

Fachhochschule Aachen

Campus Jülich

Fachbereich 10: Energietechnik

Maschinenbau PLuS  
Ausbildungsintegrierender Studiengang

Thermische Analyse der Wärmeflüsse  
eines Mesitylen-Neutronen-Moderator-Systems  
im kryogenen Temperaturbereich

Bachelorarbeit von Robin Jürgen Similon

Jülich, 09.2019



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

---

Ort, Datum

---

Robin Similon

Diese Arbeit wurde betreut von:

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



# Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS .....	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VII
TABELLENVERZEICHNIS.....	VIII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	VIII
KURZFASSUNG .....	IX
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 NEUTRONENFORSCHUNG WELTWEIT .....	1
1.2 NEUTRONENFORSCHUNG IN JÜLICH.....	2
1.3 AUFBAU EINER NEUTRONENQUELLE .....	2
<b>2 VERSUCHSTESTSTAND .....</b>	<b>5</b>
2.1 MESITYLEN ALS MODERATORMATERIAL.....	5
2.2 KONSTRUKTION DES TESTSTANDES .....	6
2.2.1 <i>Thermischer Moderator</i> .....	7
2.2.2 <i>Mesitylenbehälter</i> .....	7
2.2.3 <i>Vakuumeinhausung</i> .....	7
2.2.4 <i>Kreuzkopf</i> .....	8
2.2.5 <i>Kalkopf</i> .....	8
<b>3 ABSCHÄTZUNG DER WÄRMEFLÜSSE .....</b>	<b>11</b>
3.1 ALLGEMEINES .....	11
3.1.1 <i>Formeln der Wärmestrahlungsberechnung</i> .....	14
3.1.2 <i>Konstanten der Wärmestrahlungsberechnung</i> .....	14
3.1.3 <i>Formeln der Wärmeleitungsberechnung</i> .....	15
3.1.4 <i>Konstanten der Wärmeleitungsberechnung</i> .....	16
3.1.5 <i>Geometrie und weitere Parameter</i> .....	17
3.2 WÄRMEEINTRÄGE DURCH WÄRMESTRAHLUNG .....	18
3.2.1 <i>Strahlung vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter</i> .....	18
3.2.2 <i>Strahlung vom Vakuumrohr auf die Mesitylenleitungen</i> .....	21
3.2.3 <i>Strahlung vom Vakuumrohr auf die Wärmebrücke</i> .....	23
3.3 WÄRMEEINTRÄGE DURCH WÄRMELEITUNG .....	25
3.3.1 <i>Wärmeleitfähigkeit des Vakuums</i> .....	25
3.3.2 <i>Wärmeleitung vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter</i> .....	28
3.3.3 <i>Wärmeleitung vom Vakuumrohr auf die Mesitylenleitungen</i> .....	30
3.3.4 <i>Wärmeleitung durch die Metalle entlang der Mesitylenleitungen</i> .....	31
3.3.5 <i>Wärmeleitung durch die Stege des Abstandhalters</i> .....	33
3.3.6 <i>Wärmeleitung durch das Metall der Heizkabel</i> .....	34

3.3.7	<i>Wärmeleitung vom Vakuumrohr auf die Wärmebrücke</i> .....	35
3.4	SUMME DER WÄRMEEINTRÄGE .....	36
<b>4</b>	<b>THERMISCH STATIONÄRE ANALYSE</b> .....	<b>37</b>
4.1	THEORIE DER FINITE ELEMENTE METHODE.....	37
4.2	SIMULATION DER WÄRMEFLÜSSE.....	38
4.2.1	<i>Idee</i> .....	38
4.2.2	<i>Geometrie</i> .....	38
4.2.3	<i>Vernetzung</i> .....	40
4.2.4	<i>Randbedingungen</i> .....	42
4.2.5	<i>Ergebnis</i> .....	44
4.3	MODERATORSYSTEM BEI MAXIMALER KÜHLUNG .....	47
4.3.1	<i>Idee</i> .....	47
4.3.2	<i>Randbedingungen</i> .....	47
4.3.3	<i>Ergebnis</i> .....	48
4.4	MODERATORSYSTEM BEI GESTEUERTEM GEGENHEIZEN.....	51
4.4.1	<i>Idee</i> .....	51
4.4.2	<i>Randbedingungen</i> .....	51
4.4.3	<i>Ergebnis</i> .....	51
<b>5</b>	<b>THERMISCH TRANSIENTE ANALYSE</b> .....	<b>55</b>
5.1	MODELLERSTELLUNG.....	55
5.2	LEISTUNGSVERLAUF.....	57
5.3	ERGEBNIS .....	58
<b>6</b>	<b>DISKUSSION DER ANNAHMEN</b> .....	<b>61</b>
6.1	VERGLEICH ABSCHÄTZUNG ZU SIMULATION.....	61
6.2	MODERATORSYSTEM BEI MAXIMALER KÜHLUNG .....	63
6.3	MODERATORSYSTEM BEI GESTEUERTEM GEGENHEIZEN.....	64
6.4	BERECHNUNG DER ABKÜHLDAUER .....	65
<b>7</b>	<b>ERGEBNISSE UND AUSBLICK</b> .....	<b>67</b>
7.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	67
7.2	WEITERE MÖGLICHE AUFGABEN .....	67
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>69</b>
	<b>ANHANG</b> .....	<b>71</b>

# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: SCHEMATISCHER AUFBAU NOVA ERA .....	3
ABBILDUNG 2: MODERATOR-SYSTEM .....	6
ABBILDUNG 3: KALTKOPF FUNKTIONSPROZESS .....	9
ABBILDUNG 4: SKIZZIERUNG WÄRMEFLÜSSE.....	12
ABBILDUNG 5: MESITYLENVAKUUMROHR UND -BEHÄLTER .....	18
ABBILDUNG 6: MESITYLENVAKUUMROHR UND -LEITUNG.....	21
ABBILDUNG 7: WÄRMEBRÜCKE UND VAKUUMROHR .....	23
ABBILDUNG 8: MESITYLENLEITUNG.....	31
ABBILDUNG 9: STEG ABSTANDHALTER.....	33
ABBILDUNG 10: GESCHNITTENE GEOMETRIE.....	38
ABBILDUNG 11: GEOMETRIE INNERER BAUTEILE.....	39
ABBILDUNG 12: VERNETZUNG ÄUßERER BAUTEILE .....	41
ABBILDUNG 13: VERNETZUNG INNERER BAUTEILE .....	41
ABBILDUNG 14: WARME FLÄCHEN .....	42
ABBILDUNG 15: STRAHLUNGSFLÄCHEN .....	43
ABBILDUNG 16: KALTE FLÄCHE.....	44
ABBILDUNG 17: SIMULIERTER TEMPERATURVERLAUF.....	48
ABBILDUNG 18: LEISTUNGSVERLAUF KALTKOPF.....	49
ABBILDUNG 19: VERGLEICH DER KENNLINIEN .....	49
ABBILDUNG 20: AUSSCHNITT DES VERGLEICHS DER KENNLINIEN .....	50
ABBILDUNG 21: KENNLINIEN DER ZUSATZLEISTUNGEN .....	53
ABBILDUNG 22: BETRIEBSPUNKTE DER ZUSATZLEISTUNG .....	54
ABBILDUNG 23: ANGENÄHERTER LEISTUNGSVERLAUF .....	57
ABBILDUNG 24: ABKÜHLVORGANG.....	59

# Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: FORMELN FÜR WÄRMESTRAHLUNG .....	14
TABELLE 2: KONSTANTEN FÜR WÄRMESTRAHLUNG .....	14
TABELLE 3: FORMELN FÜR WÄRMELEITUNG .....	15
TABELLE 4: KONSTANTEN FÜR WÄRMELEITUNG.....	16
TABELLE 5: RELEVANTE PARAMETER .....	17
TABELLE 6: SUMMIERTE WÄRMEEINTRÄGE .....	36
TABELLE 7: WÄRMEEINTRÄGE SIMULATION .....	46
TABELLE 8: SIMULIERTER TEMPERATURVERLAUF .....	48
TABELLE 9: MESSPUNKTE DER ZUSATZLEISTUNG .....	52
TABELLE 10: BETRIEBSPUNKTE DER ZUSATZLEISTUNG.....	54
TABELLE 11: MATERIALEIGENSCHAFTEN.....	56
TABELLE 12: INTERVALLE.....	58

# Abkürzungsverzeichnis

CANS	Compact accelerator based neutron sources
ESS	European Spallation Source
FEM	Finite-Elemente-Methode
HBS	High Brilliance Neutron Source
ILL	Institut Laue-Langevin
JCNS	Jülich Centre for Neutron Science
MLZ	Heinz Maier-Leibnitz Zentrum
NOVA ERA	Neutrons obtained via accelerator for education and research activities

# Kurzfassung

Im Bereich der Neutronenforschung werden Moderatoren benötigt, um die Energie der Neutronen zu verändern. Kryogene Moderatorsysteme werden dabei für das Erzeugen von kalten Neutronen mit geringerem Energieniveau benötigt.

Das erste Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der kryogenen Betriebstemperatur des Moderatorsystems, welches in der vorausgegangenen Arbeit konstruiert worden ist. Die Konstruktion hat darauf abgezielt, mit der vorhandenen Kühlleistung eine möglichst geringe Moderatorbetriebstemperatur zu erreichen. Diese Betriebstemperatur wird im Zuge dieser Arbeit berechnet. Ein weiteres Ziel stellt die Temperatursteuerung dar. Die Temperatur des Moderatormaterials soll durch den Einsatz von zusätzlichen Heizströmen in einem Bereich vom minimalen Betriebspunkt bis 70 K gesteuert werden. Zuletzt wird eine Aussage über die Dauer des Abkühlvorgangs getroffen.

Für das erste Ziel wird zunächst eine händische Berechnung der größten Wärmeeinträge durchgeführt, welche durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung entstehen. Dadurch wird ersichtlich, dass ein auf das System im Betriebszustand wirkender Wärmeeintrag von weniger als 10 W zu erwarten ist. Aufbauend darauf wird ein Simulationsmodell erstellt, welches die gleichen Randbedingungen besitzt, um damit die zuvor berechneten Wärmeeinträge mit einer zweiten Methode zu berechnen. Ein Vergleich der händischen Berechnung mit der Simulation ergibt, dass das Simulationsmodell realistische Ergebnisse liefert und im Folgenden verwendet werden kann.

Im zweiten Schritt werden die Randbedingungen der Simulation an den realen Aufbau angepasst, wodurch das Kühlverhalten des verwendeten Kühlsystems simuliert wird. Diese Simulation führt zu dem Ergebnis, dass sich im Moderatormaterial eine Betriebstemperatur von 22 K einstellt.

Der Einfluss eines Heizkabels ist durch eine Erweiterung der Randbedingungen um einen zusätzlichen Wärmestrom abgebildet. Dadurch wird die Möglichkeit einer Steuerung der Moderatortemperatur erzielt. Es wird gezeigt, dass für einen Temperaturbereich von der minimalen Betriebstemperatur bis zu 70 K eine zusätzliche Heizleistung von 50 W erforderlich ist. Zuletzt wird die Abkühldauer ermittelt. Eine analytische Berechnung ergibt eine Zeit von 50 Minuten für das Abkühlen des Moderatorsystems von Raumtemperatur bis zur Betriebstemperatur des Kaltkopfes. Das Ergebnis trägt zur zeitlichen Planung der Inbetriebnahme des Moderatorteststandes und einer anstehenden Messkampagne bei.



# 1 Einleitung

## 1.1 Neutronenforschung weltweit

„Die Forschung mit Neutronen leistet entscheidende und unersetzliche Beiträge zu den großen Herausforderungen der modernen Industriegesellschaften wie Energieversorgung, Gesundheit, Umwelt, Verkehr und Informationstechnologie“ [1, S. 6]. Diese Beiträge bestehen unter anderem aus der Prüfung, der Entwicklung und der Optimierung neuer Werkstoffe. Beispiele für Anwendungsgebiete in der Energieforschung sind unter anderem die Entwicklung von Energiespeichern oder das Vorantreiben der Kraftwerkstechnologie. Im Gebiet der Gesundheit und der Medizin können durch die Neutronenforschung beispielsweise neue Erkenntnisse über die molekularen Grundlagen von Alzheimer erlangt werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit besteht in der Strahlentherapie. So können Tumore nahe der Oberfläche durch Neutronenstrahlung besser behandelt werden als mit konventionellen Therapien.

Dank der Neutronenforschung können Verunreinigungen in der Umwelt wie Spurenelemente in kleineren Konzentrationen als bisher nachgewiesen werden. Ein weiterer Nutzen entsteht für die Solar- und Photovoltaiktechnik, da dort Materialien mit extremer mechanischer und thermischer Widerstandsfähigkeit benötigt werden. Die Möglichkeit der Materialprüfung kommt auch dem Bereich Verkehr zu Gute, da dort zum Beispiel Schweißnähte zerstörungsfrei analysiert werden können. Nicht zuletzt ist der Nutzen der Forschung mit Neutronen für die Informationstechnologie zu nennen, da hier neuartige Lösungen der Informationsspeicherung und des Informationsaustauschs entwickelt werden. Dazu zählt beispielsweise die Spintronik, bei der die Informationen nicht nur durch die Ladung der Elektronen verarbeitet werden, sondern auch durch deren Rotation.

Um all diese Anforderungen abdecken zu können, wird die Neutronenforschung weltweit an vielen Forschungseinrichtungen betrieben. Zu den bekanntesten Einrichtungen zählen ILL (Institut Laue-Langevin) in Frankreich, MLZ (Heinz Maier-Leibnitz Zentrum) in Deutschland und ESS (European Spallation Source) in Schweden [2, C7.2]. Weitere Forschungseinrichtungen sind weltweit zu finden, beispielsweise in Japan und den USA.

## 1.2 Neutronenforschung in Jülich

Die Verfügbarkeit vieler dieser Quellen sinkt in Europa aufgrund der Abschaltung alter Forschungsreaktoren und wird auch weiterhin sinken [3, S. 69 f.]. Um die Verfügbarkeit von Neutronen für das breite Feld von Anwendungen nachhaltig und dauerhaft sicherstellen zu können, wird im Rahmen des HBS (High Brilliance Neutron Source) Projekts am Forschungszentrum Jülich eine neue, kompakte, beschleunigergetriebene Neutronenquelle (compact accelerator based neutron source, CANS) entwickelt.

Diese Art der kompakten Quellen erfordert neben weiteren Komponenten auch einen neuen Typ von kalten Moderatoren. Im Gegensatz zu den an bestehenden Neutronenquellen eingesetzten kalten Moderatoren, die mehrere Instrumente versorgen, werden die kalten HBS-Moderatoren jeweils genau ein Instrument mit Neutronen versorgen. Diese Besonderheit ermöglicht die Anpassung des Neutronenspektrums auf die Anforderungen der jeweiligen Anwendung. Ein aussichtsreiches Neutronenmoderator-Material ist neben Wasserstoff und festem Methan auch Mesitylen.

## 1.3 Aufbau einer Neutronenquelle

Im Folgenden wird der Aufbau der Neutronenquelle NOVA ERA (Neutrons Obtained Via Accelerator for Education and Research Activities) beschrieben, welche zurzeit am Institut JCNS (Jülich Centre for Neutron Science) des Forschungszentrums Jülich entwickelt wird. Protonen werden aus einer Ionenquelle in Richtung eines Beschleunigers emittiert. Durch die Pulsung der Ionenquelle wird auch ein gepulster Protonenstrahl mit einer Energie von 10 MeV und einem Strom im Puls von 10 mA erzeugt. Die durchschnittliche Strahlleistung beträgt dabei 400 W.

Die beschleunigten Protonen treffen auf das Target. Dieses besteht aus einer dünnen Metallscheibe, beispielsweise Beryllium, Tantal oder Vanadium. Bei den im Target stattfindenden Kernreaktionen werden freie Neutronen erzeugt. Diese Neutronen besitzen eine hohe Energie und somit eine hohe Geschwindigkeit, weswegen sie schnelle Neutronen genannt werden. Im thermischen Moderator werden diese dann moderiert. Die Moderation ist ein Prozess, bei dem die schnellen Neutronen durch elastische Stöße mit den Atomkernen im Moderatormaterial gebremst werden. Je leichter dabei die Atomkerne des Moderators sind, desto größer ist die Abbremsung je Kollision. Im Fall der NOVA ERA wird Polyethylen aufgrund des hohen Wasserstoffanteils verwendet. Die nun vorhandenen leicht abgesehenen Neutronen mit einem leicht verringerten Energieniveau werden thermische

Neutronen genannt. In der zweiten Phase der Moderation treffen die Neutronen auf den so genannten kalten Moderator. Hier werden die Neutronen ebenfalls gebremst und auf ein noch geringeres Energieniveau gebracht. Im Anschluss daran werden die kalten Neutronen zu den Neutronenstreulinstrumenten geleitet, die genau diese Art von Energieniveau benötigen. Die thermischen und schnellen Neutronen werden ebenfalls zu entsprechenden Testständen geleitet.

In Abbildung 1 ist der Aufbau skizziert. Dargestellt sind die zuvor beschriebenen Komponenten. Dazu zählen die Ionenquelle, der Beschleuniger, das Target innerhalb der beiden Moderatoren sowie die Instrumentierung für kalte, thermische und schnelle Neutronen.

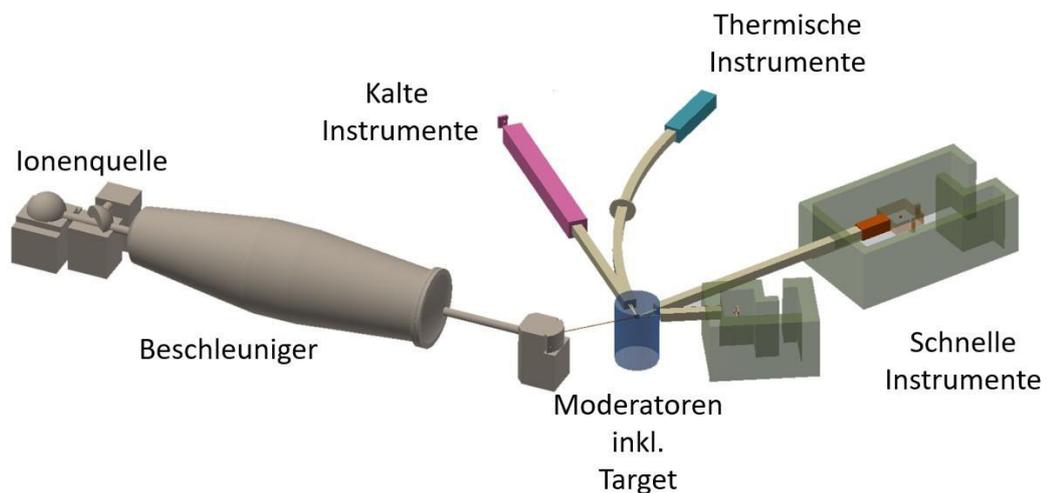


Abbildung 1: Schematischer Aufbau NOVA ERA

Quelle: [4, S. 10]



## 2 Versuchsteststand

### 2.1 Mesitylen als Moderatormaterial

Mesitylen ist als Material für einen kalten Moderator aus technischer Sicht sehr vielversprechend. Im Vergleich zu den verbreiteten Moderatormaterialien Wasserstoff und Methan findet nämlich keine Kondensation während des Abkühlprozesses von Raumtemperatur bis zur Betriebstemperatur statt. Da somit eine plötzliche Volumenänderung des Mediums verhindert wird, entfällt ebenso das Risiko einer starken Druckerhöhung im geschlossenen Behälter und damit auch das größte Gefahrenpotential.

Zudem ist die Handhabung und Lagerung des Mediums anwendungsfreundlicher. Durch einfachere Schutzmaßnahmen können die Gefahrenpotenziale Entflammbarkeit, Augen- und Hautreizungen sowie falsches Entsorgen vermieden werden.

Darüber hinaus können durch den Einsatz von Mesitylen als Moderatormaterial weitere Energiespektren für Instrumentierungen bereitgestellt werden, als bisher mit Wasserstoff oder Methan möglich ist. Somit soll erreicht werden, dass optimierte Moderatoren für einen breiteren Anwendungsbereich zu Verfügung gestellt werden.

Aus diesen Gründen wird die Verwendung von Mesitylen als Material eines Moderators untersucht.

Aufgrund einer unzureichenden Datenlage sind jedoch für die Auslegung von kalten Mesitylen-Moderatoren experimentelle Messungen notwendig, um entsprechende Neutronikprogramme zu validieren. Solche Messungen benötigen einen Teststand mit kontrollierter Umgebung, welcher im Nachfolgenden behandelt wird.

## 2.2 Konstruktion des Teststandes

Der Aufbau des Moderator-Systems des Teststandes besteht aus einzelnen Baugruppen. Abbildung 2 zeigt in einer geschnittenen isometrischen Ansicht einen Mesitylenbehälter inklusive Leitungsanschlüssen (I), dessen Vakuumeinhausung zur Wärmeisolierung (II), einen Kreuzkopf zum Anbringen aller Durchführungen durch die Vakuumschleuse (III) sowie einen Kaltkopf und dessen Wärmebrücke zur Kühlung des Behälters (IV). Es gehört ein thermischer Moderator zum Aufbau des Teststandes, da dessen Konstruktion und thermischen Eigenschaften aber nicht Teil dieser Arbeit sind, liegt der Fokus auf den zuvor genannten Baugruppen.

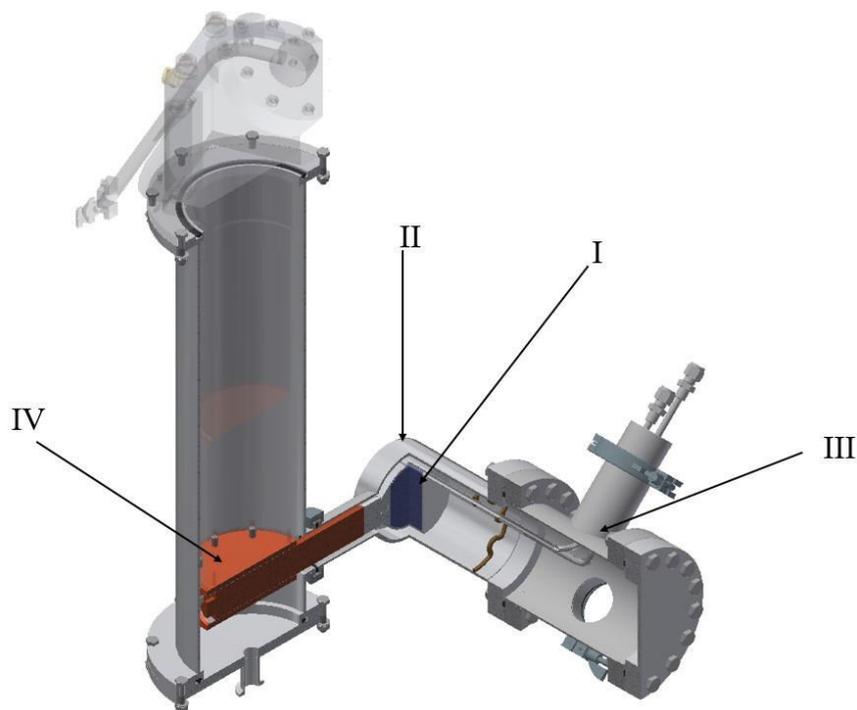


Abbildung 2: Moderator-System

Es soll zunächst ein Überblick über die wichtigsten geometrischen Parameter der Bauteile gegeben werden. Zudem werden im Folgenden die Eigenschaften, die Positionierung und die Aufgaben der Baugruppen erläutert. Weitere Details zur Konstruktion lassen sich aus den Konstruktionszeichnungen aller erstellten Bauteile im Anhang ablesen. Sowohl die Einzelteilzeichnungen als auch die Baugruppenzeichnungen mit Stücklisten befinden sich in Anhang 2.

### 2.2.1 Thermischer Moderator

Der thermische Moderator ist zwar nicht Bestandteil der Analyse der Wärmeflüsse, spielt aber für die Funktion und die Konstruktion des Moderator-Systems eine wichtige Rolle. Die generelle Funktion eines Moderators wird in Kapitel 1.3 näher erläutert.

Der thermische Moderator ist aus Blöcken aus Polyethylen gefertigt, aus denen die Umrisse der Vakuumeinhausung des kalten Moderator-Systems herausgearbeitet sind. Aus diesem Grund ist bei der Auslegung der Länge der Wärmebrücke ein Kompromiss zu finden, um den Abstand zwischen Kühlung und Mesitylen möglichst gering zu halten, ohne jedoch zu viel Volumen des thermischen Moderators wegzuschneiden.

### 2.2.2 Mesitylenbehälter

Der Mesitylenbehälter ist die Kernkomponente des Aufbaus. Darin befindet sich das Mesitylen, das als kalter Neutronen-Moderator dient. Das Mesitylenvolumen besitzt annähernd die Form eines Zylinders mit einem Durchmesser vom 60 mm und einer Länge von 30 mm. Der das Mesitylen umschließende Behälter selber besteht aus einem zylindrischen Behälter mit Boden, einem Deckel und zwei eingeschweißten Leitungen, die als Zu- und Rückleitung für das Mesitylen dienen. Durch diese beiden Leitungen kann das Mesitylen eingefüllt werden und gleichzeitig die dadurch verdrängte Luft entweichen. Die Leitungen werden zum Teil aus Aluminium gefertigt, um ein Anschweißen an den Behälter zu ermöglichen. Zum anderen Teil werden die Leitungen zu Isolationszwecken aus Edelstahl gefertigt. Sie werden in ihrer Position durch einen Abstandhalter gehalten. Dieser verhindert, dass die Leitungen an die Vakuumrohrwand stoßen oder in die Flugbahn der Neutronen geraten. Der gesamte Mesitylenbehälter besteht aus Aluminium, da dieses Material mit seiner hohen mittleren freien Weglänge für Neutronen [5] im Vergleich zu anderen Metallen und der geringen Wandstärke den Neutronenfluss nur sehr gering beeinflusst.

### 2.2.3 Vakuumeinhausung

Die Vakuumeinhausung um den Mesitylenbehälter und um dessen angrenzende Bauteile dient der Wärmeisolierung. Zwar isoliert eine Vakuumschicht im Vergleich zu anderen Isolatoren sehr gut, ein Restbetrag an Wärmeleitung kann aber nicht ausgeschlossen werden. Je höher das Vakuum ist, desto geringer ist die Wärmeleitfähigkeit. Durch einen sehr geringen Luftdruck wird also ein Volumen erzeugt, welches eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Somit werden die Wärmeeinträge von der warmen Umgebung zum kalten Mesitylenbehälter durch Wärmeleitung und Konvektion deutlich reduziert. Die Vakuumeinhausung besteht in der Nähe des Targets aus Aluminium, um die dortigen

höheren Neutronenflüsse so wenig wie möglich abzuschirmen und die Menge an langlebigen aktivierten Materialien zu minimieren. Außerhalb des hohen Neutronenflusses wird Edelstahl verwendet, da dieses Material üblicherweise bei der Produktion von Kaufteilen wie Anschlussflanschen verwendet wird und eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

#### **2.2.4 Kreuzkopf**

An die Vakuumeinhausung angeflanscht befindet sich der Kreuzkopf. Dieser stellt die Flansche für die Durchführungen bereit, die zum Gegenheizen mit zusätzlichen Heizkabeln, zum Temperaturmessen und Behälterfüllen sowie zur Vakuumerzeugung notwendig sind. Der Name des Kreuzkopfes basiert auf der Anordnung der vier Durchführungen in einem Winkel von jeweils  $90^\circ$  zueinander, welche die Form eines Kreuzes bilden. Gegenüber der Vakuumeinhausung befindet sich am Kaltkopf das Austrittsfenster für den Neutronenfluss. Dieses wird aus den zuvor genannten Gründen aus Aluminium gefertigt und im Bereich des Neutronenflusses mit einer geringen Wandstärke versehen. Das Austrittsfenster wird mit dem Kreuzkopf verschraubt. Die Flansche der Durchführungen und der Kreuzkopf selber sind aus Edelstahl gefertigt.

#### **2.2.5 Kaltkopf**

Der Kaltkopf dient als Kühlung des Mesitylens. Die Wärmeeinträge auf den Mesitylenbehälter werden durch eine Wärmebrücke abgeführt und in den Kaltkopf geleitet. Die Wärmebrücke besteht aus einem im Behälter verschraubten Aluminiumrundstab, welcher über eine Reibschweißverbindung mit einem Kupferrundstab verschweißt ist. Zu den wichtigsten geometrischen Parametern dieser Baugruppe zählen der Durchmesser der Wärmebrücke von 30 mm und der Durchmesser der Anschlussfläche des Kaltkopfes von 108 mm. Der Kaltkopf und die Wärmebrücke befinden sich in einem Isolationsvakuum.

Das Wirkprinzip eines Kaltkopfes beziehungsweise eines kryogenen Kühlers basiert auf dem Stirling-Kreisprozess. Der Aufbau dieses Prozesses besteht aus je einem Kolben an beiden Enden eines gasgefüllten Rohres und einem mittig angebrachten Regenerator. Der schematische Aufbau und der Funktionsprozess sind in Abbildung 3 dargestellt. Gezeigt werden die vier Schritte des Funktionsprozesses innerhalb des Kaltkopfes. Die Position beider Kolben innerhalb des schwarz gefärbten Rohres ist grau dargestellt, das mit Gas gefüllte Volumen gelb und der Regenerator grün.

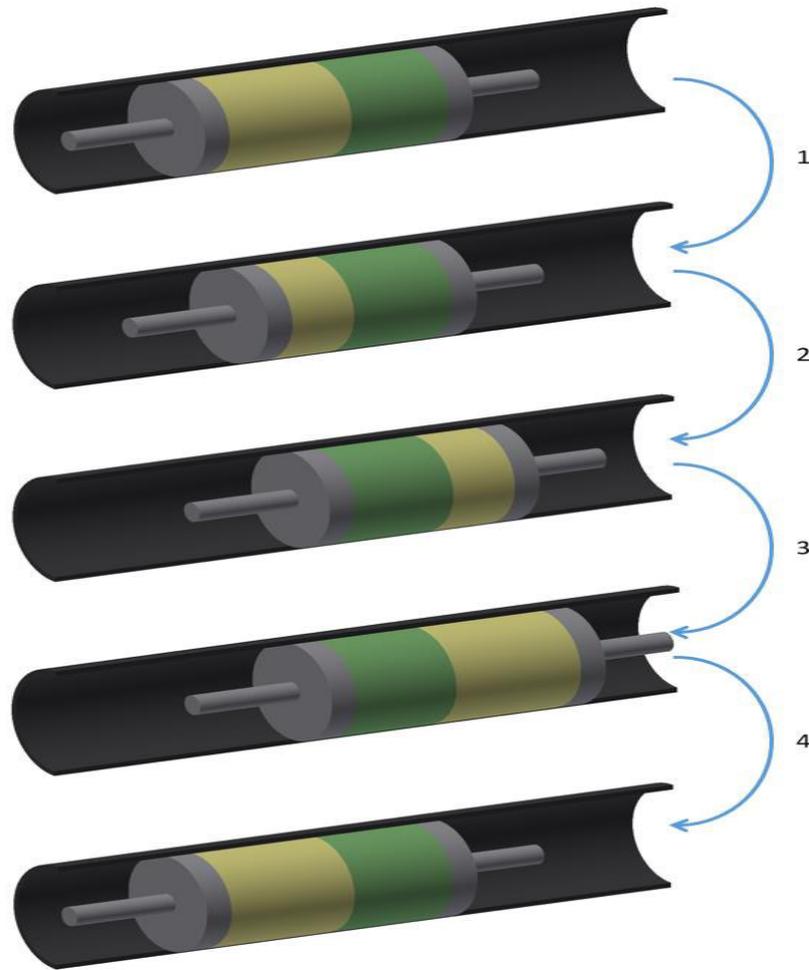


Abbildung 3: Kaltkopf Funktionsprozess

Zu Beginn befinden sich beide Kolben in der linken Endposition. Der linke Kolben bewegt sich während des ersten Schrittes isotherm nach rechts in die mittlere Stellung. Die Wärme wird nach außen abgeführt und das linke Volumen verkleinert. Bewegt sich im zweiten Schritt der linke Kolben in die rechte Endposition, strömt das Gas durch den Regenerator, gibt dort Wärme ab und bewegt den rechten Kolben in die mittlere Stellung. Im dritten Schritt, wie auch im ersten, findet eine isotherme Volumenänderung statt. Der rechte Kolben bewegt sich in die rechte Endlage. Die Temperatur des Gases ändert sich bei der Expansion nicht, da die Wärmeenergie von der Umgebung außerhalb des Rohres einfließt. Diese Wärmeenergie steht für die Kühlleistung. Während des vierten und letzten Schrittes bewegen sich beide Kolben wieder in die linke Endposition. Das Gas wird beim Durchströmen des Regenerators erwärmt. Am Ende des vierten Schrittes befindet sich das System im Ausgangszustand.



## 3 Abschätzung der Wärmeflüsse

Um eine Einschätzung der zu erreichenden Temperaturen des gesamten Systems zu erhalten, werden die Wärmeeinträge auf das kalte System abgeschätzt. Dies geschieht nach Ingenieurspraxis auf Basis des VDI Wärmeatlasses. Hierfür werden die verschiedenen Wärmeflüsse aus dem Moderatorsystem separat betrachtet und die jeweils beteiligten Komponenten auf bekannte Geometrien übertragen.

Ziel dieser Abschätzung ist es, eine Aussage über die Plausibilität der in Kapitel 4 erstellten Simulation treffen zu können. Weichen die ermittelten Wärmeeinträge der Abschätzung von denen der Simulation nicht über einen Faktor 2 ab, so kann die Simulation als verwendbar angesehen werden.

### 3.1 Allgemeines

Abbildung 4 zeigt die räumliche Anordnung der im Folgenden berechneten Wärmeflüsse. Es werden der Mesitylenbehälter mit dessen Zuleitung, das Aluminium- und Kupferbauteil der Wärmebrücke, der Abstandhalter, der Heizdraht sowie die Vakuumeinhausung in der Draufsicht der geschnittenen Baugruppe dargestellt. Die Wärmeeinträge durch Wärmestrahlung werden als grüne Pfeile, die durch Wärmeleitung als schwarze Pfeile dargestellt. Auf die Berechnung der Wärmeeinträge durch Konvektion wird in diesem Aufbau verzichtet, da aufgrund des zu erwartenden Vakuums mit einem Druck von  $10^{-3}$  mbar kaum Luft als Medium der Wärmeübertragung vorhanden ist. Zudem wird die verbleibende Luft als ruhend angenommen, was den Einfluss der Konvektion zusätzlich verringert. Im Vergleich zur Wärmeleitung und -strahlung ist der Wärmeeintrag durch Konvektion daher zu vernachlässigen.

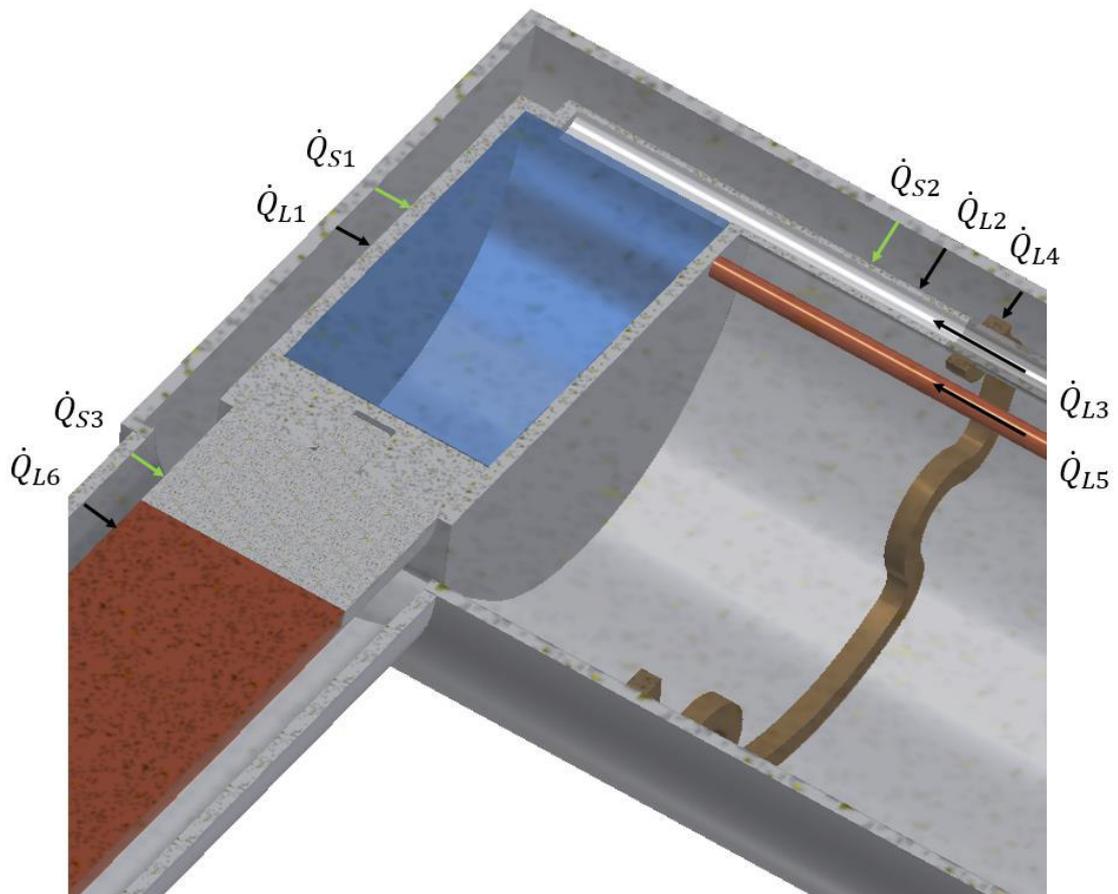


Abbildung 4: Skizzierung Wärmeflüsse

Die im Folgenden berechneten Wärmeeinträge durch Wärmestrahlung sind:

- Strahlung vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter  $\dot{Q}_{S1}$ ,
- Strahlung vom Vakuumrohr auf die Mesitylenleitungen  $\dot{Q}_{S2}$ ,
- Strahlung vom Vakuumrohr auf die Wärmebrücke  $\dot{Q}_{S3}$ .

Die im Folgenden berechneten Wärmeeinträge durch Wärmeleitung sind:

- Wärmeleitung durch das Vakuum ausgehend vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter  $\dot{Q}_{L1}$ ,
- Wärmeleitung durch das Vakuum ausgehend vom Vakuumrohr auf die Mesitylenleitungen  $\dot{Q}_{L2}$ ,
- Wärmeleitung durch die Metalle entlang der Mesitylenleitungen  $\dot{Q}_{L3}$ ,
- Wärmeleitung durch die Stege des Abstandhalters  $\dot{Q}_{L4}$ ,
- Wärmeleitung durch das Metall der Heizkabel  $\dot{Q}_{L5}$ ,
- Wärmeleitung durch das Vakuum ausgehend vom Vakuumrohr auf die Wärmebrücke  $\dot{Q}_{L6}$ .

Für die Temperaturdifferenz zwischen der Außenwand und den inneren Bauteilen, welche zur Berechnung der Wärmeeinträge nötig ist, werden folgende Annahmen getroffen:

Die erste Annahme betrifft die höhere Temperatur, also die warme Umgebung. Im realen Aufbau hat die Umgebungsluft Raumtemperatur, welche dann auf die Außenfläche der Vakuumeinhausung übertragen wird. Dabei nimmt ein Wärmeübergang an der Außenfläche Einfluss auf den zu berechnenden Wärmestrom. Im Modell wird näherungsweise die Raumtemperatur direkt auf die Innenfläche aufgeprägt. Der zu erwartende Temperaturunterschied durch das Nutzen dieser Annahme ist im Vergleich zum erheblich größeren Rechenaufwand zu vernachlässigen und für eine vorläufige Abschätzung ausreichend. Diese Annahme erzeugt rechnerisch einen höheren gesamten Wärmeeintrag auf die Baugruppe, was bedeutet, dass das Ergebnis der Berechnung der Wärmeeinträge ohne diese Annahme in Richtung einer geringeren Betriebstemperatur tendieren würde.

Die zweite Annahme bezieht sich auf die Temperatur der kalten inneren Bauteile. Um eine Einschätzung der zu erwartenden Wärmeeinträge zu erhalten, ist zunächst eine grobe Bestimmung der kalten Temperatur ausreichend. Diese Bestimmung basiert auf Erfahrungen aus der Verwendung desselben Kaltkopfes in bisherigen Messständen und auf der Minimaltemperatur des Kaltkopfes von ungefähr 12,5 K. Zudem ist aus Sicht der wissenschaftlichen Materialdatenermittlung eine Messung um 20 K wünschenswert. Die Temperatur aller inneren Bauteile wird somit näherungsweise auf 20 K festgelegt. Diese und die erste Annahme finden in allen Unterkapiteln der Abschätzung der Wärmeflüsse Anwendung.

Die Geometrie der Wärmeeinträge zwischen zwei Körpern mit gering unterschiedlicher Größe wird durch die dritte Annahme angenähert. Es wird in den jeweiligen Unterkapiteln beispielsweise die kürzere Länge zweier Zylinder zur Berechnung genutzt. Diese Annahme begründet sich dadurch, dass ein Großteil des Wärmeeintrags radial zu den betreffenden Flächen entsteht. Ein Einfluss der überstehenden Stücke der Vakuumrohre auf die einzelnen inneren Bauteile ist vernachlässigbar gering. Analog dazu findet das Vorgehen bei parallelen Oberflächen mit gering verschiedenen Größen statt. Auch hier wird für die Berechnung die Geometrie mit dem geringeren Flächeninhalt gewählt.

Im Folgenden werden die für die Berechnung der Wärmestrahlung und der Wärmeleitung notwendigen Formeln in der allgemeinen Schreibweise im Sinne der Übersichtlichkeit aufgeführt. Bei Verwendung der Formeln in den folgenden Kapiteln werden diese mit den speziellen Parametern der einzelnen Berechnungen dargestellt.

Zudem werden die Konstanten der Berechnung der Wärmeeinträge mit deren Benennung und Wert aufgeführt.

### 3.1.1 Formeln der Wärmestrahlungsberechnung

Es werden die Formeln der Berechnung der Wärmestrahlung in der allgemeinen Schreibweise in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Formeln für Wärmestrahlung

Formel	Kurzbeschreibung	Nr.	Quelle
$\dot{Q}_{12} = C_{12} * A * (T_1^4 - T_2^4)$	Wärmefluss	1	[6]
$C_{12,Man} = \frac{\sigma_B}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} * \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$	Strahlungsaustauschzahl Innen- und Mantelrohr	2	[6]
$C_{12,Sti} = \frac{\sigma_B}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$	Strahlungsaustauschzahl zweier paralleler Flächen	3	[6]

### 3.1.2 Konstanten der Wärmestrahlungsberechnung

Die konstanten Berechnungsparameter für die Wärmestrahlung sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Konstanten für Wärmestrahlung

Konstante	Kurzbeschreibung	Quelle
$\sigma_B = 5,6704 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$	Boltzmann-Konstante	[6]
$\varepsilon_{pol} = 0,09$	Emissionsverhältnis poliertes Metall	[7]

### 3.1.3 Formeln der Wärmeleitungsberechnung

Die Formeln der Berechnung der Wärmeleitung sind in der allgemeinen Schreibweise in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Formeln für Wärmeleitung

Formel	Kurzbeschreibung	Nr.	Quelle
$C_{1,x} = \frac{133 Pa}{p_{Vak}} * C_{1,x,0}$	Berechnungskonstante	4	[8]
$C_i = 0,79 * C_{i,N} + 0,21 * C_{i,O}$	Berechnungskonstante	5	[9]
$l_{Gas} = \frac{C_1}{1 + \frac{C_2}{T}}$	Mittlere freie Weglänge	6	[8]
$Kn = \frac{l_{Gas}}{\sigma}$	Knudsen-Zahl	7	[8]
$\lambda_{Gas} = \frac{\lambda_0}{1 + 2 * \beta * Kn}$	Restgaswärmeleitfähigkeit	8	[8]
$\dot{Q} = k * A * \Delta T$	Wärmefluss	9	
$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$	Mittlere Temperatur	10	
$k_{Zyl} = \frac{1}{\frac{1}{2 * \lambda} * LN\left(\frac{D_a}{D_i}\right)}$	Wärmedurchgangskoeffizient einer Zylinderwand	11	[10]
$k_{lin} = \frac{\lambda}{\sigma}$	Wärmedurchgangskoeffizient einer ebenen Wand	12	[10]
$k_{lin,doppel} = \frac{1}{\sum \frac{\sigma_i}{\lambda_i}}$	Wärmedurchgangskoeffizient mehrerer ebener Wände	13	[10]
$\dot{Q}_{Zyl} = k_{Zyl} * \pi * l * (T_1 - T_2)$	Wärmefluss in einer Zylinderwand	14	[10]
$\dot{Q}_{lin} = k_{lin} * A * (T_1 - T_2)$	Wärmefluss in einer ebenen Wand	15	[10]

### 3.1.4 Konstanten der Wärmeleitungsrechnung

Es werden in Tabelle 4 die konstanten Berechnungsparameter der Berechnung der Wärmeleitung aufgeführt. Die Angaben zur Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Materialien beziehen sich auf die Raumtemperatur.

Tabelle 4: Konstanten für Wärmeleitung

Konstante	Kurzbeschreibung	Quelle
$C_{1,n,0} = 6,1 * 10^{-5} m$	Berechnungskonstante	[8]
$C_{1,o,0} = 6,87 * 10^{-5} m$	Berechnungskonstante	[8]
$C_{2,n} = 112 K$	Berechnungskonstante	[8]
$C_{2,o} = 132 K$	Berechnungskonstante	[8]
$p_{Vak} = 0,1 Pa$	Vakuumdruck	
$\lambda_0 = 1,43 * 10^{-2} \frac{W}{m K}$	Wärmeleitfähigkeit Luft	[11]
$\beta = 1,63$	Gewichtungsfaktor	[8]
$\lambda_{Al} = 230 \frac{W}{m K}$	Wärmeleitfähigkeit Aluminium	[12]
$\lambda_{VA} = 21 \frac{W}{m K}$	Wärmeleitfähigkeit Edelstahl	[12]
$\lambda_{Ve} = 0,289 \frac{W}{m K}$	Wärmeleitfähigkeit Vespel	[13]
$\lambda_{Cu} = 372 \frac{W}{m K}$	Wärmeleitfähigkeit Kupfer	[12]
$\lambda_{Me} < 0,2 \frac{W}{m K}$	Wärmeleitfähigkeit Mesitylen	[14]

### 3.1.5 Geometrie und weitere Parameter

Die in Tabelle 5 beschriebenen geometrischen Parameter werden in den Kapiteln 3.2 und 3.3 in den dort abgebildeten Skizzen dargestellt. Die angenäherte Geometrie der einzelnen Berechnungen der Wärmeeinträge kann dadurch nachvollzogen werden.

Tabelle 5: Relevante Parameter

<b>Parameter</b>	<b>Kurzbeschreibung</b>
$D_{Heiz} = 0,003 \text{ m}$	Durchmesser des Heizdrahtes
$D_{i,Me,Leitung} = 0,004 \text{ m}$	Innendurchmesser Mesitylenleitung
$D_{Me} = 0,064 \text{ m}$	Durchmesser Mesitylenbehälter
$D_{Me,Leitung} = 0,006 \text{ m}$	Außendurchmesser Mesitylenleitung
$D_{Vak} = 0,085 \text{ m}$	Innendurchmesser Vakuumrohr
$D_{Vak,Wb} = 0,0405 \text{ m}$	Innendurchmesser Vakuumrohr um Wärmebrücke
$D_{Wb} = 0,03 \text{ m}$	Durchmesser der Wärmebrücke
$l_{Heiz} = 1 \text{ m}$	Länge des Heizdrahtes
$l_{Me} = 0,034 \text{ m}$	Länge des Mesitylenbehälters
$l_{Me,Al} = 0,03 \text{ m}$	Länge des Aluminiumstücks der Mesitylenleitung
$l_{Me,Leitung} = 0,3 \text{ m}$	Länge der Mesitylenleitung
$l_{Me,VA} = 0,27 \text{ m}$	Länge des Edelstahlstücks der Mesitylenleitung
$l_{Steg,1} = 0,003 \text{ m}$	Abmessung des Steges des Abstandhalters
$l_{Steg,2} = 0,015 \text{ m}$	Abmessung des Steges des Abstandhalters
$l_{Steg,3} = 0,0035 \text{ m}$	Abmessung des Steges des Abstandhalters
$l_{Wb,AL} = 0,03 \text{ m}$	Wärmebrücke: Länge Aluminium bis Mesitylen
$l_{Wb,Cu} = 0,13 \text{ m}$	Wärmebrücke: Länge Kupferstab bis Mitte Kaltkopf
$l_{Wb,frei} = 0,1 \text{ m}$	Freiliegende Länge der Wärmebrücke
$T_{Me} = 20 \text{ K}$	Mesitylentemperatur zur Berechnung
$T_{Raum} = 293 \text{ K}$	Raumtemperatur
$T_{Wb} = 18 \text{ K}$	Geschätzte mittlere Temperatur der Wärmebrücke
$\sigma_{Vak,Man} = 0,0105 \text{ m}$	Vakuumdicke der Mantelfläche
$\sigma_{Vak,St} = 0,005 \text{ m}$	Vakuumdicke der Stirnfläche

## 3.2 Wärmeeinträge durch Wärmestrahlung

Es folgt die Berechnung der Wärmeeinträge, welche aufgrund von Wärmestrahlung entstehen. Die größten Einträge stellen dabei Strahlung auf den Mesitylenbehälter, auf die Mesitylenleitungen sowie auf die Wärmebrücke dar. Als warme Seite der Strahlung ist in den drei folgenden Berechnungen die Innenseite des entsprechenden Vakuumrohrs gewählt. Die Berechnungen finden unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 getroffenen Annahmen statt.

### 3.2.1 Strahlung vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter

Die Berechnung des Wärmeeintrages durch Strahlung ausgehend vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter wird aufgeteilt in die Strahlung auf die Mantel- und auf die Stirnfläche des Behälters. Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf eine angenäherte Geometrie, welche in Abbildung 5 skizziert dargestellt ist. Es sind die zur Berechnung notwendigen geometrischen Parameter eingezeichnet.

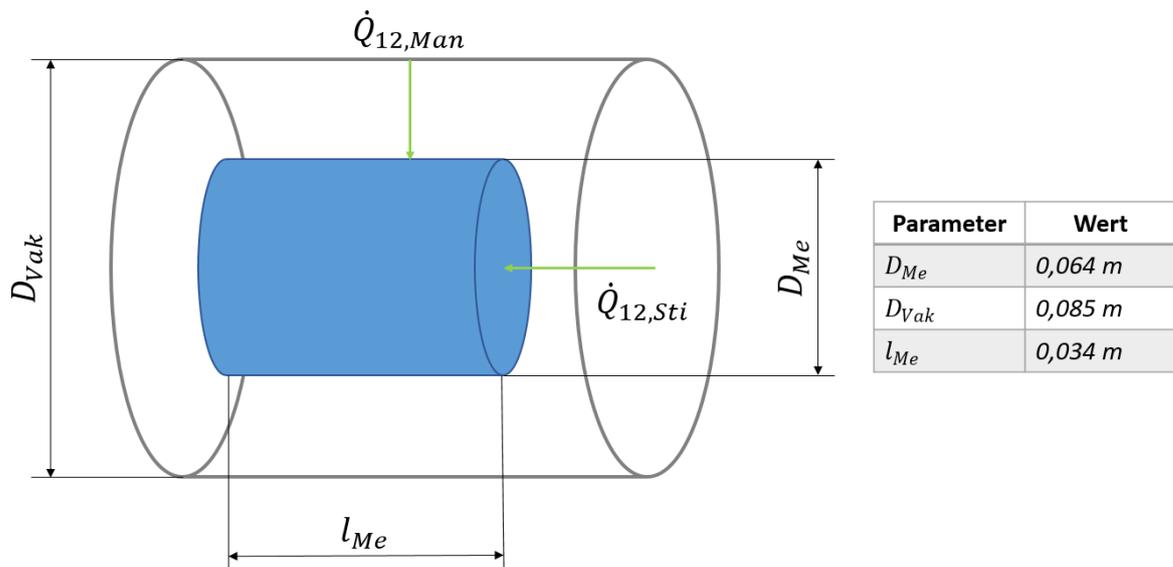


Abbildung 5: Mesitylenvakuumrohr und -behälter

#### Mantelfläche:

Diese angenäherte Geometrie besteht im ersten Fall aus zwei ineinander liegenden Zylindern, einem inneren Zylinder als Behälter und einem äußeren als Vakuumrohr. Die Strahlung des in Neutronenstrahlrichtung überstehenden Stücks des Vakuumrohres wird durch die dritte der zuvor genannten Annahmen nicht komplett vernachlässigt, sondern als Wärmeeintrag auf die Mesitylenleitungen berechnet, wie in der späteren Rechnung zu  $\dot{Q}_{S2}$  zu sehen ist.

Zuerst wird die Mantelfläche  $A_{1,Rohr}$  des äußeren Zylinders, also des Vakuumrohrs, mit dem Innendurchmesser des Vakuumrohres  $D_{Vak}$  und der Länge des Behälters  $l_{Me}$  berechnet.

$$A_{1,Rohr} = \pi * D_{Vak} * l_{Me} = 9079 \text{ mm}^2$$

Die Mantelfläche  $A_{2,Beh}$  des inneren Zylinders, also des Behälters, wird mit dem Außendurchmesser des Behälters  $D_{Me}$  und der Länge des Behälters  $l_{Me}$  berechnet.

$$A_{2,Beh} = \pi * D_{Me} * l_{Me} = 6836 \text{ mm}^2$$

Die Strahlungsaustauschzahl  $C_{12,Man}$  ergibt sich für zwei ineinander liegende Mantelflächen nach Formel 2. Es wird dabei für  $A_1$  die innere Mantelfläche eingesetzt [6, S. 6]. Dabei ist  $\sigma_B$  die Boltzmann-Konstante und  $\varepsilon_{pol}$  das Emissionsverhältnis von poliertem Metall. Zur Geometrie gehört  $A_{2,Beh}$  als Mantelfläche des inneren Zylinders und  $A_{1,Rohr}$  als Mantelfläche des äußeren Zylinders.

$$C_{12,Man} = \frac{\sigma_B}{\frac{1}{\varepsilon_{pol}} + \frac{A_{2,Beh}}{A_{1,Rohr}} * \left( \frac{1}{\varepsilon_{pol}} - 1 \right)}$$

$$C_{12,Man} = 3,03 * 10^{-9} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Der Wärmefluss der Mantelfläche  $\dot{Q}_{12,Man}$  ergibt sich nach Formel 1. Es wird dabei für  $A_1$  die innere Mantelfläche eingesetzt [6, S. 6]. Dabei ist  $C_{12,Man}$  die Strahlungsaustauschzahl,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{2,Beh}$  als Mantelfläche des inneren Zylinders.

$$\dot{Q}_{12,Man} = C_{12,Man} * A_{2,Beh} * (T_{Raum}^4 - T_{Me}^4)$$

$$\dot{Q}_{12,Man} = 0,1526 \text{ W}$$

### Stirnfläche:

Im zweiten Fall wird die Geometrie als zwei gleich große parallele Flächen angenähert.

Die Strahlungsaustauschzahl  $C_{12,Sti}$  ergibt sich für zwei parallele Flächen nach Formel 3. Dabei ist wie zuvor  $\sigma_B$  die Boltzmann-Konstante und  $\varepsilon_{pol}$  das Emissionsverhältnis von poliertem Metall.

$$C_{12,Sti} = \frac{\sigma_B}{\frac{1}{\varepsilon_{pol}} + \frac{1}{\varepsilon_{pol}} - 1}$$

$$C_{12,Sti} = 2,6719 * 10^{-9} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Die Stirnfläche  $A_{Sti}$  des Mesitylenbehälters wird berechnet. Zur Geometrie gehört  $D_{Me}$  als Außendurchmesser des Behälters.

$$A_{Sti} = \frac{\pi}{4} * D_{Me}^2 = 3217 \text{ mm}^2$$

Der Wärmefluss  $\dot{Q}_{12,Sti}$  einer Stirnfläche ergibt sich nach Formel 1. Dabei ist  $C_{12,Sti}$  die Strahlungsaustauschzahl,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{Sti}$  als Stirnfläche.

$$\dot{Q}_{12,Sti} = C_{12,Sti} * A_{Sti} * (T_{Raum}^4 - T_{Me}^4)$$

$$\dot{Q}_{12,Sti} = 0,06335W$$

**Gesamt:**

Für den Wärmeeintrag durch Strahlung vom Mesitylenvakuumrohr auf den Mesitylenbehälter werden eine Mantelfläche und zwei Stirnflächen betrachtet. Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{S1}$  auf den Mesitylenbehälter.

$$\dot{Q}_{S1} = \dot{Q}_{12,Man} + 2 * \dot{Q}_{12,Sti}$$

$$\dot{Q}_{S1} = 0,2793W$$

### 3.2.2 Strahlung vom Vakuumrohr auf die Mesitylenleitungen

Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf die angenäherte Geometrie, welche in Abbildung 6 skizziert dargestellt ist. Es sind die zur Berechnung notwendigen geometrischen Parameter eingezeichnet. Diese Geometrie besteht, ähnlich der vorherigen Berechnung, aus zwei ineinander liegenden Zylindern, nämlich einem inneren Zylinder als Mesitylenleitung und einem äußeren als Vakuumrohr. Diese Berechnung betrachtet das in Neutronenstrahlrichtung überstehende Stück des Vakuumrohrs, auf welches im vorherigen Kapitel in der Rechnung zu  $\dot{Q}_{S1}$  verwiesen worden ist. Die Berechnung wird zunächst für eine Leitung durchgeführt und im Anschluss mit der Anzahl der Leitungen multipliziert.

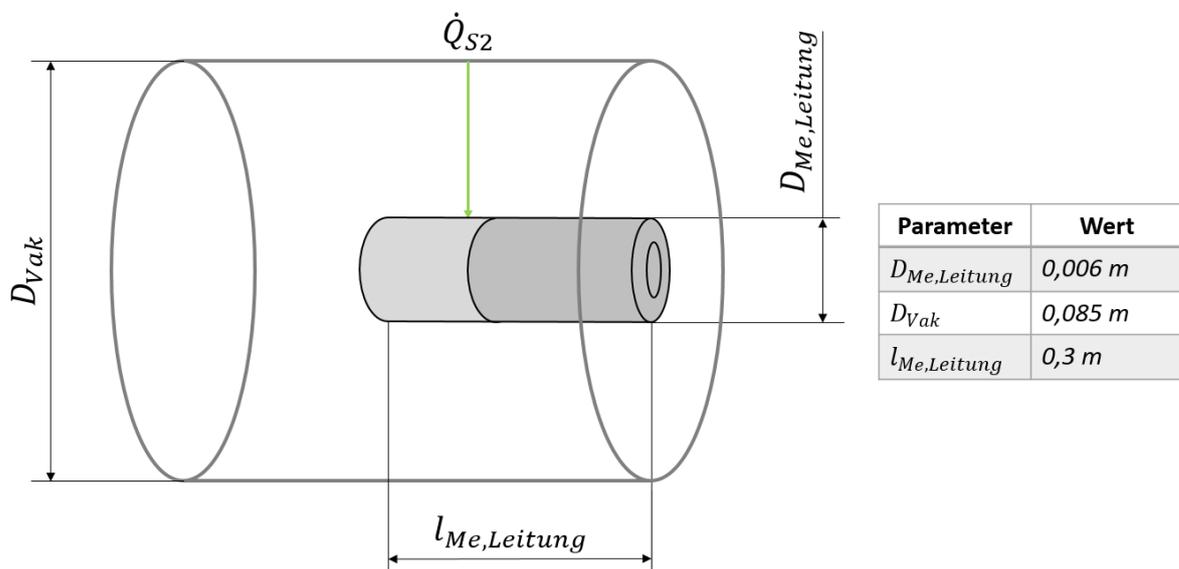


Abbildung 6: Mesitylenvakuumrohr und -leitung

Zunächst wird die Mantelfläche  $A_{1,Rohr}$  des äußeren Zylinders, also des Vakuumrohrs, berechnet. Zur Geometrie gehört der Innendurchmesser des Vakuumrohres  $D_{Vak}$  und die Länge einer Leitung  $l_{Me,Leitung}$ .

$$A_{1,Rohr} = \pi * D_{Vak} * l_{Me,Leitung} = 80110 \text{ mm}^2$$

Die Mantelfläche  $A_{2,Leitung}$  des inneren Zylinders, also einer Leitung, wird mit der zugehörigen Geometrie des Außendurchmessers der Mesitylenleitung  $D_{Me,Leitung}$  und der Länge einer Leitung  $l_{Me,Leitung}$  berechnet.

$$A_{2,Leitung} = \pi * D_{Me,Leitung} * l_{Me,Leitung} = 6836 \text{ mm}^2$$

Die Strahlungsaustauschzahl  $C_{12,Man}$  ergibt sich für zwei ineinander liegende Mantelflächen nach Formel 2. Es wird dabei für  $A_1$  die innere Mantelfläche eingesetzt [6, S. 6]. Dabei ist

$\sigma_B$  die Boltzmann-Konstante und  $\varepsilon_{pol}$  das Emissionsverhältnis von poliertem Metall. Zur Geometrie gehört  $A_{2,Leitung}$  als Mantelfläche des inneren Zylinders und  $A_{1,Rohr}$  als Mantelfläche des äußeren Zylinders.

$$C_{12,Man} = \frac{\sigma_B}{\frac{1}{\varepsilon_{pol}} + \frac{A_{2,Leitung}}{A_{1,Rohr}} * \left( \frac{1}{\varepsilon_{pol}} - 1 \right)}$$

$$C_{12,Man} = 4,7953 * 10^{-9} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Der Wärmefluss  $\dot{Q}_{12,Man}$  einer Mantelfläche ergibt sich nach Formel 1. Es wird dabei für  $A_1$  die innere Mantelfläche eingesetzt [6, S. 6]. Dabei ist  $C_{12,Man}$  die Strahlungsaustauschzahl,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesityltemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{2,Leitung}$  als Mantelfläche.

$$\dot{Q}_{12,Man} = C_{12,Man} * A_{2,Leitung} * (T_{Raum}^4 - T_{Me}^4)$$

$$\dot{Q}_{12,Man} = 0,1998 W$$

Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{S2}$  durch Wärmestrahlung durch das Vakuum auf zwei Mesitylenleitungen.

$$\dot{Q}_{S2} = 2 * \dot{Q}_{12,Man}$$

$$\dot{Q}_{S2} = 0,3997 W$$

### 3.2.3 Strahlung vom Vakuumrohr auf die Wärmebrücke

Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf die angenäherte Geometrie, welche in Abbildung 7 skizziert dargestellt ist. Es sind die zur Berechnung notwendigen geometrischen Parameter eingezeichnet. Die angenäherte Geometrie besteht aus zwei ineinander liegenden Zylindern, einem inneren als Wärmebrücke und einem äußeren als Vakuumrohr. Die Strahlung des nur gering überstehenden Stücks des Vakuumrohres wird vernachlässigt.

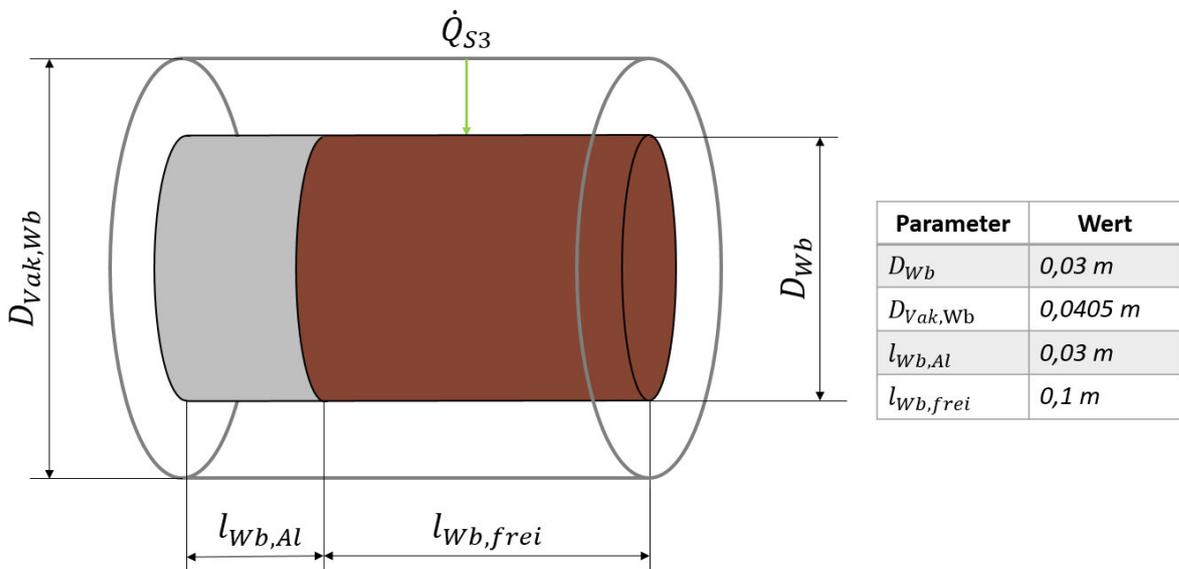


Abbildung 7: Wärmebrücke und Vakuumrohr

Es wird die Mantelfläche  $A_{1,Rohr}$  des äußeren Zylinders, also des Vakuumrohres, berechnet. Zur Geometrie gehören  $D_{Vak,Wb}$  als Innendurchmesser des Vakuumrohres der Wärmebrücke,  $l_{Wb,Al}$  als Länge der Aluminiumbrücke und  $l_{Wb,frei}$  als freiliegendes Stück der Kupferbrücke.

$$A_{1,Rohr} = \pi * D_{Vak,Wb} * (l_{Wb,frei} + l_{Wb,Al}) = 16540 \text{ mm}^2$$

Die Mantelfläche  $A_{2,Wb}$  des inneren Zylinders, also der Wärmebrücke, wird mit dem Außendurchmesser der Wärmebrücke  $D_{Wb}$ , der Länge der Aluminiumbrücke  $l_{Wb,Al}$  und des freiliegenden Stücks der Kupferbrücke  $l_{Wb,frei}$  berechnet.

$$A_{2,Wb} = \pi * D_{Wb} * (l_{Wb,frei} + l_{Wb,Al}) = 12250 \text{ mm}^2$$

Die Strahlungsaustauschzahl  $C_{12,Man}$  ergibt sich für zwei ineinander liegende Mantelflächen nach Formel 2. Es wird dabei für  $A_1$  die innere Mantelfläche eingesetzt [6, S. 6]. Dabei ist  $\sigma_B$  die Boltzmann-Konstante und  $\varepsilon_{pol}$  das Emissionsverhältnis von poliertem Metall. Zur

Geometrie gehört  $A_{2,Wb}$  als Mantelfläche des inneren Zylinders und  $A_{1,Rohr}$  als Mantelfläche des äußeren Zylinders.

$$C_{12,Man} = \frac{\sigma_B}{\frac{1}{\varepsilon_{pol}} + \frac{A_{2,Wb}}{A_{1,Rohr}} * \left( \frac{1}{\varepsilon_{pol}} - 1 \right)}$$

$$C_{12,Man} = 3,0484 * 10^{-9} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Der Wärmefluss  $\dot{Q}_{S3}$  der Mantelfläche ergibt sich nach Formel 1. Es wird dabei für  $A_1$  die innere Mantelfläche eingesetzt [6, S. 6]. Dabei sind  $C_{12,Man}$  die Strahlungsaustauschzahl,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesityltemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{2,Wb}$  als Mantelfläche. Folgendes gilt für den Wärmeeintrag durch Wärmestrahlung durch das Vakuum auf die Wärmebrücke.

$$\dot{Q}_{S3} = C_{12,Man} * A_{2,Wb} * (T_{Raum}^4 - T_{Me}^4)$$

$$\dot{Q}_{S3} = 0,2753 W$$

### 3.3 Wärmeeinträge durch Wärmeleitung

In diesem Kapitel wird die Berechnung der Wärmeeinträge dargestellt, welche aufgrund von Wärmeleitung entstehen. Die größten Einträge sind dabei die Wärmeleitung durch das Vakuum vom außenliegenden Vakuumrohr auf die inneren Bauteile und die Wärmeleitung durch die Materialien der Mesitylenleitungen, der Heizkabel und des Abstandhalters. Die Berechnungen finden unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.1 getroffenen Annahmen statt.

#### 3.3.1 Wärmeleitfähigkeit des Vakuums

Es wird zunächst die Wärmeleitfähigkeit des Vakuums für eine mittlere Temperatur und die zwei auftretenden Vakuumschichtdicken bestimmt. Das Erzeugen eines Vakuums im realen Teststand bedeutet, dass zwar ein Großteil der Luft abgepumpt wird, aber ein Rest immer noch in der Vakuumschicht verbleibt. Das Vakuum wird somit als nicht ideal betrachtet, weshalb eine Wärmeleitung durch das Vakuum möglich ist.

Es wird angenommen, dass lediglich ein Vakuumdruck von  $p_{vak} = 0,1 Pa$  erreicht wird. Im Vergleich zu einem höheren Vakuum ist die Isolationswirkung durch diese Annahme geringer.

Durch die Definition von verschiedenen Berechnungskonstanten und mit der Verwendung der mittleren freien Weglänge und der Knudsen-Zahl wird die Wärmeleitfähigkeit des Vakuums für den angenommenen Druck und für die beiden Vakuumschichtdicken analog zur Vorgabe des VDI Wärmetlasses bestimmt.

Die Bestimmung der ersten Berechnungskonstanten  $C_{1,N}$  erfolgt nach Formel 4 zunächst für den Stickstoffanteil. Dabei sind  $p_{vak}$  der angenommene Vakuumdruck und  $c_{1,N,0}$  eine Berechnungskonstante.

$$C_{1,N} = \frac{133 Pa}{p_{vak}} * c_{1,N,0}$$

$$C_{1,N} = 0,08113 m$$

Die Berechnungskonstante  $C_{1,O}$  berechnet sich nach Formel 4 für den Sauerstoffanteil in der Luft mit der Berechnungskonstanten  $c_{1,O,0}$ .

$$C_{1,O} = \frac{133 Pa}{p_{vak}} * c_{1,O,0}$$

$$C_{1,O} = 0,09137 m$$

Die Bestimmung der Berechnungskonstanten  $C_1$  erfolgt nach Formel 5 und fügt die Anteile geometrischen Berechnungskonstanten  $C_{1,N}$  von Stickstoff und  $C_{1,O}$  Sauerstoff zusammen.

Dies geschieht unter Berücksichtigung deren grober Volumenanteile bei der Zusammensetzung der Luft [9].

$$C_1 = 0,79 * C_{1,N} + 0,21 * C_{1,O}$$

$$C_1 = 8,33 * 10^{-2} m$$

Analog dazu erfolgt die Bestimmung der Berechnungskonstanten  $C_2$  mit den temperaturbezogenen Konstanten  $C_{2,N}$  und  $C_{2,O}$  nach Formel 5.

$$C_2 = 0,79 * C_{2,N} + 0,21 * C_{2,O}$$

$$C_2 = 116,2 K$$

Die mittlere Temperatur  $T_m$  des Vakuums ergibt sich nach Formel 10. Dabei sind  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur.

$$T_m = \frac{T_{Raum} + T_{Me}}{2}$$

$$T_m = 156,5 K$$

Mithilfe der vorherigen Berechnungskonstanten  $C_1$  und  $C_2$  und der mittleren Temperatur  $T_m$  ergibt sich nach Formel 6 die mittlere freie Weglänge  $l_{Vak}$  des Vakuums.

$$l_{Vak} = \frac{C_1}{1 + \frac{C_2}{T_m}}$$

$$l_{Vak} = 47,79 mm$$

Die Knudsen-Zahl  $Kn_{Man}$  berechnet sich nach Formel 7 für eine Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Man} = 10,5 mm$ . Dabei ist  $l_{Vak}$  die mittlere freie Weglänge.

$$Kn_{Man} = \frac{l_{Vak}}{\sigma_{Vak,Man}}$$

$$Kn_{Man} = 4,5518$$

Analog dazu berechnet sich die Knudsen-Zahl  $Kn_{Sti}$  für eine Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Sti} = 5 mm$ .

$$Kn_{Sti} = \frac{l_{Vak}}{\sigma_{Vak,Sti}}$$

$$Kn_{Sti} = 9,5588$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Vakuums  $\lambda_{Vak,Man}$  mit dem angenommenen Druck ergibt sich nach Formel 8 für eine Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Man} = 10,5 \text{ mm}$ . Dabei sind  $\lambda_0$  die Wärmeleitfähigkeit von Luft bei Normaldruck,  $\beta$  der Gewichtungsfaktor und  $Kn_{Man}$  die Knudsen-Zahl.

$$\lambda_{Vak,Man} = \frac{\lambda_0}{1 + 2 * \beta * Kn_{Man}}$$

$$\lambda_{Vak,Man} = 9,054 * 10^{-4} \frac{W}{m K}$$

Analog dazu ergibt sich Folgendes für die Wärmeleitfähigkeit des Vakuums  $\lambda_{Vak,Sti}$  mit einer Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Sti} = 5 \text{ mm}$ .

$$\lambda_{Vak,Sti} = \frac{\lambda_0}{1 + 2 * \beta * Kn_{Sti}}$$

$$\lambda_{Vak,Sti} = 4,459 * 10^{-4} \frac{W}{m K}$$

### 3.3.2 Wärmeleitung vom Vakuumrohr auf den Mesitylenbehälter

Die Berechnung des Wärmeeintrages durch Wärmeleitung im Restgas vom Vakuumrohr wird aufgeteilt in die Wärmeleitung auf die Mantelfläche und auf die Stirnfläche des Behälters. Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf eine angenäherte Geometrie.

#### Mantelfläche:

Diese angenäherte Geometrie besteht im ersten Fall aus zwei ineinander liegenden Zylindern, einem inneren als Behälter und einem äußeren als Vakuumrohr (siehe Abbildung 5). Die Vakuumschicht stellt somit das Volumen des Hohlzylinders zwischen dem inneren und äußeren Zylinder dar. Der Wärmeeintrag des weiter überstehenden Stücks des Vakuumrohres auf die Mesitylenleitungen wird in der späteren Rechnung zu  $\dot{Q}_{L2}$  berechnet. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k_{Zyl}$  des Vakuums einer Zylinderwand ergibt sich nach Formel 11. Dabei ist  $\lambda_{Vak,Man}$  der oben berechnete Wärmeleitkoeffizient des Vakuums bei einer Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Man} = 10,5 \text{ mm}$ . Zur Geometrie gehören  $D_{Vak}$  als Innendurchmesser des Mesitylenvakuumrohrs und  $D_{Me}$  als Außendurchmesser des Mesitylenbehälters.

$$k_{Zyl} = \frac{1}{\frac{1}{2 * \lambda_{Vak,Man}} * LN\left(\frac{D_{Vak}}{D_{Me}}\right)}$$

$$k_{Zyl} = 0,006381 \frac{W}{m K}$$

Der Wärmefluss der Mantelfläche  $\dot{Q}_{Zyl}$  ergibt sich nach Formel 14. Dabei ist  $k_{Zyl}$  der Wärmedurchgangskoeffizient des Vakuums einer Zylinderwand,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur. Zur Geometrie gehört  $l_{Me}$  als Länge des Mesitylenbehälters.

$$\dot{Q}_{Zyl} = k_{Zyl} * \pi * l_{Me} * (T_{Raum} - T_{Me})$$

$$\dot{Q}_{Zyl} = 0,1861 \text{ W}$$

#### Stirnfläche:

Im zweiten Fall wird die Geometrie als zwei gleich große parallele Flächen angenähert. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k_{lin}$  des Vakuums ergibt sich für zwei parallele Flächen nach Formel 12. Dabei ist  $\lambda_{Vak,Sti}$  der oben berechnete Wärmeleitkoeffizient des Vakuums bei einer Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Sti} = 5 \text{ mm}$ .

$$k_{lin} = \frac{\lambda_{vak,sti}}{\sigma_{vak;sti}}$$

$$k_{lin} = 0,08917 \frac{W}{m^2 K}$$

Die Stirnfläche  $A_{sti}$  des Mesitylenbehälters wird berechnet. Zur Geometrie gehört  $D_{Me}$  als Außendurchmesser des Behälters.

$$A_{sti} = \frac{\pi}{4} * D_{Me}^2 = 3217 \text{ mm}^2$$

Der Wärmefluss der Stirnfläche  $\dot{Q}_{lin}$  ergibt sich nach Formel 15. Dabei ist  $k_{lin}$  der Wärmedurchgangskoeffizient des Vakuums zweier paralleler Flächen,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{sti}$  als Stirnfläche des Mesitylenbehälters.

$$\dot{Q}_{lin} = k_{lin} * A_{sti} * (T_{Raum} - T_{Me})$$

$$\dot{Q}_{lin} = 0,07832 \text{ W}$$

### **Gesamt:**

Für den Wärmeeintrag durch Wärmeleitung durch das Vakuum vom Mesitylenvakuumrohr auf den Mesitylenbehälter wird eine Mantelfläche und eine Stirnfläche betrachtet. Die zweite Stirnfläche sieht nur die vergleichsweise weit entfernte Vakuumrohrwand und wird deshalb nicht berücksichtigt. Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{L1}$  auf den Mesitylenbehälter.

$$\dot{Q}_{L1} = \dot{Q}_{Zyl} + \dot{Q}_{lin}$$

$$\dot{Q}_{L1} = 0,2644 \text{ W}$$

### 3.3.3 Wärmeleitung vom Vakuumrohr auf die Mesitylenleitungen

Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf eine angenäherte Geometrie. Diese besteht aus zwei ineinander liegenden Zylindern, nämlich einem inneren Zylinder als Mesitylenleitung und einem äußeren als Vakuumrohr (siehe Abbildung 6). Diese Berechnung bezieht sich auf das in Neutronenstrahlrichtung überstehende Stück des Vakuumrohrs, auf welches im vorherigen Kapitel in der Rechnung zu  $\dot{Q}_{S1}$  verwiesen worden ist. Die Berechnung wird zunächst für eine Leitung durchgeführt.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k_{Zyl}$  des Vakuums einer Zylinderwand ergibt sich nach Formel 11. Dabei ist  $\lambda_{Vak,Man}$  der oben berechnete Wärmeleitkoeffizient des Vakuums bei einer Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Man} = 10,5 \text{ mm}$ . Zur Geometrie gehören  $D_{Vak}$  als Innendurchmesser des Mesitylenvakuumrohrs und  $D_{Me,Leitung}$  als Außendurchmesser der Mesitylenleitung.

$$k_{Zyl} = \frac{1}{\frac{1}{2 * \lambda_{Vak,Man}} * LN\left(\frac{D_{Vak}}{D_{Me,Leitung}}\right)}$$

$$k_{Zyl} = 6,831 * 10^{-4} \frac{W}{m K}$$

Der Wärmefluss der Mantelfläche  $\dot{Q}_{Zyl}$  ergibt sich nach Formel 14. Dabei sind  $k_{Zyl}$  der Wärmedurchgangskoeffizient des Vakuums einer Zylinderwand,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur. Zur Geometrie gehört  $l_{Me,Leitung}$  als Länge einer Mesitylenleitung.

$$\dot{Q}_{Zyl} = k_{Zyl} * \pi * l_{Me,Leitung} * (T_{Raum} - T_{Me})$$

$$\dot{Q}_{Zyl} = 0,1758 \text{ W}$$

Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{L2}$  durch Wärmeleitung durch das Vakuum auf zwei Mesitylenleitungen.

$$\dot{Q}_{L2} = 2 * \dot{Q}_{Zyl}$$

$$\dot{Q}_{L2} = 0,3515 \text{ W}$$

### 3.3.4 Wärmeleitung durch die Metalle entlang der Mesitylenleitungen

Die Geometrie, auf die sich diese Berechnung bezieht, ist in Abbildung 8 skizziert dargestellt. Es sind die zur Berechnung notwendigen geometrischen Parameter eingezeichnet.

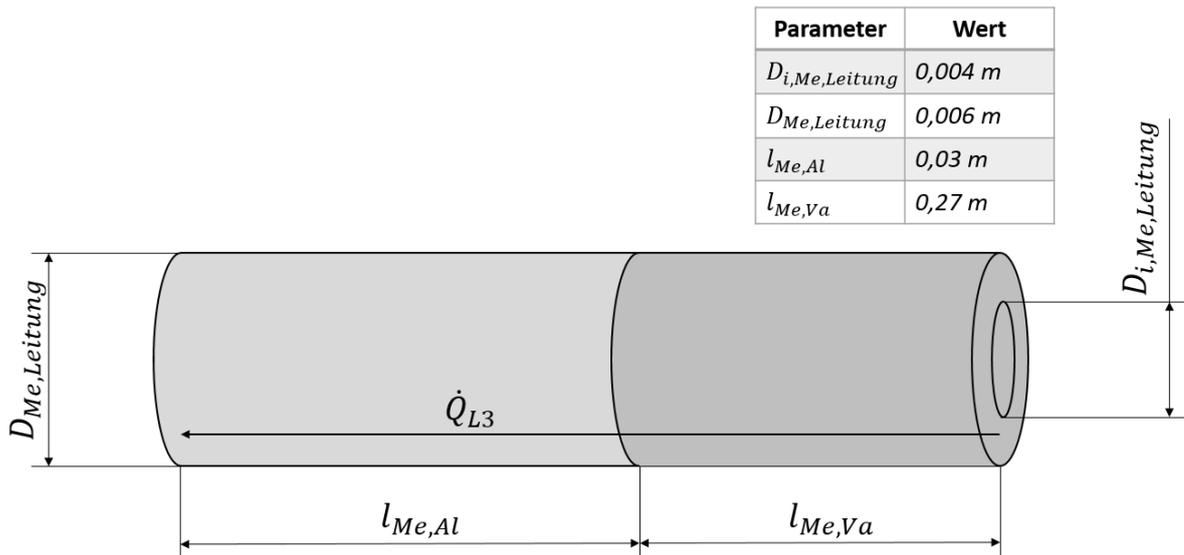


Abbildung 8: Mesitylenleitung

Für die Berechnung des Wärmeeintrags durch Wärmeleitung entlang der Mesitylenleitungen wird nur die aus Aluminium und Edelstahl bestehende Mesitylenleitung berücksichtigt. Obwohl auch ein Wärmeeintrag durch Wärmeleitung durch das gefrorene Mesitylen selber auftritt, ist dieser aufgrund der sehr schlechten Wärmeleitung von gefrorenem Mesitylen vernachlässigbar.

$$\lambda_{Al} > \lambda_{Va} \gg \lambda_{Me}$$

$$230 \frac{W}{m K} > 21 \frac{W}{m K} \gg 0,2 \frac{W}{m K}$$

Es wird zunächst der Wärmeeintrag durch eine Mesitylenleitung berechnet.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k_{lin,doppel}$  mehrerer ebener Wände ergibt sich nach Formel 13. Dabei ist  $\lambda_{Al}$  die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium und  $\lambda_{Va}$  die Wärmeleitfähigkeit von Edelstahl. Zur Geometrie gehören  $l_{Me,Al}$  als Länge des Aluminiumstücks der Mesitylenleitung und  $l_{Me,Va}$  als Länge des Edelstahlstücks der Mesitylenleitung.

$$k_{lin,doppel} = \frac{1}{\frac{l_{Me,Al}}{\lambda_{Al}} + \frac{l_{Me,Va}}{\lambda_{Va}}}$$

$$k_{lin,doppel} = 76,99 \frac{W}{m^2 K}$$

Die Kreisringfläche  $A_{Ring}$  der Mesitylenleitung wird berechnet. Zur Geometrie gehören  $D_{Me,Leitung}$  als Außendurchmesser einer Mesitylenleitung und  $D_{i,Me,Leitung}$  als Innendurchmesser einer Mesitylenleitung.

$$A_{Ring} = \frac{\pi}{4} * (D_{Me,Leitung}^2 - D_{i,Me,Leitung}^2) = 15,71 \text{ mm}^2$$

Der Wärmefluss der Kreisringfläche  $\dot{Q}_{lin}$  ergibt sich nach Formel 15. Dabei sind  $k_{lin,doppel}$  der Wärmedurchgangskoeffizient der Mesitylenleitung durch beide Materialien,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesitylentemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{Ring}$  als Kreisringfläche einer Mesitylenleitung.

$$\dot{Q}_{lin} = k_{lin,doppel} * A_{Ring} * (T_{Raum} - T_{Me})$$

$$\dot{Q}_{lin} = 0,3302 \text{ W}$$

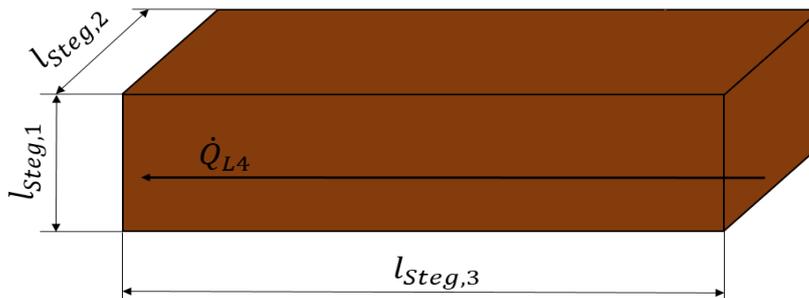
Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{L3}$  durch Wärmeleitung entlang zweier Mesitylenleitungen.

$$\dot{Q}_{L3} = 2 * \dot{Q}_{lin}$$

$$\dot{Q}_{L3} = 0,6604 \text{ W}$$

### 3.3.5 Wärmeleitung durch die Stege des Abstandhalters

Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf eine angenäherte Geometrie der Stege des Abstandhalters, welche in Abbildung 9 skizziert dargestellt ist. Dort sind die zur Berechnung notwendigen geometrischen Parameter eingezeichnet. Diese Geometrie stellt den senkrecht zur Rohrwand ausgerichteten Steg als einen Stab mit rechteckiger Grundfläche und einer festen Länge dar. Dabei sind  $l_{Steg,1}$  und  $l_{Steg,2}$  die Länge und Breite der Grundfläche. Die Länge des Steges wird durch  $l_{Steg,3}$  angenähert.



Parameter	Wert
$l_{Steg,1}$	0,003 m
$l_{Steg,2}$	0,015 m
$l_{Steg,3}$	0,0035 m

Abbildung 9: Steg Abstandhalter

Es wird zunächst der Wärmeeintrag durch einen Steg berechnet und anschließend das Ergebnis mit der Anzahl der Stäbe multipliziert.

Der Wärmeleitkoeffizient  $k_{lin}$  eines angenäherten Steges ergibt sich nach Formel 12. Dabei ist  $\lambda_{Ve}$  die Wärmeleitfähigkeit von Vespel, dem Material des Abstandhalters.

$$k_{lin} = \frac{\lambda_{Ve}}{l_{Steg,3}}$$

$$k_{lin} = 82,57 \frac{W}{m^2 K}$$

Die Grundfläche eines Steges  $A_{Grund}$  wird berechnet.

$$A_{Grund} = l_{Steg,1} * l_{Steg,2} = 45 \text{ mm}^2$$

Der Wärmefluss der Grundfläche  $\dot{Q}_{lin}$  ergibt sich nach Formel 15. Dabei ist  $k_{lin}$  der Wärmedurchgangskoeffizient eines Steges,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesityltemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{Grund}$  als Grundfläche eines Steges.

$$\dot{Q}_{lin} = k_{lin} * A_{Grund} * (T_{Raum} - T_{Me})$$

$$\dot{Q}_{lin} = 1,0144 \text{ W}$$

Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{L4}$  durch Wärmeleitung entlang zweier Stege des Abstandhalters.

$$\dot{Q}_{L4} = 2 * \dot{Q}_{lin}$$

$$\dot{Q}_{L4} = 2,0288 \text{ W}$$

### 3.3.6 Wärmeleitung durch das Metall der Heizkabel

Die Funktion der Kabel ist es, einen kontrollierten zusätzlichen Wärmestrom durch elektrisches Heizen auf das Mesitylen zu leiten, um damit die Mesityltemperatur steuern zu können. Da die Heizkabel aus zwei sehr gut leitenden Kupferleitungen bestehen und somit ein vergleichsweise großer Wärmeeintrag auch bei ausgeschalteter Heizung zu erwarten ist, wird die Berechnung des Wärmeeintrags durch Wärmeleitung entlang der Heizkabel hier durchgeführt. Es wird zunächst der Wärmeeintrag durch ein Kabel berechnet.

Der Wärmeleitkoeffizient  $k_{lin}$  eines Heizkabels ergibt sich nach Formel 12. Dabei ist  $\lambda_{Cu}$  die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer. Zur Geometrie gehören  $l_{Heiz}$  als Länge des Heizdrahtes und  $D_{Heiz}$  als Durchmesser des Heizdrahtes.

$$k_{lin} = \frac{\lambda_{Cu}}{l_{Heiz}}$$

$$k_{lin} = 372 \frac{W}{m^2 K}$$

Die Stirnfläche eines Kabels  $A_{Sti}$  wird berechnet.

$$A_{Sti} = \frac{\pi}{4} * D_{Heiz}^2 = 7,068 \text{ mm}^2$$

Der Wärmefluss der Stirnfläche  $\dot{Q}_{lin}$  ergibt sich nach Formel 15. Dabei sind  $k_{lin}$  der Wärmedurchgangskoeffizient eines Kabels,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesityltemperatur. Zur Geometrie gehört  $A_{Sti}$  als Stirnfläche eines Kabels.

$$\dot{Q}_{lin} = k_{lin} * A_{Sti} * (T_{Raum} - T_{Me})$$

$$\dot{Q}_{lin} = 0,7179 \text{ W}$$

Folgendes gilt für den Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{L5}$  durch Wärmeleitung entlang zweier Heizkabel.

$$\dot{Q}_{L5} = 2 * \dot{Q}_{lin}$$

$$\dot{Q}_{L5} = 1,436 \text{ W}$$

### 3.3.7 Wärmeleitung vom Vakuumrohr auf die Wärmebrücke

Die bei dieser Berechnung verwendete Geometrie bezieht sich auf eine angenäherte Geometrie. Diese besteht aus zwei ineinander liegenden Zylindern, nämlich einem inneren Zylinder als Wärmebrücke und einem äußeren als Vakuumrohr (vgl. Abbildung 7).

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k_{Zyl}$  des Vakuums einer Zylinderwand ergibt sich nach Formel 11. Dabei ist  $\lambda_{Vak,Sti}$  der oben berechnete Wärmeleitkoeffizient des Vakuums bei einer Vakuumschichtdicke von  $\sigma_{Vak,Sti} = 5 \text{ mm}$ . Zur Geometrie gehören  $D_{Vak,Wb}$  als Innendurchmesser des Wärmebrücken-Vakuumrohrs und  $D_{Wb}$  als Außendurchmesser der Wärmebrücke.

$$k_{Zyl} = \frac{1}{\frac{1}{2 * \lambda_{Vak,Sti}} * LN\left(\frac{D_{Vak,Wb}}{D_{Wb}}\right)}$$

$$k_{Zyl} = 0,002971 \frac{W}{m K}$$

Der Wärmefluss der Mantelfläche  $\dot{Q}_{L6}$  ergibt sich nach Formel 14. Dabei sind  $k_{Zyl}$  der Wärmedurchgangskoeffizient des Vakuums einer Zylinderwand,  $T_{Raum}$  die Raumtemperatur und  $T_{Me}$  die zur Berechnung angenommene Mesityltemperatur. Zur Geometrie gehören  $l_{Wb,frei}$  als freiliegende Länge der Wärmebrücke aus Kupfer und  $l_{Wb,Al}$  als Länge der Wärmebrücke aus Aluminium.

$$\dot{Q}_{L6} = k_{Zyl} * \pi * (l_{Wb,frei} + l_{Wb,Al}) * (T_{Raum} - T_{Me})$$

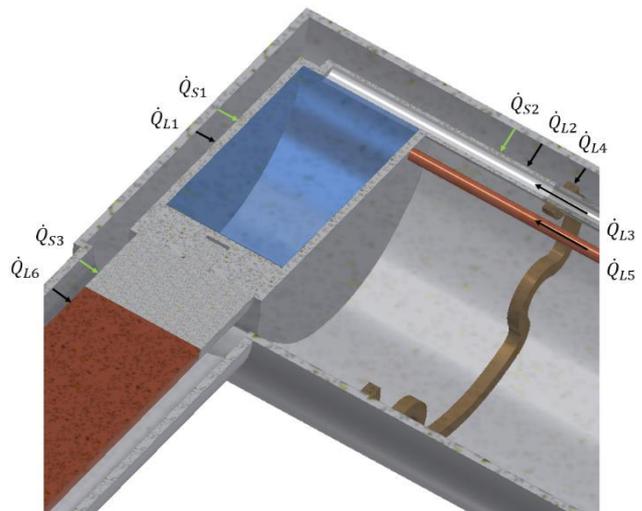
$$\dot{Q}_{L6} = 0,3313 W$$

### 3.4 Summe der Wärmeeinträge

Es werden die in diesem Kapitel errechneten Wärmeeinträge in Tabelle 6 aufsummiert. Um einen Eindruck über die Verteilung der Wärmeflüsse zu erhalten, ist Abbildung 4 erneut dargestellt.

Tabelle 6: Summierte Wärmeeinträge

Wärmeeintrag	Betrag [W]
$\dot{Q}_{S1}$	0,22
$\dot{Q}_{S2}$	0,40
$\dot{Q}_{S3}$	0,28
$\dot{Q}_{L1}$	0,26
$\dot{Q}_{L2}$	0,35
$\dot{Q}_{L3}$	0,66
$\dot{Q}_{L4}$	2,03
$\dot{Q}_{L5}$	1,44
$\dot{Q}_{L6}$	0,33
<b>Summe: <math>\dot{Q}_{ges}</math></b>	<b>6,00</b>



Somit kann in der Simulation im folgenden Kapitel ein ungefährender Wärmeeintrag von 6 W erwartet werden. Zudem können die hier im Einzelnen berechneten Wärmeströme mit den entsprechenden Wärmeströmen in der Simulation verglichen werden.

## 4 Thermisch stationäre Analyse

Das Kapitel der thermisch stationären Analyse teilt sich in drei einzelne Analysen auf. Diese besitzen unterschiedliche Ziele. Zunächst wird eine Simulation der Wärmeflüsse erstellt. Diese dient der zuvor berechneten Abschätzung als Vergleichswert. Die Verwendung des Simulationsmodells wird dadurch validiert.

In der zweiten Analyse wird das Verhalten der Baugruppe bei verschiedenen Kühlleistungen bestimmt und die Ergebnisse als Kennlinie dargestellt. Durch einen Vergleich dieser erstellten Kennlinie des Moderatorsystems mit der Kühlleistungskennlinie des Kaltkopfes wird der sich nach der Abkühlzeit einstellende Betriebspunkt ermittelt. Die Betriebstemperatur im Mesitylen bei maximaler Kühlung wird somit angegeben.

Um die Mesityltemperatur im Betrieb variieren zu können, wirken in der dritten Analyse zusätzliche Heizwerte auf das System. Die sich nun verändernden Betriebspunkte und deren zugehörige Mesityltemperaturen werden dadurch bestimmt.

Die Analyse wird mit dem FEM-Programm ANSYS (R18.0) durchgeführt. Dazu wird das Tool Thermisch-stationäre Analyse der Workbenchumgebung gewählt.

### 4.1 Theorie der Finite Elemente Methode

Die Finite Elemente Methode (FEM) basiert auf dem Prinzip der Aufteilung einer Berechnung für eine komplexe Geometrie in sehr viele einzelne Berechnungen für bekannte einfache Geometrien. Im verwendeten Aufbau werden alle Bauteile mit deren umfangreichen Geometrien in kleine Tetraeder und Hexaeder unterteilt. Die Software kann im Anschluss daran die geforderten thermischen Ergebnisse und deren für den entsprechenden Anwendungsfall passende Genauigkeit liefern. „Berechnet werden soll eine außerordentlich heterogene Struktur, deren Bauteile unterschiedliche Dicken, veränderliche Form, Aussparungen und Versteifungen besitzen und auch noch aus unterschiedlichem Material bestehen“ [15, S. 1]. In diesem Fall stellt das Moderatorsystem die komplexe Geometrie dar. Diese wird zunächst von der Software in ein Gitternetz überführt, welches an ausgewählten Punkten, Kanten, Flächen und Körpern vom Nutzer bearbeitet werden kann. Mit Hilfe von thermischen und statischen Randbedingungen können die Ergebnisse berechnet und veranschaulicht werden.

## 4.2 Simulation der Wärmeflüsse

Im Folgenden werden die Erstellung des Modells bezogen auf die verwendete Geometrie, das Erstellen des Netzes und die Wahl der thermischen Randbedingungen beschrieben.

### 4.2.1 Idee

Das Ziel dieser Berechnung ist es, eine Einschätzung der Plausibilität des simulierten Modells und dessen Ergebnisse zu erhalten. Dafür werden die Randbedingungen der in Kapitel 3 berechneten Wärmeflüsse in einem Aufbau nachgestellt, der dem realen Modell deutlich ähnlicher ist. Bei einer angemessenen Übereinstimmung der berechneten und simulierten Wärmeeinträge kann die Analyse des Modells bei maximaler Kühlung fortgesetzt werden.

### 4.2.2 Geometrie

Die bei der Simulation der Wärmeflüsse verwendete Geometrie liegt im Vergleich zu den Annäherungen aus Kapitel 3 sehr nahe an dem realen Aufbau. In Abbildung 10 ist diese Geometrie in einer isometrischen Ansicht im Schnitt dargestellt. Ähnlich wie in dem in Kapitel 2.2 dargestellten Aufbau werden hier die Kernkomponenten abgebildet. Dazu zählen der mit Mesitylen gefüllte Mesitylenbehälter, die beiden daran angeschweißten Leitungen (hier aufgrund des Schnitts nur eine abgebildet), der Abstandhalter zur Positionierung der Leitungen, die Wärmebrücke, bestehend aus einem Aluminium- und Kupferstück, die beiden Brückenhalter und die alles umschließende Vakuumrohre.

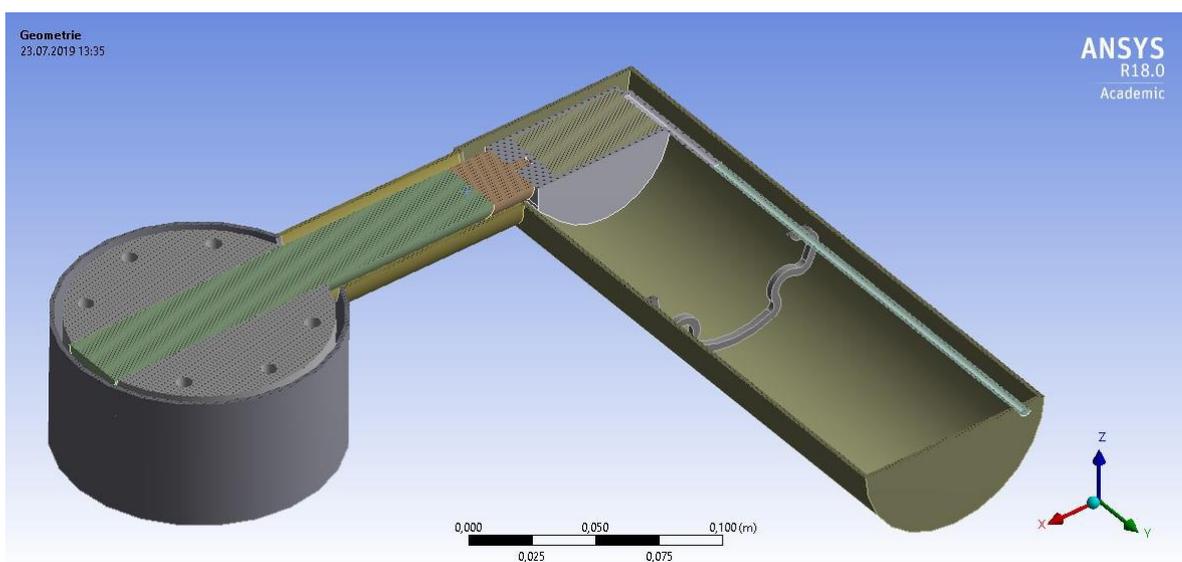


Abbildung 10: geschnittene Geometrie

Abbildung 11 bezieht sich ebenfalls auf diese Geometrie, jedoch sind hier die Vakuumrohre ausgeblendet. Es werden die inneren Bauteile gezeigt, da sich die folgende Erstellung des Netzes der einzelnen Elemente auf diese Bauteile fokussiert.

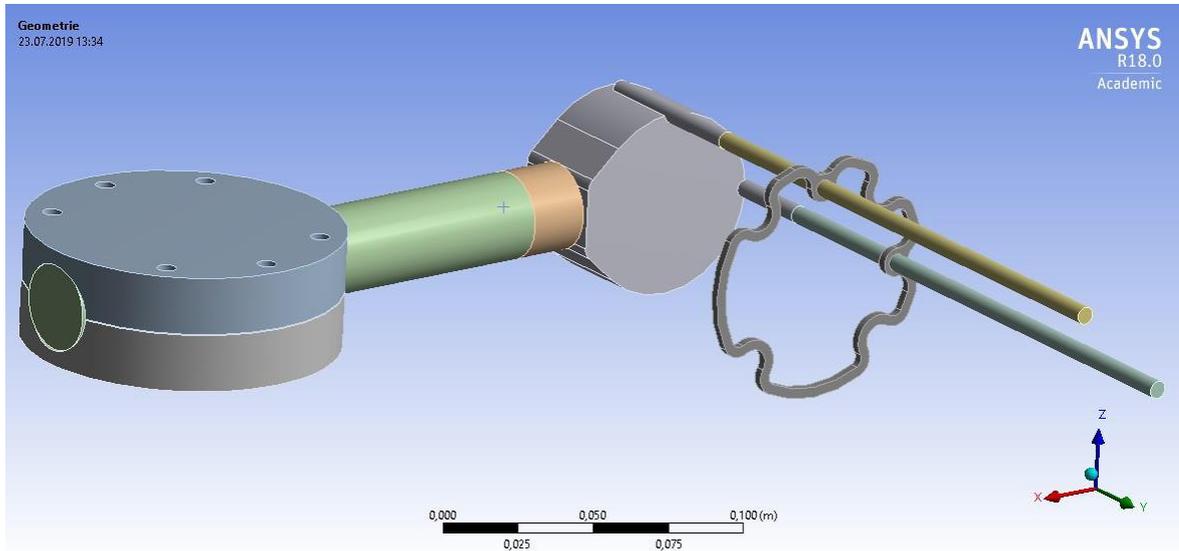


Abbildung 11: Geometrie innerer Bauteile

Es wird im Vergleich zu der bisherigen Berechnung auf eine deutliche Anzahl an Annäherungen und Verallgemeinerungen verzichtet, um die Simulation so nah wie möglich am realen Aufbau zu halten. Es müssen jedoch die folgenden Vereinfachungen im Vergleich zum realen Aufbau getroffen werden.

Die Gewindeverschraubung zwischen dem Mesitylenbehälter und der Wärmebrücke wird nicht berücksichtigt und nur als glatter Zylinder dargestellt. Dadurch bleibt die Rechenzeit für die Simulation der komplexen Geometrie eines Gewindes erspart. Die Mesitylenleitungen werden ebenfalls vereinfacht abgebildet. Die um 90 Grad gebogenen Leitungen sowie die Vakuumdurchführungen werden als zwei gerade Rohre modelliert, die orthogonal einen Blindflansch durchstoßen. Das Auslassen der Simulation des Kaltkopfkörpers erspart ebenfalls einen großen Teil der Rechenzeit. Lediglich die kalte Fläche des Kaltkopfes ist für die Simulation relevant. Aus diesem Grund kann das Vakuumrohr, welches den Kaltkopf umschließt, ebenfalls gekürzt werden.

### 4.2.3 Vernetzung

Das Vernetzen beschreibt das Unterteilen der gesamten Geometrie in einzelne Elemente, wodurch eine Art Netz entsteht. Je feiner die Unterteilung stattfindet, desto mehr Elemente und somit Berechnungsstellen werden erzeugt. Einerseits ist eine bestimmte Anzahl an Elementen notwendig, um eine ausreichende Annäherung an das reale Ergebnis zu erhalten; andererseits steigt die Rechenzeit der Simulation sehr stark mit der Anzahl der Elemente. Ein gutes Netz ist daher stets ein Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenzeit.

Das Programm ANSYS erzeugt ein automatisiertes Netz basierend auf den voreingestellten Standards. Um die Qualität dieses Netzes in Bezug auf die ausgewählte Geometrie zu verbessern, können sowohl globale als auch lokale Einstellungen vorgenommen werden. Globale Einstellungen beziehen sich auf die gesamte Geometrie aller Bauteile. Durch lokale Einstellungen kann das Netz in bestimmten Bereichen wie Punkten, Kanten, Flächen oder einzelnen Bauteilen verändert werden.

In den globalen Einstellungen dieser Simulation ist die Anzahl der Elemente erhöht worden, um ein feineres Netz zu generieren und das Ergebnis in einer höheren Auflösung darstellen und berechnen zu können. Dies geschieht durch die Festlegung der Elementgröße auf „fein“ und eine zusätzliche Verfeinerung durch die Erhöhung der Relevanz.

Mit Hilfe der lokalen Einstellungen ist die Größe der Elemente des Mesitylenbehälters angepasst worden. Da die Wandstärke des Bauteils im Vergleich zu seiner gesamten Geometrie gering ist, verfälscht ein grobes Netz die Auswirkung von Wärmeleitung innerhalb der Wand deutlich. Analog geschieht dies für den Abstandhalter. Eine Vorgabe für die Form der Elemente der Wärmebrücke als Hexaeder lässt das Programm ein gleichmäßigeres Netz mit höherer Qualität erstellen.

Nach Anwenden der globalen und lokalen Einstellungen ergibt sich das in Abbildung 12 und in Abbildung 13 dargestellte Netz.

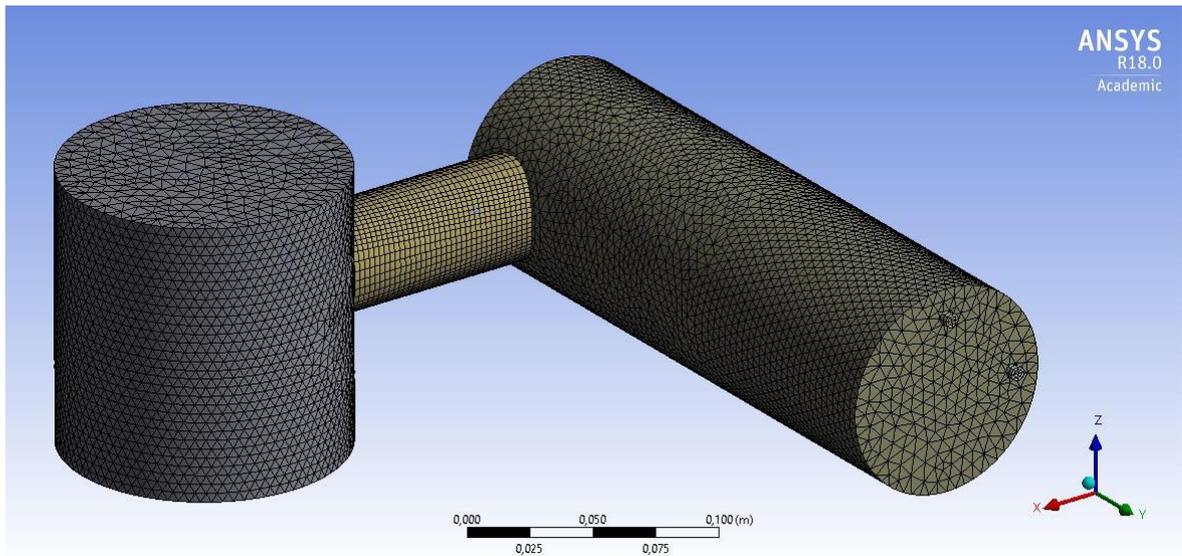


Abbildung 12: Vernetzung äußerer Bauteile

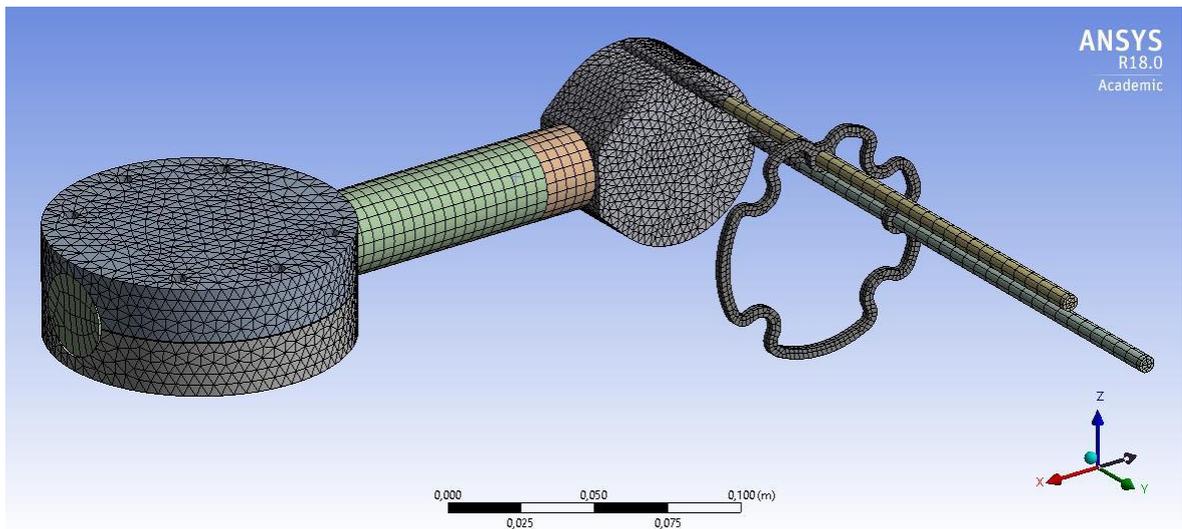


Abbildung 13: Vernetzung innerer Bauteile

Es ist ein Kompromiss für die Netzqualität erreicht worden. Die Rechenzeit liegt mit weniger als zehn Minuten in einem Bereich, der dem Zweck angemessen ist. Eine deutliche Verfeinerung des Netzes und somit eine Erhöhung der Elemente hat eine vernachlässigbare Auswirkung auf das Ergebnis, wirkt sich aber drastisch auf die Rechenzeit aus.

Um die Qualität der Vernetzung vergleichbar zu machen, wird nach der Durchführung der Simulation ein Wert ausgegeben. Da das Ziel der Vernetzung unter anderem ein Netz mit möglichst gleichbleibenden Elementgrößen ist, beschreibt der ausgegebene Wert die Homogenität der Elementgrößen. Er stellt das Verhältnis der durchschnittlichen zur maximalen Elementgröße dar. Ein Wert von 1 bezeichnet somit ein perfektes Netz aus exakt

gleich großen Elementen, während ein Wert nahe 0 ein Netz von geringer Qualität repräsentiert. Allgemein gilt, dass ein Netz mit einem Verhältnis über 0,5 gut anwendbar ist. Die Qualität des hier erzeugten Netzes wird zu 0,713 berechnet, was deutlich über der geforderten Grenze liegt.

#### 4.2.4 Randbedingungen

Nachdem die Geometrie in ein Gitternetz überführt worden ist, werden Systembedingungen definiert. In dieser Berechnung zählen dazu die Raumtemperatur, die Strahlungseigenschaften und die Temperatur auf der kalten Fläche des Kaltkopfes, welche im Folgenden einzeln erläutert werden.

Abbildung 14 stellt die Definition der Raumtemperatur mit dessen ausgewählten, rot gefärbten Flächen dar. Diese wird mit einem Wert von  $22^{\circ}\text{C}$  auf die Außenflächen der Vakuumrohre aufgebracht. Grundsätzlich werden alle Außenflächen bis auf eine Ausnahme gewählt. Die obere Stirnfläche des Vakuumrohres des Kaltkopfes erhält keine aufgeprägte Temperatur, da diese Fläche nur durch die Vereinfachung der Geometrie erzeugt worden ist und somit im realen Aufbau an dieser Stelle keinen Wärmeeintrag darstellt. Auf das Erzeugen einer Umgebung, deren Wärme über einen Wärmeübergangskoeffizienten an die Vakuumrohre übergeben wird, wird verzichtet. Zum einen erhöht sich dadurch die Rechenzeit, zum anderen wird in der vergleichenden Abschätzung zuvor die Raumtemperatur ebenfalls direkt auf die Vakuumrohre aufgeprägt.

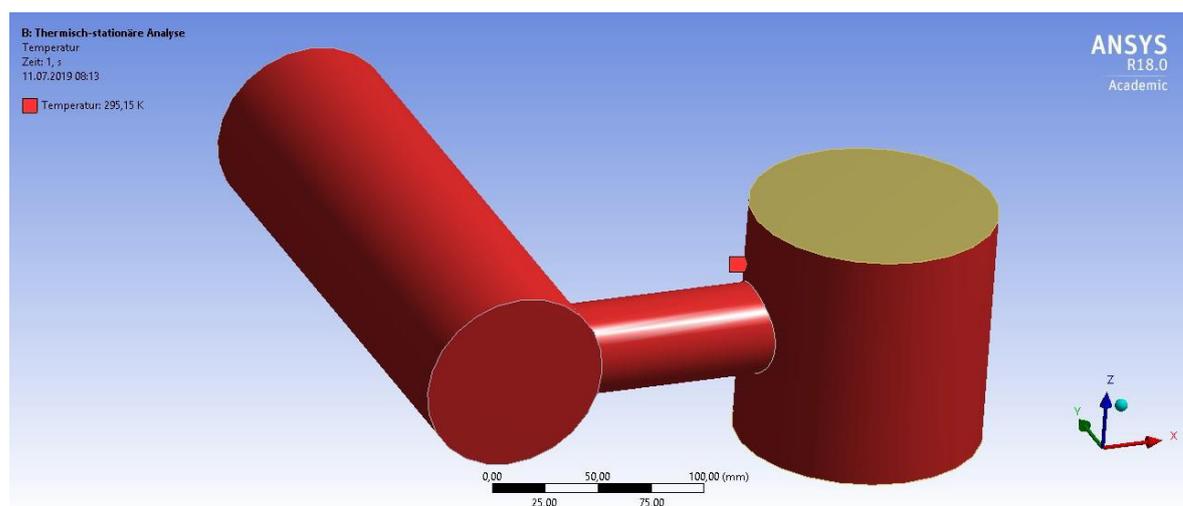


Abbildung 14: Warme Flächen

Als zweite Systembedingung werden die Eigenschaften der Strahlung definiert. Dazu zählt zunächst die Auswahl der von Strahlung betroffenen Flächen, die in Abbildung 15 in einer geschnittenen Ansicht blau dargestellt sind. Es werden hier fast alle inneren Oberflächen ausgewählt, wie beispielsweise die Innenwände der Vakuumrohre, die Mantelflächen der Mesitylenleitungen und die Außenflächen des Mesitylenbehälters. Es wird zudem ein Emissionskoeffizient für jede Fläche festgelegt. Dieser entspricht dem Wert des Emissionskoeffizienten für poliertes Metall aus Kapitel 3. Zudem wird die Möglichkeit gewährt, dass jede Strahlungsfläche auf jede andere Strahlungsfläche Einfluss nehmen kann, sofern dies durch die Geometrie nicht verhindert wird. Somit kann beispielsweise die Innenfläche des Mesitylenvakuumrohrs auf einen Teil der Wärmebrücke strahlen. Dies war in der vorherigen vereinfachten Berechnung nicht möglich.

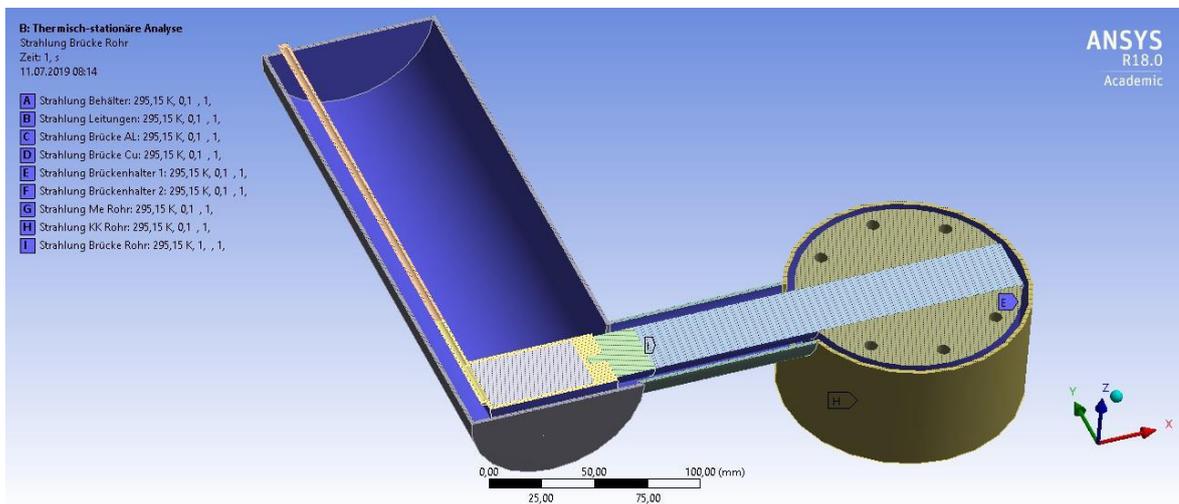


Abbildung 15: Strahlungsflächen

Zu den nicht strahlenden Flächen zählt die Innenseite der oberen Stirnfläche des Vakuumrohres des Kaltkopfes, da diese Fläche nur durch die Vereinfachung der Geometrie erzeugt worden ist und somit im realen Aufbau an dieser Stelle keinen Wärmeeintrag darstellt. Die zweite Ausnahme der Strahlungsflächen ist die kalte Fläche des Kaltkopfes, welche sich auf dem oberen Brückenhalter befindet. Diese Fläche ist in Abbildung 16 in einer geschnittenen Ansicht rot dargestellt. Die kalte Fläche wird mit einer Temperatur von 20 K beaufschlagt, so wie es auch in der vorherigen vereinfachten Rechnung vorgesehen wurde.

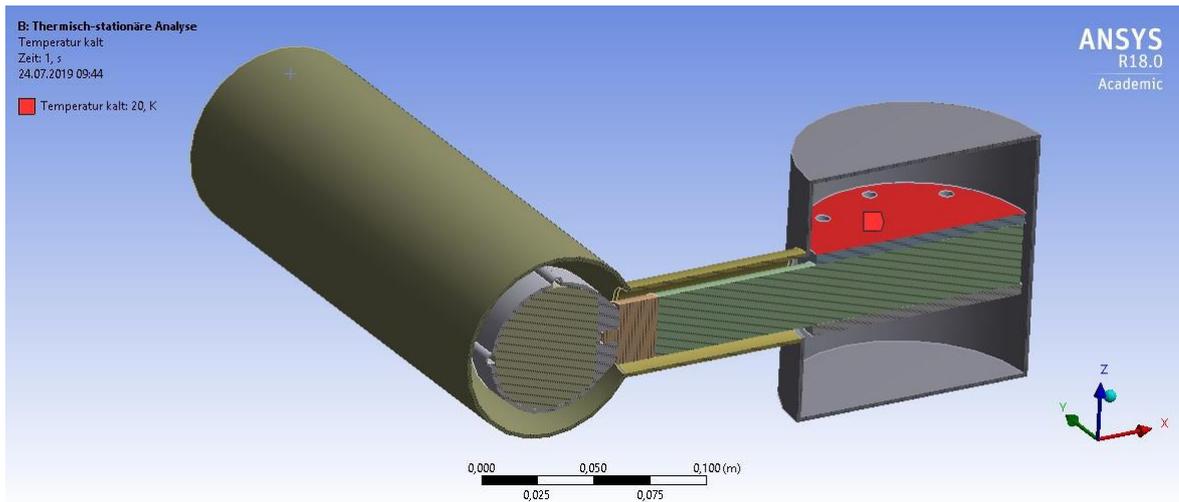


Abbildung 16: Kalte Fläche

#### 4.2.5 Ergebnis

Um eine Aussage über den Grad der Übereinstimmung zwischen der Abschätzung mit dem VDI-Wärmeatlas und der FEM-Simulation zu erhalten, werden die Wärmeeinträge der Strahlung miteinander verglichen, da diese in der Simulation einzeln betrachtet werden können. Relevante Ergebnisse der Simulation sind die einfallende, emittierte und reflektierte Strahlung sowie die sich dadurch ergebende Nettostrahlung, welche sich aus der einfallenden Strahlung abzüglich der reflektierten und emittierten Strahlung ergibt.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{ein} - \dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_{emi}$$

Die Nettostrahlung stellt die insgesamt vom Objekt ausgehende Strahlung als positiven Wert dar. Eine negative Nettostrahlung bedeutet somit eine insgesamt eingehende Strahlung, also einen Wärmeeintrag auf das Objekt.

Für den ersten Wärmeeintrag durch Strahlung auf den Mesitylenbehälter ergeben sich folgende Werte für die einfallende, emittierte und reflektierte Strahlung.

$$\dot{Q}_{S1,ein} = 4,0939 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S1,ref} = 3,7207 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S1,emi} = 3,95 \cdot 10^{-5} \text{ W}$$

Die vom Behälter insgesamt ausgehende Nettostrahlung berechnet sich somit wie folgt.

$$\dot{Q}_{S1,net} = -0,3731 \text{ W}$$

Für den zweiten Wärmeeintrag durch Strahlung auf die Mesitylenleitungen ergeben sich folgende Werte für die einfallende, emittierte und reflektierte Strahlung.

$$\dot{Q}_{S2,ein} = 3,1853 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S2,ref} = 2,8952 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S2,emi} = 0,0793 \text{ W}$$

Die von den Leitungen insgesamt ausgehende Nettostrahlung berechnet sich somit wie folgt.

$$\dot{Q}_{S2,net} = -0,2108 \text{ W}$$

Der dritte Wärmeeintrag durch Strahlung auf die Wärmebrücke ergibt sich als Summe der Wärmeeinträge durch Strahlung auf das Aluminium- und das Kupferstück. In der Simulation ist die Wärmebrücke als zwei miteinander verbundene Körper dargestellt, da die Materialien unterschiedliche physikalische Eigenschaften aufweisen.

Für das Aluminiumstück der Wärmebrücke ergeben sich folgende Werte für die einfallende, emittierte und reflektierte Strahlung.

$$\dot{Q}_{S3,AL,ein} = 0,5219 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S3,AL,ref} = 0,5219 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S3,AL,emi} = 3,11 * 10^{-6} \text{ W}$$

Die vom Aluminiumstück der Wärmebrücke insgesamt ausgehende Nettostrahlung berechnet sich somit wie folgt.

$$\dot{Q}_{S3,AL,net} = -0,0522 \text{ W}$$

Die Werte der einfallenden, emittierten und reflektierten Strahlung ergeben sich für das Kupferstück der Wärmebrücke folgendermaßen.

$$\dot{Q}_{S3,Cu,ein} = 5,6387 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S3,Cu,ref} = 5,1277 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{S3,Cu,emi} = 1,79 * 10^{-5} \text{ W}$$

Die vom Kupferstück der Wärmebrücke insgesamt ausgehende Nettostrahlung berechnet sich wie folgt.

$$\dot{Q}_{S3,Cu,net} = -0,5110 \text{ W}$$

Die ausgehende Nettostrahlung der gesamten Wärmebrücke ergibt sich aus der Summe beider Teilstücke.

$$\dot{Q}_{S3,net} = -0,5632 \text{ W}$$

Die hier simulierten Ergebnisse werden zusammen mit den entsprechenden Ergebnissen aus Kapitel 3.4 in Tabelle 7 dargestellt. Die Wärmeströme, welche durch das Prinzip der Wärmeleitung erzeugt werden, können nicht ohne größeren Aufwand mit den zur Verfügung stehenden Tools der Workbenchumgebung ermittelt werden. Allerdings liegen diese Werte, wie in Kapitel 3.3 berechnet und in Tabelle 6 gezeigt, in etwa in derselben Größenordnung wie die Werte der Wärmestrahlung.

Zwischen den Werten der abgeschätzten Strahlung und den simulierten Werten ist eine Abweichung zu erkennen, jedoch liegt diese in einem für diesen Kontext vertretbaren Rahmen. Der Fokus liegt nicht auf der relativen Abweichung oder den exakten Werten der Wärmeströme, sondern auf einer absoluten Abweichung von wenigen Watt. Dieser akzeptable Toleranzbereich basiert auf dem Kühlverhalten des Kaltkopfes, welches eine ausreichend große Leistungsreserve bietet. Eine detailliertere Fehleranalyse ist in Kapitel 6 zu finden.

Tabelle 7: Wärmeeinträge Simulation

Wärmeeintrag	Abschätzung [W]	Simulation [W]
$\dot{Q}_{S1}$	0,22	0,37
$\dot{Q}_{S2}$	0,40	0,21
$\dot{Q}_{S3}$	0,28	0,56

Die Simulation gilt somit durch die geringe Abweichung als realistisch. Aufgrund der deutlich genaueren Abbildungen des gesamten Systems in der Simulation gegenüber der auf dem Wärmetlas basierenden Abschätzung ist das Ergebnis der Simulation als präziser anzusehen.

### **4.3 Moderatorsystem bei maximaler Kühlung**

Die zuvor beschriebene Geometrie und deren Vernetzung finden im zweiten Teil der Analyse ebenfalls Anwendung. Um das Simulationsmodell nicht erneut mit einer händischen Berechnung vergleichen zu müssen, sollen die Geometrie und die Vernetzung nicht verändert werden. Lediglich die Randbedingungen werden auf das neue Ziel angepasst.

#### **4.3.1 Idee**

Am Ende dieser Analyse soll eine Anlagenkennlinie entstehen, die den Verlauf der benötigten Kühlleistung über die erreichbare Endtemperatur zeigt. Die Kennlinie des Kaltkopfes ist vom Hersteller vorgegeben. Durch ein Übereinanderlegen beider Kennlinien entsteht ein Schnittpunkt. Dieser Schnittpunkt stellt den sich nach einer gewissen Anfangszeit einstellenden Betriebspunkt dar. Es wird in diesem Punkt durch die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und den inneren Bauteilen genau der Wärmestrom auf das System eingetragen, der durch den Kaltkopf als Kühlleistung abgeführt wird. Als Ergebnis wird dann die Temperatur des Mesitylens angegeben.

#### **4.3.2 Randbedingungen**

Wie auch in der vorherigen Simulation gibt es drei Systembedingungen. Die Umgebungstemperatur und die Strahlungseigenschaften bleiben erhalten, da diese zum Aufbau des Moderatorsystems gehören und auch durch eine andere Zielstellung nicht verändert werden. Die zuvor konstant auf den Brückenthalter aufgeprägte kalte Temperatur wird in dieser Analyse jedoch durch eine Wertereihe für die Kühlleistung des Kaltkopfes ersetzt.

### 4.3.3 Ergebnis

Tabelle 8 zeigt die gemittelte Temperatur der Fläche des Moderatorsystems, an die der Kaltkopf befestigt wird, unter der Einwirkung verschiedener Kühlleistungen.

Tabelle 8: Simulierter Temperaturverlauf

Leistung Kaltkopf [W]	Mitteltemperatur Kaltkopf [K]
0,01	294,37
1	275,45
3	230,96
5	179,31
7	121,03
9	58,59
9,5	42,51
10	26,57
10,25	18,59
10,35	15,39
10,38	14,44
10,4	13,80
10,5	10,60

Abbildung 17 stellt die ermittelten Werte graphisch dar. Dabei ist zu erkennen, dass der Schnittpunkt der Kennlinie mit der x-Achse bei Raumtemperatur liegt. Dies ist dadurch zu erklären, dass bei einer Kühlleistung von 0 W keine Wärme über den Kaltkopf abgeführt wird und das System somit Raumtemperatur annimmt.

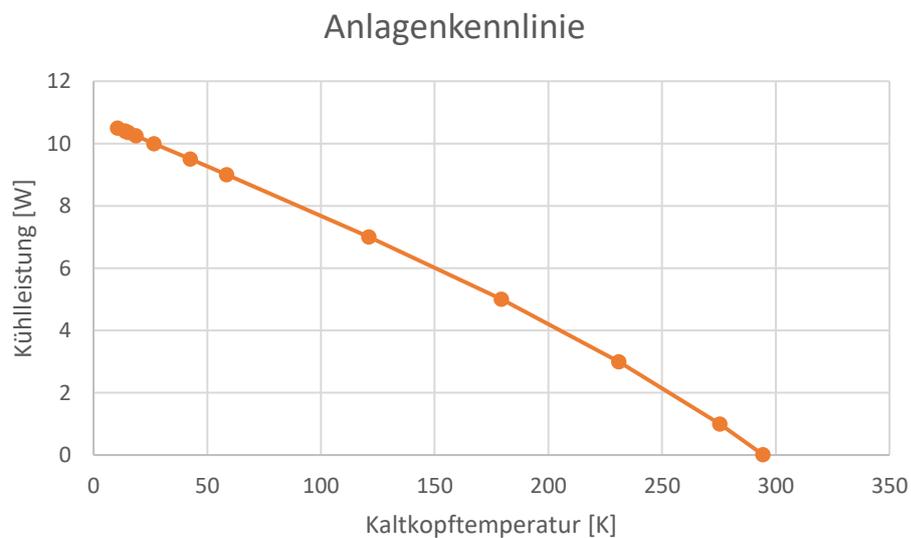


Abbildung 17: Simulierter Temperaturverlauf

In Abbildung 18 ist die Kühlleistung des Kaltkopfes über die Temperatur aufgetragen. Der Schnittpunkt mit der x-Achse bei 12,4 K bedeutet, dass dies die minimal erreichbare Temperatur des Kaltkopfes ist. An diesem Punkt steht jedoch keine Kühlleistung für das Moderatorsystem zur Verfügung.

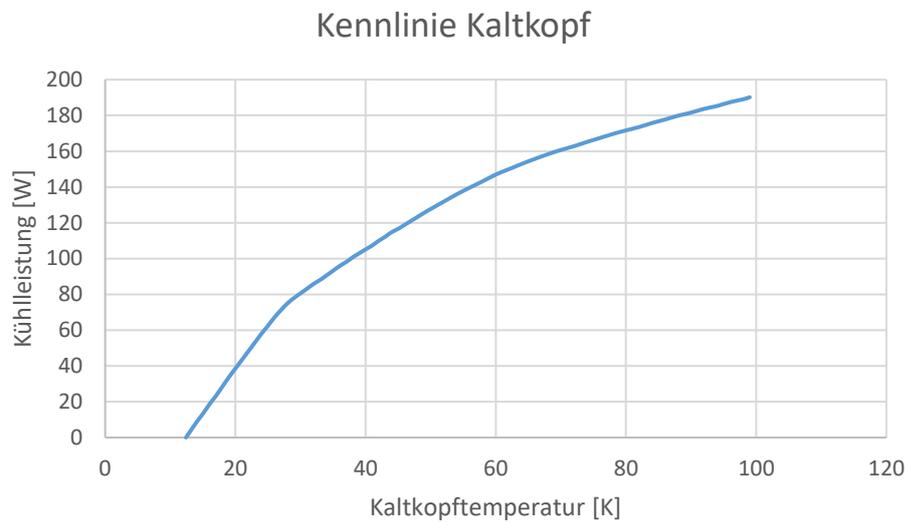


Abbildung 18: Leistungsverlauf Kaltkopf

Beim Übereinanderlegen der beiden zuvor gezeigten Kennlinien entsteht ein Schnittpunkt. Abbildung 19 zeigt den Leistungsverlauf beider Kennlinien über der Temperatur.

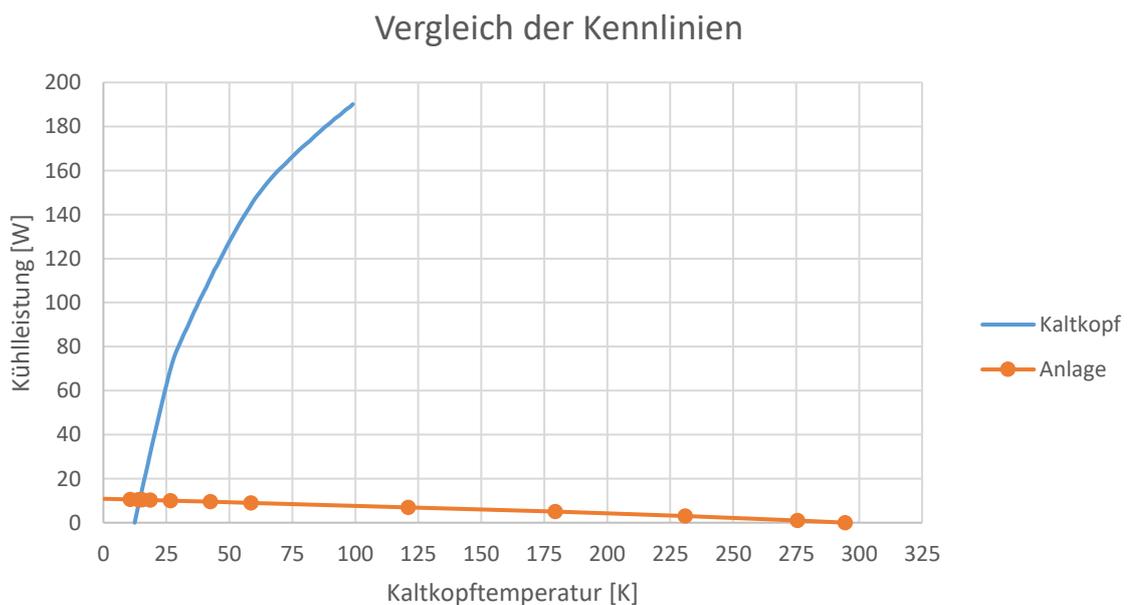


Abbildung 19: Vergleich der Kennlinien

Da die Kennlinie des Kaltkopfes einen großen Leistungsbereich und die Kennlinie der Anlage einen großen Temperaturbereich abdecken, ist ein Ausschnitt um den Schnittpunkt in Abbildung 20 vergrößert dargestellt.

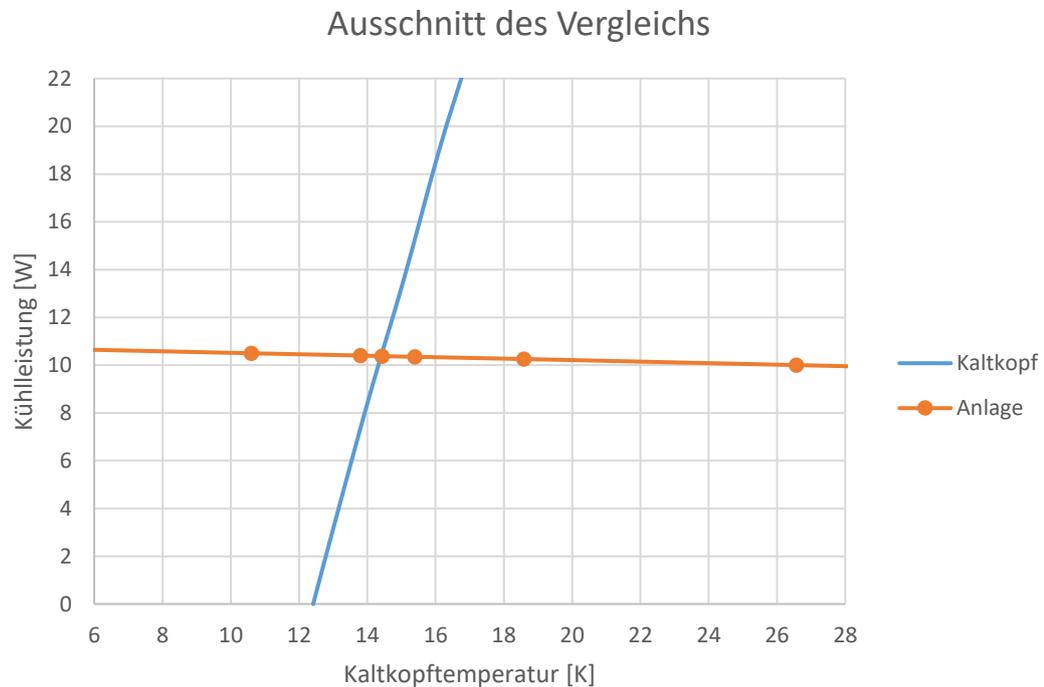


Abbildung 20: Ausschnitt des Vergleichs der Kennlinien

Der Schnittpunkt beider Kennlinien liegt bei einer Kühlleistung von 10,38 W und einer Temperatur des Kaltkopfes von 14,44 K.

Diese Temperatur herrscht an der Oberfläche des angeflanschten Kaltkopfes. Die über das Mesitylenvolumen gemittelte Temperatur beträgt in diesem Punkt 22,35 K.

Die Simulationssoftware ANSYS bietet in der verwendeten Umgebung aber kein Tool, welches eine über ein Volumen gemittelte Temperatur ausgibt. Die notwendigen Daten für deren Berechnung sind am Ende eines Durchlaufs einer Simulation jedoch vorhanden und können mit der Ansys eigenen Skriptsprache APDL (ANSYS Parametric Design Language) ausgelesen werden. Zu den notwendigen Daten zählen die Temperatur jedes Elementes des Gitternetzes, welches Teil des ausgewählten Körpers ist, und dessen Volumen. Alle Temperaturen der Elemente werden entsprechend nach deren Volumen gewichtet und aufsummiert. Das verwendete Skript sowie kurze Erläuterungen der einzelnen Befehlszeilen befinden sich in Anhang 1.

## 4.4 Moderatorsystem bei gesteuertem Gegenheizen

Die zuvor beschriebene Geometrie und dessen Vernetzung finden auch in dieser Analyse wieder Anwendung. Lediglich die Randbedingungen werden auf das neue Ziel angepasst.

### 4.4.1 Idee

Diese Analyse hat das Ziel, die Mesityltemperatur anhand eines zusätzlich auf das System einwirkenden Wärmestroms zu bestimmen. Da die Temperatur des Mesitylens nicht nur so gering wie möglich sein soll, sondern auch gezielt in einem gewissen Temperaturbereich angesteuert werden soll, ist ein gewisses Maß an Temperaturregelung notwendig. Um im Vorfeld eine Aussage treffen zu können, welche zusätzliche Heizleistung welche Mesityltemperatur erreichen wird, wird in dieser Analyse eine Kennlinie der Heizleistung über die Mesityltemperatur erstellt.

### 4.4.2 Randbedingungen

Wie auch in den vorherigen Simulationen bleiben die Systembedingungen Umgebungstemperatur und Strahlungseigenschaften erhalten, da diese zum Setup des Moderatorsystems gehören und auch durch eine andere Zielstellung nicht verändert werden. Zusätzlich zu der Wertereihe für die Kühlleistung des Kaltkopfes wirkt eine Heizleistung auf das System ein. Diese Heizleistung wird im realen Aufbau als wärmeerzeugender Strom durch ein Kupferkabel eingeführt. In dieser Simulation jedoch wird die Heizleistung als Wärmestrom direkt auf den Mesitylenbehälter aufgeprägt.

### 4.4.3 Ergebnis

Analog zur vorherigen Analyse wird erneut der Betriebspunkt bestimmt. Dazu wird analog zum bisherigen Vorgehen die gemittelte Temperatur an der Kaltkopfoberfläche der Anlage mit der leistungsabhängigen Temperatur des Kaltkopfes verglichen. Für die ausgewählten zusätzlichen Heizwerte von 5 W, 10 W, 20 W, 50 W und 100 W wird die Temperatur des Mesitylens im Betriebspunkt bestimmt und dann als Kennlinie dargestellt.

In Tabelle 9 werden alle aufgenommenen Messpunkte dargestellt. Dabei sind für die jeweilige zusätzliche Heizleistung die Kühlleistungen und die gemittelten Kaltkopftemperaturen dargestellt.

Tabelle 9: Messpunkte der Zusatzleistung

Heizleistung [W]	Kühlleistung [W]	Temperaturmittel [K]
0	6	150,90
0	7	121,03
0	8	90,13
0	9	58,59
0	10	26,57
5	11	146,69
5	12	116,67
5	13	85,69
5	14	54,10
5	15	22,07
10	16	142,43
10	17	112,29
10	18	81,23
10	19	49,61
10	20	17,57
10	20,04	16,29
20	26	133,83
20	27	103,49
20	28	72,30
20	29	40,62
20	29,7	18,14
20	30	8,57
50	55	137,44
50	56	107,69
50	57	76,87
50	58	45,40
50	58,67	24,10
50	59	13,59
100	104	123,41
100	105	93,89
100	106	63,31
100	106,74	40,22
100	107	32,05
100	108	0,38

Abbildung 21 stellt diese Ergebnisse graphisch dar. Es sind die ausgewählten Messpunkte sowie die Schnittpunkte mit dem Leistungsverlauf des Kaltkopfes eingetragen. Zum Vergleich ist die Anlagenkennlinie mit 0 W zusätzlicher Heizleistung eingezeichnet. Diese entspricht der Anlagenkennlinie aus der vorherigen Analyse ohne zusätzlicher Heizung.

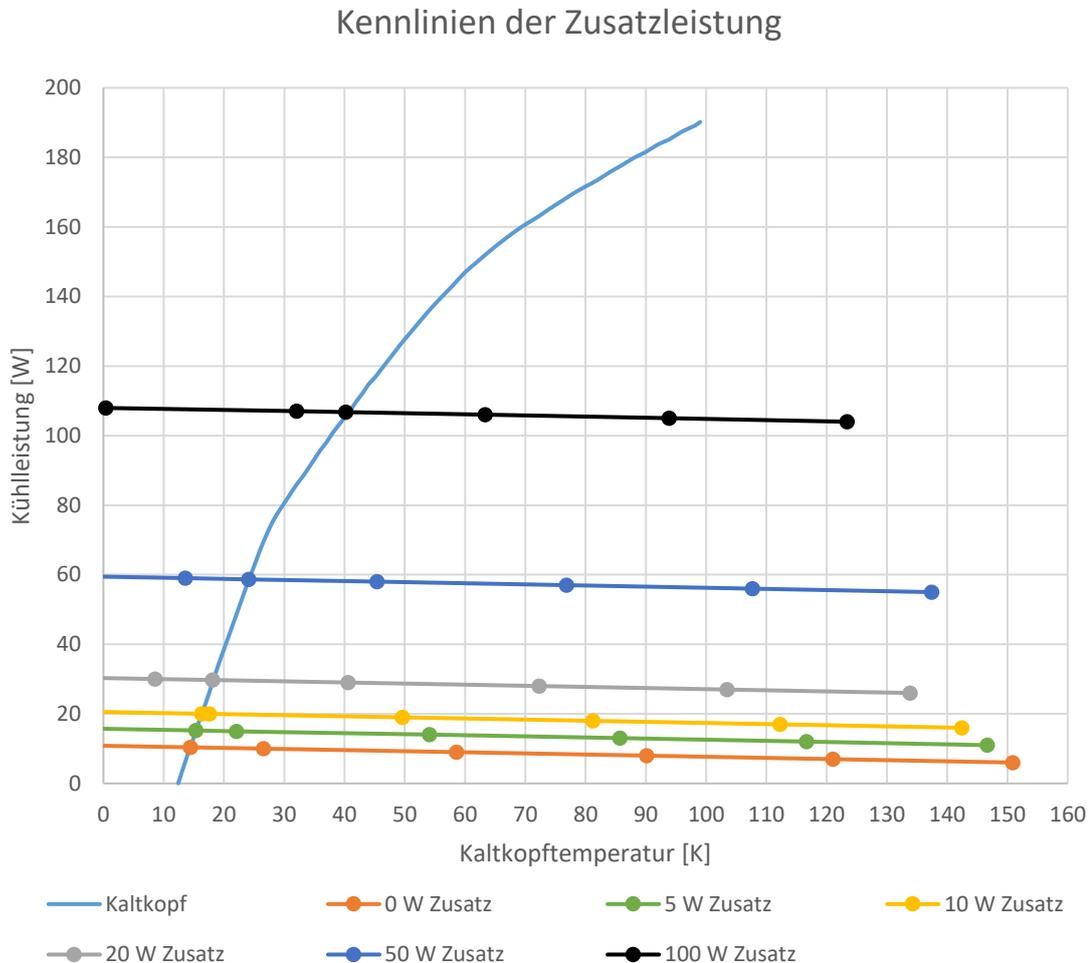


Abbildung 21: Kennlinien der Zusatzleistungen

Die eingezeichneten Schnittpunkte, welche die sich einstellenden Betriebspunkte bei entsprechender zusätzlicher Heizung darstellen, werden in Tabelle 10 aufgeführt. Neben der Kühlleistung im Schnittpunkt und der Kaltkopftemperatur wird für jede zusätzliche Heizleistung die Mesitylentemperatur dargestellt. Diese wird wie in der vorherigen Analyse beschrieben über das Mesitylenvolumen gemittelt. Es lässt sich erkennen, dass die Differenz zwischen der Kaltkopftemperatur und der Mesitylentemperatur mit steigender Heizleistung immer größer wird. Dies ist der räumlichen Anordnung der Kühl- und Heizleistung geschuldet. Während der Kaltkopf seine Flanschfläche kühlt, heizt der zusätzliche

Wärmestrom direkt den Mesitylenbehälter auf. Somit entsteht der Temperaturgradient innerhalb der Baugruppe vom Kaltkopf entlang der Wärmebrücke hin zum Mesitylen.

Tabelle 10: Betriebspunkte der Zusatzleistung

Heizleistung [W]	Kühlleistung [W]	Kaltkopf- temperatur [K]	Mesitylen- temperatur [K]
0	10,38	14,44	22,35
5	15,21	15,36	26,95
10	20,04	16,29	31,54
20	29,70	18,14	40,72
50	58,67	24,10	68,66
100	106,74	40,22	121,23

In Abbildung 22 werden die ermittelten Betriebspunkte bei zusätzlicher Heizung graphisch dargestellt. Eingetragen ist der zusätzliche Wärmestrom als Heizleistung über die gemittelte Mesitylentemperatur.

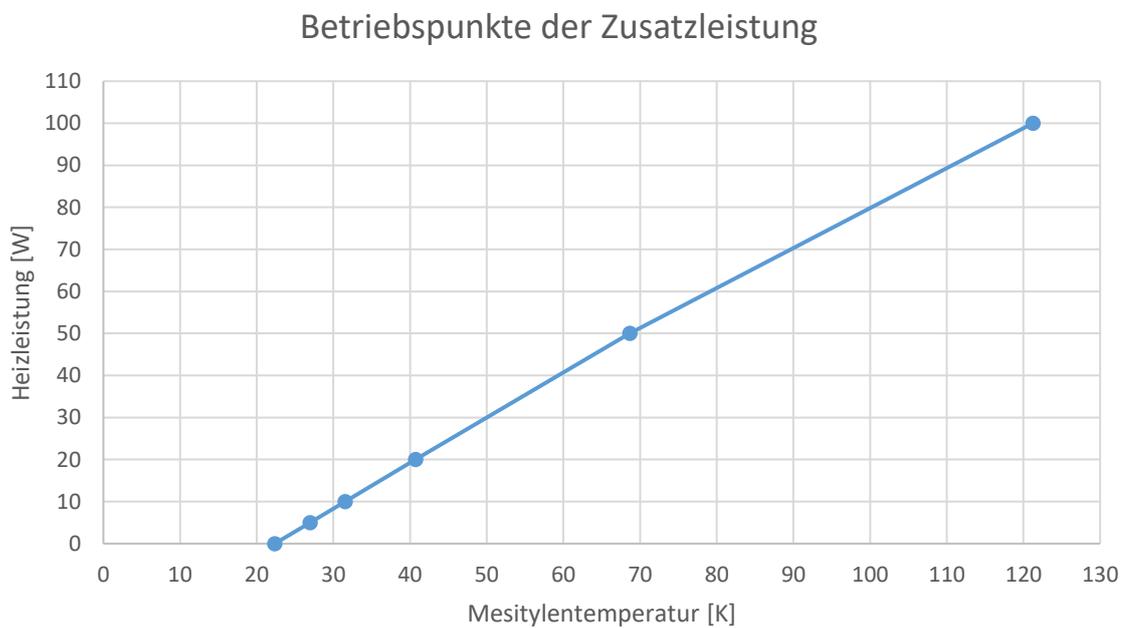


Abbildung 22: Betriebspunkte der Zusatzleistung

Mithilfe dieser Abbildung kann ein zusätzlicher Heizwert ausgewählt und somit jede beliebige Betriebstemperatur erreicht werden. In diesem Teststand wird für den Temperaturbereich von 20 K bis 70 K eine zusätzliche Heizleistung von 0 W bis 50 W benötigt.

## 5 Thermisch transiente Analyse

In diesem Kapitel soll eine Einschätzung gegeben werden, wie lange das Abkühlen des Moderatorsystems von Raumtemperatur bis zur Minimaltemperatur dauert. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist nicht die exakte Bestimmung der Abkühldauer, sondern lediglich eine Einschätzung der Größenordnung der benötigten Zeit. Dies ist für die Durchführung der Messungen am Teststand erforderlich, da somit eine effektivere Planung der Zeit möglich ist, die für die Inbetriebnahme des Teststandes benötigt wird.

### 5.1 Modellerstellung

Dieses Kapitel beschreibt die Annäherung an den realen Teststand durch ein Modell mit Hilfe einer analytischen Berechnung der Abkühldauer. Betrachtet wird für dieses Modell der Zusammenhang zwischen der vorhandenen Kühlleistung, dem sich bildenden Temperaturunterschied und der dafür benötigten Zeit.

Eine der allgemeinen Grundgleichungen der Wärmeübertragung ist die folgende Bilanzgleichung.

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{V} (\dot{Q} + \dot{W} + \dot{H})_{zu-ab} + \beta T \frac{dp}{dt} - h \frac{d\rho}{dt} \quad 16$$

Diese Gleichung ist allgemein gültig und kann für das hier vorliegende Modell noch durch die nachfolgend beschriebenen Annahmen vereinfacht dargestellt werden. Es finden keine zeitlichen Änderungen einer verrichteten Arbeit ( $\dot{W} = 0$ ) oder der Enthalpie ( $\dot{H} = 0$ ) statt. Eine Druckänderung tritt im angenäherten Model nicht auf ( $\frac{dp}{dt} = 0$ ). Ebenso wird die Dichte aller Materialien als konstant angenommen ( $\frac{d\rho}{dt} = 0$ ). Für den zugeführten Wärmestrom wird konstant der maximale Wärmeeintrag von 6 W angenommen ( $\dot{Q}_{zu} = 6 \text{ W}$ ).

Durch das Anwenden der Vereinfachungen reduziert sich die Formel 16 auf den zuvor beschriebenen Zusammenhang zwischen der Kühlleistung, dem sich bildenden Temperaturunterschied und der dafür benötigten Zeit. Weiterhin wird dabei für die Kühlleistung ein positiver Wert der abgeführten Leistung  $\dot{Q}_{ab}$  angenommen.

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{V} (\dot{Q}_{ab} - \dot{Q}_{zu}) \quad 17$$

Das Umstellen von Formel 17 nach der Zeit ergibt Folgendes.

$$dt = \frac{\rho * V * c_p * dT}{\dot{Q}_{ab} - \dot{Q}_{zu}} \quad 18$$

Der Ausdruck  $\rho * V * c_p$  der Dichte, des Volumens und der Wärmekapazität gilt für die Summe aus der Wärmebrücke mit deren Kupfer- und Aluminiumstück, aus den beiden Wärmebrückenhaltern und aus dem Mesitylenvolumen. Alle diese Bauteile müssen annähernd auf die Minimaltemperatur gebracht werden.

Die Parameter der Materialien der einzelnen Komponenten werden in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Materialeigenschaften

Bauteil	Dichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumen $V$ [cm <sup>3</sup> ]	Wärmekapazität $c_p$ [J/kg/K]	Produkt $\rho * V * c_p$ [J/K]
Brückenhalter	8940	142,0	385	488,7
Kupferbrücke	8940	128,4	385	441,9
Aluminiumbrücke	2700	14,4	888	34,5
Mesitylen	864	78,5	2000	135,6

Die Parameter der einzelnen Bauteile werden entsprechend dem Ausdruck  $\rho * V * c_p$  zunächst miteinander multipliziert. Anschließend werden die Produkte unter Berücksichtigung der Anzahl der verwendeten Bauteile summiert.

$$\rho * V * c_p = 2 * 488,7 \frac{J}{K} + 441,9 \frac{J}{K} + 34,5 \frac{J}{K} + 135,6 \frac{J}{K} = 1589,4 \frac{J}{K}$$

Der in Formel 18 beschriebene Zusammenhang zwischen Zeit, Temperatur und Leistung kann im Folgenden vereinfacht dargestellt werden.

$$dt = 1589,4 \frac{J}{K} * \frac{dT}{\dot{Q}_{ab} - 6 W} \quad 19$$

## 5.2 Leistungsverlauf

Da in der zuvor beschriebenen Formel ein konstanter Wärmestrom für den Berechnungsbereich angenommen wird, der Kaltkopf aber einen temperaturabhängigen Wärmestrom erzeugt, wird der Verlauf der Kühlleistung aus Abbildung 18 in einzelne Temperaturbereiche geteilt. In diesen Bereichen wird die Kühlleistung als konstant angesehen und für die Berechnung jeweils die mittlere Temperatur des Bereiches gewählt. In Richtung der kalten Temperaturen wird die Größe der Intervalle verringert, um einen deutlicheren Verlauf darstellen zu können und die Abweichung vom Modell zum realen Verlauf so gering wie möglich zu halten. In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass aus dem blau dargestellten, stetigen Verlauf der Kühlleistung ein durch Einteilung in Intervalle angenäherter, hier orange gefärbter Verlauf für die modellhafte Berechnung erzeugt wird.

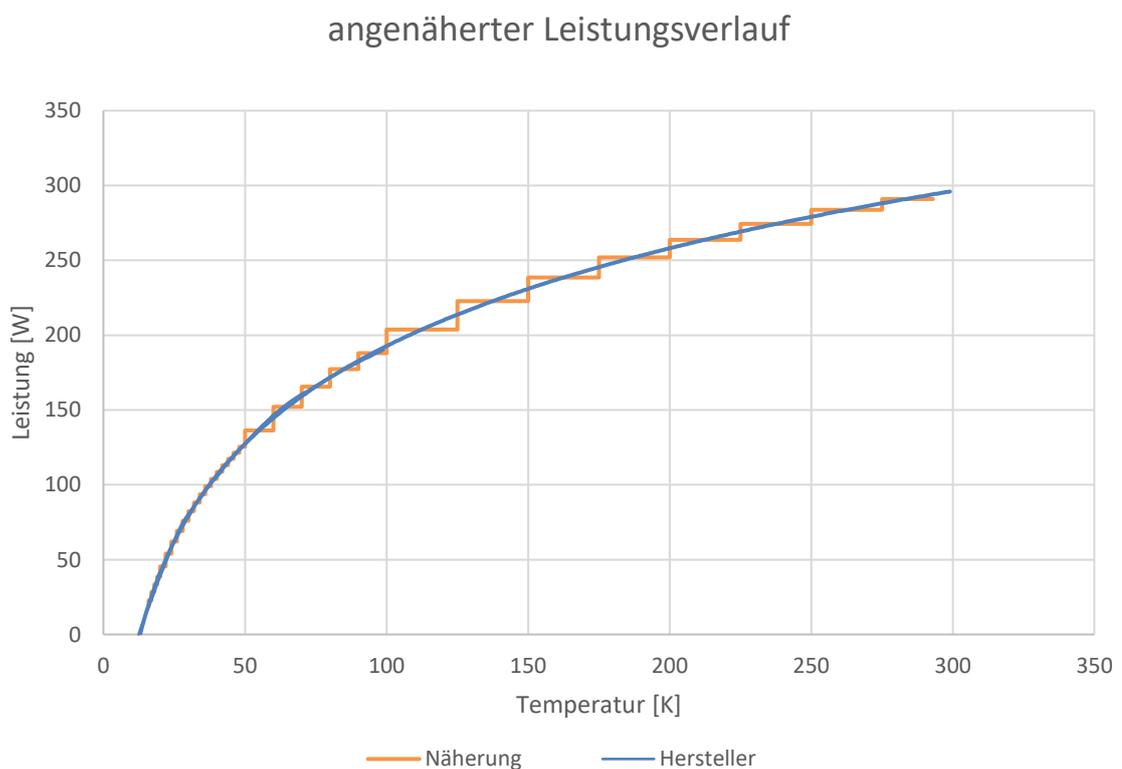


Abbildung 23: angenäherter Leistungsverlauf

### 5.3 Ergebnis

Der Startpunkt des ersten Intervalls liegt bei einer Raumtemperatur von 293 K. Das letzte Intervall endet bei einer mittleren Temperatur des Kaltkopfes von 14,4 K. Dabei wird die Mesityltemperatur nicht betrachtet. Tabelle 12 stellt die gewählten Intervallbereiche mit deren mittleren Temperaturen und den zugehörigen Kühlleistung dar. Das Zeitintervall berechnet sich nach der in Kapitel 5.1 erstellten Formel 19.

Tabelle 12: Intervalle

Temperaturintervall bis [K]	Mittlere Temperatur [K]	Mittlere Kühlleistung $Q_{ab}$ [W]	Temperaturdifferenz $dT$ [K]	Zeitintervall $dt$ [s]
275	284	291,1	18	100,33
250	262,5	283,7	25	143,07
225	237,5	274,3	25	148,11
200	212,5	263,8	25	154,13
175	187,5	252,0	25	161,53
150	162,5	238,5	25	170,90
125	137,5	222,7	25	183,32
100	112,5	203,8	25	200,86
90	95	187,9	10	87,39
80	85	177,4	10	92,73
70	75	165,6	10	99,59
60	65	152,1	10	108,79
50	55	136,3	10	121,94
48	49	125,4	2	26,61
46	47	121,5	2	27,52
44	45	117,4	2	28,53
42	43	113,1	2	29,67
40	41	108,6	2	30,97
38	39	103,9	2	32,46
36	37	99,0	2	34,20
34	35	93,7	2	36,24
32	33	88,2	2	38,69
30	31	82,3	2	41,68
28	29	76,0	2	45,42
26	27	69,2	2	50,26
24	25	62,0	2	56,77
22	23	54,1	2	66,05
20	21	45,5	2	80,38
19	19,5	38,6	1	48,81
18	18,5	33,6	1	57,60
17	17,5	28,4	1	71,10
16	16,5	22,8	1	94,57
15,5	15,75	18,4	0,5	63,99
15	15,25	15,4	0,5	84,74
14,5	14,75	12,2	0,5	127,47
14,3	14,4	10,0	0,2	80,08

Die Kaltkopftemperatur im minimalen Betriebspunkt beträgt 14,4 K, wie in Kapitel 4.3.3 gezeigt worden ist. Die Summe aller Zeitintervalle bis zur Minimaltemperatur des Kaltkopfes beträgt 3027 s.

Abbildung 24 veranschaulicht den Verlauf der Temperatur des Kaltkopfes während des Abkühlvorgangs. Zu Beginn ist eine große negative Steigung der Kennlinie zu erkennen, da dort eine hohe Kühlleistung durch den Kaltkopf möglich ist. Zum Ende hin fällt der Verlauf nicht weiter ab, da im niedrigen Temperaturbereich sich die Wärmeabfuhr durch die Kühlleistung immer mehr dem Wärmeeintrag annähert. Es stellt sich die Endtemperatur ein.

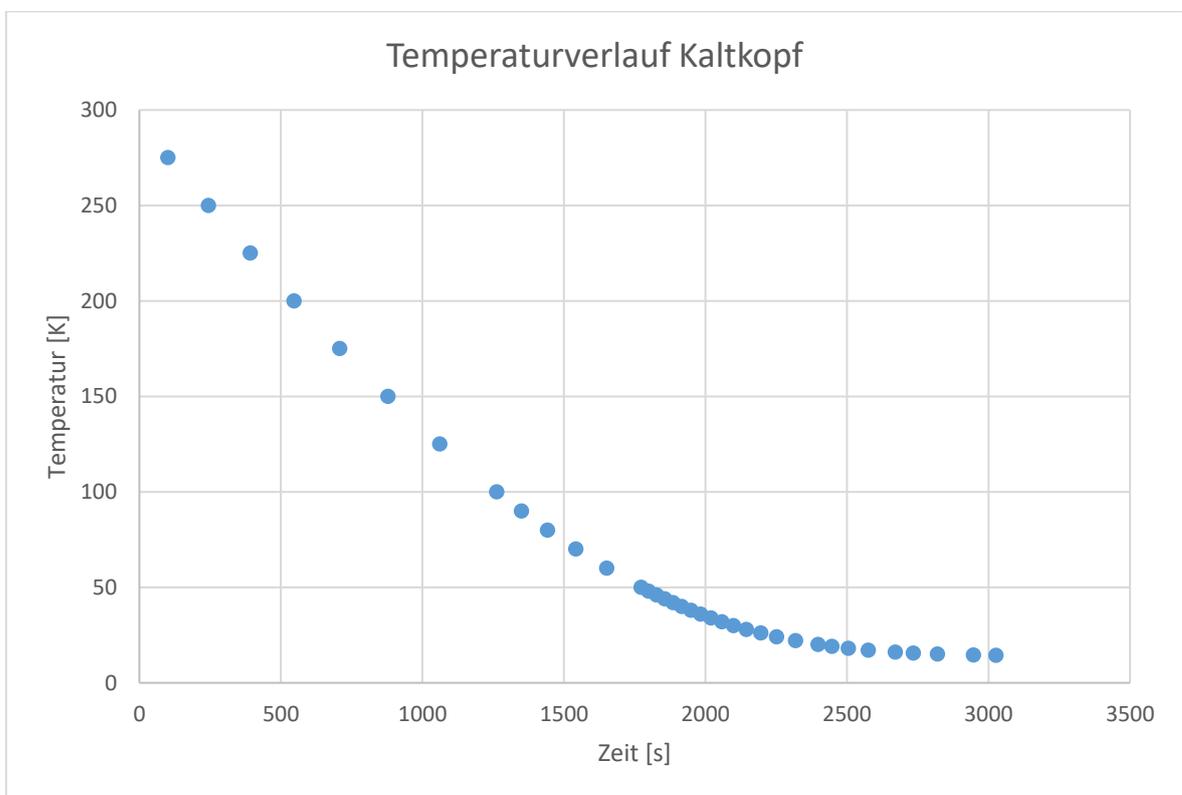


Abbildung 24: Abkühlvorgang

Aus Tabelle 12 und Abbildung 24 ist zu erkennen, dass der in Kapitel 4.3.3 ermittelte Betriebspunkt mit einer Kaltkopftemperatur von 14,4 K nach ungefähr 50 Minuten (3000 s) erreicht wird.



## 6 Diskussion der Annahmen

In diesem Kapitel werden die zuvor ermittelten Ergebnisse ausgewertet. Dazu werden die getroffenen Annahmen für die jeweiligen Simulationsschritte aufgeführt und deren Auswirkungen eingeschätzt.

### 6.1 Vergleich Abschätzung zu Simulation

Dieses Kapitel bezieht sich auf die Abschätzung der Wärmeflüsse in Kapitel 3 und auf die Simulation der Wärmeflüsse in Kapitel 4.2.

#### **Vakuumdruk:**

Es wird ein Vakuumdruk in den Abschätzungen von 0,1 Pa angenommen. Dieser Wert basiert auf der Leistung der Vakuumpumpe und möglichen Leckagen der Vakuumrohre. Erfahrungswerte mit ähnlichen Testständen lassen darauf schließen, dass ein Vakuum mit diesem Druck durchaus möglich ist. Ein besseres Vakuum hätte zur Folge, dass die Isolationswirkung der Vakuumschicht erhöht wird. Dies hätte einen geringeren Wärmeeintrag auf die inneren Bauteile und eine niedrigere minimale Betriebstemperatur zur Folge.

#### **Emissionskoeffizient:**

Der Wert des Emissionskoeffizienten von 0,09 ist eine allgemeine Angabe für poliertes Metall. Eine schlechte oder fehlende Politur oder sehr geringe Oberflächengüten hätten einen höheren Strahlungsaustausch zur Folge. Somit würden sich der Wärmeeintrag und damit auch die minimale Betriebstemperatur erhöhen. Ein Emissionskoeffizient kleiner als der angenommene nach einer Hochglanzpolitur beispielsweise würde die Isolationswirkung verstärken.

#### **Geometrie:**

Die in der Abschätzung verwendete Geometrie ist sehr stark vereinfacht worden, während die Simulation den realen Bauteilen sehr ähnlich ist. Es bestehen trotzdem weiterhin Vereinfachungen wie beispielsweise die Vernachlässigung der Schraubverbindung der Wärmebrücke. Die Simulation soll realitätsnahe Ergebnisse liefern, kann aber bei fehlerhaften Randbedingungen oder Analyseinstellungen auch sehr weit von der Realität abweichende Ergebnisse erzeugen. Ein starkes Indiz, dass die Simulation die reale

Geometrie hinreichend genau abbildet, ist die geringe Abweichung der Wärmeeinträge zwischen dem aus dem Wärmetlas basierenden Ansatz und der Simulation.

**Vernetzung:**

Die Qualität der Vernetzung wird in Kapitel 4.2.3. beschrieben. Eine perfekte Vernetzung, bei der die einzelnen Elemente unendlich klein sind, würde die Geometrie exakt nachbilden. Dies würde jedoch eine unendlich große Anzahl an Elementen bedingen. Es ist für diese Geometrie ein Kompromiss zwischen geringer Rechenzeit und hoher Qualität der Ergebnisse gefunden worden. Die Ergebnisse der Simulation mit der gewählten Vernetzung werden mit den Ergebnissen einer Simulation mit einer deutlich feineren Vernetzung verglichen. Der Vergleich hat eine Abweichung von unter 1% für die minimale Betriebstemperatur gezeigt. Somit kann die Vernetzung als ausreichend genau betrachtet werden.

**Strahlungsflächen:**

In der Abschätzung ist der Strahlungsaustausch zwischen jeweils zwei Flächen betrachtet worden. Im Gegensatz dazu wird in der Simulation die Strahlung jeder Fläche zu jeder anderen Fläche berücksichtigt. Dies wird lediglich durch die Geometrie eingeschränkt. Aufgrund der geringen Abweichungen von deutlich unter 1 W der Wärmeeinträge zwischen den Ergebnissen der händischen Abschätzung und denen der Simulation ist diese Annahme durchführbar.

**Raumtemperatur:**

Die Raumtemperatur wird in der Abschätzung auf die Innenfläche des Vakuumrohres aufgeprägt, während in der Simulation die Außenfläche Raumtemperatur besitzt. Die maximale Abweichung der Temperatur von der Außenseite zur Innenseite des Vakuumrohres in der Simulation beträgt 0,02 K. Im Vergleich zum Temperaturunterschied vom Vakuumrohr zu den inneren Bauteilen von ungefähr 273 K erzeugt auch diese Annahme einen vernachlässigbaren Fehler.

Zusammenfassend lässt sich somit für die Ergebnisse der simulierten und der abgeschätzten Wärmeflüsse sowie für deren Vergleich sagen, dass die getroffenen Annahmen nur eine geringe Abweichung erzeugen. Diese Abweichung ist für das Ziel des Kapitels 4.2, eine Aussage über die Plausibilität der Simulation zu erhalten, zu vernachlässigen.

Die Simulation kann als plausibel angesehen werden.

## 6.2 Moderatorsystem bei maximaler Kühlung

Diese Auswertung bezieht sich auf die Simulation des Moderatorsystems bei maximaler Kühlung in Kapitel 4.3. Da diese auf dem zuvor ausgewerteten Ergebnis des Kapitels 4.2 basiert, finden die oben genannten Annahmen in betrachteten Kapitel ebenfalls Anwendung. Es ist bereits gezeigt worden, dass diese Annahmen zu plausiblen Ergebnissen führen, daher werden im Folgenden nur die für das Kapitel 4.3 zusätzlich hinzukommenden Annahmen beschrieben.

### **Kühlfläche:**

Die Kühlfläche des Kaltkopfes wird an den bisher betrachteten Aufbau angeflanscht und besitzt somit an der Kontaktfläche eine ähnliche Temperatur. Diese Temperatur ist jedoch nicht über die gesamte Flanschfläche konstant, wodurch die Kühlleistung über die gesamte Flanschfläche ebenfalls nicht konstant ist. Die Kaltkopftemperatur ist zur Berechnung in Tabelle 8 gemittelt worden. Da die Differenz der beiden gemittelten Werte jedoch unter  $1^{\circ}\text{C}$  liegt und weitere Angaben des Herstellers des Kaltkopfes für diesen Aspekt fehlen, wird eine Betrachtung der örtlichen Verteilung der Kühlleistung vernachlässigt.

### **Diskrete Werte:**

Wie in Abbildung 17 zu sehen ist, sind diskrete Werte der Kühlleistung betrachtet worden und nicht ein stetiger Verlauf. Die Anzahl der betrachteten Werte ist jedoch, wie in Abbildung 20 dargestellt, im relevanten Bereich erhöht worden und für diese Anwendung ausreichend genau.

### **Unbekannte Fehler:**

Um eine Einschätzung über den Einfluss bisher nicht erkannter Ungenauigkeiten zu erhalten, könnte ein Fehler von 100% des bisherigen Ergebnisses angenommen werden. In diesem Fall würde das System für jede Temperatur die doppelte Kühlleistung benötigen. Aus Abbildung 19 und Abbildung 20 ist dann zu erkennen, dass sich der Betriebspunkt selbst bei diesem großen Fehler nur um  $2^{\circ}\text{C}$  verschieben würde. Das ist der sehr großen Steigung der Kaltkopfkenlinie im Vergleich zur Anlagenkenlinie geschuldet.

Es lässt sich also sagen, dass die für die Simulation in Kapitel 4.3 getroffenen Annahmen einen vernachlässigbar kleinen Fehler erzeugen.

### 6.3 Moderatorsystem bei gesteuertem Gegenheizen

Die Auswertung bezieht sich auf die Simulation in Kapitel 4.4. Ähnlich wie in Kapitel 6.2 gelten die zuvor getroffenen Annahmen auch in dem Kapitel der Analyse des Moderatorsystems bei gesteuertem Gegenheizen. Es werden die bisher getroffenen Annahmen nicht erneut analysiert, sondern nur die neu hinzukommenden.

#### **Wärmeeintrag:**

Der Wärmeeintrag durch das Gegenheizen, welcher im realen Aufbau durch ein Kupferkabel auf das System einwirkt, wird in der Simulation direkt auf die Außenwand des Mesitylenbehälters aufgebracht. Unter Berücksichtigung der Verluste der Wärmeleitung durch das Kupferkabel wird außerhalb des Systems ein leicht höherer Heizstrom nötig sein als in Abbildung 22 zu sehen ist.

Da das Ziel des Gegenheizens ein Abdecken eines Temperaturbereichs ist und nicht das Einstellen bestimmter Temperaturwerte im Einzelnen, ist die Annahme für den Wärmeeintrag des Gegenheizens durchführbar.

## 6.4 Berechnung der Abkühldauer

Im Folgenden wird die Berechnung der Abkühldauer in Kapitel 5 ausgewertet. Dazu werden die getroffenen Annahmen aufgeführt und deren Einfluss bewertet.

### **Modellannäherung:**

Der Einfluss des Kaltkopfes wird in diesem Modell dem eines großen gefüllten Beckens gleichgestellt, in welches das Moderatorsystem getaucht wird. Die kryogene Temperatur des Fluides im Beckens bleibt dabei konstant, während sich die Temperatur des Moderatorsystems von anfänglich Raumtemperatur immer weiter an die kalte Temperatur des Fluides annähert. Um eine große Abweichung des modellierten vom realen Abkühlvorgang zu vermeiden, wird der Verlauf, wie in Abbildung 23 dargestellt, in einzelne Intervalle eingeteilt. Die reale Kühlleistung wird somit immer nur für einen geringen Bereich angenähert, anstatt für den kompletten Abkühlvorgang.

Der Fehler, der durch das Vereinfachen des realen Aufbaus durch das Modell entsteht, kann besonders durch die Intervalleinteilung der Berechnungsabschnitte als gering gesehen werden. Im Besonderen für das Einschätzen der Größenordnung von einer Stunde stellt diese Annahme einen zu vernachlässigenden Fehler dar.

### **Mesitylentemperatur:**

Durch dieses Modell wird lediglich betrachtet, zu welchem Zeitpunkt der Kaltkopf seine Betriebstemperatur erreicht. Die Mesitylentemperatur ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht minimal. Um den Zeitraum bis zum Erreichen der Minimaltemperatur des Mesitylens bestimmen zu können, wird das exakte Kühlverhalten des verwendeten Kaltkopfes nahe dessen Minimaltemperatur benötigt. Damit ließe sich eine Aussage treffen, wann das Mesitylen vollständig die Minimaltemperatur von 22 K erreicht.

Falls es nötig ist, das Mesitylen exakt auf die Minimaltemperatur zu bringen, kann das Modell durch die getroffene Annahme keine Aussage dazu liefern. Sollte die Mesitylentemperatur jedoch lediglich in die Nähe des Minimums gekühlt werden müssen, dann ist die Annahme für das verwendete Modell zulässig.

**Vereinfachungen:**

Die Grundgleichung ist in allgemeiner Form dargestellt. Da in diesem Modell kein Einfluss durch eine Arbeits- oder Enthalpieänderung betrachtet wird, können diese beiden Parameter zu null gesetzt werden. Druck- und Dichteänderungen des Beckens finden ebenfalls nicht statt, da wie zuvor beschrieben angenommen wird, dass das Becken ein isothermes Verhalten aufweist. Somit erzeugen diese vier Vereinfachungen für das Modell keinen Fehler.

# 7 Ergebnisse und Ausblick

## 7.1 Zusammenfassung

Es sind alle der zu Beginn genannten Ziele erreicht worden. Die Betriebstemperatur des kryogenen Moderatorsystems ist in Kapitel 4.3 auf 22 K im Bereich des Moderatormaterials bestimmt worden. Dies ist durch eine Simulation geschehen, die zuvor auf Basis eines Vergleichs mit einer händischen Berechnung verifiziert worden ist.

Der Heizwert, der auf das System aufzuprägen ist, um bei einer maximalen Kühlleistung eine Temperatur von 70 K anzusteuern, ist in Kapitel 4.4 mit einem Betrag von 50 W bestimmt worden. Weitere Heizwerte, die notwendig sind, um bestimmte Temperaturen ansteuern zu können, sind in Abbildung 22 abzulesen.

Aufgrund der Berechnung in Kapitel 5 ist eine Abkühldauer des gesamten Systems von Raumtemperatur auf die Betriebstemperatur in der Größenordnung von ungefähr einer Stunde zu erwarten. Eine Wartezeit für die Abkühldauer des Kaltkopfes von über einem Tag während der Inbetriebnahme des Teststandes ist daher nicht zu erwarten.

## 7.2 Weitere mögliche Aufgaben

Als eine der ersten Aufgaben nach Fertigstellung der konstruierten Bauteile des Moderatorsystems wird eine Messung der Temperatur des Mesitylens im Betriebszustand empfohlen. Diese kann dann mit der berechneten Betriebstemperatur verglichen werden. Während des Einkühlens sollte dabei die Zeit gemessen und mit der berechneten Abkühldauer verglichen werden. Die Simulation kann nach der Ermittlung von temperaturabhängigen Materialdaten für Mesitylen erneuert werden, diese stehen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung.

Sollte die Kühlleistung des Moderatorsystems wegen einer neuen Zieldefinition für niedrigere Temperaturen oder aufgrund von fehlerhafter Fertigung oder Montage verbessert werden müssen, ist ein Polieren der Oberflächen der inneren Bauteile möglich. Als weitere Maßnahmen dazu könnten auch eine zweite Schicht Isolationsvakuum und ein Austausch der Wärmebrücke durch hochreines Kupfer dienen.



## 8 Literaturverzeichnis

[1]

Brückel, Thomas; Eckold, Götz; Griewatsch, K.; Link, P. Steitz, Roland; Voit, A.; Zabel, Helmut (2011): Perspektiven der Neutronenforschung in Deutschland. im Licht der kommenden neuen Europäischen Neutronenquelle. Institut für Physikalische Chemie.

[2]

Gutberlet, Thomas; Rucker, Ulrich (2019): Accelerator Based High Brilliance Neutron Sources. In: Manuel Angst, Thomas Brückel, Stephan Förster, Karen Friese und Reiner Zorn (Hg.): Scattering! Soft, Functional and Quantum Materials (Schlüsseltechnologien / Key Technologies, 190), S. 318–333.

[3]

ESFRI Physical Sciences and Engineering Strategy Working Group - Neutron Landscape Group (2016): Neutron scattering facilities in europe. present status and future perspectives. Italy: University of Milan.

[4]

Mauerhofer, Eric; Rucker, Ulrich; Cronert, Tobias; Zakalek, Paul; Baggemann, Johannes; Doege, Paul-Emmanuel et al. (2017): Conceptual design report. NOVA ERA (Neutrons obtained via accelerator for education and research activities) : a Jülich high brilliance neutron source project (Allgemeines / General, 7).

[5]

Organisation for Economic Co-operation and Development: AL-27 Cross Section. Online verfügbar unter <http://www.oecd-neo.org/janisweb/book/neutrons/Al27/MT1/renderer/658>.

[6]

Kabelac, S. Prof. Dr.-Ing.; Vortmeyer, D. Prof. Dr. (2006): Wärmestrahlung. Ka. In: Verein Deutscher Ingenieure VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hg.): VDI-Wärmeatlas. Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, Ka 1–Ka 11.

[7]

viZaar industrial imaging AG (2019): Emissionsgrad Tabelle. Online verfügbar unter <https://www.thermografie-xtra.de/tipps-tricks/emissionsgrad-tabelle>.

[8]

Reiss, H. Prof. Dr. (2006): Wärmestrahlung. Kf. In: Verein Deutscher Ingenieure VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hg.): VDI-Wärmeatlas. Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, Kf 1-Kf 22.

**[9]**

Hans-Peter Willig (2019): Luft. Zusammensetzung. Hg. v. cosmos-indirekt.de. Online verfügbar unter <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Luft>.

**[10]**

Elgeti, K. Prof. Dr.-Ing.; Hahne, E. Prof. Dr.-Ing.; Martin, E. Prof. Dr.-Ing. (2006): Wärmeleitung. E. In: Verein Deutscher Ingenieure VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hg.): VDI-Wärmeatlas. Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer, Ea 1-Ec 24.

**[11]**

Span, Roland Prof. Dr.-Ing. (2006): Stoffwerte von Luft. Dbb. In: Verein Deutscher Ingenieure VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hg.): VDI-Wärmeatlas. Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer.

**[12]**

Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Hönnmann, Winfried; Schramek, Ernst-Rudolf (1993): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 66. Aufl. München Wien: Oldenbourg.

**[13]**

Technical Products, Inc.: Vespel® SP-1 Material Specifications. Online verfügbar unter <http://www.technicalproductsinc.com/pdf/Specs/Vespel%20Specs.pdf>, zuletzt geprüft am 11.04.2019.

**[14]**

Yaws, Carl L. (1995): Handbook of thermal conductivity. Volume 3. Houston: Gulf Pub. Co (Library of physico-chemical property data). Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780884153849>.

**[15]**

Knothe, Klaus; Wessels, Heribert (2017): Finite Elemente. Eine Einführung für Ingenieure. 5. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.

# Anhang

## Anhang 1: Skript Mittlere Temperatur

Nachfolgend ist das Skript eingefügt, das die über ein ausgewähltes Volumen gemittelte Temperatur ausgibt.

Zeilen, die mit einem Ausrufezeichen starten, sind Kommentarzeilen und werden von der Software übergangen. Hier wird dadurch kurz die Funktion der darauffolgenden Zeile beschrieben.

```
! Start nach Durchfuehrung der Berechnung  
/post1
```

```
! Bezug auf alle berechneten Ergebnisse  
allsel,all
```

```
! Bezug auf die Ergebnisse des letzten Zeitschrittes  
set,last
```

```
! Auswahl des Koerpers  
cmsel,s,Me_Vol,VOLU
```

```
! Temperatur jedes Elementes in Tabelle speichern  
ETABLE,temp_elem,TEMP
```

```
! Volumen jedes Elements in Tabelle speichern  
ETABLE,vol_elem,VOLU,
```

```
! Multiplikation von Temperatur und Volumen fuer jede Zeile  
der Tabellen  
SMULT,weighted_temp,temp_elem,vol_elem,1,1,
```

```
! Summe der multiplizierten Zeilen der Tabelle  
SSUM
```

```
! Berechnung der summierten gewichteten Temperatur
*get,total_weighted_temp,ssum,,item,weighted_temp

! Berechnung des gesamten Volumens
*get,total_vol,ssum,,item,vol_elem

! Berechnung der mittleren Temperatur des Volumens
my_volume_average_temp = total_weighted_temp/total_vol

! Endbefehl
fini
```

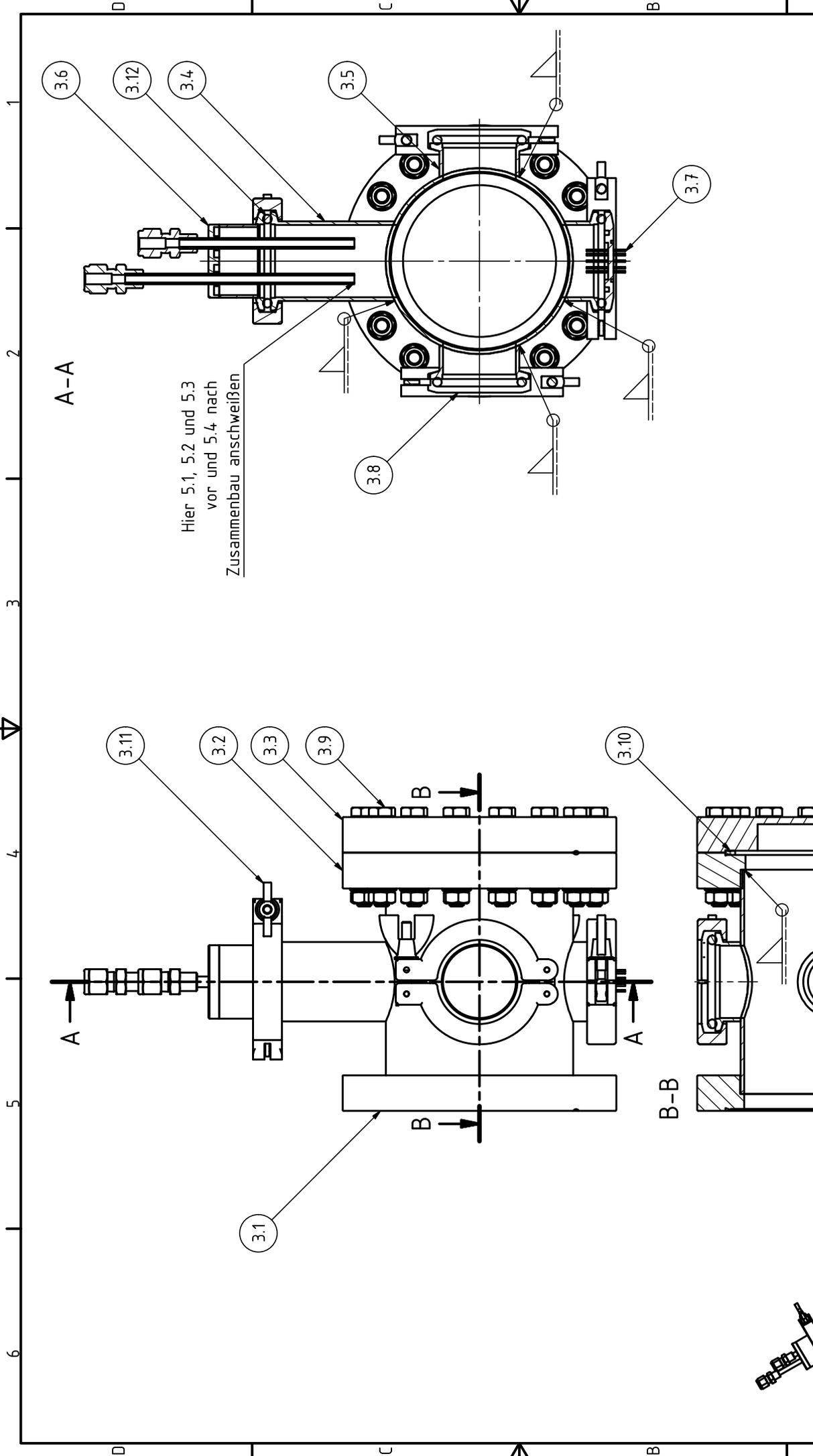
## **Anhang 2: Konstruktionszeichnungen**

Die in vorhergegangenen Arbeiten erstellten Konstruktionszeichnungen werden im Folgenden angehängt. Dazu zählen die Einzelbauteilzeichnungen und die Baugruppenzeichnungen sowie die Stückliste und die Zeichnungsliste.



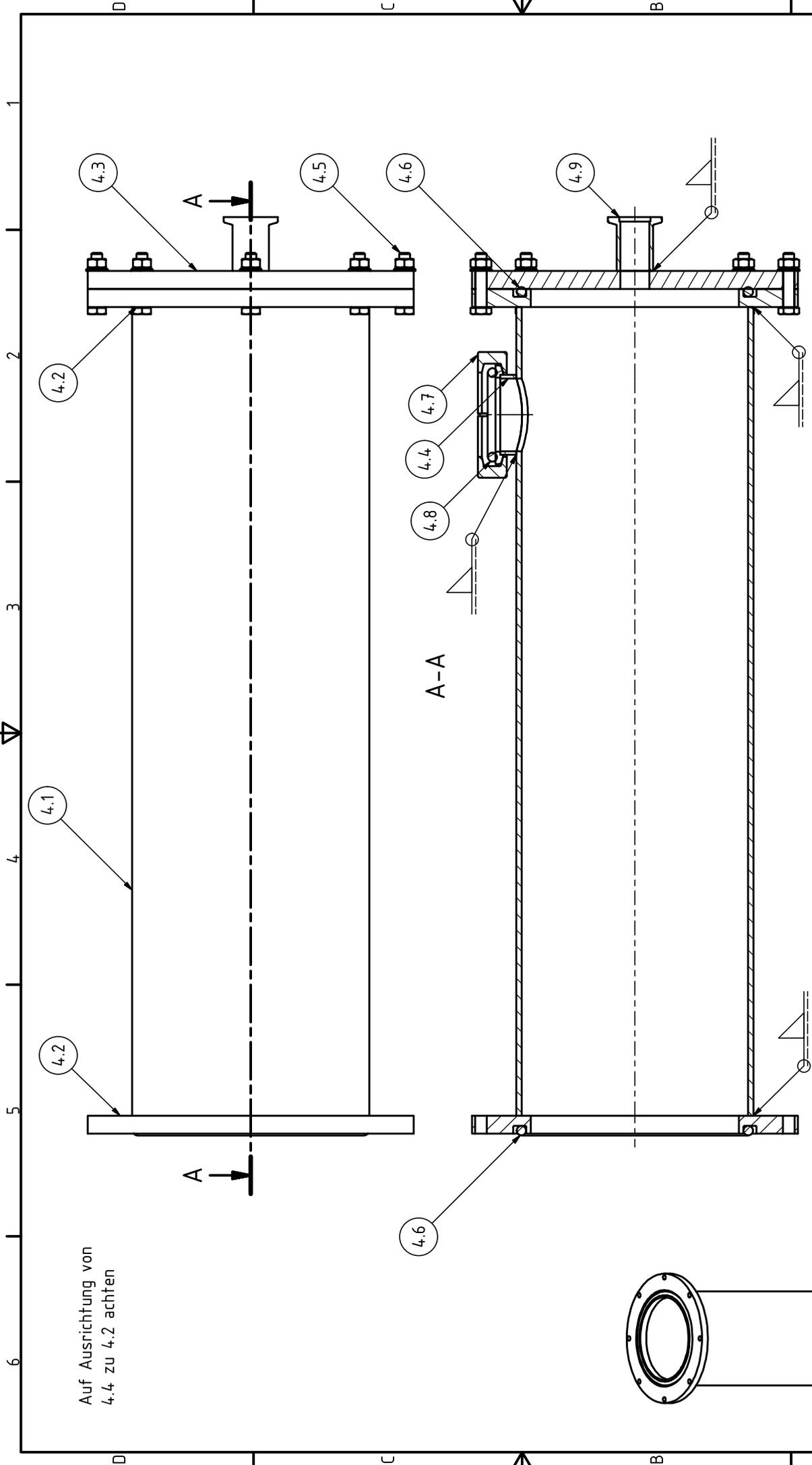






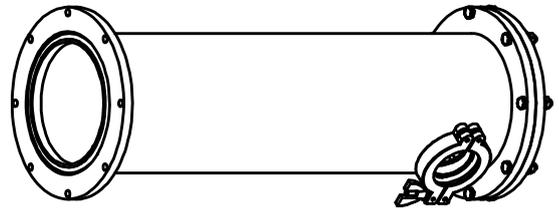
A-A  
 Hier 5.1, 5.2 und 5.3  
 vor und 5.4 nach  
 Zusammenbau anschweißen

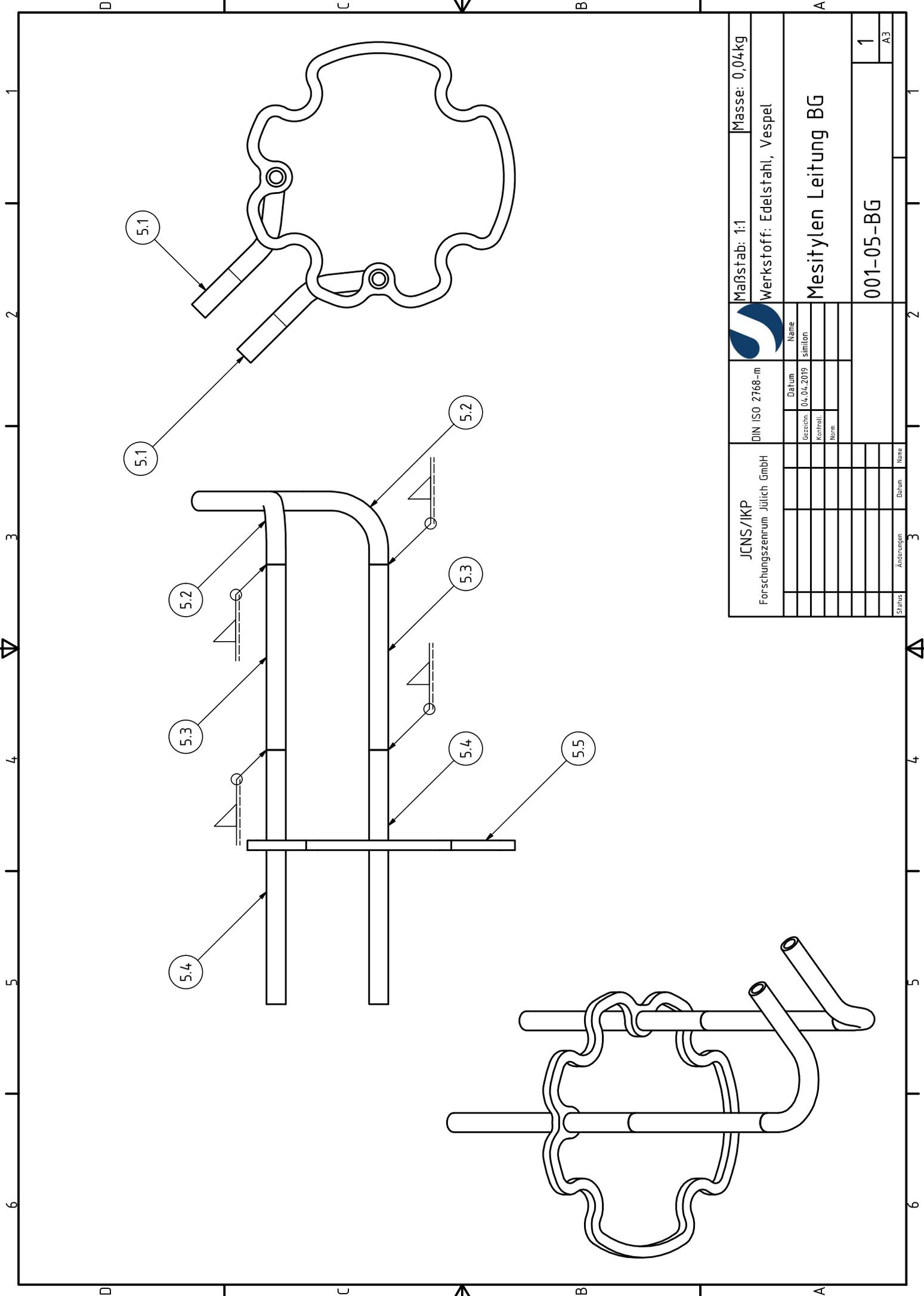
JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 1:2	Masse: 6,3kg
	Bezeichnung	Datum		Werkstoff: Edelstahl	
		04.04.2019	Name	Kreuzkopf BG	
		similon	Kontroll.		
			Norm		
Status	Änderungen	Geburt	Name	001-03-BG	
				1	
				A3	



Auf Ausrichtung von  
4.4 zu 4.2 achten

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:2		Masse: 2,7kg
	Gezeichnet	Datum	Name	Werkstoff: Aluminium	
	04.04.2019	similon			
	Kontroll.	Norm	Kaltkopf Vakuum BG		
			001-04-BG		
Status	Änderungen	Datum	Name	1	A3





JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 1:1	Masse: 0,04kg
	Gezeichnet	Datum		Werkstoff: Edelstahl, Vespel	
	04.04.2019	Name		Mesitylen Leitung BG	
		similon			
		Norm			
Status	Änderungen	Datum	Name	001-05-BG	
				1	
				A3	





Nr	Name	Stk	Zeichn/Vacom	Bemerkung/Material
1.	BG Mesitylen Volumen		001-01-BG	
1.1	Mesitylen	1		
1.2	Me Behälter	1	001-01-01	EN AW-5754
1.3	Me Deckel	1	001-01-02	EN AW-5754
1.4	Me Leitung Anschluss	2	001-01-03	EN AW-5754
2.	BG Me Vakuumrohr		001-02-BG	
2.1	Me Vakuumrohr mit Deckel	1	001-02-01	EN AW-5754
2.2	DN100 CF-Blindflansch gebohrt	1	001-02-02	EN AW-5754
2.3	DN40 KF Flansch mit Rohransatz lang	1	001-02-03	EN AW-5754
3.	BG Kreuzkopf		001-03-BG	
3.1	DN100 CF Flansch mit Rohransatz	1	001-03-01	Basierend auf Teil 302900 von Vacom
3.2	DN100 CF-Anschweißflansch	1	300572	
3.3	DN100 CF-Blindflansch	1	001-03-02	Basierend auf Teil 337761 von Vacom
3.4	DN40 KF Flansch mit Rohransatz lang	1	001-03-03	Basierend auf Teil 302990 von Vacom
3.5	DN40 KF Flansch mit Rohransatz kurz	3	001-03-04	Basierend auf Teil 302977 von Vacom
3.6	DN40 KF Flüssigkeitsdurchführung	1	LNFKF402PS-3 16	
3.7	DN40 KF Elektrodurchführung	1		
3.8	DN40 KF Heizdurchführung	1		
3.9	Schraube M8x35 + Scheibe, Mutter	16		
3.10	DN 100 CF Dichtung	1		
3.11	DN 32/40 KF Spannring	4		
3.12	DN 40 KF O-Ring-Dichtung	4		



JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH		DIN ISO 2768-m					
			Datum	Name	Stückliste 1		
		Gezeichnet	05.04.2019	similon			
		Kontroll.					
		Norm					
					001-StkL-01		1
							A4
Status	Änderungen	Datum	Name				





Nr	Name	Stk	Zeich/Vacom	Bemerkung/Material
4.	BG Kaltkopf Vakuumrohr		001-04-BG	
4.1	Kaltkopf Vakuumrohr	1	001-04-01	EN AW-5754
4.2	Kaltkopf Vakuumflansch	2	001-04-02	EN AW-5754
4.3	Kaltkopf Vakuumdeckel	1	001-04-03	EN AW-5754
4.4	DN40 KF Flansch mit Rohransatz kurz	1	001-04-04	EN AW-5754
4.5	Schraube M6x30 + Scheibe, Mutter	16		
4.6	O-Ring Dichtung	2		
4.7	DN 32/40 KF Spannring	1		
4.8	DN 40 KF O-Ring-Dichtung	1		
4.9	DN 16 KF Flansch mit Rohransatz	1	001-04-05	EN AW-5754
5.	BG Mesitylenleitung		001-05-BG	
5.1	Rohr kurz	2	001-05-01	1.4571
5.2	Wellschlauch	2		1.4571
5.3	Mesitylenleitung	2	001-05-02	1.4571
5.4	Reibschweißadapter	2	001-05-03	EN AW-5754/1.4571
5.5	Abstandhalter	1	001-05-04	Vespel
6.	BG Wärmebrücke		001-06-BG	
6.1	Wärmebrücke	1	001-06-01	2.0065/EN AW-5754
6.2	Brückenhalter	2	001-06-02	2.0065
6.3	Kaltkopf	1		
6.4	Zylinderkopfschraube M6x50	4		
6.5	Indiumfolie	1		
7.	Zusammenbau		001-BG	
7.1	Zusammenbauwerkzeug Griff	2	001-07-01	EN AW-5754
7.2	DN 100 CF Dichtung	1		
7.3	Schraube M8x35 + Scheibe, Mutter	16		
7.4	Verschraubung Testblock	1	001-07-02	EN AW-5754
7.5	Verschraubung Testbrücke	2	001-07-03	EN AW-5754
7.6	Zusammenbauwerkzeug Stab	4	001-07-04	EN AW-5754



JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH		DIN ISO 2768-m							
			Datum	Name		Stückliste 2			
		Gezeichnet	05.04.2019	similon					
		Kontroll.							
		Norm							
						001-StkL-02			1
									A4
Status	Änderungen	Datum	Name						

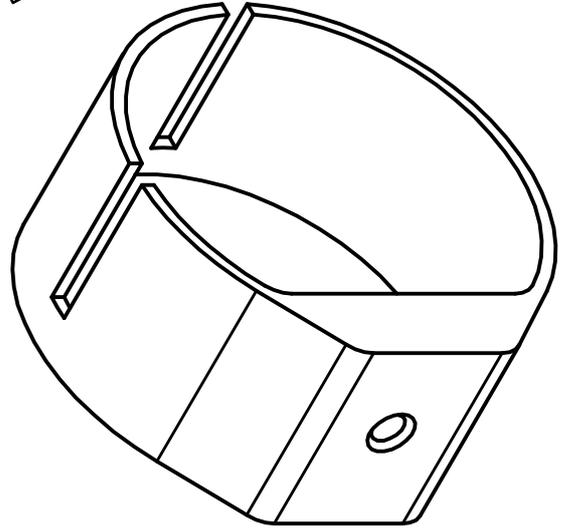
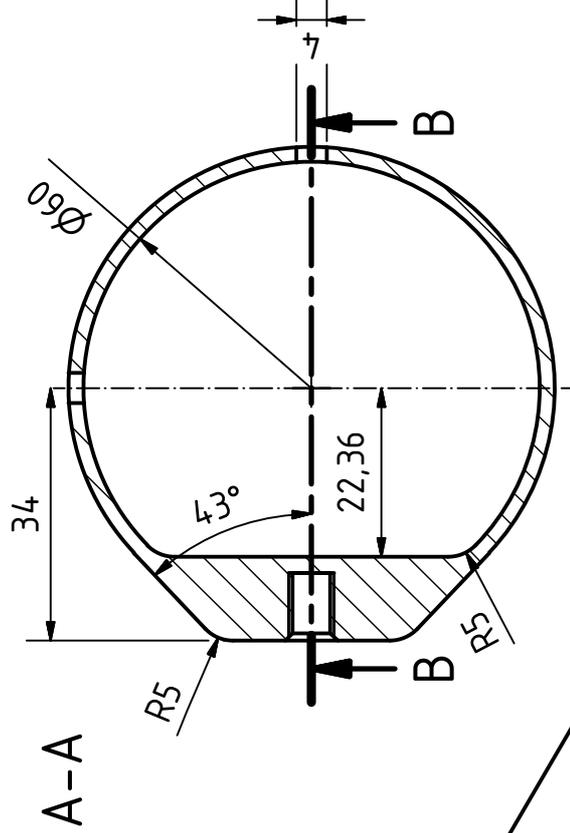
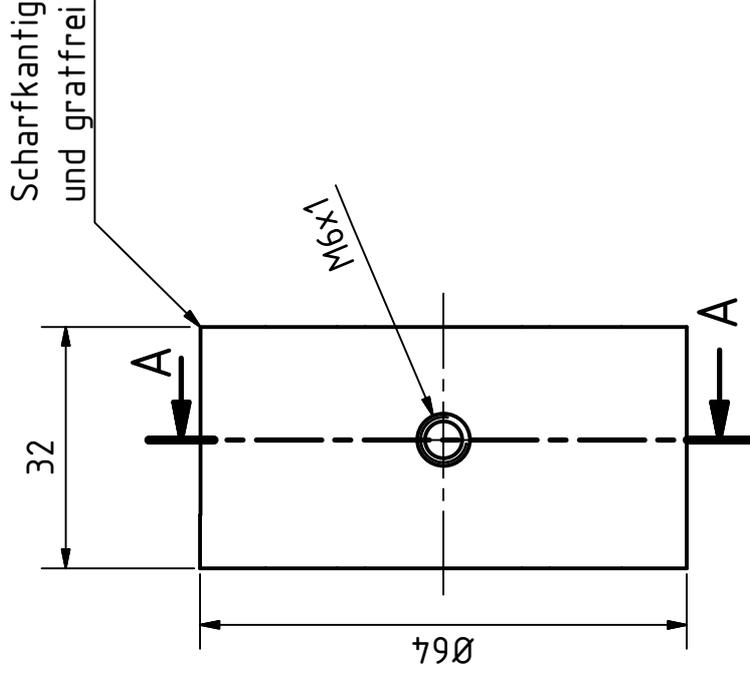
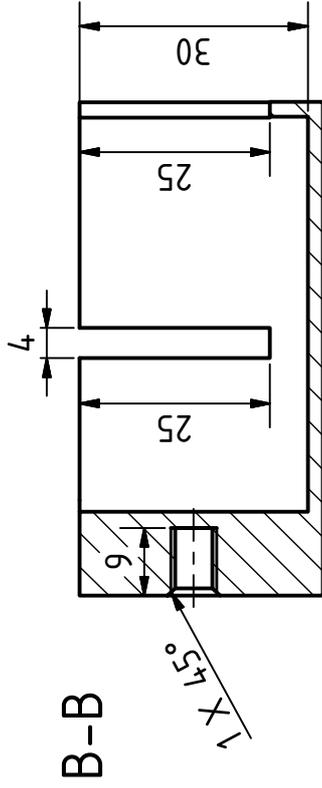




Nr	Name	Stk	Zeich Nr	Bemerkung
1.	BG Mesitylen Volumen		001-01-BG	
1.2	Me Behälter	1	001-01-01	
1.3	Me Deckel	1	001-01-02	
1.4	Me Leitung Anschluss	2	001-01-03	
2.	BG Me Vakuumrohr		001-02-BG	
2.1	Me Vakuumrohr mit Deckel	1	001-02-01	
2.2	DN100 CF-Blindflansch gebohrt	1	001-02-02	Basierend auf Teil 337761 von Vacom
2.3	DN40 KF Flansch mit Rohransatz lang	1	001-02-03	
3.	BG Kreuzkopf		001-03-BG	
3.1	DN100 CF Flansch mit Rohransatz	1	001-03-01	Basierend auf Teil 302900 von Vacom
3.3	DN100 CF-Blindflansch	1	001-03-02	Basierend auf Teil 337761 von Vacom
3.4	DN40 KF Flansch mit Rohransatz lang	1	001-03-03	Basierend auf Teil 302990 von Vacom
3.5	DN40 KF Flansch mit Rohransatz kurz	3	001-03-04	Basierend auf Teil 302977 von Vacom
4.	BG Kaltkopf Vakuumrohr		001-04-BG	
4.1	Kaltkopf Vakuumrohr	1	001-04-01	
4.2	Kaltkopf Vakuumflansch	2	001-04-02	
4.3	Kaltkopf Vakuumdeckel	1	001-04-03	
4.4	DN40 KF Flansch mit Rohransatz kurz	1	001-04-04	
4.9	DN 16 KF Flansch mit Rohransatz	1	001-04-05	
5.	BG Mesitylenleitung		001-05-BG	
5.1	Rohr kurz	2	001-05-01	
5.3	Mesitylenleitung	2	001-05-02	
5.4	Reibschweißadapter	2	001-05-03	
5.5	Abstandhalter	1	001-05-04	
6.	BG Wärmebrücke		001-06-BG	
6.1	Wärmebrücke	1	001-06-01	
6.2	Brückenhalter	2	001-06-02	
7.	Zusammenbau		001-BG	
7.1	Zusammenbauwerkzeug Griff	1	001-07-01	
7.4	Verschraubung Testblock	1	001-07-02	
7.5	Verschraubung Testbrücke	2	001-07-03	
7.6	Zusammenbauwerkzeug Stab	4	001-07-04	



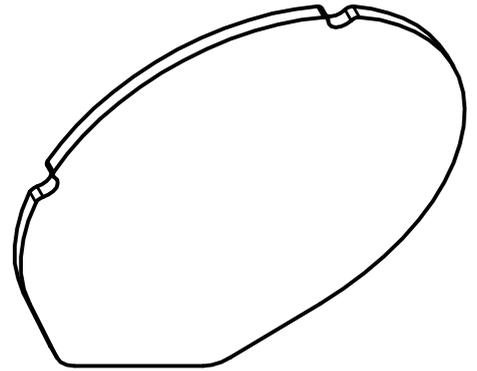
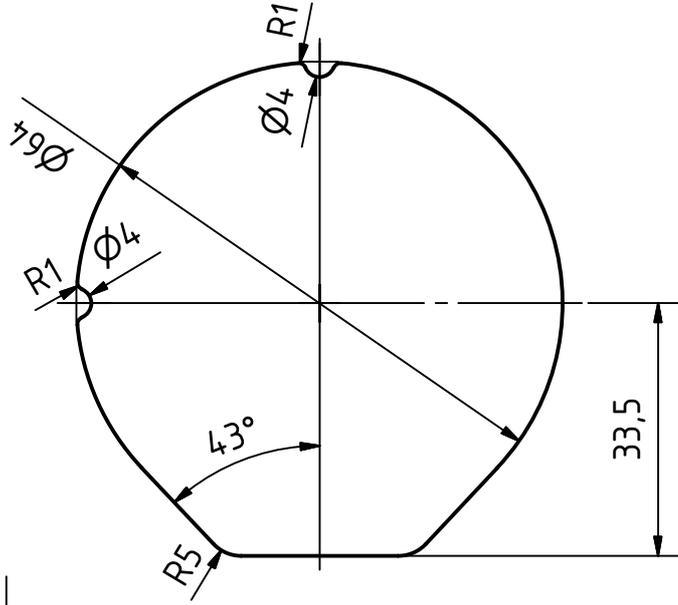
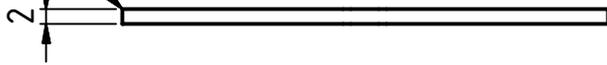
JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH		DIN ISO 2768-m					
			Datum	Name	Zeichnungsliste		
		Gezeichnet	05.04.2019	similon			
		Kontroll.					
		Norm					
					001-ZL		1
							A4
Status	Änderungen	Datum	Name				



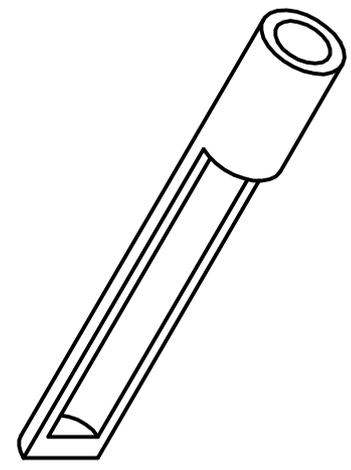
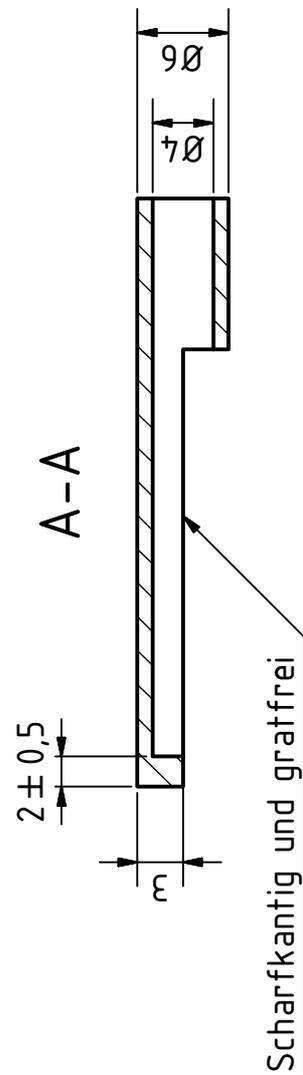
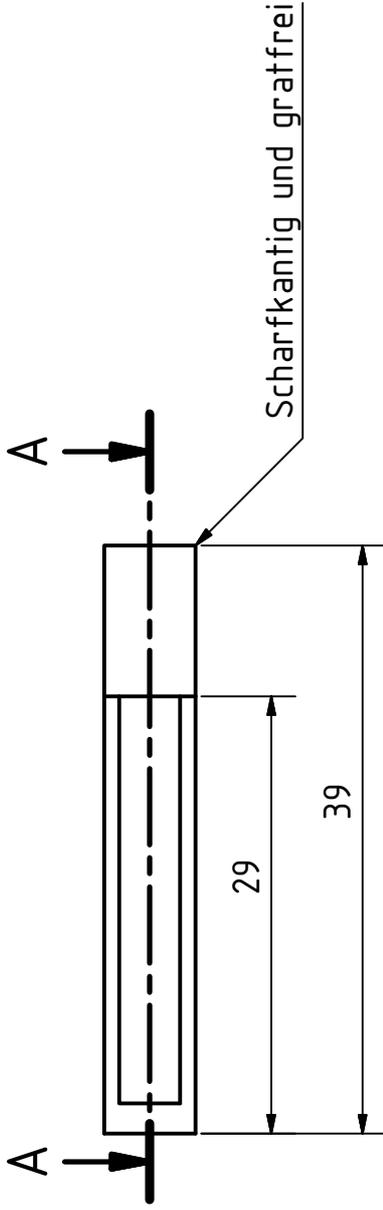
JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m	<table border="1"> <tr><th>Name</th></tr> <tr><td>similon</td></tr> <tr><th>Datum</th></tr> <tr><td>01.04.2019</td></tr> <tr><th>Gezeichn.</th></tr> <tr><td></td></tr> <tr><th>Kontroll.</th></tr> <tr><td></td></tr> <tr><th>Norm</th></tr> <tr><td></td></tr> </table>	Name	similon	Datum	01.04.2019	Gezeichn.		Kontroll.		Norm		<table border="1"> <tr><th>Name</th></tr> <tr><td></td></tr> <tr><th>Datum</th></tr> <tr><td></td></tr> <tr><th>Änderungen</th></tr> <tr><td></td></tr> <tr><th>Status</th></tr> <tr><td></td></tr> </table>	Name		Datum		Änderungen		Status	
Name																					
similon																					
Datum																					
01.04.2019																					
Gezeichn.																					
Kontroll.																					
Norm																					
Name																					
Datum																					
Änderungen																					
Status																					

Maßstab: 1:1	Masse: 0,7kg
Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
<b>Mesitylen Behälter</b>	
001-01-01	
1	
A4	

Scharfkantig  
und gratfrei

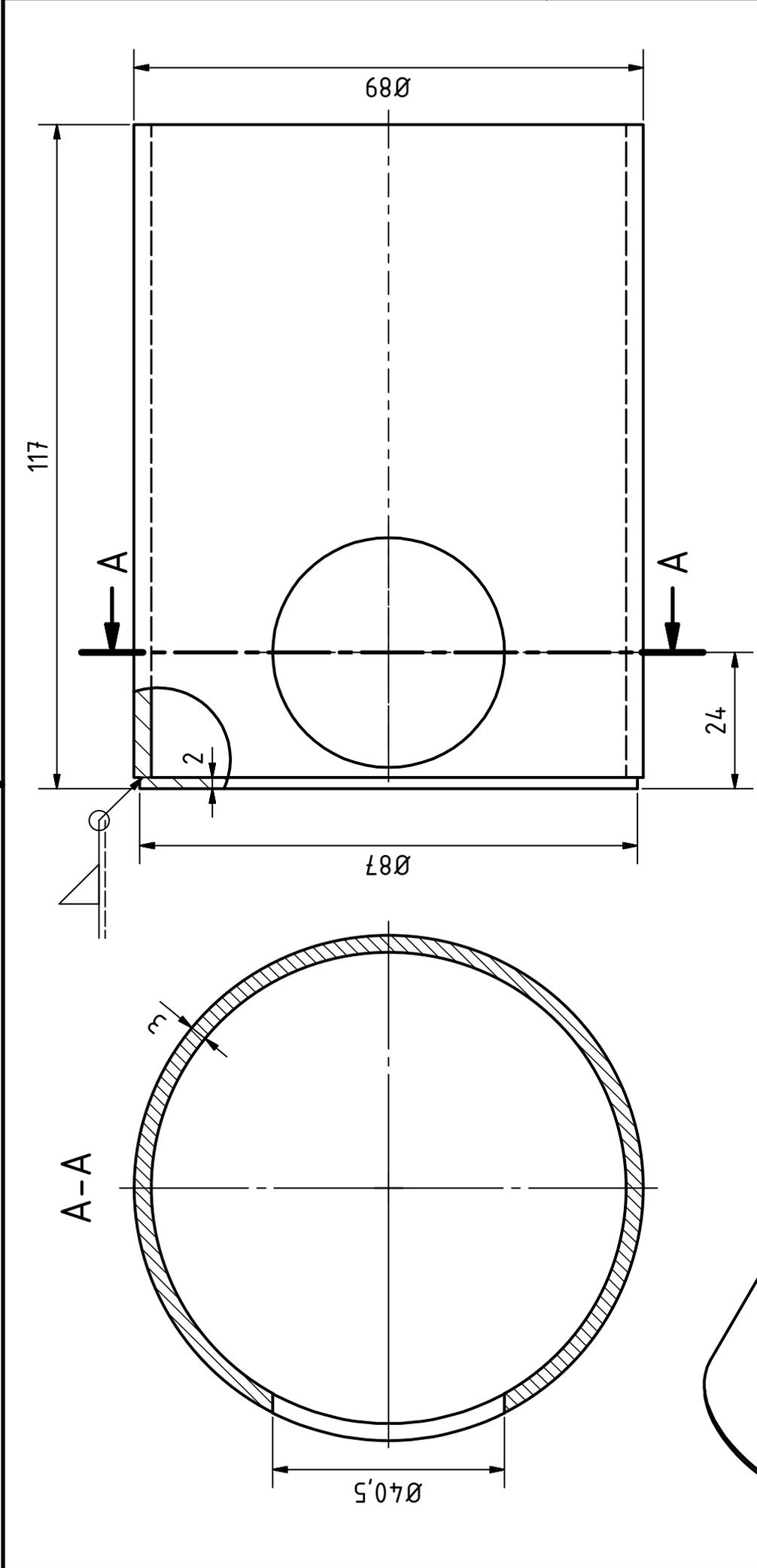


JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:1	Masse: 0,02kg
		Name	Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	Gezeichnet: 02.04.2019	similon	Mesitylen Deckel	
	Kontroll:		001-01-02	
	Norm		1	
			A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	

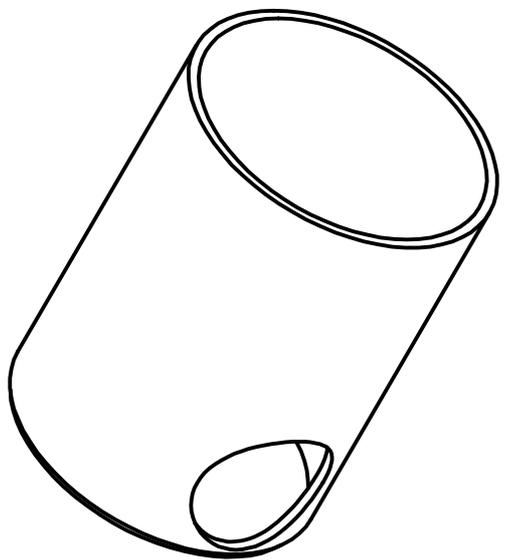


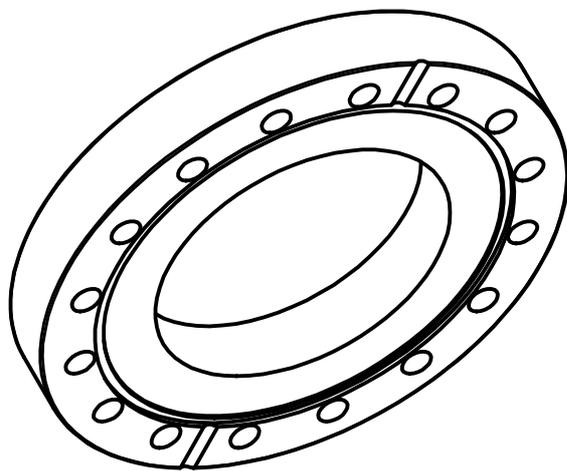
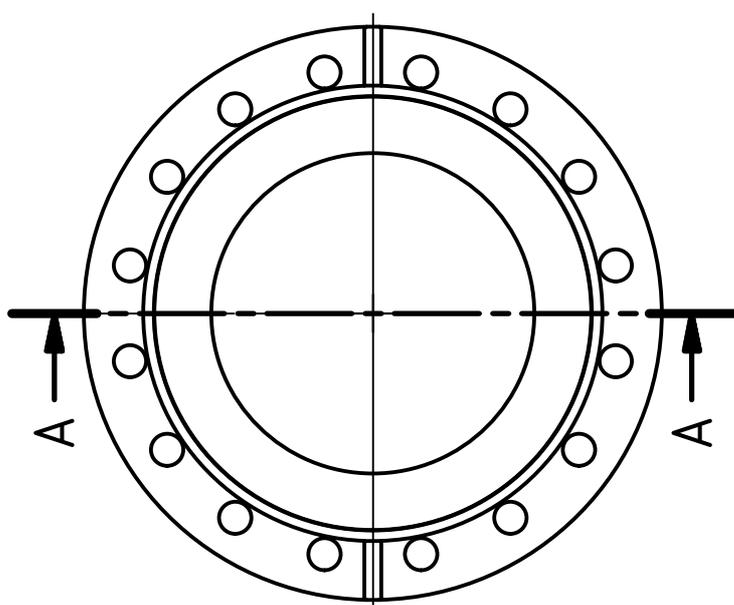
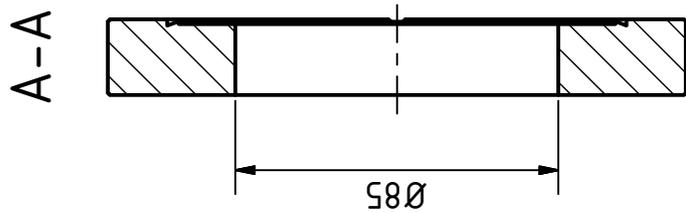
2 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:1	Masse: 0,001kg
	Gezeichn. 02.04.2019	Name similon	Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	Kontroll.		Mesitylen Leitung Anschluss	
	Norm		001-01-03	
			1	
			A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	

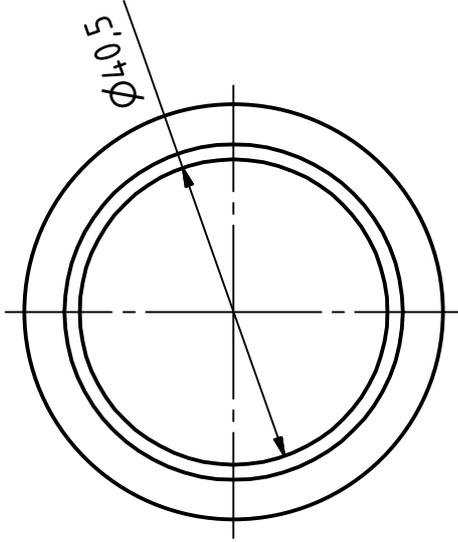


JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 1:1	Masse: 0,2kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	02.04.2019	Name		Mesitylen Vakuumrohr	
		simlon			
				001-02-01	
				1	
				A4	
Status	Änderungen	Datum	Name		

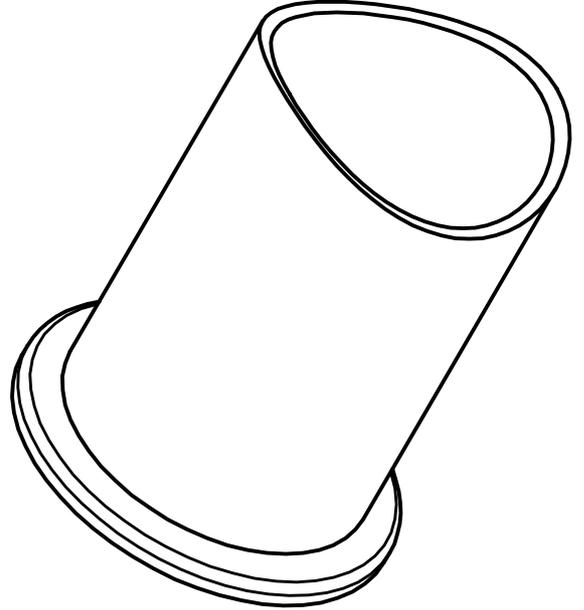
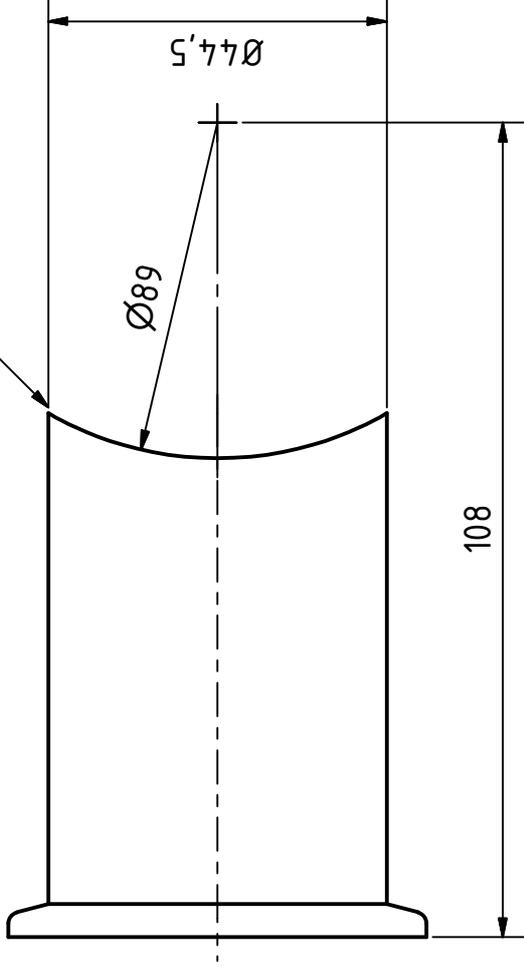




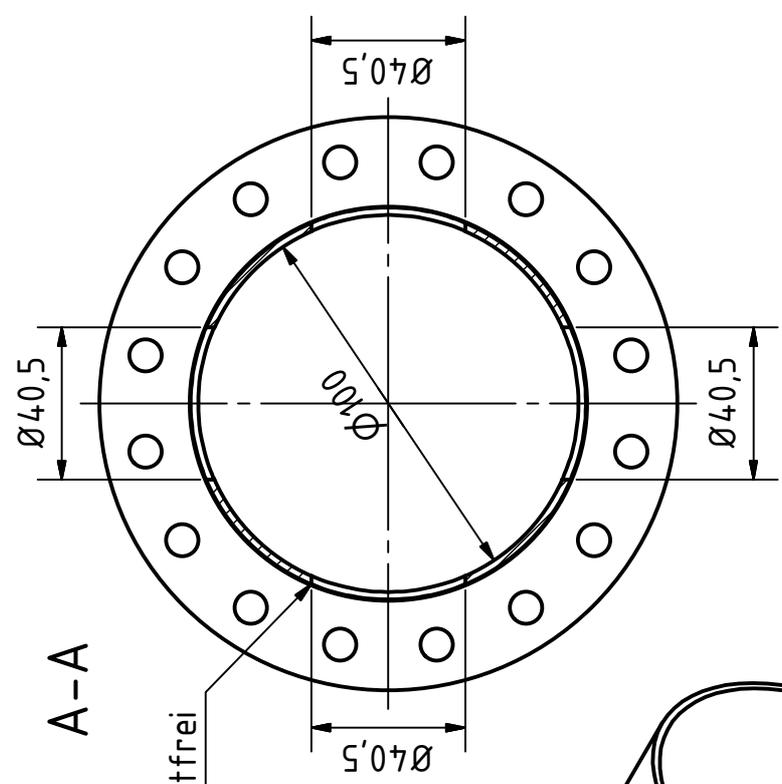
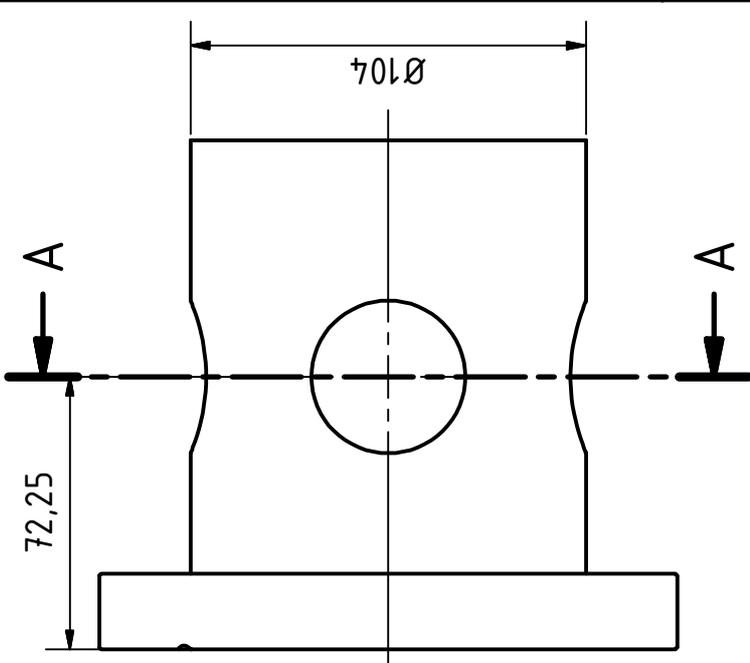
JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768 - m		Maßstab: 1:2		Masse: 0,6kg
	Gezeichn.	Datum	Werkstoff: Aluminium		
	02.04.2019		DN 100 CF Blindflansch gebohrt		
	Kontroll.		001-02-02		
	Norm		1		
			A4		
Status	Änderungen	Datum	Name		



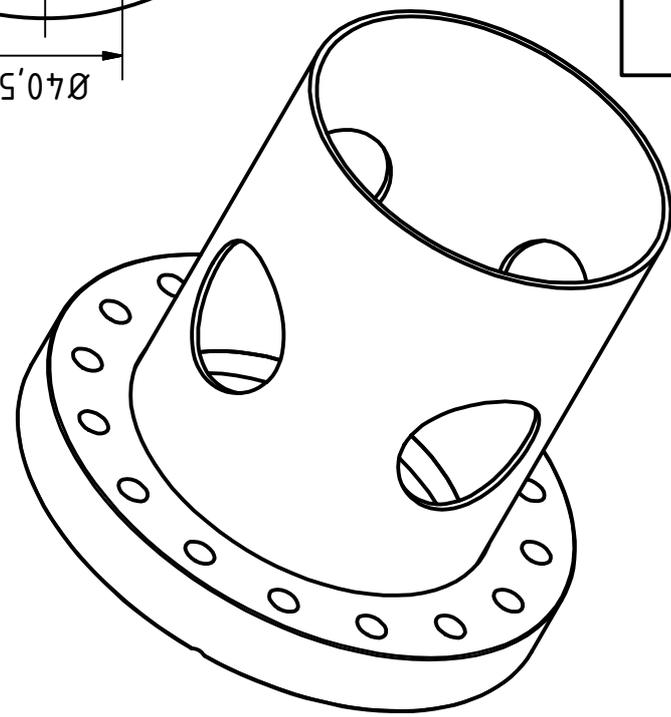
Scharfkantig und gratfrei



JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		 Name similon	Maßstab: 1:1	Masse: 0,06kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	02.04.2019			DN 40 KF Flansch Rohr lang Alu	
				001-02-03	
				1	
				A4	
Status	Änderungen	Datum	Name		



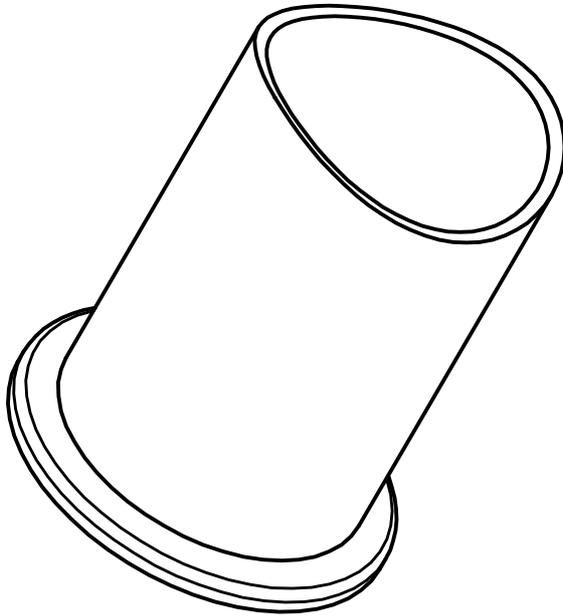
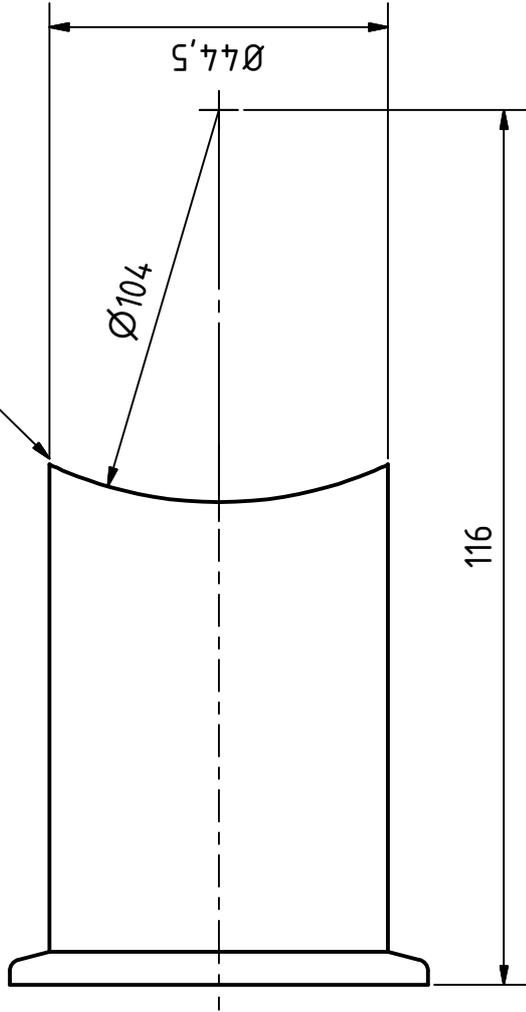
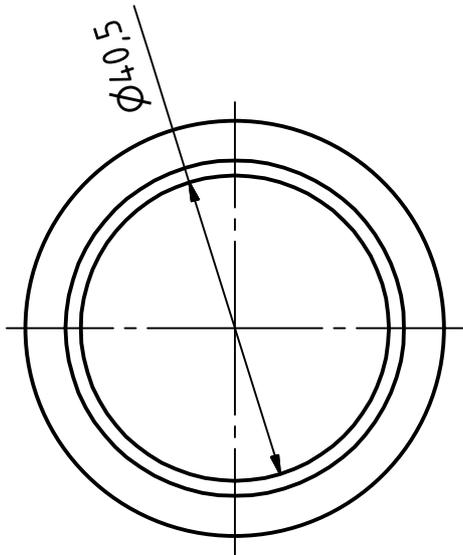
4x scharfkantig und gratfrei



JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:2	Masse: 2,0kg
	Gezeichn. 02.04.2019	Name simiton	Werkstoff: Edelstahl 304	
	Kontroll.		DN 100 CF Flansch Rohr	
	Norm		001-03-01	
			1	
			A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	



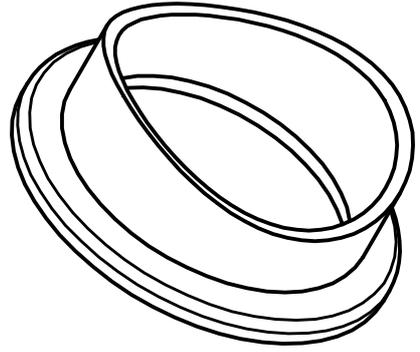
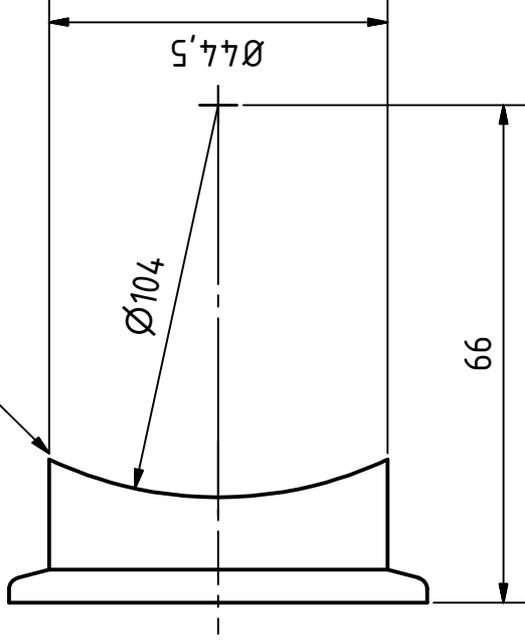
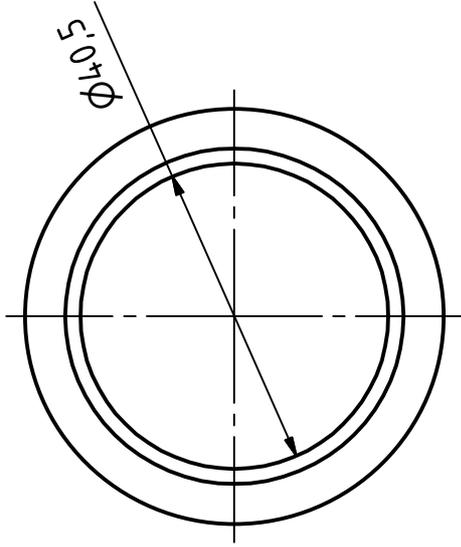
Scharfkantig und gratfrei



JCNS/IKP	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:1	Masse: 0,2kg
Forschungszentrum Jülich GmbH	Gezeichn.		Werkstoff: Edelstahl 304	
	Datum		DN 40 KF Flansch Rohr lang	
	Name		001-03-03	
	Gezeichn.	similon		
	Kontroll.			
	Norm			
Status	Änderungen	Datum	1	
			A4	

JCNS/IKP	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:1	Masse: 0,2kg
Forschungszentrum Jülich GmbH	Gezeichn.		Werkstoff: Edelstahl 304	
	Datum		DN 40 KF Flansch Rohr lang	
	Name		001-03-03	
	Gezeichn.	similon		
	Kontroll.			
	Norm			
Status	Änderungen	Datum	1	
			A4	

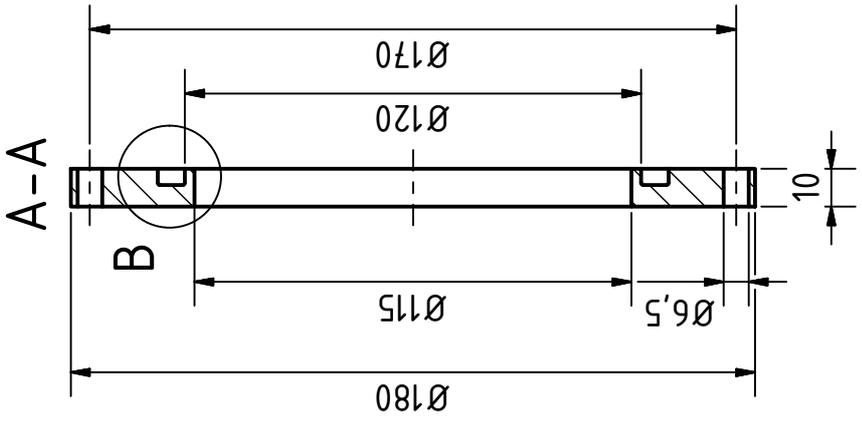
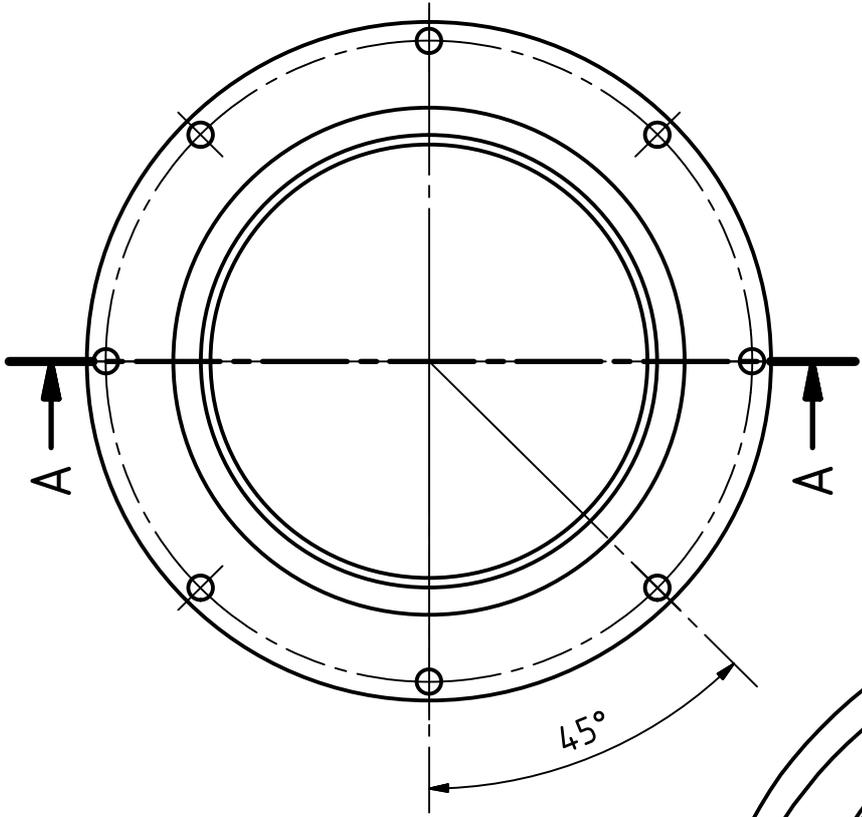
Scharfkantig und gratfrei



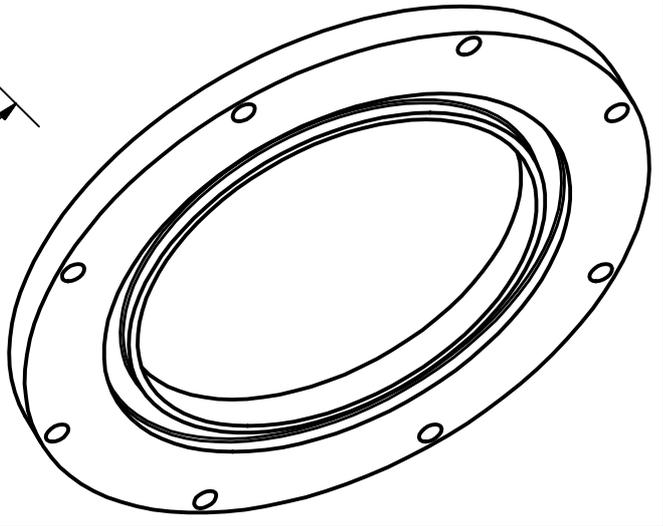
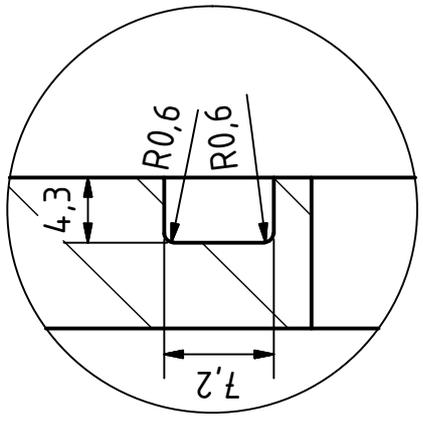
3 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH		DIN ISO 2768-m				Maßstab: 1:1		Masse: 0,06kg	
				Name		Werkstoff: Edelstahl 304			
				Datum		DN 40 KF Flansch Rohr kurz			
				Gezeichn.					
				02.04.2019					
				similton					
				Name					
				similton					
				Datum					
				Gezeichn.					
				Kontroll.					
				Norm					
				Name					
				Datum					
				Änderungen					
				Name					
				Datum					
				Status					
				1					
				A4					
				001-03-04					





B ( 2 : 1 )



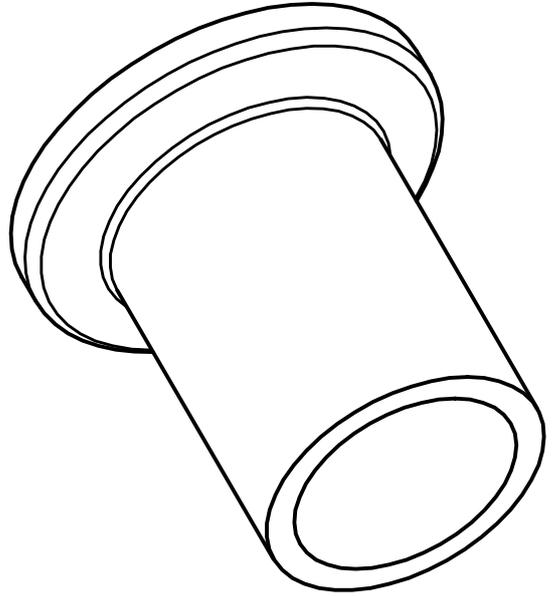
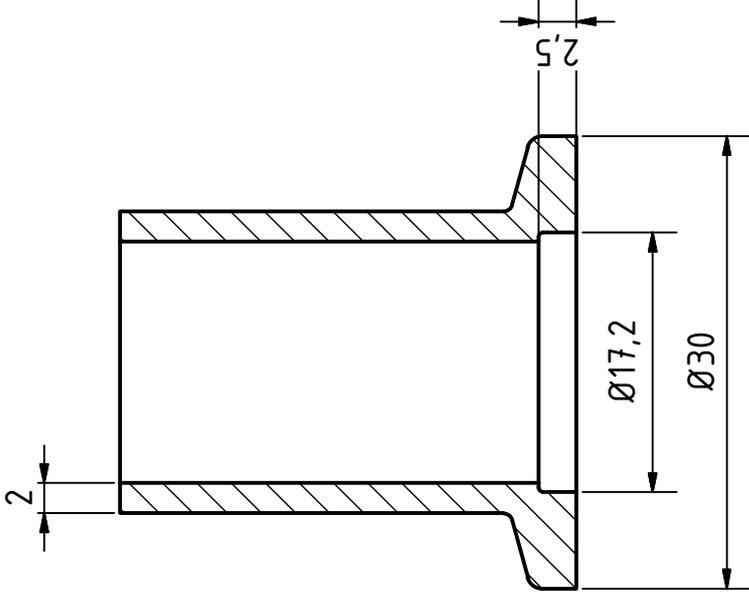
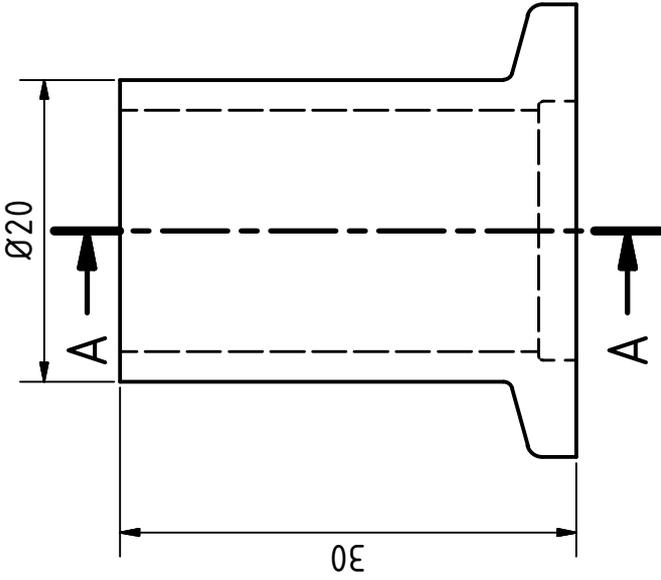
2 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:2	Masse: 0,4kg																				
	Gezeichn. 02.04.2019 Kontroll. Norm		Werkstoff: Aluminium EN AW-5754																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Datum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>similon</td> <td>02.04.2019</td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>			Name	Datum	similon	02.04.2019							Kaltkopf Vakuumflansch											
Name	Datum																							
similon	02.04.2019																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Status</th> <th>Änderungen</th> <th>Datum</th> <th>Name</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>			Status	Änderungen	Datum	Name																	001-04-02	
Status	Änderungen	Datum	Name																					
			1																					
			A4																					





A-A

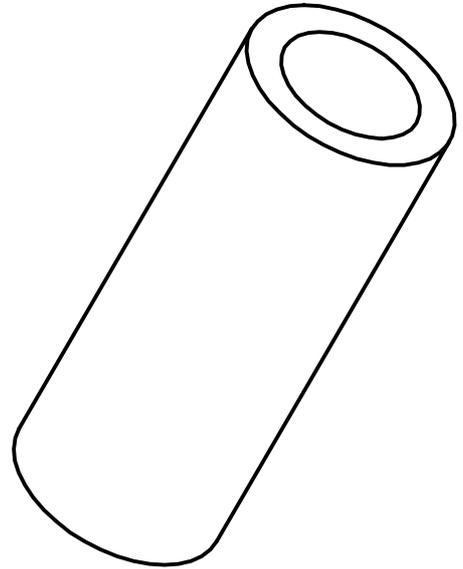
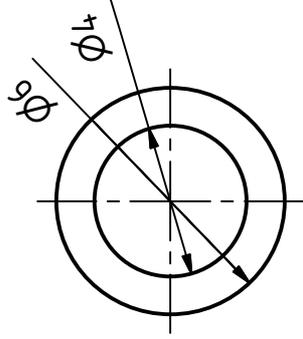
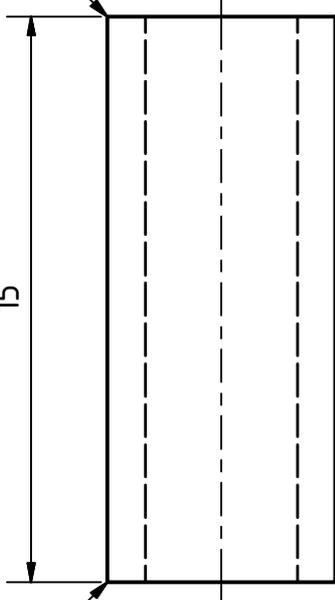


JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 2:1	Masse: 0,013 kg
	Gezeichn.	Name	Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	Datum	similon	DN 16 KF Flansch Rohr	
	Kontroll.		001-04-05	
	Norm		1	
			A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	

Scharfkantig und gratfrei

15

Scharfkantig und gratfrei



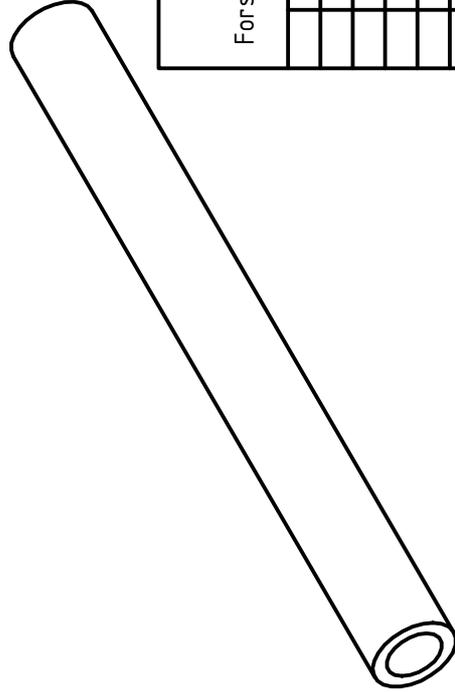
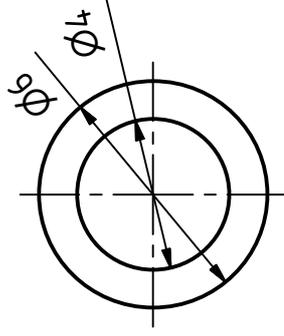
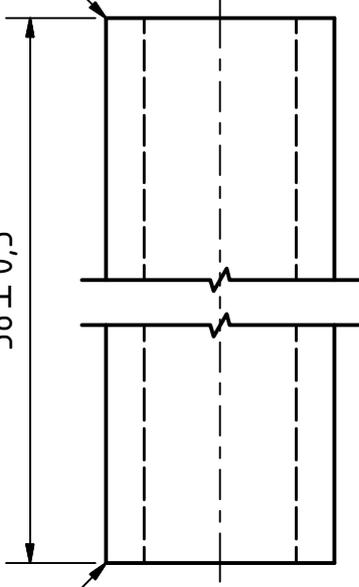
2 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 5:1	Masse: 0,002 kg
		Name	Werkstoff: Nichtrostender Stahl 1.4404	
		Datum	Rohr kurz	
		Gezeichn.	001-05-01	
		Kontroll.	1	
		Norm	A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	

Scharfkantig und gratfrei

58 ± 0,5

Scharfkantig und gratfrei



2 Stück

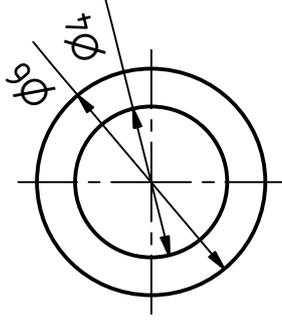
JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 5:1	Masse: 0,01kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoff: Nichtrostender Stahl 1.4404	
	02.04.2019		Name	Mesitylen Leitung	
			similon		
				001-05-02	
Status	Änderungen	Datum	Name	1	A4

Scharfkantig  
und gratfrei

20

60

Scharfkantig  
und gratfrei

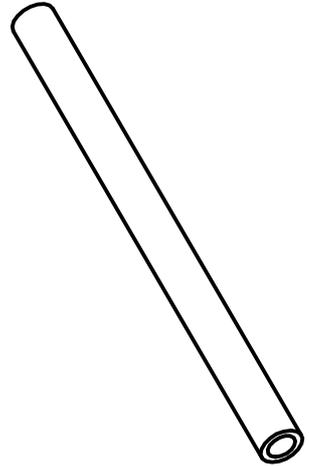


Aluminium

Edelstahl

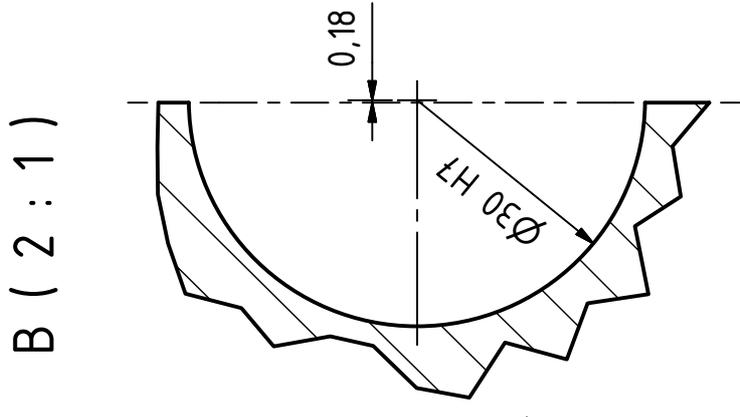
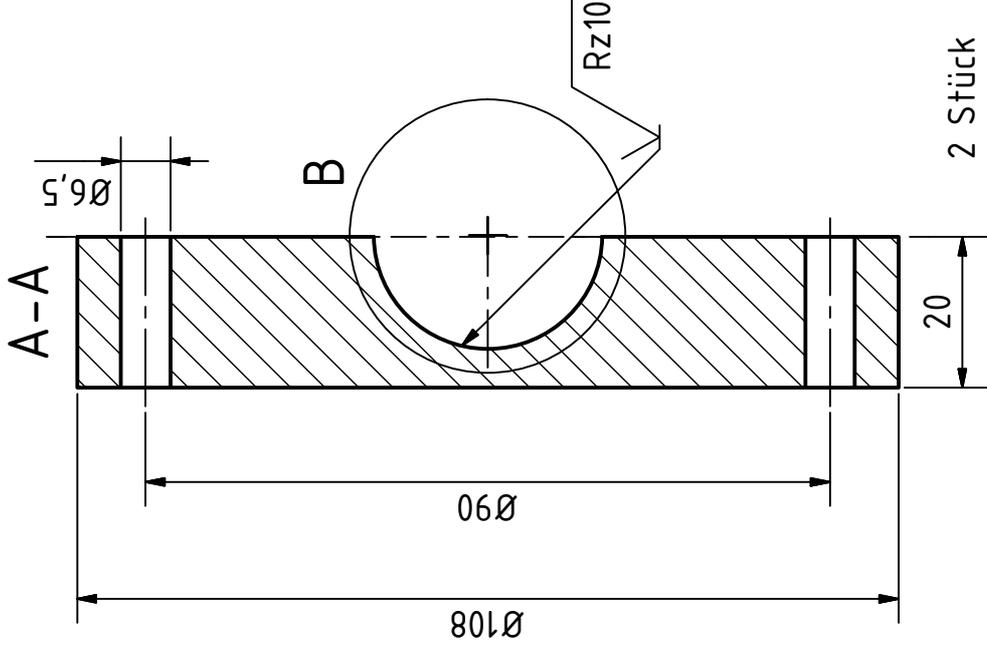
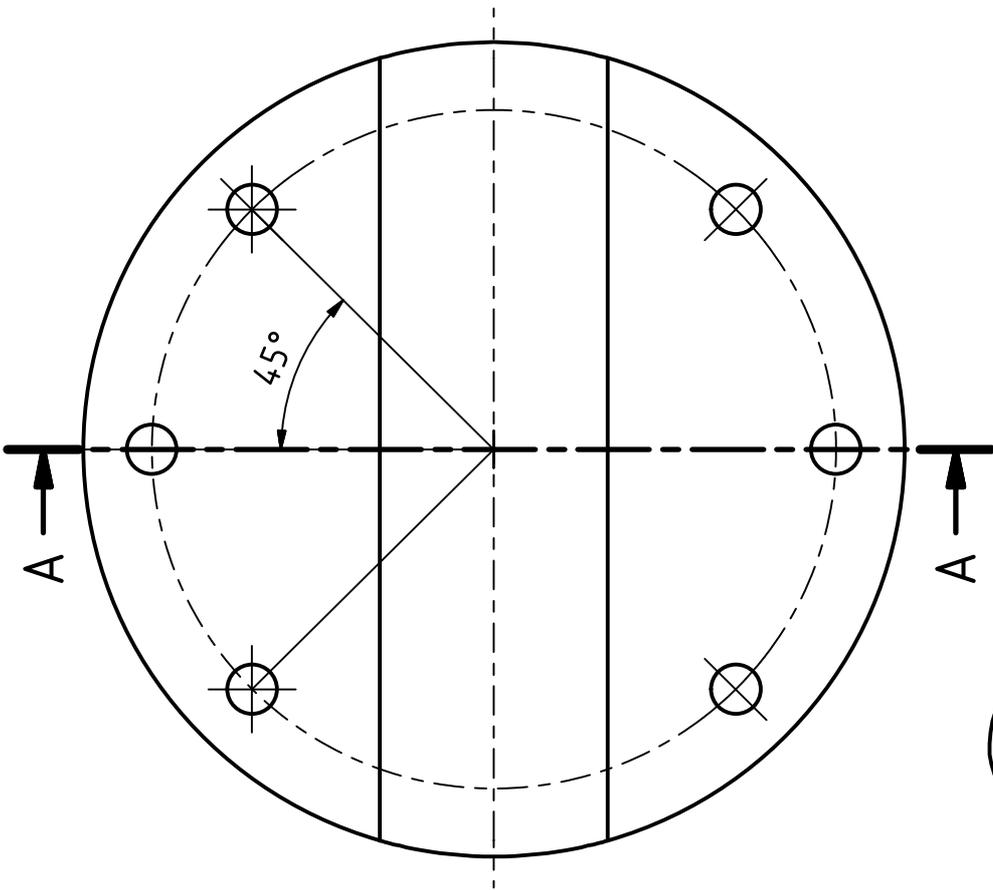
2 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 5:1	Masse: 0,01kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoffe: 3.3535/1.4404	
	02.04.2019	Name	ReibschweißAdapter AL VA		
		similon			
				001-05-03	
				1	
				A4	
Status	Änderungen	Datum	Name		



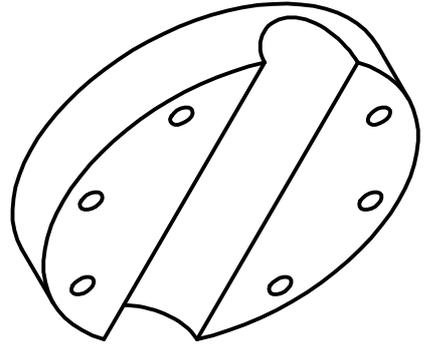


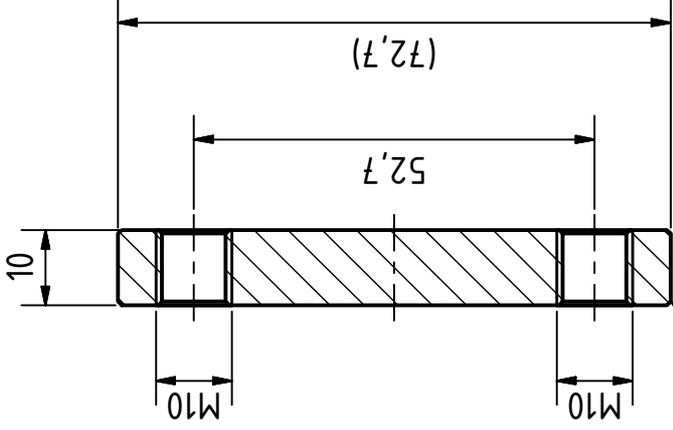
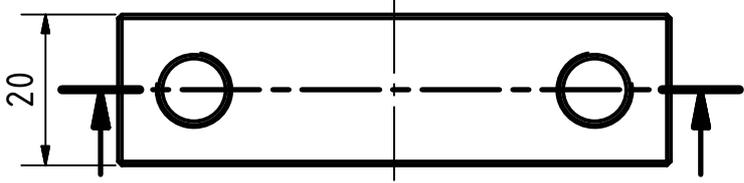




2 Stück

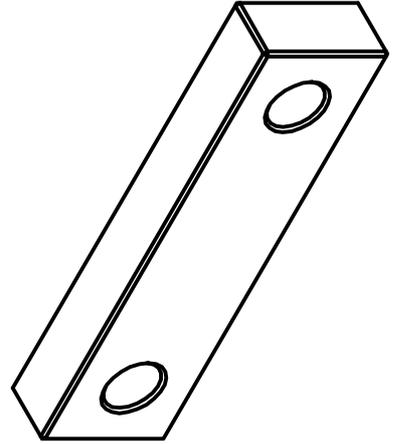
JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 1:1	Gewicht: 1,3kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoff: Cu-ETP	
	02.04.2019	Name	Brückenhalter		
		simlon			
		Kontroll.	001-06-02		
		Norm			
			1		
Status	Änderungen	Datum	Name	A4	



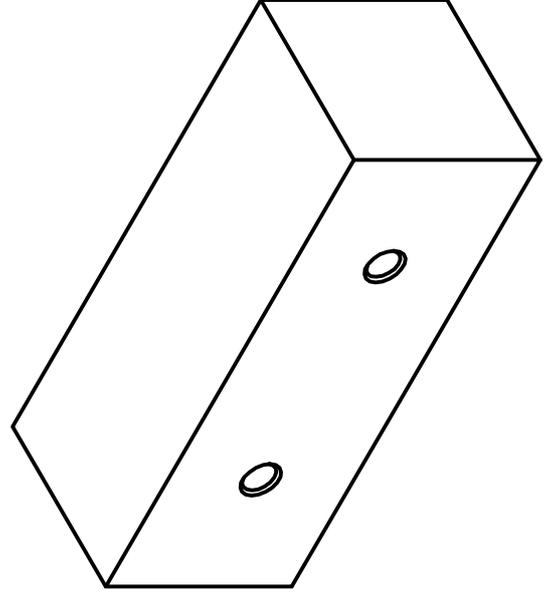
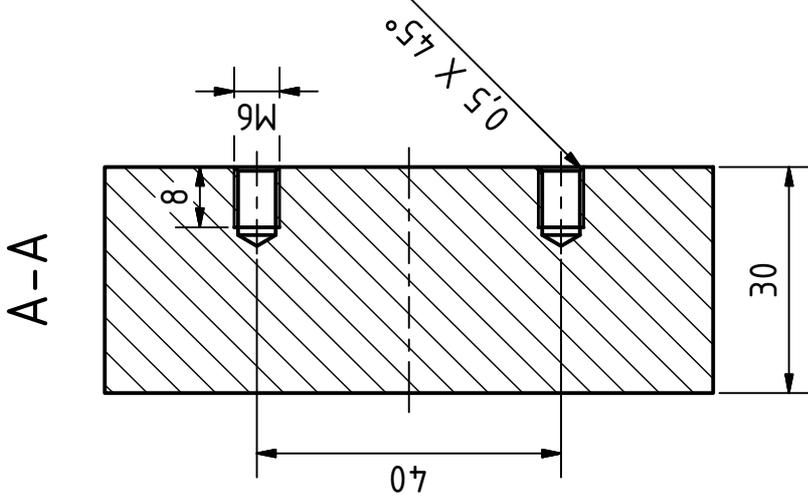
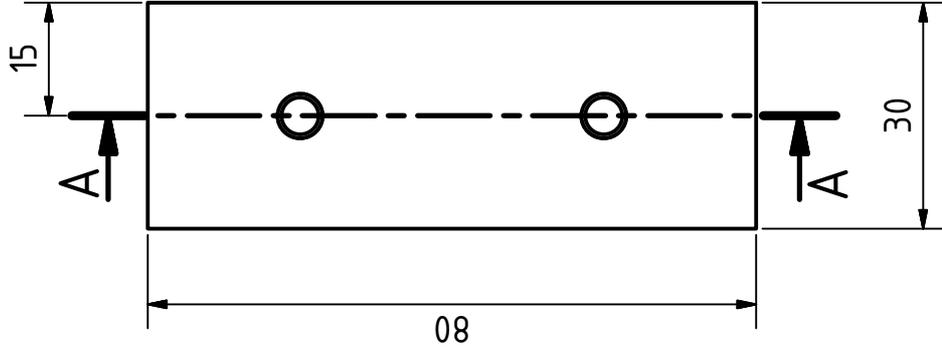


Alle Kanten mit 0,5mm Fase

2 Stück



JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Maßstab: 1:1	Masse: 0,036 kg
	Gezeichn.	Name	Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	13.05.2019	similon	Zusammenbauwerkzeug Griff	
	Kontroll.		001-07-01	
	Norm		1	
			A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	



JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 1:1	Masse: 0,193 kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	16.04.2019	Name	Verschraubung Testblock		
		similon			
				001-07-02	
				1	
				A4	
Status	Änderungen	Datum	Name		

A-A

218

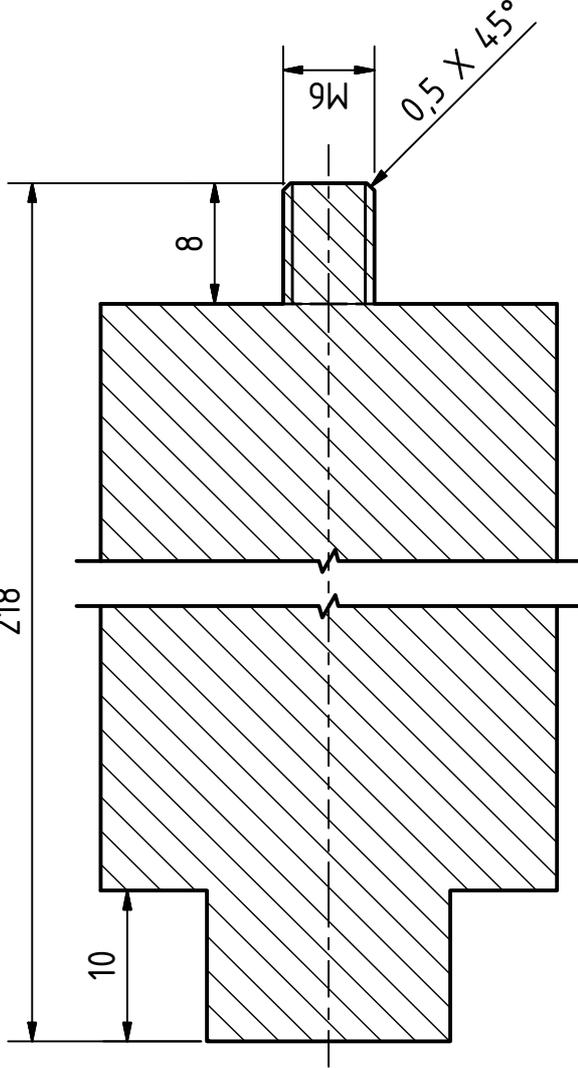
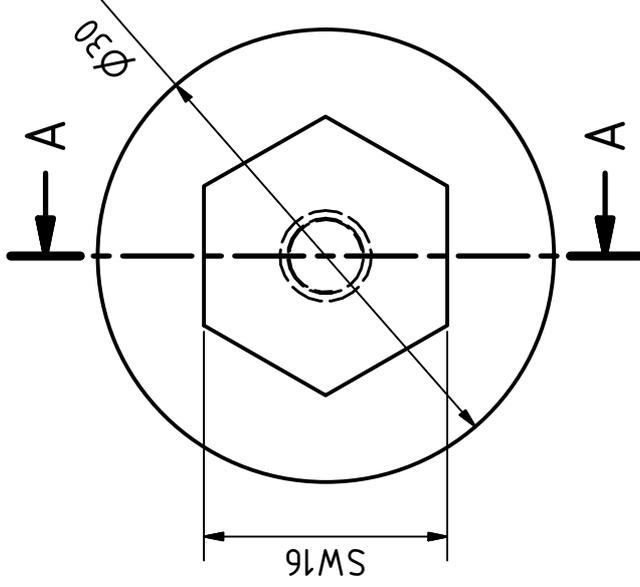
10

8

M6

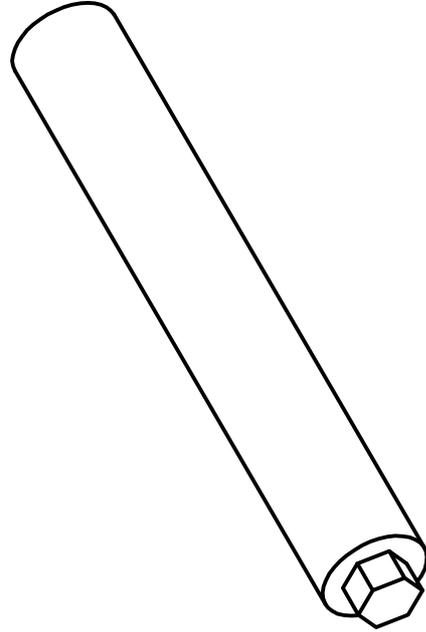
0.5 X 45°

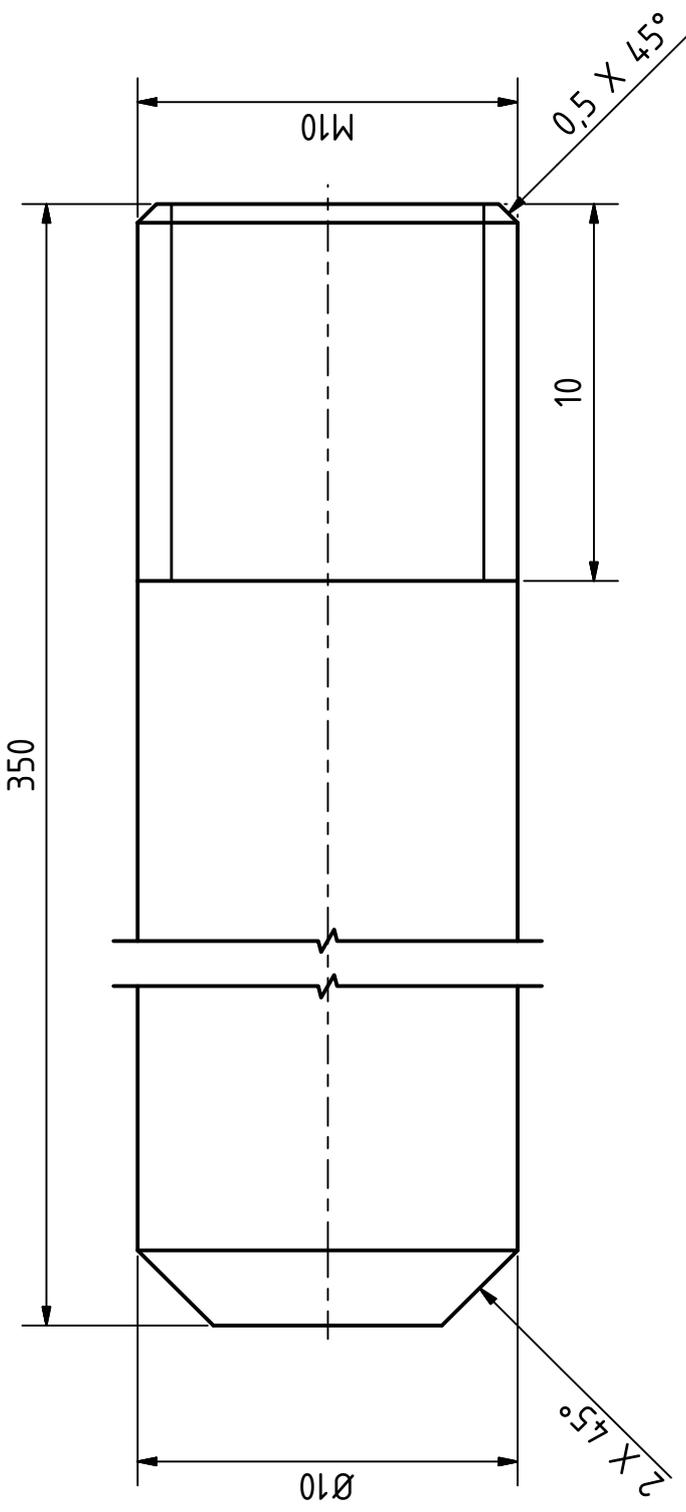
SW16



2 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m		Masse: 0,388 kg	
			Maßstab: 2:1	Werkstoff: Aluminium EN AW-5754
Verschraubung Testbrücke			001-07-03	
Status			1	
Änderungen			A4	
Datum				
Name				
Gezeichnet			similon	
Datum			16.04.2019	
Kontrolliert				
Norm				





4 Stück

JCNS/IKP Forschungszentrum Jülich GmbH	DIN ISO 2768-m			Maßstab: 5:1	Masse: 0,074 kg
	Gezeichn.	Datum		Werkstoff: Aluminium EN AW-5754	
	13.05.2019	Name	Zusammenbauwerkzeug Stab		
Kontroll.		similon			
Norm					
				001-07-04	
				1	
				A4	
Status	Änderungen	Datum	Name		