. Die bekanntesten Elementarteilchen sind Proton, Neutron und Elektron. Sie bilden die Ruhemasse jedes einzelnen Atoms.

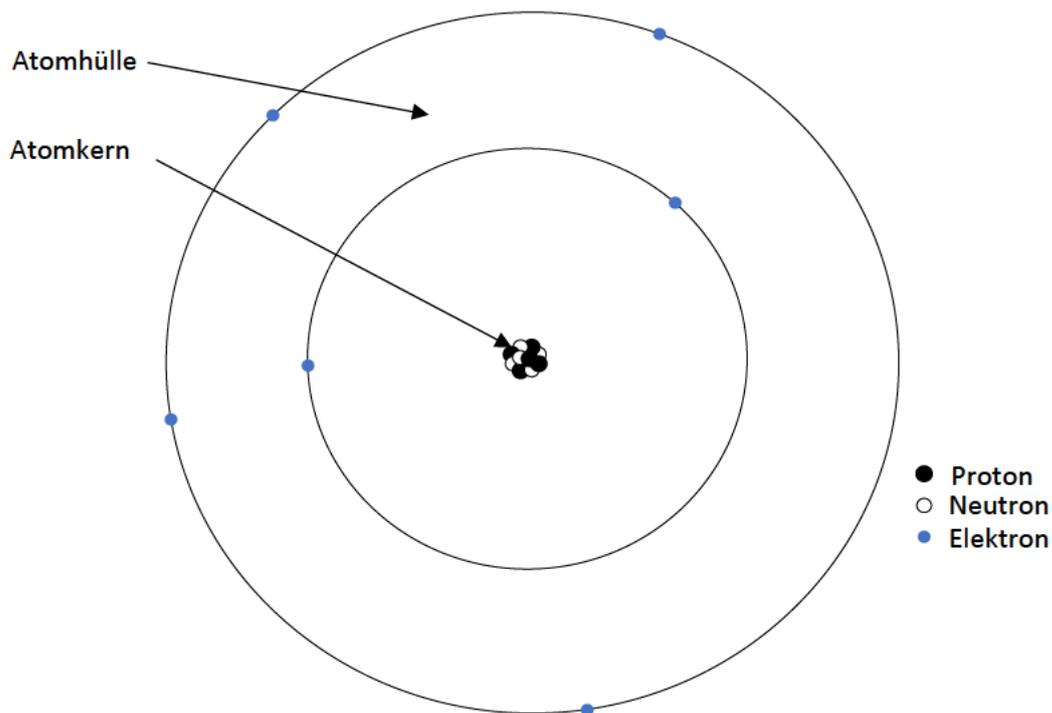


Abbildung 2-1 * Schematische Darstellung eines Atoms mit seinen Elementarteilchen nach Bohr

Die Masse an Materie lässt sich aus der vorhandenen Atommenge und deren Ruhemasse bestimmen. Die Dichte eines Stoffes ergibt sich dann aus der Atommenge in einem bestimmten Volumen. Je größer die Anzahl der Atome, desto größer die Dichte und umso mehr Strahlungsenergie wird absorbiert. Dieser Effekt ist wichtig für die Beurteilung des Strahlenschutzes in Hinblick auf Absorption- und Transmissionsenergie.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst auf die unterschiedlichen Arten der Strahlung eingegangen. [2]

2.3.2 Strahlungsarten

Spricht man von Strahlung im physikalischen Sinne, sind die materielle- und die Wellenstrahlung gemeint. Röntgenstrahlung ist ein kleiner spektraler Bereich der Wellenstrahlung.

Materielle Strahlungsteilchen sind Bestandteile von Atomen, die eine Ruhemasse besitzen. Sie durchsetzen dem Raum mit hoher Geschwindigkeit. Die bekanntesten materiellen Strahlungsteilchen sind Elektronen, Protonen und Neutronen. Weitere Bestandteile wie Alpha- und Betateilchen entstehen häufig bei Fusions- und Zerfallsprozessen von Materie. [8] Materiestrahlung ist in der Röntgentechnik weniger zu erwarten.

Wellenstrahlung hat eine ähnliche Wirkung wie die materielle Strahlung. Jedoch wird sie durch periodische Veränderungen von magnetischen und elektrischen Kraftfeldern verursacht. Die entstehenden Wellen breiten sich im Raum in Lichtgeschwindigkeit aus. Dabei besteht ein Zusammenhang zwischen Lichtgeschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Wellenfrequenz f .

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Der Wellenzug der Abb. 2-2 veranschaulicht die periodische Veränderung der Kraftfelder in einem Photon, dass mit Lichtgeschwindigkeit an einem Punkt vorbeiläuft. [8]

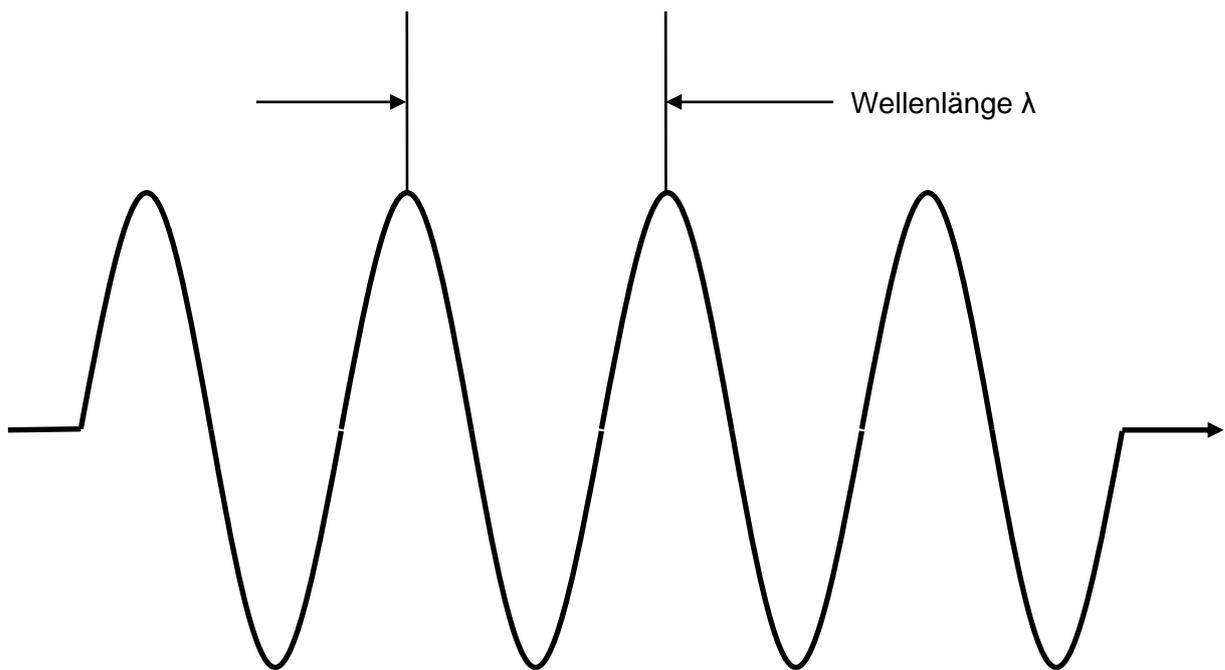


Abbildung 2-2 * Schematische Darstellung einer elektromagnetischen Welle

Umgangssprachlich werden elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von etwa $0,25 \cdot 10^{18}$ Hz bis $60 \cdot 10^{18}$ Hz und einer Länge unter $10 \cdot 10^{-9}$ m als Röntgenstrahlen bezeichnet. Diese kurzen Wellen mit hoher Frequenz haben zum einen Teilchen- und zum anderen Wellencharakteristik, werden als Energiepakete aufgefasst und als Photonen bezeichnet. Photonen haben keine Ruhemasse und transportieren nur Energie. Röntgenstrahlung

entsteht, wenn Elementarteilchen mit hoher kinetischer Energie gebremst werden. In einem Teilchenbeschleuniger, wie zum Beispiel PETRA III am DESY in Hamburg oder in kleineren Formen wie Röntgenröhren, werden Elektronen mit hoher kinetischer Energie aufgeladen und dann gebremst. Der Effekt sind kurze Lichtblitze (Röntgenstrahlung). Röntgengeneratoren können Photonen mit Energien von mehreren 100.000 eV erzeugen. Freigesetzte Photonen breiten sich geradlinig in Lichtgeschwindigkeit aus und werden bei ihrem Gang je nach Materie und Struktur unterschiedlich abgeschwächt oder abgelenkt. Da der Brechungsindex von Röntgenstrahlung nahe Eins liegt und sie weder durch elektrische oder magnetische Felder abgelenkt werden, ist eine Fokussierung nur schwer und in begrenztem Umfang möglich. Möglich ist hingegen die Flugbahn der Elementarteilchen und ihre Bremsbahn zu beeinflussen, um der entstehenden Strahlung eine ungefähre Richtung vorzugeben. Die Abbildung 2-3 zeigt schematisch das Funktionsprinzip einer Röntgenröhre. Die Glühkathode wird durch Glühspannung erhitzt und mit Energie angereichert. Da sich die Elektronen der Kathode auf einem hohen Energielevel bewegen, können sie einfach aus ihrer Umgebung gelöst werden. Durch das Kraftfeld der Anodenspannung werden Elektronen aus dem Umfeld der Kathode gerissen und in Richtung Anode beschleunigt. Treffen die Elektronen auf die Antikathode, geben sie durch die starke Abbremsung ein Teil ihrer Energie in Form von Röntgenstrahlung ab. [3]

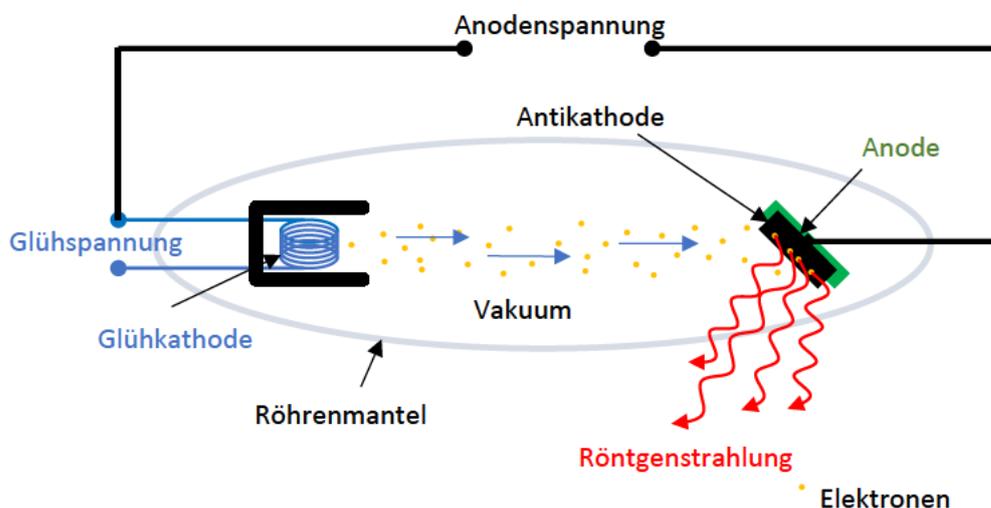


Abbildung 2-3 * Prinzipskizze der Funktionsweise einer Röntgenröhre

Im nächsten Abschnitt wird darauf eingegangen, wie sich die Strahlung in Materie verhält.

2.3.3 Ausbreitung von Strahlung in Materie

Um das Wirkungsprinzip der Strahlungsschirmung besser verstehen zu können, muss ein Blick auf bestimmte Effekte geworfen werden, die entstehen, wenn Röntgenstrahlung auf Materie trifft. Dabei sind bestimmte Effekte von der Intensität der Strahlung abhängig.

Wichtig beim Strahlenschutz ist die Tatsache, dass sich die Richtung der Röntgenstrahlen nicht gezielt umlenken lässt. Ihr Richtungswechsel geschieht unwillkürlich durch Beugung. Photonen (Röntgenstrahlung) sind Energiepakete hoher Intensität. Ihre Energie können sie, wenn sie auf Materie treffen, an diese wieder abgeben. In welchem Maße dieses geschieht, hängt von der Materie selbst ab. Materie mit hoher Kernladungszahl absorbiert mehr Energie als solche mit niedriger. Gibt ein Photon seine Energie an ein Atom ab, hebt es dieses auf ein neues Energieniveau oder schlägt wiederum Elementarteilchen heraus. Dabei kommt es zu verschiedenen Effekten, wie zum Beispiel Photo-, Compton-, Paarbildungs- oder Kernphotoeffekte. Trifft ein Photon auf ein Elektron, ist der Energieübertrag entweder vollständig (Photoeffekt), oder teilweise (Compton-Effekt). [3]

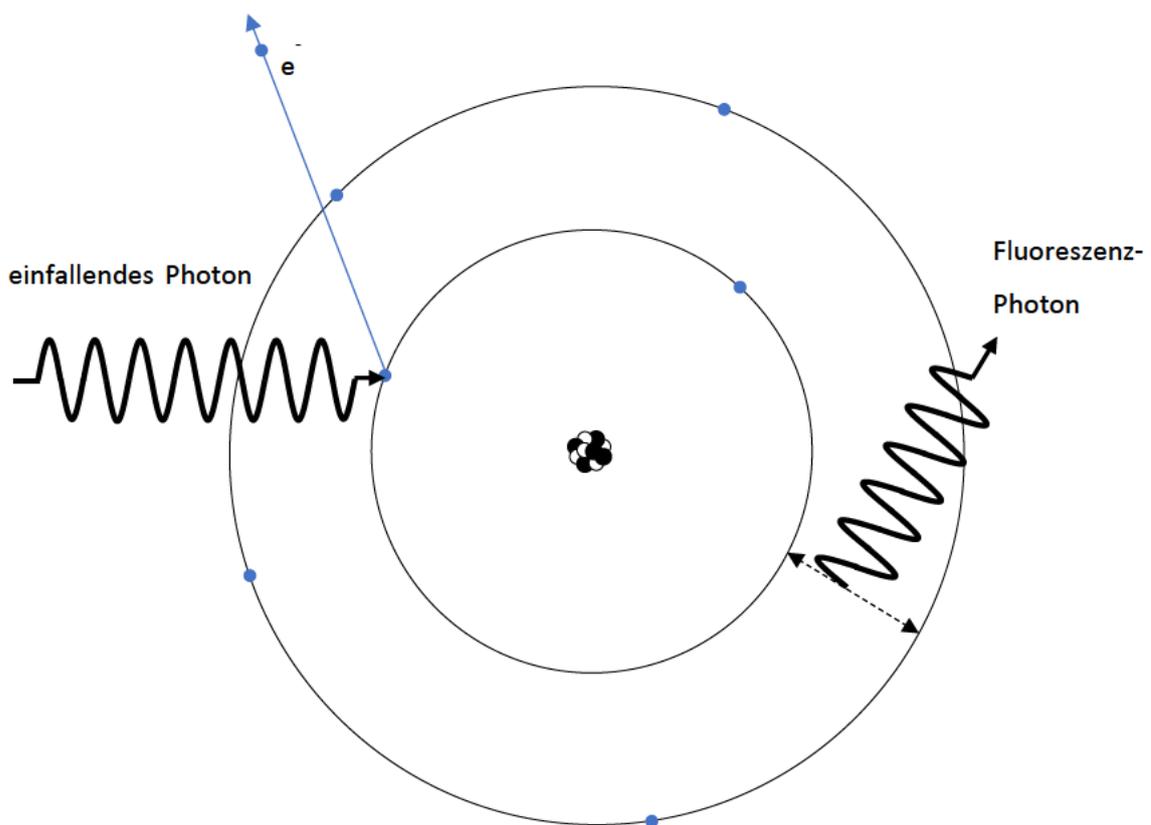


Abbildung 2-4 * einfaches Modell Photo-Effekt

Beim Compton-Effekt ändert das Photon seine Richtung und verliert ein Teil seiner Anfangsenergie.

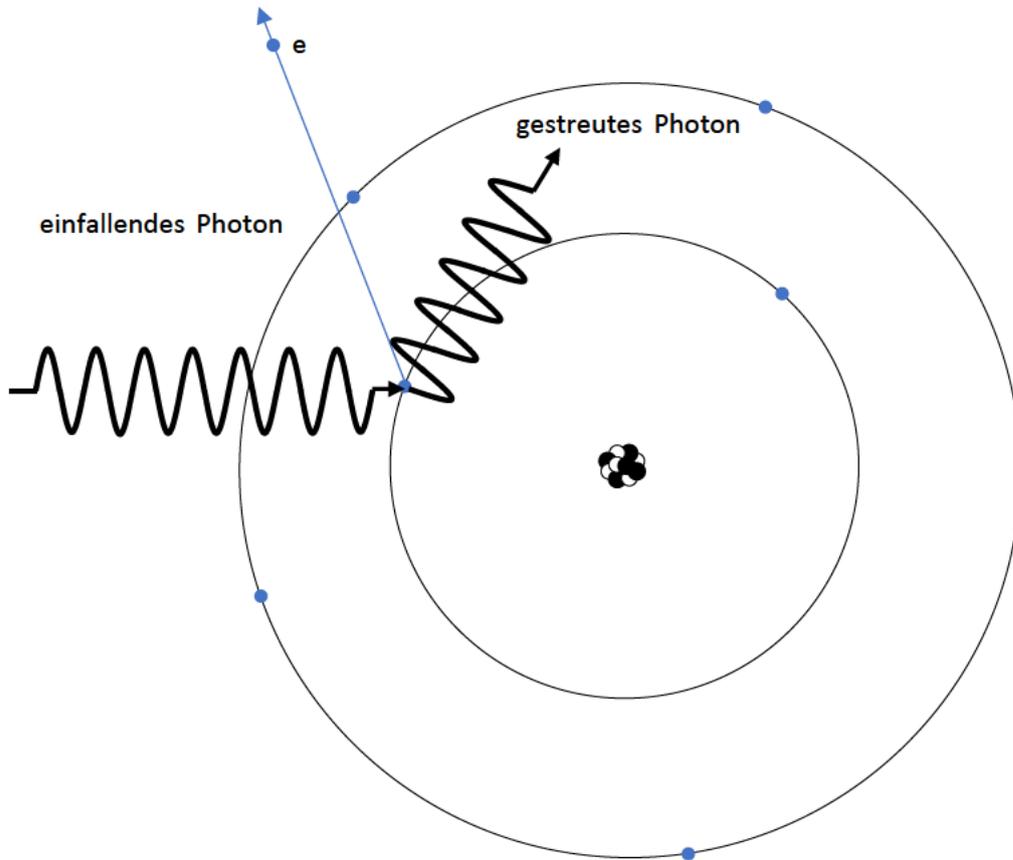


Abbildung 2-5 * einfaches Modell Compton-Effekt

Paarbildungs- und Kernphotoeffekte werden vernachlässigt, da diese erst ab Energien oberhalb von einem MeV auftreten. Photonen breiten sich geradlinig aus. Durch die beschriebenen Effekte können die Photonen ihre Richtung ändern und somit eine neue Bahn annehmen. Diese Bahnen werden als Strahlungsfelder bezeichnet. Das Bild 2-6 zeigt eine Skizze, bei der die Strahlungsfelder schematisch dargestellt sind. Der Richtungswechsel der Strahlung ist in alle Richtungen anzunehmen.

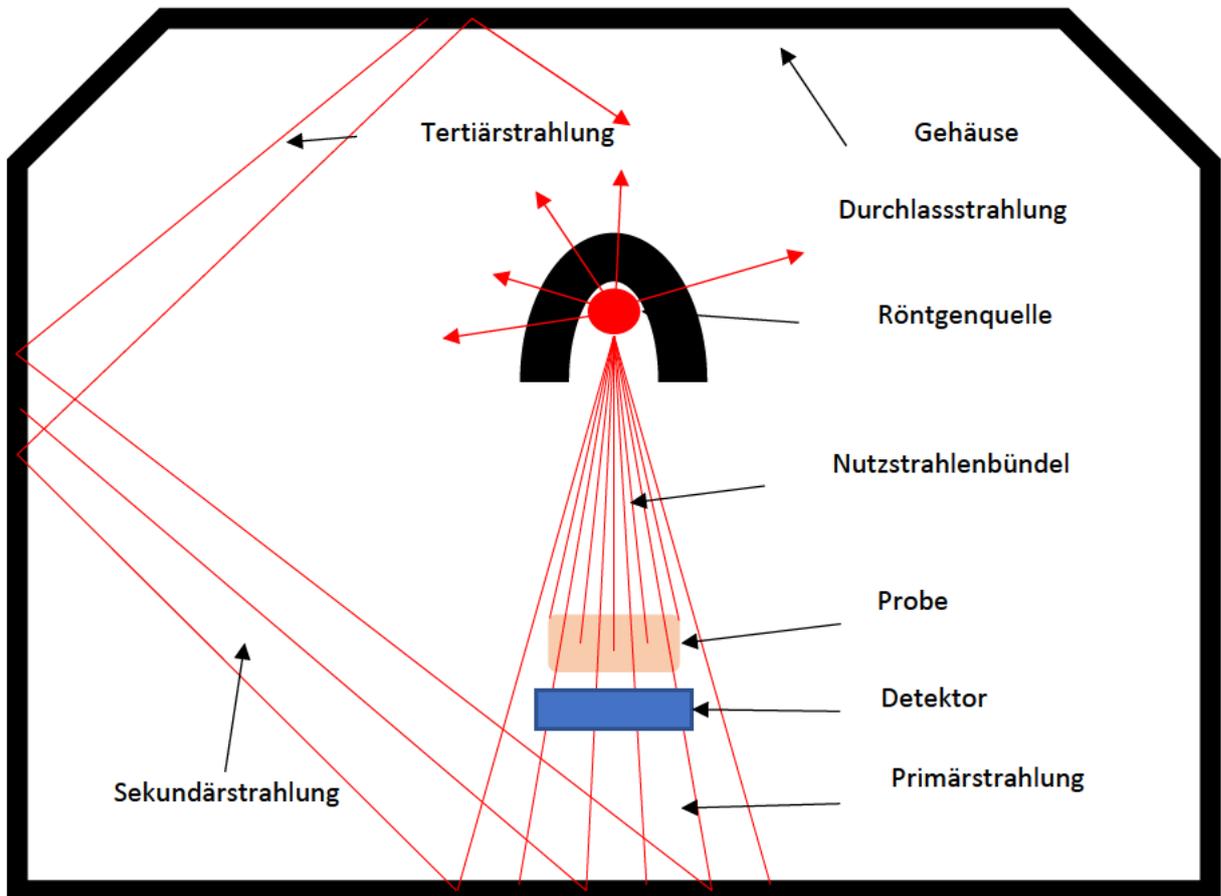


Abbildung 2-6 * Prinzipskizze der Verteilung von Strahlungsfeldern

Die Photonen verlieren entlang ihrer Bahn kontinuierlich an Energie. Die Umlenkung der Photonen ist durch Beugung unwillkürlich. [3]

2.4 Computertomographie

2.4.1 Funktionsprinzip

Computertomographie (kurz: CT) ist ein Verfahren, bei dem Strukturen innerhalb von Objekten sichtbar gemacht werden können. Dazu nutzt man Eigenschaften von Elektromagnetischen Wellen, wie zum Beispiel Röntgenstrahlung, und erfasst deren Veränderung nach einem Gang. Jedes Element erzeugt abhängig von seiner atomaren Zusammensetzung einzigartige Signaturen. Werden diese erkannt, können so Veränderungen innerhalb einer Struktur lokalisiert und analysiert werden.

Die Abbildung 2-7 zeigt sehr vereinfacht das Funktionsprinzip eines Röntgentomographen. Dabei ist die Strahlungsquelle (Röntgenröhre) rechts, der Bildaufnehmer (Röntgenkamera) links und der Röntgenstrahlgang (roter Kegel) dargestellt.

Die Röntgenröhre kann mit elektrischer Energie aus dem Stromnetz Röntgenstrahlung erzeugen und dient als Strahlungsquelle innerhalb des Gerätes. Der Austritt der Strahlung aus der Quelle heraus erfolgt gezielt durch ein Berylliumfenster. Die Strahlen durchdringen die Probe und werden unterschiedlich absorbiert. Die transmittierte Strahlung trifft auf den Bildaufnehmer und wird in elektrische Impulse umgewandelt. Diese können dann elektronisch ausgewertet werden.

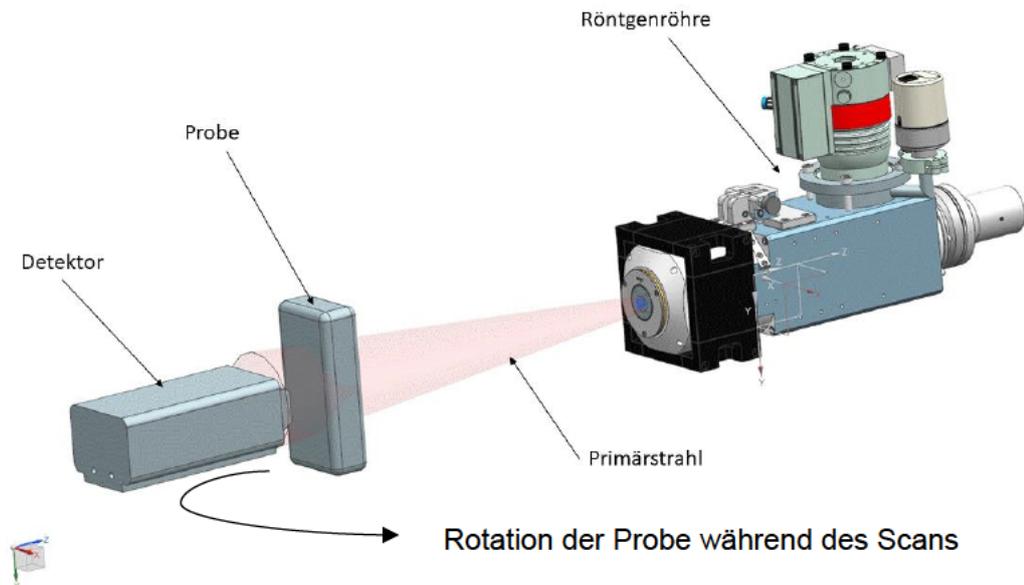


Abbildung 2-7 * vereinfachtes Funktionsprinzip eines Röntgen-CT

2.4.2 Bildergeneration am Tomographen

Es ist davon auszugehen, dass das Probeobjekt inhomogen ist. Verschiedene Materialien, Bruchkanten oder Dichteveränderungen innerhalb der Probe absorbieren die auftreffenden Photonen unterschiedlich intensiv oder lenken sie ab. Die restlichen Photonen, die das Objekt durchdringen, werden durch die Röntgenkamera erfasst. Diese generiert aus den auftreffenden Photonen ein Bild. Wie in der folgenden Grafik Abb. 2-8 zu sehen, wird das Probeobjekt in verschiedenen Positionen belichtet. Werden von einem Objekt Aufnahmen aus drei verschiedenen Positionen aufgenommen, kann bei bekannter Geometrie des Aufbaus ein digitales dreidimensionales Bild der inneren Strukturen der Probe erzeugt werden.

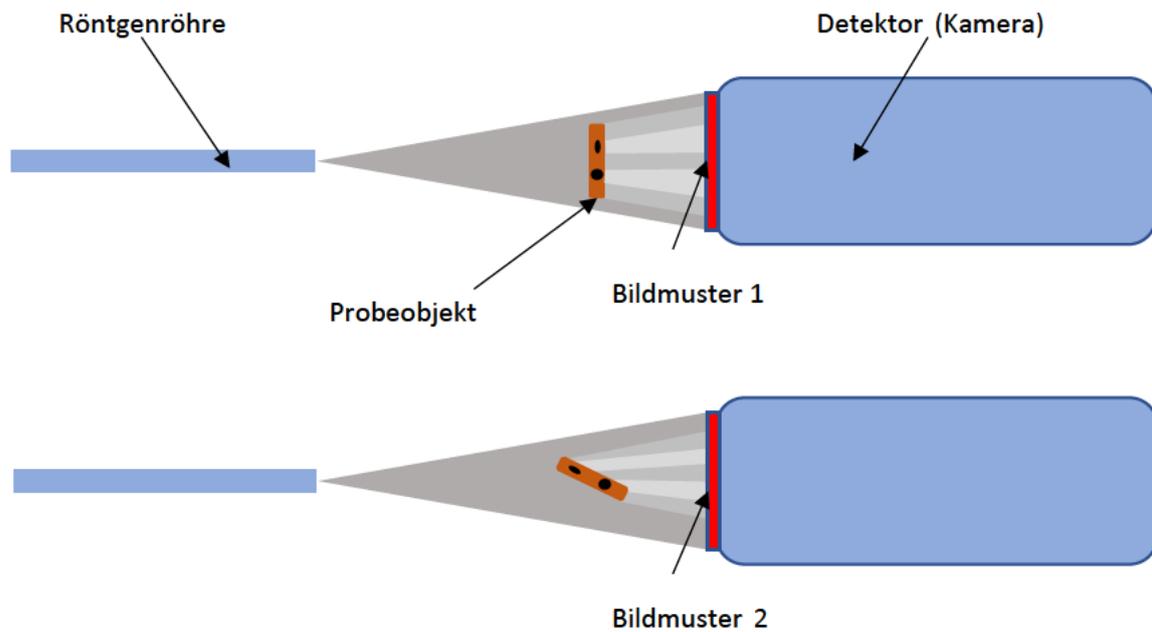


Abbildung 2-8 * Erzeugung verschiedener Bildmuster auf der Kamera

Abbildung 2-9 zeigt die digitale Rekonstruktion des Scans einer Tontafel mit Keilschrift. Diese ist entstanden in Zusammenarbeit zwischen dem DESY und der Forschungseinrichtung des Helmholtz-Instituts in Hamburg.



Abbildung 2-9 Steintafel mit Keilschrift [Tomography of Cuneiform Tablets | Christian G. Schroer, February 12, 2019]

2.5 Strahlenschutz

Röntgenstrahlung gehört zu den Ionisierenden Strahlungen, da sie ein Energieübertragungsvermögen besitzt, und kann unter Umständen negativ auf Organismen wirken. Aus diesem Grund sollte die Dosis an Strahlung auf Organismen auf ein Minimum reduziert werden. Dies hat einen sehr großen Einfluss auf das Design des zu entwickelnden Gerätes. Zur Kontrolle der Strahlungsemissionen gibt das Bundesamt für Verbraucherschutz im Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung die maximale Dosis vor, welche in die Umwelt gelangen darf. Die Hauptproblematik liegt in dem Mindestmaß an benötigter Strahlung nach innen, um die Probe zu durchdringen, und der maximalen Strahlung nach außen, um eine Gefährdung der Umgebung auszuschließen. In dem angedachten Konzept sollte es zu keiner messbaren Erhöhung an ionisierender Strahlung außerhalb des Gerätes kommen. Nachfolgend werden relevante gesetzliche Bestimmungen und deren Auswirkung auf das Projekt genannt. [6][7]

2.5.1 Gesetze und Vorschriften

Die für das Projekt entscheidenden Paragraphen werden im Folgenden genannt und deren Auswirkungen auf das Projekt geprüft.

§10 *Genehmigungsbedürftige Errichtung von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlung [6]*

- Das Gerät ist vor der Inbetriebnahme genehmigungspflichtig.

§11 *Voraussetzung für die Erteilung der Genehmigung; Aussetzung des Genehmigungsverfahrens [6]*

- Es muss ein Strahlenschutzbeauftragter bei Errichtung bestellt werden. Wenn das Gerät für eine Verbringung zerlegt wird, hat dieser bei der erneuten Montage vor Ort zu sein.

§13 *Allgemeine Voraussetzungen für die Erteilung der Genehmigung; Aussetzung des Genehmigungsverfahrens [6]*

- Es muss gewährleistet sein, dass die bei der Tätigkeit sonst tätigen Personen das notwendige Wissen und die notwendigen Fähigkeiten im Hinblick auf die mögliche Strahlungsgefährdung und die anzuwendenden Schutzmaßnahmen besitzen.
- Die Exposition darf den zugelassenen Grenzwert in allgemein Zugänglichen Bereichen nicht überschreiten.

§25 *Genehmigungsbedürftige Beschäftigung in fremden Anlagen oder Einrichtungen [6]*

- Die Genehmigung ist auf 5 Jahre befristet.

§79 *Verordnungsermächtigung für die berufliche Exposition [6]*

- Das Führen einer Gesundheitsakte für den Benutzer ist erforderlich.

§166 *Festlegung zur Ermittlung der beruflichen Exposition [6]*

- Es besteht eine Nachweispflicht über Exposition.

2.5.2 Abschirmung nach DIN EN 54113 [1]

Die erforderlichen Rahmen und Anweisungen zur Umsetzung des Betriebes von Röntgeneinrichtungen sind dem Regelwerk zu entnehmen. Dabei beziehen sich die Berechnungen auf ein ortsfestes Vollschutzgerät. Ein Vollschutzgeräte wird wie folgt beschrieben: „... Bei Vollschutzgeräten nach Anlage 2 RöV muss das Schutzgehäuse den Röntgenstrahler und das Prüfobjekt vollständig umschließen. Die Ortsdosisleistung darf in 0,1 m Abstand von der berührbaren Oberfläche des Schutzgehäuses 3 µSv/h nicht überschreiten. Zwei voneinander unabhängige Vorrichtungen müssen sicherstellen, dass der Röntgenstrahler nur bei geschlossenem Schutzgehäuse betrieben werden kann. Beim kontinuierlichen Betrieb des Röntgenstrahlers kann das Schutzgehäuse nur bei geschlossenem Strahlenaustrittsfenster des Röntgenstrahlers (Shutterbetrieb) geöffnet werden. Hierbei darf im Inneren des Schutzgehäuses die Ortsdosisleistung von 3 µSv/h nicht überschritten werden. ...“ [DIN EN 54113-1 Abschnitt 8.3.3]

Die DIN EN 54113-3 Abschnitt 4 beschreibt die Berechnung der erforderlichen Schutzschichten bei ortsfestem Betrieb. Die notwendige Absorberdicke d_x kann nach der Berechnung einer spezifischen Dosisleistung aus dem Diagramm 1 für Nutzstrahlung, abgelesen werden. Es wird für spätere Vergleiche Blei als Referenzmaterial verwendet. Dieser Werkstoff ist als Schirmungsmaterial in den Laborbereichen des DESY gängig. Im folgenden Abschnitt kann die Berechnung der Schutzschichtdicke aus Blei nachvollzogen werden.

2.5.3 Berechnung der erforderlichen Schutzschichten aus Blei gegen Nutzstrahlung

Die Dicke von Schutzschichten gegen Nutzstrahlung ergibt sich bei Kenntnis der spezifischen Dosisleistung $\dot{H}_{spez,N}$ aus dem Diagramm. Die spezifische Dosisleistung $\dot{H}_{spez,N}$ für Nutzstrahlung ist nach Gleichung (2) zu berechnen:

$$\dot{H}_{spez,N} = \frac{H a_N^2}{t_E I_N T} \quad (2)$$

Dabei ist

H der Grenzwert der effektiven Dosis je Jahr, in μSv ;

T der Aufenthaltsfaktor;

$\dot{H}_{\text{spez},N}$ die spezifische Dosisleistung für Nutzstrahlung, in $\frac{\mu\text{Sv m}^2}{\text{h mA}}$;

$I_N = I$ die Nennstromstärke, in mA;

a_N der Abstand vom Brennfleck bis zum zu schützenden Aufenthaltsplatz, in m;

t_E die maximale jährliche Einschaltzeit der Röntgenröhre, in h

Die Werte sind nach den Vorgaben von DIN EN 54113 ermittelt worden:

H 1000 μSv ;

T 1;

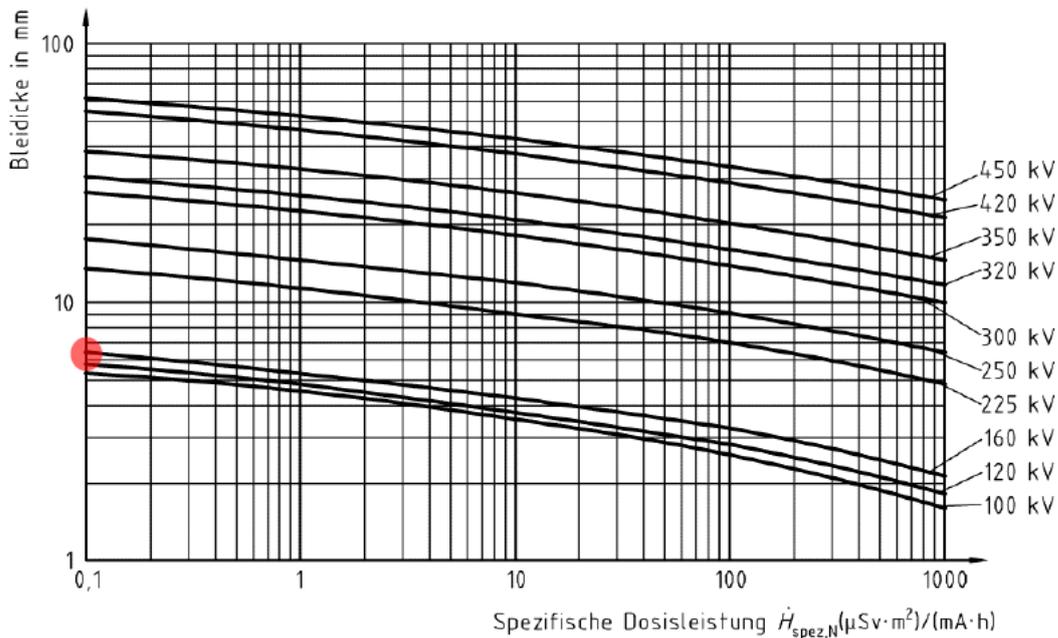
$I_N = I$ 20 mA;

a_N 0,5 m;

t_E 100h;

$$\dot{H}_{\text{spez},N} = \frac{1000 \mu\text{Sv} \cdot 0,5 \text{ m}^2}{100 \text{ h} \cdot 20 \text{ mA}} \quad (3)$$

$$\dot{H}_{\text{spez},N} = 0,1 \frac{\mu\text{Sv m}^2}{\text{h mA}} \quad (4)$$



$$\dot{H} \left(0,1 \frac{\mu\text{Sv m}^2}{\text{h mA}} \right) \approx d_x(6,5 \text{ mm}) \text{ bei } 160 \text{ kV}$$

Aus dem Diagramm abgelesen ist eine Abschirmung aus Blei von mindestens 7 mm Bleistärke anzusetzen. [1]

3 Von der Idee zum Design

In diesem Kapitel wird der Konstruktionsprozess von der Aufgabenstellung bis hin zur Definition der Parameter für eine freie Konstruktion beschrieben. Die Ausarbeitung des Designs erfolgt in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 "Entwicklung technischer Produkte und Systeme" und unterteilt sich in Zeitphasen des Konstruktionsprozesses. Die für dieses Projekt relevanten Zeitphasen werden in Recherchephase, Profilphase, Ideenphase und Konzeptphase chronologisch gegliedert. Parallel dazu wurden Arbeitspakete definiert und den Zeitphasen zugeordnet. Aufzählung der Arbeitspakete:

1. Klären und Präzisieren der Aufgabe
2. Planung des Konstruktionsprozesses
3. Suchen nach Lösungen
4. Bewerten und Auswählen der Lösungen
5. Entwickeln eines Sicherheitskonzeptes
6. Freie Konstruktion und CAD Simulation
7. Ausarbeitung Montage/ Demontageplan
8. Bewertung und Schlussfolgerungen
9. Dokumentation
10. Präsentation

3.1 Klären und Präzisieren der Aufgabe

Mit dem Auftraggeber, Christian G. Schroer (Leitender Wissenschaftler von PETRA III), wurden alle Forderungen und Wünsche besprochen und erläutert. Durch die Recherche konnten die gesetzlichen und technischen Grenzen grob abgesteckt werden.

In einer Anforderungsliste (Tabelle 3-1) sind diese Forderungen und Wünsche schriftlich festgehalten und so formuliert, dass Fehlinterpretationen möglichst ausgeschlossen sind. Geplant ist eine Röntgenapparatur, mit der archäologische Artefakte, insbesondere Tontafeln mit Keilschriften, zerstörungsfrei untersucht werden können. Diese soll in der Lage sein, Details und Schriftfragmente innerhalb der Probe sichtbar zu machen und zu rekonstruieren. Da diese Röntgenapparatur unter kontrollierten Bedingungen in Museen und archäologischen Instituten zum Einsatz kommen soll, muss Sie mobil und modular aufgebaut sein. Die Untersuchungen sollen zeit- und sachgerecht durchführbar sein.

Tabelle 3-1 Anforderungsliste

F=Forderung W=Wunsch		Röntgenapparatur	
Lfd.	F/W	Anforderung	Beschreibung
Energie			
1	F	Röntgenenergie	Die minimale Photonenenergie wurde durch Versuche im Vorfeld ermittelt und beträgt min. 160 keV.
2	F	Energieversorgung	Die elektrische Energieversorgung erfolgt aus dem lokalen Stromnetz 230 V [AC] – EU Standard.
3	W	Temperatur	Die Wärmeemission sollte gering sein.
Geometrie			
4	W	Abmessungen [b x l]	Die Ausmaße der Apparatur/ Segmente sollten EU-Standard für Türöffnungen nicht überschreiten 860 mm x 1950 mm [DIN EN 18100].
Gewicht			
5	W	Gesamtgewicht	Das Gesamtgewicht von 600 kg sollte nicht überschritten werden.
6	W	Paketgewicht	Die Einzelpakete nach Zerlegung für die Verbringung sollten 50 kg nicht überschreiten.
Ergonomie			
7	F	Probenraum	Der Probenraum muss Objekte mit den Abmaßen [l x b x h] 200 mm x 100 mm x 50 mm bei allen notwendigen Bewegungen Platz bieten.
8	W	Arbeitshöhe	Die Probe sollte sich in einer stehenden Arbeitsposition des Bedieners leicht wechseln lassen.
Kinematik			
9	F	Probenbewegung	Die Probe muss sich in drei Achsen linear zur Positionierung bewegen und einmal für den Scan rotieren lassen.
Wartung			
10	W	Hardware	Der Zugang zur Hardware sollte möglichst einfach sein.
11	W	Hardwaretausch	Die Hardware ist durch Universalhalterungen austauschbar.

12	F	Wartung/ Montage	Es ist ein Montageplan bereitzustellen.
Transport			
13	W	Verbringung	Die Bewegung der Gesamtkonstruktion ist mit Standardhubwagen möglich.
Sicherheitskonzept			
14	F	Betrieb	Die Apparatur soll sich als ortsfestes Vollschutzgerät unter kontrollierten Bedingungen betreiben lassen.

Die Aufteilung des Designs erfolgt in Kauf- und Konstruktionsteile. Kaufteile, in dieser Studie als Hardware bezeichnet, sind die Röntgenröhre als Strahlungsquelle, der Probesturm mit seinen Schrittmotoren und die Röntgenkamera. Die Konstruktionsteile sind das Gehäuse, die Schirmung, Maschinenelemente und die Befestigung der Hardware. Die benötigten Parameter der Hardware sind dem Anhang zu entnehmen. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Einschätzung einer Gehäusekonstruktion mit seinen Maschinenelementen und Aufhängungen. Die Analysebereiche sind Werkstoffe, Mantelgeometrie und Segmentierungsgrad, strahlungssicheres Fügen, Rahmen- und Hardwarebefestigungen, strahlungssichere Stoßkanten, Probenumgebung und das Sicherheitskonzept. Die morphologische Auswahl erfolgt nach einem für diese Arbeit entwickelten Bewertungsschema. Die Abbildung 3-1 zeigt die grundsätzliche Anordnung der Hardware zur Einhaltung des Funktionsprinzips. Durch diese Anordnung ergibt sich ein zu ummantelnder Bauraum, der in seinen Dimensionen nicht verändert werden kann. Der graue Quader als Schirmung (Abbildung 3-1) dient in späteren Vergleichen als Referenzwert.

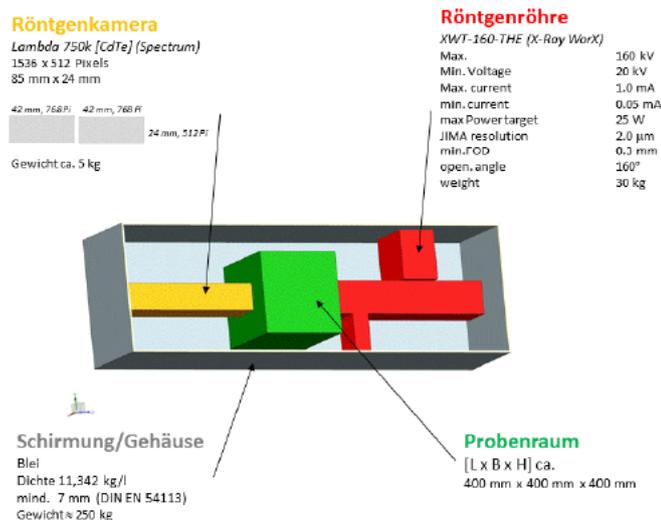


Abbildung 3-1 * Anordnung der Module zur Einhaltung des Funktionsprinzips

3.2 Planung des Konstruktionsprozesses

Zur besseren Übersicht sind die Arbeitspakete in der unteren Grafik farblich codiert. Der zeitlich geplante Ablauf kann dem Gantt-Chart Diagramm entnommen werden. [9]

Tabelle 3-2 Gantt-Chart Diagramm

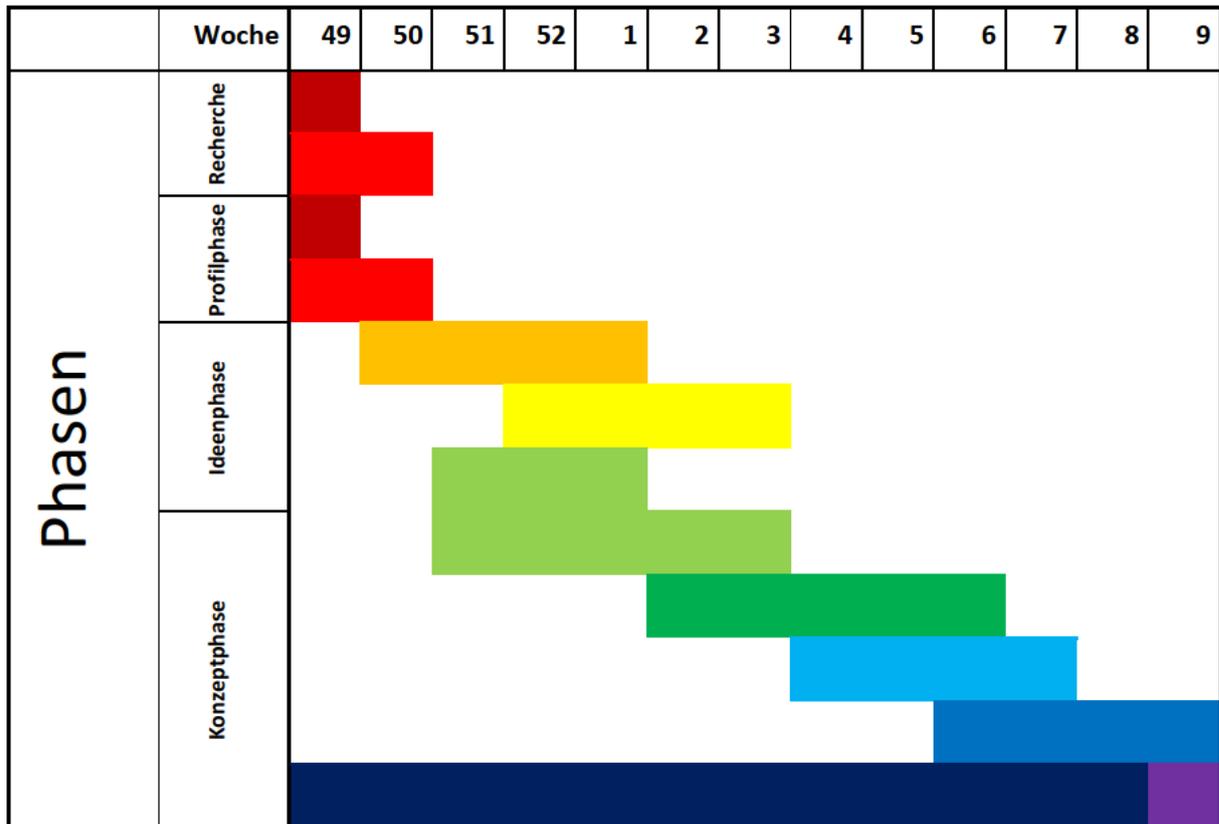


Tabelle 3-3 farbliche Codierung der Arbeitspakete

Arbeitspakete	
Klären und Präzisieren der Aufgabe	1
Planung des Konstruktionsprozesses	2
Suchen nach Lösungen	3
Bewerten und Auswählen der Lösungen	4
Entwickeln eines Sicherheitskonzeptes	5
Freie Konstruktion und CAD Simulation	6
Ausarbeitung Montage/ Demontageplan	7
Bewertung und Schlussfolgerungen	8
Dokumentation	9
Präsentation	10

3.3 Suche nach Lösungen

Bei der Suche nach Lösungen werden die in Abschnitt 3-1 definierten Bereiche, in Aufzählung:

- Werkstoffe
- Mantelgeometrie und Segmentierungsgrad
- strahlungssicheres Fügen
- Rahmen und Hardwarebefestigung
- strahlungssichere Stoßkanten
- Probenumgebung
- Sicherheitskonzept

zunächst unabhängig voneinander betrachtet und alle Ideen zusammengetragen.

3.3.1 Werkstoffe

Bei der Abschirmung ist die Absorption ionisierender Strahlung gemeint, um eine Gefährdung der Anlagenumgebung auszuschließen. Neben verschiedenen Mantelflächen und deren Dicke um die Module, sind eine Vielzahl an Schirmungsmaterialien einsetzbar. Die Absorption der Strahlung ist von der Kernladungszahl und der Dichte des Schirmungsmaterials abhängig. So lässt sich mit dem Einsatz eines anderen Mantelmaterials die Manteldicke verändern, das Gewicht wird nur im geringen Maße beeinflusst. Das für die Schirmung am häufigsten verwendete Material ist Blei. Dieser Werkstoff ist kostengünstig, hat einen niederen Schmelzpunkt und kann mit einfachen Fertigungsmethoden bearbeitet werden. Jedoch stehen dem Einsatz eine geringe Festigkeit und toxische Eigenschaften entgegen. So kann Blei als Konstruktionsmaterial nur in Kombination härterer Werkstoffe verwendet werden. Während der Ideenphase wurde auch der Einsatz von Hybriden Werkstoffen in Erwägung gezogen. Mit Hybriden Werkstoffen sind in diesem Fall Kunststoffe gemeint, welche metallische Partikel in ihre Matrix eingebettet haben, um so eine Absorption der Strahlung zu erreichen. Vorteil dieser Werkstoffe liegt im 3D Druck und so können auch komplexe Mantelstrukturen gefertigt und eine individuelle Formanpassung an die Umgebung erreicht werden. Da zum Zeitpunkt dieser Studie nur wenige Informationen und Parameter zu dieser Werkstofftechnik vorliegen, wird im Weiteren von diesen Werkstoffen abgesehen. Als mögliche Materialien für die Absorption der Strahlung werden Aluminium, Blei, Wolfram, Niob, Tantal, Gold, Silber und Stahl verglichen.

Tabelle 3-4 mögliche Schirmungsmaterialien im Vergleich

Vergleich möglicher Schirmungsmaterialien								
	Blei	Aluminium	Niob	Silber	Tantal	Wolfram	Gold	Stahl
Symbol	<i>Pb</i>	<i>Al</i>	<i>Nb</i>	<i>Ag</i>	<i>Ta</i>	<i>W</i>	<i>Au</i>	<i>Legierung</i>
Ordnungszahl	82	13	41	47	73	74	79	<i>Legierung</i>
Dichte g/cm ³	11,34	2,67	8,57	10,49	16,65	19,25	19,3	ca. 8,76
Schmelzpunkt in °C	327,4	660	4744	2210	3017	3422	1064,2	ca. 1600
geschätzte Materialdicke in mm Absorption 99,9998%*	7	>100	45	27	16	5,1	4,5	-
Rohmaterial in US\$/kg**	2,22	2,10	46,36	505,09	241,72	285,24	39804	0,56
Vergleich von Gewicht und Rohmaterialpreis								
geschätztes Gewicht in kg	206	692	1000	735	691	255	226	-
Rohmaterial in US\$	457	1455	46399	371261	167116	72675	8971661	-
* Quelle: Referenzbezug: DIN EN 54113 und X-ray-Optics-Calculator [http://purple.ipmt-hpm.ac.ru/xcalc/xcalc_mysql/mattrans.php]								
**Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Stand Juli 2018								

Ein entscheidender Auswahlparameter neben den physikalischen Eigenschaften ist der Rohstoffpreis. Grundlage der Angabe ist die Deutsche Rohstoff Agentur der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Um die Materialstärke für die Absorption abzuschätzen, sind die Referenzwerte für eine Abschirmung von 160 keV mit Blei nach DIN EN 54113 zu Grunde gelegt. Zu unterscheiden ist, ob das gewählte Material der Strahlungsschirmung dient oder rein der Konstruktion von Stütz- oder Maschinenelemente. Bei Wertung der Tabelle 3-4 „mögliche Schirmungsmaterialien im Vergleich“, sind die Werkstoffe Blei, Niob, Tantal und Wolfram am ehesten als Schirmungsmaterial geeignet. Blei ist das kostengünstigste Schirmungsmaterial. Jedoch ist es nicht formstabil und toxisch. Blei kann daher nur als Schirmungs- und nicht als Stützmaterial eingesetzt werden. Es ist nur in Kombination mit

anderen Werkstoffen verwendbar, zum Beispiel als Blei-Aluminium- oder Blei-Stahl-Sandwich. Niob hat die geringsten Schirmungseigenschaften, ist jedoch formstabil und gut bearbeitbar. Niob kann daher gut als stabilisierender Werkstoff für Rahmen oder Maschinenelemente eingesetzt werden. Wolfram scheint bei der Betrachtung seiner physikalischen Eigenschaften am besten geeignet. Durch seinen momentan sehr hohen Rohmaterialpreis sollte sich der Einsatz aber auf kleinere Konstruktionsteile beschränken. Der Einsatz von Aluminium schließt sich als Schirmungsmaterial aus. Die Absorption von Aluminium ist zu gering. Zur Konstruktion für Rahmen-, Stütz- oder Maschinenelementen ist dieser Werkstoff hingegen hervorragend geeignet. Die Einschätzung von Stahl als Schirmungselement ist an dieser Stelle nicht möglich. Da es sich bei Stahl um einen legierten Werkstoff handelt, können Schirmungsparameter erst mit der genauen Zusammensetzung der gewählten oder bereitgestellten Legierungskomponenten ermittelt werden.

3.3.2 Mantelgeometrie und Segmentierungsgrad

Geometrisch und konstruktiv betrachtet ist die Segmentierung eine Grenzwertentscheidung. Es ist nicht sinnvoll, bis in die kleinste zu umschließende Geometrie zu segmentieren. Auch erhöht sich ab einem Extrempunkt die Oberfläche. Im weiteren Verlauf dieses Anschnittes wird auf mögliche Formen der Schirmung und deren Zerlegung eingegangen. Die simpelste Geometrie ist der Quader oder Würfel. Eine geringe Anzahl an Flächen und rechten Winkeln lassen aus technischer Sicht diese Form sehr einfach konstruieren und montieren. Es besteht zudem die Möglichkeit die einzelnen Flächen weiter zu partitionieren.

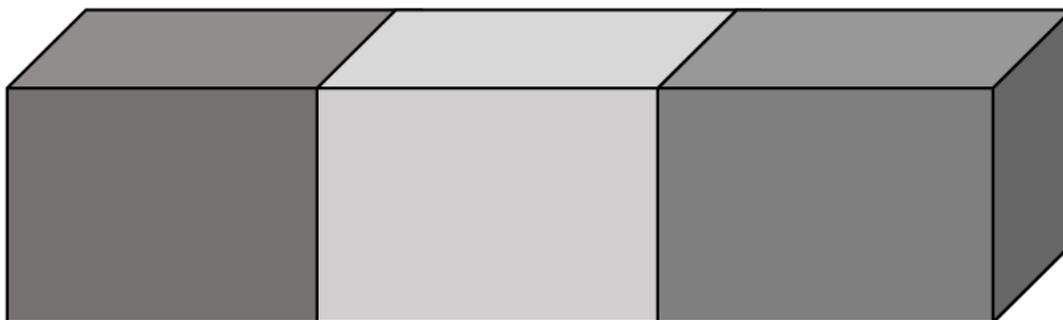
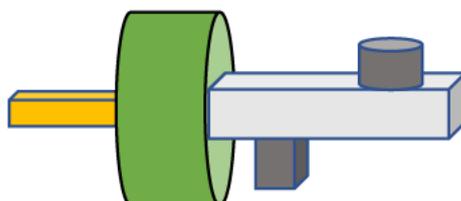


Abbildung 3-2 * Segmentierter Quader

Um alle Module zu umschließen, sind in dem Beispiel des Kastenaufbaus ungefähr $2,59 \text{ m}^2$ Oberfläche notwendig. Beim Einsatz von Blei wäre die Konstruktion ohne Rahmen geschätzt 210 kg schwer. Um die Schirmungsfläche zu minimieren ist es eventuell sinnvoller, Grundgeometrien zu kombinieren und Bauteile enger zu umschließen. Bei dieser Aufbauidee

werden die einzelnen Hardwaremodule minimal ummantelt zusammengesetzt. Die Mantelfläche kann im optimalen Fall halbiert werden.



Symbol



Abbildung 3-3 * Schema eines Aufbaus bei einer stark segmentierten Schirmungsfläche

Dabei entsteht jedoch eine erhebliche Anzahl zusätzlicher Segmente, die darüber hinaus noch Krümmungen aufweisen können. Es wären zusätzliche Rahmen- und Maschinenelemente zur Positionierung und Verbindung der Segmente notwendig, was das gesamte Gewicht der Anlage wieder erhöht.

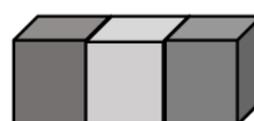
Eine Auswahl an einfachen Geometrien, welche zu einem späteren Zeitpunkt in den Auswahlprozess aufgenommen werden, wird im Folgenden gezeigt. Die Grundgeometrie ist für die weitergehende Konstruktion des Rahmens mit seinen Maschinenelementen entscheidend.



Symbol



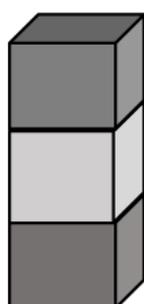
Abbildung 3-4 * Säule



Symbol



Abbildung 3-5 * Kasten liegend



Symbol



Abbildung 3-6 * Kasten stehend



Symbol

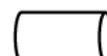


Abbildung 3-7 * Rohr liegend

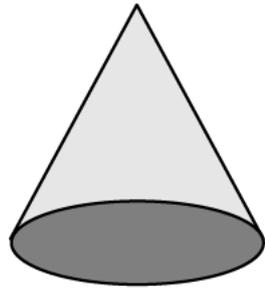


Abbildung 3-8 * Kegel

Symbol

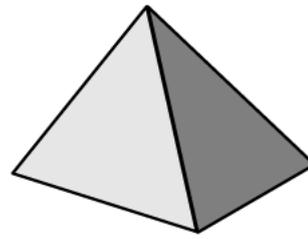


Abbildung 3-9 * Pyramide

Symbol



3.3.3 Strahlungssicheres Fügen der Bauteile

In diesem Abschnitt werden Verbindungsmöglichkeiten von Segmenten aufgeführt. Dabei handelt es sich um eine kleine Auswahl an Möglichkeiten, die zielführend erscheinen. Im Einzelnen werden die Techniken schematisch dargestellt und kurz erläutert

Die Steckverbindung ohne zusätzliche Elemente stellt eine sehr einfache und stabile Form der Verbindung dar. Diese Art ist für gerade Segmente geeignet. Bei Rundsegmenten kann diese Verbindung nur mit Einschränkungen eingesetzt werden, da Radiusveränderungen zum Klemmen führen. Auch ist dem Einsatz von reinem Blei abzuraten, da dieses Material nicht formstabil ist und es leicht zu Beschädigungen und Abnutzung an der Geometrie kommen kann.

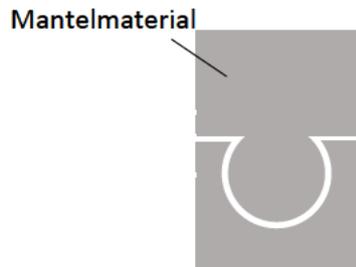


Abbildung 3-10 * schematische Schnittdarstellung einer Steckverbindung

Mit dem Klemmelement könne einzelne Teile formschlüssig miteinander verbunden werden. Diese Art ist sehr gut für Schnellverbindungen geeignet.

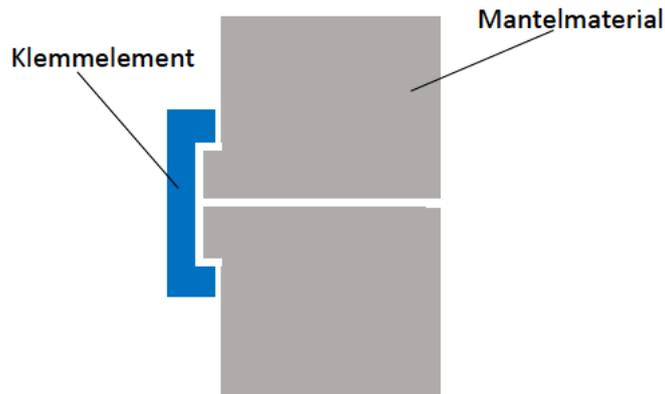


Abbildung 3-11 * schematischer Schnitt durch eine Verbindung mit einem zusätzlichen Element

Durch Schraubverbindungen lassen sich die Segmente einfach miteinander verbinden. Die Muttern und Schrauben müssen aus einem strahlungssicheren Werkstoff bestehen. Der Einsatz von handelsüblichen Schrauben ist dadurch nicht möglich. Weiterhin sollten Montage und Demontage genauer betrachtet werden, da eventuell der Zugang zu Schraubelementen nicht möglich ist.

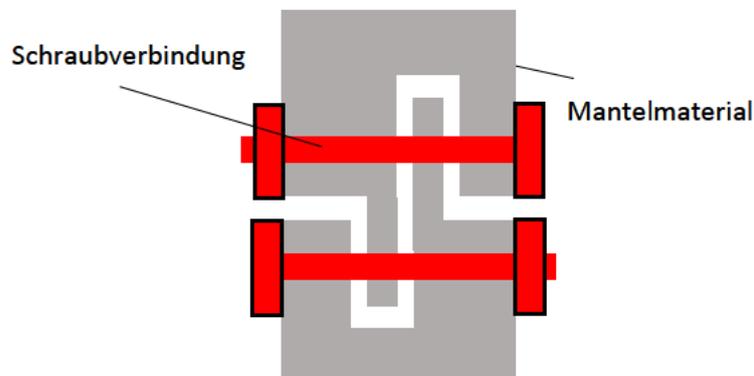


Abbildung 3-12 * schematischer Schnitt durch eine doppelte Schraubverbindung

Die Schweißverbindung stellt eine sehr feste und nicht lösbare Segmentverbindung dar. Durch die hohe Wärmeinwirkung während des Verbindungsprozesses kommt es um die Wärmeinflusszone zu kristallinen Veränderungen im Material und zu Spannungen. Diese könnten sich negativ auf die Strahlensicherheit auswirken. Auch der Einsatz von toxischen Schwermetallen führt zu Einschränkungen im Fertigungsprozess.

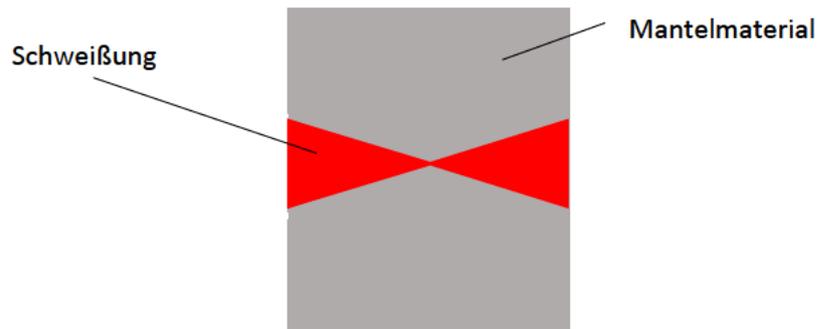


Abbildung 3-13 * schematischer Schnitt durch eine Schweißverbindung

Die Lötverbindung ist wie die Schweißverbindung eine feste nicht lösbare Verbindung. Im Gegensatz zur Schweißung sind die Wärmeinflusszonen sehr klein. Jedoch kommt es zu Diffusionsprozessen, welche das Mantelmaterial beeinflusst. Das Löten von Bleisegmenten stellt eine besondere Herausforderung dar, da Blei sehr toxisch ist.

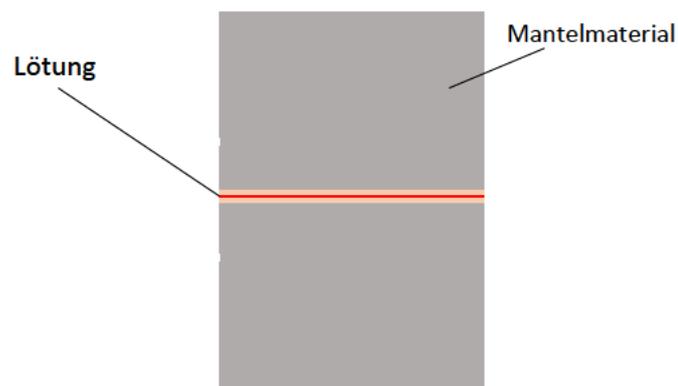


Abbildung 3-14 * schematischer Schnitt durch eine Lötverbindung

Kleiverbindungen werden den nicht lösbaren Fügeformen zugeordnet. Da der Klebstoff nichtmetallisch ist, kann die Strahlensicherheit nur durch spezielle Geometrien an der Fugestelle erreicht werden. Auch ist der Einfluss von Strahlung auf den Klebstoff zu beachten.

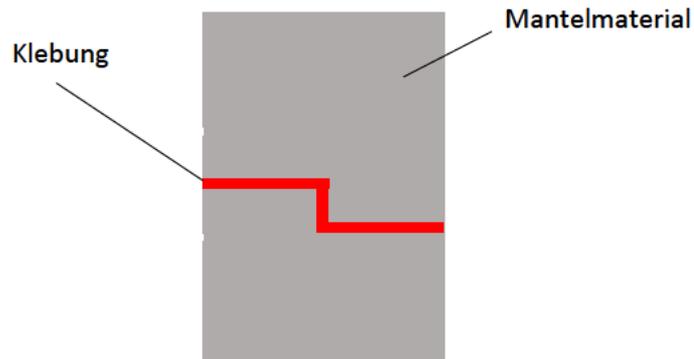


Abbildung 3-15 * schematischer Schnitt durch eine Klebverbindung

Ähnlich der Schraubverbindung, werden bei Nietverbindungen die Segmente mit der Hilfe von Nieten verbunden. Jedoch ist diese Verbindung nicht mehr lösbar.

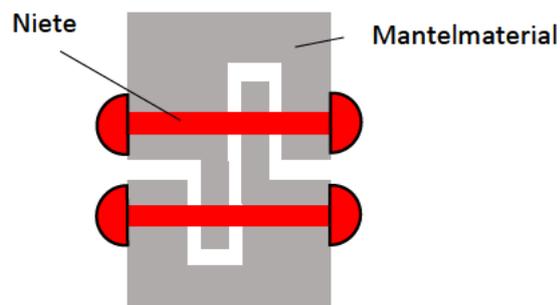


Abbildung 3-16 * schematische Darstellung einer Nietverbindung

Oft stellen die Kombination aus den verschiedenen Fügemethoden eine sehr gute Alternative dar. Im Folgenden ist als Beispiel der Schnitt durch Gewinderinge dargestellt. Die Gewinderinge wurde in dieser Darstellung auf die Rohrenden geklebt und dann miteinander verschraubt.

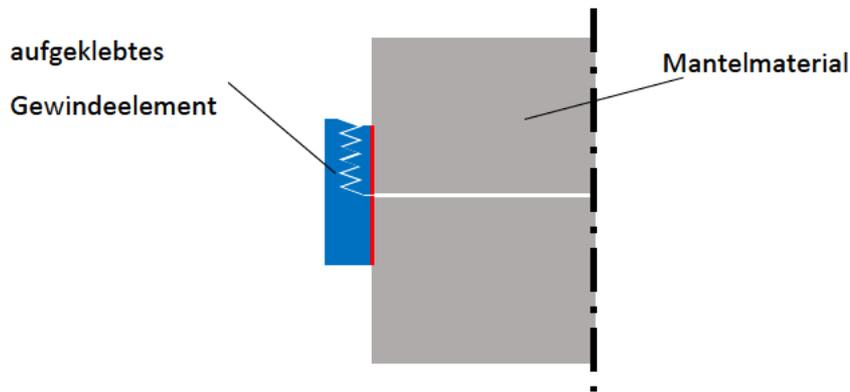
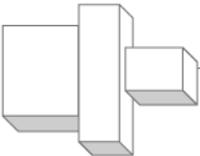
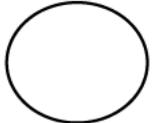


Abbildung 3-17 * schematischer Schnitt durch eine beispielhafte Kombination an Fügstellen

3.3.4 Rahmen und Aufhängung der Hardware

Grundsätzlich müssen die Hardware und die Schirmungselemente in ihrer Position befestigt und gehalten werden. Daraus ergeben sich drei verschiedenen Prinzipien. Beim ersten Prinzip haben die Stützrahmen für Hardware und Schirmungselemente keine Absorptionseigenschaften. Genauer heißt dies, dass die Hardware unabhängig der Schirmung an einem Rahmen befestigt ist. Dieser Rahmen dient allein der Halterung der Teile und hat keine schirmende Funktion. Da der Rahmen zusätzlich konstruiert wird, kann das Gesamtgewicht der Anlage steigen. Zudem müssen die Schnittstellen der Schirmung strahlungssicher verbunden werden. Ein reiner Außenrahmen ist konstruktiv nicht möglich, da die Aufhängepunkte für die Hardware innerhalb der Schirmung fehlen. Sollte ein äußerer Rahmen für die Schirmung konstruiert werden, ist ein weiter innerer für die Halterung der Hardware nötig, was das Gewicht noch zusätzlich erhöht. Eine zweite Möglichkeit ist, den Rahmen als Teil der Schirmung mit angebrachten Schirmungselementen und Hardware zu gestalten. Der Rahmen, an dem die Hardware angebracht wird, stellt die Stützstruktur des Schirmungsgehäuses dar und ist Teil der Schirmungsfläche. Dies setzt zum einen schirmungstauglichen Werkstoff als Rahmenmaterial voraus, was beispielsweise den Einsatz von Aluminium ausschließt. Eine dritte Möglichkeit wäre, dass die Schirmung die Funktion des Rahmens übernimmt. Bei diesem Prinzip werden die Schirmungselemente ohne Rahmen miteinander verbunden. Gleichzeitig enthält die Schirmung alle Aufhängepunkte für die Hardware.

Tabelle 3-5 Auflistung der Rahmenprinzipien

Rahmen	Prinzip 1	Prinzip 2	Prinzip 3
	separater Rahmen	integrierter Rahmen	Rahmenlos
Symbol			

3.3.5 Strahlungssichere Stoßkanten

Um die Segmente strahlungssicher miteinander verbinden zu können, sind verschiedene Stöße möglich. Durch eine Verschränkung der Stoßkanten kann die Strahlung nicht mehr ungehindert durch eine Spaltöffnung nach außen treten.

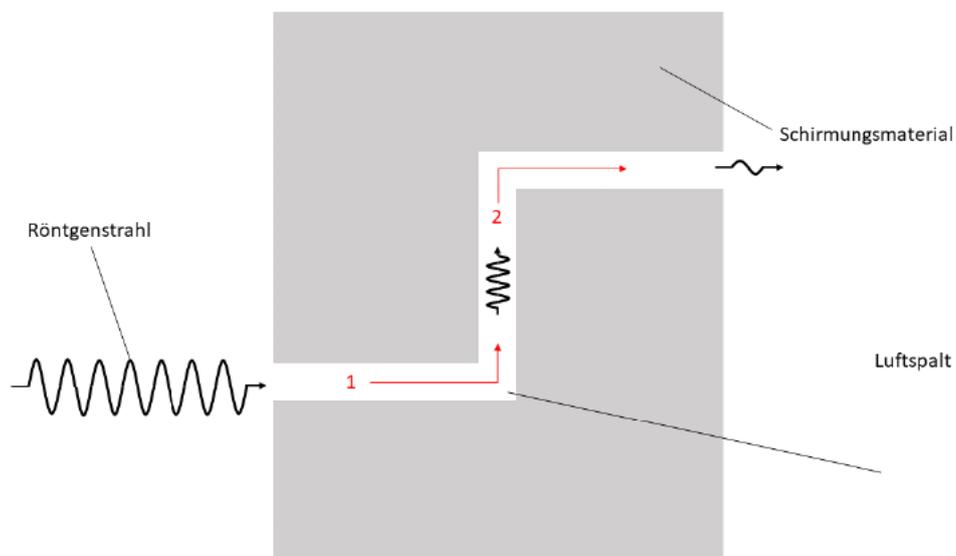
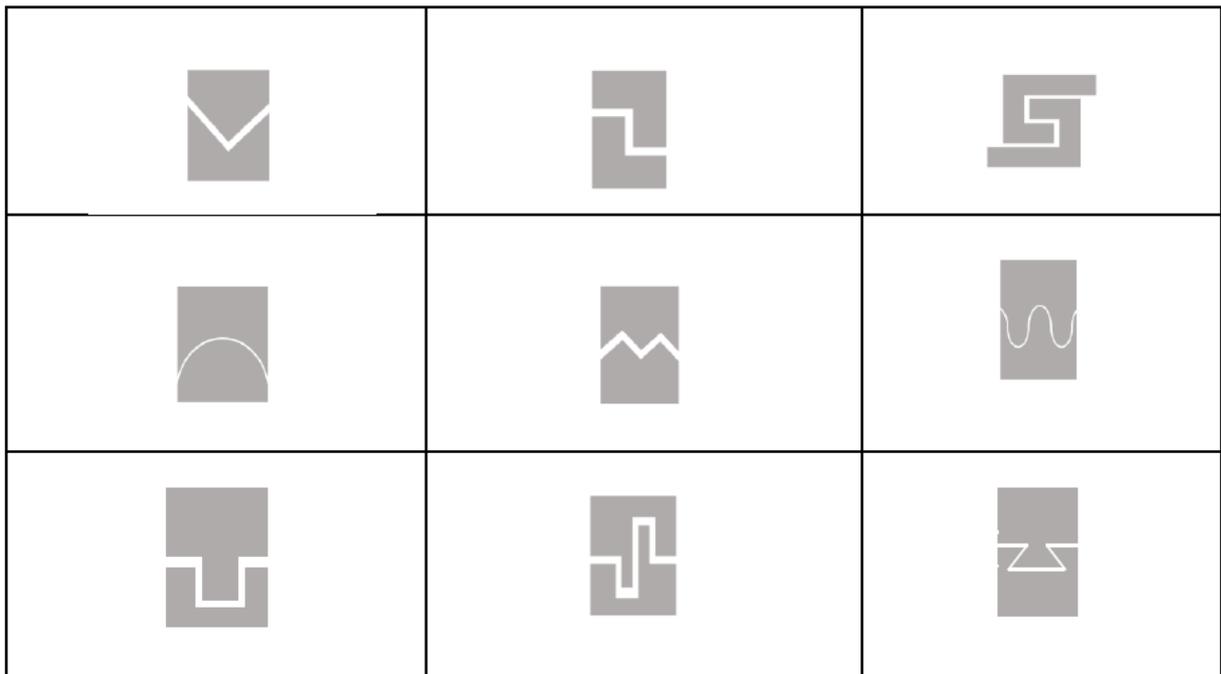


Abbildung 3-18 * Umlenkungsprinzip von Röntgenstrahlung

Einige Möglichkeiten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt und bilden nur eine kleine Auswahl ab. Es ist auch möglich, verschiedene Stöße miteinander zu kombinieren. Die Geometrie muss später in der Detaillierung festgelegt werden.

Tabelle 3-6 verschränkte Stöße



Die einzelnen Abbildungen in der Tabelle zeigen schematische Schnitte an den Verbindungsstellen. Die grauen Geometrien stellen dabei das Mantelmaterial dar, die weißen Luftspalte. Spalten sollten durch Fertigungsgenauigkeiten nur wenigen Mikrometer breit sein.

3.3.6 Design des Probenraumes

Gemäß den Anforderungen soll die Probe linear in drei Achsen und rotatorisch um eine Achse bewegt werden. Zwei Linear- und die Rotationsachse dienen dabei zur Bewegung der Probe zur Zeit des Scans. Mit der dritten linearen Achse wird der Abstand der Probe zur Röntgenkamera vor dem Scan festgelegt. Dieser wird während des Scans nicht mehr verändert. Aus den Primärstrahlausrichtungen des Röntgenaufbaus ergeben sich drei Probenumgebungen, die Horizontale, die Diagonale und die Vertikale. Bei der horizontalen Probenumgebung, Abbildung 3-19, liegen Strahlengang und Gravitation im rechten Winkel zueinander. Die Probenbewegung würde durch standardisierte Lineartische und eine Rotationsplattform erfolgen.

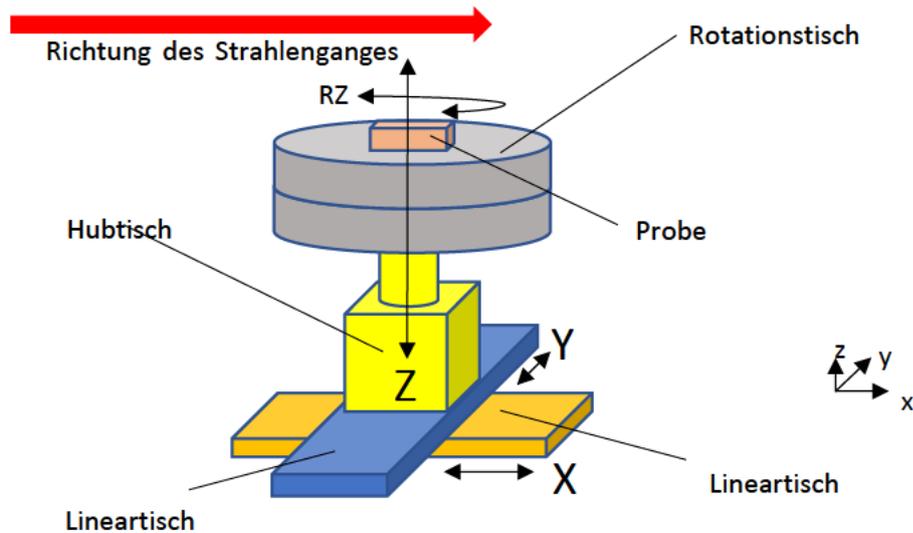


Abbildung 3-19 * Prinzipskizze eines horizontalen Tischaufbaus

Die diagonale bzw. vertikale Probenumgebung sind im Vergleich zur horizontalen in ihrer Konstruktion komplexer. Da die Strahlenrichtung im geringen Winkel zur Gravitation verläuft, müssen zusätzliche Aufhängungspunkte für die Probe konstruiert werden, um den Strahlengang nicht zu beeinflussen. Eine beispielhafte Lösung ist eine Kombination aus einem Kreuztisch mit Spindelhub. Da diese Art der Probenbewegung eine individuelle Anpassung wäre, sind keine Informationen über das Verhalten der Probe innerhalb des Strahlenganges bekannt. Die Abbildung 3-20 stellt einen möglichen Aufbau einer Probenumgebung für einen diagonalen Strahlengang dar. Dabei ist insbesondere auf die Lastverteilung der Lager, der Bewegungstische und der Rotationsmotoren zu achten. Um Biegemomente zu reduzieren, muss die Probenaufnahme zusätzlich gelagert werden. Der Vertikale Spindelhub dient der Positionierung der Probe vor dem Scan und ist während der Durchleuchtung fixiert. Eine Synchronisation der vier Spindeln kann durch einen Zahnriemen gewährleistet werden. Bei der Rotation sind ein einzelner Motor und eine drehgelagerte Aufhängung ausreichend.

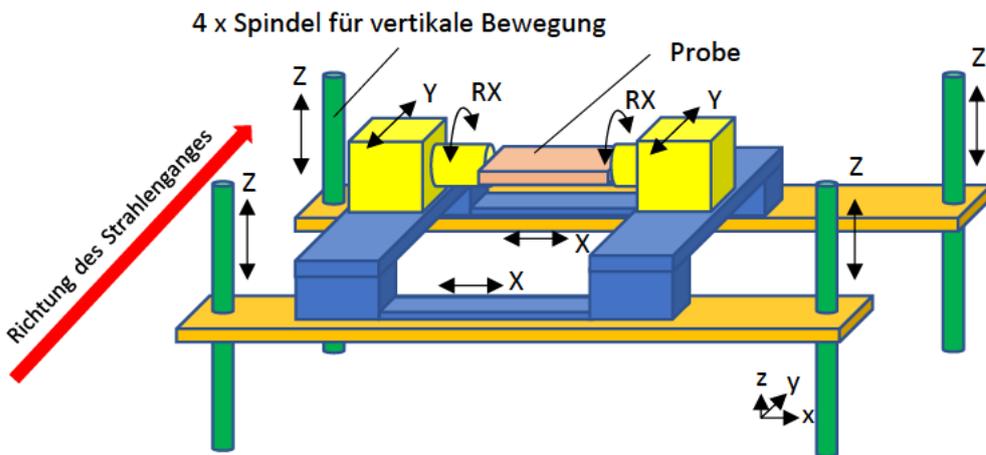


Abbildung 3-20 * Möglichkeit des Aufbaus einer diagonalen Probenumgebung

Das Halten und Befestigen der Probe für eine horizontale Probenumgebung ist durch eine Schale, die auf dem Drehtisch befestigt wird, möglich. In diese Schale kann in eine Schutzschicht gehüllt, die Probe abgelegt und gescannt werden.

Die Probenschale kann leicht auf dem Drehtisch montiert werden und wird in verschiedenen Größen bereitgestellt. Die Abbildung 3-21 zeigt die Prinzipskizze einer horizontalen Probenhalterung. Da die Schwerkraft die Probe in ihrer Schale hält, ist eine zusätzliche Sicherung in diesem Fall nicht nötig.

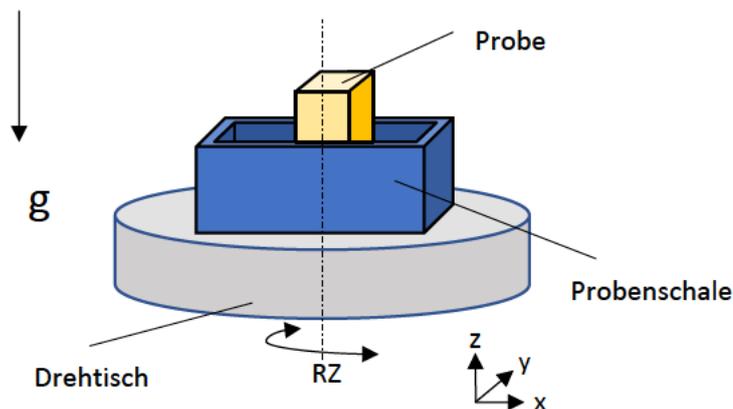


Abbildung 3-21 * Probenschale für einen horizontalen Aufbau

Eine Probenhalterung in vertikaler bzw. diagonaler Richtung ist komplexer zu gestalten. Durch die Drehbewegung um die x-Achse, muss die Probe gegen ein Fallen gesichert werden.

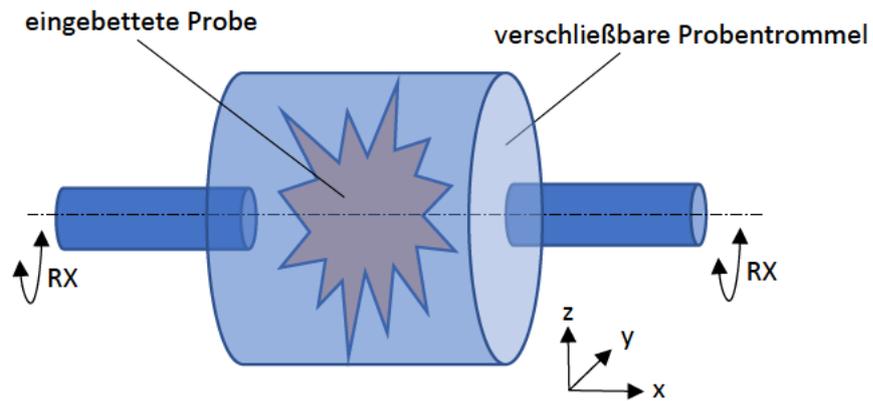


Abbildung 3-22 * mögliche vertikale Probenhalterung

Eine Möglichkeit, um eine Probe in einer diagonalen bzw. vertikalen Probenumgebung zu halten, ist eine verschleißbare Trommel aus Kunststoff. Die Probe könnte durch von außen durchgeführte Steck- oder Schraubelemente in ihrer Position gehalten werden. Diese Idee ist aber nur ein Ansatz, der innerhalb einer Detailkonstruktion weiter geprüft und verfeinert werden müsste.

In dem jetzt folgenden Abschnitt werden die zusammengetragenen Ideen analysiert und bewertet.

3.4 Bewertung der Lösungen und deren Auswahl

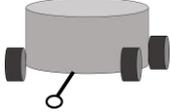
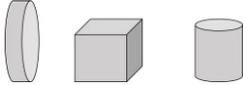
3.4.1 Erläuterung des Bewertungsschemas

Um die Vielzahl an Lösungsmöglichkeiten und Ideen einordnen und bewerten zu können, wird ein nachvollziehbares Bewertungsschema benötigt. Dabei werden die Einzellösungen bewertet und mit Bezug auf die Anforderungsliste gewichtet. Die Analyse erfolgt im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit der konstruktiven Möglichkeiten. Angewandte Fragestellungen sind bei Rahmenkonstruktionen beispielsweise: „Beeinflusst der Rahmen den Zugang zur Probe?“, „Welche Materialien stehen zur Konstruktion des Rahmens zur Verfügung?“, „Kann auf den Rahmen verzichtet werden oder ist eine andere Lösung denkbar?“ , „Wie könnte der Rahmen gefertigt werden?“ , „Wie kann der Rahmen mit anderen Segmenten verbunden werden?“ ... und so weiter. Aus diesen Überlegungen ergeben sich Kombinationen, die bepunktet werden. Haben die Konstruktionsideen Einfluss auf die Anforderungsliste, werden ihre Punkte zusätzlich faktorisiert. Betrifft es einen Wunsch im Lastenheft ist es der Faktor 5 und bei Einfluss auf eine Forderung ist der Faktor 10 anzusetzen. Optionale Parameter, welche nur persönliches Empfinden widerspiegeln (z.B. Farbe), werden nicht faktorisiert. Zusammenfassend werden die Punkte mit einander addiert. Morphologisch hat die Lösung mit der höchsten Punktzahl den Vorrang. Sollten sich Endergebnisse nur in geringen Differenzen unterscheiden, sind diese als gleichwertig anzusehen. Diese Unterschiede liegen oft in persönlichen Vorlieben und weniger in essenziellen Faktoren.

3.4.2 Definition der Funktionen

Um entscheiden zu können, welche Ideen analysiert werden sollten, stellt die VDI 2221 “ Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse“ Tools zur Verfügung. Mit Hilfe von morphologischen Kästen, lassen sich Einzelideen und Fertigungsmöglichkeiten kombinieren oder ausschließen. Um einen morphologischen Kasten zu nutzen, müssen im Vorfeld Funktionen definiert werden, welche sich aus der Anforderungsliste ergeben. Aus der Forderung der Mobilität ergibt sich die erste Funktion. Die Anlage soll weltweit in Museen eingesetzt werden. Daraus entstehenden zwei Varianten. Entweder wird .das Gerät im DESY unter Aufsicht montiert und dann am Stück transportiert, oder die Teile der Anlage werden verbracht und erst am Aufstellort montiert.

Tabelle 3-7 Auflistung der Funktionsvarianten

Funktion 1		
Variante	Erklärung	Symbol
Kompakt	Die Anlage wird vormontiert transportiert.	
Zerlegbar	Die Anlage ist vor Ort montier- und demontierbar.	

Die zweite Funktion ist eine gute Ergonomie für den Benutzer. Es sollte möglich sein, die Probe einfach zu wechseln und die Hardware zu warten. Dazu kann die Anlage auf dem Fußboden, in Tischhöhe oder so weit oben platziert werden, dass die Beladung von unten erfolgt kann.

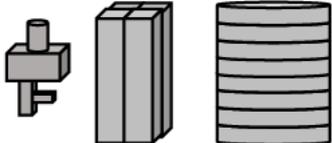
Tabelle 3-8 Auflistung der Funktionsvarianten

Funktion 2		
Variante	Erklärung	Symbol
am Boden	Die Anlage wird auf dem Boden aufgebaut. Dabei kann der Probenzugang von oben oder der Seite erfolgen.	
Tischhöhe 70 cm bis 110 cm	Der Zugang zur Probe befindet sich in Hüft- bis Brusthöhe.	
unter der Decke	Der Zugang zur Probe erfolgt von unten.	

Da es sich bei Röntgenstrahlung um ionisierende Strahlung handelt, muss die Umgebung abgeschirmt werden. Die Strahlenschutzverordnung schreibt eine maximale Dosis an Strahlung vor, die in die Umgebung gelangen darf. Aus dieser Forderung ergibt sich eine dritte

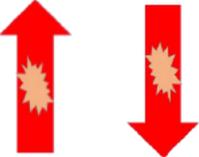
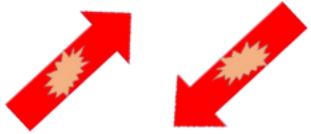
Funktion. Dabei kann ein einfaches Schirmungsgehäuse konstruiert werden, welches aus maximal zwei Teilen besteht. Eine weitere Möglichkeit ist ein flexibler Mantel, der die Hardware und die Probe abdeckt. Weiterhin wäre es möglich, die Schirmung zu segmentieren und in einzelne kleinere Teile zu zerlegen.

Tabelle 3-9 Auflistung der Funktionsvarianten

Funktion 3		
Variante	Erklärung	Symbol
einfaches kompaktes Schirmungsgehäuse	Um die Hardware wird ein einfaches, formstabiles Gehäuse gelegt, welches die Strahlung absorbiert. Im übertragenen Sinne handelt es sich um eine geschlossene Kiste aus zwei Teilen.	
flexibler Mantel	Mit einer flexiblen Decke oder Vorhang, kann die Anlage vor Ort eingewickelt oder abgedeckt werden. Diese Technik wird häufig in der Medizintechnik eingesetzt, um bestimmte Bereiche zu schützen.	
Segmente	Einzelne Segmente aus Grundgeometrien, wie beispielsweise Quader, Zylinder oder Pyramide, werden zu einem Gehäuse gefügt und umschließen die Hardware.	

Die letzte Hauptfunktion liegt darin, eine Probe mit Röntgenstrahlung zu durchleuchten. Der Strahlengang ist linear und kann nicht verändert werden. Jedoch ist zu entscheiden, welche Richtung der Strahlengang haben darf.

Tabelle 3-10 Auflistung der Funktionsvarianten

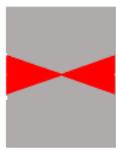
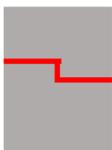
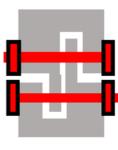
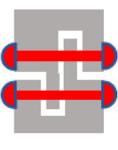
Funktion 3		
Variante	Erklärung	Symbol
Horizontal	Die Hauptrichtung des Strahlenganges ist kollinear mit dem Fußboden.	
Vertikal	Der Strahlengang zeigt nach oben oder nach unten.	
Diagonal	Der Strahlengang wird in einem Winkel zum Boden ausgerichtet.	

Aus diesen Möglichkeiten ergibt sich letztendlich der erste morphologische Kasten, in den die Funktionen eingesetzt und kombiniert werden können.

3.4.3 Bewertung der Fügемöglichkeiten

Aus der Tabelle 3-11 kann eine zulässige Auswahl an Möglichkeiten zur Fügung entnommen werden. Da sich beim Schweißen und Löten der Verbindungsstellen Gefügeveränderungen im Bereich der Wärmeinflusszonen und Diffusionseffekte ergeben, die zu einer Verringerung der Absorptionsleistung der Schirmung führen können, können diese Methoden ausgeschlossen werden.

Tabelle 3-11 Zusammenfassung der Fügемöglichkeiten

stecken	klemmen	schweißen	löten	kleben	schrauben	nieten
						
✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓
		Gefüge- Veränderungen	Gefüge- Veränderungen			

3.4.4 Einschätzung der Optimierungsmöglichkeiten

Die Einschätzung, wie weit es zu den Verschiebungen in den einzelnen Bereichen kommt, ist meistens individuell. Jedoch dürfen die Verschiebungen nicht der Anforderungsliste entgegenstehen. Parameter bzw. Stellschrauben der Optimierung sind:

1. Grad der Segmentierung
2. Geometrie
3. Gewicht
4. Kosten
5. Handling

Der benötigte Bauraum für die Funktionsanordnung der Hardware ist vorgegeben. Auch das maximale Ausmaß der Anlagen wird durch eine Standardtüröffnung begrenzt.

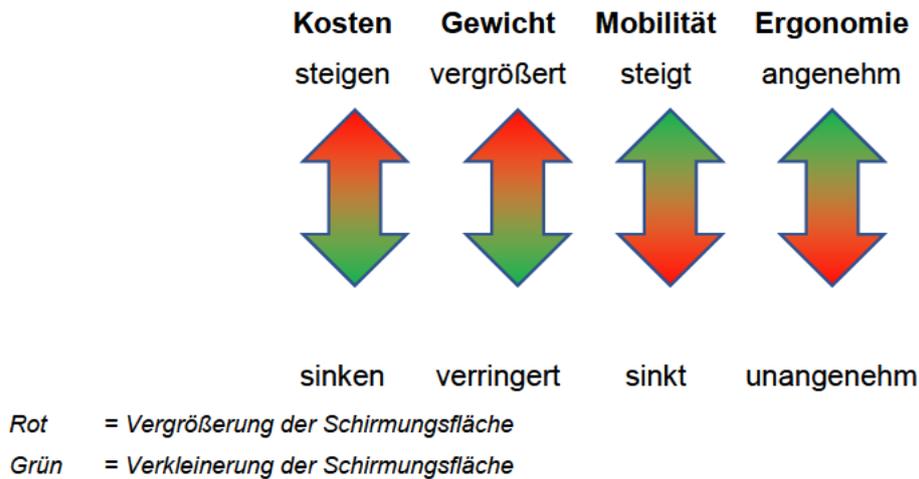


Abbildung 3-23 * Parameterverschiebung und Optimierungsmöglichkeit

Kausal ergibt sich, dass die Schirmungsfläche reduziert werden muss, um eine Gewichts- und Dimensionsverringering zu erreichen. Für die Bewertung wurden die minimalen Mantelflächen der einzelnen Geometrien ermittelt, die notwendig sind, um das Röntgensetup zu umschließen. In der nachfolgenden Abbildung sind die zu bewertenden Körper nach Mantelflächengröße sortiert.

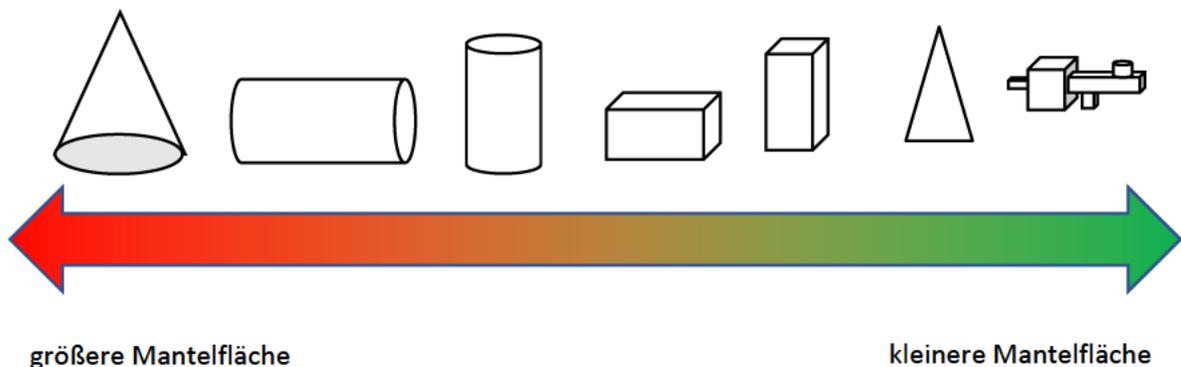


Abbildung 3-24 * Sortierung der Geometrien nach Oberflächengröße

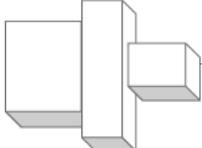
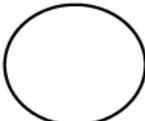
Da eine Reduzierung des Gewichtes ein Wunsch in der Anforderungsliste darstellt, wird dieser Beurteilungspunkt mit dem Faktor 5 versehen. Da die Mantelform gleichzeitig auch der beste Optimierungsparameter ist, wird der Faktor auf 10 erweitert.

3.4.5 Bewertung der Rahmenkonstruktion

Grundsätzlich sind alle drei Rahmen und Befestigungsprinzipien konstruktiv umsetzbar.

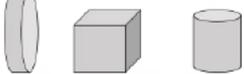
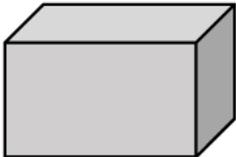
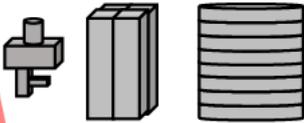
Bei Prinzip 1 ist ein zusätzlicher Rahmen zu konstruieren. Damit entstehen mehr Teile und mehr Gewicht. Auch die Montage könnte sich als komplexer erweisen. Ein reiner Außenrahmen ist konstruktiv nicht möglich, da die Aufhängepunkte für die Hardware innerhalb der Schirmung fehlen. Prinzip 2 setzt voraus, dass auch die Materialien des Rahmens strahlentauglich sind, was den Einsatz von Aluminium ausschließt. Das dritte Prinzip ist sehr komplex und setzt ein Material mit Formstabilität voraus. Damit ist der Einsatz von reinem Blei ausgeschlossen. Auch Aluminium als Werkstoff kann ausgeschlossen werden, da die Schirmungsdicken überdimensional groß wären. Die Kosten beim Einsatz von Wolfram oder Niob sind bei diesem Prinzip unverhältnismäßig groß.

Tabelle 3-12 Bewertung Rahmenkonstruktion

Rahmen	Prinzip 1	Prinzip 2	Prinzip 3
	separater Rahmen	integrierter Rahmen	Rahmenlos
Symbol			
Wertung	2	3	1
Faktor 5	15	20	5

3.4.6 Auswertung und Zusammenfassung

Tabelle 3-13 morphologischer Kasten zur Reduzierung der Lösungsansätze

Funktion	Varianten			
1 Mobilität	 		 	
Ausschlusskriterium	 Ein Transport in engen Treppenhäusern ist ohne Lift nicht möglich.			
2 Ergonomie	 	 	 	
Ausschlusskriterium	 Ergonomie-Grundnorm DIN EN ISO 26800 wird nicht eingehalten		 Ergonomie-Grundnorm DIN EN ISO 26800 wird nicht eingehalten	
3 Abschirmung der Strahlung	 	 	 	
Ausschlusskriterium	 Ein Transport in engen Treppenhäusern ist nicht möglich.	 Die Umsetzung nach Strahlenschutzgesetz ist nicht möglich.		
4 Richtung der Strahlung	 	 	 	   
Ausschlusskriterium	 Staub- und Materialabrieb auf Beryllium- oder Cadmiumtelluridfenster führen mittelfristig zu Ergebnisverschlechterung.			

Schlussfolgernd muss die Anlage die nächsten genannten Funktionen haben. Sie muss demontierbar sein. Der Probenraumzugang und Probe haben eine Arbeitshöhe von ca. 70-110 cm. Der Strahlengang kann eine horizontale bzw. diagonale Richtung haben.

Die Teilerkenntnisse aus dem ersten morphologischen Kasten, der Analyse von Schirmungsgeometrie und die Betrachtung der Rahmenkonstruktion, werden in einen zweiten morphologischen Kasten eingesetzt und gemäß ihrer Wertigkeit kombiniert.

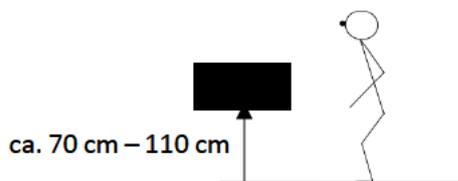


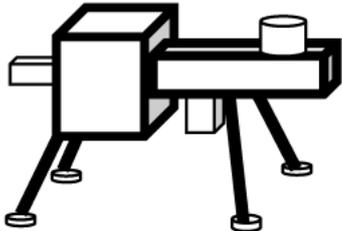
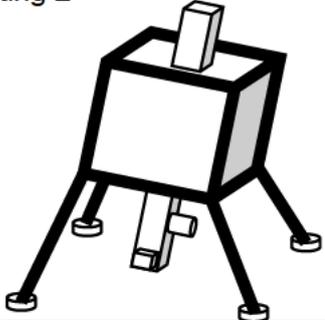
Abbildung 3-25 * Arbeitsposition des Benutzers

Tabelle 3-14 morphologischer Kasten zur Lösungsfindung

Richtung Strahlengang							
Punkte	3		1		2		
Geometrie							
Punkte	40	20	50	30	10	60	70
Rahmen/ Aufhängung							
Punkte	10		15		5		

In der Tabelle 3-15 sind die beiden morphologischen Lösungen zu sehen. Diese haben sich durch die im Vorfeld gesetzten Eingrenzungen und Anforderungen ergeben.

Tabelle 3-15 Ergebnis der morphologischen Auswahl

Punkte	88	87
Kombination	Lösung 1 	Lösung 2 

Diese beiden Varianten stellen nur den Funktionskern dar und sind keine endgültigen Designlösungen. Sie geben aber eine Orientierungsmöglichkeit für die folgende freie Konstruktion. Die Lösung 1 bezieht sich auf die Arbeitsposition. In dieser Lösung können Probenaufnahmen, die bereits erprobte sind, verwendet werden. Die Lösung 2 ist die Transportposition, da diese es ermöglicht, Lastenaufzüge mit geringer Grundfläche zu nutzen. In Anlehnung an die DIN 18040 „Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude“, sind Lastenaufzüge von Typ 1 und Typ 2 mit einer maximalen Tiefe von 1,40 m vorgesehen. Diese sind für den Transport der Anlage in Arbeitsposition nicht geeignet, da das Setup mindestens 1,45 m lang wäre.[11]

Im jetzt folgenden Abschnitt werden alle Rahmenbedingungen und Vorgaben zusammengefasst, die für die freie Konstruktion herangezogen werden.

3.4.7 Rahmenbedingungen zur freien Konstruktion

In der Tabelle 3-16 sind alle Vorgaben für die freie Konstruktion zusammengefasst. In der linken Spalte befinden sich die Konstruktionsvorgaben. Sie werden zur besseren Abwägung in der rechten Spalte durch die Analyseergebnisse, die zu dieser Vorgabe geführt haben, ergänzt.

Tabelle 3-16 Auflistung der Rahmenbedingung für die freie Konstruktion

Konstruktionsvorgaben	Begründung
Aufbau der Konstruktion muss sehr einfach sein.	Auch nicht speziell geschultes Personal sollte in der Lage sein, die Anlage aufbauen zu können.
Es ist nur eine minimale Anzahl an Teilen zu verwenden.	Da die Anlage auch zerlegt transportiert werden muss, ist eine geringe Anzahl an Teilen anzustreben. Die geringe Teilezahl ist zusätzlich ein Teil des Sicherheitskonzepts.
Einzelne Teile dürfen das maximale Gewicht von 50 kg nicht überschreiten.	Sollte kein Lastenaufzug vorhanden sein, sollten 2 Personen in der Lage sein, ein einzelnes Teil ohne Hebevorrichtung zu bewegen.
Die Anzahl an Schraubverbindungen ist möglichst gering zu halten.	Schraubverbindungen können sich durch das Setzen der Teile bei Vibrationen lösen.
Der Rahmen ist ein Teil der Schirmung und der Hardwarefixierung.	Zusätzliche Rahmen- und Fixierungselementen sind zu vermeiden, da die Anzahl an Teilen gering zu halten ist.
Es sind genormte Maschinenelemente zu verwenden.	Die Anlage muss mit genormtem Werkzeug montierbar sein. Spezialwerkzeuge müssen vermieden werden.
Die Grundfläche der Anlage muss sich für den Transport verkleinern lassen.	Die Anlage ist auch im montierten Zustand transportierbar (kleine Lastenaufzüge).
Hardware soll leicht entnehmbar sein.	Die Entnahme der Hardware lässt eine gute Wartung und Bedienbarkeit zu.
Einsetzbare Schirmungsmaterialien	Blei, Niob, Tantal, Wolfram
Einsetzbare Werkstoffe für Maschinenelemente	Aluminium, Stahl
Verbindungsverfahren der Anlagenelemente	Stecken, Klemmen, Kleben, Schrauben, Nieten

Mit den Vorgaben kann die Anlage frei konstruiert werden. Bei der folgenden Konstruktion handelt es sich um einen Konstruktionsansatz. Da zur Zeit der Bearbeitung dieser Studie die endgültige Hardware noch nicht definiert wurde, wird bei der Vorkonstruktion auf damit in Zusammenhang stehende Details verzichtet. Im Rahmen von Detailkonstruktionen kann es unter Umständen zu anderen Einzel- oder Teillösungen kommen. Auch fertigungsbedingte Einzelgeometrien, wie zum Beispiel Innenradien oder Fasen, sind oft nicht berücksichtigt. Diese müssen zwingend bei der weiteren Konstruktion bedacht werden.

3.5 Sicherheitskonzept

Gemäß des Strahlenschutzgesetzes [6] müssen mindestens 2 voneinander unabhängige Schutzmechanismen vorhanden sein, die sicherstellen, dass das System abgeschlossen ist und keine ionisierende Strahlung nach außen gelangt. Es ist von Vorteil, dass der Bediener den Betriebszustand des Gerätes jederzeit durch äußere Reize, optisch oder akustisch, erfassen kann.

Die angedachten Schutzmechanismen sind:

1. Formschlüssige Codierung
 - Die Schirmungselemente können nur in ihrer vorgesehenen Position montiert und befestigt werden. Durch Stiftelemente an codierten Koordinaten werden einzelne Elemente an vorgesehenen Positionen befestigt.
2. Sensorische Verriegelungskontrolle
 - Durch Sensoren werden die Schlosspositionen der Verriegelungsmechanismen erfasst.
3. Elektronische Positionssicherung
 - Durch einen elektrischen Schaltkreis wird sichergestellt, dass das System komplett geschlossen ist und sich in einem sicheren Zustand befindet.
4. Optische Anzeigen
 - Der Betriebszustand kann durch eine Signalampel von jeder Standposition erfasst werden.

Ein weiterer Aspekt der Umsetzung des Sicherheitskonzeptes ist die Minimierung an Verbindungs- und Maschinenelementen. Da jede trennbare Verbindung zwischen den Schirmungselementen eine Stör- und Fehlerquelle darstellt, sollten die Schnittstellen so gestaltet sein, dass natürliche Rahmenbedingungen wie zum Beispiel die Schwerkraft oder Formschlüssigkeit ausreichen, um einen sicheren Schutz zu gewährleisten. Verriegelungselemente stellen dabei nur noch einen zusätzlichen Schutz dar. Das Sicherheitskonzept umfasst 3 Stufen. In der ersten Stufe ist eine mechanische Sicherung vorgesehen. Dabei werden die Bauelemente der Anlage durch mechanische

Sicherungselemente codiert, so dass sie nur an ihren richtigen Positionen befestigt werden können. Eine Befestigung und Verschränkung mit anderen Bauelementen soll dadurch ausgeschlossen werden. In der zweiten Stufe prüfen Sensoren, ob sich die Bauelemente an den richtigen Positionen befinden und das System geschlossen ist. Die zweite Sicherheitsstufe gibt gleichzeitig mit einem Signal die Anlage frei. Die dritte Stufe ist die endgültige Freigabe des Systems durch den Benutzer, welche manuell erfolgt. Dieser hat dafür zu sorgen, dass der Arbeitsbereich abgesichert ist und die Sicherheitsstufen 1 und 2 korrekt arbeiten. In der Abbildung 3-26 ist das Sicherheitskonzept in einem Flussdiagramm dargestellt.

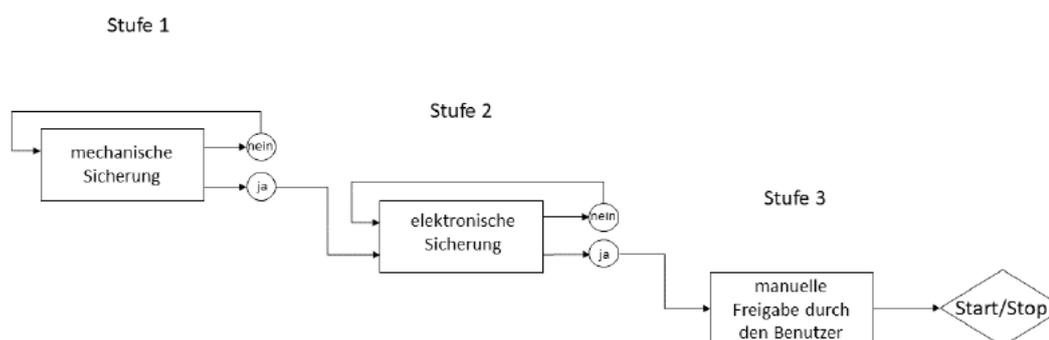


Abbildung 3-26 * Stufenplan des Sicherheitskonzepts

Um den Betriebszustand der Anlage sofort erfassen zu können, ist eine Farbampel vorgesehen, die von jeder Seite der Anlage sofort ersichtlich ist. Dabei werden die Betriebszustände mit drei unterschiedlichen Leuchtsignalen ausgegeben.

Grün: safe (Anlage sicher und kann gestartet werden)

Gelb: in progress (Anlage ist in Betrieb)

Rot: unsafe (Anlage ist nicht korrekt geschlossen und darf nicht gestartet werden)

Eine mögliche Logik ist in der Abbildung 3-27 dargestellt.

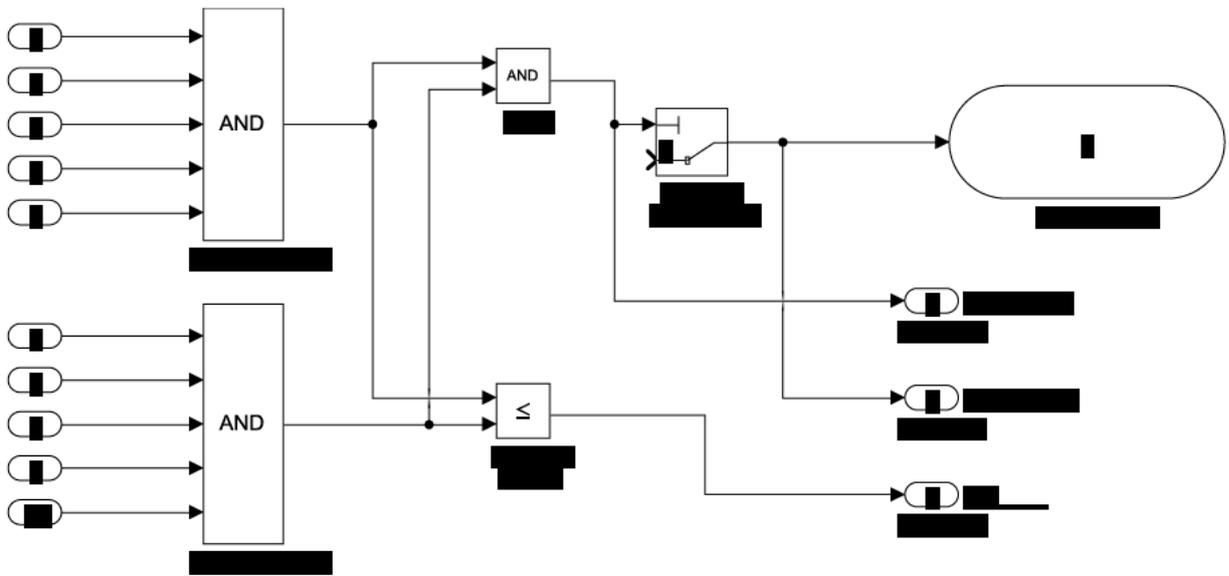


Abbildung 3-27 * logic plan electrical safe

Tabelle 3-17 Signalbezeichnungen für Abbildung 3-27

Eingangssignale/ Input Sicherheitssystem 1

1	Boden
2	Seiten
3	Abdeckung
4	Probenraum Zugang
5	Schlossverriegelung

Eingangssignale / Input Sicherheitssystem 2

6	Boden
7	Seiten
8	Abdeckung
9	Probenraum Zugang
10	Schlossverriegelung

Ausgangssignale / Output

1	Signal rot
2	Signal grün
3	Signal gelb
4	Systemstart möglich

4 Freie Konstruktion und CAD Simulation

4.1 Ergebnis der freien Konstruktion

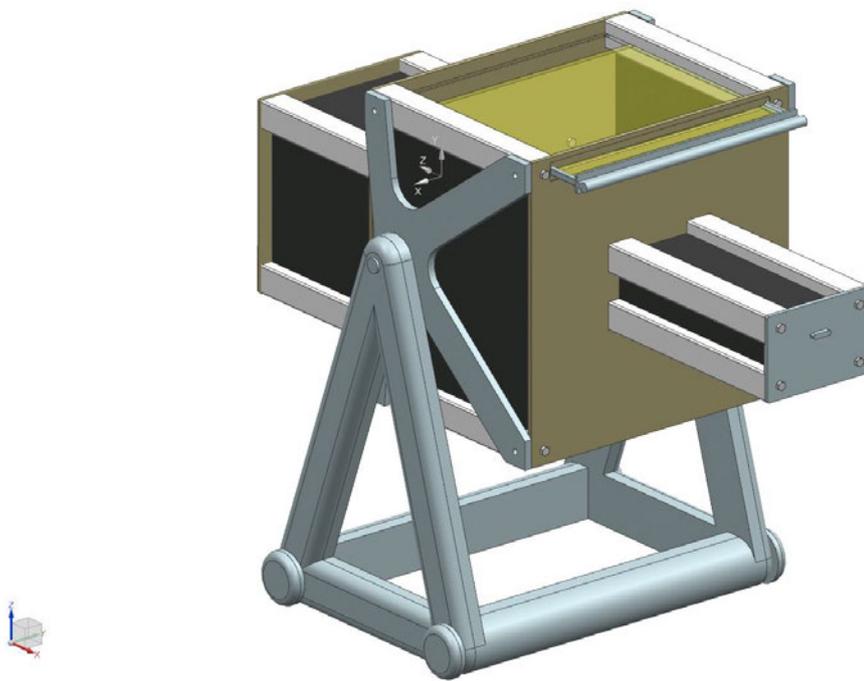


Abbildung 4-1 * Arbeitsposition der Anlage

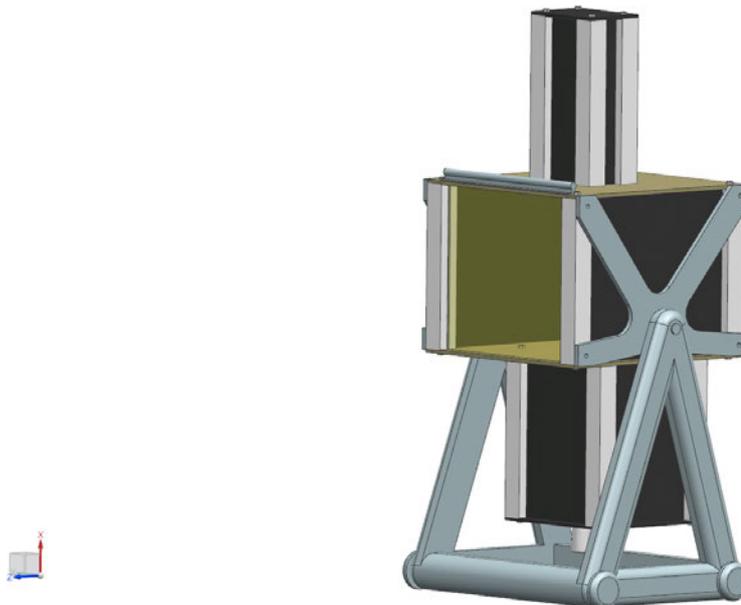
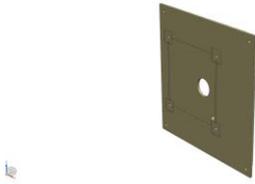
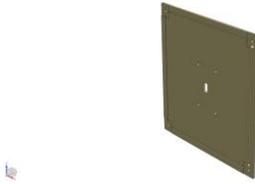
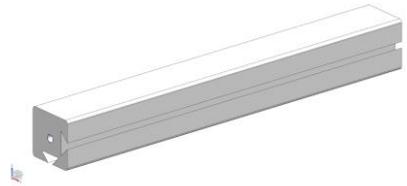
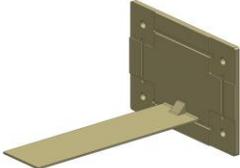


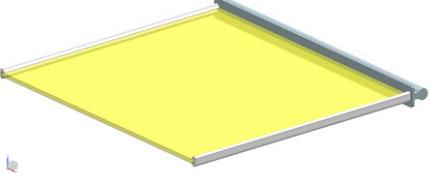
Abbildung 4-2 * Transportposition der Anlage

4.3 Teile der Anlage

Tabelle 4-1 Teileliste mit Dimension/Material/Gewicht

 <p>1x</p>	Seitenteil Probenraum links <ul style="list-style-type: none">• 600 mm x 10 mm x 600 mm• Wolfram• 65,5kg
 <p>1x</p>	Seitenteil Probenraum rechts <ul style="list-style-type: none">• 600 mm x 10 mm x 600 mm• Wolfram• 65,7 kg
 <p>12x</p>	Rahmenprofil <ul style="list-style-type: none">• 57 mm x 450 mm x 57 mm• Niob• 11,2 kg
 <p>22x</p>	Schirmungsplatten-Verstärkungsleiste <ul style="list-style-type: none">• 28 mm x 10,5 mm x 450 mm• Niob• 0,6 kg
 <p>4x</p>	Schirmungsplatte Röntgenröhre <ul style="list-style-type: none">• 280 mm x 454 mm x 7 mm• Blei• 10,1 kg

 <p>2x</p>	<p>Schirmungsplatte Kamera Seite</p> <ul style="list-style-type: none"> • 70 mm x 454 mm x 7 mm • Blei • 2,5 kg
 <p>2x</p>	<p>Schirmungsplatte Kamera Oben/Unten</p> <ul style="list-style-type: none"> • 140 mm x 454 mm x 7 mm • Blei • 5 kg
 <p>1x</p>	<p>Halterung Röntgenröhre</p> <ul style="list-style-type: none"> • 380 mm x 308 mm x 380 mm • Wolfram • 24,8 kg
 <p>1x</p>	<p>Halterung Kamera</p> <ul style="list-style-type: none"> • 240 mm x 315 mm x 170 mm • Wolfram • 8,6 kg
 <p>2x</p>	<p>Aufhängung</p> <ul style="list-style-type: none"> • 600 mm x 10 mm x 460 mm • Aluminium • 4,5 kg
 <p>1x</p>	<p>Tragegestell</p> <ul style="list-style-type: none"> • 705 mm x 600 mm x 460 mm • Aluminium • 70,5 kg

 <p>1x</p>	<p>Probendeckel</p> <ul style="list-style-type: none">• 507 mm x 473 mm x 28 mm• Blei• 21,7 kg
---	---

4.4 Montage der Anlage

Beim ersten Montageschritt werden die ersten 4 Rahmenprofile an die Seitenplatte des Probenraumes geschraubt.

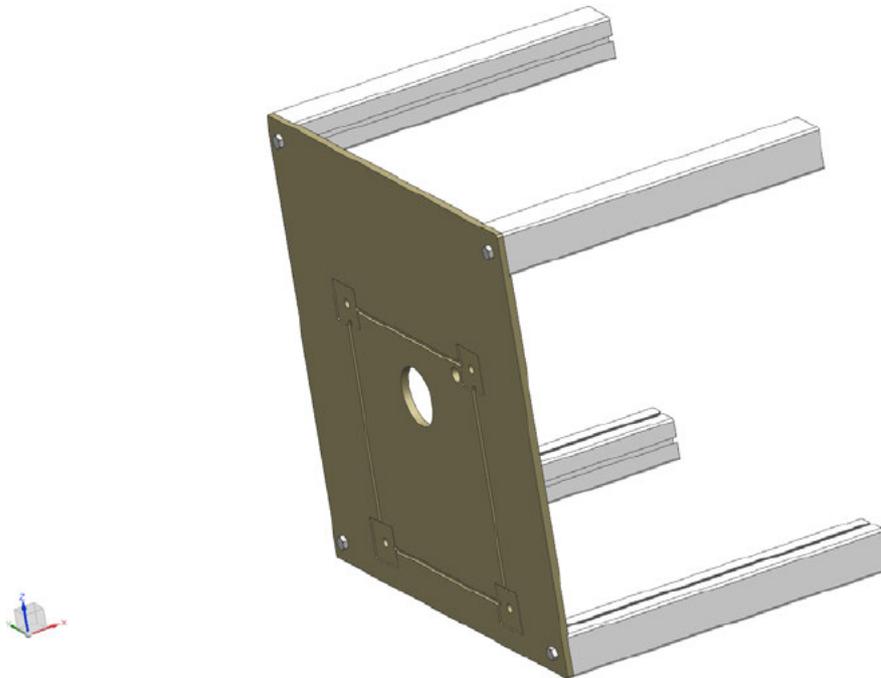


Abbildung 4-3 * Seitenplatte des Probenraums mit angeschraubten Rahmenprofilen

Im Montageschritt 2 können die Boden- und Seitenteile für den Probenraum eingeschoben werden.

Verstärkungsleiste aus Niob

Blei-/ Aluminium
Sandwichplatte

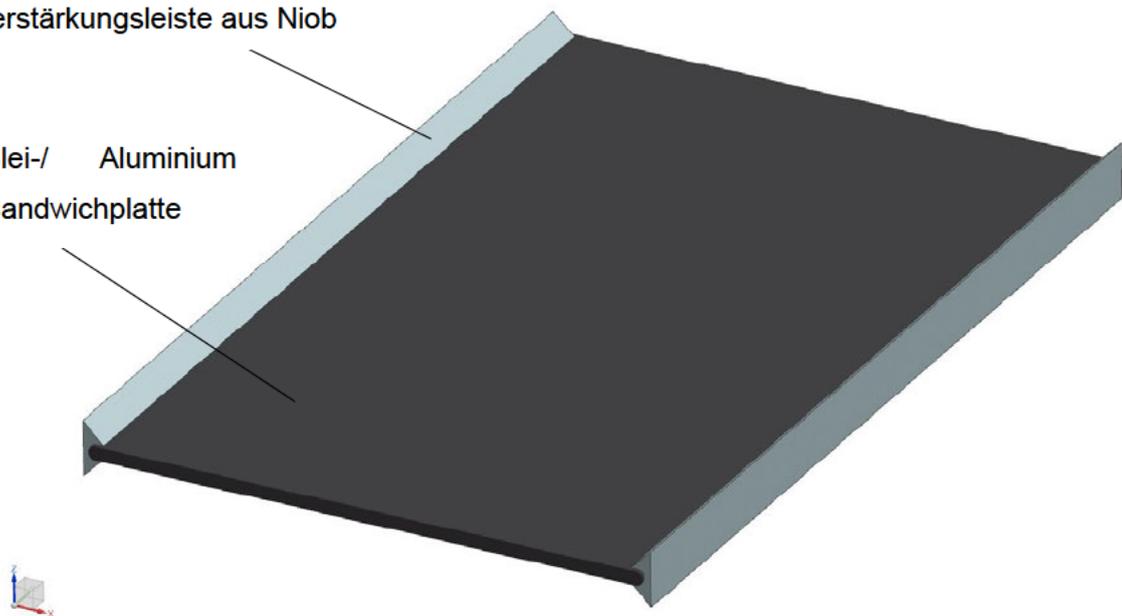


Abbildung 4-4 * Boden- und Seitenplatte für den Probenraum

Eine vergrößerte Darstellung der Schirmungsplatte zeigt die Versetzung zwischen Verstärkungsleiste und der Plattenkante, als spätere Verschränkung der Stoßkanten innerhalb des Rahmens.

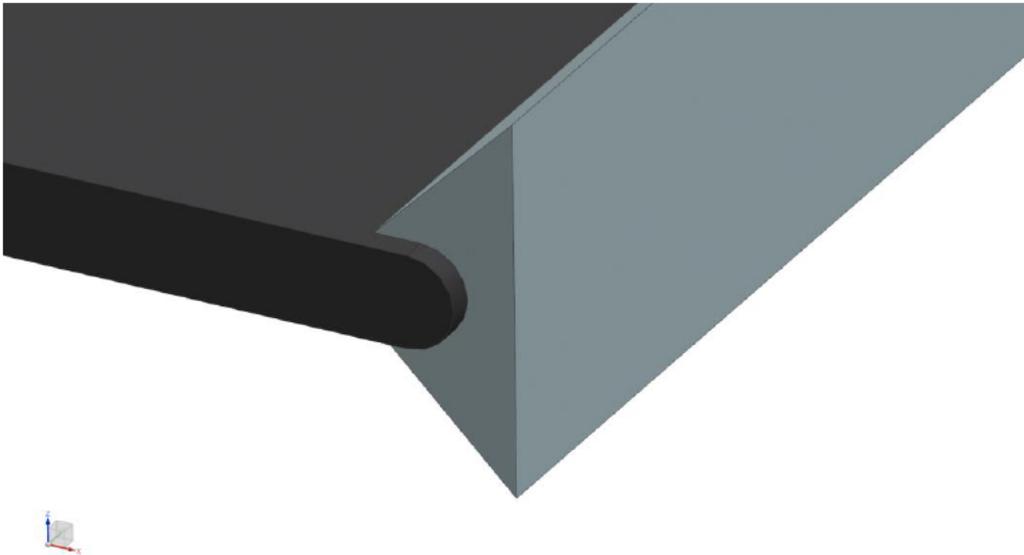


Abbildung 4-5 * Vergrößerung der Kantenleiste einer Schirmungsplatte

Die Verstärkungsleiste bietet die nötige Kantenstabilität. Diese kann aufgedrückt oder geklebt werden. Da die Schirmungsplatten ein Teil der Gehäusestabilität leisten, wurde in dieser Konstruktion einer Schwalbenschwanzform der Vorrang gegeben.

Die Dreieck-Form der Leiste stellt eine sehr stabile Montagemethode für Linearführungen dar.

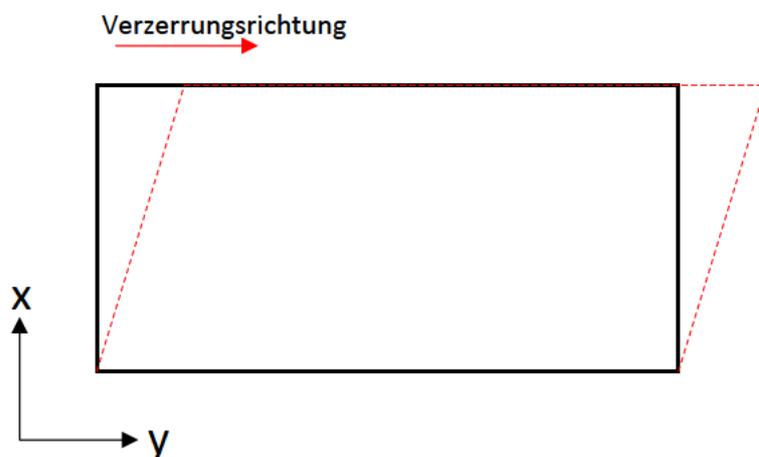


Abbildung 4-6 * Prinzipskizze der Verzerrung einer Geometrie

Diese verhindert eine Verzerrung der Struktur und stabilisiert das Gehäuse.

Wenn durch eine andere Werkstoffkombination ein bessere Formstabilität erreicht wird, kann auf eine Leiste verzichtet werden.

Auf der folgenden Abbildung sind die eingesetzten Schirmungsplatten der Probenumgebung zu sehen.

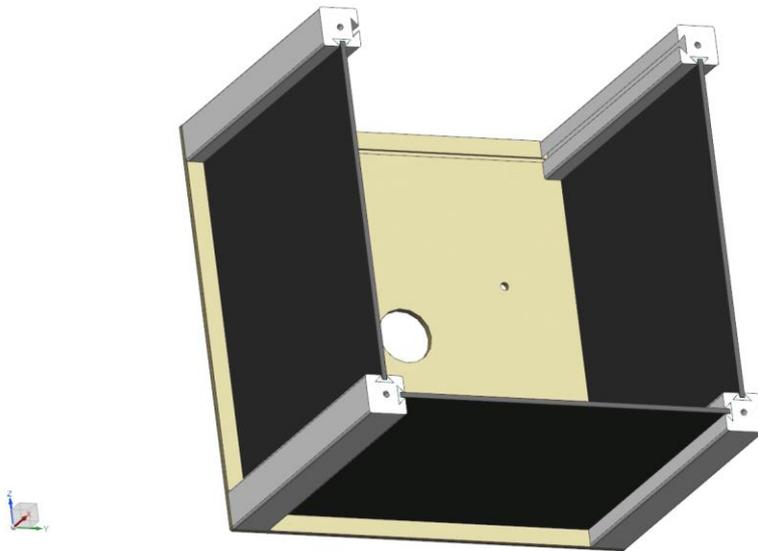


Abbildung 4-7 * eingesetzte Seitenteile in die Rahmenprofile

Im nächsten Schritt wird der Probenraum mit der zweiten Seitenwand stabilisiert.

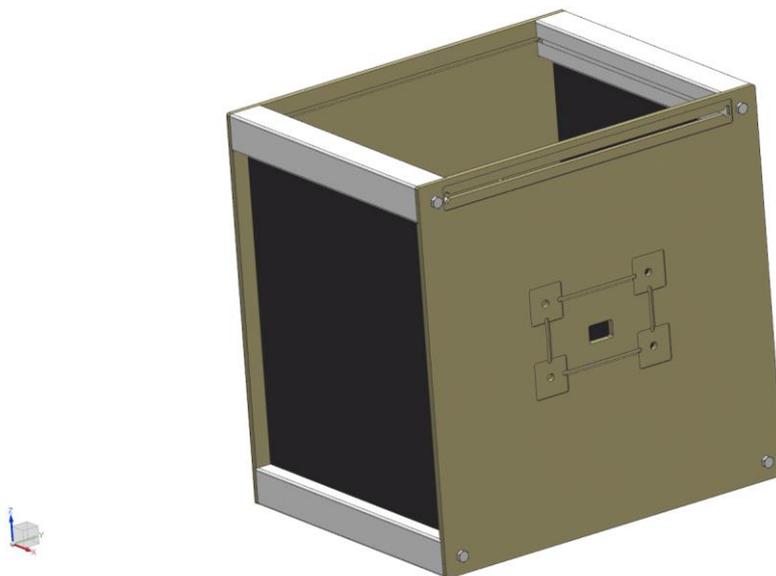


Abbildung 4-8 * aufgeschraubte zweite Seitenplatte

Durch unterschiedlich eingebrachte Nuten in den Seitenwänden werden die Teile strahlungssicher miteinander verbunden. Es wäre möglich in die Nuten codierte Formen einzubringen, die eine richtige Montageposition garantierten.

Auch ist es zu empfehlen, die Schraubverbindungen mit Draht zu sichern, um Manipulationen oder das Lösen durch Transportvibrationen zu verhindern.
Die Abbildung 4-9 zeigt einen Schnitt durch den Rahmen, die die Verschränkung der Stoßkanten für eine optimale Strahlungssicherung darstellt.

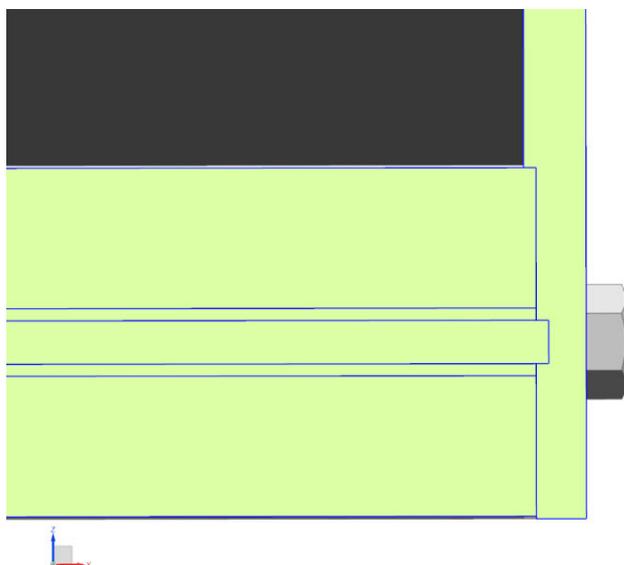


Abbildung 4-9 * Schnitt durch einen Stoß von Rahmenprofil und Seitenwand

In den nächsten beiden Montageschritten, Abbildungen 4-10 und 4-11, können die Aufhängung montiert und der Probenraum mit dem Transportgestell verbunden werden.

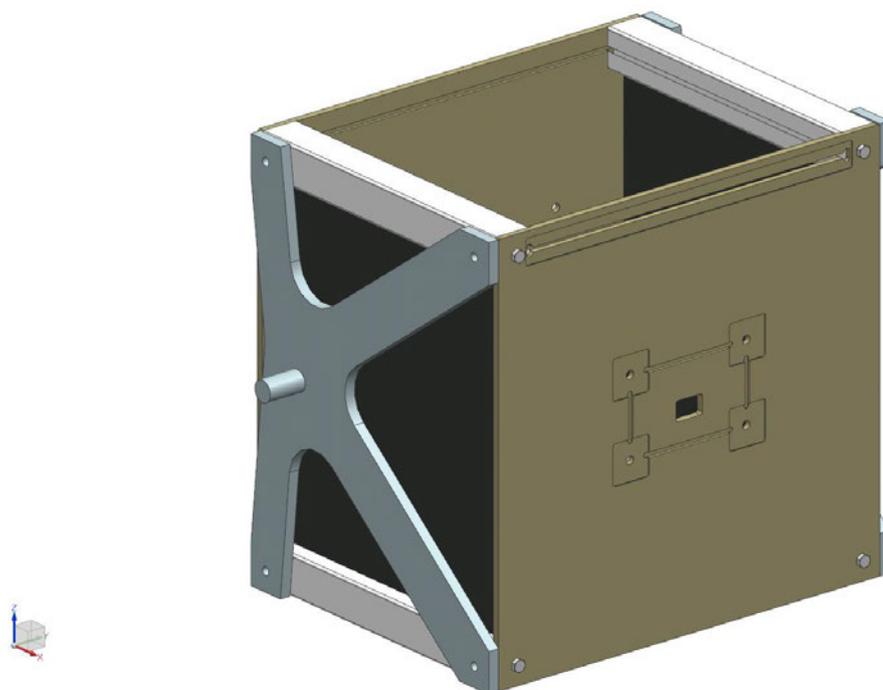


Abbildung 4-10 * Probenraum mit Aufhängung

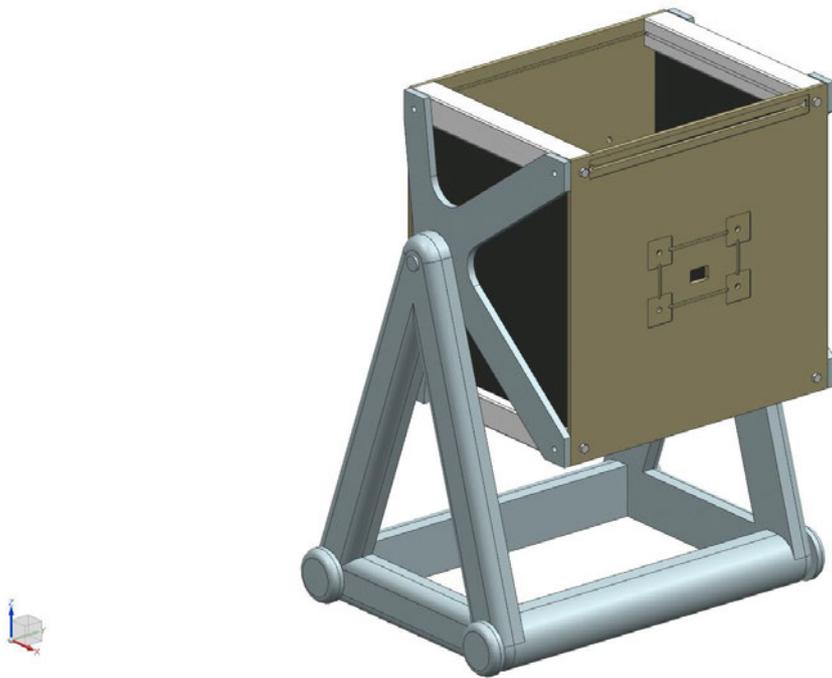


Abbildung 4-11 * Transportgestell mit Vormontierter Anlage

Nun können Rahmenelemente verschraubt und die dazugehörigen Schirmungsplatten eingeschoben werden.

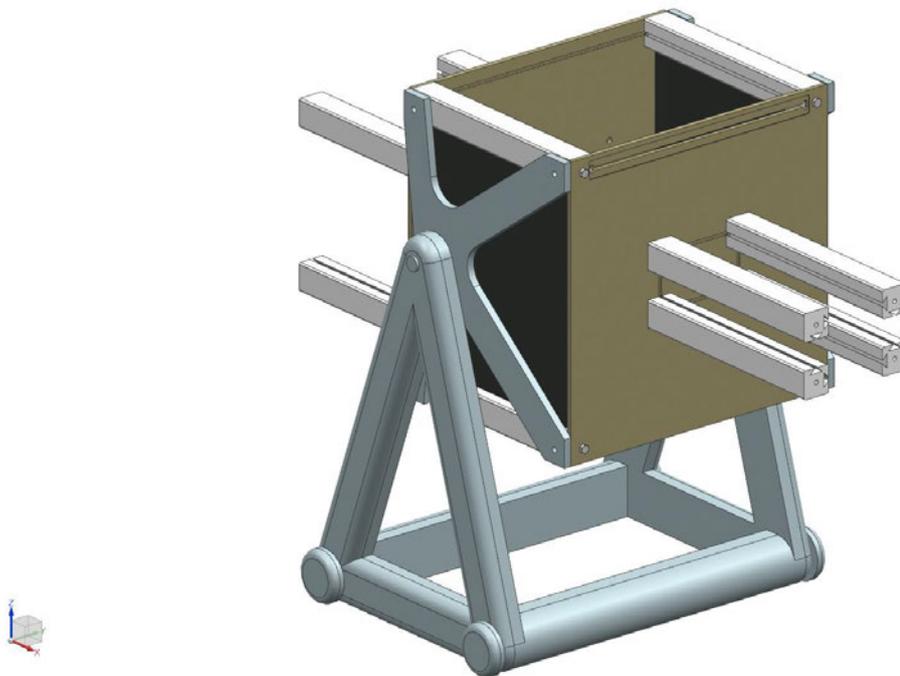


Abbildung 4-12 * fest montierte Rahmenprofile für die Kamera- und die Röhrenumgebung

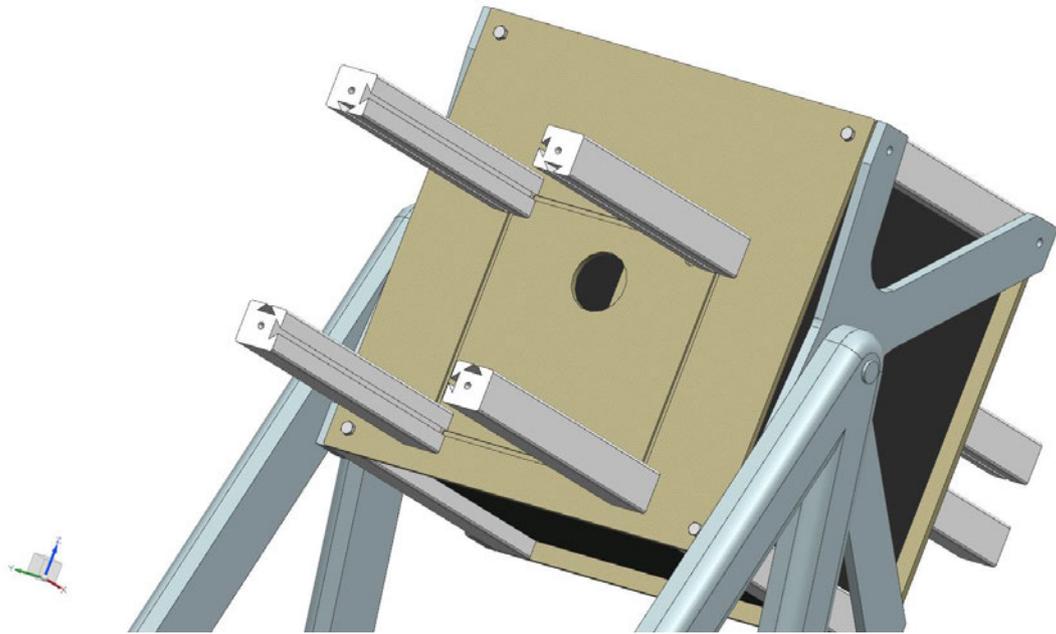


Abbildung 4-13 * hintere Ansicht nach der Montage

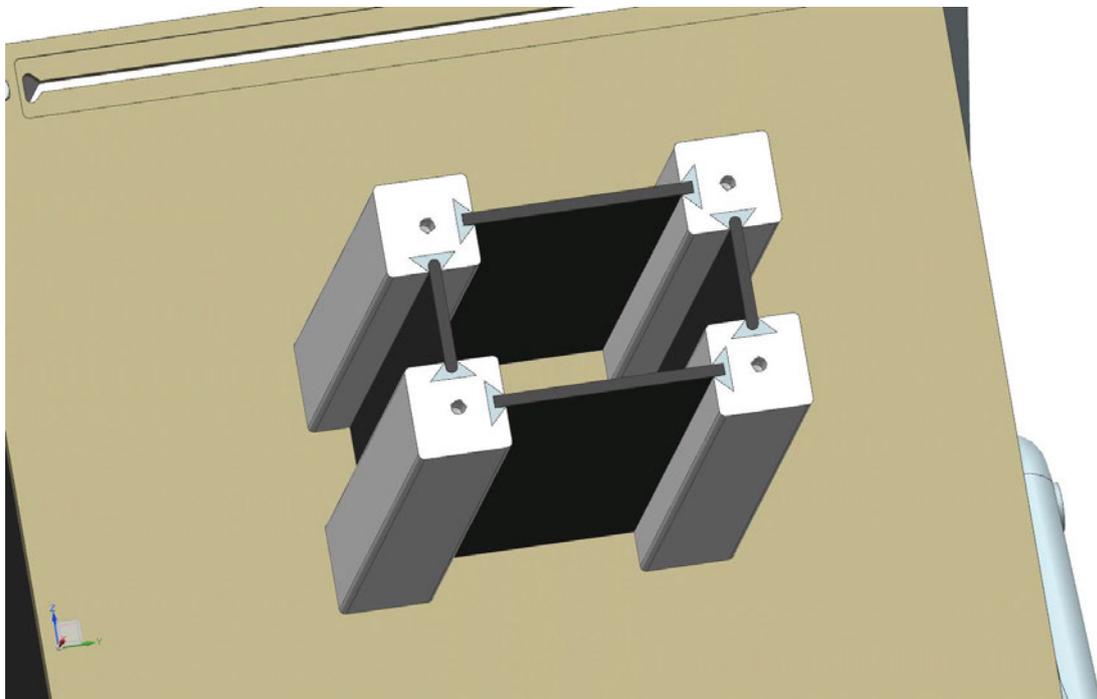


Abbildung 4-14 * eingeschobene Schirmungsplatten für die Kameraumgebung

Auch hier sollten alle Schraubverbindungen drahtgesichert oder versiegelt werden.

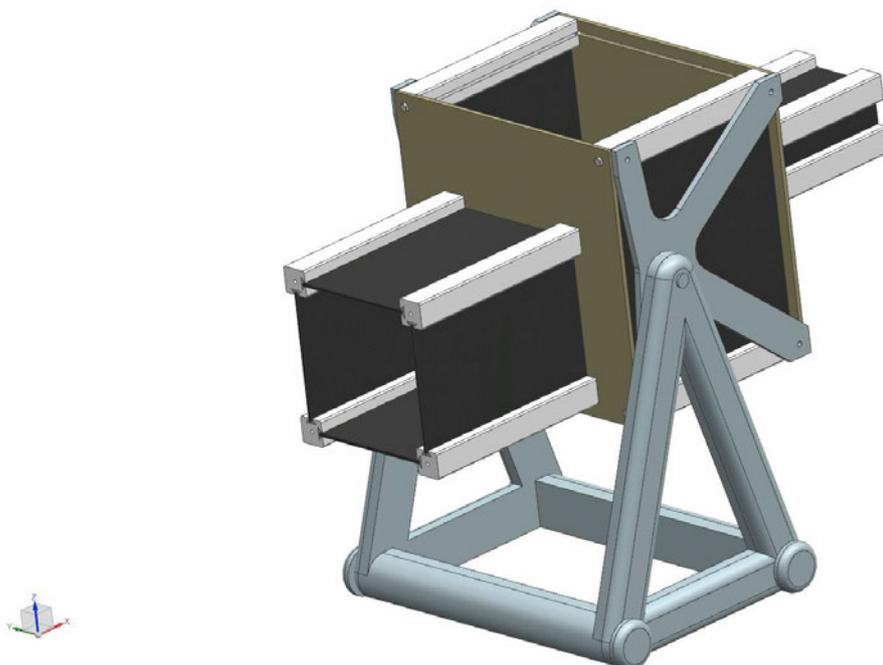


Abbildung 4-15 * eingeschobene Schirmungsplatten für die Röntgenkamera

In diesem Montagezustand kann das Gehäuse transportiert werden. Es sind jedoch Transportsicherungen notwendig, die ein Herausfallen der Schirmungsplatten verhindern. Das kann durch Abschlussplatten aus Kunststoff ermöglicht werden. Diese sind im 3-D Druck mit PLA schnell und kostengünstig herzustellen.

Die folgende Abbildung 4-16 zeigt eine optionale Transportposition.

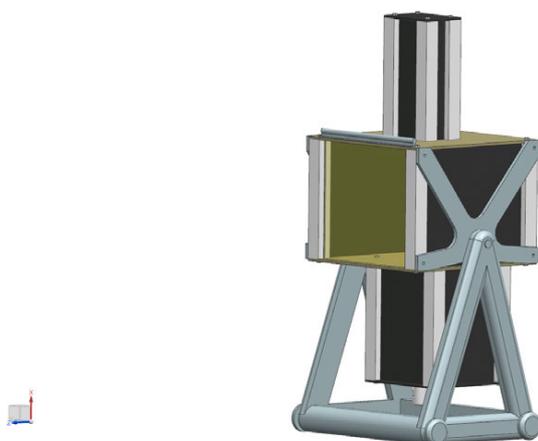


Abbildung 4-16 * Transportposition der Anlage mit Schutzabdeckungen

Im jetzigen Zustand hätte die Anlage ein geschätztes Gewicht von 400 kg. In Anbetracht der gängigen Zuladungsgewichte für Lastenaufzüge, könnte die Anlage in dieser Form leicht transportiert werden. Die benötigte Grundfläche wurde auf ein Minimum reduziert. Es ist zu empfehlen die Hardware wie Röntgenröhre, Probesturm und Kamera erst vor Ort einzusetzen. Da diese Geräte sehr empfindlich sind, sollte sie nur in vorbereiteten Transportkisten bewegt werden.

Eine Konstruktionsmöglichkeit ist es, die Hardwareaufhängungen direkt mit den dazugehörigen Verschlussdeckeln zu kombinieren.

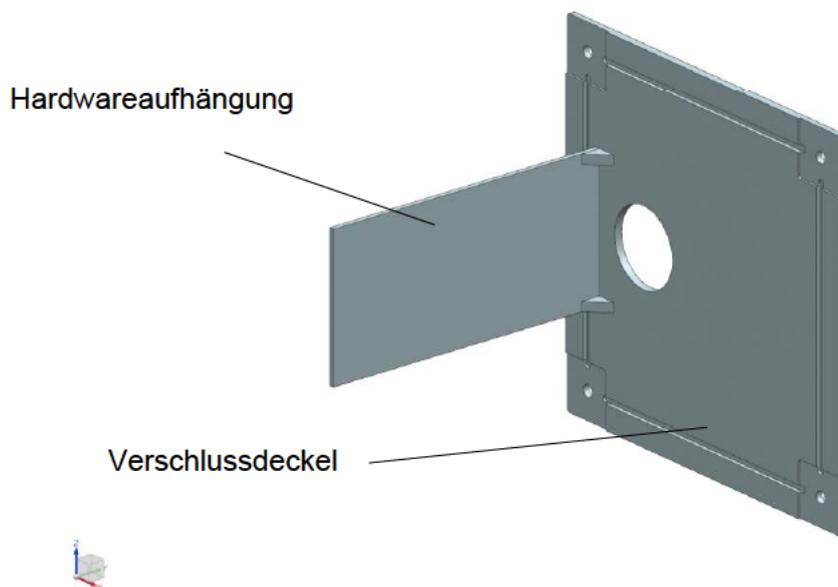


Abbildung 4-17 * Verschlussdeckel mit der Hardwareaufhängung für die Röntgenröhre

In der nächsten Grafik ist die Kombination von Röntgenröhre und Bodenplatte zu sehen. In diesem montierten Zustand kann dieser Teil der Anlage transportiert werden.

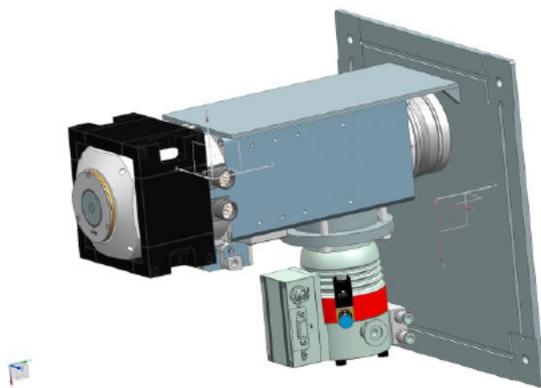


Abbildung 4-18 * Vormontierte Röntgenröhre auf der Bodenplatte

Es ist weiter zu empfehlen eine strahlungssicher Kabeldurchführung durch die Bodenplatte zu gestalten. Dies kann als feste Einheit, die versiegelt wird, konstruiert werden.

Im gleichen Prinzip wird die Kamera an der dazugehörigen Bodenplatte fixiert. Die Kabeldurchführung ist diesem Fall nur schematisch angedeutet. Anbieten würde sich ist eine Steckverbindung, welche schnell getrennt werden kann.

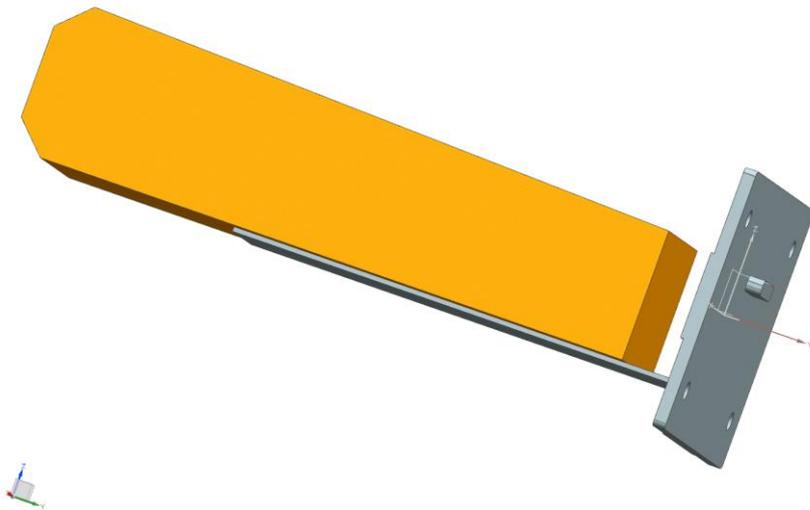


Abbildung 4-19 * Bodenplatte mit Kamera und Andeutung der Kabeldurchführung als Steckverbindung

Der Probesturm ist nicht extra mit einer Aufhängung versehen. Die Montage kann auf einem Breadboard erfolgen oder mit Gewinde-Insert die in die Schirmungsplatten eingelassen werden.

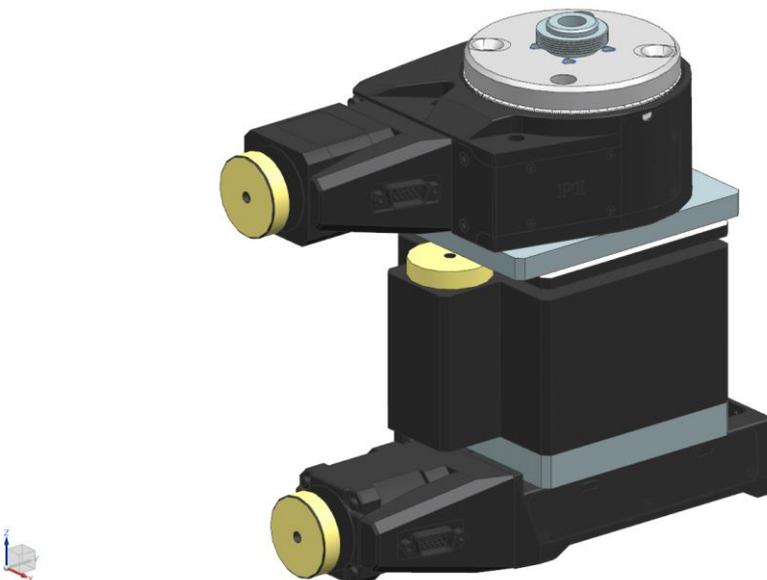


Abbildung 4-20 * Probesturm mit Bewegungseinheiten

In der nachfolgenden Grafik ist der Einbauzustand der Hardware zu sehen. Für die bessere Darstellung sind Teile der Schirmung ausgeblendet.

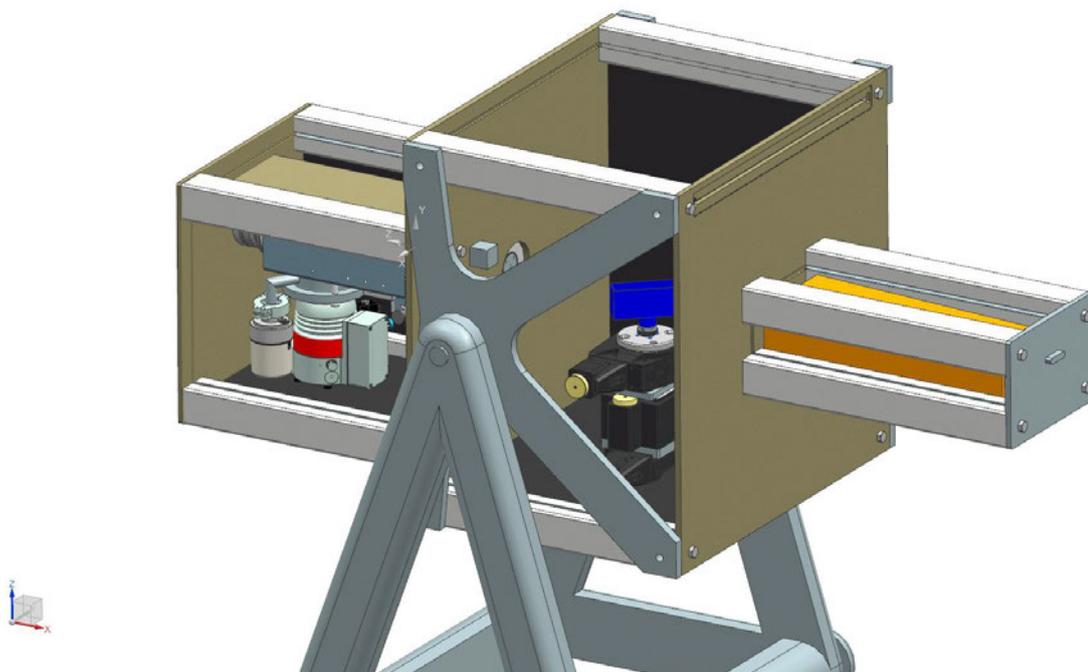


Abbildung 4-21 * Hardware in eingebauten Positionen

Als letzten Schritt der Vormontage wird der Deckel des Probenraumes eingeschoben.

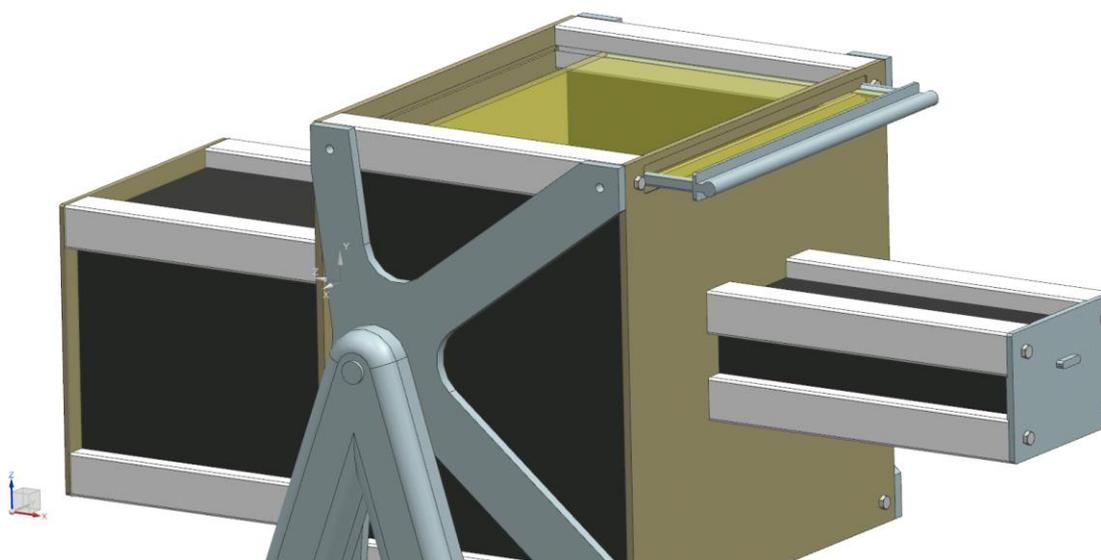


Abbildung 4-22 * eingeschobener Probendeckel

4.5 Integration des Sicherheitskonzepts

Der Aufbau der Anlage darf nur unter Aufsicht von geschultem Fachpersonal erfolgen. Es ist anzunehmen, dass die Schraubverbindungen nach dem Anziehen durch Siegel geschützt werden müssen. So wird garantiert, dass ein Lösen der Schraubverbindungen bemerkt oder eine Manipulation verhindert werden kann. Die Schraubverbindungen an den Verschlussdeckeln kann durch einen Schnellverschluss erfolgen, welche dann zusätzlich mit elektronischen Sensoren versehen werden. Auch der Deckel des Probenraumes ist in der verschlossenen Position zusätzlich zu sichern und elektronisch abzusichern.

Positionsüberwachung
durch einen Sensor

Schnellverschlüsse mit
Positionsüberwachung

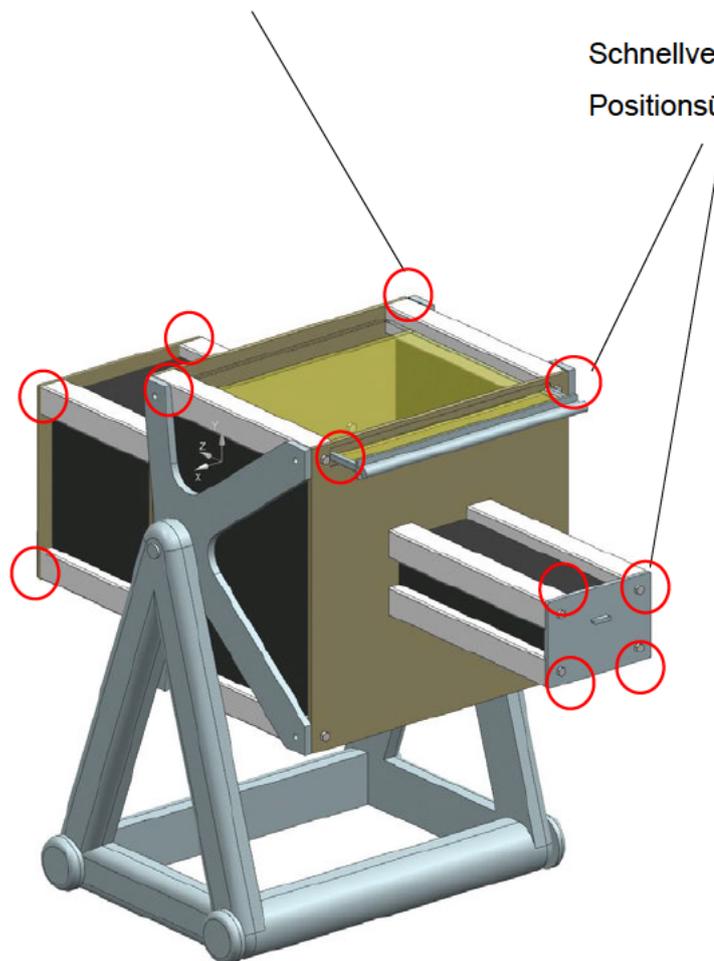


Abbildung 4-23 * Benötigte Sensorik an der Anlage

5 Bewertung- und Schlussfolgerung

Tabelle 5-1 Analyse der verbauten Teile

Bezeichnung	Dimensionen in mm			Material	Einzel- Gewicht in kg	Anzahl	Gesamtgewicht in kg	Rohstoffpreis in \$/kg	Rohstoffpreis in \$ gesamt	
	x	y	z							
Seitenteil Probenraum links	600	10	600	Wolfram	65,5	1	65,5	\$285,24	\$18.683,22	
Seitenteil Probenraum rechts	600	10	600	Wolfram	65,7	1	65,7	\$285,24	\$18.740,27	
Rahmenprofile	57	450	57	Niob	11,2	12	134,4	\$46,36	\$6.230,78	
Kantenleisten	28	450	10, 5	Niob	0,6	22	12,1	\$46,36	\$560,96	
Seitenteil Schirmung Röntgenröhre	280	454	7	Blei	10,1	4	40,4	\$2,22	\$89,69	
Seitenteil Schirmung Kamera	70	454	7	Blei	2,5	2	5	\$2,22	\$11,10	
Boden Schirmung Kamera	140	454	7	Blei	5,0	2	10	\$2,22	\$22,20	
Schirmung Probenraum	500	454	7	Blei	18,0	3	54	\$2,22	\$119,88	
Deckel Probenraum	507	473	7	Blei	21,7	1	21,7	\$2,22	\$48,17	
Zusammenbaugewicht der Anlage					408,8					
Aufhängung	600	460	10	Aluminium	4,5	2	9	\$2,10	\$18,90	
Gestell	705	600	450	Aluminium	70,5	1	70,5	\$2,10	\$148,05	
Gewicht des Transportgestells					79,5					
Transportfähige Anlage					488,3					
Boden Röntgenröhre	380	308	380	Wolfram	24,8	1	24,8	\$285,24	\$7.073,95	
Boden Kamera	240	315	170	Wolfram	8,6	1	8,6	\$285,24	\$2.453,06	

5.1 Vergleich der Ergebnisse mit der Anforderungsliste

Tabelle 5-2 Abgleich mit der Anforderungsliste

F=Forderung W=Wunsch	Röntgenapparatur			Ergebnis	
Lfd.	F/W	Anforderung	gefordert		
Geometrie					
	W	Abmessungen [b x l]	860 mm x 1950 mm	780 mm x 1450 mm (in Transportposition)	✓
Gewicht					
	W	Gesamtgewicht	Das Gesamtgewicht von 600 kg sollte nicht überschritten werden.	488,3 kg	✓
	W	Paketgewicht	Einzelpakete nach Zerlegung für den Transport ca. 50 kg.	65,7 kg	✗
Ergonomie					
	F	Probenraum	400 mm x 200 mm x 100 mm	400 mm x 300 mm x 450 mm	✓
	W	Arbeitshöhe	700 mm – 1000 mm	ca. 750 mm	✓
Kinematik					
	F	Probenbewegung	Die Probe muss sich in drei Achsen linear und einer Rotation bewegen lassen.	erfüllt	✓
Wartung					
	W	Hardware	Der Zugang zur Hardware möglichst einfach.	erfüllt	✓
	W	Hardwaretausch	Hardware ist durch Universalhalterungen austauschbar.	erfüllt	✓
	F	Wartung/ Montage	Wartungs- und Montageplan werden bereitgestellt.	erfüllt	✓

Transport					
	W	Verbringung	Die Bewegung der Gesamtkonstruktion ist mit einem Standard Hubwagen möglich.	erfüllt	✓
Sicherheitskonzept					
	F	Betrieb	Die Apparatur soll sich als ortsfestes Vollschutzgerät unter kontrollierten Bedingungen betreiben lassen.	erfüllt	✓

5.2 Individuelle Einschätzung und Bewertung

Innerhalb dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass die technische und konstruktive Umsetzung einer Anlage, wie sie durch den Auftraggeber gewünscht wird, möglich ist. Je nach Priorisierung der Vorgaben und Wünsche sind Einschränkungen zu erwarten.

Eine Segmentierung, bei der alle zu transportierenden Anlagenteile ein Gewicht unter 50 kg haben, sind bei der vorgeschlagenen Lösung beispielsweise nicht möglich. Auch die geschätzten Rohstoffkosten von ca. 49.000 € können gegebenenfalls in weiteren und detaillierten Konstruktionen optimiert werden. Eine weitere Reduzierung des Gewichtes und der Kosten sind nur begrenzt möglich. Die Kosten könnten über andere Werkstoffkombination gesenkt werden. Dem steht jedoch die Erhöhung des Gesamtgewichtes der Anlage entgegen, da weitere Stützstrukturen notwendig sind. Die Reduzierung von Kosten und Gewicht sind oft gegenläufig.



Abbildung 5-1 * Darstellung der Gegenläufigkeit von Kosten und Gewicht

Eine Optimierung kann erst erfolgen, wenn die integrierte Hardware abschließend definiert wurde. Gegebenenfalls können Kosten durch Optimierung von Geometrien und Dimensionen reduziert werden.

5.3 Anmerkungen

Die Anlage kann in vielen Detailkonstruktionen verbessert werden. Ein Beispiel ist der Einsatz von Niob und Wolfram, der jedoch sehr kostenintensiv wäre. Diese Bereiche könnten auch durch günstigere Blei-/ Stahlkombination ersetzt werden. Da es sich bei Stahl aber um eine Legierung handelt, muss die Absorption gesondert gerechnet werden.

Der Bereich des Probendeckels könnte ebenfalls komfortabler konstruiert werden. Eine Schwalbenschwanzführung neigt zum Klemmen. Abhilfe könnte ein lineares Rollenlager schaffen.

Es konnte gezeigt werden, dass durch eine geänderte Priorisierung der Vorgaben und Wünsche noch Gestaltungsspielraum bei der Konstruktion vorhanden sind. Dabei müssen Vor- und Nachteile immer abgewogen und Auswirkungen auf andere Teilbereiche analysiert werden.

Anhang

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung, D. (Januar 2018). DIN 54113 "Zerstörungsfreie Prüfung – Strahlenschutzregeln für die technische Anwendung von Röntgeneinrichtungen bis 1 MV".
- [2] Dirk Eidmüller. (21. 02 2020). *Welt der Physik*.
<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/atome-und-molekuele/atome-und-quantenphysik/das-bohrsche-atommodell-in-der-heutigen-physik/> abgerufen
- [3] Hans-Gerrit Vogt, Heinrich Schulz. (2007). *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes*. Carl Hanser Verlag München Wien.
- [4] Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft. (21. 02 2020). *Helmholtz Spitzenforschung*.
https://www.helmholtz.de/ueber_uns/helmholtz_zentren/zentren_a_z/zentrum/detailansicht/deutsches-elektronen-synchrotron-desy-1/ abgerufen
- [5] Internetpräsenz der HZG. (10. 12 2019). *Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V.*
https://www.helmholtz.de/ueber_uns/helmholtz_zentren/zentren_a_z/zentrum/detailansicht/deutsches-elektronen-synchrotron-desy-1/ abgerufen
- [5] Matek, R. (2017). *Maschinenelemente*. München: Springer Vieweg.
- [6] StrlSchG. (2017). Gesetz zum Schutz vor der Wirkung ionisierender Strahlung.
- [7] StrlSchV. (2017). Verordnung zum Schutz vor der Wirkung ionisierender Strahlen.
- [8] Reemers Publishing. (21. 2 2020). *Die Welt der Strahlen und Wellen*.
https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527410996_c01.pdf abgerufen
- [9] Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft. (November 2019). VDI 2221 "Entwicklung technischer Produkte und Systeme".
- [10] Christian G. Schroer. (12. 02 2019). Tomography of Cuneiform Tablets.
- [11] Deutsches Institut für Normung. (27. 02 2020). DIN 18040 Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude.

A. Strahlungsquellen (Röntgenröhren)

Röntgenröhre wird als Platzhalter (Dummy) gesetzt

Produktname:	Microfocus X-ray tube XWT-160-THE
Röhren Spannung:	160 [kV]
Röhrenleistung:	20 [W]
Röhrenfokus:	20 [μm]
Gewicht:	ca. 30 kg (ohne Transformator)

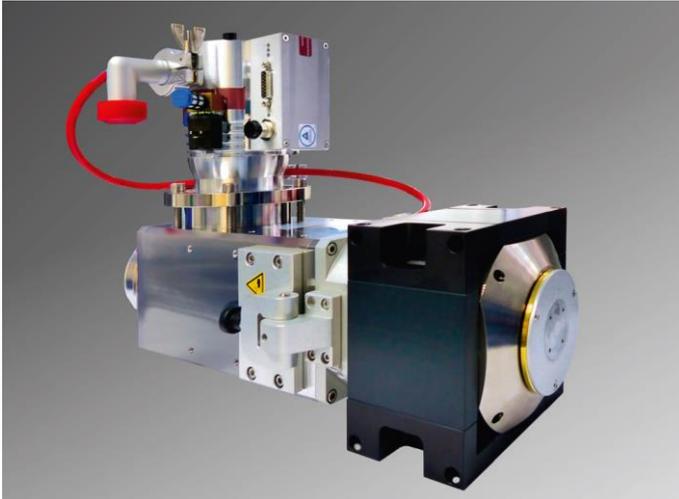


Abbildung 0-1 Aufnahme Microfocus X-ray Tube XWT-160-THE

[Quelle: Produktdatenblatt X-ray WorX]

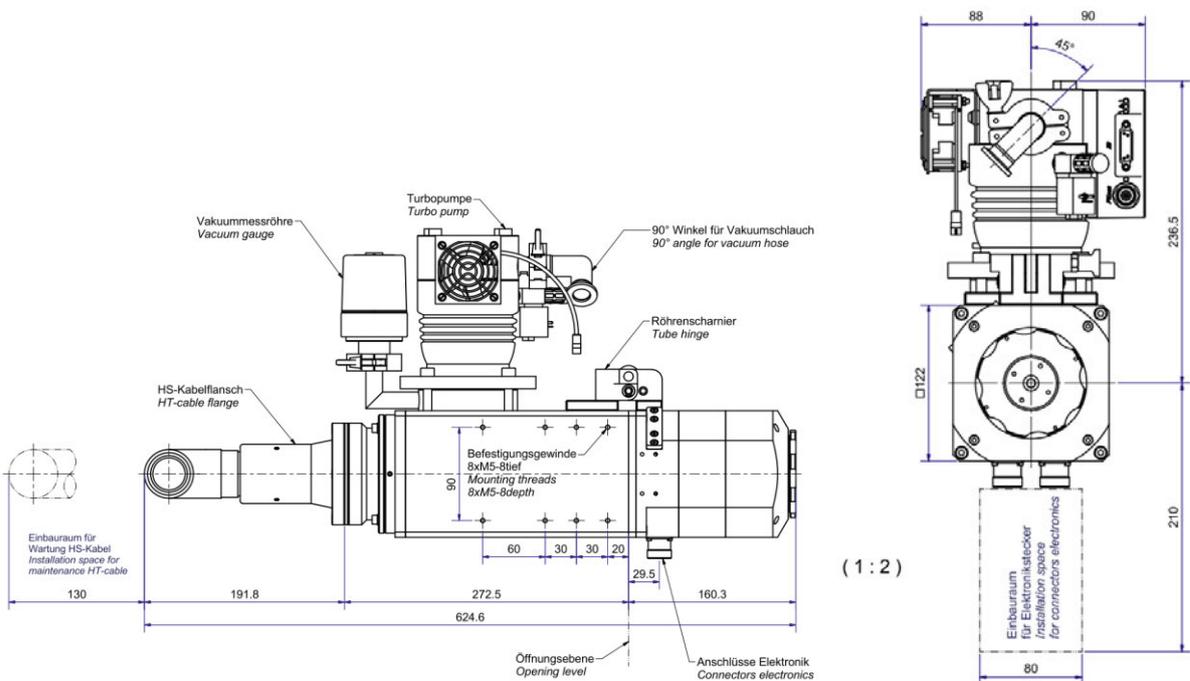


Abbildung 0-2 Seitenansichten mit Maßen Röntgenröhre

[Quelle: Produktdatenblatt X-ray WorX]

B. Röntgendetektor

Detektor wird als Platzhalter (Dummy) gesetzt

Referenzwerte und Maße des Detektors Lambda by Spectrum

CdTeSensor 1536x512 Pixel, 55µm Pixel Size 42mmx28mm



Abbildung 0-3 Seitenansicht eines Lambda 750K

[Quelle: <https://x-spectrum.de/products/lambda-350k750k/>]

Technische Informationen

Maße: 405x100x120 mm³

Gewicht: 5 kg

Kühlung: Luftgekühlt



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

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

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

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

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

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Stehlmann-Polewicz

Vorname: Jan

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

Designkonzept für eine Röntgenapparatur zur Erforschung von historischen Artefakten

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

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

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

Hamburg

Ort

29.02.2020

Datum


Unterschrift im Original