

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6687

**Auslegung eines geschlossenen 4 MW-Targetmoduls
mit Wärmeabfuhrsystem für eine ADS-Anordnung**

H.-J. Neitzel, J.U. Knebel

Institut für Kern- und Energietechnik
Programm Nukleare Sicherheitsforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
2002

Impressum der Print-Ausgabe:

**Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor**

**Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe**

**Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)**

ISSN 0947-8620

Design of a closed 4 MW spallation target module with heat removal system for an ADS system

Abstract

At the Forschungszentrum Karlsruhe the HGF Strategy Fund Project entitled "Innovative Technology to Reduce Radiotoxicity" is performed which delivers an essential scientific contribution to the application oriented fundamental research for Accelerator Driven Systems (ADS). The addressed topics are in the areas of heavy liquid metal technology, thermalhydraulics and materials / corrosion.

An ADS consists of three main components: an proton accelerator, a spallation target and a subcritical blanket.

The strategic objective of an ADS is the transmutation of long-lived radioactive waste (plutonium, minor actinides and long-lived fission products) into short-lived isotopes or stable elements, thus closing the fuel cycle.

The objective of one task of the HGF Strategy Fund Project is the numerical calculation of a closed spallation target module. In a consequent next step such a spallation target can be experimentally investigated at IKET and the numerical results can be validated.

In this report the geometry of the Integral Experiment K4T (Karlsruhe 4 MW Target) of a closed 4 MW(th) spallation target is developed which uses lead-bismuth as spallation material and as coolant. The heat shall be removed in a fully passive way to the environment by coupled natural circulation loops for all operational conditions (normal operation and decay heat removal). The Integral Experiment K4T simulates the geometrically scaled 1:1, identical geometry in comparison to a prototype. The components of the investigated loop system are:

- Spallation area and beam window,
- Primary-secondary heat exchanger,
- Secondary-tertiary heat exchanger,
- Chimney.

The Integral Experiment K4T will be integrated in the KARlsruhe Lead Laboratory KALLA.

The most important design parameters of the Integral Experiment K4T are:

- Heat to be removed,
- Temperatures,
- Mass fluxes,
- Pressure drops,
- Heat transfer characteristics of primary-secondary heat exchanger (WT12),
- Heat transfer characteristics of secondary-tertiary heat exchanger (WT23),
- Driving geodesic height for pure natural circulation flow.

Auslegung eines geschlossenen 4 MW-Targetmoduls mit Wärmeabfuhrsystem für eine ADS-Anordnung

Kurzfassung

Am Forschungszentrum Karlsruhe wird das HGF-Strategiefonds-Projekt 99/16 mit dem Kurztitel „Innovative Technologie zur Reduzierung der Radiotoxizität“ durchgeführt, das einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag zur anwendungsorientierten Grundlagenforschung für Beschleuniger getriebene Anlagenanordnungen ADS (Accelerator Driven System) leistet. Die bearbeiteten Themen sind den Bereichen Technologie schwerer Flüssigmetalle, Thermohydraulik und Materialien / Korrosion zuzuordnen.

Eine ADS-Anordnung besteht aus drei Hauptkomponenten: einem Beschleuniger für Protonen, einem Spallationstarget und einem unterkritischen Blanket.

Die strategische Zielsetzung einer ADS-Anordnung ist die Transmutation von langlebigem radioaktivem Abfall (Plutonium, minore Aktiniden und langlebige Spaltprodukte) zu kurzlebigen Isotopen oder stabilen Elementen und somit die Schließung des Brennstoffkreislaufs.

Eine Teilaufgabe des HGF-Strategiefonds-Projekts sieht die numerische Vorausberechnung eines geschlossenen Targetmoduls vor. Als konsequenter weiterer Schritt können dann am IKET ein solches Targetmodul experimentell untersucht und somit die numerischen Ergebnisse validiert werden.

In diesem Bericht wird die Geometrie des Integralexperiments K4T (Karlsruher 4 MW Target) zu einem geschlossenen 4 MW_{th} Spallationstarget entwickelt, das Blei-Wismut als Spallationsmaterial und als Kühlmittel verwendet. Die Wärme soll für alle Anlagenzustände (Normalbetrieb und Nachwärmeabfuhrbetrieb) vollständig passiv durch gekoppelte Naturkonvektionskreisläufe an die Umgebung abgeführt werden. Das Integralexperiment K4T untersucht eine im Maßstab 1:1 geometrisch identische Geometrie im Vergleich zum Prototyp. Die einzelnen Komponenten des hier betrachteten Kreislaufsystems sind:

- Spallationsbereich und Strahlfenster,
- Primär-Sekundär-Wärmetauscher,
- Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher,
- Kamin.

Das Integralexperiment K4T wird in das Flüssigmetalllabor KALLA (KARlsruhe Lead Laboratory) integriert.

Die wichtigsten Auslegungsgrößen des Integralexperiments K4T sind:

- Abzuführende Leistung,
- Temperaturen,
- Massenströme,
- Druckverluste,
- Wärmedurchgang beim Primär-Sekundär-Wärmetauscher (WT12),
- Wärmedurchgang beim Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher (WT23),
- Treibende geodätische Höhen für reinen Naturkonvektions-Antrieb.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1. Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung	3
1.3 KARlsruhe Lead LAaboratory KALLA	4
2. Betrachtetes Kreislaufsystem	6
3. Auslegungsrechnung	12
3.1 Gegebene Größen	12
3.1.1 Abzuführende Leistung	12
3.1.2 Geometrische Größen	12
3.2 Gesuchte Größen	13
3.3 Berechnete Grundgrößen	13
3.3.1 Ring-Tauchkühler (TK) WT12	13
3.3.2 Luftkühler (LK) WT23	14
3.4 Auslegungsfälle	15
3.5 Ergebnisse der Auslegungsrechnungen	15
3.5.1 Hauptdaten	16
3.5.2 Strömungsdaten	17
3.5.3 Wärmeübergangsdaten für Primär-Sekundär-Wärmetauscher	18
3.5.4 Wärmeübergangsdaten für Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher	19
4. Zusammenfassung der Auslegungsrechnung für das Integralexperiment K4T	20
4.1. Kreislaufsystem	20
4.2 Abzuführende Leistung	20
4.3 Maximale Temperaturen, über den Querschnitt gemittelt	20
4.4 Geometrie der Steig- und Fall-Leitungen	21
4.5 Treibende geodätische Höhen für reinen Naturkonvektions-Antrieb	21
4.6 Geometrie des Primär-Sekundär-Wärmetauschers (WT12)	21
4.7 Geometrie des Sekundär-Tertiär-Wärmetauschers (WT23):	22
4.8 Geometrie des Kamins	22
4.9 Integration in das Flüssigmetalllabor KALLA	23
5. Schlussbetrachtung	26
6. Literatur	27
A. Anhang	30
A.1 Berechnungsgrundlagen	30
A.1.1 Enthalpiebilanz	30
A.1.2 Wärmedurchgang bei den Wärmetauschern	30
A. 1.3 Korrelationen für den Wärmeübergang	31
A. 1.4 Wärmeübergang bei Strömung quer durch Rohrreihen	32
A. 1.5 Druckabfälle	33
A.2 Stoffdaten	37

1. Einleitung

1.1 Motivation

Eine ADS-Anordnung (Accelerator Driven System) besteht aus drei Hauptkomponenten: einem Beschleuniger (Linearbeschleuniger oder Zyklotron) für Protonen, einem Spallationstarget, in welchem die Protonen beim Auftreffen auf ein schweres Element in einer Spallationsreaktion freie Neutronen erzeugen (externe Neutronenquelle), und einem unterkritischen Blanket. In dem unterkritischen Blanket, das dem Kern eines konventionellen Reaktors ähnlich ist, führen die externen Neutronen, die aus dem Spallationstarget kommen, zu Spaltungsreaktionen, so dass thermische Energie und in einer nicht-selbsterhaltenden Kettenreaktion zusätzliche Neutronen (interne Neutronenquelle) freigesetzt werden. Diese internen Neutronen führen zusätzlich zu den gewünschten Transmutationsreaktionen, das heisst der Umwandlung von Minoren Aktiniden und langlebigen Spaltprodukten in kurzlebige oder stabile Elemente, Bowman et al. (1992). Die Protonen werden durch ein evakuiertes Strahlrohr, das im Allgemeinen am Ende durch ein Strahlfenster abgeschlossen ist, in das Spallationstarget eingebracht. Das Spallationstarget besteht aus einem schweren Flüssigmetall, zum Beispiel Blei oder eutektisches Blei-Wismut. Die im Spallationstarget erzeugten Spallationsneutronen sind unabhängig vom unterkritischen Blanket. Eine Unterbrechung des Protonenstrahls führt zu einer Unterbrechung der Spaltungsreaktion im Blanket. Das Sicherheitsverhalten eines ADS ist zum Beispiel in Maschek et al. (2001a, 2001b) diskutiert. Eine schematische Darstellung einer ADS-Anordnung gibt Abb. 1.

Die strategische Zielsetzung einer ADS-Anordnung ist die Transmutation von langlebigem radioaktivem Abfall und somit die Schließung des Brennstoffkreislaufs (Heusener und Salvatores (1998), Carminati et al. (1993), Rubbia et al. (1995), Takizuka et al. (1998)). Der in einer ADS-Anordnung verwertbare radioaktive Abfall unterteilt sich in zwei Gruppen: Die minoren Aktiniden wie zum Beispiel Neptunium, Americium und Curium und einige langlebige Spaltprodukte wie zum Beispiel Technetium 99 und Jod 129.

Der Einsatz von ADS-Anordnungen verringert die Menge und die Radiotoxizität an radioaktivem Abfall, der in ein Endlager eingebracht werden muss.

Die strategischen Arbeiten im Bereich Transmutation werden von der Evaluierungskommission des BMWi als vordringliche Aufgabe bezeichnet. Die Evaluierungskommission hält es für erforderlich, Grundlagenuntersuchungen zu den physikalischen und technischen Bedingungen einer technologischen Umsetzung der Transmutation durchzuführen, Sandtner et al. (2000).

Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Europa wird von der Industrie und den Forschungseinrichtungen, zum Beispiel Ansaldo Nucleare Inc. und Enlarged Technical Working Group (TWG), die Errichtung einer experimentellen Demonstrationsanlage diskutiert (Ansaldo (2001), Enlarged Technical Working Group (2001)).

Die Europäische Kommission sieht Partitioning & Transmutation (P&T) als erfolgversprechende Technologie zur maßgeblichen Reduzierung der Menge und der Langzeitradiotoxizität von hochradioaktivem Abfall an, European Commission (2001). Im Rahmen des Euratom 5th EU Framework Programme werden in erheblichem Umfang Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu P&T gefördert, Euratom (2001).

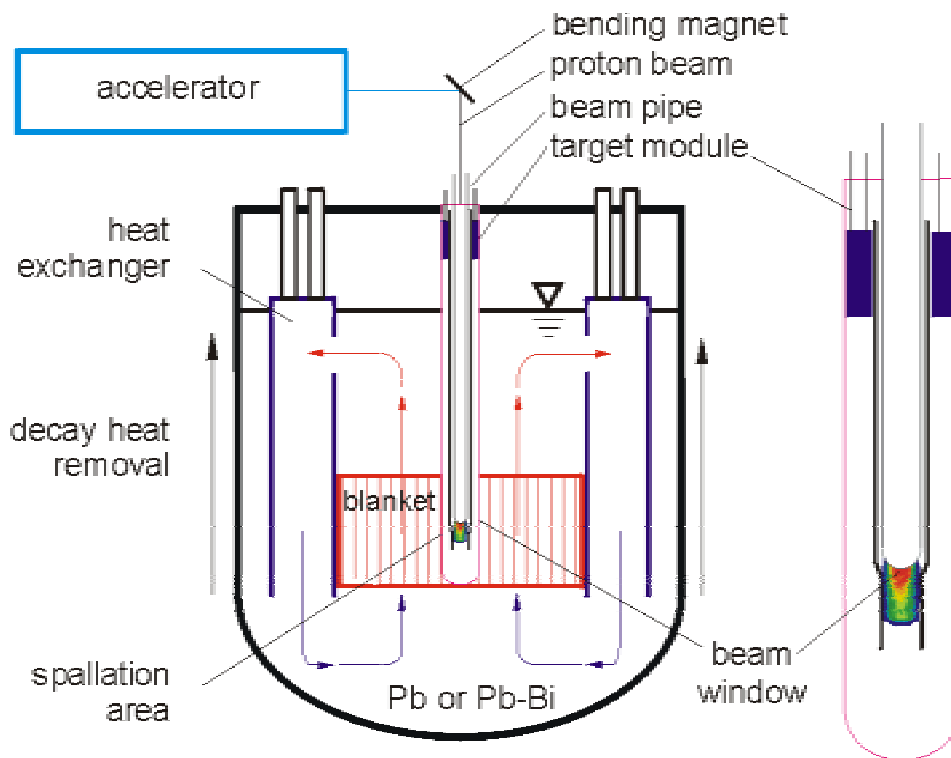


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer ADS-Anordnung.

Die strategische Aufgabe der experimentellen Demonstrationsanlage ist der Nachweis der Kopplung von Beschleuniger, Spallationstarget und unterkritischem Blanket zum Zweck der Transmutation von Aktiniden und langlebigen Spaltprodukten.

Darüber hinaus ist die Bereitstellung von Daten im Bereich der Nuklearphysik, der Reaktortechnik und der Energietechnologie von Bedeutung. Im Bereich der Nuklearphysik müssen zum Beispiel umfangreichere und genauere Daten von Wirkungsquerschnitten von Kernen erarbeitet werden, um bestehende Bibliotheken zu vervollständigen und die Rechenmethoden zur Bestimmung der Wechselwirkung der sehr hochenergetischen Protonen und Neutronen mit den Target- und Blanketmaterialien experimentell abzusichern. Im Bereich der Energietechnik werden detaillierte und auf schwere Flüssigmetalle angepasste Erkenntnisse zur Thermohydraulik (Experiment, Modellentwicklung und Numerik) des Strahlfensters, des Spallationstargets und des Primärkreislaufs sowie zu Korrosionsmechanismen und zum Langzeitverhalten von Werkstoffen für das Strahlfenster, das Targetmodul und das Primärsystem unter Betriebsbedingungen benötigt. Weiter müssen Methoden entwickelt werden, um Verunreinigungen, die durch Protonen- und Neutronen-induzierte Kernreaktionen verursacht werden, zu messen und aus den Kühlkreisläufen zu entfernen.

Das am Forschungszentrum Karlsruhe bearbeitete HGF-Strategiefonds-Projekt 99/16 mit dem Kurztitel „Innovative Technologie zur Reduzierung der Radiotoxizität“ leistet einen wesentlichen, wissenschaftlichen Beitrag zur anwendungsorientierten Grundlagenforschung im oben angesprochenen Bereich der Energietechnik für eine ADS-Anordnung. Die Ergebnisse der Jahre 1999 und 2000 sind in Knebel et al. (2000, 2001) zusammengefasst.

1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung

Einige der wichtigsten noch offenen Untersuchungsschwerpunkte für eine ADS-Anordnung und somit für eine experimentelle Demonstrationsanlage sind:

- Auswahl und Auslegung des Beschleunigers,
- Auslegung des unterkritischen Blankets, Wahl des Kühlmittels,
- Auslegung des Spallationstargets, Wahl des Spallationsmaterials und des Kühlmittels,
- Auswahl und Auslegung des Strahlfensters,
- Auswahl der Struktur- und Fenstermaterialien,
- Korrosionsschutz und Korrosionsbeständigkeit der ausgewählten Materialien,
- Auslegung des Containments und Integration der Komponenten,
- Brennstoff und Brennstoffzyklus mit Wiederaufarbeitung,
- Funktionalität der Kombination von Beschleuniger, Spallationstarget und unterkritischem Blanket,
- Transmutationsraten für Minore Aktiniden und Langlebige Spaltprodukte,
- Sicherheitsuntersuchungen.

In diesem Bericht wird die Geometrie des Integralexperiments K4T (Karlsruher 4 MW Target) eines geschlossenen 4 MW_{th} Spallationstargets entwickelt (Kapitel 2), das Blei-Wismut als Spallationsmaterial und als Kühlmittel verwendet. Ein solches Spallationstarget kann für das von Cheng, Knebel und Hofmann (1999) diskutierte FZK-Dreistrahl-Konzept eines ADS oder eine experimentelle Demonstrationsanlage eingesetzt werden. Die Geometrie orientiert sich an den Vorschlägen von Carminati et al. (1993), Rubbia et al. (1995) und Buono et al. (1996). Das FZK Dreistrahl-Konzept basiert auf neutronenphysikalischen Überlegungen von Broeders (1997, 1998).

Die Auslegung der einzelnen Komponenten bezüglich Temperaturen, Strömungsquerschnitten, treibende Höhendifferenzen, Druckverluste erfolgt über ingenieurmäßige Ansätze (Kapitel 3 und Anhang A.1).

In Kapitel 4 erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Auslegungsgrößen des Integralexperiments K4T.

Im Integralexperiment K4T wird eine im Maßstab 1:1 geometrisch identische Geometrie im Vergleich zum Prototyp untersucht (Kapitel 4.9). Es wird angestrebt, den Leistungseintrag im Spallationsbereich über Wendel-Hochleistungsheizer identisch wiederzugeben. Die im Strahlfenster eingebrachte Heizleistung wird entsprechend dem technisch Machbaren skaliert simuliert. Es ist beabsichtigt, die Leistung über einen CO₂-Laser oder Wendel-Hochleistungsheizer in das Strahlfenster einzubringen. Der für die Wärmeabfuhr notwendige Sekundärkreislauf (Fluid Blei-Wismut oder Wärmeträgeröl Diphyl THT) und der Tertiärkreislauf werden identisch nachgebildet. Die Wärme soll für alle Anlagenzustände (Normalbetrieb, Transienten und Nachwärmeabfuhrbetrieb) vollständig passiv durch gekoppelte Naturkonvektionskreisläufe an die Umgebung abgeführt werden. Es werden die Grenzen für eine Wärmeabfuhr allein durch Naturkonvektion aufgezeigt.

Die primären Untersuchungsziele des Integralexperiments K4T sind:

- Nachweis der Wärmeabfuhr aus dem Spallationsbereich und dem Strahlfenster durch Naturkonvektion,
- Stationäre und instationäre Charakteristiken des Wärmetransports in den gekoppelten Kreislaufsystemen unter Naturkonvektion und deren Grenzen,
- Sauerstoffkontrolle zur Beherrschung der Korrosion,
- Korrosionsverhalten von Struktur- und Fenstermaterialien,
- Erstellung einer Datenbasis zur Validierung von physikalischen Modellen und CFD-Programmen,
- Simulation der Strömungsphänomene mit CFD-Programmen.

1.3 Karlsruhe Lead Laboratory KALLA

Das Integrationsexperiment K4T wird in das Flüssigmetalllabor KALLA (KARlsruhe Lead LABORatory) integriert, das am Forschungszentrum Karlsruhe betrieben wird. Eine schematische Darstellung von KALLA geben Abb. 2 und 7. Technische Einzelheiten zu KALLA sind in Knebel et al. (2002) gegeben. In KALLA werden grundlegende Untersuchungen zur Blei-Wismut Technologie, zur Thermohydraulik und zu Material / Korrosion durchgeführt. KALLA umfasst bisher drei Experimente, die mit stagnierendem Blei-Wismut arbeiten, und drei Kreislaufexperimente.

- Stagnierende Experimente:
 - COSTA 1 bis 9 (COrrusion test stand for STagnant liquid lead Alloys)
Zielsetzung: Grundlegende Untersuchung von Korrosionsmechanismen an Stählen unter Berücksichtigung des Einflusses von Sauerstoffkonzentration, Vergütung der Oberfläche einschließlich Legierungsbildung und Coatings.
 - KOSIMA 1 to 6 (KARlsruhe Oxygen Sensor In Molten Alloys)
Zielsetzung: Entwicklung und Kalibrierung von Sauerstoffsonden mit Optimierung der Sonden hinsichtlich Referenzsystem, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, Langzeitstabilität.
 - KOCOS (Kinetics of Oxygen COntrol Systems).
Zielsetzung: Entwicklung eines selbstregelnden Sauerstoffkontrollsystems (OCS).
- Kreislaufexperimente:
 - THESYS (Technologies for HEavy metal SYStems)
Zielsetzung: Messung und Kontrolle des Sauerstoffpotentials in strömendem Pb-Bi; Entwicklung und Erprobung von Strömungsmesstechniken; Entwicklung und Erprobung von Hochleistungs-Wendelheizern; Durchführung von Wärmeübergangs- und Turbulenzmessungen.
 - THEADES (THErmalhydraulics and Ads DESign)
Zielsetzung: Einzeleffektuntersuchungen an einem Strahlfenster, fensterlosen Target, Brennelement(en), Wärmetauscher und Dampferzeuger.

- **CORRIDA** (**CORR**osion **I**n **D**ynamic **l**ead **A**lloys)
 Zielsetzung: Untersuchungen zur Korrosion und zu Schutzschichten an ausgewählten Stählen; (weiteres Potential des Kreislaufs: mechanische Tests an ausgewählten Stählen).
- **K4T (Planung)** (**K**arlsruhe **4** MW **T**arget experiment)
 Zielsetzung: Untersuchungen der Wärmeabfuhr / Nachwärmeabfuhr aus einem Spallationstarget.

Das Flüssigmetalllabor KALLA ist offen für Experimente zu Strömungsmesstechniken, ADS-relevante Testeinsätze und die Untersuchung von Materialproben anderer Forschungseinrichtungen oder der Industrie. So wird zum Beispiel von SCK/CEN Belgien im Rahmen des MYRRHA Projektes ein fensterloses Flüssigmetalltarget mit freier Oberfläche in KALLA untersucht werden, Tichelen et al. (2001). Ebenso werden die thermohydraulischen Untersuchungen zum Pilot-Spallationstarget MEGAPIE in KALLA durchgeführt, Bauer et al. (1999), Knebel et al. (2001).

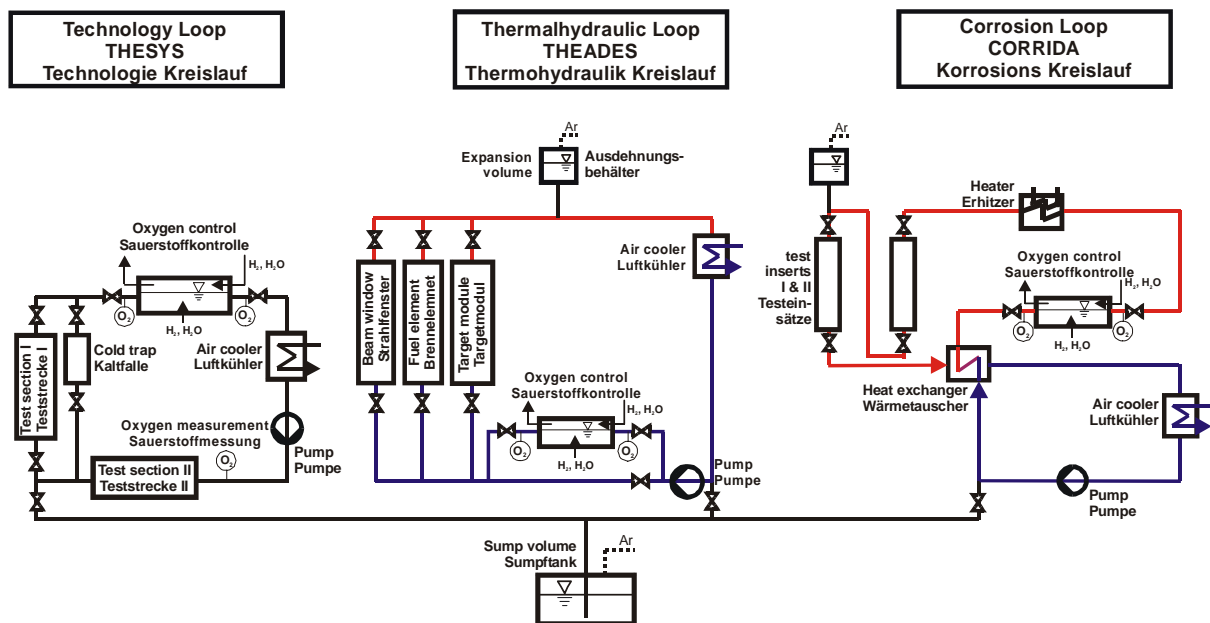


Abbildung 2: Flüssigmetall-Labor KALLA (KARlsruhe Lead LABORatory),
 Schema der Kreislauf-Experimente in Gebäude 415.
 Die stagnierenden Experimente COSTA (bei IHM), KOSIMA (bei IMF III) und
 KOCOS (bei IKET) sind hier nicht dargestellt.

2. Betrachtetes Kreislaufsystem

Zur Wärmeabfuhr aus dem geschlossenen Spallationstarget (oder Targetmodul) wird ein System aus drei gekoppelten Kreisläufen betrachtet, das schematisch in Abb. 3 gegeben ist.

Der Primärkreislauf besteht aus dem geschlossenen Targetmodul. Die Wärmequellen sind der Spallationsbereich und das Strahlfenster, die Wärmesenke ist ein Wärmetauscher zum Sekundärkreislauf. Im Sekundärkreislauf ist die Wärmesenke ein Luftkühler, der die Wärme in einem offenen Tertiärkreislauf über einen Kamin an die Umgebung abgibt.

Die relevanten Größen (Hauptdaten) sind in Abb. 3 eingetragen.

- Abzuführende Leistung: \dot{Q}
- Temperaturen:
 - Primärkreis kalter Strang (Eintritt Wärmequelle): T_{1k}
 - Primärkreis heißer Strang (Austritt Wärmequelle): T_{1h}
 - Sekundärkreis kalter Strang: T_{2k}
 - Sekundärkreis heißer Strang: T_{2h}
 - Tertiärkreis Luft Eintritt: T_{3k}
 - Tertiärkreis Luft Austritt: T_{3h}
- Druckverluste:
 - Primärkreis, gesamt: Δp_1
 - Sekundärkreis, gesamt: Δp_2
 - Tertiärkreis, gesamt: Δp_3
- Treibende Höhen:
 - Primärkreis: H_1
 - Sekundärkreis: H_2
 - Tertiärkreis: H_3

Die einzelnen Komponenten des hier betrachteten Kreislaufsystems

- Spallationsbereich und Strahlfenster
- Primär-Sekundär-Wärmetauscher
- Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher
- Kamin

sind in den Abb. 4, Abb. 5 und Abb. 6 mit den wichtigsten geometrischen Bezeichnungen schematisch dargestellt.

Der Primär-Sekundär-Wärmetauscher ist als Ringtauchkühler ausgeführt. Es handelt sich um einen Geradrohr-Gegenstrom-Wärmetauscher. Das Fluid des Primärkreises strömt in den Wärmetauscherrohren, der Zutritt des Fluids erfolgt von oben über einen horizontalen Ringverteiler. Das Fluid des Sekundärkreises strömt zwischen den Wärmetauscherrohren, der Zutritt des Fluids erfolgt seitlich und senkrecht zu den Rohren über Ringräume am unteren Ende der Wärmetauscherrohre, siehe Abb. 5.

Der Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher ist als Luftkühler ausgeführt. Das Medium des Sekundärkreises strömt in einen oberen Ringverteiler. Von diesem oberen Ringverteiler wird es in drei konzentrisch angeordnete Rohrreihen verteilt. Die Wärmetauscherrohre sind senkrecht angeordnet (siehe Abb. 6). Die Wärmetauscherrohre münden in einen unteren Ring, der als Sammler dient.

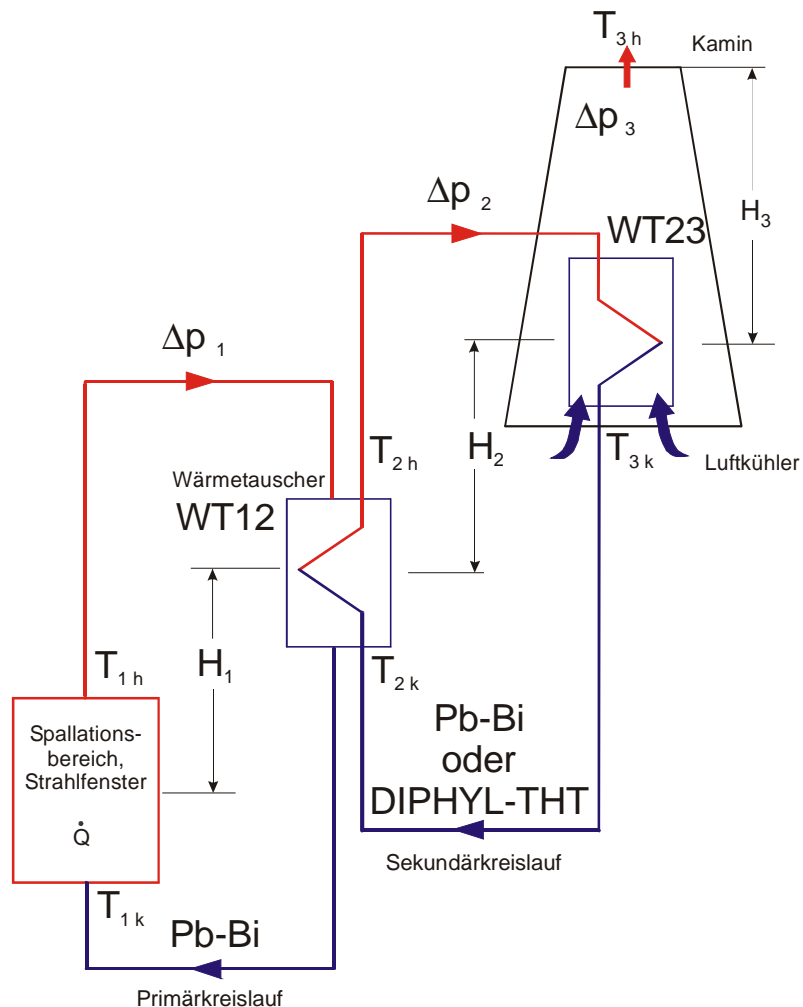


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Kreislaufsystems mit den wichtigsten Bezeichnungen und Hauptdaten.

In den folgenden Kapiteln werden geometrische, fluiddynamische und konstruktive Randbedingungen für ein geschlossenes 4 MW-Spallationstarget definiert. Basierend auf diesen Randbedingungen erfolgt eine thermohydraulische Auslegung des Spallationstargets und des Kreislaufsystems zur Wärmeabfuhr. Abschließend wird eine Geometrie vorgeschlagen, die in dem Integralexperiment K4T auf ihre thermohydraulische Machbarkeit und ihre dynamischen Charakteristiken hin untersucht werden kann.

Die Auslegungsrechnungen erfolgen mit dem eindimensionalen, stationären Rechenprogramm ADSCLS, das stationäre Zustände gekoppelter Kreislaufsysteme berechnen kann. Die Vorgehensweise ist wie folgt:

Grundsätzlich können aus den zwei Wärmeübergangsbeziehungen für die Wärmetauscher WT12 und WT23 sowie aus den drei Bilanzen für die Druckabfälle

der drei Kreisläufe fünf physikalische Größen bestimmt werden. Wählt man als unbekannte Größen die fünf charakteristischen Kreislauftemperaturen T_{1k} , T_{1h} , T_{2k} , T_{2h} und T_{3h} (die Eintrittstemperatur T_{3k} der Luft wird vorgegeben), so müssten für die Berechnung die Geometriegrößen der Wärmetauscher sowie die für Naturkonvektion erforderlichen treibenden geodätischen Höhen H_1 , H_2 , H_3 vorgegeben werden. Die Lösung des Gleichungssystems würde die Verwendung aufwendiger geschachtelter Iterationsverfahren nötig machen.

Im Gegensatz zu dieser Vorgehensweise werden beim Rechenprogramm ADSCLS die Kreislauftemperaturen als gegeben betrachtet, so dass jetzt die Berechnung der Wärmeübergänge für die Wärmetauscher von der Berechnung der Druckabfälle und der erforderlichen geodätischen Höhen entkoppelt ist. Diese Vorgehensweise erfordert einfach zu handhabende Iterationsvorgänge. Die Notwendigkeit dieser Iterationen liegt in der Abhängigkeit der Nusselt-Korrelationen von der gesuchten Länge und der gesuchten Wandtemperatur der Wärmetauscherrohre sowie in der Abhängigkeit des Druckabfalls im Kamin des Tertiärkreises von der gesuchten treibenden geodätischen Höhe. Die letztlich gesuchten Größen bei diesem Verfahren sind die Längen der Wärmetauscherrohre für die beiden Wärmetauscher WT12 und WT23 sowie die geodätischen Höhendifferenzen jeweils zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, welche für den Naturkonvektionsbetrieb notwendig sind. Hierbei ist zu beachten, dass bei zu großen berechneten Höhendifferenzen der Gesamtdruckabfall ganz oder teilweise von einer Pumpe aufgebracht werden muss.

Bei dem Rechenprogramm ADSCLS ist es möglich, für die vorzugebenden Größen wie Kreislauftemperaturen, Durchmesser und Anordnung der Wärmetauscherrohre geschachtelte Variationen durchzuführen, so dass eine übersichtliche und schnelle Optimierung des Wärmeabfuhrsystems möglich ist.

Die einzelnen Berechnungsschritte sind:

- Einlesen der Daten für: Wärmeleistung, Kreislauftemperaturen, Geometrie (Durchmesser, Teilungen, Anordnungen),
- Berechnung der geometrischen Grundgrößen: Anzahl der WT-Rohre, Teilungsverhältnisse, Überströmlänge, hydraulische Durchmesser,
- Berechnung der mittleren Temperaturdifferenzen für den Wärmedurchgang der Gegenstromwärmetauscher,
- Berechnung der mittleren Fluidtemperaturen der Kreisläufe,
- Berechnung der Massenströme und Strömungsgeschwindigkeiten,
- Berechnung der Länge des Wärmetauschers WT12 mit Iteration über Länge und Wandtemperatur der Rohre,
- Berechnung der Länge des Wärmetauschers WT23 mit Iteration über Länge und Wandtemperatur der Rohre,
- Berechnung der Druckverluste im Primärkreis und der geodätischen Höhendifferenz für Naturkonvektion,
- Berechnung der Druckverluste im Sekundärkreis und der geodätischen Höhendifferenz für Naturkonvektion,
- Berechnung der Druckverluste im offenen Tertiärkreis und der geodätischen Höhendifferenz für Naturkonvektion mit Iteration über Kaminhöhe.

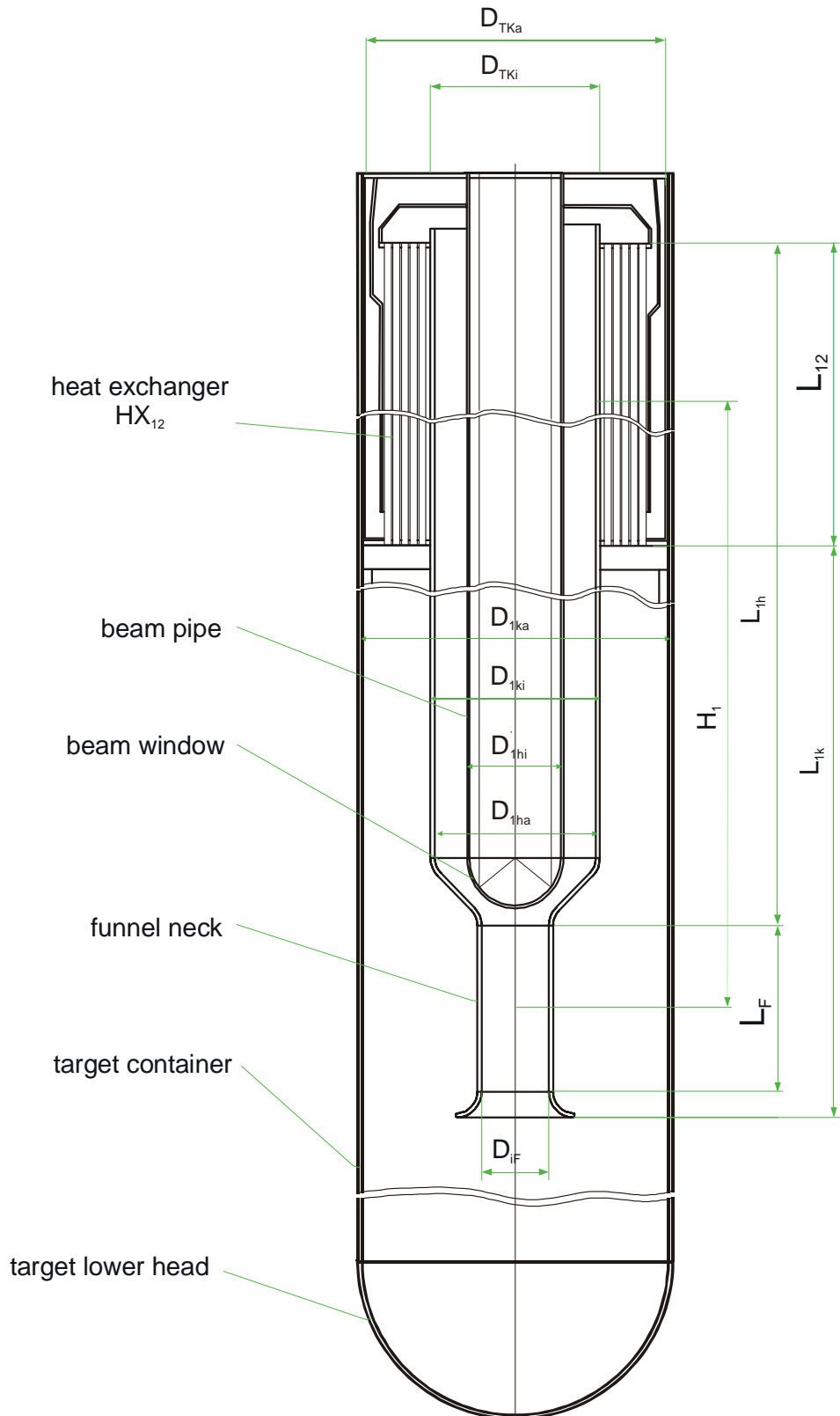


Abbildung 4: Schematische Darstellung des geschlossenen Spallationstargets mit Spallationsbereich, Strahlfenster und Primär-Sekundär-Wärmetauscher mit den wichtigsten Bezeichnungen.

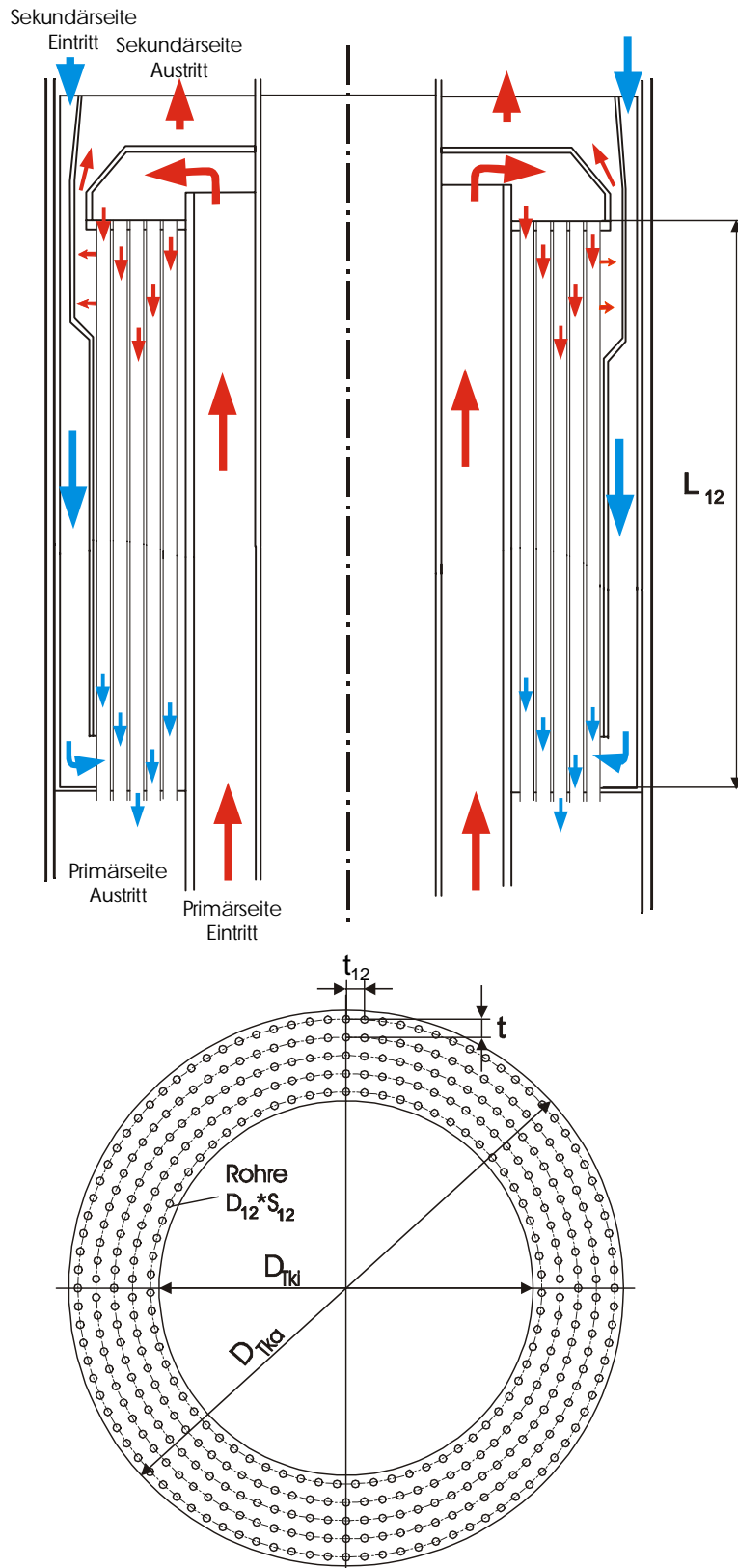


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Primär-Sekundär-Wärmetauschers, mit den wichtigsten Bezeichnungen.

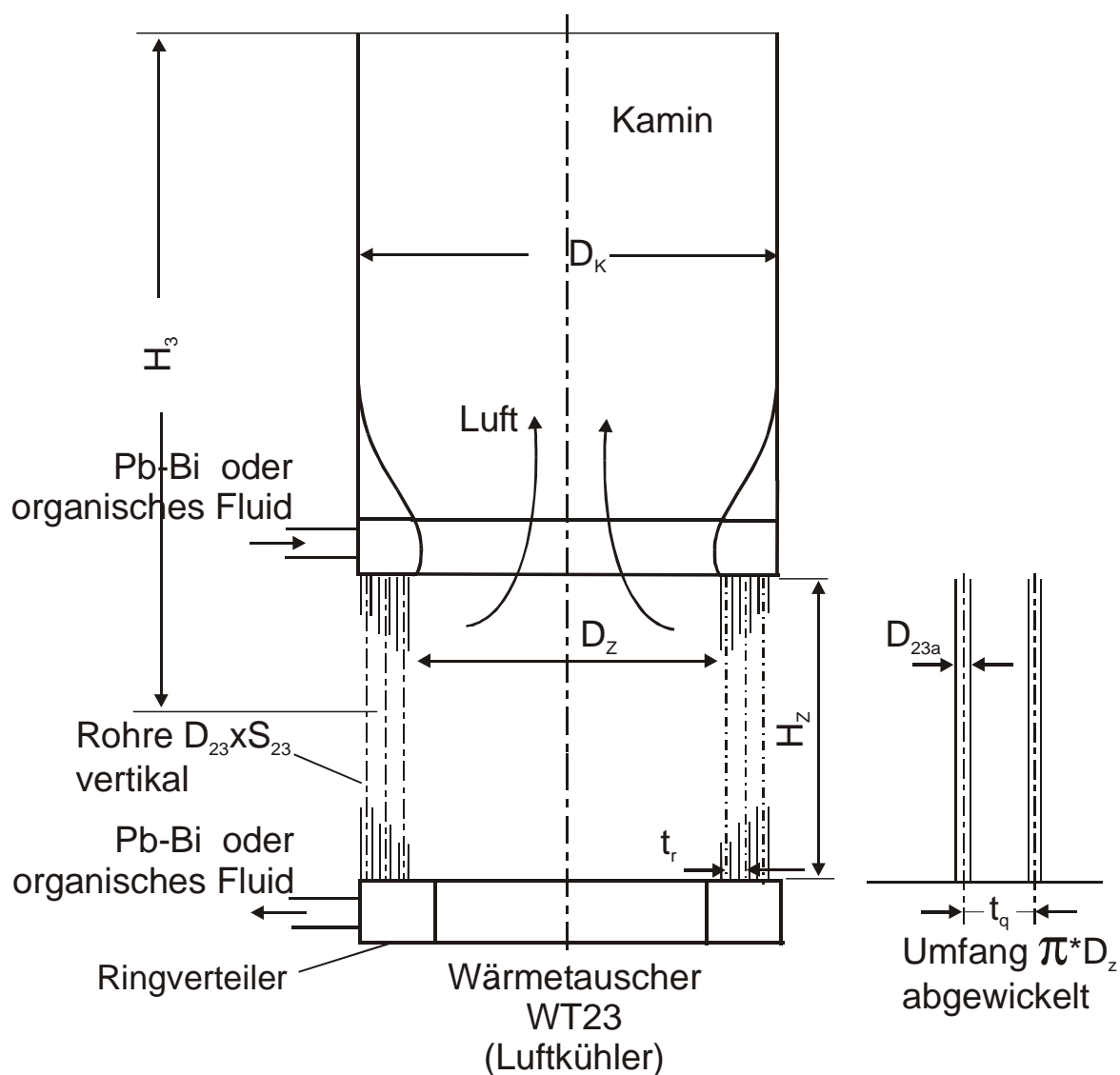


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Sekundär-Tertiär-Wärmetauschers und des Kamins mit den wichtigsten Bezeichnungen.

3. Auslegungsrechnung

3.1 Gegebene Größen

3.1.1 Abzuführende Leistung

Die aus dem Spallationsbereich und dem Strahlfenster abzuführende Heizleistung beträgt

$$\dot{Q} = 4 \text{ MW} .$$

3.1.2 Geometrische Größen

Der Primärkreis (geschlossenes Spallationstarget) besteht aus:

Führungsrohr im Spallationsbereich:

Innendurchmesser: $D_{iF} = 140 \text{ mm}$

Länge: $L_F = 400 \text{ mm}$

Steig-Leitung:

Ringquerschnitt, heisser Strang

Außendurchmesser: $D_{1ha} = 336 \text{ mm}$

Innendurchmesser: $D_{1hi} = 200 \text{ mm}$

Länge: $L_{1h} = 10 \text{ m}$

Fall-Leitung:

Ringquerschnitt, kalter Strang

Außendurchmesser: $D_{1ka} = 638.8 \text{ mm}$

Innendurchmesser: $D_{1ki} = 354 \text{ mm}$

Länge: $L_{1k} = 10 \text{ m}$

Primär-Sekundär-Wärmetauscher (WT12):

Typ: Ring-Tauchkühler (TK), im äußeren Ringquerschnitt des Primärkreises angeordnet, siehe Abb. 5

Ring-Durchmesser:

Außendurchmesser: $D_{TKa} = 550 \text{ mm}$

Innendurchmesser: $D_{TKi} = 370 \text{ mm}$

Wärmetauscher-Rohre:

Außendurchmesser: $D_{12a} = 15 \text{ mm}$ (nach Optimierung)

Wandstärke: $S_{12} = 2 \text{ mm}$

Wärmetauscher-Rohre sind auf Kreisen angeordnet.

Abstand der Kreise: $t_{12} = 18 \text{ mm}$

Bogenabstand der Rohre auf den Kreisen: ca. 18 mm

Abstand des innersten und äußersten Kreises von Ringquerschnitt-Wänden: 9 mm

Der Sekundärkreis besteht aus:

Steig-Leitung:

Kreisrohr, heißer Strang

Innendurchmesser: $D_{2h} = 250 \text{ mm}$

Länge: $L_{2h} = 15 \text{ m}$

Fall-Leitung:

Kreisrohr, kalter Strang

Innendurchmesser: $D_{2k} = 250 \text{ mm}$

Länge: $L_{2k} = 15 \text{ m}$

Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher (WT23):

Typ: Luftkühler (LK), siehe Abb. 6

Wärmetauscher-Rohre:

Außendurchmesser $D_{23a} = 13.5 \text{ mm}$ (nach Optimierung)

Wandstärke $S_{23} = 1.5 \text{ mm}$

Wärmetauscherrohre sind vertikal auf 3 Kreiszyklindern angeordnet.

Durchmesser des mittleren Kreiszyklinders: $D_z = 3 \text{ m}$

Abstand der Kreiszyklinder: $t_r = 17 \text{ mm}$ (nach Optimierung)

Querteilung: $t_q = 17 \text{ mm}$

Der Tertiärkreis besteht aus:

Kamin:

Typ: vertikaler Kreiskamin, siehe Abb. 6

Durchmesser: $D_K = 3.0 \text{ m}$

3.2 Gesuchte Größen

Primär-Sekundär-Wärmetauscher WT12:

Länge der Rohre: L_{12}

Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher WT23:

Länge der Rohre: L_{23}

Treibende geodätische Höhen für Naturkonvektion:

Primärkreis (Abstand Mitte Wärmequelle zu Mitte WT12): H_1

Sekundärkreis (Abstand Mitte WT12 zu Mitte WT23): H_2

Tertiärkreis (Höhe des Kamins über Mitte WT23): H_3

Druckabfälle in den drei Kreisläufen:

Primärkreis: Δp_1

Sekundärkreis: Δp_2

Tertiärkreis: Δp_3

3.3 Berechnete Grundgrößen

3.3.1 Ring-Tauchkühler (TK) WT12

Anzahl der Rohr-Kreise:

$$N_{RTK} = 0.5 (D_{TKa} - D_{TKi}) / t_{12}$$

$$N_{RTK} = 5$$

Durchmesser der Kreise mit Abstand $t_{12} = 18 \text{ mm}$:

$$d_{K1} = 388 \text{ mm}$$

$$d_{K2} = 424 \text{ mm}$$

$$d_{K3} = 460 \text{ mm}$$

$$d_{K4} = 496 \text{ mm}$$

$$d_{K5} = 532 \text{ mm}$$

Anzahl der Rohre auf den jeweiligen Kreisen mit Bogenabstand $t_{12} = 18 \text{ mm}$:

$n_K = \pi \cdot d_K / t_{12}$ und abgerundet:

$$n_{K1} = 67$$

$$n_{K2} = 74$$

$$n_{K3} = 80$$

$$n_{K4} = 86$$

$$n_{K5} = 92$$

Gesamtzahl der Rohre:

$$N_{gTK} = 399$$

3.3.2 Luftkühler (LK) WT23

Aus der Querteilung t_q und dem mittleren Zylinderdurchmesser D_Z ergibt sich die Anzahl N_{ZLK} der Rohre pro Zylinderkreis.

Da die Anzahl der Rohre ganzzahlig sein muss, muss die zunächst angenommene Teilung $t_q = 17 \text{ mm}$ korrigiert werden.

Aus der Beziehung

$$N_{ZLK} = \pi D_Z / t_q$$

ergeben sich:

Querteilung: $t_q = 17.01 \text{ mm}$

Anzahl der Rohre pro Zylinderkreis: $N_{ZLK} = 554$

Bei den angenommenen 3 Kreiszyklindern (3 Rohrreihen) ergibt sich die Gesamtzahl der WT-Rohre zu

$$N_{gLK} = 1662 .$$

Das Sekundärkühlmedium strömt in den WT-Rohren. Die Kühlluft strömt von außen quer durch die Rohrreihen in den Raum innerhalb der auf den drei Kreisen angeordneten Rohrreihen.

Für die Luftströmung werden folgende Größen benötigt:

Querteilungsverhältnis $a = t_q / D_{23a}$

Längsteilungsverhältnis $b = t_r / D_{23a}$

Überströmlänge $l = (\pi / 2) D_{23a}$

Es ergibt sich:

Querteilungsverhältnis $a = 1.26$

Längsteilungsverhältnis $b = 1.26$

Überströmlänge $l = 21.21 \text{ mm}$

3.4 Auslegungsfälle

Die Auslegungsrechnungen wurden für drei verschiedene Fälle durchgeführt, wobei für den Referenz-Fall A gilt:

- Fall A:**
- Fluid im Primärkreis: Blei-Wismut-Eutektikum (Pb-Bi)
 - Hohes Temperatur-Niveau des Primärkreises
 - $T_{1h} = 500^{\circ}\text{C}$ (heißer Strang)
 - $T_{1k} = 350^{\circ}\text{C}$ (kalter Strang)
 - Fluid im Sekundärkreis: Blei-Wismut-Eutektikum (Pb-Bi)

Für die beiden anderen Fälle wird das Temperaturniveau im Primärkreis um 50 K abgesenkt. Für Fall B ist das Fluid im Sekundärkreis wie auch schon im Fall A Blei-Wismut, für den Fall C ist das Fluid im Sekundärkreis ein spezielles Wärmeträgeröl (Diphyl THT der Firma Bayer AG).

Die Absenkung des Temperaturniveaus des Primärkreises ist aufgrund der hohen thermischen Belastung des Strahlfensters und des steigenden Korrosionsangriffs mit steigender Temperatur vorteilhaft.

Die Verwendung von Wärmeträgeröl als Wärmeträgermedium im Sekundärkreis ist kostengünstig und technisch einfach zu handhaben. Allerdings muss auf die bei Erreichen der Siedetemperatur einsetzende Zersetzung des Wärmeträgeröls geachtet werden.

- Fall B:**
- Fluid im Primärkreis: Blei-Wismut-Eutektikum (Pb-Bi)
 - Niedrigeres Temperatur-Niveau des Primärkreises
 - $T_{1h} = 450^{\circ}\text{C}$ (heißer Strang)
 - $T_{1k} = 300^{\circ}\text{C}$ (kalter Strang)
 - Fluid im Sekundärkreis: Blei-Wismut-Eutektikum (Pb-Bi)

- Fall C:**
- Fluid im Primärkreis: Blei-Wismut-Eutektikum (Pb-Bi)
 - Niedrigeres Temperatur-Niveau des Primärkreises
 - $T_{1h} = 450^{\circ}\text{C}$ (heißer Strang)
 - $T_{1k} = 300^{\circ}\text{C}$ (kalter Strang)
 - Fluid im Sekundärkreis: Wärmeträgeröl Diphyl THT

3.5 Ergebnisse der Auslegungsrechnungen

Im Folgenden sind die wichtigsten Daten der Auslegungsrechnungen für die Fälle A, B und C tabellarisch dargestellt. Die Wärmequelle von 4 MW ist vorgegeben, das Blei-Wismut-Eutektikum wird für beide Temperaturniveaus jeweils um 150 K aufgeheizt. Für die ultimative Wärmesenke Umgebungsluft wurde für alle drei Fälle eine Eintrittstemperatur in den Luftkühler von 30°C angenommen.

Für die Dimensionierung der Wärmetauscher WT12 und WT23 wurden Rohrdurchmesser, Rohrabstand (Teilung) und Anordnung variiert, so dass sich optimale Abmessungen ergaben.

Bei Verwendung von Diphyl THT als Sekundärmedium an Stelle von Blei-Wismut wurde versucht, die Abmessungen der beiden Wärmetauscher WT12 und WT23 im Wesentlichen beizubehalten. Somit können im Modellexperiment beide Fluide ohne größere bauliche Veränderungen ausgetestet werden.

3.5.1 Hauptdaten

Die wichtigsten berechneten Hauptdaten sind die erforderlichen treibenden Höhen für Naturkonvektionsbetrieb H_i (geodätische Höhendifferenzen zwischen Mitte Wärmequelle und Mitte Wärmesenke), die entsprechenden Druckabfälle Δp_i , welche bei zu großen treibenden Höhen durch eine Pumpe aufgebracht werden müssen, sowie schließlich die Längen der Wärmetauscherrohre L_{ij} .

In Tabelle 1 sind für die drei untersuchten Fälle die Hauptdaten eingetragen. Für den Fall A ergeben sich mit treibenden Höhen von $H_1 = 6.0\text{ m}$, $H_2 = 2.6\text{ m}$ und $H_3 = 4.8\text{ m}$ und für den Fall B mit treibenden Höhen von $H_1 = 6.4\text{ m}$, $H_2 = 2.8\text{ m}$ und $H_3 = 4.8\text{ m}$ Werte, die in einem Prototyp technisch realisierbar sind. Der Vergleich der Fälle A und B in Tabelle 1, das heisst der Einfluss der Absenkung des Temperaturniveaus des Primärkreises, macht deutlich, dass der Primär-Sekundär-Wärmetauscher WT12 für Fall B mit einer Länge von 0.936 m um den Faktor 1.52 länger sein muss als für Fall A. Der Grund dafür ist das geringere treibende Temperaturgefälle zwischen Primärfluid und Sekundärfluid. Aufgrund des durch die längeren Wärmetauscherrohre bedingten größeren Strömungswiderstandes ergeben sich für den Primär- und den Sekundärkreis um die Faktoren 1.07 und 1.08 größere erforderliche treibende Höhen für Naturkonvektion.

Im Fall C ist das Fluid des Sekundärkreises das Wärmeträgeröl Diphyl THT, das eine um zwei Größenordnungen geringere Wärmeleitfähigkeit als Blei-Wismut (Fall B) besitzt. Diphyl THT hat bei Umgebungsdruck einen Siedepunkt von etwa 352°C , ab

Tabelle 1: Ergebnisse für die Hauptdaten.

Symbol	Einheit	Fall A	Fall B	Fall C
		Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 500^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Diphyl THT
\dot{Q}	MW	4.0	4.0	4.0
T_{1k}	$^\circ\text{C}$	350	300	300
T_{1h}	$^\circ\text{C}$	500	450	450
T_{2k}	$^\circ\text{C}$	200	200	263
T_{2h}	$^\circ\text{C}$	350	350	273
T_{3k}	$^\circ\text{C}$	30	30	30
T_{3h}	$^\circ\text{C}$	150	150	140
H_1	m	6.016	6.444	6.762
H_2	m	2.608	2.804	744.5
H_3	m	4.782	4.782	5.635
Δp_1	Pa	10623	11379	11941
Δp_2	Pa	4860	5226	47472
Δp_3	Pa	15	15	17
L_{12}	m	0.615	0.936	1.169
L_{23}	m	4.882	4.882	5.074
Q	Abzuführende Leistung			
T	Temperatur			
H	Treibende Höhe für Naturkonvektionsbetrieb			
Δp	gesamter Druckverlust in jeweiligem Kreis			
L_{12}	Länge der Rohre des Primär-Sekundär-Wärmetauschers WT12			
L_{23}	Länge der Rohre des Sekundär-Tertiär-Wärmetauschers WT23			
Indices: Primärkreis 1, Sekundärkreis 2, Tertiärkreis 3, kalter Strang k, heißer Strang h.				

dem auch eine Zersetzung des Wärmeträgeröls und somit eine Reduzierung der thermischen Eigenschaften einsetzt. Um für Fall C die selbe Wärmemenge zu transportieren und an keiner Stelle des Wärmetauschers WT12 die Siedetemperatur von Diphyl THT zu erreichen, wird die Strömungsgeschwindigkeit des Diphyl THT im Vergleich zur Strömungsgeschwindigkeit des Blei-Wismut im Fall B so stark erhöht, dass sich eine Aufheizspanne von lediglich 10 K (von 263°C auf 273°C) ergibt. Die Längen der Wärmetauscher müssen durch diese Maßnahme nur unwesentlich erhöht werden (Verlängerung um 25% auf 1.169 m für WT12 und um 4% auf 5.074 m für WT23). Ein Naturkonvektionsbetrieb des Sekundärkreises ist für Fall C nicht mehr möglich, da eine treibende Höhe von $H_2 = 744.5\text{ m}$ erforderlich wäre. Die Druckdifferenz von 0.47 bar muss durch eine Pumpe aufgebracht werden.

3.5.2 Strömungsdaten

In Tabelle 2 sind für die drei untersuchten Fälle die Strömungsdaten, das heisst die Massen- und Volumenströme sowie die wichtigsten Geschwindigkeiten für die drei Kreisläufe, eingetragen.

Ein Vergleich zwischen Fall B und C macht deutlich, dass bei Verwendung von Diphyl THT als Sekundärmedium ein wesentlich höherer Massenstrom bzw. höhere Strömungsgeschwindigkeiten im Sekundärkreis notwendig sind als bei der Verwendung von Blei-Wismut als Sekundärmedium. Die Strömungsgeschwindigkeiten von Pb-Bi liegen deutlich unter 2 m/s , so dass Effekte wie Erosion von Strukturmaterialien keine Rolle spielt. Eine Strömungsgeschwindigkeit von 4 m/s für Diphyl THT, was einem Volumenstrom von $713\text{ m}^3/\text{h}$ bei 0.47 bar Druckverlust im Sekundärkreis entspricht, ist über eine mechanische Pumpe technisch handhabbar.

Tabelle 2: Ergebnisse für die Strömungsdaten.

Symbol	Einheit	<u>Fall A</u>	<u>Fall B</u>	<u>Fall C</u>
		Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 500^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Diphyl THT
\dot{m}_1	kg/s	181.4	181.4	181.4
\dot{m}_2	kg/s	181.4	181.4	167.3
\dot{m}_3	kg/s	32.97	32.97	36.0
\dot{V}_1	m^3/h	63.4	63.0	63.0
\dot{V}_2	m^3/h	62.3	62.3	713.4
\dot{V}_3	m^3/h	103200	103200	112600
w_F	m/s	1.15	1.15	1.15
w_{1h}	m/s	0.313	0.311	0.311
w_{1k}	m/s	0.079	0.079	0.079
w_{2h}	m/s	0.359	0.359	4.07
w_{2k}	m/s	0.352	0.352	4.04
w_{3h}	m/s	5.67	5.67	6.04
w_{3k}	m/s	5.67	5.67	6.04
$m =$	Massenstrom,	Indices: Primärkreis 1, Sekundärkreis 2, Tertiärkreis 3,		
$V =$	Volumenstrom bei T_k ,	kalter Strang k , heißer Strang h .		
$w =$	Strömungsgeschwindigkeit,			

3.5.3 Wärmeübergangsdaten für den Primär-Sekundär-Wärmetauscher WT12

Beim Primär-Sekundär-Wärmetauscher WT12 strömt das Primärfluid (Pb-Bi) im Innern der Wärmetauscherrohre und das Sekundärfluid (Pb-Bi oder Diphyl THT) strömt im Außenraum zwischen den Rohren. Dabei ergibt sich auf der Primärseite bei mäßig turbulenten Geschwindigkeiten von Blei-Wismut ein guter Wärmeübergang und relativ kleine Nusselt-Zahlen (Fall A $Nu_{12i} = 6.7$ und Fall B $Nu_{12i} = 6.8$), siehe Tabelle 3. Die Wärmeübergangszahl liegt für Fall A bei $8489 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$ und für Fall B bei $8242 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$. Die Wärmedurchgangszahlen liegen für die Fälle A und B bei $2682 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$ und $2644 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$.

Die gute Wärmeübergangscharakteristik gilt auch für die Sekundärseite bei Verwendung von Blei-Wismut als Fluid. Die Nusselt-Zahl für den Wärmeübergang an der Außenseite der Wärmetauscherrohre ist von gleicher Größenordnung wie an der Innenseite.

Ersetzt man das Blei-Wismut durch das Wärmeträgeröl Diphyl THT (Übergang von Fall B auf Fall C), so muss das Wärmeträgeröl um eine Größenordnung schneller strömen, um etwa die gleiche Wärmeübergangszahl zu erreichen: Für einen Volumenstrom des Diphyl THT von $713 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich eine Wärmeübergangszahl von $4735 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$. Die Nusselt-Zahl für Fall C ist mit $Nu_{12a} = 585$ um zwei Größenordnungen größer als für Fall B, der Grund ist die um zwei Größenordnungen schlechtere Wärmeleitfähigkeit von Diphyl THT gegenüber Blei-Wismut, siehe Anhang A.2. Die Wärmeübergangszahl für Fall C liegt bei $2367 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$ und liegt somit um etwa 11% unter den Werten der Fälle A und B.

Tabelle 3: Wärmeübergangsdaten für den Primär-Sekundär-Wärmetauscher WT12.

Symbol	Einheit	Fall A	Fall B	Fall C
		Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 500^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Diphyl THT
Primärseitig: Medium 1 strömt in den Wärmeaustauscherrohren.				
w_{12i}	m/s	0.469	0.466	0.466
Re_{12i}	-	34020	31250	31250
Nu_{12i}	-	6.694	6.766	6.766
α_{12i}	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	8489	8242	8242
Sekundärseitig: Medium 2 strömt im Außenraum zwischen den Rohren.				
w_{12a}	m/s	0.293	0.293	3.341
Re_{12a}	-	18700	18700	70320
Nu_{12a}	-	6.375	6.375	584.7
α_{12a}	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	6265	6265	4735
Wärmedurchgangszahl:				
k_{12}	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	2682	2644	2367
$w =$	Strömungsgeschwindigkeit,			
$Re =$	Reynolds-Zahl,			
$Nu =$	Nusselt-Zahl,			
$\alpha =$	Wärmeübergangszahl.			
Indices:	Primärkreis 1, Sekundärkreis 2, innen i , aussen a bezüglich Wärmetauscherrohren.			

3.5.4 Wärmeübergangsdaten für den Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher WT23

Beim Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher WT23 strömt das Sekundärmedium (Pb-Bi oder Diphyl THT) im Inneren der Wärmetauscherrohre und das Tertiärmedium (Luft) im Außenraum senkrecht zu den Rohren.

Der Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher WT23 ist so ausgelegt, dass die Wärmeübergangszahl auf der Sekundärseite für Pb-Bi für die Fälle A und B bei $6280 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ liegt. Bei Verwendung des Wärmeträgeröls Diphyl THT an Stelle von Blei-Wismut (Übergang von Fall B zu Fall C) gilt die gleiche Argumentation wie in Kapitel 3.5.3. Für Fall C liegt die Wärmeübergangszahl dann bei einem deutlich niedrigeren Wert von $2121 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Für die Luft-Seite ergeben sich für alle drei Fälle in etwa die selben Werte für die Wärmeübergangszahl von $\alpha_{23a} \approx 65 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Da der Wärmeübergang auf der Luftseite die den Wärmedurchgang begrenzende Einflussgröße ist, ergibt sich für die Wärmedurchgangszahl für alle drei Fälle in etwa der gleiche Wert von $k_{23} = 71 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Tabelle 4: Wärmeübergangsdaten für den Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher WT23.

Symbol	Einheit	<u>Fall A</u>	<u>Fall B</u>	<u>Fall C</u>
		Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 500^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Pb-Bi	Fluid 1: Pb-Bi $T_{1h} = 450^\circ\text{C}$ Fluid 2: Diphyl THT
Sekundärseitig: Medium 2 strömt in den Wärmeaustauscherrohren.				
w_{23i}	m/s	0.121	0.121	1.382
Re_{23i}	-	6414	6414	24120
Nu_{23i}	-	5.297	5.297	217.1
α_{23i}	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	6280	6280	2121
Tertiärseitig: Medium 3 strömt senkrecht zu den Rohren.				
w_{23a}	m/s	0.747	0.747	0.774
Re_{23a}	-	1874	1874	1989
Nu_{23a}	-	43.75	43.75	45.23
α_{23a}	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	64.15	64.15	65.56
Wärmedurchgangszahl:				
k_{23}	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	71.22	71.22	70.92
$w =$	Strömungsgeschwindigkeit,			
$Re =$	Reynolds-Zahl,			
$Nu =$	Nusselt-Zahl,			
$\alpha =$	Wärmeübergangszahl.			
Indices:	Sekundärkreis 2, Tertiärkreis 3, innen i , aussen a bezüglich Wärmetauscherrohren.			

4. Zusammenfassung der Auslegungsrechnung für das Integralexperiment K4T

Im Folgenden sind die wichtigsten Auslegungsdaten für das Integralexperiment K4T (Karlsruhe 4 MW Target) zusammengefasst. Die Auslegungsdaten stellen eine ingenieurmäßige Abschätzung für das gekoppelte Wärmeabfuhrsystem eines geschlossenen Targetmoduls einer ADS-Anordnung dar. Die abzuführende Wärmemenge beträgt $4 MW_{th}$.

4.1. Kreislaufsystem

Primärkreis:

Index 1

Geschlossenes System

Fluid: Blei-Wismut Eutektikum (Pb-Bi)

Wärmequelle: Strahlfenster und Spallationsbereich

Wärmesenke: Primär-Sekundär-Wärmetauscher (Ringtauchkühler) WT12

Sekundärkreis:

Index 2

Geschlossenes System

Fluid: Blei-Wismut Eutektikum (Pb-Bi) oder Diphyl THT
(für Fall C und Verwendung von Diphyl THT mit Pumpe)

Wärmequelle: Primär-Sekundär-Wärmetauscher (Ringtauchkühler) WT12

Wärmesenke: Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher (Luftkühler) WT23

Tertiärkreis:

Index 3

Offenes System

Fluid: Luft

Wärmequelle: Sekundär-Tertiär-Wärmetauscher, WT23 (Luftkühler)

Wärmesenke: Umgebung

Eine schematische Darstellung des Kreislaufsystems mit den wichtigsten Bezeichnungen gibt Abb. 3.

4.2 Abzuführende Leistung

Spallationsleistung und Leistung im Strahlfenster: $\dot{Q} = 4 MW$

4.3 Maximale Temperaturen, über den Querschnitt gemittelt

Primärkreis heißer Strang (Austritt Wärmequelle): $T_{1h} = 500^{\circ}C$

Sekundärkreis heißer Strang (Austritt Wärmetauscher): $T_{2h} = 350^{\circ}C$

Tertiärkreis Luft Austritt: $T_{3h} = 150^{\circ}C$

4.4 Geometrie der Steig- und Fall-Leitungen

Primärkreis:

Führungsrohr im Spallationsbereich:

Innendurchmesser:

$$D_{if} = 140 \text{ mm}$$

Länge:

$$L_F = 400 \text{ mm}$$

Steig-Leitung:

Ringquerschnitt, heißer Strang

Außendurchmesser:

$$D_{1ha} = 336 \text{ mm}$$

Innendurchmesser:

$$D_{1hi} = 200 \text{ mm}$$

Länge:

$$L_{1h} = 10 \text{ m}$$

Fall-Leitung:

Ringquerschnitt, kalter Strang

Außendurchmesser:

$$D_{1ka} = 638.8 \text{ mm}$$

Innendurchmesser:

$$D_{1ki} = 354 \text{ mm}$$

Länge:

$$L_{1k} = 10 \text{ m}$$

Sekundärkreis

Steig-Leitung:

Kreisrohr, heißer Strang

Innendurchmesser:

$$D_{2h} = 250 \text{ mm}$$

Länge:

$$L_{2h} = 15 \text{ m}$$

Fall-Leitung:

Kreisrohr, kalter Strang

Innendurchmesser:

$$D_{2k} = 250 \text{ mm}$$

Länge:

$$L_{2k} = 15 \text{ m}$$

Tertiärkreis:

Kamindurchmesser:

$$D_K = 3.0 \text{ m}$$

4.5 Treibende geodätische Höhen für reinen Naturkonvektions-Antrieb

Primärkreis:

(Abstand Mitte Wärmequelle zu Mitte WT12): $H_1 = 6.76 \text{ m}$

Sekundärkreis:

(Abstand Mitte WT12 zu Mitte WT23): $H_2 = 2.80 \text{ m}$

Tertiärkreis:

(Höhe des Kamins über Mitte WT23): $H_3 = 5.64 \text{ m}$

4.6 Geometrie des Primär-Sekundär-Wärmetauschers (WT12)

Typ: Ring-Tauchkühler (TK), im äußeren Ringquerschnitt des Primärkreises angeordnet (siehe Abb. 5).

Das Fluid Pb-Bi des Primärkreises strömt im Inneren der Rohre des Ringtauchkühlers.

Das Fluid des Sekundärkreises strömt im Außenraum der Rohre.

Anzahl der Rohr-Anordnungskreise:

$$N_{RTK} = 5$$

Durchmesser der Kreise mit Abstand $t_{12} = 18 \text{ mm}$:	Kreis 1:	$d_{K1} = 388 \text{ mm}$
	Kreis 2:	$d_{K2} = 424 \text{ mm}$
	Kreis 3:	$d_{K3} = 460 \text{ mm}$
	Kreis 4:	$d_{K4} = 496 \text{ mm}$
	Kreis 5:	$d_{K5} = 532 \text{ mm}$

Anzahl der Rohre auf Kreis mit Bogenabstand $t_{12} = 18 \text{ mm}$:

	Kreis 1:	$n_{K1} = 67$
	Kreis 2:	$n_{K2} = 74$
	Kreis 3:	$n_{K3} = 80$
	Kreis 4:	$n_{K4} = 86$
	Kreis 5:	$n_{K5} = 92$
Gesamtzahl der Rohre:		$N_{gTK} = 399$
Außendurchmesser der Rohre:		$D_{12a} = 15 \text{ mm}$
Innendurchmesser der Rohre:		$D_{12i} = 11 \text{ mm}$
Wandstärke:		$S = 2 \text{ mm}$
Länge der Rohre:		$L_{12} = 1.169 \text{ m}$

4.7 Geometrie des Sekundär-Tertiär-Wärmetauschers (WT23):

Typ: Luftkühler (LK), die Rohre sind auf drei Kreisringen angeordnet (siehe Abb. 6).
Das Fluid des Sekundärkreises strömt in den Rohren des Luftkühlers.

Zylinderhöhe (vertikale Höhe des Wärmetauschers):	$H_z = 5.07 \text{ m}$
Zylinderdurchmesser (Durchmesser des Wärmetauschers):	$D_z = 3 \text{ m}$
Querteilung:	$t_q = 17.01 \text{ mm}$
Anzahl der Rohre pro Zylinderkreis:	$N_{ZLK} = 554$
Anzahl der Kreise (Anzahl der Rohrreihen):	3
Abstand der Kreise:	$t_r = 17 \text{ mm}$
Gesamtzahl der WT-Rohre:	$N_{gLK} = 1662$
Länge der Rohre:	$L_{23} = 5.07 \text{ m}$
Rohr-Außendurchmesser:	$D_{23a} = 13.5 \text{ mm}$
Wandstärke:	$S_{23} = 1.5 \text{ mm}$

4.8 Geometrie des Kamins

Typ: vertikaler Kreiskamin (siehe Abb. 6)

Innen-Durchmesser des Kamins:	$D_K = 3.0 \text{ m}$
Höhe des Kamins:	$H_3 = 5.64 \text{ m}$

4.9 Integration in das Flüssigmetalllabor KALLA

Die Integration des Integralexperiments K4T in KALLA ist in Abb. 7 (Lageplan) und Abb. 8 (vertikaler Schnitt) gegeben. Im Osten der Halle 415 sind sowohl in der Bodenplatte des Erdgeschosses als auch in der Hallendecke Durchbrüche des Querschnitts $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ gegeben, so dass auf technische einfache Weise das Targetmodul und Teile des Sekundärkreislaufs innerhalb der Halle, der Luftkühler und der Kamin oberhalb des Hallendachs installiert werden können. Die Lasten werden über Träger in die Bodenplatte der Halle 415 oder in außerhalb der Halle zu erstellende Fundamente eingebracht.

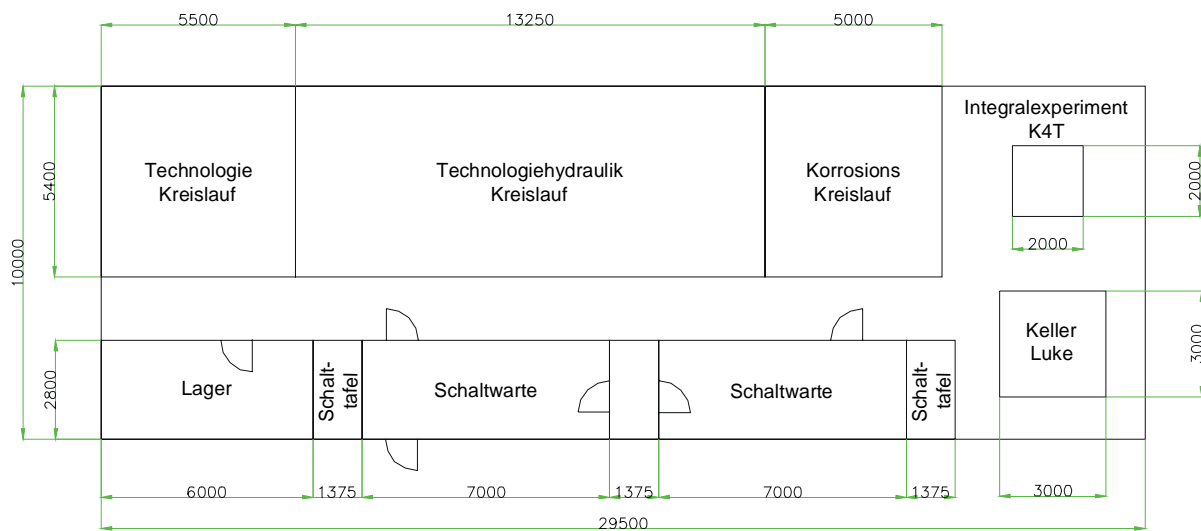


Abbildung 7: Flüssigmetalllabor KALLA (KARlsruhe Lead LABoratory),
räumliche Anordnung in Bau 415.

Der Targetmodul selbst hat eine Bauhöhe von etwa 9000 mm . Der lichte Abstand zwischen der Bodenkalotte des Targetmoduls und dem Kellerboden beträgt 2600 mm , so dass eine Demontage der Heizstäbe möglich ist, ohne das Targetmodul selbst zu demontieren. Ebenso können der Wärmetauscher WT12, das Strahlrohr mit Strahlfenster und das Führungsrohr nach oben aus dem Targetmodul herausgezogen und ausgetauscht werden. Das Blei-Wismut aus dem Primärkreis von K4T wird in den Sumpftank des Thermohydraulik-Kreislaufs entleert.

Die Leistung von $4\text{ MW}(el)$, die in den Spallationsbereich eingebracht werden muss, kann über Hochleistungs-Wendelheizer (Knebel et al. (2000)) zugeführt werden. Ein Schnitt durch ein Heizelement mit den wichtigsten Bezeichnungen ist in Abbildung 9 gegeben. Die Heizelemente werden wie in Abbildung 10 dargestellt von unten durch die Kugelkalotte des Targetcontainers in den Spallationsbereich (Führungsrohr) eingebracht. Die Abdichtung der Heizstäbe erfolgt über Metall-Schneidringdichtungen, die zum Auswechseln eines Heizstabes gelöst werden können. Die beheizte Länge beträgt 1230 mm , der Außendurchmesser beträgt 8.2 mm . Die Heizstäbe sind auf einem Pitch von 17.4 mm in 5 Ringen mit einem Zentralelement angeordnet. Insgesamt sind 91 Heizelemente vorgesehen. Die Heizwendel ist aus Inconel gefertigt. Der Mantel des Heizelements ist Edelstahl 1.4571. Um bei den hohen Oberflächentemperaturen der Heizelemente Korrosion zu

vermeiden, ist eine GESA-Behandlung und ein gleichzeitiges Einlegieren von Aluminium in die Oberfläche vorgesehen, Müller et al. (2000). Um die 91 Hezelemente im Spallationsbereich unterzubringen und um die Druckverluste im Experiment gleich den Druckverlusten im Prototyp zu halten, muss der Durchmesser des Führungsrohrs im Spallationsbereich D_{iF} von 140 mm auf 191 mm vergrößert werden. Ebenfalls muss die Länge des Führungsrohrs L_F von 400 mm auf die beheizte Länge der Wendelheizer von 1230 mm verlängert werden. Bei einer spezifischen Stableistung von etwa 360 W/cm ergibt sich für das Stabbündel eine maximale Heizleistung von 4 MW .

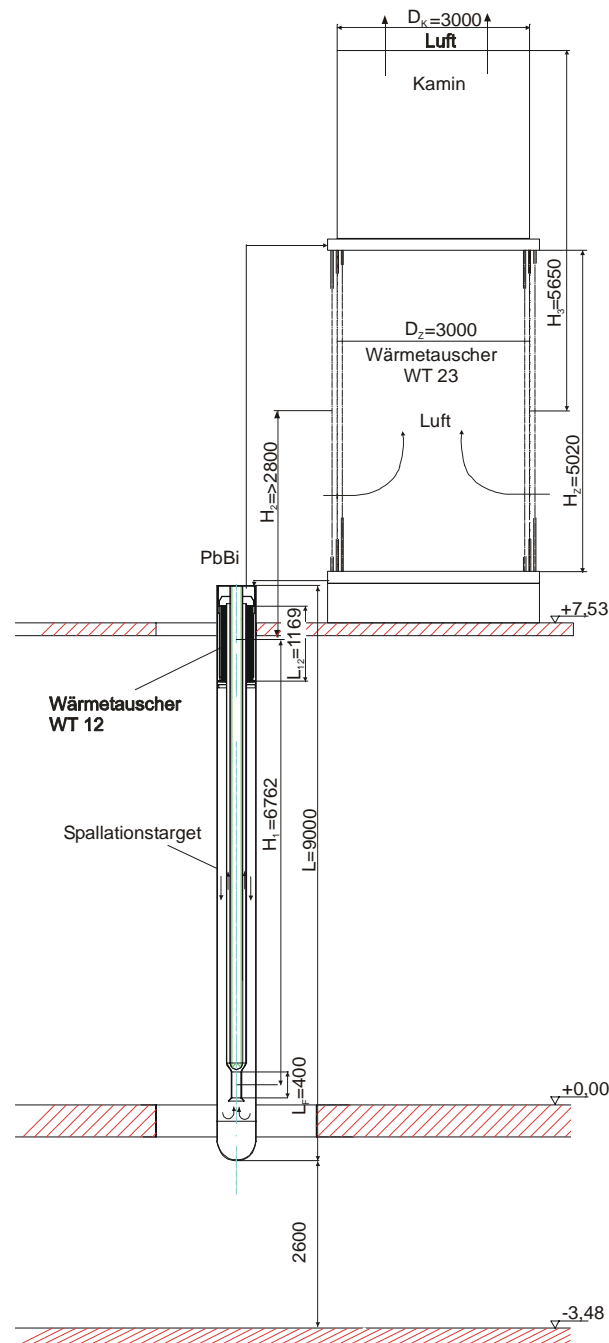
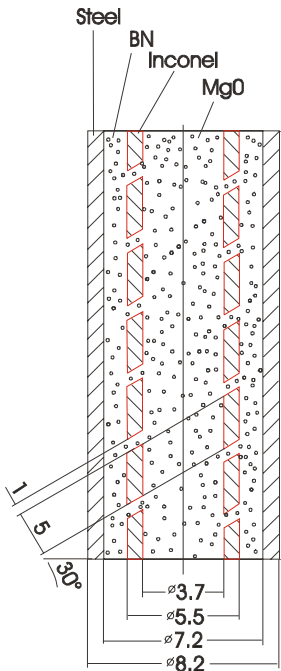


Abbildung 8: Integration des Integralexperiments K4T (Karlsruher 4 MW Target) in Halle 415.



Material der Heizwendel:	Inconel
Beheizte Länge:	1.23 m
Elektrischer Widerstand (kalt):	1920 mΩ / m
Elektrischer Widerstand (warm):	1025 mΩ / m
Strom:	191.1 A
Spannung:	230 V
Spezifische Leistung:	357.4 W/cm



Abbildung 9: Hochleistungs-Wendelheizer: Skizze, Daten und Foto (aufgeschnitten).

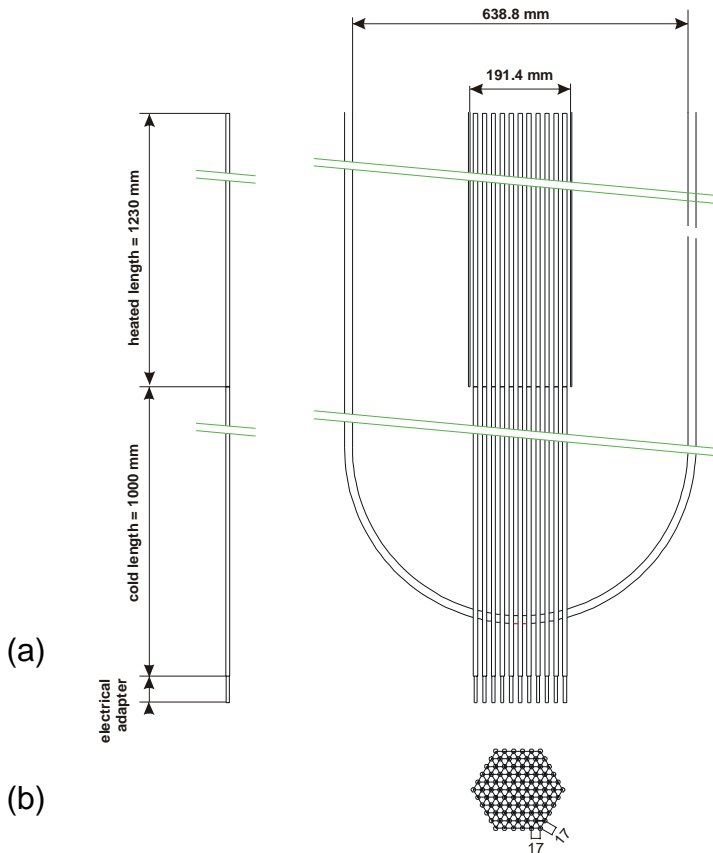


Abbildung 10: Einbau der Hochleistungs-Wendelheizer in das Integralexperiment K4T.

- (a) Heizstab und Seitenansicht des Spallationsbereichs,
- (b) Draufsicht auf Heizstäbe.

5. Schlussbetrachtung

Dieser Bericht fasst auf der Basis einer ingenieurmäßigen Abschätzung die wichtigsten Auslegungsgrößen für das Integralexperiment K4T (Karlsruhe 4 MW Target) zusammen, mit dem das gekoppelte Wärmeabfuhrsystem eines geschlossenen Targetmoduls einer ADS-Anordnung integral untersucht werden kann. Das Spallationsmaterial und Kühlmittel des Primärkreislaufs ist flüssiges Blei-Wismut.

Die Wärmeabfuhr aus dem Targetmodul erfolgt über einen Sekundärkreislauf an einen Luftkühler. Der Sekundärkreislauf wird mit dem Fluid Blei-Wismut oder dem Wärmeträgeröl Diphyl THT betrieben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeabfuhr – außer für den Fall des Wärmeträgeröls als Sekundärfluid – durch Naturkonvektion für die angenommenen Randbedingungen (Temperaturen, freie Strömungsquerschnitte) grundsätzlich möglich ist. Die Dimensionierung der einzelnen Komponenten (Spallationsbereich, Wärmetauscher, Luftkühler, Kamin), die Gesamtabmessungen des Targetmoduls und die errechneten notwendigen treibenden geodätischen Höhen sind von realistischer Größenordnung und können somit in eine prototypische ADS-Anordnung integriert werden.

Die vorgegebene Temperaturdifferenz von maximal 150 K sowohl im Primärkreislauf als auch im Sekundärkreislauf darf für Blei-Wismut nicht überschritten werden, um einen verstärkten Korrosionsangriff der Strukturmaterialien zu vermeiden. Aufgrund der kleinen Strömungsgeschwindigkeiten von Pb-Bi ist die Gefahr einer Schädigung der Strukturmaterialien durch Erosion nicht gegeben. Bei der Verwendung von Diphyl THT darf die Siedetemperatur des Wärmeträgeröls nicht überschritten werden.

Neben der integralen Auslegung des Spallationstargets muss die Kühlung des Strahlfensters im Detail mit dreidimensionalen Rechenprogrammen untersucht werden. Die sich lokal am und im Strahlfenster ergebenden Temperaturen dürfen die zulässigen Höchstwerte, die zu einem Versagen des Strukturmaterials führen können, nicht überschreiten. Der sich aufgrund der hier vorgegebenen Randbedingungen berechnete primäre Volumenstrom von $63\text{ m}^3/\text{h}$ gewährleistet nach Cheng et al. (1999) eine Kühlung des Strahlfensters – vor allem des Staupunktes des Fensters, in dem die höchste vom Protonenstrahl deponierte Leistungsdichte vorliegt – unter stationären Betriebsbedingungen.

Die nächsten Schritte der Arbeiten konzentrieren sich auf:

- Konstruktive Auslegung des Targetmoduls K4T,
- Erweiterung des Rechenprogramms ADSCLS zur Berechnung transienter Zustände des gekoppelten Kreislaufsystems,
- Durchführung von dreidimensionalen CFD-Simulationsrechnungen für das gesamte Targetmodul,
- Integration der Arbeiten zu K4T in das PDS-XADS Project des Euratom 5th EU Framework Programme.

6. Literatur

Ansaldo, 2001

Ansaldo Nucleare, Hrsg.: XADS Pb-Bi Cooled Experimental Accelerator Driven System, Reference Configuration, Summary Report, ADS 1 SIFX 0500-Rev. 0, June 2001

Bauer, G., Salvatores, M., Heusener, G., 1999

The MEGAPIE Initiative – Executive Outline and Status as per November 1999, Paul Scherrer Institut, Villigen Switzerland

Borrmann, H., 1981

Kernforschungsanlage Jülich / Kernforschungszentrum Karlsruhe, Hrsg.: Realisationsstudie zur Spallations-Neutronenquelle SNQ, Teil III, Annex E, Teil 2: Huber P.E., Untersuchungen zur Kühlmöglichkeit eines Flüssigmetalltargets für eine Spallations-Neutronenquelle

Bowman, C.D., Arthur, E.D., Lisowski, P.W., et al., 1992

Nuclear Energy Generation and Waste Transmutation using an Accelerator-Driven Intense Thermal Neutron Source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A320, pp.336-367

Broeders, C.H.M., 1997

Neutron Physics ADS Investigations at Forschungszentrum Karlsruhe, Proceedings of the International Workshop on Physics of Accelerator Driven Systems for Nuclear Transmutation and Clean Energy Production, Trento, Sept. 29 – Oct. 3, 1997, und http://inrwww.fzk.de/~inr487/public_html/trento_viewcharts.html

Broeders, C.H.M., 1998

A Comparison of Some Neutronics Characteristics of Critical Reactors and Accelerator Driven Subcritical Systems, Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Proc. 5th Intern. Information Exchange Meeting, Mol Belgium, Nov. 25-27; Paris: OECD, 1999 EUR-18898-EN S. 343-353

Buono, S., Rubbia, C., 1996

Preliminary Design of a Molten Lead Convection Driven Standalone Beam Target for the Energy Amplifier, CERN/ET Internal Note 96-023, October 17, 1996

Carminati, F., Klapisch, R., Revol, J.P., Roche, Ch., Rubio, J.A., Rubbia, C., 1993

An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator, CERN/AT/93-47 (ET)

Cheng, X., Knebel, J.U., Hofmann, F., 1999

Thermalhydraulic Design of an ADS with Three Spallation Targets, 3rd Int. Conf. On Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications ADTTA99, June 7-11, Praha Czech Republic

Enlarged Technical Working Group (TWG), 2001

A Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration, Issued by the Enlarged TWG on ADS, April 2001

Euratom, 2001

<http://www.cordis.lu/fp5-euratom>

European Commission, 2001
Partitioning and Transmutation: Towards an Easing of the Nuclear Waste Management Problem, EURATOM Report EUR 19785

Heusener, G., Salvatores, M., 1998
Use of heavy liquid metal: A perspective for critical/subcritical fast neutron concepts, HLMC'98, 5-9 October, Obninsk, Russia

Knebel, J.U., Cheng, X., Müller, G., Schumacher, G., Konys, J., Wedemeyer, O., Grötzbach, G., Carteciano, L., 2000
Thermalhydraulic and Material Specific Investigations into the Realization of an Accelerator Driven System (ADS) to Transmute Minor Actinides, 1999 Status Report, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6506

Knebel, J.U., Cheng, X., Müller, G., Schumacher, G., Konys, J., Wedemeyer, O., Grötzbach, G., Carteciano, L., 2001
Thermalhydraulic and Material Specific Investigations into the Realization of an Accelerator Driven System (ADS) to Transmute Minor Actinides, 2000 Status Report, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6618

Knebel, J.U., Klein, J.-C., Gorse, D., Agostini, P., Gröschel, F., Kupschus, P., Kirchner, T., Vogt, J.-B., 2001
MEGAPIE-TEST: A European Project on Spallation Target Testing, Proc. of Accelerator Applications / Accelerator Driven Transmutation Technology and Applications (AccApp / ADTTA'01), Reno Nev., November 11-15, 2001

Knebel, J.U., Müller, G., Konys, J., 2002
The KARlsruhe Lead LABORatory KALLA: A Technical Description, Forschungszentrum Karlsruhe, <http://www.kalla.fzk.de> and Report to be published

Maschek, W., Rineiski, A., Morita, K., Flad, M., 2001a
Inherent and Passive Safety Measures in Accelerator Driven Systems: A Safety Strategy for ADS, GLOBAL 2001, Paris, France, Sept. 9-13, 2001

Maschek, W., Rineiski, A., Wang, S., Flad, M., 2001b
Safety Improvements for ADS Transmuters with Dedicated Fuel, Proc. of Accelerator Applications / Accelerator Driven Transmutation Technology and Applications (AccApp / ADTTA'01), Reno Nev., November 11-15, 2001

Müller, G., Schumacher, G., Zimmermann, F., 2000
Investigation on Oxygen Controlled Liquid Lead Corrosion of Surface Treated Steels, J. Nucl. Mater., 278, pp. 85-95

Rubbia C., Rubio, J.A., Buono, S., Carminati, F., Fiétier, F., Galvez, J., Gelès, C., Kadi, Y., Klapisch, R., Mandrillon, P., Revol, J.P., Roche, Ch., 1995
Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier, CERN/AT/95-44(ET)

Sandtner, W., Closs, K.D., Erlenwein, P., 2000
Ergebnisse der Evaluierungskommission zur Nuklearen Sicherheits- und Endlagerforschung in Deutschland, Intern. Zeitschrift für Kernenergie, atw 45. Jg. Heft 7, pp. 430 435

Takizuka T., et al., 1998
Heavy liquid-metal cooling option of JAERI accelerator-driven transmutation systems, HLMC'98, October 5-9, Obninsk, Russia

Tichelen Van, K., Kupschus, P., Arien, B., Aït Abderrahim, H., Klujkin, A., Platacis, E., 2001

Design and Verification Experiments for the Windowless Spallation Target of the ADS Prototype MYRRHA, Proc. of Accelerator Applications / Accelerator Driven Transmutation Technology and Applications (AccApp / ADTTA'01), Reno Nev., November 11-15, 2001

VDI-Wärmeatlas, 1988, 5. Auflage

A. Anhang

A.1 Berechnungsgrundlagen

Für die Auslegungsrechnungen wurden die im Folgenden dargestellten Beziehungen verwendet.

A.1.1 Enthalpiebilanz

Für die Enthalpieerhöhung des Massenstroms \dot{m} um die Temperaturdifferenz $(T_h - T_k)$ gilt:

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_h - T_k),$$

wobei die spezifische Wärmekapazität c_p bei der mittleren Temperatur T_m der Fluide

$$T_m = \frac{1}{2}(T_h + T_k)$$

eingesetzt wird.

Für den Massenstrom gilt:

$$\dot{m} = \rho w A .$$

A.1.2 Wärmedurchgang bei den Wärmetauschern

Für den Wärmedurchgang an den Wärmetauscherrohren gilt:

$$\dot{Q} = k A_m \Delta T_m$$

mit:

Wärmedurchgangszahl:	k
mittlere Wärmetauscherfläche der N Rohre:	A_m
mittlere treibende Temperaturdifferenz:	ΔT_m

wobei gilt:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_h - \Delta T_k}{\ln \frac{\Delta T_h}{\Delta T_k}}$$

mit:

ΔT_h = Temperaturdifferenz zwischen den Fluiden am heißen Ende des WT,

ΔT_k = Temperaturdifferenz zwischen den Fluiden am kalten Ende des WT.

Der Wärmedurchgang mit der Wärmedurchgangszahl k setzt sich aus den Wärmeübergängen durch Konvektion an Innen- und Außenseite der Rohre sowie aus Wärmeleitung in der Rohrwand zusammen, so dass gilt:

$$\frac{1}{k A_m} = \frac{1}{\alpha_i A_i} + \frac{1}{\frac{\lambda}{S} A_m} + \frac{1}{\alpha_a A_a}$$

mit:

$$A_m = \frac{A_a - A_i}{\ln \frac{A_a}{A_i}} ,$$

wobei der Index a für außen und Index i für innen bezogen auf die Rohrwand steht.

Der mittlere Term für die Wärmeleitung in der Rohrwand ergibt sich aus

$$\dot{Q} = N 2\pi L \frac{\lambda}{\ln \frac{D_a}{D_i}} (T_i - T_a)$$

durch Erweiterung mit der Wandstärke S

$$S = \frac{1}{2} (D_a - D_i)$$

und der benetzten Oberfläche A

$$A = N \pi D L ,$$

wobei L die Rohrlänge ist.

Außerdem gilt:

$$A = U L$$

mit U als Umfang aller Rohre.

Somit lauten die Wämedurchgangsbeziehungen:

$$\dot{Q} = k U_m L \Delta T_m$$

$$\frac{1}{k U_m} = \frac{1}{\alpha_i U_i} + \frac{1}{\frac{\lambda}{S} U_m} + \frac{1}{\alpha_a U_a}$$

$$U_m = \frac{U_a - U_i}{\ln \frac{U_a}{U_i}}$$

mit

$$\dot{Q} = \alpha_i U_i L (T_{wi} - T_i) \quad \text{für die Innenseite der Rohre,}$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{S} U_m L (T_{wa} - T_{wi}) \quad \text{für die Rohrwand,}$$

$$\dot{Q} = \alpha_a U_a L (T_a - T_{wa}) \quad \text{für die Außenseite der Rohre.}$$

A.1.3 Korrelationen für den Wärmeübergang

Für Flüssigmetalle gilt folgende Wärmeübergangsbeziehung, Borrmann (1981):

$$Nu = 4.5 + 0.014 Pe^{0.8} .$$

Für Diphyl THT werden folgende Korrelationen verwendet:

$$Nu_0 = \sqrt[3]{3.66^3 + 1.61^3 Re Pr D_h / L} \quad \text{für } Re < 2300 \text{ (laminar),}$$

$$Nu_0 = \frac{\xi / 8 (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\xi / 8} (Pr^{2/3} - 1)} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{2/3} \right] \quad \text{für } Re \geq 2300 \text{ (turbulent)}$$

mit

$$\xi = (1.82 \lg Re - 1.64)^2 .$$

Aus Nu_o errechnet sich die Nusselt-Zahl zu:

$$Nu = Nu_o (Pr/Pr_w)^{0.11}$$

wobei Pr_w die Prandtl-Zahl bei Rohrwand-Temperatur ist.

Für die dimensionslosen Kennzahlen gilt:

$$\text{Peclet-Zahl:} \quad Pe = Re Pr$$

$$\text{Reynolds-Zahl:} \quad Re = \frac{w D_h}{\nu}$$

$$\text{Nusselt-Zahl:} \quad Nu = \frac{\alpha D_h}{\lambda}$$

A.1.4 Wärmeübergang bei Strömung quer durch Rohrreihen

Die Wärmeübergangszahl auf der Luftseite im Außenraum quer durch das Rohrbündel wird nach VDI-Wärmeatlas (1988) für Querströmung durch fluchtende Rohre berechnet. Aus dem Querteilungsverhältnis $a = t_q/d$ und dem Längsteilungsverhältnis $b = t_l/d$ wird ein Hohlraumanteil von

$$\psi = 1 - \pi / (4a)$$

und ein Rohranordnungsfaktor für fluchtende Rohrreihen von

$$f_A = 1 + \frac{0.7}{\psi^{1.5}} \cdot \frac{(b/a - 0.3)}{(b/a + 0.7)^2}$$

berechnet.

Die Reynolds-Zahl wird mit der Überströmlänge ℓ , dem Hohlraumanteil ψ und der Geschwindigkeitskomponente w quer zum Rohrbündel im freien Querschnitt vor dem Rohrbündel gebildet.

$$Re = \frac{w \ell}{\psi \nu}$$

Die mit Hilfe der Reynolds-Zahl zu berechnende Nusselt-Zahl besteht aus einem laminaren Anteil

$$Nu_\ell = 0.664 \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr}$$

und einem turbulenten Anteil

$$Nu_t = \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)} \cdot$$

Aus Nu_ℓ und Nu_t ergibt sich die Nusselt-Zahl für eine Rohrreihe zu

$$Nu_o = 0.3 + \sqrt{Nu_\ell^2 + Nu_t^2}$$

Für ein Rohrbündel erhält man mit dem Rohranordnungsfaktor f_A

$$Nu_B = f_A Nu_0$$

Bei Bündeln mit weniger als zehn Rohrreihen spielt die Anzahl N der Rohrreihen eine Rolle, so dass gilt:

$$Nu_B = \frac{1 + (N-1) f_A}{N} Nu_0 .$$

Die Wärmeübergangszahl α berechnet sich schließlich mit der Überströmlänge ℓ aus

$$Nu_B = \frac{\alpha \ell}{\lambda} .$$

A.1.5 Druckabfälle

Die Druckabfälle in den einzelnen Kreisläufen setzen sich zusammen aus Druckabfällen infolge Beschleunigung, Reibung, plötzlichen Querschnittsverengungen und Querschnittserweiterungen und Druckabfällen in Rohrbündeln. Die Summe der Druckabfälle in einem Kreislauf kann aufgebracht werden durch eine Pumpe, durch Auftrieb oder durch eine Kombination dieser beiden Mechanismen.

$$\sum \xi_i \frac{\rho_i}{2} w_i^2 = \Delta \rho g H + \Delta p_p$$

Soll der Antrieb durch Auftrieb erfolgen, das heisst durch eine schwere kalte Fluid-Säule in der Fall-Leitung und eine leichte warme Fluid-Säule in der Steig-Leitung, so ist zur Minderung der Druckverluste darauf zu achten, dass im ganzen Strömungspfad sanfte geometrische Übergänge vorhanden sind, da ansonsten die notwendige treibende geodätische Höhe H stark ansteigt. Die Dichte des Mediums ergibt sich aus den vorgegebenen Temperaturen. Die Geschwindigkeit ergibt sich aus den Strömungsquerschnitten A_i der gegebenen Geometrie und den berechneten Massenströmen.

A.1.5.1 Druckverluste in Rohren und im Außenraum längs der Rohre

Der Beschleunigungsdurchverlust Δp_b berechnet sich zu

$$\Delta p_b = \frac{\rho}{2} w^2 .$$

Der Reibungsdruckverlust Δp_R berechnet sich nach der Beziehung

$$\Delta p_R = \xi_R \frac{\rho}{2} w^2$$

mit dem Druckverlustbeiwert ξ_R von

$$\xi_R = \xi \frac{L}{D_h}$$

wobei gilt:

$$\begin{aligned}\xi &= 64 / Re && \text{für } Re < 3000, \\ \xi &= 0.3164 / Re^{1/4} && \text{für } Re > 3000.\end{aligned}$$

Die Reynolds-Zahl wird berechnet nach

$$Re = \frac{w D_h}{\nu} .$$

Für den Druckverlust Δp_A beim Austritt aus einem Rohr gilt

$$\Delta p_A = \xi \frac{\rho}{2} w^2$$

mit

$$\xi = 1 - \frac{A_i}{A_k} .$$

Ist der Strömungsquerschnitt A_k , in den das Fluid eintritt, groß gegen den Querschnitt A_i , aus dem das Fluid austritt, so gilt $A_i/A_k \rightarrow 0$, so dass $\xi = 1$ wird.

Der Eintrittsdruckverlust Δp_E bei plötzlicher Querschnittsverengung bei Rohrbündeln mit abgerundetem Einlauf ist

$$\Delta p_E = \xi \frac{\rho}{2} w_E^2$$

mit

$$\xi = 0.05 .$$

A.1.5.2 Druckverlust im Luftkühler

Die Druckverlustberechnung bei der Strömung quer zu Rohrbündeln und für fluchtende Rohranordnung erfolgt nach VDI-Wärmeatlas (1988). Es gilt:

Querteilungsverhältnis:

$$a = t_q/d .$$

Längsteilungsverhältnis:

$$b = t_l/d .$$

Strömungsgeschwindigkeit im engsten Querschnitt:

$$w_e = \frac{a}{a-1} w .$$

Anordnungsfaktor $f_{a,l,f}$ für fluchtende Rohre im laminaren Bereich:

$$f_{a,l,f} = \frac{280 \pi \left[(b^{0.5} - 0.6)^2 + 0.75 \right]}{(4 a b - \pi) a^{1.6}}$$

Anordnungsfaktor $f_{a,t,f}$ für fluchtende Rohre im turbulenten Bereich:

$$f_{a,t,f} = \left[0.22 + 1.2 \frac{(1 - 0.94/b)^{0.6}}{(a - 0.85)^{1.3}} \right] 10^{0.47(b/a - 1.5)} + [0.03(a - 1)(b - 1)]$$

Einfluss der nicht-isothermen Strömung im turbulenten Bereich:

$$f_{z,t} = \left(\frac{\eta_w}{\eta} \right)^{0.14}$$

wobei η_w die dynamische Zähigkeit bei der Wandtemperatur T_w ist.

Einfluss der Anzahl der Rohrreihen N_R im laminaren Bereich:

$$f_{zn,l} = \left(\frac{\eta_w}{\eta} \right) \left\{ \frac{0.57 \left(\frac{N_R}{10} \right)^{0.25}}{[(4 a b / \pi - 1) Re]^{0.25}} \right\}$$

Einfluss des Austrittsdruckverlustes für den turbulenten Bereich bei kleiner Rohrreihen-Anzahl:

$$f_{n,t} = \xi_0 \left(\frac{1}{N_R} - \frac{1}{10} \right)$$

mit $\xi_0 = \frac{1}{a^2}$.

Unkorrigierter laminarer Druckverlust-Beiwert für fluchtende Rohranordnung:

$$\xi_l = \frac{f_{a,l,f}}{Re}$$

Unkorrigierter turbulenter Druckverlust-Beiwert für fluchtende Rohranordnung:

$$\xi_t = \frac{f_{a,t,f}}{Re^{0.1(b/a)}}$$

Druckverlustbeiwert für fluchtende Rohranordnung:

$$\xi = \xi_l f_{zn,l} + (\xi_t f_{z,t} + f_{n,t}) \left[1 - \exp\left(-\frac{Re + 1000}{2000} \right) \right]$$

Druckverlust durch Rohrbündel:

$$\Delta p_R = \xi N_R \frac{\rho}{2} w_e^2$$

Die Druckverlustberechnung bei stetiger Querschnitts-Verengung und –Erweiterung erfolgt nach VDI-Wärmeatlas (1988).

Bei konstruktiv günstiger Gestaltung ist der Druckverlust-Beiwert ξ_V bei stetiger Verengung:

$$\xi_V = 0.04 \quad .$$

Bei ebenfalls günstiger Gestaltung erreicht man bei stetiger Erweiterung einen Druckverlust-Beiwert ξ_E von:

$$\xi_E = 0.2 \quad .$$

Für die Summe aus Verengung und anschließender Erweiterung ergibt sich somit ein Beiwert ξ von:

$$\xi = 0.24 \quad .$$

Der gesamte Druckverlust bei stetiger Querschnitts-Verengung und –Erweiterung Δp_B ist dann:

$$\Delta p_B = \xi \frac{\rho}{2} w^2 \quad .$$

A.2 Stoffdaten

Für die Berechnungen mit dem Rechenprogramm ADSCLS werden für Blei-Wismut (Pb-Bi) für das Wärmeträgeröl Diphyl THT die in Tabelle 5 angegebenen Stoffdaten verwendet.

Tabelle 5: Stoffdaten für Blei-Wismut Pb-Bi und das Wärmeträgeröl Diphyl THT.

Physik. Größe	Einheit	lead-bismuth Pb ⁴⁵ Bi ⁵⁵ <i>T</i> = 400°C	Wärmeträgeröl Diphyl THT <i>T</i> = 260°C
Dichte, ρ	<i>kg/m</i> ³	10570	846
dyn. Viskosität, μ	<i>Pa s</i> 10 ⁻⁶	3360	530
kin. Viskosität, ν	<i>m</i> ² / <i>s</i> 10 ⁻⁶	0.32	0.63
spec. Wärmekapazität, c_p	<i>kJ / kg / K</i>	0.146	2.36
Molek. Wärmeleitfähigkeit, λ	<i>W / m / K</i>	10.9	0.103
Molek. Diffusivität, Γ	<i>m</i> ² / <i>s</i> 10 ⁻⁶	7.1	0.0516
Vol. Ausdehnungskoeffizient, β	<i>1 / K</i> 10 ⁻⁴	1.2	
mol. Prandtl-Zahl, <i>Pr</i>	1	0.045	12.2
Schmelztemperatur, T_m	°C	125	-
Siedetemperatur, T_b	°C	1670	352