

Abschlussarbeit im Bachelorstudiengang Physik

Simulation der thermischen und mechanischen Belastung eines Doppelrohrs der UCN-Quelle am FRM II

**Simulation of thermal and mechanical stress of a double-tube of the
UCN source at the FRM II**

Nicolas Pfifferling

28. Juli 2014

Erstgutachter (Themensteller): Prof. Dr. Stephan Paul
Zweitgutachter: Prof. Dr. Shawn Bishop
Betreuer: Dr. Andreas Frei, Dipl.-Ing. Johann Schilcher

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
1 Motivation	1
2 Grundlagen	3
2.1 Ultrakalte Neutronen	3
2.1.1 Definition	3
2.1.2 Erzeugungsmöglichkeiten	4
2.2 Die UCN–Quelle am FRM II	5
2.2.1 Forschungs–Neutronenquelle Heinz Maier–Leibnitz	5
2.2.2 Technische Umsetzung der UCN–Quelle	7
2.3 Aktueller Projektstatus	9
3 Simulation	11
3.1 Belastungsarten	11
3.1.1 Thermische Belastung	11
3.1.2 Mechanische Belastung	12
3.2 Verwendete Daten	12
3.3 Szenario 0: Keine Strömungskühlung, keine Wärmestrahlung	15
3.3.1 Analytische Betrachtung	15
3.3.2 Simulation mittels <i>COMSOL Multiphysics®</i>	19
3.3.3 Ergebnis	21
3.4 Szenario 1: Keine Strömungskühlung	23
3.4.1 Geometrie	23
3.4.2 Randbedingungen	23
3.4.3 Ergebnis	25
3.5 Szenario 2: Normalbetrieb	25
3.5.1 Geometrie	25
3.5.2 Randbedingungen	25
3.5.3 Ergebnis	25
3.6 Szenario 3: Abgeschaltete Quelle	26
3.6.1 Geometrie	26
3.6.2 Randbedingungen	26
3.6.3 Ergebnis	27

Inhaltsverzeichnis

4 Resultierende Längendehnungen	29
5 Fazit und Ausblick	31
A Neutronenflussdichte & Heizleistung	33
B Quellcode zur analytischen Berechnung	37
Literaturverzeichnis	41

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird die Simulation eines Doppelrohrs, welches einen wesentlichen Bestandteil der neuen Quelle für ultrakalte Neutronen (UCN) darstellt und in das durchgehende Strahlrohr SR6 der Forschungs–Neutronenquelle Heinz Maier–Leibnitz (FRM II) eingeschoben werden soll, beschrieben. Im Vordergrund steht dabei die thermische Belastung des Bauteils durch nukleare Aufheizung in der Nähe des zentralen Brennelements des Reaktors. Die thermische Ausdehnung der Bauteile erzeugt wiederum mechanische Belastung, welche ebenfalls betrachtet wird.

Der erste Teil der Arbeit befasst sich mit den benötigten Grundlagen, hier die Definition von ultrakalten Neutronen und deren Erzeugungsmöglichkeiten, die Forschungs–Neutronenquelle, die technischen Details der UCN–Quelle und der aktuelle Projektstatus. Im zweiten Teil wird dann die Durchführung der Simulation für drei verschiedene Betriebszustände der Quelle im Detail beschrieben und die jeweiligen Ergebnisse interpretiert. Abschließend folgt eine kurze Bewertung.

Kapitel 1

Motivation

An der Forschungs–Neutronenquelle Heinz Maier–Leibnitz soll durch neue Einbauten eine Quelle für ultrakalte Neutronen entstehen. Diese sind in der Grundlagenforschung von großem Interesse, da ihre Beobachtungsdauer nur durch die Lebensdauer freier Neutronen $\tau = (880,0 \pm 0,9)\text{s}$ begrenzt ist [1]. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in der Untersuchung fundamentaler Eigenschaften von Neutronen, wie zum Beispiel der genannten Lebensdauer oder eines möglichen elektrischen Dipolmoments.

Die Konstruktion der für die UCN–Quelle erforderlichen Baugruppen ist bereits abgeschlossen und liegt im Detail vor. Eine dieser Gruppen ist ein im Inneren des Kernreaktors verbautes Aluminium–Doppelrohr, welches in das Strahlrohr 6 eingebracht wird. Die wesentlichen Aufgaben des Rohres sind:

- Aufnahme der Versorgungslanze, welche mit flüssigem Helium gekühlt wird und festen Wasserstoff als Vormoderator enthält. An ihrem reaktorinternen Ende sitzt der eigentliche Konverter aus festen Deuterium [2].
- Abführung der durch nukleare Heizung entstehenden Wärme durch aktive Kühlung mittels gasförmigem Helium im Ringkanal zwischen Außen- und Innenrohr.
- Leitung der erzeugten UCN im Innenrohr in Richtung Extraktionsseite.
- Bildung einer Schutzbarriere im Reaktor mit folgenden Funktionen:
 - Verhindern von Beckenwasserverlust.
 - Einschluss von Radioaktivität.
 - Einschluss brennbarer Medien (hier H_2 und D_2).
 - Ausschluss von Luft (keine Bildung zündfähiger Gemische).
 - Aufrechterhaltung der Integrität bei Störungen.

Im Betrieb der Quelle erfährt das Doppelrohr sowohl thermische als auch mechanische Belastung. Letztere ergibt sich aus der thermischen Längendehnung, welche mittels Faltenbälgen aus Metall an einem Ende des Rohrs kompensiert werden soll.

Kapitel 1 Motivation

Ziel der Arbeit ist die Durchführung einer Simulation dieser Belastungsarten, um die Auswirkungen auf das gesamte Bauteil zu ermitteln und die Konstruktion gegebenenfalls zu optimieren.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel wird kurz auf die nötigen Grundlagen dieser Arbeit eingegangen.

2.1 Ultrakalte Neutronen

2.1.1 Definition

Freie Neutronen können anhand ihrer Energie und damit ihrer Geschwindigkeit in bestimmte Klassen aufgeteilt werden. Die Klassifizierung folgt dabei meist Tabelle 2.1.

Typ	Energie
schnell	$> 1 \text{ MeV}$
Resonanz	$1 \text{ keV} \dots 1 \text{ MeV}$
epithermisch	eV-Bereich
thermal	$\sim 25 \text{ meV}$
kalt	$v_n \sim 800 \text{ m s}^{-1}$
ultrakalt	$v_n < 10 \text{ m s}^{-1}$

Tabelle 2.1: Klassifizierung freier Neutronen. Entnommen aus [3]

Eine besondere Rolle spielen die ultrakalten Neutronen: Nach Definition handelt es sich hierbei um freie Neutronen, die sich in geschlossenen Gefäßen einsperren lassen [4].

Grund hierfür ist die starke Wechselwirkung zwischen Neutronen und Nukleonen der Behälterwand. Teilchen mit großer Wellenlänge, also kleiner Energie, sehen nicht das Potential eines einzelnen Nukleons, sondern die quantenmechanische Überlagerung einer Vielzahl. Dieses effektive Fermi-Potential V_f ist nicht mehr attraktiv wie die starke Wechselwirkung allgemein, sondern abstoßend und es bildet sich eine Potentialbarriere [5]. Ist die Neutronenenergie kleiner als diese Barriere, kommt es zur Totalreflektion und der Behälter kann nicht verlassen werden.

Für die meisten Materialien gilt $V_f < 300 \text{ neV}$ [4], was somit die Maximalenergie ultrakalter Neutronen festlegt.

2.1.2 Erzeugungsmöglichkeiten

Nachdem die schnellen Neutronen aus der Kernspaltung im Moderatortank zu thermischen Neutronen mit einer Energie von $\sim 25\text{ meV}$ werden, müssen sie erneut abgebremst werden, damit ultrakalte Neutronen entstehen. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten [4]:

2.1.2.1 Moderation

Die klassische Methode der Moderation basiert auf der Tatsache, dass sich zwischen dem verwendeten Moderator und den Neutronen aufgrund vieler elastischer Stöße ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Dies bedeutet, dass die Energieverteilung der freien Neutronen danach einer Maxwell–Verteilung mit der charakteristischen Temperatur des Moderators entspricht. Man könnte also in einem großvolumigen Moderator, dessen Temperatur im mK–Bereich liegt, ultrakalte Neutronen erzeugen. Dies ist technisch allerdings kaum realisierbar.

2.1.2.2 Superthermische Quellen

Eine effizientere Methode zur Erzeugung ultrakalter Neutronen ist die Verwendung eines sogenannten Konverters, wie er in superthermischen UCN–Quellen zum Einsatz kommt. Dies ist ein Moderator, der durch mindestens einen zusätzlichen Wechselwirkungsprozess Energie aufnehmen kann. Im Unterschied zur klassischen Moderation verliert ein Neutron dabei seine komplette überschüssige Energie in nur einem einzigen Stoß.

Damit ein solcher superthermischer Prozess möglich ist, muss der verwendete Konverter, welcher meist ein Festkörper ist, neben dem Grundzustand E_0 mindestens ein weiteres anregbares Energieniveau $E_0 + \Delta E$ besitzen. Liegt der Abstand ΔE im meV–Bereich, so können durch Anregung aus thermischen oder kalten Neutronen UCN erzeugt werden. Der gewünschte Prozess $E_{UCN} + \Delta E \rightarrow E_{UCN}$, bei dem ein UCN erzeugt wird, entspricht der Abwärtsstreuung des eintreffenden Neutrons, das heißt Verschiebung zu kleineren Energien. Vermeiden will man hingegen den Vorgang $E_{UCN} \rightarrow E_{UCN} + \Delta E$, bei dem ein bereits erzeugtes ultrakaltes Neutron zu größeren Energien aufwärts gestreut wird. Dies ist möglich, wenn der anregbare Zustand unbesetzt ist, zum Beispiel durch Ausfrieren der Festkörperanregungen bei niedrigen Temperaturen. Für die Wirkungsquerschnitte der beiden Streuvorgänge in einem Konverter mit Temperatur T gilt dabei [6]:

$$\sigma(E_{UCN} \rightarrow E_{UCN} + \Delta E) \propto \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \sigma(E_{UCN} + \Delta E \rightarrow E_{UCN}) \quad (2.1)$$

Liegt also die Konvertertemperatur tief genug, das heißt $k_B T \ll \Delta E$, wird die Aufwärtsstreuung der Neutronen stark unterdrückt.

Ein Beispiel für einen solchen Konverter ist festes Deuterium, in dem ein Neutron Energie durch Anregung eines Phonons, einer Gitterschwingung im Festkörper, verlieren kann. Die Phononenzustandsdichte von Ortho-Deuterium oD₂ (Rotationsquantenzahl $J = \text{gerade}$ [7]) weist mehrere Maxima im subthermischen Bereich von 5 meV bis 15 meV auf [8, 9] und macht oD₂ somit zu einem geeigneten Konverter zur UCN-Erzeugung. Der Wirkungsquerschnitt der anfangs beschriebenen UCN-Aufwärtsstreuung, hier durch Phononabregung, ist in Ortho-D₂ bereits für Konvertertemperaturen unterhalb von 5 K kleiner als der Absorptionsquerschnitt für Neutronen $\sigma_{abs} = 0,14 \text{ b}$ [10], was eine gut zu realisierende Kühlung mittels flüssigem Helium möglich macht.

Da der Grundzustand von Ortho-Deuterium energetisch tiefer liegt als der des Para-Moleküls pD₂ ($J = \text{ungerade}$), ist in einem Para–Ortho–Gemisch auch ein Prozess ohne Phononenbeteiligung möglich (0–Phonen–Prozess): Ein bereits erzeugtes ultrakaltes Neutron streut dabei an einem Para-Molekül und wandelt es in ein Ortho-Molekül um. Die hierbei frei werdende Energiedifferenz wird von dem UCN aufgenommen und es kommt zur Aufwärtsstreuung. Weil der Wirkungsquerschnitt für diesen Mechanismus $\sigma_{J=1 \rightarrow 0} = 31 \text{ b}$ [11] circa zwei Größenordnungen über dem Absorptionsquerschnitt bei 5 K liegt, sollte, um unnötige UCN–Verluste zu vermeiden, die Para-Konzentration im Konverter nicht über 1 % liegen.

2.2 Die UCN–Quelle am FRM II

2.2.1 Forschungs–Neutronenquelle Heinz Maier–Leibnitz

Die Forschungs–Neutronenquelle Heinz Maier–Leibnitz ist ein Reaktor mit einer thermischen Maximalleistung von 20 MW, in dem Neutronen für Forschungszwecke erzeugt werden [12]. Abbildung 2.1 zeigt den schematischen Aufbau.

Am Grund eines Wasserbeckens mit Innendurchmesser 5 m befindet sich der abgeschlossene Moderatorortank, welcher wiederum mit schwerem Wasser D₂O gefüllt ist. Dieses eignet sich wegen der geringen Absorption besser zur Moderation der erzeugten Neutronen. Durch die Mitte des zylindrischen Tanks verläuft ein abgeschlossener Kanal, in welchem ein einzelnes 70 cm hohes Brennelement aus hochangereichertem ²³⁵U sitzt. Dieses wird zur Kühlung von leichtem Wasser durchströmt, wodurch ein Großteil der thermischen Leistung abgeführt wird.

Der Einsatz von nur einem einzelnen Brennelement bringt mehrere entscheidende Vorteile mit sich: Aufgrund des geringen Durchmessers des Brennstabs von 24,3 cm, können rund 72,5 % aller erzeugten Neutronen die Uranzone verlassen, wobei jedoch 25,2 % zurück reflektiert werden und weiter zur Kernspaltung beitragen. Die verbleibenden Neutronen werden durch das schwere Wasser abgebremst und es ergibt sich circa 35 cm vom Zentrum entfernt, also innerhalb des Moderatorortanks, die gewünschte hohe Flussdichte an thermischen Neutronen von $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Durch

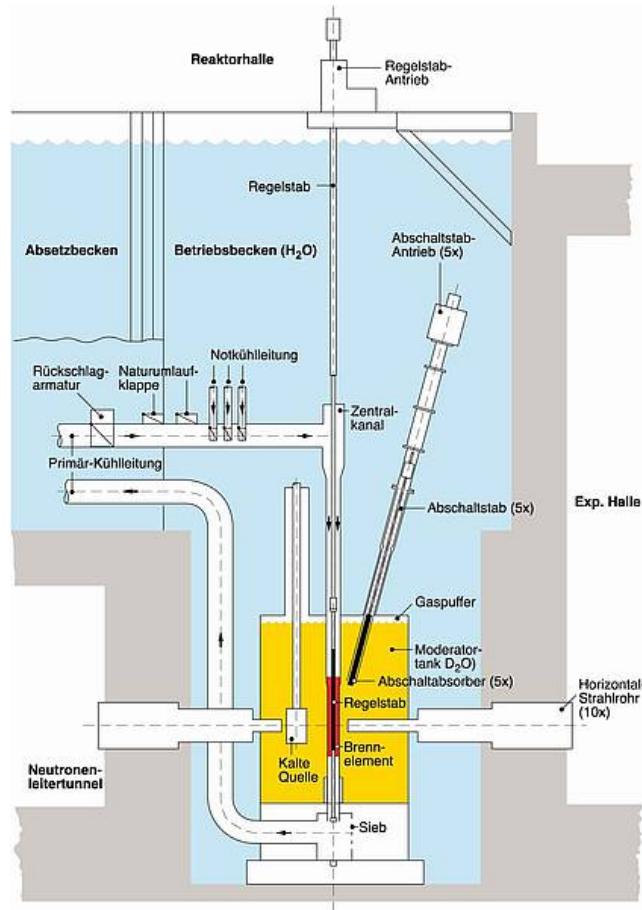


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des FRM II. Entnommen aus [13].

das geringe Volumen des Kompaktkerns steht somit auch ein größerer Bereich mit hoher Flussdichte für experimentelle Einbauten zur Verfügung.

Um die erzeugten Neutronen aus dem Reaktor extrahieren zu können, führen insgesamt 13 Strahlrohre durch das Wasserbecken in den Moderatortank hinein. An ihren Spitzen befinden sich oft sogenannte Sekundärquellen, die das Energiespektrum der Neutronen verändern. Eine Sonderstellung nimmt das Strahlrohr 6 ein, da es im Gegensatz zu den anderen Rohren nicht nur in den Reaktor hinein, sondern komplett hindurch führt.

Beispiel für eine solche sekundäre Quelle ist die kalte Quelle, in der thermische Neutronen mittels flüssigem Deuterium bei 25 K moderiert werden. In der heißen Quelle hingegen wird die Energie durch einen auf 2700 K erhitzten Graphitblock

erhöht. Rund 50 % der Experimente am FRM II verwenden kalte und 40 % thermische Neutronen.

2.2.2 Technische Umsetzung der UCN–Quelle

Abbildung 2.2 zeigt einen Schnitt durch die Quelle für ultrakalte Neutronen.

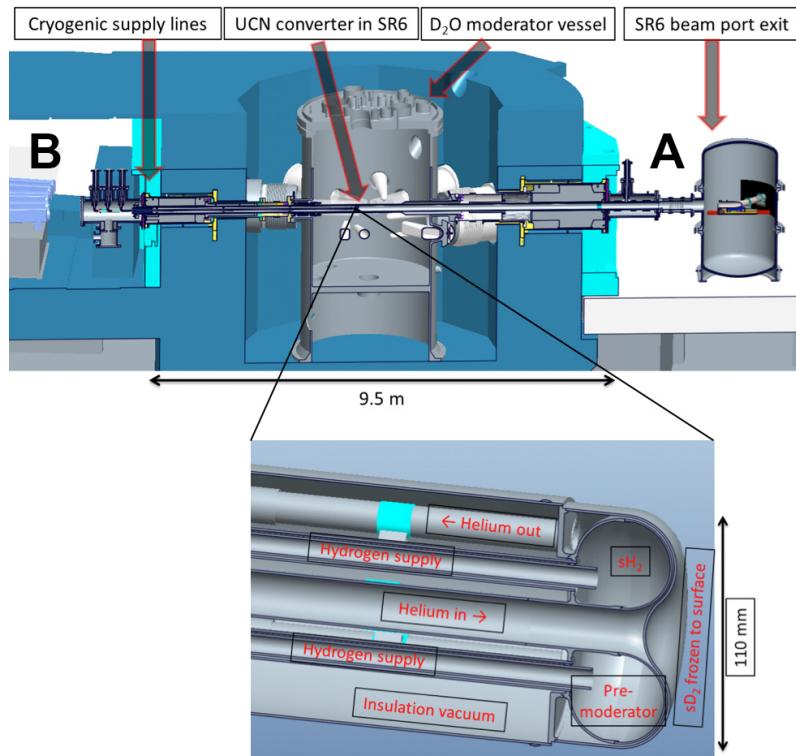


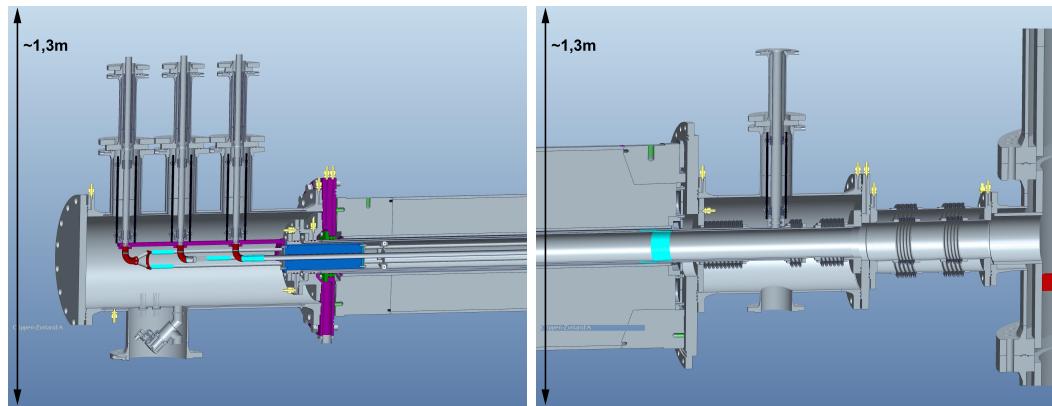
Abbildung 2.2: Schnittansicht durch die im Reaktor verbaute UCN–Quelle. Die Vergrößerung zeigt das Ende der Versorgungslanze samt Konvertortorus. Mit Änderungen entnommen aus [14].

Kernstück der Quelle ist der am Ende der Versorgungslanze sitzende Konverter (siehe Vergrößerung), welche sich im Inneren des Doppelrohrs befindet. Die komplette Baugruppe wird in das Strahlrohr 6 am FRM II eingebracht. Die Versorgungslanze verlässt das SR6 dabei auf der B-Seite des Strahlrohrs, die erzeugten ultrakalten Neutronen hingegen werden durch das Doppelrohr zur A-Seite geleitet, wo sie anschließend extrahiert werden können.

Im Betrieb der Quelle wird in das Innere des hohlen Konvertortorus Wasserstoff eingeleitet und in die feste Phase ausgefroren. Dies geschieht mittels flüssigem Helium

bei $T_{He} \sim 5\text{ K}$, das in einem Zwischenkanal durch den Torus strömt. Durch langsames Einleiten von gasförmigem Deuterium in das evakuierte Doppelrohr bildet sich an der Außenseite des gekühlten Torus eine rund 1 cm dicke Schicht aus gefrorenem D_2 . In dieser festen Deuteriumschicht findet die im Abschnitt 2.1.2.2 beschriebene Konversion der im Wasserstoff vormoderierten Neutronen mittels Phononanregung statt.

Die Zu- und Ableitungen für Wasserstoff und Helium verlaufen durch die Lanze aus dem Reaktor, wo sich die Anschlüsse für die benötigten Kühlaggregate befinden. Am anderen Ende des Doppelrohrs befindet sich ein evakuierter Tank, in welchen die verwendeten Gase im Falle einer Temperaturerhöhung expandieren können. Abbildung 2.3 zeigt die beiden Enden jeweils in Vergrößerung. Man erkennt hier die Faltenbälge auf der A-Seite, mit welchen die Dehnung des Doppelrohres ausgeglichen wird, und auf der anderen Seite die Schnittstellen zu den benötigten Aggregaten.



(a) B-Seite: Man erkennt die Zu- und Ableitung für Helium und Wasserstoff.
(b) A-Seite: Zu sehen sind die Faltenbälge für Außen- und Innenrohr und der Auslass für das Kühlhelium.

Abbildung 2.3: Vergrößerte Schnittansicht der beiden Endseiten.

Die relevanten Rohrradien sind in Tabelle 2.2 zu finden und stammen aus den zugehörigen Konstruktionszeichnungen. Die Länge der Rohrteile, die im Reaktorinneren liegen und somit Strahlung ausgesetzt sind, beträgt $L = 4,86\text{ m}$.

Bereich	Innenradius (mm)	Außenradius (mm)	Rohrdicke (mm)
Innenrohr	60,0	64,0	4,0
Außenrohr	67,25	71,65	4,4
Strahlrohr 6	81,5	85,5	4,0

Tabelle 2.2: Relevante Radien der verbauten Rohre.

2.3 Aktueller Projektstatus

Da der Betrieb der Quelle für ultrakalte Neutronen mit den beiden Medien H₂ und D₂ eine wesentliche Änderung des Reaktors darstellt, ist hierfür eine Genehmigung nach §7 Atomgesetz (AtG) nötig. Das dazugehörige Genehmigungsverfahren wurde bereits am 27.03.2009 eröffnet, um eine frühzeitige Prüfung der Komponenten zu ermöglichen. Die Errichtung und der Einbau von technischen Komponenten der UCN-Quelle ist hingegen keine wesentliche Änderung und erfolgt daher nur im Aufsichtsverfahren nach §19 AtG. Die zuständige Aufsichtsbehörde ist in beiden Fällen das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Sachverständige werden vom TÜV Süd gestellt.

Zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Arbeit ist die Konzeption und Konstruktion aller wesentlichen Bestandteile der UCN-Quelle abgeschlossen. Bevor eine endgültige Freigabe für den Betrieb am FRM II erfolgen kann, muss ein externer Testbetrieb stattfinden, dessen Dauer im Moment auf ein bis zwei Jahre geschätzt wird. Hierfür wurden bereits die benötigten Kühlaggregate und ein Muster des Doppelrohrs geliefert. Nach dem jetzigen Plan soll der Testaufbau auf dem Gelände des Maier-Leibnitz-Laboratorium stehen und einen Teil der Infrastruktur des Tandembeschleunigers nutzen. Der Beginn des Testbetriebs ist für Anfang 2015 vorgesehen.

Kapitel 3

Simulation

In diesem Kapitel wird die Durchführung der einzelnen Simulationen des Doppelrohrs für die folgenden vier Szenarien beschrieben:

0: Keine Strömungskühlung, keine Wärmeabstrahlung Das Innenrohr ist evakuiert und der Ringspalt an beiden Enden abgeschlossen, sodass das darin befindliche Helium nicht strömt und keine aktive Kühlung des Doppelrohrs stattfindet. Die Abstrahlung von Wärme an den Rohroberflächen wird ignoriert, da dieses Szenario nur zur Verifizierung der Methoden dient.

1: Keine Strömungskühlung Wie Szenario 0, aber diesmal mit Wärmeabstrahlung. Anhand der Ergebnisse kann später der Nutzen einer aktiven Kühlung bewertet werden.

2: Normaler Betrieb Wie Szenario 1, allerdings mit Kühlung, das heißt Ein- und Auslass des Heliums im Ringspalt. Dies entspricht dem normalen Betriebszustand der Quelle.

3: Abgeschaltete Quelle Wie Szenario 1, aber diesmal ist das Innenrohr nicht evakuiert, sondern ebenfalls mit Helium gefüllt. Dies entspricht einer kompletten Abschaltung der Quelle.

3.1 Belastungsarten

Im Folgenden werden kurz die in dieser Arbeit betrachteten Belastungsarten, die auf das Doppelrohr wirken, genannt und ihre Ursachen erläutert.

3.1.1 Thermische Belastung

Mit thermischer Belastung ist die lokale Temperaturänderung des Doppelrohrs und der daraus resultierende Temperaturgradient entlang der Struktur gemeint. Dieser kann die Eigenschaften des verwendeten Materials verändern und zum Beispiel die mechanische Stabilität des Doppelrohrs verschlechtern.

Da in einem Kernreaktor unterschiedliche Strahlungsarten auftreten, gibt es verschiedene Beiträge zur Wärmeproduktion in den Bauteilen. Diese sind:

Neutronenstreuung: Die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen stoßen mit den Atomkernen des Materials. Bei elastischer Streuung wird ein Teil der kinetischen Energie der Neutronen direkt in thermische Energie im Bauteil umgewandelt. Im inelastischen Fall kommt es zu einer Anregung des Stoßpartners, welcher unter Aussendung von Photonen wieder in den Grundzustand zurückfällt. Diese γ -Teilchen unterliegen der Photonestreuung.

Photonenstreuung: Bei der Kernreaktion selbst werden ebenfalls hochenergetische Photonen erzeugt. Mögliche Mechanismen für die Energiedeposition in Materie sind der photoelektrische Effekt, die Compton-Streuung und die Paarbildung.

Neutroneneinfang: Da Aluminium einen hohen Absorptionsquerschnitt für Neutronen hat, passiert es oft, dass ein freies Neutron durch einen Atomkern absorbiert wird. Damit wird aus normalen Aluminium das Isotop ^{28}Al , welches ein reiner β^- -Strahler ist und unter Aussendung von Elektronen und Photonen zerfällt [15].

All diese Mechanismen führen zu Energiedeposition im Material und damit zur Erwärmung der Bauteile.

3.1.2 Mechanische Belastung

Als direkte Folge der Aufheizung ergibt sich eine thermische Expansion der Rohre, welche durch Metallbälge ausgeglichen werden soll. Ähnlich wie eine Feder üben die Bälge eine rückstellende mechanische Kraft in axialer Richtung auf das Doppelrohr aus. Dies könnte zu einer Stauchung führen.

3.2 Verwendete Daten

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten über die nukleare Heizung im Doppelrohr und dem Strahlrohr 6 stammen aus einem Bericht von Dr. A. Röhrmoser aus dem Jahr 2010 [16].

In diesem wurden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation die Neutronenflussdichten für die reale Reaktorgeometrie (Abbildung 3.1) entlang des SR6 berechnet (Abbildung A.1). Berücksichtigt wurden dabei die in Kapitel 3.1.1 genannten Beiträge. Die x-Achse entspricht der in dieser Arbeit gewählten z-Achse und verläuft durch das Zentrum des SR6. Der Punkt $z = 0$ befindet sich an der Stelle, wo später der UCN-Konverter im Doppelrohr sitzen wird, sein Abstand zum Brennelement beträgt 59 cm.

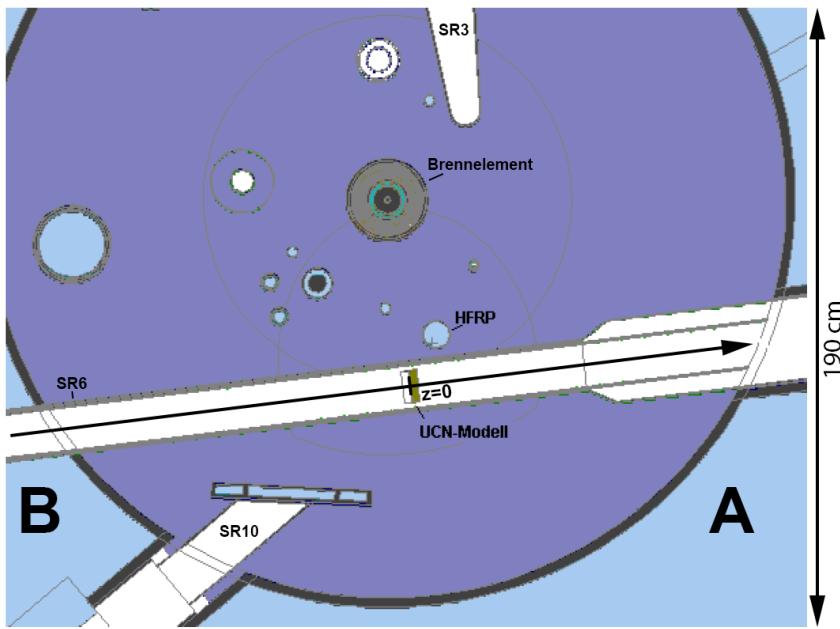


Abbildung 3.1: Horizontaler Schnitt durch den Reaktor, circa 30 cm über der Mittelebene. Zu sehen sind das durchgehende Strahlrohr 6, das zentrale Brennelement und ein Fingerhutrohr (HFRP). An das SR3 schließt das Experiment *STRESS-SPEC* an, das SR10 bedient *MEDAPP* und *NECTAR*. Mit Änderungen entnommen aus [16].

Aus der Flussdichte lässt sich die Wärmeproduktion im Doppelrohr (Abbildung A.2) und Strahlrohr berechnen (Abbildung A.3). Man sieht, dass der Unterschied zwischen Außen- und Innenrohr sehr gering ist, weshalb die Wärmeleitung in beiden Rohren als identisch angenommen werden kann. Für das Strahlrohr ist die Kurve weniger symmetrisch, da sich das Rohr auf der A-Seite ($z > 0$) deutlich aufweitet und die Wanddicke 5 mm statt 4 mm wie in der anderen Richtung beträgt. Dadurch ergibt sich auf der A-Seite ein größerer Wärmeeintrag.

Durch Multiplizieren der Wärmequellterme mit der Dichte des jeweiligen Materials und der Querschnittsfläche der Rohre erfolgt eine Umrechnung in die Einheit W cm^{-1} und man erhält Abbildung A.4.

Die bis jetzt genannten Werte müssen abschließend noch nach oben korrigiert werden, um die Bestückung eines benachbarten Fingerhutrohrs mit zusätzlichen Urantargets zur Herstellung von Molybdän-99 zu berücksichtigen. Diese Targets führen zur Erhöhung der Neutronenflussdichte im Strahlrohr. Wie in dem horizontalen Schnitt (Abbildung 3.1, Markierung HFRP) zu sehen, sitzt das genannte Rohr vom Konverter aus gesehen Richtung A-Seite, weshalb alle Kurven leicht asymmetrisch um den

gewählten Nullpunkt werden. Die im Doppelrohr zusätzlich auftretende Heizleistung ist in Graph A.5 zu sehen.

Durch Anpassen geeigneter Funktionen an die korrigierten Datenpunkte erhält man Abbildung 3.2.

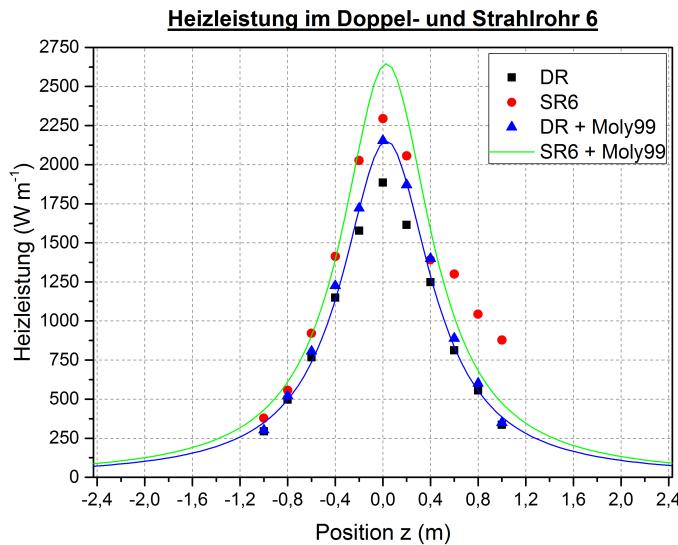


Abbildung 3.2: Heizleistung im Doppelrohr und im Strahlrohr 6, mit und ohne Korrektur für zusätzliche Uran–Träger. Die eingezeichneten Datenpunkte stammen aus [16].

Die Fitfunktion ergibt sich wie folgt: Nach dem Abstandsgesetz gilt für Energiegrößen, wie in diesem Fall die Heizleistung, $P(r) = ar^{-2}$, wobei a eine Konstante ist. Betrachtet man die horizontale Ebene, die das Brennelement und das Strahlrohr enthält, so beträgt der radiale Abstand eines Punktes z auf der Rohrachse $r(z) = \sqrt{z^2 + d^2}$, wobei $d = 59$ cm der Abstand der Achse zum Brennelement ist. Als Fitfunktion ergibt sich damit Formel 3.1 mit den Parametern: $a = 749$ W m, $b = 1,3$, und $c = -0,038$ m.

$$P(z) = \frac{a}{(bz + c)^2 + d^2} \quad (3.1)$$

Da die geometrische Asymmetrie des Strahlrohrs (Aufweitung) nicht relevant für diese Arbeit ist, wird sie ignoriert und der Fit für das Doppelrohr lediglich um den Faktor 1,23 modifiziert. Dieser stammt aus dem Vergleich der Daten für Doppelrohr und Strahlrohr, ohne Berücksichtigung der zusätzlichen Targets. Es ist zu beachten, dass die gezeigte Kurve *DR* für das komplette Doppelrohr gilt und somit noch auf

3.3 Szenario 0: Keine Strömungskühlung, keine Wärmestrahlung

das Außen- und Innenrohr im Verhältnis der Querschnittsflächen aufgeteilt werden muss. Für das Innenrohr ergibt sich somit ein etwas geringerer Wert.

Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht der resultierenden Funktionsverläufe.

Bereich	Heizleistung
Innenrohr	$P_{DRi}(z) = \frac{A_{DRi}}{A_{DRi} + A_{DRA}} P(z) =: xP(z) \approx 0,45P(z)$
Außenrohr	$P_{DRA}(z) = \frac{A_{DRA}}{A_{DRi} + A_{DRA}} P(z) = (1 - x) P(z) \approx 0,55P(z)$
Strahlrohr 6	$P_{SR}(z) = 1,23P(z)$

Tabelle 3.1: Funktionsverläufe der Heizleistung in den Rohren.

3.3 Szenario 0: Keine Strömungskühlung, keine Wärmestrahlung

Um den Einfluss der nuklearen Heizung im Reaktor auf das Doppelrohr abzuschätzen und die Frage zu beantworten, in welchem Umfang eine Kühlung erforderlich ist, wurde zuerst folgendes Szenario betrachtet: Die beiden Enden des Ringkanals sind abgeschlossen, sodass das im Kanal eingeschlossene Helium nicht strömt. Die Innенwand des Innenrohrs wird als perfekt isolierend angenommen, da sich während des Betriebs im Rohrinneren ein Vakuum befindet, durch welches keine Wärmeleitung stattfindet. An der Außenseite des Strahlrohres befindet sich das Beckenwasser mit der Temperatur $T_{Bw} = 300\text{ K}$, in welches alle auftretenden Wärmeströme abgeführt werden.

Um die Korrektheit des in *COMSOL* erstellten Grundmodells zu verifizieren, soll in diesem Abschnitt ein Vergleich zwischen Simulation und analytischer Berechnung anhand eines vereinfachten Modells des ersten Szenarios gezogen werden. Die von allen Rohroberflächen abgegebene Wärmestrahlung wird hierbei vorerst ignoriert.

3.3.1 Analytische Betrachtung

Als Erstes wird die analytische Berechnung vorgenommen. Um die Komplexität zu reduzieren, wird angenommen, dass Temperaturfluss nur in radialer, aber nicht in axialer Richtung stattfindet. Der Wärmetransport in Fluiden findet nur durch Leitung und nicht durch Konvektion statt.

3.3.1.1 Geometrisches Modell

Die Geometrie des Rohrsystems lässt sich aufgrund der Symmetrie effizient in Zylinderkoordinaten beschreiben. Legt man als z–Achse die Rohrachse des Innenrohrs fest, so kann jedes Rohr oder jeder Zwischenraum durch ein Rechteck in der r–z–Ebene dargestellt werden. Abbildung 3.3 zeigt das entsprechende Schema samt der relevanten Bezeichnungen und der zu erwartenden Wärmeströme.

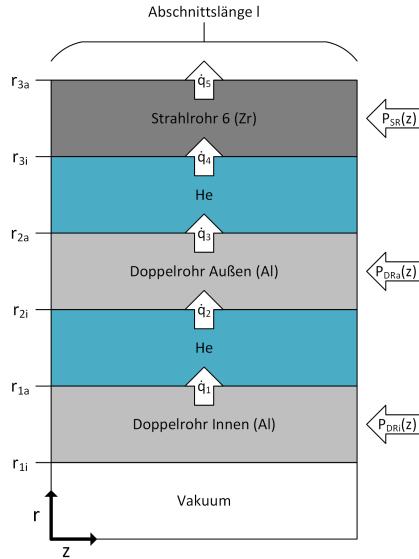


Abbildung 3.3: Schema des für die analytische Rechnung verwendeten geometrischen Modells.

Die einzelnen Bereiche sind:

Strahlrohr 6 Ganz außen befindet sich das Strahlrohr aus Zirkaloy–4, in welches das eigentliche Doppelrohr eingebbracht ist. Die Wärmeleitfähigkeit wird hier mit $\lambda_{Zr} = 21,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ abgeschätzt [17]. Es wird angenommen, dass die Temperatur an der Außenseite des SR6 durch das umgebende Beckenwasser konstant bei $T_{3a} = 300 \text{ K}$ gehalten wird, wobei im Material Wärme durch die eingehende Leistung P_{SR} erzeugt wird.

Außen- und Innenrohr Das Doppelrohr ist aus der Aluminiumlegierung EN AW–6061 gefertigt, welche eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{Al} = 185 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ besitzt [18]. In beiden Rohren wird Wärme durch die entsprechenden Leistungen P_{DRi} und P_{DRa} erzeugt.

Helium Im Ringkanal und zwischen SR6 und Doppelrohr befindet sich jeweils gasförmiges Helium bei $p = 1,2 \text{ bar}$. Aufgrund der geringen Dichte ist die hier

3.3 Szenario 0: Keine Strömungskühlung, keine Wärmestrahlung

produzierte Wärme vernachlässigbar. Es ist aber zu beachten, dass die Wärmeleitfähigkeit von Gasen stark von der Temperatur abhängt. Für Helium gilt Formel 3.2 [19] mit den empirischen Parametern aus Tabelle 3.2 (verifiziert durch [20]). In dem relevanten Temperaturbereich bis 1000 K ist dies eine monoton steigende Funktion. Bei hohen Temperaturen wird deswegen eine größere Wärmemenge über das Helium abgeführt und die Maximaltemperatur reduziert.

$$\lambda_{He}(T) = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \quad (3.2)$$

	Wert	Einheit
A	$3,400 \cdot 10^{-2}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
B	$4,566 \cdot 10^{-4}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-2}$
C	$-2,149 \cdot 10^{-7}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-3}$
D	$1,0071 \cdot 10^{-10}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-4}$
E	$-1,914 \cdot 10^{-14}$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-5}$

Tabelle 3.2: Parameter zur Berechnung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Helium. Entnommen aus [19].

Die Zahlenwerte für die Radien und der funktionale Verlauf der nuklearen Heizung können den Kapiteln 2.2.2 und 3.2 entnommen werden.

Die Randbedingungen sind für jede der fünf Schichten analog:

- Die Temperatur an der Außenseite einer Schicht ist bekannt und konstant.
- Der an der Innenseite einer Schicht eingehende Wärmestrom ist bekannt und lässt sich berechnen.

Damit ist es möglich, die Temperaturen der einzelnen Schichten von Außen (Beckenwasser) nach Innen (Innenrohr) zu berechnen. Eine genauere Definition der Randbedingungen folgt im nächsten Abschnitt.

3.3.1.2 Mathematische Beschreibung

Die Wärmeleitung durch eine isotrope Schicht eines Materials kann mittels der Wärmeleitungsgleichung 3.3 beschrieben werden [21], wobei $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ die Diffusivität des Materials, ρ die Dichte, c die spezifische Wärmekapazität, P die dem Material zugeführte Heizleistung, V das Volumen des betrachteten Teilstücks und $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ der Laplace-Operator sind.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \Delta T + \frac{P/V}{\rho c} \quad (3.3)$$

Da in diesem Fall die Gleichgewichtslösung gesucht ist, gilt $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. Teilt man die Gleichung anschließend durch die Diffusivität, folgt:

$$\boxed{\Delta T + \frac{P/V}{\lambda} = 0} \quad (3.4)$$

Durch die wie zuvor beschriebene Darstellung der Geometrie in Zylinderkoordinaten, lässt sich der Laplace-Operator auch wie folgt schreiben:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

Aufgrund der φ -Unabhängigkeit des Wärmeeintrags ist der Temperaturverlauf unabhängig vom Polarwinkel und es gilt $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0$. Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, wird zur Vereinfachung auch $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$ angenommen, womit die finale Wärmeleitungsgleichung für diesen Fall folgt:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = -\frac{P/V}{\lambda} =: -c_0 \quad (3.6)$$

Diese Differentialgleichung lässt sich durch zweimalige Integration leicht lösen:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{c_0}{2} r + \frac{c_1}{r} \Rightarrow \boxed{T(r) = -\frac{c_0}{4} r^2 + c_1 \ln r + c_2} \quad (3.7)$$

Die beiden Integrationskonstanten folgen jeweils aus den Randbedingungen. Der auf der Innenseite einer Schicht eingehende Wärmestrom \dot{q} bestimmt c_1 :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_i} = -\frac{c_0}{2} r_i + \frac{c_1}{r_i} = -\frac{\dot{q}}{A(r_i) \lambda} = -\frac{\dot{q}}{2\pi r_i l \lambda} \Rightarrow \boxed{c_1 = \frac{c_0}{2} r_i^2 - \frac{\dot{q}}{2\pi l \lambda}} \quad (3.8)$$

c_2 folgt aus der zeitlich konstanten Temperatur T_a an der Außenseite:

$$T(r_a) = -\frac{c_0}{4} r_a^2 + c_1 \ln r_a + c_2 = T_a \Rightarrow \boxed{c_2 = T_a + \frac{c_0}{4} r_a^2 - c_1 \ln r_a} \quad (3.9)$$

Insgesamt ergibt sich für die Temperatur in einer Schicht des Systems:

$$\boxed{T(r) = T_a - \frac{c_0}{4} r^2 + \left(\frac{c_0}{2} r_i^2 - \frac{\dot{q}}{2\pi l \lambda} \right) \ln \frac{r}{r_a} + \frac{c_0}{4} r_a^2} \quad (3.10)$$

Für den Wärmestrom, der eine Schicht an der Außenseite verlässt, gilt:

$$\dot{q}_{out} = -A(r_a) \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_a} = -2\pi r_a l \lambda \left(-\frac{c_0}{2} r_a + \left(\frac{c_0}{2} r_i^2 - \frac{\dot{q}}{2\pi l \lambda} \right) \frac{1}{r_a} \right) = \dot{q} + P \quad (3.11)$$

Die in Abbildung 3.3 eingezeichneten Wärmeströme ergeben sich damit zu:

- $\dot{q}_1 = P_{DRi}(z)$
- $\dot{q}_2 = \dot{q}_1$
- $\dot{q}_3 = \dot{q}_2 + P_{DRa}(z)$
- $\dot{q}_4 = \dot{q}_3$
- $\dot{q}_5 = \dot{q}_4 + P_{SR}(z)$

3.3.1.3 Berechnung

Zur Temperaturberechnung wurde das Rohrsystem in axiale Abschnitte der Länge $l = 5 \text{ mm}$ eingeteilt, in welchen die eingehende Heizleistung für jede Schicht konstant ist. Berechnet wird diese durch Multiplikation der zuvor ermittelten Funktionsverläufe (Tabelle 3.1) mit der Abschnittslänge l (damit sich die Einheit W ergibt). Für die beiden Heliumschichten wurde die Temperatur mittels Formel (3.10) im radialen Abstand von $0,1 \text{ mm}$ berechnet, um die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen. Im Fall einer Metallschicht reicht die Temperaturbestimmung an der Innenseite.

Realisiert wurde dies mit Hilfe eines in Python geschriebenen Programms. Der Quellcode dazu findet sich im Anhang B und das Ergebnis ist in Abschnitt 3.3.3 zu sehen.

3.3.2 Simulation mittels *COMSOL Multiphysics®*

Für eine genauere Analyse wurde nun die Simulationssoftware *COMSOL Multiphysics®* verwendet. Als Physik-Modul wurde der *konjugierte Wärmetransport* gewählt, welcher die Kombination von Wärmetransport in Festkörper und in Fluiden beschreibt, wie sie bei umströmten Körpern auftritt [22]. In Festkörpern tritt dabei hauptsächlich Wärmeleitung auf, während in Gasen und Flüssigkeiten die Konvektion überwiegt. Das hier beschriebene Modell wird als Grundlage für alle weiteren Simulationen verwendet und für jeden Fall geeignet ergänzt.

3.3.2.1 Geometrie

Ähnlich wie bei der analytischen Rechnung (Abschnitt 3.3.1.1) besteht die Geometrie des Systems aus Rechtecken in der r-z-Ebene. Zusätzlich zu den Bereichen aus Abbildung 3.3 wurde an die Außenseite des Strahlrohres ein 20 cm breiter Block Wasser gesetzt, welcher das Beckenwasser beschreiben soll. Auf eine Unterteilung in Moderatorank und Becken wurde dabei verzichtet. Die Materialauswahl erfolgte nach Kapitel 2.2.2. Zum besseren Verständnis wurde ein ergänztes geometrisches Schema (Abbildung 3.4), welches Nummerierungen beziehungsweise Beschriftung der Grenzen und Bereiche enthält, erstellt.

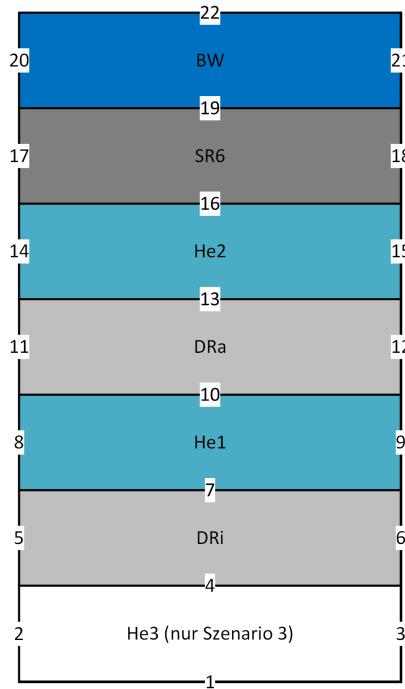


Abbildung 3.4: Ergänztes geometrisches Schema für das *COMSOL*-Modell, wobei der Block He3 erst im dritten Szenario relevant wird. Das Koordinatensystem ist wie in Abbildung 3.3 gelegt.

3.3.2.2 Randbedingungen

Entscheidend für die korrekte Beschreibung des physikalischen Modells ist die Auswahl der Randbedingungen. Die Angaben in Klammern beziehen sich dabei von nun an auf die Beschriftungen des Schemas 3.4. Die Randbedingungen sind:

Wärmetransport in Festkörpern: Festlegung der als Festkörper behandelten Gebiete (DRi, DRa, SR6).

Fluid: Festlegung der als Fluide behandelten Gebiete (He1, He2, BW).

Thermische Isolierung: Als thermisch isolierend wird die Innenseite des Innenrohrs und alle Grenzen bei $z = \pm L/2$ angenommen (4, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 21).

Wand: Jeder Fluidbereich muss durch Wände begrenzt sein. Diese sind Anfang und Ende des Ringspaltes und des SR6–Volumens, sowie die zugehörigen Innenwän-

3.3 Szenario 0: Keine Strömungskühlung, keine Wärmestrahlung

de, der Beckenwasserbereich ist durch die Außenseite des SR6 begrenzt (7-10, 13-16, 19, 22).

Wärmequelle SR6: Auswahl des Strahlrohrs als Gebiet (SR6), in dem Wärme mit der Leistung P_{SR} erzeugt wird. Um die von *COMSOL* geforderte Einheit W m^{-3} zu erhalten, muss P_{SR} noch durch die Querschnittsfläche des Strahlrohrs A_{SR} geteilt werden.

Wärmequelle Doppelrohr: Auswahl von Außen- und Innenrohr (DRi, DRa) als gemeinsame Wärmequelle mit der Wärmeleitungsrate P_{DR} . Auch hier muss zusätzlich durch die Summe der Querschnittsflächen von Außen- und Innenrohr $A_{DRi} + A_{DRa}$ geteilt werden.

Einlass Beckenwasser: Auswahl der Beckenwassergrenze bei $z = -L/2$ (20), wobei eine Strömung des Beckenwassers entlang der z-Achse mit der Geschwindigkeit $v_{Bw} = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ angenommen wird [23].

Auslass Beckenwasser: Auswahl der Beckenwassergrenze bei $z = +L/2$ (21). Es herrscht kein Gegendruck.

Temperatur Beckenwasser: Auswahl der äußeren Seite des Beckenwasserblocks (22), mit der Annahme, dass die Temperatur ab dort der regulären Beckenwassertemperatur von $T_{Bw} = 300 \text{ K}$ entspricht.

3.3.3 Ergebnis

Abbildung 3.5 zeigt den resultierenden Temperaturverlauf der analytischen Rechnung und der Simulation. Die Außen- und Innentemperaturen des Außen- und Innenrohres liegen aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Aluminium sehr nahe beieinander, weshalb sie in den Graphen nicht zu unterscheiden sind.

Wie zu erwarten, sind die Kurven der Simulation aufgrund des, von *COMSOL* berücksichtigten, axialen Wärmestroms im Vergleich zur analytischen Rechnung verbreitert, das Maximum liegt dafür tiefer.

Da in beiden Betrachtungen das selbe System mit den gleichen Parametern berechnet wurde, sollte die Fläche unter den beiden Graphen identisch sein. Um den Effekt der unterschiedlichen Randbedingungen an der Außenseite des Strahlrohrs zu berücksichtigen, wurde in beiden Fällen von der gemittelten Doppelrohrtemperatur die gemittelte Strahlrohrtemperatur abgezogen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.6 zu sehen.

Eine numerische Integration beider Kurven ergibt:

$$\int_{z=-L/2}^{z=L/2} T_{\text{analytisch}}(z) dz = 340 \text{ K m} \quad (3.12)$$

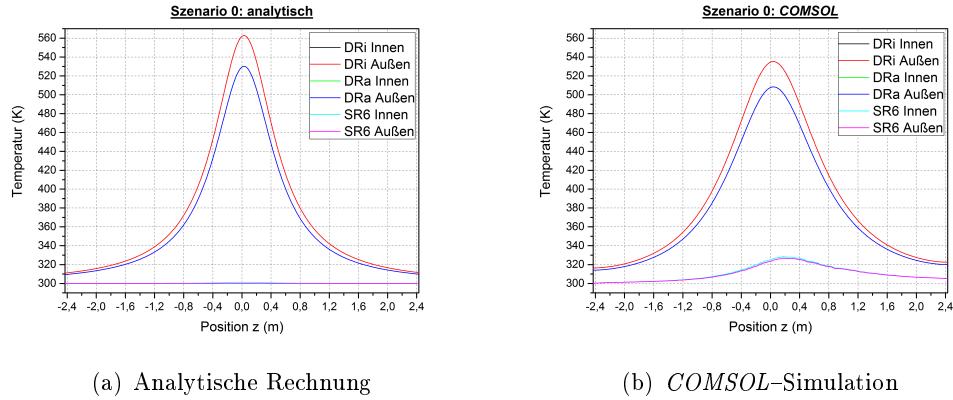


Abbildung 3.5: Temperaturverlauf im Doppelrohrsysteem ohne aktive Kühlung und ohne Berücksichtigung von Wärmeabstrahlung.

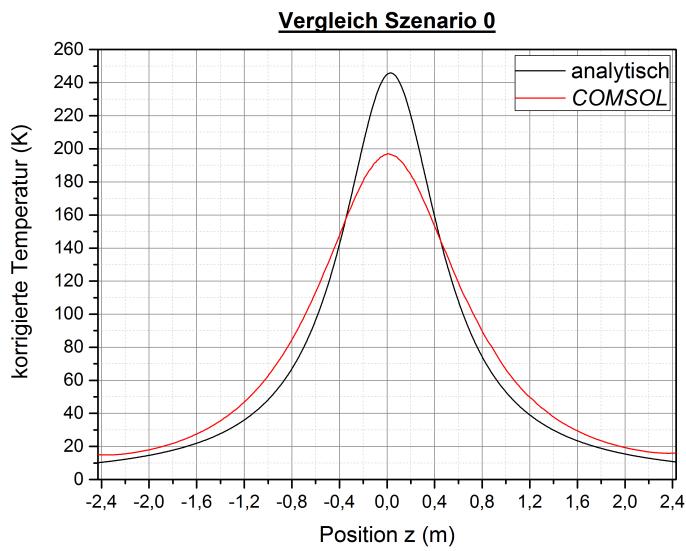


Abbildung 3.6: Vergleich der korrigierten mittleren Doppelrohrtemperatur für analytische Rechnung und Simulation.

$$\int_{z=-L/2}^{z=L/2} T_{comsol}(z) dz = 352 \text{ K m} \quad (3.13)$$

Aufgrund der geringen Abweichung zwischen beiden Integralen von $\sim 3,5\%$ ist davon auszugehen, dass das aufgestellte *COMSOL*-Modell korrekt ist.

3.4 Szenario 1: Keine Strömungskühlung

Nach der Vorbetrachtung in Szenerio 0 folgt nun die Simulation ohne Strömungskühlung mit Berücksichtigung von Wärmeabstrahlung, welche zur Erhöhung der Wärmestrome von Innen nach Außen führen wird.

Nach dem Stefan–Boltzmann–Gesetz gilt für den Wärmestrom, der von einer Fläche A mit der Temperatur T in Form von Strahlung abgeführt wird [24]:

$$\dot{q}_{rad} = \epsilon \sigma A T^4 \quad (3.14)$$

Die Emissivität gibt an, wie groß der von einer Oberfläche abgestrahlte Wärmestrom im Vergleich zu einem idealen schwarzen Körper ist. Es gilt also $\epsilon \leq 1$.

3.4.1 Geometrie

Die Geometrie des Problems ist identisch zur der aus Szenario 0 (Abschnitt 3.3.2.1).

3.4.2 Randbedingungen

Die Randbedingung aus Abschnitt 3.3.2.2 müssen wie folgt ergänzt werden:

Oberfläche–zu–Oberfläche Strahlung: Auswahl der Innen- und Außenseiten beider Aluminium–Rohre und der Innenseite des Strahlrohrs (4, 7, 10, 13, 16). Die Emissivitäten können Tabelle 3.3 entnommen werden. Die Umgebungstemperatur kann willkürlich gewählt werden, da sich die entsprechenden Beiträge gegenüberliegender Oberflächen aufheben [25].

Oberfläche–zu–Umgebung Strahlung: An der Außenseite des SR6 (19) wird Strahlung an die Umgebung, in diesem Fall das Beckenwasser, abgegeben. Die Umgebungstemperatur beträgt deswegen $T_{Bw} = 300 \text{ K}$.

Die Innenseite des Innenrohres (4) wird nicht mehr als isolierend angenommen, da sie einen Wärmestrom in Form von Strahlung abgibt.

Oberfläche	Beschaffenheit	Emissivität
DRI Innen (4)		
DRi Außen (7)	oxidiert	0,40 [20]
DRa Innen (10)		
DRa Außen (13)	schwarz eloxiert	0,90
SR Innen (16)	oxidiert	0,45 [26]
SR Außen (19)		

Tabelle 3.3: Angenommene Emissivitäten der einzelnen Oberflächen. Die Außenseite des Doppelrohrs ist absichtlich schwarz eloxiert, um eine bessere Wärmeabfuhr zu ermöglichen. Alle anderen Oberflächen weisen Oxidation auf.

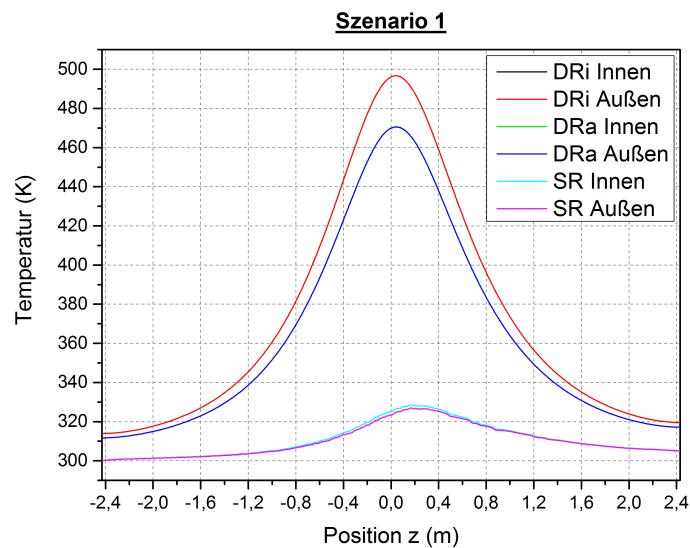


Abbildung 3.7: Temperaturverlauf im Szenario 1 (ohne Kühlung).

3.4.3 Ergebnis

Abbildung 3.7 zeigt den berechneten Temperaturverlauf.

Wie erwartet liegen die Temperaturen aufgrund der Abstrahlung von Wärme tiefer als im Szenario 1 (Abschnitt 3.3.3). Allerdings bleibt die maximale Temperatur in der Mitte des Innenrohrs mit $\sim 500\text{ K}$ sehr hoch. Die Aufheizung des Strahlrohrs hingegen ist aufgrund der guten Kühlung durch das umströmende Beckenwasser zu vernachlässigen.

3.5 Szenario 2: Normalbetrieb

Die zweite betrachtete Situation entspricht dem normalen Betriebszustand der UCN–Quelle: Das Innenrohr ist evakuiert und auf der B–Seite des Reaktors wird gekühltes Helium in den Ringspalt des Doppelrohrs eingeleitet.

3.5.1 Geometrie

Die Geometrie für dieses Szenario wird erneut aus Abschnitt 3.3.2.1 übernommen.

3.5.2 Randbedingungen

Zusätzlich zu Szenario 1 (Abschnitt 3.4.2) gelten die folgenden Randbedingungen:

Einlass Helium: Auswahl der Ringspaltgrenze bei $z = -L/2$ (8), wobei über die Rohrlänge ein Druckabfall von $\Delta p_{He} = 20\text{ mbar}$ angenommen wird [27].

Auslass Helium: Auswahl der Ringspaltgrenze bei $z = +L/2$ (9). Es herrscht kein Gegendruck.

Temperatur Helium: Auswahl der Grenze auf Einlassseite des Ringspalts (8), mit der Annahme, dass die Temperatur des einströmenden Heliums $T_{He} = 220\text{ K}$ beträgt.

3.5.3 Ergebnis

Die Abbildung 3.8 zeigt den Temperaturverlauf für den Normalbetrieb.

Auf der B–Seite wird das einströmende Helium und gekühlte Doppelrohr durch das Beckenwasser aufgewärmt. Der Temperaturanstieg ist näherungsweise linear. Ab $z > -0,8\text{ m}$ kommt es schließlich zu starker Wärmeproduktion in den Rohren und die Temperatur steigt schnell an, bis das Maximum bei $z \approx 0,5\text{ m}$ erreicht wird. Es liegt nicht bei $z = 0$, da das strömende Helium Wärme aufnimmt und diese weiter in $+z$ –Richtung transportiert. Danach sinkt die Temperatur wieder ab, bleibt allerdings über der Beckenwassertemperatur. Die Kühlung reduziert die Maximaltemperatur also von 500 K auf 400 K und erfüllt damit ihren Zweck.

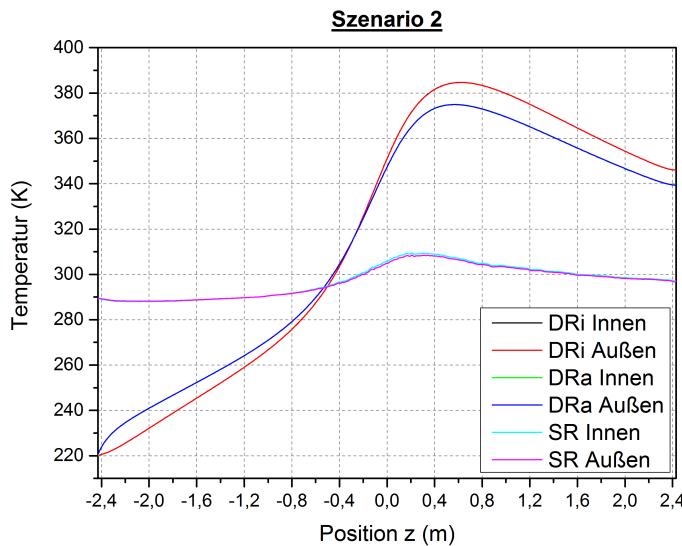


Abbildung 3.8: Temperaturverlauf im Szenario 2 (Normalbetrieb).

3.6 Szenario 3: Abgeschaltete Quelle

In der letzten Betrachtung geht es um die komplett abgeschaltete UCN–Quelle. Dies bedeutet, dass keine Kühlung des Doppelrohrs mittels Helium stattfindet und dass das Innenrohr nicht evakuiert, sondern mit Helium geflutet ist. Ziel ist es, zu sehen, ob durch die zusätzliche Heliumfüllung mehr Wärme über die axialen Ränder des Innenvolumens an die Umgebung abgeführt wird als in Szenario 1.

3.6.1 Geometrie

Für diese Situation wird die Geometrie aus Szenario 0 (Abschnitt 3.3.2.1) um einen Heliumblock im Inneren des Innenrohrs ergänzt.

3.6.2 Randbedingungen

Es gelten erneut die Randbedingungen aus Szenario 1 (Abschnitt 3.4.2), allerdings müssen folgende Ergänzungen vorgenommen werden:

Fluid: Hinzufügen des neuen inneren Heliumbereichs (He3) zur Auswahl.

Temperatur Helium: Auswahl der Grenzen des Innenbereichs bei $z = \pm L/2$ (2, 3).

Es wird eine Umgebungstemperatur von 293 K angenommen.

3.6.3 Ergebnis

In Grafik 3.9 sieht man, dass sich das Ergebnis nur minimal vom Szenario 1 (Abbildung 3.7) unterscheidet: Erst ab $|z| > 1,6$ m wird zusätzliche Wärme durch die Heliumfüllung in Richtung Rohrenden abgeführt. Die Maximaltemperatur reduziert sich jedoch nicht. Grund hierfür ist die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von Helium und die lang gezogene Geometrie, welche den Wärmetransport in axialer Richtung zu den Rohrenden behindert. Der Großteil des Wärmetransfers findet also weiterhin in radialer Richtung statt.

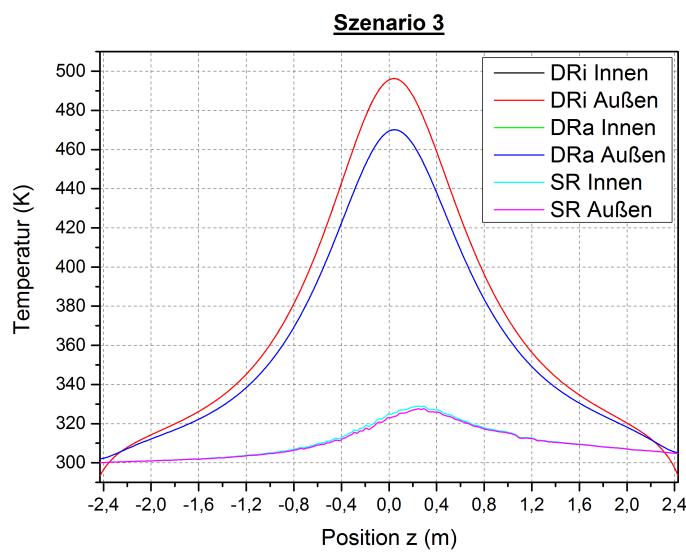


Abbildung 3.9: Temperaturverlauf im Szenario 3 (abgeschaltete Quelle).

Kapitel 4

Resultierende Längendehnungen

Aus den in Kapitel 3 berechneten Temperaturverläufen lässt sich nun die thermische Expansion der einzelnen Rohre bestimmen.

Die Längenänderung ist dabei linear zur Temperaturänderung gegenüber einer Referenztemperatur T_0 :

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0 = \alpha(T_0 - T)L_0 \quad (4.1)$$

L_0 steht hierbei für die ursprüngliche Länge, die ein Bauteil bei Temperatur T_0 hat. α meint den Längenausdehnungskoeffizient und kann Tabelle 4.1 entnommen werden.

Werkstoff	α (K^{-1})
EN AW-6061	$23 \cdot 10^{-6}$ [18]
Zirkaloy-4	$6 \cdot 10^{-6}$ [17]

Tabelle 4.1: Längendehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien.

Zur Berechnung wurde, analog zur analytischen Betrachtung, jedes Rohr in axiale Abschnitte der Länge $l_0 = 5 \text{ mm}$ unterteilt und jeweils die Längendehnung nach Formel 4.1 berechnet. Die Summe über alle Abschnitte ergibt die Gesamtdehnung der Rohrabschnitte innerhalb des Reaktorbeckens. Die Ergebnisse für die drei relevanten Szenarien sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Als Referenztemperatur wurde $T_0 = 293 \text{ K}$ angenommen.

	Szenario 1 (mm)	Szenario 2 (mm)	Szenario 3 (mm)
Innenrohr	9,1	2,7	8,9
Außenrohr	8,0	2,5	7,8
Strahlrohr	0,5	0,1	0,5

Tabelle 4.2: Längendehnung der reaktorinternen Rohrteile in mm.

Aufgrund des kleinen Ausdehnungskoeffizienten von Zirkaloy-4 und der geringen Aufheizung des Strahlrohrs, kann seine Expansion ignoriert werden. Der Dehnungsunterschied zwischen Außen- und Innenseite der Rohre ist ebenso vernachlässigbar,

da die Temperaturdifferenzen wegen der guten Wärmeleitfähigkeit von Metallen sehr gering sind. Die Abweichungen liegen im μm -Bereich und sind deshalb nicht in Tabelle 4.2 enthalten.

Für die Randbereiche des Doppelrohrs und die anschließenden Edelstahlteile, welche sich außerhalb des Reaktors befinden und keiner Strahlung mehr ausgesetzt sind, können aufgrund der großen Rohrlänge in z-Richtung konstante Temperaturen angenommen werden. Mit der Gesamtlänge des Doppelrohrs $L_{DR} = 7,48 \text{ m}$ und den Längen der beiden Anbauteile $L_A = 0,5 \text{ m}$ und $L_B = 0,9 \text{ m}$ ergeben sie die zusätzlichen Dehnungen aus Tabelle 4.3. Für die Stahlteile wurde $\alpha_{Stahl} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angenommen [28].

	Szenario 1		Szenario 2		Szenario 3	
	B-Seite	A-Seite	B-Seite	A-Seite	B-Seite	A-Seite
Temperatur (K)	310	320	220	340	300	
Dehnung (mm)	0,8	1,0	-3,3	1,8	0,3	0,3

Tabelle 4.3: Angenommene Temperaturen der Rohrteile außerhalb des Reaktors und die daraus resultierenden Längenänderungen. Eine Unterscheidung zwischen Außen- und Innenrohr ist nicht nötig.

Insgesamt erhält man folgende Gesamtlängenänderungen des Doppelrohrs (Summe der reaktorinternen und -externen Abschnitte):

	Szenario 1 (mm)	Szenario 2 (mm)	Szenario 3 (mm)
Innenrohr	10,9	1,2	9,5
Außenrohr	9,8	1,0	8,4

Tabelle 4.4: Gesamtdehnungen des kompletten Doppelrohrs in mm.

Die Federkonstante der verwendeten Metallbälge beträgt $D \approx 200 \text{ N mm}^{-1}$ und das Elastizitätsmodul von Al-6061 liegt bei $E_{Al} = 70 \text{ kN mm}^{-2}$ [18]. Für die Stauung durch die rücktreibende Kraft der Bälge gilt Formel 4.2, wobei ΔL_{therm} die thermische Längendehnung, A die jeweilige Rohrquerschnittsfläche und L_0 die Ursprungslänge bei Raumtemperatur meinen.

$$\Delta L = \frac{\Delta L_{therm} D}{E A} (L_0 + \Delta L_{therm}) \quad (4.2)$$

Der größte Effekt ergibt sich demnach für das Aluminium-Innenrohr in Szenario 1, da hier ΔL_{therm} am größten und A am kleinsten ist. Das Ergebnis ist $\Delta L = 0,15 \text{ mm}$, woraus sich schließen lässt, dass die mechanische Stabilität der Rohre nicht beeinträchtigt wird.

Kapitel 5

Fazit und Ausblick

Nachdem die nötigen Grundlagen dieser Arbeit erläutert wurden, konnte das für die Simulationen verwendete Grundmodell durch eine analytische Vergleichsrechnung erfolgreich verifiziert werden. Für das erste betrachtete Szenario, welches die UCN-Quelle im laufenden Betrieb, jedoch ohne aktive Kühlung des Doppelrohrs, darstellt, ergibt sich eine Maximaltemperatur von $T_{max} \sim 500\text{ K}$ im Innenrohr. Die Kühlung durch 220 K kaltes Helium reduziert diese auf $\sim 400\text{ K}$. Die letzte Betrachtung zur komplett abgeschalteten UCN-Quelle, welche sich vom ersten Szenario durch die Heliumfüllung im Innenrohr unterscheidet, ergibt nur eine minimale zusätzliche Wärmeabfuhr an die Umgebung, weshalb erneut $T_{max} \sim 500\text{ K}$ gilt. Mit rund 11 mm erfährt das Innенrohr im Szenario 1 die größte Längendehnung, die gut durch die Federbälge ausgeglichen werden kann.

Es lässt sich schlussfolgern, dass die Konstruktion des Doppelrohrs keine Probleme hinsichtlich der thermischen Belastung aufweist und das Kühlssystem ausreichend groß dimensioniert ist. Auch die mechanische Belastung durch die Faltenbälge ist unkritisch zu bewerten, sodass keine Verformungen der Rohre zu erwarten sind.

Abschließend ist noch zu bemerken, dass sich anhand von Simulationen meist korrekte Aussagen zu den erwarteten Relativwerten und Funktionsverläufen der betrachteten Größen treffen lassen. Absolutwerte bedürfen im Allgemeinen jedoch einer experimentellen Überprüfung. Hierfür ist im weiteren Verlauf des Projekts ein Testbetrieb des Doppelrohrs und der Kühlaggregate vorgesehen, in dem den Rohren durch Heizmatten eine ähnliche Leistung wie im Reaktor zugeführt werden soll.

Anhang A

Neutronenflussdichte & Heizleistung

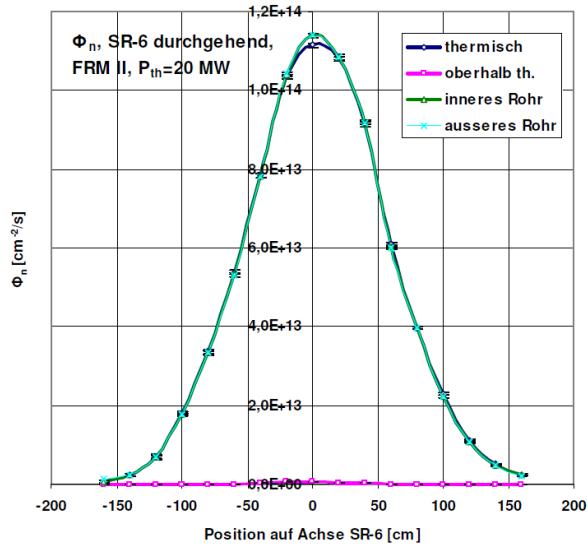


Abbildung A.1: Neutronenflussdichte im Strahlrohr 6. Entnommen aus [16].

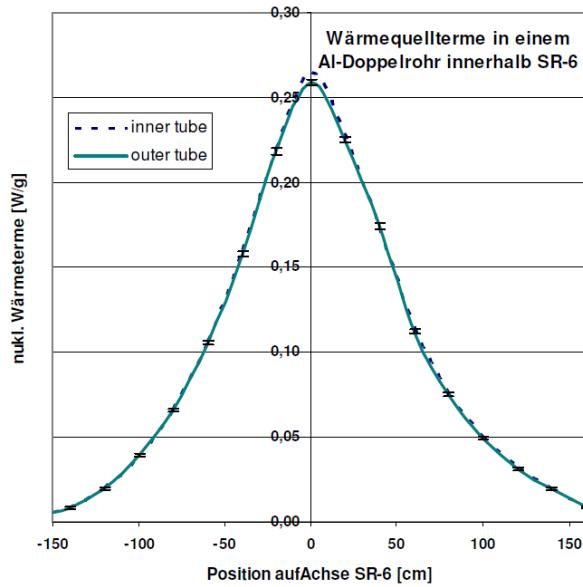


Abbildung A.2: Wärmequellterme im Außen- und Innenrohr. Der Unterschied zwischen Außen- und Innenrohr ist zu vernachlässigen. Entnommen aus [16].

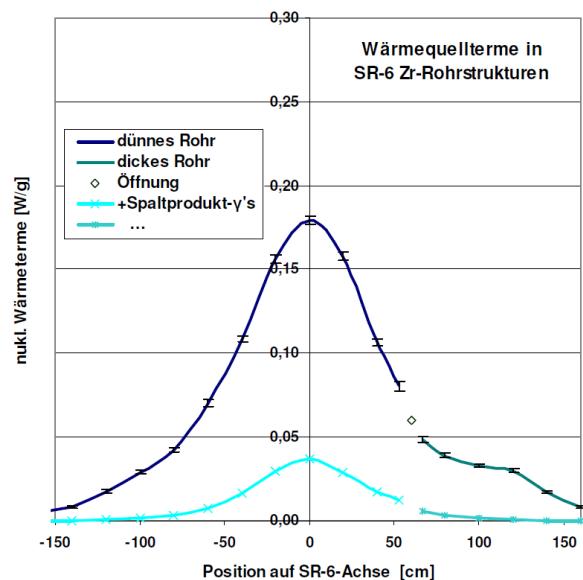


Abbildung A.3: Wärmequellterme im Strahlrohr 6. Der Knick Richtung A-Seite ergibt sich durch die Aufweitung des Rohres. Entnommen aus [16].

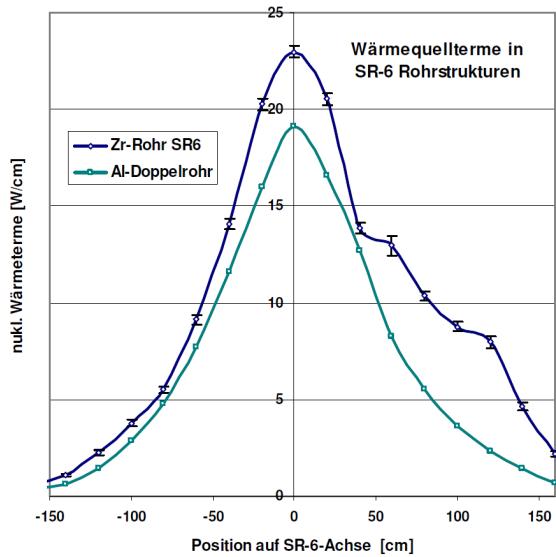


Abbildung A.4: Zusammenfassung der Wärmequellen für das komplette Doppelrohr und das Strahlrohr. Entnommen aus [16].

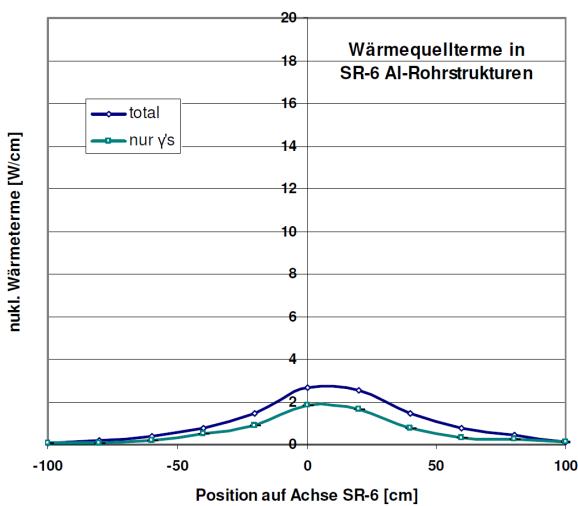


Abbildung A.5: Zusätzliche Heizleistung im Doppelrohr durch Urantargets im Fingerhutrohr *HFRP*. Entnommen aus [16].

Anhang B

Quellcode zur analytischen Berechnung

```
1 import math
2
3 helium = (0,1,0,1,0)      # Gibt an, welche Schichten Helium sind (von
   aussen nach innen)
4 r_a = (85.5e-03,81.5e-03,71.65e-03,67.25e-03,64.0e-03) # Aussenradien
   der Schichten in m
5 r_i = (81.5e-03,71.65e-03,67.25e-03,64.0e-03,60.0e-03) # Innenradien
   der Schichten in m
6 lamb = (21.5,0,185,0,185) # Wärmeleitfähigkeiten der Schichten in W/(m
   K), die Werte für Helium (0) sind nicht relevant
7
8
9 range = (-2.430, 5e-3, 2.430) # Startpunkt, Schrittweite, Endpunkt
   entlang der z-Achse in m
10 T0 = 300 # Temperatur des Beckenwassers in K
11 dr = 0.0001 # Radiale Schrittweite der Temperaturberechnung im Helium in
   m
12
13 def fit(z):
   # Berechnet den Wert des erstellten Fits bei z (m) in W/m
14   return 749/((1.3*z-0.038)**2+0.59**2)
15
16 def PDR(z):
   # Berechnet die Heizleistung in einem Abschnitt des Doppelrohrs in
   W
17   return range[1]*fit(z)
18
19 def PSR(z):
   # Berechnet die Heizleistung in einem Abschnitt des Strahlrohrs in
   W
20   return 1.23*range[1]*fit(z)
21
22 def T_i(r_a,r_i,lamb,P_in,q_in,T_a):
   # Berechnet die Temperatur an der Innenseite einer Schicht in K
23   return (0.5*P_in + (P_in/(r_a**2/r_i**2-1)-q_in)*math.log(r_i/r_a))
24   / (2*math.pi*range[1]*lamb) + T_a
25
26 def lamb_He(Ta):
```

```

# Berechnet die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Helium
# in W/(m K)
31 C_He = (3.400e-02, 4.566e-04, -2.149e-07, 1.0071e-10, 1.914e-14)
    return C_He[0]+C_He[1]*Ta+C_He[2]*(Ta**2)+C_He[3]*(Ta**3)+C_He[4]*(Ta**4)

33 def calc():
35     # Führt alle Berechnungen durch
36     print 'Calculating...'
37     T = [] # Fasst die Ergebnisse der axialen Abschnitte zusammen

39     # Berechne für jeden axialen Abschnitt des System
40     z = range[0]
41     while z <= range[2]:
42         x = 1/(1+(r_a[2]**2 - r_i[2]**2)/(r_a[4]**2 - r_i[4]**2)) # Volumenverhältnis DRi/DRa
43         P_DRi = x*PDR(z) # Heizleistung im Innenrohr
44         P_DRa = (1-x)*PDR(z) # Heizleistung im Außenrohr
45         P_SR = PSR(z) # Heizleistung im Strahlrohr

46         P_in = (P_SR, 0, P_DRa, 0, P_DRi) # Heizleistung in den Schichten
47         q_in = (P_DRa + P_DRi, P_DRa + P_DRi, P_DRi, P_DRi, 0) # Eingehende Wärmeströme in den Schichten

48         Ta = [T0] # Fasst die Ergebnisse der Schichten zusammen
49

50         # Laufe durch die radialen Schichten
51         for y in xrange(len(helium)):
52             # Wenn die Schicht Helium ist ...
53             if helium[y] == 1:
54                 Tn = Ta[y]
55                 r = r_a[y]

56                 # ... berechne Temperatur im oben angegebenen radialen
57                 # Abstand
58
59                 while r >= r_i[y]:
60                     Tn = T_i(r, r-dr, lamb_He(Tn), P_in[y], q_in[y], Tn)
61                     r -= dr

62                     Ta.append(Tn) # Nur die letzte Temperatur an der
63                     # Innenseite wird gespeichert
64                     else:
65                         Ta.append(T_i(r_a[y], r_i[y], lamb[y], P_in[y], q_in[y], Ta
66                         [y])) # Berechne Temperatur an der Innenseite der aktuellen
67                         # Schicht
68                         T.append(Ta)
69                         z += range[1]
70             return T

71 def safe(T):

```

```

# Speichert die Temperatur-Matrix spaltenweise: z = T_SR_Aussen - 
73   T_SR_Innen - T_DRa_Aussen - T_DRa_Innen - DRi_Aussen - DRi_Innen
    print 'Saving...'
    name = 'Sz0_1d.txt' # Dateiname der Ausgabedatei 'Sz0_1d.txt'
75
75   with open(name, 'w') as f:
77     # Durchlaufen der z-Achse
77     for x in xrange(len(T)):
79       row = '%.3f\t' % (range[0] + x*range[1])      # z in der
ersten Spalte
81
81     # Danach die Temperaturen der Schichten
81     for y in xrange(len(T[x])-1):
83       row += '%.2f\t' % T[x][y]
85
85     row += '%.2f' % T[x][len(T[x])-1]
87     f.write(row + '\n')
87
89   print 'Done!'
90
90 def main():
91   result = calc()
91   safe(result)
93
93 if __name__ == "__main__":
95   main()

```


Literaturverzeichnis

- [1] BERNINGER, J. et al.: Review of Particle Physics. In: *Phys. Rev. D* **86**, 010001 (2012)
- [2] FRM II: *UCN Quelle*. <http://www.mlz-garching.de/instrumente/teilchenphysik/ucn.html>. – [Online; abgerufen am 22.07.2014]
- [3] STOCK, R.: *Encyclopedia of Nuclear Physics and its Applications*. Wiley-VCH, 2013. – ISBN 3527407421
- [4] GOLUB, R. ; RICHARDSON, D. J. ; LAMOREAUX, S. K.: *Ultra-Cold Neutrons*. Adam Hilger, 1991. – ISBN 0750301155
- [5] FERMI, E.: Motion of neutrons in hydrogenous substances. In: *Ricerca Scientifica* **7**, 13 (1936)
- [6] GOLUB, R. ; PENDLEBURY, J. M.: Super-Thermal Sources of Ultra-Cold Neutrons. In: *Phys. Lett. A* **53**, 133 (1975)
- [7] SILVERA, I. F.: The solid molecular hydrogens in the condensed phase: Fundamentals and static properties. In: *Rev. Mod. Phys.* **52**, 393 (1980)
- [8] YU, Z-Ch. et al.: A Thin Film Source of Ultra-Cold Neutrons. In: *Z. Phys. B* **62**, 137 (1986)
- [9] FREI, A. et al.: Understanding of ultra-cold-neutron production in solid deuterium. In: *Europhys. Lett.* **92**, 62001 (2010)
- [10] GOLUB, R. ; BÖNING, K.: New Type of Low Temperature Source of Ultra-Cold Neutrons and Production of Continous Beams of UCN. In: *Z. Phys. B* **51**, 95 (1983)
- [11] LIU, C.-Y. et al.: Ultracold neutron upscattering rates in a molecular deuterium crystal. In: *Phys. Rev. B* **62**, R3581 (2000)
- [12] FRM II: *Die Neutronenquelle - Technik*. <http://www.frm2.tum.de/technik/>. – [Online; abgerufen am 12.07.2014]
- [13] FRM II: *Schematischer Aufbau des FRM II*. <http://cdn.frm2.tum.de/temp/pics/2146142557.jpg>. – [Online; abgerufen am 01.05.2014]

- [14] FRM II: *Schnittansicht UCN-Quelle*. http://www.mlz-garching.de/files/ucn_fig_ganz.jpg. – [Online; abgerufen am 13.07.2014]
- [15] LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY: Table of Isotopes decay data, Al28. <http://ie.lbl.gov/toi/nuclide.asp?iZA=130028>. – [Online; abgerufen am 11.07.2014]
- [16] RÖHRMOSER, A.: *Ultrakalte n-Quelle (UCN) im Strahlrohr SR-6 des FRM II: Verschiedene Studien zu Flussverhältnissen im Reaktor und nuklearer Wärmedeposition*. 2010
- [17] ATI METALS: *Technical Data Sheet, Zircaloy-4*. <https://www.atimetals.com/businesses/atispesialtyalloysandcomponents/products/Document%20Zr%20nuke%20waste%20disposal.pdf>. Version: 2013. – [Online; abgerufen am 11.07.2014]
- [18] SCHWARZWÄLDER METALLHANDEL GMBH: *Werkstoffdatenblatt, EN AW-6061*. http://www.smh-metalle.de/internet/media/smh/pdf/datenblatt/datenblatt_en_aw_6061.pdf. Version: 2013. – [Online; abgerufen am 11.07.2014]
- [19] VDI E.V.: *VDI-Wärmeatlas*. Springer Vieweg, 2013. – ISBN 3642199801
- [20] JENSEN, J. E. et al.: Selected Cryogenic Data Notebook. In: *BNL 10200-R* (1980)
- [21] CARS LAW, H. S. ; JAEGER, J. C.: *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, 1986. – ISBN 0198533683
- [22] HUC, N.: *COMSOL Blog: Conjugate Heat Transfer*. <http://www.comsol.com/blogs/conjugate-heat-transfer/>. Version: 2014. – [Online; abgerufen am 11.07.2014]
- [23] FRM II: *Systembeschreibung JFA10*. Oktober 2004
- [24] MESCHEDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – ISBN 3642128939
- [25] COMSOL: *Heat Transfer Module - User's Guide*. 2013
- [26] COMMITTEE ON THE SAFETY OF NUCLEAR INSTALLATIONS: *Gap Conductance in Zircaloy-Clad LWR Fuel Rods*. 1982. – [Online verfügbar: <http://www.ecd-nea.org/nsd/docs/1982/csni82-72.pdf>]
- [27] SCHILCHER, J.: *Berechnungen zum Druckabfall im Doppelrohr JBU12*. Juni 2014. – private communication

- [28] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE: *Werkstoffdatenblatt, Edelstahl 1.4571.* http://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4571_de.pdf. Version: 2008.
– [Online; abgerufen am 11.07.2014]