

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7570

# **Technische Beschreibung der Versuchsanlage ALINA zur Untersuchung eines Natrium-Freistrahls**

M. Daubner, F. Fellmoser, L. Stoppel

Institut für Kern- und Energietechnik



M. Daubner, F. Fellmoser, L. Stoppel

**Technische Beschreibung der Versuchsanlage ALINA  
zur Untersuchung eines Natrium-Freistrahls**

Karlsruhe Institute of Technology  
**KIT SCIENTIFIC REPORTS 7570**

# Technische Beschreibung der Versuchsanlage ALINA zur Untersuchung eines Natrium-Freistrahls

von  
M. Daubner,  
F. Fellmoser,  
L. Stoppel

Institut für Kern- und Energietechnik

**Report-Nr. KIT-SR 7570**

### **Impressum**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales  
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz  
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2011  
Print on Demand

ISSN 1869-9669  
ISBN 978-3-86644-620-5

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen des FAIR Projekts am GSI wird für den neu zu entwickelnden supraleitenden Fragmentseparator (Super-FRS) eine leistungsfähige Target-Anlage benötigt. In einer Design-Studie der NUSTAR-Kollaboration soll gezeigt werden, dass es möglich ist, einen flüssigen Lithium- bzw. Natrium-Freistrahler zu erzeugen, der die Anforderungen an Form, Genauigkeit und Stabilität einhält, um ihn mit Ionenstrahlen beschleunigen zu können. Die dafür erforderlichen experimentellen Arbeiten werden in der am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) entwickelten und gebauten Testanlage ALINA (Karlsruher Lithium- u. Natrium-Freistrahlexperimente) durchgeführt.

Der Bericht gibt eine detaillierte technische Beschreibung der drei zur Anlage gehörenden Kreislaufsysteme mit ihren wesentlichen Komponenten und ihrer Instrumentierung. Es werden die verschiedenen Betriebszustände vorgestellt und die aus der Inbetriebnahme gewonnenen anlagenspezifischen Daten gezeigt.

## **Abstract**

Within the scope of the FAIR project at GSI an efficient target arrangement is required for the prospective superconductive fragment separator (Super-FRS). In a design study of the NUSTAR collaboration it has to be shown that it is possible to generate a liquid lithium or sodium free jet which satisfies the requirements of form, accuracy and stability to be able to work as a ion beam target. The experimental works necessary for this intention are carried out in a test facility called ALINA (Karlsruhe experiments with Li and Na free jet) which was developed and built at the Institute for Nuclear and Energy Technologies (IKET).

The present report gives a detailed technical description of the three loop systems belonging to the facility, showing its essential components and its instrumentation. The different operating conditions are introduced as well as specific data gained by the commissioning process.



## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Zielsetzung .....	1
2	Flüssigmetallkreislauf ALINA.....	3
2.1	Kreislaufschema, 3D-Ansicht.....	3
2.2	Sumpftank und Ventile.....	5
2.3	Freistrahls-Teststrecke .....	6
2.4	Elektromagnetische Pumpe P001 .....	8
2.5	Na/Öl-Wärmetauscher W001.....	10
2.6	Erhitzer W002 .....	11
2.7	Reinigungsstrecke mit Kaltfalle W003 .....	11
2.8	Instrumentierung.....	12
3	Diphyl-Ölkühlkreislauf.....	15
3.1	Kreislaufschema .....	15
3.2	Pumpe P002 .....	16
3.3	Wärmetauscher W005 .....	17
3.4	Gebälse G002.....	18
3.5	Instrumentierung.....	19
4	Gas- und Vakuumsystem .....	21
4.1	Kreislaufschema .....	21
4.2	Instrumentierung.....	23
5	Vorgänge und Betriebszustände der Anlage.....	25
5.1	Füllen, Reinigen, Normalbetrieb .....	25
5.2	Ereignis-Maßnahmen-Katalog .....	26
6	Kenndaten der Anlage.....	31
6.1	Pumpen- und Anlagenkennlinie.....	31
6.2	Leistungsfähigkeit des Na-Diphyl-Wärmetauschers .....	32
7	Betriebsüberwachung.....	33
7.1	Anlagensteuerung.....	33
7.2	Messdatenerfassung, ZEUS-System.....	34
8	Literatur .....	37
Anhang A	Messstellenliste .....	39
Anhang B	Ergänzende Zeichnungen und Fotos .....	43
Anhang C	Stoffeigenschaften von Natrium .....	47

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1	Bestehende (blau) und neue, geplante (rot) Beschleunigeranlage	1
Abb. 2-1	Kreislaufschema des Flüssigmetallteils	3
Abb. 2-2	3D-Gesamtansicht	4
Abb. 2-3	Sumpftank und Zulaufleitung zum Hauptkreis	5
Abb. 2-4	3D-Schnittansicht der Freistrah-Teststrecke	6
Abb. 2-5	Strömungskonditionierung und Rechteck-Düse	7
Abb. 2-6	Lineare Flachkanal-Induktionspumpe von ALINA	8
Abb. 2-7	Konstruktionszeichnung des EM-Pumpen-Flachkanals	9
Abb. 2-8	Natrium-Öl-Wärmetauscher	10
Abb. 2-9	Natrium-Eckerhitzer-Konstruktion	11
Abb. 2-10	Ölgekühlte Natrium-Kaltfalle	11
Abb. 2-11	Durchflussmesser Coriolis F1 und Magnet F2	13
Abb. 3-1	Diphyl-Öl-Kreislauf	15
Abb. 3-2	Kennlinien der Allweiler-Kreiselpumpe im Ölkreislauf	16
Abb. 3-3	Öl-Luft-Wärmetauscher mit Gebläse und Ölpumpe	17
Abb. 3-4	Kennlinien des Piller-Radialventilators zur Kühlung von W005	18
Abb. 3-5	Vortex-Durchflussmesser (F3) im Diphyl-Ölkreislauf	19
Abb. 4-1	Kreislaufschema des Gas- und Vakuumsystems	21
Abb. 4-2	Drucksensoren im Gas- und Vakuumsystem	23
Abb. 4-3	Kulite-Drucksensor mit Messumformer AW980	23
Abb. 6-1	Pumpen- und Anlagenkennlinie ALINA 200°C	31
Abb. 6-2	Pumpen- und Anlagenkennlinie ALINA bei 300°C	31
Abb. 6-3	Wärmeströme und k-Werte des Na/Öl-Wärmetauschers W001	32
Abb. 7-1	Beckhoff-Buskoppler BK3100 mit Messklemmen	33
Abb. 7-2	Prinzip des ZEUS-Systems	34
Abb. 7-3	Flussbild-HMI der ALINA-Anlage	35
Abb. 7-4	Sollwerteingabe-HMI für Begleitheizungen	36
Abb. B-1	Natrium-Diphyl-Wärmetauscher W001	43
Abb. B-2	Diphyl-Luft-Wärmetauscher W005	44
Abb. B-3	Gebäudeübersicht der geplanten Beschleunigeranlage FAIR am GSI	45
Abb. B-4	Foto der ALINA-Anlage mit thermischer Isolation bei Inbetriebnahme	45
Abb. B-5	Natriumfreistrah mit einer mittleren Geschwindigkeit von 2,5m/s und einer Temperatur von 200°C am Austritt aus der Rechteckdüse	46
Abb. B-6	Freistrah-Teststrecke ohne thermische Isolation	46
Abb. C-1	Dichte des Natriums im Temperaturbereich von ALINA	47
Abb. C-2	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des Natriums	47
Abb. C-3	Temperaturabhängige kinematische Viskosität des Natriums	48
Abb. C-4	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Natriums	48
Abb. C-5	Temperaturabhängige Prandtlzahl des Natriums	49

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Die bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt geplante neue Teilchenbeschleuniger-Anlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) wird ab 2016 weltweit einzigartige Experimente ermöglichen [1]. Durch dieses internationale Forschungsprojekt erhoffen sich Physiker neue Einblicke in die Struktur der Materie und die Evolution des Universums.

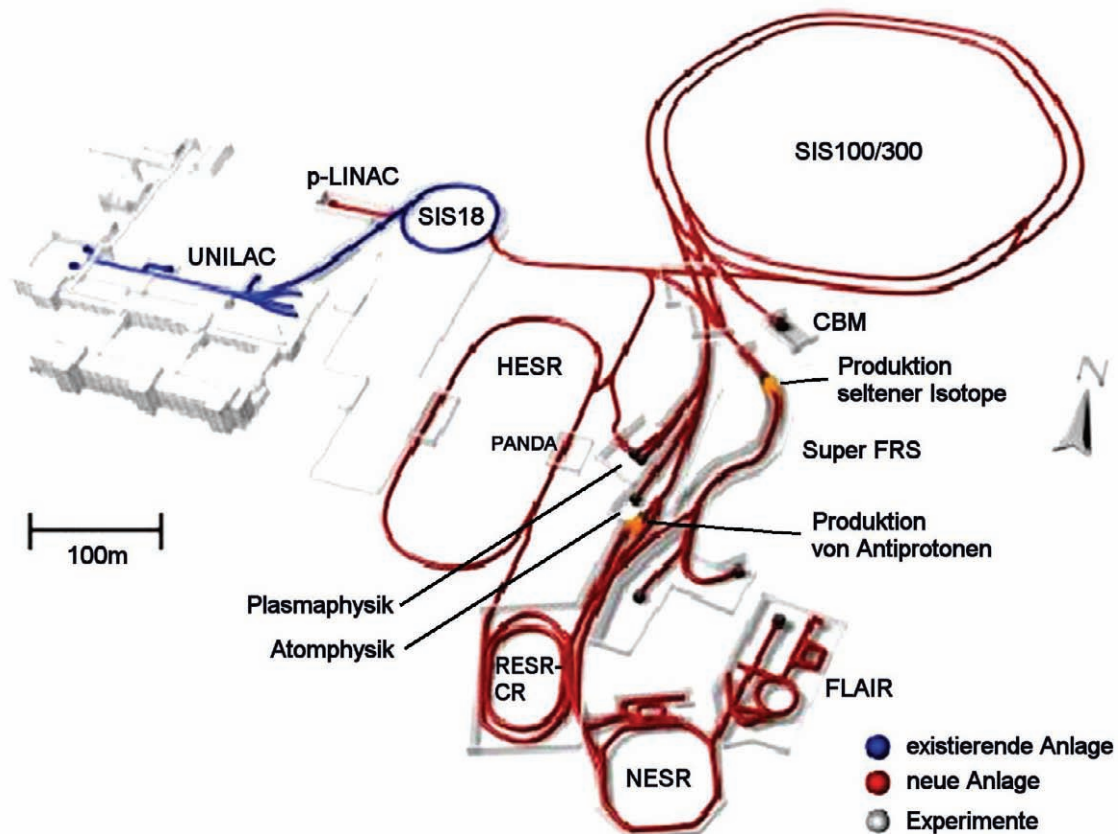


Abb. 1-1 Bestehende (blau) und neue, geplante (rot) Beschleunigeranlage

Die in Abbildung 1-1 in blau gezeigte, bisherige Beschleunigeranlage wird der neuen Anlage als Vorbeschleuniger (Injektor) dienen. Das Herzstück des FAIR ist ein supraleitender Doppelringbeschleuniger, bestehend aus zwei Synchrotrons SIS100 und SIS300, mit 1100 m Umfang. An diesen schließt sich ein komplexes System aus Speicherringen und Experimentierstationen an. Mit der neuen Anlage können Ionenstrahlen aller Art von Protonen bis Uran mit bisher unerreichter Intensität erzeugt werden. Darüber hinaus sollen Sekundärstrahlen erzeugt werden, die auf der Erde natürlicherweise nicht vorkommen, indem stabile Ionen auf Materialfolien, auch Targets genannt, geschossen werden. Dabei werden die Atomkerne in unzählige Bruchstücke fragmentiert. Von größtem Interesse sind die dabei entstehenden Antiprotonen und extrem protonen- und neutronenreiche Atomkerne. Im neuen Super-Fragment-Separator sollen letztere zu den so genannten Rare Isotop Beams (RIBs) gebündelt werden.

Grundvoraussetzung für eine kontinuierliche Produktion dieser RIBs ist allerdings die Langzeitverfügbarkeit eines entsprechenden Targets. Da alle bisherigen Targets, wie z.B. ein schnell rotierendes Kohlenstoffrad, der Intensität der neuen Ionenstrahlen nur kurze Zeit gewachsen sein werden, wurde an ein Freistrahl-Target aus Flüssigmetall gedacht, das problemlos in der Lage wäre, die eingebrachte Wärmeleistung über Wärmetauscher abzuführen. In einer Design-Studie der NUSTAR-Kollaboration soll gezeigt werden, dass es möglich ist, einen flüssigen Lithium- bzw. Natrium-Freistrahl zu erzeugen, der die Kriterien für die Rechteckform, Maßgenauigkeit und Stabilität so gut erfüllt, dass er beispielsweise mit Uran-Ionenstrahlen beschossen werden kann [2] [3] [4].

Um die dafür erforderlichen experimentellen Arbeiten durchführen zu können, wurde am Institut für Kern- und Energietechnik (IKET) die hier vorgestellte Testanlage ALINA (Karlsruher Lithium- u. Natrium-Freistrahlexperimente) entwickelt und gebaut.

## 2 Flüssigmetallkreislauf ALINA

### 2.1 Kreislaufschema, 3D-Ansicht

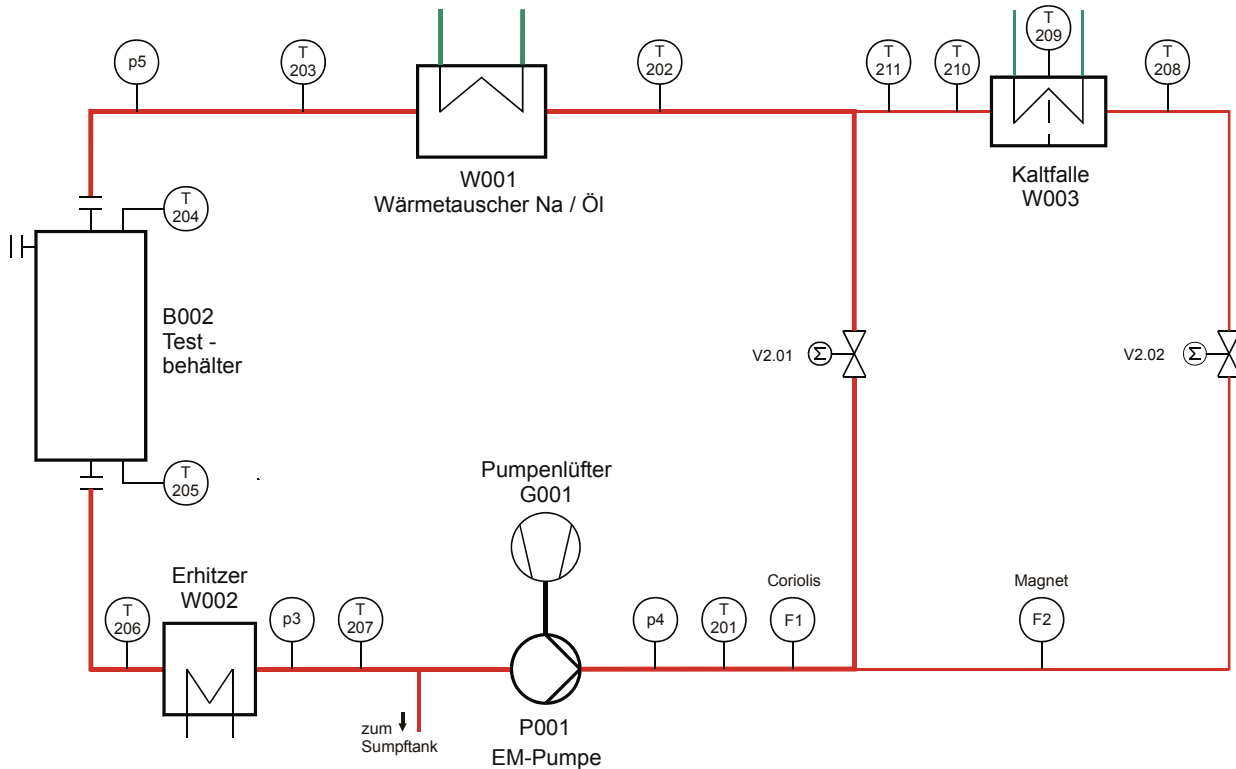


Abb. 2-1 Kreislaufschema des Flüssigmetallteils

Wie aus dem Schema ersichtlich wird, besteht der Hauptkreislauf neben dem Testbehälter im Wesentlichen aus dem Erhitzer (W002), der Pumpe (P001) mit Kühlung, einem Hauptventil (V2.01) und dem ölgekühlten Wärmetauscher (W001). Im Nebenkreislauf befindet sich lediglich ein Ventil (V2.02) und die so genannte Kaltfalle (W003), die ebenfalls mit Öl gekühlt wird. Alle Komponenten, wie auch das gesamte Rohrleitungssystem, sind aufgrund der Betriebstemperatur von bis zu maximal 300°C mit Begleitheizungen versehen und mit 20 cm Steinwolle isoliert. Die Betriebsinstrumentierung besteht aus mehreren Temperatur- und Drucksensoren, sowie zwei Durchflussmessern für Haupt- und Nebenkreis. In Abbildung 2-2 wird die 3D-Anordnung der Komponenten ersichtlich. Dabei wurden die Teile des Natrium-Hauptkreislaufs rot eingefärbt, der Ölkreislauf grün und schließlich zum Gassystem gehörende Teile blau. Abbildung 2-2 zeigt den für Flüssigmetallsysteme typischen Aufbau [7] [8] [9] mit einem Sumpftank für eine Notablassmöglichkeit bei Leckage und einem für flüssige Alkalimetalle typischen Nebenkreis mit Kaltfalle zur Reinigung der Flüssigkeit von Oxiden, beides in orange dargestellt.

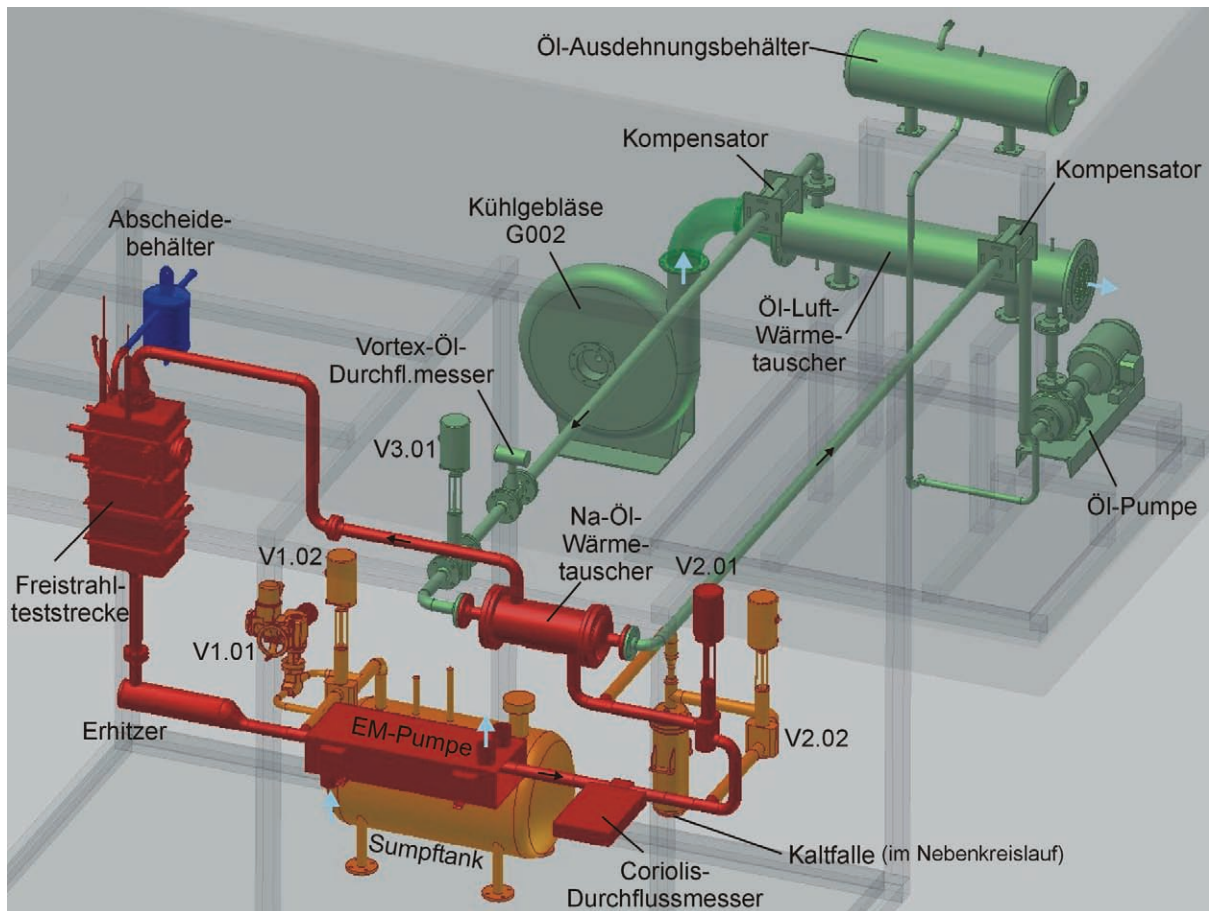


Abb. 2-2 3D-Gesamtansicht

Das gesamte Kreislaufsystem, inklusive Öl- und Gassystem wurde aus nahtlos gezogenen Edelstahlrohren (1.4571) angefertigt. Der Nenndurchmesser der Rohrleitungen beträgt aufgrund des angestrebten Durchsatzes von bis zu 12 m<sup>3</sup>/h DN50 d.h. es wurden Standardrohre der Größe Ø60,3x2,9 verwendet. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten näher beschrieben.

## 2.2 Sumpftank und Ventile

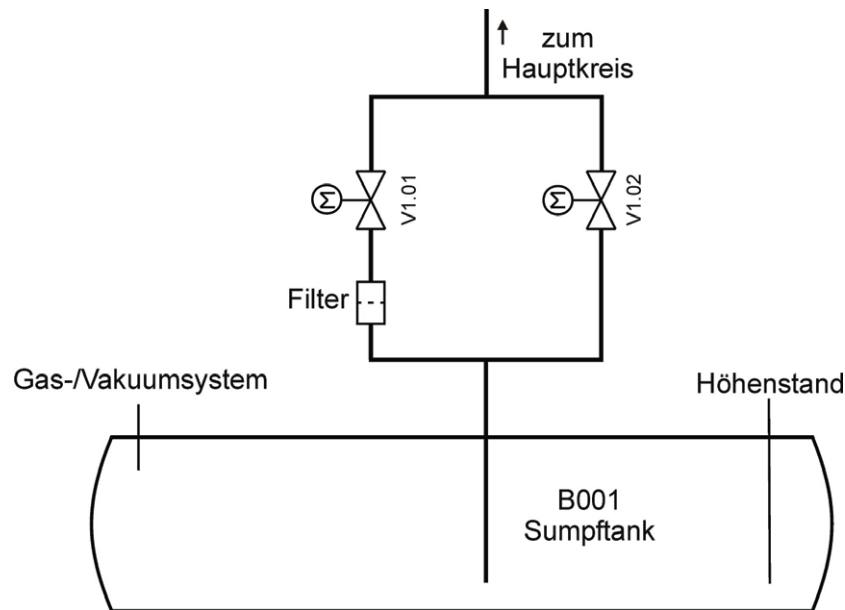


Abb. 2-3 Sumpftank und Zulaufleitung zum Hauptkreis

Bei dem Sumpftank handelt es sich um einen 300 Liter Edelstahlbehälter der Firma Ned. Doken Scheepsbouw mit einem Durchmesser von 610 mm, einer Gesamtlänge von 1190 mm und einer Wandstärke von 5 mm. Der Nenndruck beträgt 2 bar, die maximale Temperatur 600°C. Neben dem Stutzen für das Gassystem und dem ins Natrium hineinragende Tauchrohr verfügt der Sumpftank zusätzlich über einen Flansch zur Messung der Natriumtemperaturen sowie zur Feststellung des Höhenstandes über Elektroden. Er ist mit ca. 100 l Natrium gefüllt.

Um den Kreislauf zu füllen, wird über den Gasstutzen auf der Natriumoberfläche ein dem Kreislauf gegenüber erhöhter Gasdruck eingestellt, sodass das Natrium nach Öffnen des Füllventils V1.01 über das Tauchrohr und den Filter in den Kreislauf steigt. Der Filter besteht hauptsächlich aus einem gesinterten Edelstahlrohr der Firma GKN-Sintermetals, das mit gesintertem Deckel in ein Reduzierstück eingeschweißt wurde. Die Füllleitung wurde als Verzweigung zu einer direkten Ablassleitung gebaut. Da im Notfall der Ablassvorgang schnell vonstatten gehen muss, wurde als Ablassventil ein mit den Ventilen V2.01 und V2.02 baugleiches Ventil der Fa. Kämmer mit großem Durchmesser (DN50) eingeschweißt, während das Füllventil der Fa. KSB die Nennweite DN25 besitzt. Alle verwendeten Ventile sind Motorventile aus Edelstahl mit eingeschweißtem Balg zur Vermeidung von Undichtheiten. Um in jedem Fall sicherzustellen, dass das Natrium im Notfall abgelassen werden kann, wurde in die elektrische Versorgung der Ventilmotoren eine unterbrechungsfreie Stromversorgungseinheit (USV) eingebaut.

### 2.3 Freistrahl-Teststrecke

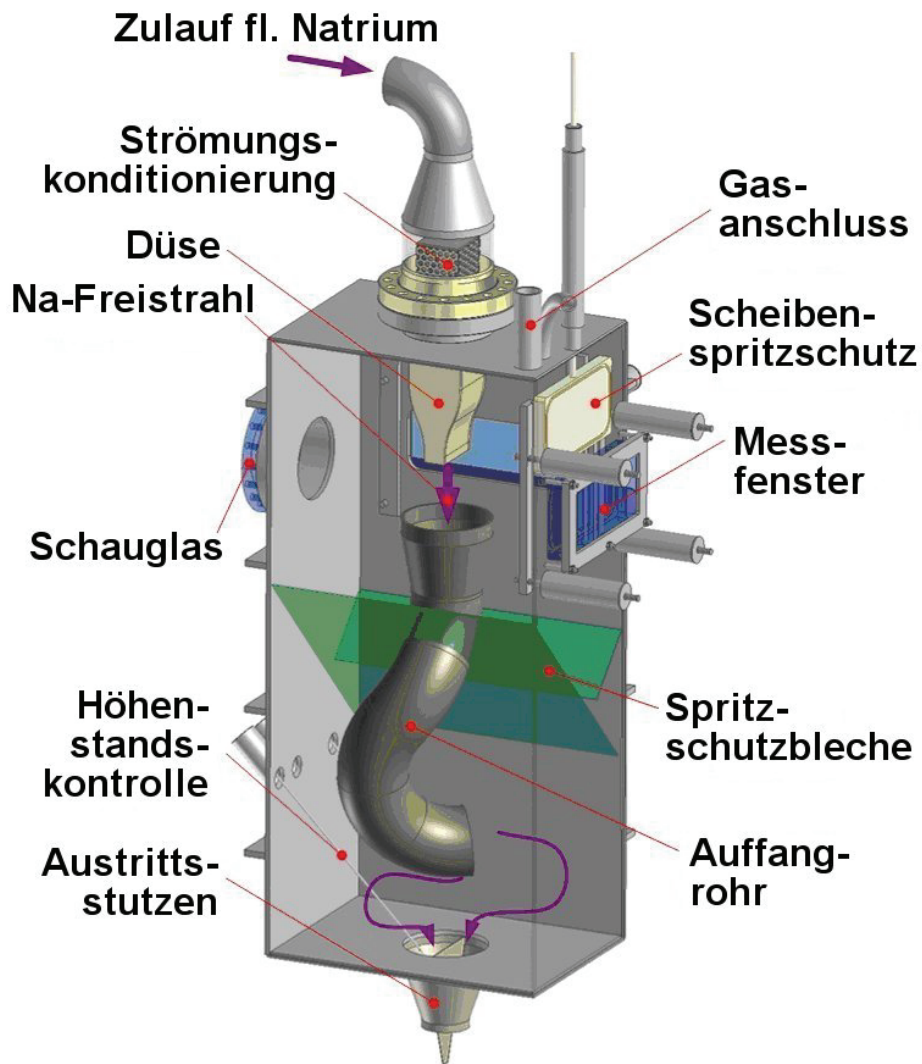


Abb. 2-4 3D-Schnittansicht der Freistrahl-Teststrecke

Die Konstruktion der Teststrecke zur Untersuchung eines in einer Rechteckdüse erzeugten Natrium-Freistrahls basiert auf dem Design und den Erfahrungen aus den entsprechenden Experimenten einer Wasserteststrecke, sowie umfangreichen numerischen Untersuchungen [5]. Wie in Abbildung 2-4 gezeigt, besteht sie im Wesentlichen aus dem in den Testbehälter integrierten Strömungskonditionierer mit anschließender Düse und dem speziellen Auffangrohr.

Das in KALLA gebaute Modul hat einen rechteckigen Außenbehälter mit zwei runden Schaugläsern und zwei rechteckigen Messfenstern, die über Balgschieber mit Edelstahlplatten vor spritzendem Natrium z.B. beim Anfahren geschützt werden. Die Quarzglasscheiben der Messfenster können mithilfe dieser gedichteten Platten im Falle eines Glasdefektes aber auch in situ gewechselt werden und dienen außerdem dem so genannten „Double Layer Projection (DLP)“- Messverfahren [6] gleichzeitig als Projektionsebenen für Laserpunkte. Zur Stabilisierung der rechteckigen Behälter-Außenform und damit zur Gewährleistung der Dichtheit der Fenster wurden am Testbehälter zusätzlich Flacheisen angepunktet, sodass



Temperaturerhöhungen und Vakuumziehen nahezu ohne Einfluss bleiben (siehe Foto im Anhang B). Die Abmessungen des Testbehälters betragen  $257 \times 366 \times 800 \text{ mm}^3$ , womit er ein Innenvolumen von etwa 73 l erhält. Beim Anfahren des Kreislaufs wird ein Teil der zunächst gut angefüllten unteren Behälterhälfte benötigt, um das leere Zulaufrohr, den Konditionierer und die Düse anzufüllen.

Die Strömungskonditionierung vor der Düse ist notwendig, um die durch Umlenkung und Transition von rundem zu rechteckigem Querschnitt verursachten Turbulenzen zu verringern. Die Anordnung besteht, wie in Abbildung 2-5 zu erkennen, aus einem rechteckigen Lochkorb mit Prallplatte oben und dem daran anschließenden Gleichrichter im Rechteckkanal. Sodann folgt eine kontinuierliche Verengung des Querschnittes in der Düse von  $63 \times 57,6 \text{ mm}^2$  auf  $63 \times 14,4 \text{ mm}^2$  am scharfkantigen Austritt des Freistrahls. Die Form der Düse (Polynom 5. Ordnung in Strömungsrichtung) wurde über eine numerische Simulation optimiert, sodass der Einfluss der Grenzschichten durch adäquate Beschleunigung der Strömung minimiert werden kann.

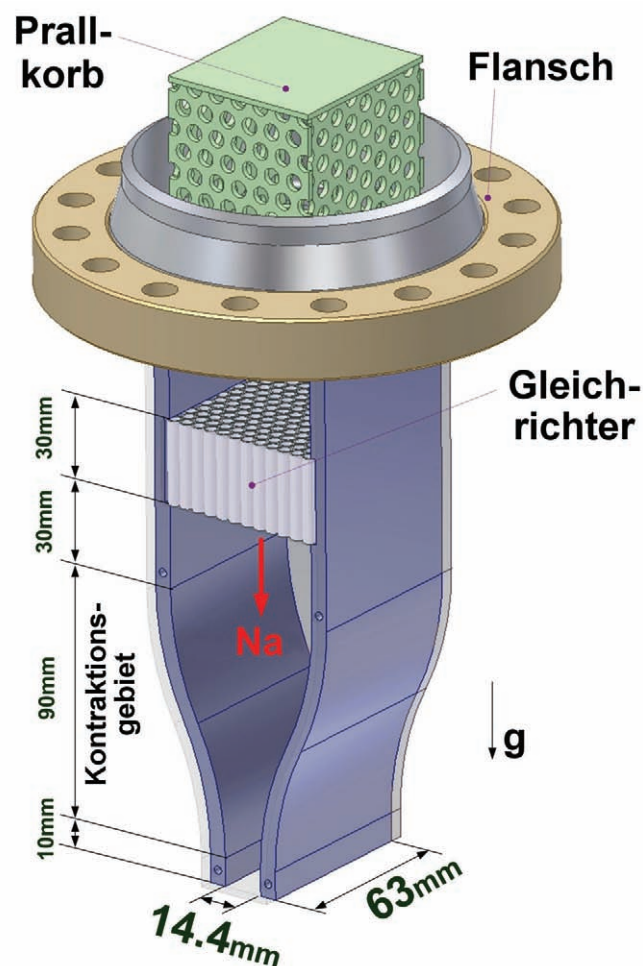


Abb. 2-5 Strömungskonditionierung und Rechteck-Düse

## 2.4 Elektromagnetische Pumpe P001

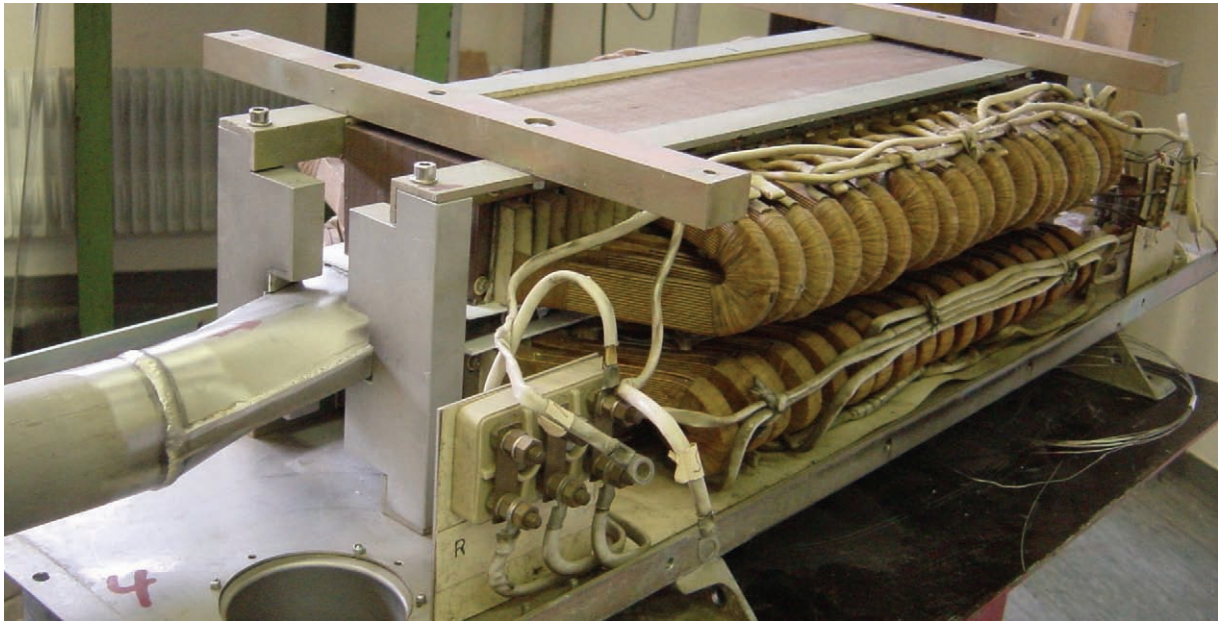


Abb. 2-6 Lineare Flachkanal-Induktionspumpe von ALINA

Bei Anlagen mit flüssigen Alkalimetallen, die bei einer Leckage sofort mit der Luftfeuchtigkeit reagieren würden, versucht man unter allen Umständen undichte Stellen zu vermeiden. Hier bietet sich bei den hervorragenden elektrischen Eigenschaften des Natriums eine lineare Flachkanal-Induktionspumpe an, wie in Abbildung 2-6 gezeigt. Zwar besitzen diese Pumpen einen relativ schlechten Wirkungsgrad gegenüber herkömmlichen Kreiselpumpen, jedoch erübrigen sich sämtliche Dichtungs- oder Wartungsprobleme, da weder Dichtungen noch Lager oder sonstige bewegte Teile vorhanden sind. Es handelt sich lediglich um einen flachen Edelstahlkanal, der in Spulen- und Eisenpakete eingepackt wurde. Die Spulen sind so angeordnet, dass bei Anschluss von 3 Phasen (Drehstrom) ein Wandermagnetfeld entsteht, wodurch im Flüssigmetall ein wandernder Strom induziert wird. Aus dem Zusammenspiel von Magnetfeld und induziertem Strom resultiert schließlich eine elektromagnetische Lorentzkraft, die das Flüssigmetall beschleunigt. Die in ALINA eingesetzten Spulen der Fa. Zur Bosen Düsseldorf, mit dem in Abbildung 2-7 dargestellten Flachkanal, sind in der Lage einen Natrium-Durchsatz (bei 200°C) von 12m<sup>3</sup>/h bei einem Druck von etwa 1 bar zu erzeugen (siehe Abschnitt 6.1).

Aufgrund ihres kleinen Wirkungsgrades setzt die EM-Pumpe einen beträchtlichen Anteil der eingebrachten Energie einfach nur in Wärme um, die einerseits an das Flüssigmetall, andererseits aber auch an die Spulen abgegeben wird. Um eine Zerstörung der Spulen durch Überhitzung zu vermeiden, wurde für die Pumpe ein geschlossenes Gehäuse mit Kühlgebläseanschluss und Abluftkanal gebaut.

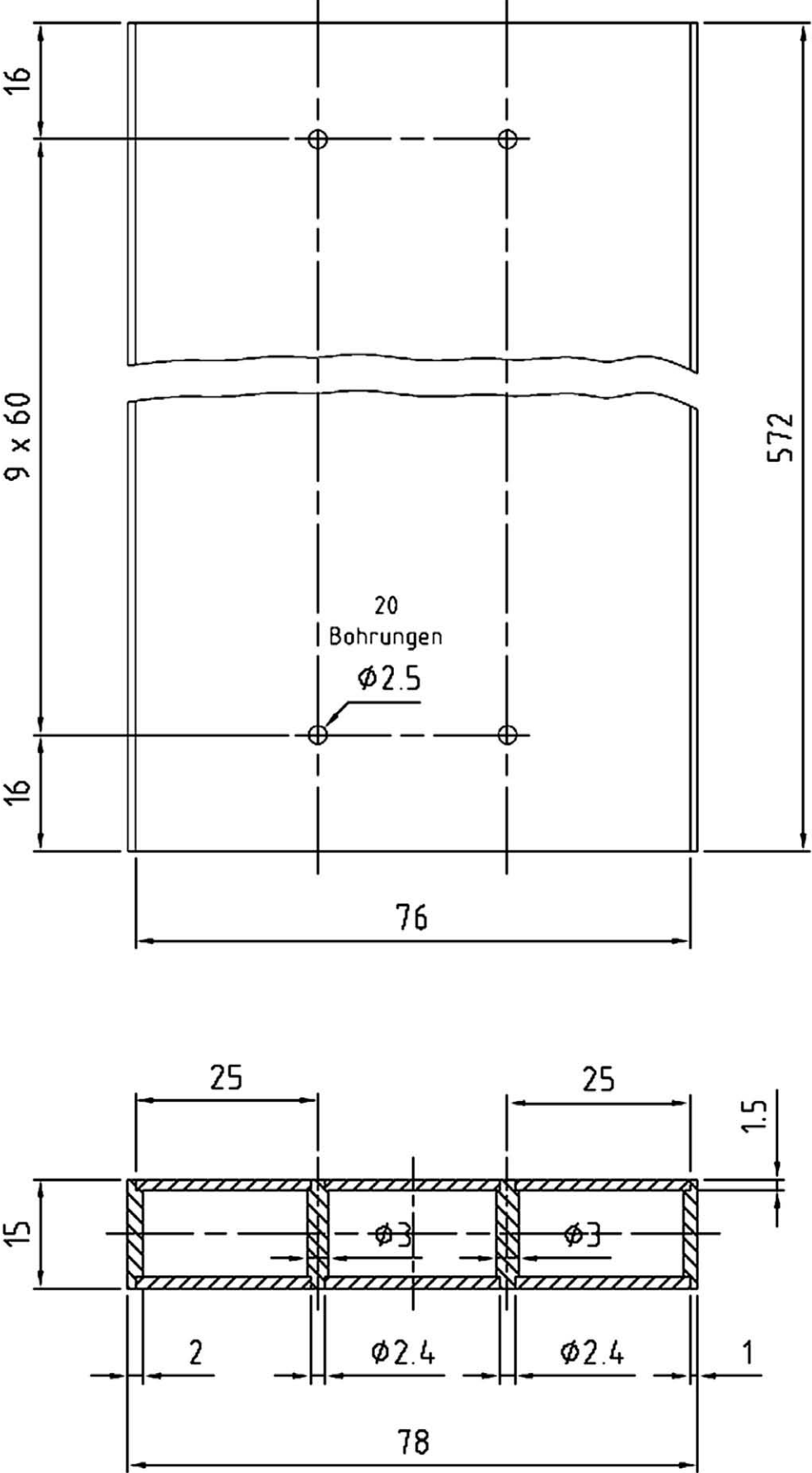


Abb. 2-7 Konstruktionszeichnung des EM-Pumpen-Flachkanals

## 2.5 Na/Öl-Wärmetauscher W001

Bei dem mit Diphyl-THT-Öl gekühlten Natriumwärmetauscher W001 handelt es sich um einen Rohrbündelwärmetauscher aus Edelstahl (1.4541) der Fa. Deller mit einem Durchmesser von 219 mm, einer Gesamtlänge von 850 mm. Er enthält 61 Rohre der Maße  $\text{Ø}12 \times 2,0 \times 500$  mm und zwei Umlenkbleche. Im Anhang B ist ein Auszug der Konstruktionszeichnung der Firma Deller dargestellt. Aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit des Natriums und der schlechten des Öls sind die mittleren Wandtemperaturen der Innenrohre nahezu identisch mit der Außenwand, sodass in der Konstruktion feste Außenplatten ohne Kompensator verwendet werden konnten. Der Wärmetauscher wurde ausgelegt [10] für eine Gesamtleistung von 30 kW, bei einem Natriumdurchsatz von  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  mit  $200^\circ\text{C}$  zwischen den Rohren, sowie einem Diphyl-THT-Öldurchsatz von  $12 \text{ m}^3/\text{h}$  mit  $130^\circ\text{C}$  in den Rohren. Für andere Betriebszustände, wie etwa kleinere Durchsätze oder kleinere Temperaturdifferenzen kann die Wärmeleistung von 30 kW natürlich nicht erreicht werden (siehe auch Abschnitt 6.2).

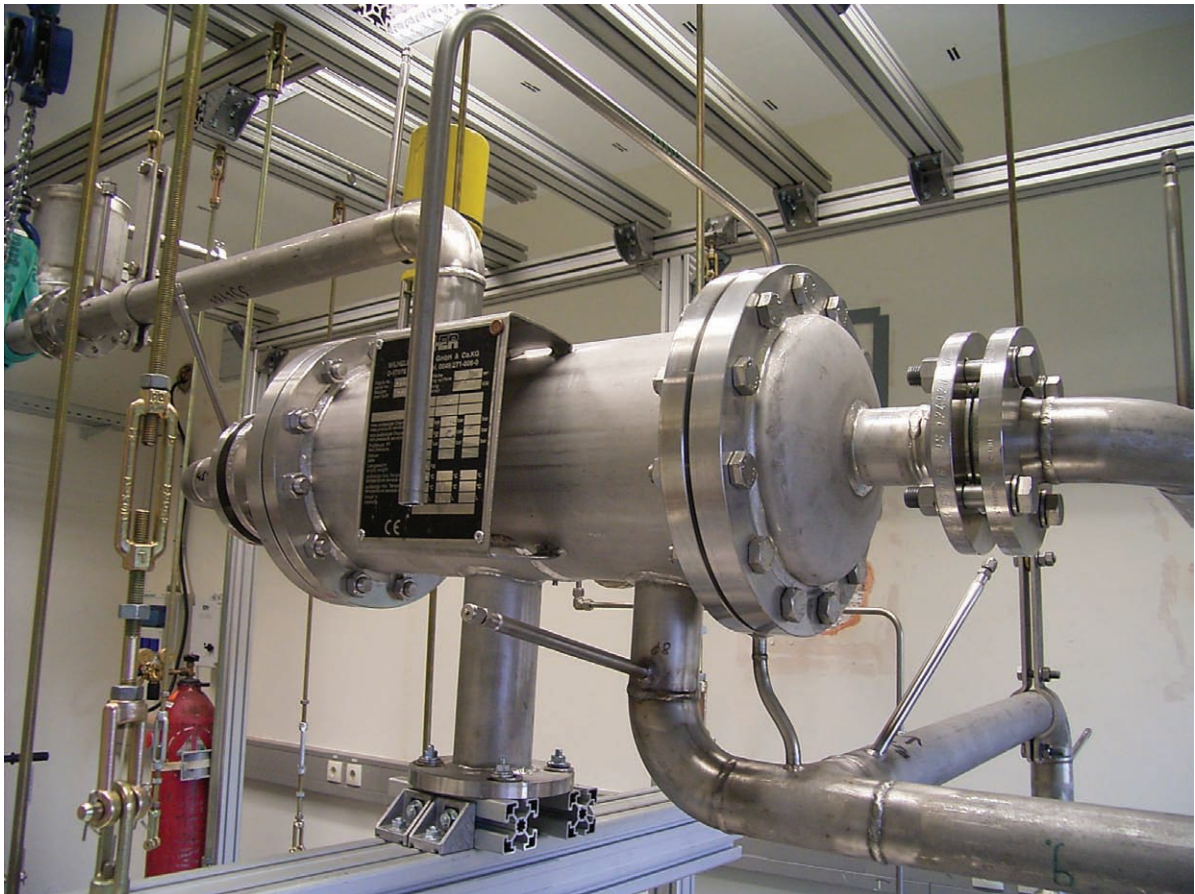


Abb. 2-8 Natrium-Öl-Wärmetauscher

## 2.6 Erhitzer W002

Der Aufbau des verwendeten Erhitzers W002 kann aus Abbildung 2-9 entnommen werden. Er besteht im Grundaufbau aus einem Ringkanal, in den 6 Heizpatronen der Firma Watlow mit einer Leistung von jeweils 6 kW (220 V) eingeschweißt wurden. Der Erhitzer wird einerseits zur Feinregelung der Temperatur und andererseits zum Testen der Leistungsfähigkeit des Wärmetauschers benötigt.

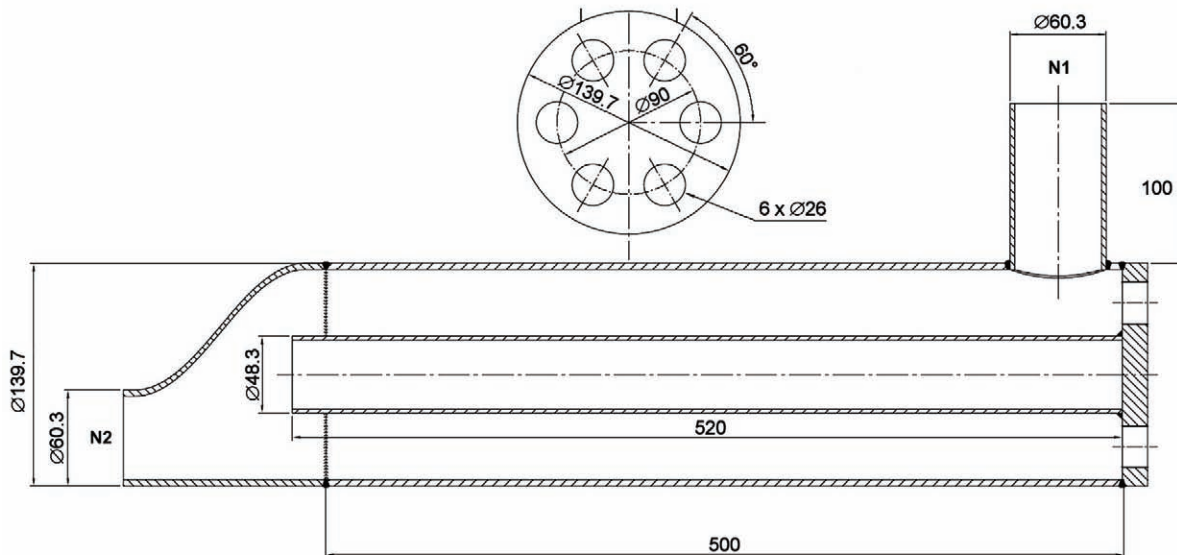


Abb. 2-9 Natrium-Eckerhitzer-Konstruktion

## 2.7 Reinigungsstrecke mit Kaltfalle W003

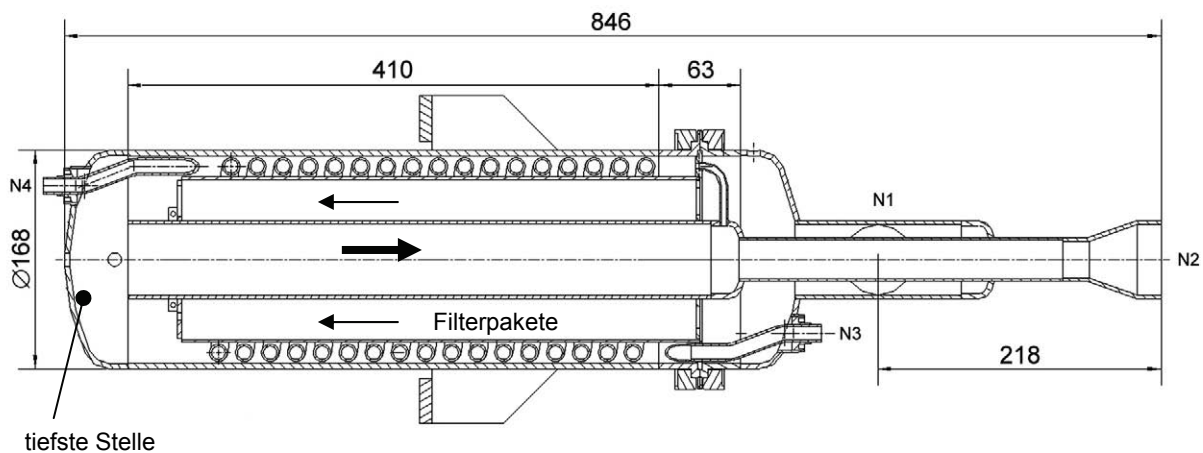


Abb. 2-10 Ölgekühlte Natrium-Kaltfalle

Im Nebenkreis, der zur Reinigung des Natriums von Oxiden dient, befinden sich gemäß Abbildung 2-1 nur das Kämmer-Motorventil V2.02 (DN50) und die so genannte Kaltfalle. Bei der Umstellung von Normalbetrieb auf Reinigungsbetrieb wird zunächst das Ventil V2.02 geöffnet und dann V2.01 langsam geschlossen bis der gewünschte Volumenstromanteil von etwa 1/10 in der Reinigungsstrecke erreicht ist. Nun wird die Kühlleistung über den angeschlossenen Ölkreislauf langsam erhöht, sodass die Temperatur in der Kaltfalle stetig fällt. Wie in der Konstruktionszeichnung (Abbildung 2-10) dargestellt, strömt das Natrium vom Anschluss N1 kommend über einen Ringkanal, der mit Edelstahlfilterpaketen bestückt ist, bis zum untersten Punkt, wo die Strömungsrichtung umgekehrt wird und das Natrium zentral wieder nach oben fließt. Die Abwärtsbewegung erfolgt unter ständiger Abkühlung durch die im Außenringkanal befindliche Öl-Kühlspirale, wohingegen das Natrium in der Aufwärtsbewegung durch Rekuperation wieder wärmer wird. Nach Verlassen der Kaltfalle wird das Flüssigmetall durch enge Wicklungen der Begleitheizung bis zur Rückkehr in den Hauptkreis wieder nahezu auf Hauptkreistemperatur gebracht. Um zunächst möglichst viele Oxide im fließenden Medium in Lösung zu haben, wird mit einer Fluidtemperatur von 300°C im Hauptkreis gearbeitet. Am tiefsten Punkt der Kaltfalle wird bei mäßiger Kühlung zunächst etwa bei einer Natriumtemperatur von 280°C begonnen und schließlich bis 120°C abgekühlt, sofern sich nicht vorher schon ein deutlicher Anstieg des Druckverlustes in der Kaltfalle durch Ausfiltern von Oxiden bemerkbar macht.

### 2.8 Instrumentierung

Bei der verwendeten Betriebsinstrumentierung handelt es sich um Temperatur-, Druck- und Durchflussmessung (siehe Kreislaufschema in Abbildung 2-1). Die Temperaturmessung erfolgt über Thermoelemente. Dabei wurden fast ausschließlich NiCr-Ni-Thermoelemente (Typ K) verwendet. Aufgrund der magnetischen Felder in der EM-Pumpe wurden jedoch zur Messung der Spulentemperaturen Kupfer-Konstantan-Thermoelemente (Typ T) verwendet. Jedes Begleitheizungselement besitzt ein eigenes Regelthermoelement, das auf die Rohrwand geschweißt wurde. Die Messung der Fluidtemperaturen erfolgt in der Mitte der Strömung durch Thermoelemente, die über Swagelok-Verbindungen eingeschraubt wurden. Gemessen werden jeweils die Eintritts- und Austrittstemperatur der Komponenten, also EM-Pumpe (T207, T201), Wärmetauscher (T202, T203), Testbehälter (T204, T205), Erhitzer (T206, T207) und Kaltfalle (T208, T210). Zusätzlich wird am kältesten Punkt der Kaltfalle (T209), sowie direkt vor Wiedereintritt der Reinigungsverzweigung in den Hauptkreis (T211) gemessen. Durch Kalibration wird eine Messgenauigkeit von  $\pm 0,1$  K erreicht.

Die Messung der Drücke erfolgt über Absolutdrucksensoren der Fa. Kulite vom Typ HEM-375M. Der Messbereich liegt zwischen 0 bar (Vakuum) und 3,5 bar und die Messgenauigkeit beträgt  $\pm 0,1\%$ . Es handelt es sich dabei um mediengetrennte, piezoresistive Miniaturdrucksensoren mit Edelstahlmembran und Silikonöl als Druckmittler. Über Messumformer vom Typ AW980 (Abbildung 4-3) werden die Sensoren mit der Brückenspannung versorgt und wahlweise Ausgangswerte von 0 - 10V oder 0 - 20mA erzeugt. Die maximal zulässige Sensortemperatur beträgt 232°C. Da im Kreislauf Temperaturen von bis zu 300°C herrschen, dürfen die Sensoren nur über längere, abkühlende Rohrstücke mit eigener Heizregelung an der Anlage angeschlossen werden. Die Messpositionen beschränken sich hier auf den Ein- und Austritt der Pumpe (p3, p4), sowie den Eintritt in den Testbehälter (p5).

Die Messung des Massenstroms schließlich erfolgt durch einen Coriolis-Durchflussmesser (F1) der Fa. Schwing vom Typ RHM-20-T4-P1. Der Messbereich erstreckt sich bis maximal 300 kg/min, was bei einer Natriumtemperatur von 200°C und der daraus resultierenden Dichte von 904 kg/m<sup>3</sup> etwa 20 m<sup>3</sup>/h entspricht. Die zulässige Höchsttemperatur beträgt 300°C, wobei darauf geachtet werden muss, dass Temperaturwechsel möglichst vermieden werden und die Anstiegs- bzw. Abfallrate beim Aufheizen oder Abkühlen einen Wert von 1°C/min nicht übersteigt.

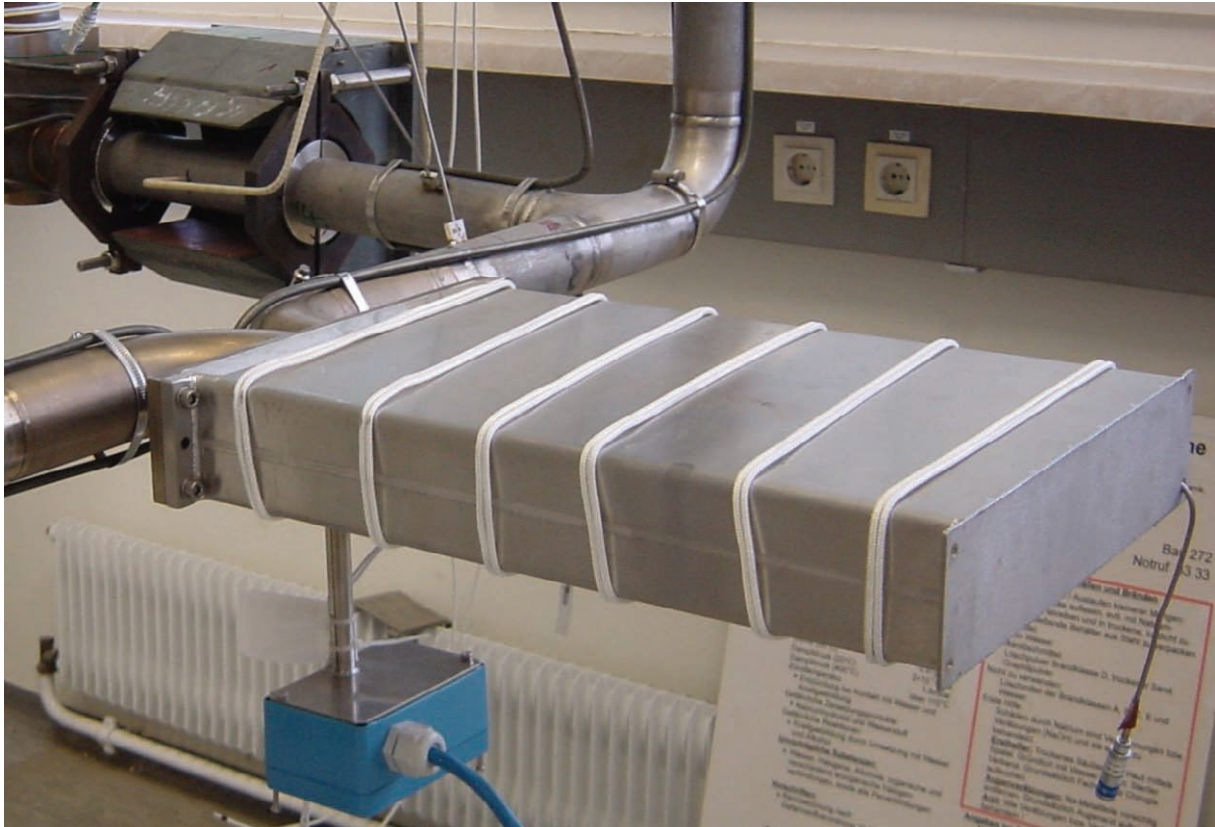


Abb. 2-11 Durchflussmesser Coriolis F1 und Magnet F2

Ein weiterer Durchflussmesser ist in der Reinigungsstrecke eingebaut (F2). Dabei handelt es sich um einen Permanentmagneten der an der Außenwand der Rohrleitung angebracht wurde. Sein Magnetfeld durchdringt das Rohr, wodurch in dem fließenden Metall eine elektrische Spannung induziert wird, die proportional zur mittleren Fließgeschwindigkeit und somit auch zum Volumenstrom ist. Diese Messspannung kann einfach über senkrecht zum Magnetfeld auf die Rohrwand geschweißte Elektroden abgegriffen werden. Mithilfe des Coriolis-Massendurchflussmessers kann bei geschlossenem Ventil 2.01 schließlich der Proportionalitätsfaktor dieses Messgeräts festgestellt werden, da die Dichte des Mediums mithilfe der gemessenen Temperatur berechnet werden kann.





# 3 Diphyl-Ölkühlkreislauf

## 3.1 Kreislaufschema

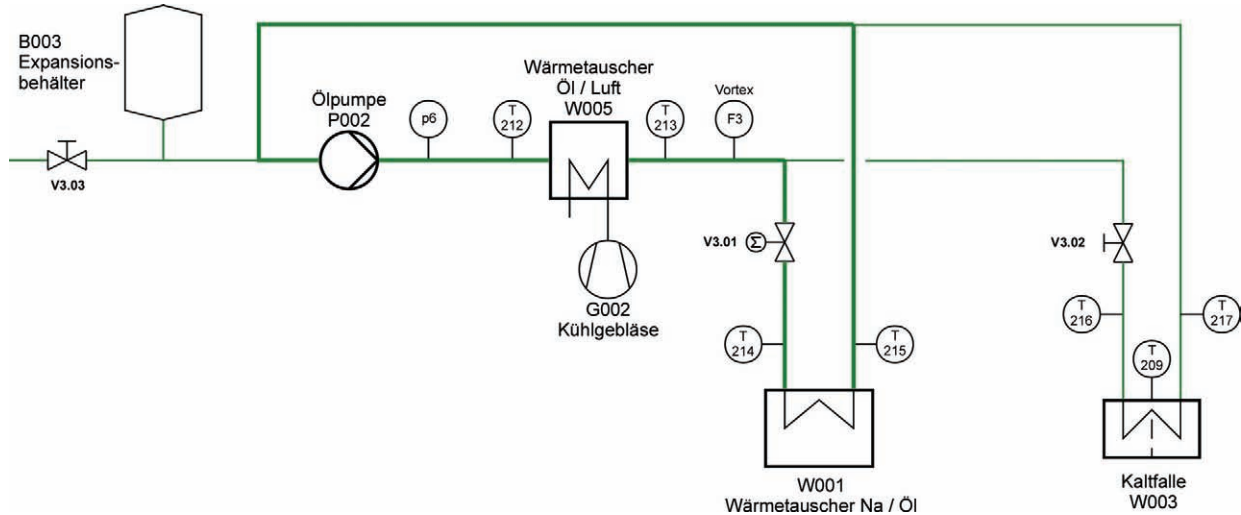


Abb. 3-1 Diphyl-Öl-Kreislauf

Abbildung 3-1 ist zu entnehmen, dass das Ölkreislaufsystem je nach gewünschtem Betrieb sowohl der Kühlung des großen Wärmetauschers im Natriumkreislauf, als auch der Kühlung der Kaltfalle dient. Das System besteht hauptsächlich aus einer mechanischen Kreiselpumpe, die im Hauptstrang die beiden Wärmetauscher W001 und W005 speist. Damit kann das Diphyl-Öl einerseits dem Natrium Wärme entziehen (W001) und diese sodann an den im Kühlgebläse G002 erzeugten, hohen Luftstrom in W005 abgeben. Wird das Kammers-Motorventil V3.01 im Hauptkreis geschlossen, kann nach Öffnen des Handventils V3.02 im Nebenkreis die dort befindliche Kaltfalle zur Reinigung des Natriums durchströmt werden. Für die starken Volumenänderungen aufgrund unterschiedlicher Öltemperaturen ist ein Expansionsbehälter mit Sicherheitsventil unerlässlich [11].

Der Temperaturbereich des Ölkreislaufs erstreckt sich im Kühlbetrieb von 100°C bis 300°C. Einerseits sollte die Temperatur des Kühlmediums, wenn möglich nicht unter die Schmelztemperatur des Natriums fallen (97,8°C), andererseits sollte seine eigene Verdampfungstemperatur nicht überschritten werden (ca. 370°C), um eine Dampfexpansion zu vermeiden. Bei dem Öl Diphyl-THT handelt es sich um ein prototypisches Wärmeträgeröl, das eine hohe Beständigkeit sowohl gegen Wärme- als auch gegen Bestrahlung anbietet. Da für den Reinigungsbetrieb und die Benetzung der Oberflächen jedoch eine Natriumtemperatur von 300°C ausreichend ist, wurde die maximale Diphyltemperatur des Kreislaufs auf diesen Wert festgelegt. Die Festlegung des Minimalwertes auf 100°C empfiehlt sich auch aufgrund der rapide steigenden Viskosität mit abnehmender Temperatur.

Die Rohrleitungen des Ölkreislaufs sind wie die des Natriumteils aus nahtlos gezogenen Edelstahlrohren der Standardgröße Ø60,3x2,9 angefertigt, da hier ebenfalls ein Nenndurchsatzes von 12 m³/h angestrebt wird. Ebenso wurden hier Begleitheizungen mit entsprechender thermischer Isolierung um die Rohrleitungen vorgesehen, was gegenüber einem einge-

bauten Erhitzer den großen Vorteil in sich birgt, dass die Kreislauftemperatur unabhängig vom Betrieb der Ölpumpe eingestellt werden kann. Zur Verminderung des Geräuschpegels im Flüssigmetall-Labor wurden die lärmintensiven Bauteile, Ölpumpe P002, Wärmetauscher W005 mit großem Gebläse G002, sowie der EM-Pumpenlüfter G001 in einem separaten Container installiert. Dadurch ergeben sich jedoch für die Zu- und Ableitung ins Labor lange gerade Rohrstücke mit entsprechend großen Wärmedehnungen, die über Kompensatoren abgefangen werden müssen (siehe Abbildung 2-2, Abbildung 3-3).

### 3.2 Pumpe P002

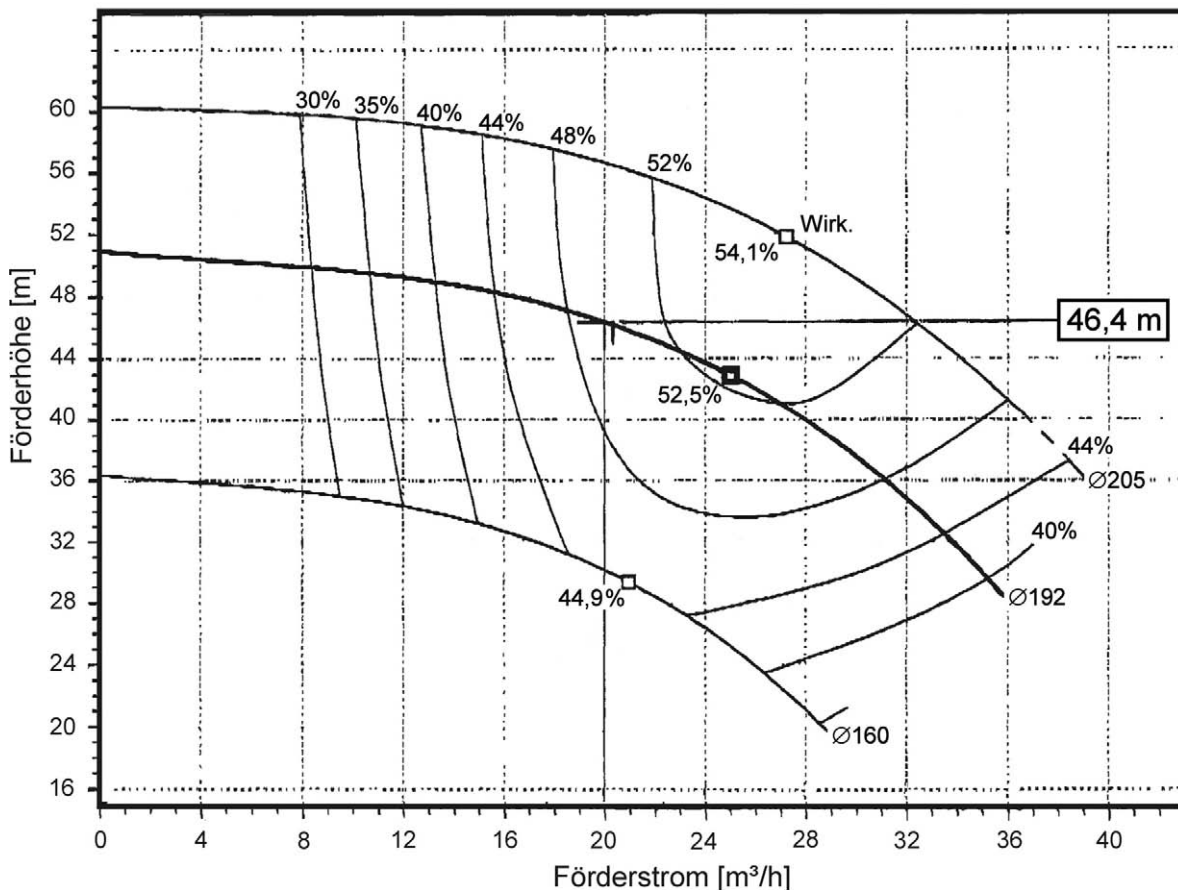


Abb. 3-2 Kennlinien der Allweiler-Kreiselpumpe im Ölkreislauf

Die verwendete Pumpe ist eine mechanische Spiralgehäuse-Kreiselpumpe vom Typ NTWH 32-200/01 der Firma Allweiler, Radolfzell, die den Betrieb mit einer maximalen Fluidtemperatur von 350°C zulässt. Die Motorleistung liegt bei 5,5 kW und der Wirkungsgrad beträgt 49,9% bei einem Diphyl-Volumenstrom von 20 m³/h und einer Nennzahl von 2900 min<sup>-1</sup> (siehe auch Abbildung 3-2). Das Anfahren eines benötigten Durchsatzes wird über die Anpassung der Pumpendrehzahl durch SPS und Thyristor-Steuerung bewerkstelligt. Durch Veränderung der Kreislaufbetriebsbedingungen und durch die stark temperaturabhängige Öl-Viskosität kann der Druckverlust der Anlage erheblich variieren. Dies wird jedoch durch die Drehzahlregelung automatisch ausgeglichen. Das Diagramm in Abbildung 3-2 zeigt die Förderhöhe der Pumpe über dem Förderstrom (Drosselkurve) für 200°C heißes Diphyl-THT mit einer Dichte von 0,88 kg/dm³ und einer kinematischen Viskosität von 1,33 mm²/s.

### 3.3 Wärmetauscher W005

Bei dem luftgekühlten Öl-Wärmetauscher W005 handelt es sich wie bei W001 um einen Rohrbündelwärmetauscher aus Edelstahl (1.4301) der Fa. Deller (Typ GVS 273/1500). Mit einem Durchmesser von 273 mm und einer Gesamtlänge von 1500 mm enthält er 37 Rohre der Maße  $\varnothing 25 \times 2,0$  mm und 6 Umlenkleche (siehe auch Konstruktionszeichnung im Anhang B). Wie bei W001 konnten aufgrund der unterschiedlichen Leitfähigkeiten von Diphyl-THT und Luft in der Konstruktion feste Außenplatten ohne Kompensator verwendet werden, da die mittleren Wandtemperaturen der Innenrohre nahe bei der Außenwandtemperatur liegen. Der Wärmetauscher wurde ausgelegt für eine Gesamtleistung von 30 kW, bei einem Diphyl-THT-Volumenstrom von 12 m<sup>3</sup>/h mit 130°C zwischen den Rohren. Der aus der Umgebung angesaugte Luftstrom von 1980 m<sup>3</sup>/h erhält in den Rohren eine Geschwindigkeit von 43 m/s, wohingegen sich das Diphyl-Öl mit ca. 0,5 m/s zwischen den Rohren bewegt. Abbildung 3-3 zeigt den Containerbereich mit dem darin befindlichen Gegenstromwärmetauscher W005 (Mitte), der angeschlossenen Pumpe P002 (links), dem Gebläse G002 (rechts unten), sowie dem Expansionsbehälter B003 (oben). Ebenfalls zu erkennen ist einer der aufgrund der Wärmedehnung erforderlichen, gegen Lateral- und Torsionsbewegungen geschützten Axialkompensatoren.



Abb. 3-3 Öl-Luft-Wärmetauscher mit Gebläse und Ölpumpe

### 3.4 Gebläse G002

Das verwendete Kühlgebläse ist ein Radialventilator vom Typ 25573 MN 80160 der Firma Piller, Moringen. Es wurde ausgelegt für einen Luftvolumenstrom von 0,6 m<sup>3</sup>/s (entspricht 2160 m<sup>3</sup>/h) bei einer Druckdifferenz von 61 mbar, wie in Abbildung 3-4 ersichtlich. Dabei liegt die Motorleistung bei 7,5 kW und der Wirkungsgrad beträgt 74% bei einer Drehzahl von 2930 min<sup>-1</sup>. Der Laufraddurchmesser beträgt 580 mm und die Gesamtabmessungen sind 1115 x 910 x 680 mm.

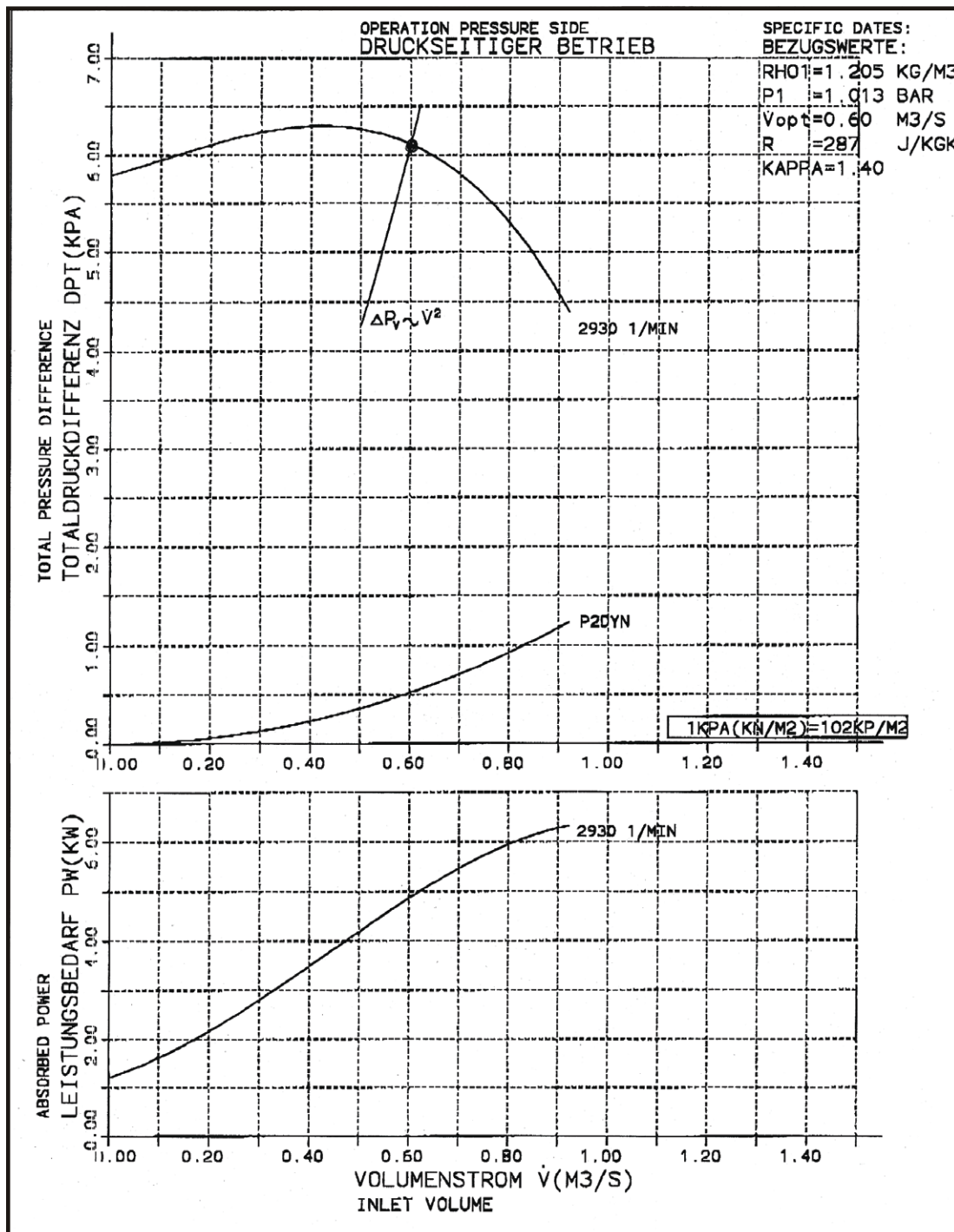


Abb. 3-4 Kennlinien des Piller-Radialventilators zur Kühlung von W005

### 3.5 Instrumentierung

Bei den verwendeten Thermoelementen im Ölkreislauf handelt es sich wiederum um NiCr-Ni-Thermoelemente (Typ K). Wie auf der Natriumseite werden jeweils die Öl-Eintritts- und Austrittstemperatur jeder wärmeübertragenden Komponente gemessen, also Na/Öl-Wärmetauscher W001 (T214,T215), Kaltfalle W003 (T216,T217) und Öl-Luft-Wärmetauscher W005 (T212,T213).

Die Messung des Kreislaufdrucks  $p_6$  am Ausgang der Pumpe P002 erfolgt über einen Absolutdrucksensor der Fa. Amos vom Typ APM-550-M10-5SG. Der Messbereich liegt zwischen 0 bar (Vakuum) und 5 bar und die Messungenauigkeit beträgt  $\pm 0,3\%$  bei einer maximal zulässigen Sensortemperatur von  $220^\circ\text{C}$ .

Für die Messung des Diphyl-Volumenstroms (F3) schließlich wurde ein Vortex-Durchflussmesser vom Typ 8800C der Fa. Emerson-Rosemount eingebaut. Dieses Gerät ist in einem weiten Temperaturbereich zwischen  $-40$  und  $232^\circ\text{C}$  einsetzbar, wobei im vorliegenden Anwendungsfall aufgrund der hohen Viskosität nicht unterhalb einer Temperatur von ca.  $50^\circ\text{C}$  gefahren wird. Um zu gewährleisten, dass die zulässige Höchsttemperatur nicht überschritten wird, wurde das Messgerät nach dem Wärmetauscher W005 eingebaut. Durch die langen Leitungen zwischen Container und Labor konnten die für eine hohe Genauigkeit erforderliche Einlaufstrecke von  $35\cdot D$  problemlos übertroffen werden. Der Messbereich des Vortex-Durchflussmessers liegt zwischen  $3,3$  und  $59,4 \text{ m}^3/\text{h}$  bei einer Messungenauigkeit von  $0,75\%$  vom Messwert. Oberhalb einer Reynoldszahl von  $20000$  haben Dichte und Temperatur keinen Einfluss auf die Genauigkeit.

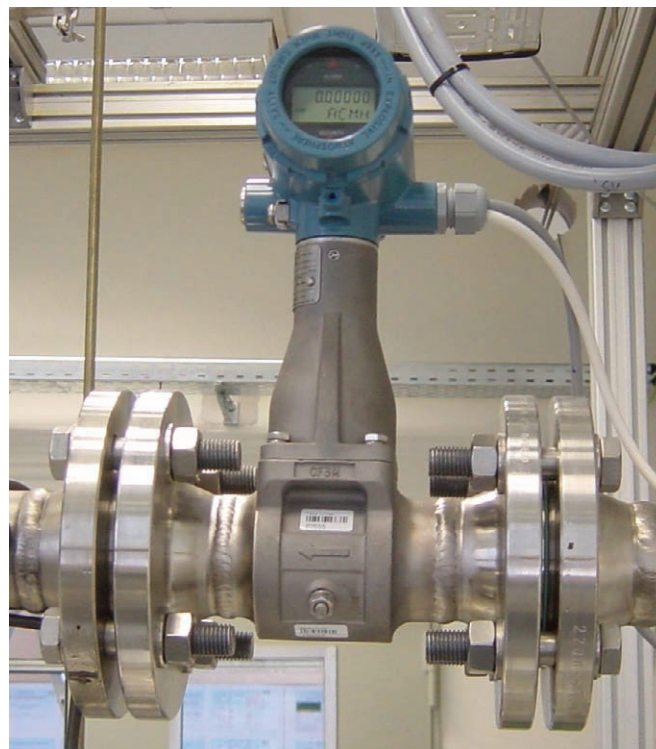


Abb. 3-5 Vortex-Durchflussmesser (F3) im Diphyl-Ölkreislauf



# 4 Gas- und Vakuumsystem

## 4.1 Kreislaufschema

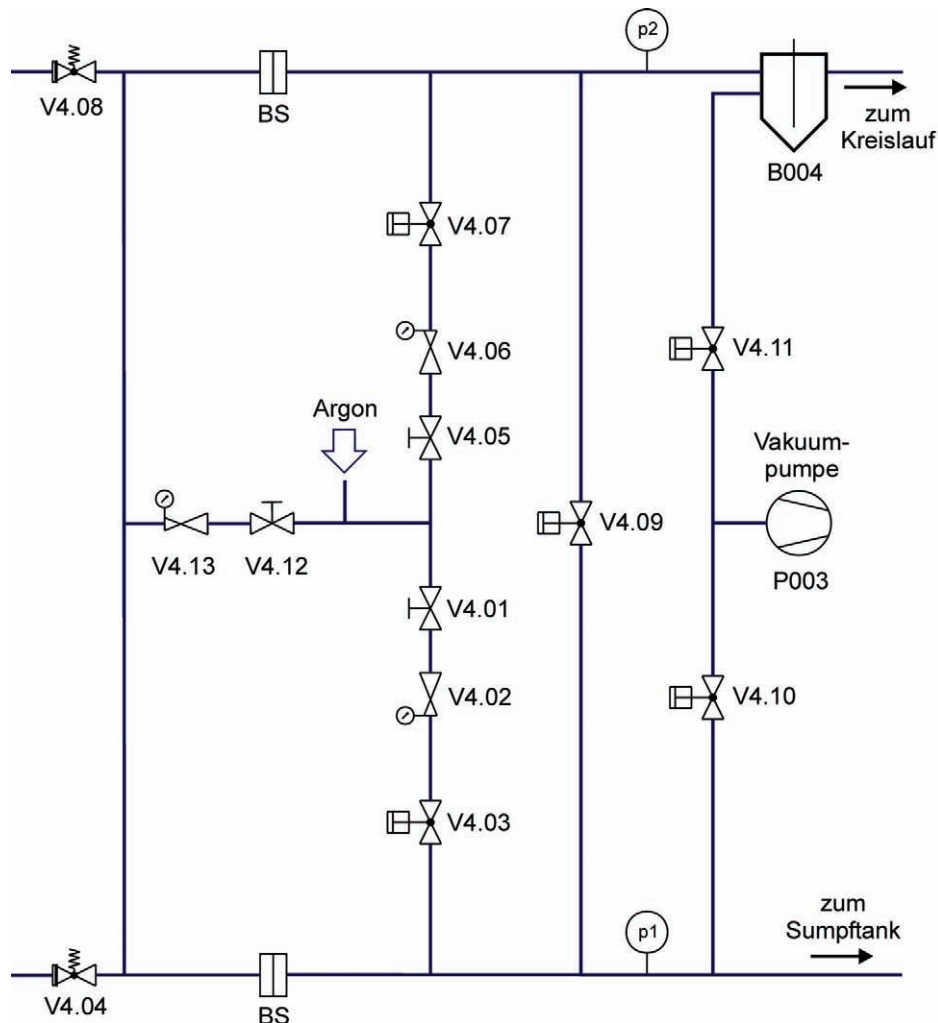


Abb. 4-1 Kreislaufschema des Gas- und Vakuumsystems

Um den Kreislauf füllen, ablassen und mit Inertgas spülen zu können, wurde ein spezielles Gasleitungssystem aufgebaut. Das vom Flaschenbündel kommende, auf 9 bar geminderte Argon-Gas wird zunächst über Handventile (V4.01, V4.05) an die Enddruckminderer vom Typ LMD51 der Firma DruVa, Eppelheim (V4.02, V4.06) geführt, über die im System Absolutdrücke zwischen 0,1 bar und 2 bar manuell eingestellt werden können. Zum Fluten mit Argon-Gas wird dann für den Sumpftank das Ventil V4.03 geöffnet, für den Kreislauf das Ventil V4.07 (pneumatische Ventile der Fa. Swagelok).

Für einen prototypischen Freistrahlbetrieb und um ein gasfreies Flüssigmetall zu erhalten, wurde eine Drehschieber-Vakuumpumpe der Fa. Leybold vom Typ Trivac-D16-BCS-PFPE integriert. Kreislauf und Sumpftank müssen getrennt angesteuert werden können, um überhaupt Natrium einfüllen können. Dies wurde beim Vakuumziehen über die Ventile V4.10 und V4.11 realisiert, beides Pneumatikventile vom Typ EV25EPVA der Firma Leybold. Beim Füllen der Anlage (Abschnitt 2.2) herrscht Vakuum im Kreislauf und ein demgegenüber leicht

erhöhter Druck im Sumpftank. Um nach dem Füllen nicht erst wieder Gas vom Sumpftank in den Kreislauf zu transportieren, kann der Sumpftank zunächst über V4.10 getrennt evakuiert werden, um danach dann das im Betrieb stets offen zu haltende Ausgleichsventil V4.09 zu öffnen. Über eine entsprechende Sicherheitseinstellung in der SPS-Steuerung wird gewährleistet, dass sich dieses elektrisch ansteuerbare pneumatische Ventil der Firma Swagelok vom Typ MS-8B-50 im Falle eines Notablasses im geöffneten Zustand befindet und somit die Drücke in Kreislauf und Sumpftank ausgeglichen sind. Andernfalls könnte es beim Öffnen des Ablassventils passieren, dass der Natriumkreislauf überfüllt wird.

Sollte der Natriumkreislauf aufgrund einer Fehlbedienung überfüllt werden, dann würde das Natrium in den Abscheidebehälter B004 fließen und dort einen Kontakt auslösen, der einen Notablass zur Folge hätte. Wie in Abbildung 4-1 schematisch gezeigt, enthält der Behälter B004 in der Mitte eine Trennwand, die das eindringende Natrium zwingt, zum Boden des Behälters zu strömen, wo sich die detektierende Elektrode E8 befindet. Ein Abscheidebehälter am Sumpftank ist nicht erforderlich, da dieser nicht überfüllt werden kann. Bei zu hohem Kreislaufdruck kann lediglich das im Tauchrohr befindliche Natrium zurückgedrängt werden, bis das Gas schließlich in den Sumpftank überströmt.

Um sicherzustellen, dass weder Kreislauf noch Sumpftank mit einem zu großen Gasdruck beaufschlagt werden können, wurden die beiden Sicherheitsüberdruckventile V4.04 und V4.08 eingebaut. Nach dem automatischen Druckablassen bewerkstelligt die Federrückführung dieser Ventile das Wiederverschließen des Ventils, führt aber zu einer unakzeptabel hohen Leckrate im Normalbetrieb unter Vakuum. Deshalb wurden als zusätzliche Abschottung gegen die Umgebung DIABON-Berstscheiben der SGL-Group eingebaut. Dennoch wird die ursprünglich hohe Anlagendichtheit (Leckrate  $1 \cdot 10^{-5}$  mbar l/s) durch diese Bauteile auf eine Leckrate von  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar l/s verschlechtert. Da ein Eindringen von Umgebungssauerstoff unter allen Umständen vermieden werden soll, wurde ein zusätzlicher Anschluss zwischen Berstscheibe und Sicherheitsventil vorgesehen, über den ein kleiner Überdruck an Argon-Sperrgas angelegt werden kann, zuschaltbar über Druckminderer V4.13. Da eine gewisse Leckrate nicht verhindert werden kann, wird mit Hilfe dieses Systems sichergestellt, dass es sich bei eindringendem Gas um Argon handelt und nicht um Sauerstoff.



## 4.2 Instrumentierung

Damit der gewünschte Höhenstand des Flüssigmetalls im Kreislauf mit Hilfe der unterschiedlichen Gasdrücke eingestellt werden kann, wurden zur Kontrolle dieser Drücke CeraVac-Druckmesser (CTR90) der Firma Leybold in die Gasleitungen eingebaut (p1, p2). Sie decken den Messbereich 0 bis 1000 torr bzw. 1,33 bar bei Raumtemperatur ab und haben eine Messgenauigkeit von 0,2% vom Messwert. Die Auflösung beträgt 0,0015% vom Endwert, also 0,02 mbar. Neben der Messfunktion im Betrieb dienen sie auch der Kalibration der Kulite-Drucksensoren p3, p4 und p5 im ungefüllten Natriumkreislauf, im dicht eingeschraubten und somit leicht verspannten Zustand unter Betriebstemperatur 200°C.



Abb. 4-2 Drucksensoren im Gas- und Vakuumsystem

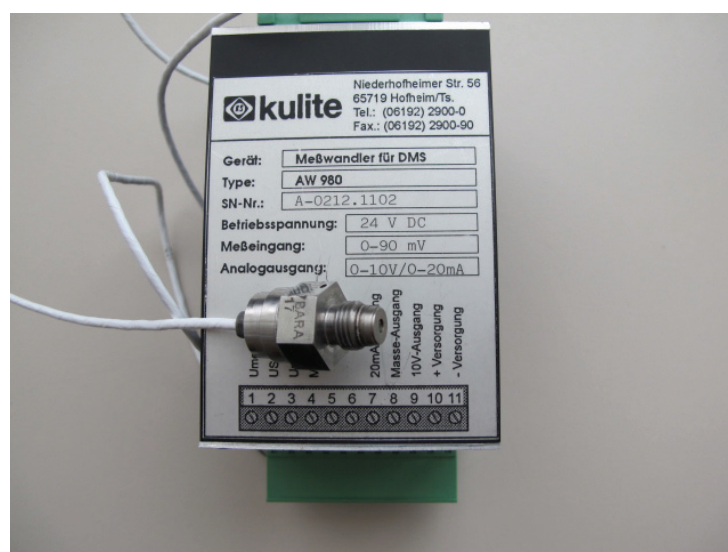


Abb. 4-3 Kulite-Drucksensor mit Messumformer AW980



## 5 Vorgänge und Betriebszustände der Anlage

### 5.1 Füllen, Reinigen, Normalbetrieb

Im Folgenden werden die verschiedenen Betriebsvorgänge und -zustände in ihren wesentlichen Schritten tabellarisch aufgelistet.

#### Füllen der Anlage mit Natrium:

Na-Ventile V2.01 und V2.02 sollen geöffnet sein
Begleitheizungen der Na-Rohre auf 200°C einstellen
Ölkreislauf ebenfalls auf 200°C erhitzen
Evakuieren von Na-Kreislauf und Sumpftank (PP03 an, V4.09, V4.10, 4.11 geöffnet)
Schließen der Ventile V4.09, V4.10, 4.11.
Öffnen des Gasventils V4.03 und langsame Druckerhöhung über V4.02
Langsames Öffnen des Füllventils 1.01
Na steigen lassen bis Höchststand (Elektrodendetektoren E4-E7)
Füllventil 1.01 schließen
Sumpftank aus Sicherheitsgründen evakuieren, druckgleich mit Kreislauf

Tabelle 5-1: Füllvorgang bei ALINA

#### Reinigen des Natriums:

Temperaturniveau im Kreislauf auf 300°C erhöhen
Öffnen von Natriumnebenkreis-Ventil V2.02
Kalibration des Magnetdurchflussmesser F2 überprüfen (V2.01 geschlossen)
Na-Ventil 2.01 öffnen bis $F2/F1 = 1/10$
W001 nicht in Betrieb (Ventil 3.01 geschlossen) , V3.02 geöffnet
In Kaltfalle (W003), ölgekühlt, fällt Na-Temperatur
Mehrere Tage, schrittweise Absenken der Na-Temp. bis 120°C
Oxid fällt aus, Schmutz bleibt im Filter der Kaltfalle hängen, dadurch steigt der Druckabfall an der Kaltfalle ständig an.
Zur Kompensation des erhöhten Druckabfalls V2.01 etwas schließen

Tabelle 5-2: Reinigungsvorgang bei ALINA

### Reiner Erhitzerbetrieb, Regelung der Erhitzeraustrittstemperatur (T207)

Wärmeeintrag der Pumpe P001 geringer als Wärmeverluste des Kreislaufs
Natrium-Öl-Wärmetauscher nicht in Betrieb (V3.01 geschlossen)
Temperatur T207 wird durch die Erhitzerleistung (W002) eingeregelt, Teststreckeneintritt T204 ergibt sich aus den Kreislaufwärmeverlusten
Betrieb bei 200°C möglich, solange Pumpenspannung < 150V (<6,5 m3/h)

Tabelle 5-3: Regelungszustand Erhitzerbetrieb

### Wärmetauscherbetrieb, Regelung der Testbehältereintrittstemperatur (T204)

Wärmeeintrag der Pumpe P001 größer als Wärmeverluste des Kreislaufs
Natrium-Öl-Wärmetauscher wird benötigt (V3.01 geöffnet)
Temperatur T204 wird durch die Kühlerleistung (W001) eingeregelt, d.h. festgelegte Öltemperatur; Öldurchsatz (Drehzahl P002) in W001 regelt T204.
Betriebzustand bei 200°C für Pumpenspannung >150V (>6,5 m3/h)

Tabelle 5-4: Regelungszustand Wärmetauscherbetrieb

Im Übergangsbereich zwischen den in Tabelle 5.3 und 5.4 beschriebenen Zuständen kann zum schnelleren Einregeln der Natriumtemperatur auch ein Mischbetrieb sinnvoll sein, d.h. es findet sowohl ein Wärmetauscherbetrieb als auch Erhitzerbetrieb statt. Dabei wird aufgrund der viel geringeren Totzeit der elektrische Erhitzer für die Regelung von T207 eingesetzt, während der Wärmetauscher mit konstanter Öleintrittstemperatur und konstantem Ölvolumenstrom gefahren wird.

## 5.2 Ereignis-Maßnahmen-Katalog

Die Steuerungseinheit (SPS) muss auf die für sie relevanten Ereignisse je nach Betriebszustand mit geeigneten Maßnahmen reagieren. In der Hauptsache wird dabei in der SPS zwischen dem Füllvorgang (BZ1) und dem Normalbetrieb (BZ3) unterschieden. Um beim Umschalten nach dem Füllen der Anlage nicht mit den direkten Konsequenzen aus eventuellen, unerwarteten Ereignissen und deren Konsequenzen (z.B. Notablass) konfrontiert zu werden, wurde ein Zwischenbereich (BZ2) definiert, bei dem jegliche Ereignisse mit ihren Meldungen oder Alarmen an die Betriebsmessdatenerfassung weitergegeben werden, aber keine Maßnahmen eingeleitet werden, außer bei Leckage. Zusätzlich wird eine Meldung generiert, die auf diesen Sicherheitszustand hinweist. In diesem Bereich kann kein Betrieb gefahren werden, da alle Ventile gesperrt sind und auch die Pumpe und der Erhitzer nicht eingeschaltet werden können. BZ2 dient nur einer kurzen Überprüfung der Situation. Sobald keine Alarmereignisse feststellbar sind, kann die Anlage nach BZ3 umgeschaltet werden und ihren Normalbetrieb aufnehmen.

Auf den nächsten Seiten sind alle Ereignisse und ihre Konsequenzen in der SPS für den Normalbetrieb tabellarisch aufgelistet:

Maßnahme Ereignis	Meldung	Voralarm	Alarm	Notblass	Füllventil	Ablassventil	Na-Hauptkreisventil	Na-Nebenkreisventil	Ölkreisventil	Gasventil Sumpftank	Gasventil Kreislauf	Druckausgleichsventil	Vakuumentil	Vakuumentil	EM-Pumpe	EM-Pumpengebläse	Na-Erhitzer	Öl-Pumpe	Öl-Kühlergebläse	Raumluftventilator	Begleitheizung
					V1.01	V1.02	V2.01	V2.02	V3.01	V4.03	V4.07	V4.09	V4.10	V4.11	P001	G001	W002	P002	G002		1-75
<b>Schalttafel</b> Not-Aus (Handschalter) gedrückt			X	X	zu	auf	auf	auf	auf	zu	zu	auf + nach 5min zu	zu	zu	aus	aus	aus	aus	aus		
<b>Allgemein</b>																					
Stromausfall		X													aus	aus	aus	aus	aus		
Stromausfall (nach 5 min Verzögerung)			X	X																	
24V-Netzteil (SPS) - Batteriebetrieb		X																			
24V-Netzteil (SPS) - Batteriebetrieb Spannung < 21V			X	X																	
24V-Netzteil (SPS) - Alarm			X	X																	
Beckhoff RS485 Buskoppler (Begleit- heizungen) ausgefallen			X	X																	
LabView-Rechner ausgefallen		X																			
SPS-Rechner ausgefallen		X			auf	auf	auf		(zu)	(zu)	(auf)	(zu)	(zu)		aus	aus	aus	aus	aus		
Lampentest	X																				
IM308C/Profibus Beckhoff / BK3100 (Betriebsmessstel- len) ausgefallen ADR. 2			X							zu	zu				aus		aus				
IM308C/Profibus JUMO-Regler.1 (Öl-Pumpe) ausgef. ADR. 3			X												aus		aus	aus	aus		
IM308C/Profibus JUMO-Regler.2 (Öl-Kühlgebläse) ausgefallen ADR. 4			X												aus		aus	aus	aus		
IM308C/Profibus JUMO-Regler.3 (Na-Erhitzer) ausgefallen ADR. 5			X														(aus)				
IM308C/Profibus Fr.Umrichter (Öl- Kühlgebläse) ausgefallen ADR. 6			X												aus		aus	aus	aus		
IM308C/Profibus Fr.Umrichter (Öl-Pumpe) ausgef. ADR. 7			X												aus		aus	aus	aus		
IM308C/Profibus Fr.Umrichter (Raumluftvent.) ausgefallen ADR. 8			X																		

# Vorgänge und Betriebszustände der Anlage

Maßnahme  Ereignis	Meidung	Voralarm	Alarm	Notablass	Füllventil	Ablassventil	Na-Hauptkreisventil	Na-Nebenkreisventil	Ölkreisventil	Gasventil Sumpftank	Gasventil Kreislauf	Druckausgleichsventil	Vakuumentil	Vakuumentil	EM-Pumpe	EM-Pumpengebläse	Na-Erhitzer	Öl-Pumpe	Öl-Kühlergebläse	Raumluftventilator	Begleitheizung
	IM308C/Profibus Fr.Umrichter (EM-Pumpe) ausgefallen Adr. 9			X												aus		aus	aus	aus	
IM308C/Profibus Thyro-P (Na- Erhitzer) ausge- fallen Adr. 10			X														(aus)				
<b>Brandmelder</b> ausgelöst			X	X																	Ein
<b>EM-Pumpe</b> Pumpenstrom: <= 3A oder Schütz aus																	aus				
Spulen T401 oder T402 oder T403 oder T404 > 350°C		X																			
Spulen T401 oder T402 oder T403 oder T404 > 370°C			X												Grund- last		aus	aus	aus		
Spulen T401 oder T402 oder T403 oder T404 > 400°C			X												aus		aus	aus	aus		
Pumpenkanal T405 oder T406 oder T407 oder T408 oder 409 >330°C		X																			
Pumpenkanal T405 oder T406 oder T407 oder T408 oder 409 >350°C			X												aus		aus	aus	aus		
<b>Pumpenlüfter</b> Spulen T401 oder T402 oder T403 oder T404 > 200°C																ein					
Spulen T401 und T402 und T403 und T404 < 150°C																aus					
<b>Öl-Pumpe</b> Schütz aus																				aus	
<b>Elektroden</b> Höhenstand Aus- gleichsbehälter E4 Kontakt aus			X	X																	
Höhenstand Aus- gleichsbehälter E5 Kontakt aus		X													aus		aus				
Höhenstand Aus- gleichsbehälter E6 Kontakt ein		X													aus		aus				
Höhenstand Aus- gleichsbehälter E7 Kontakt ein			X	X																	
Natrium-Detektion im Abscheidebehäl- ter E8 Kontakt ein			X	X																	
<b>Natrium- Innentemp.</b> T202 oder T203 >305°C		X																			
T202 oder T203 > 310°C			X												aus		aus				

Maßnahme Ereignis	Meldung	Voralarm	Alarm	Notablass	Füllventil	Ablassventil	Na-Hauptkreisventil	Na-Nebenkreisventil	Ölkreisventil	Gasventil Sumpftank	Gasventil Kreislauf	Druckausgleichsventil	Vakuumentil	Vakuumentil	EM-Pumpe	EM-Pumpengebläse	Na-Erhitzer	Öl-Pumpe	Öl-Kühlergebläse	Raumluftventilator	Begleitheizung
T206 oder T207 > 310°C			X														aus				
Diphyl-Innentemp.																					
T214 oder T215 oder T216 oder T217 > 305°C		X																			
T214 oder T215 oder T216 oder T217 > 310°C			X												aus		aus				Nr.44-54 aus
Drucküberwachung																					
p1 oder p2 > 28264 (entspricht 1150 mbar)		X																			
p1 oder p2 > 29493 (entspricht 1200 mbar)			X							zu	zu										
Begleitheizungen																					
FI-Schalter aus		X																			
FI-Schalter aus nach 60 min.			X	X																	
TE 1-75 Drahtbruch	X																				fix
TE 1-75 > 310°C			X																		
TE 1-75 < 130°C			X																		
TE 1-75 < 130°C		X																			
Füllventil V1.01: T7 <140°C		X																			
Füllventil V1.01: T7 <130°C oder Drahtbruch			X		ge-sperrt																
Ablassventil V1.02: T9 oder T10 <140°C		X																			
Ablassventil V1.02: T9 oder T10 <130°C oder Drahtbruch			X			gesp.															
Hauptkr.ventil V2.01: T16 oder T17 <140°C		X																			
Hauptkreisventil V2.01: T16 oder T17 <130°C oder Drahtbruch			X				auf + gesperrt														
Nebenkr.ventil V2.02: T36 oder T37 <140°C		X																			
Nebenkreisventil V2.02: T36 oder T37 <130°C oder Drahtbruch			X				auf + gesperrt														
Sumpftank: T1 oder T2 oder T3 oder T4 <130°C oder Drahtbruch			X	X																	
Ablassleitung: T5 oder T11 <130°C oder Drahtbruch			X	X																	
Begleitheizung Handbetrieb (Stellwerte eingefroren!!!)	X																				

Tabelle 5-5: Ereignis-Maßnahmenkatalog ALINA





# 6 Kenndaten der Anlage

## 6.1 Pumpen- und Anlagenkennlinie

Bei der Inbetriebnahme der Anlage wurden für die EM-Pumpe P001 (max. 320V, 36A, 70Hz), sowie für den Natriumkreislauf bei einer Mediumtemperatur von 200°C und 300°C die folgenden Kennlinien ermittelt:

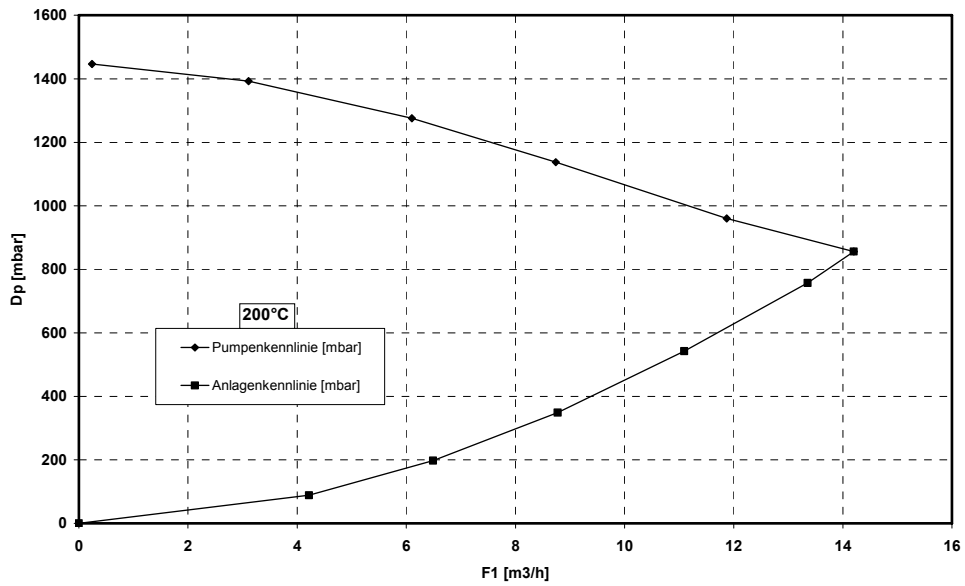


Abb. 6-1 Pumpen- und Anlagenkennlinie ALINA 200°C

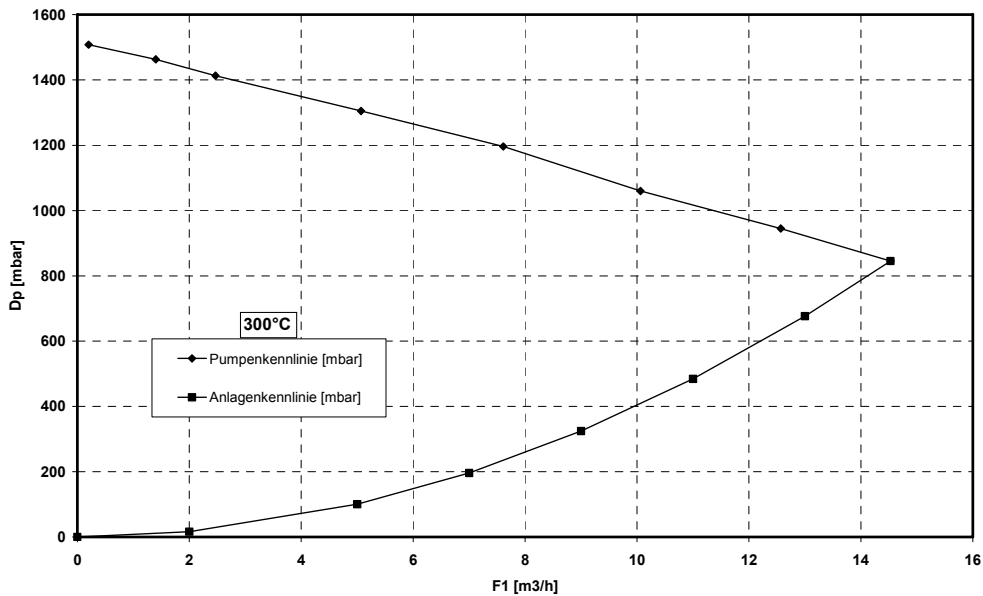


Abb. 6-2 Pumpen- und Anlagenkennlinie ALINA bei 300°C

## 6.2 Leistungsfähigkeit des Na-Diphyl-Wärmetauschers

Zur Überprüfung der Auslegungsrechnung [10] wurden Versuche im Wärmetauscherbetrieb, wie in Tabelle 5-4 angegeben, durchgeführt. Die ermittelten k-Werte haben eine Abweichung von etwa 5%, wobei die Rechnung den tatsächlichen Wärmeübergang unterschätzt. Da sich bei Prandtlzahlen von 0,0075 (200°C) bis 0,0059 (300°C) die WärmetauscherAuslegung nicht mehr so exakt realisieren lässt, kann das Ergebnis als gute Übereinstimmung gewertet werden. In Abbildung 6-3 sind die im Bereich von 200 und 300°C ermittelten k-Werte des Wärmetauschers W001 über dem Volumenstrom aufgetragen. Die für 300°C berechneten Werte können mit den experimentell gewonnenen verglichen werden. Die dazugehörigen Wärmeströme können auf der zweiten Ordinatenachse abgelesen werden.

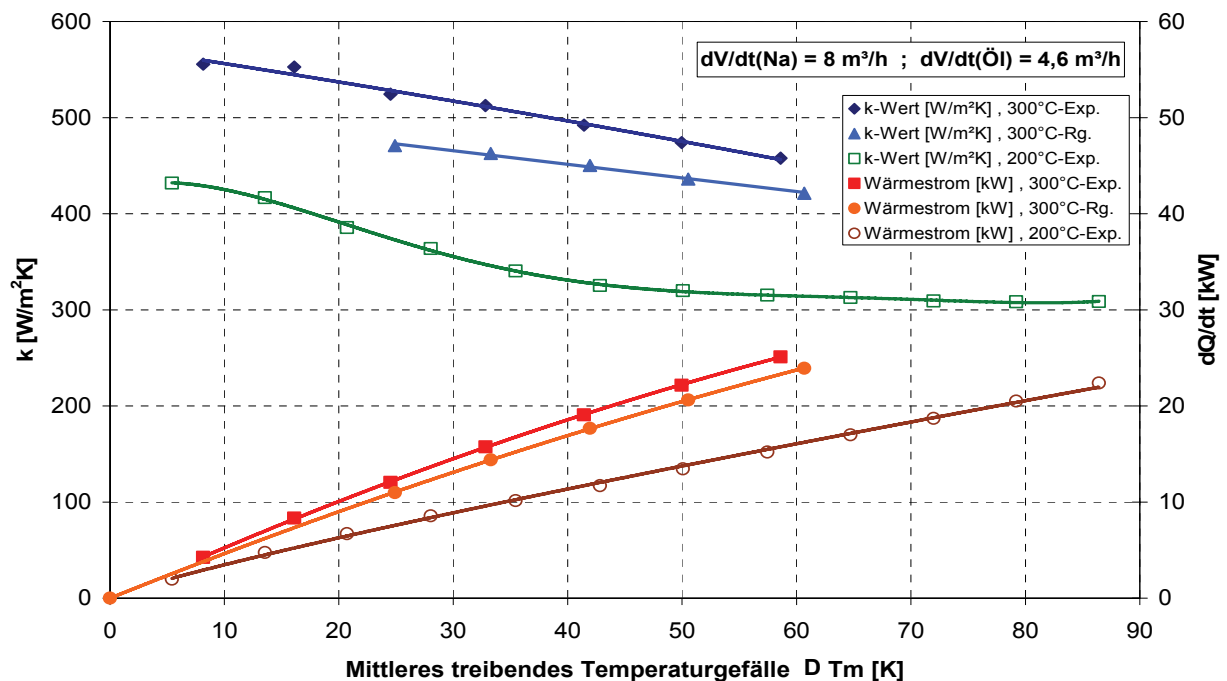


Abb. 6-3 Wärmeströme und k-Werte des Na/Öl-Wärmetauschers W001

# 7 Betriebsüberwachung

## 7.1 Anlagensteuerung

Um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten, wurde für die Anlagensteuerung eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) vom Typ Simatic S5 mit unterbrechungsfreier Stromversorgung (USV) verwendet. Sämtliche Betriebsmessdaten werden zunächst von Busklemmen der Fa. Beckhoff vom Typ KL3312 (Thermoelemente bzw. Millivoltspannungen), Typ KL3064 (Messspannungen 0-10V) und Typ KL3054 (Messströme 4-20mA) erfasst. Die angeschlossenen Buskoppler BK8000 und BK3100 (Abbildung 7-1) sammeln kontinuierlich die analog vorliegenden Messwerte und stellen sie der SPS digital über serielle (RS485) bzw. Profibusverbindung zur Verfügung.

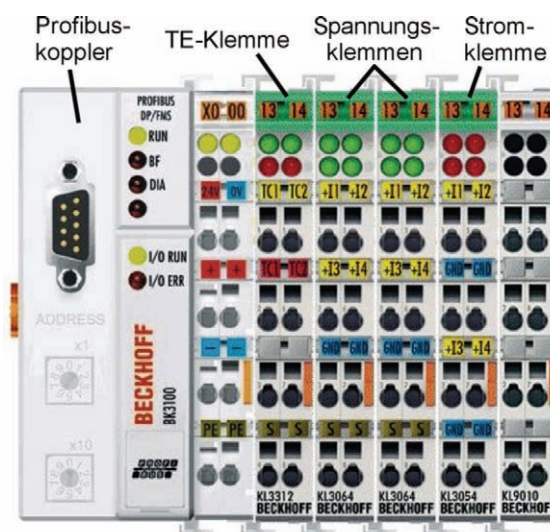


Abb. 7-1 Beckhoff-Buskoppler BK3100 mit Messklemmen

Somit können alle anliegenden Messwerte zur Überwachung herangezogen werden und bei Grenzwertüberschreitungen Maßnahmen eingeleitet und Alarme oder Meldungen ausgegeben werden (Abschnitt 5.2). Je nach Betriebszustand (Abschnitt 5.1) werden über Jumo-Regler vom Typ dtron304 die erforderlichen Gerätesteuern eingeregelt, wie die Thyristorsteuerung (Thyro-P) beim Erhitzer W002 und die Micromaster-Frequenzumformer bei der Ölpumpe P002 und beim Gebläse G002. Die EM-Pumpe P001 wird dagegen nicht geregelt, sondern über einen Simovert-Frequenzumformer nur angesteuert und muss daher zur Erreichung eines gewünschten Volumenstroms manuell nachgestellt werden. Die wichtigsten Mess- und Einstellwerte werden von der SPS über ein Touchpanel angezeigt, welches außerdem auch zur Eingabe von Sollwerten verwendet werden kann.

Gleichzeitig werden die Messdaten über eine weitere Profibus-Verbindung auf einem PC mit installiertem Siemens-OPC-Server bereitgestellt. Die im OPC-Server vereinbarten und somit allen im lokalen Netz (LAN) befindlichen PCs zur Verfügung stehenden Variablen, die die Messwerte enthalten, sind Tabelle 7-1 zu entnehmen.

OPC - Variable	Index	Variablen-Typ	S5-Adresse	ANZW	Bemerkung
Ist_001-100	100	Array 100, Integer 16	DB 21, DW 1 - 100	DB 50, DW 0	Read
Soll_001-100	101	Array 100, Integer 16	DB 20, DW 1 - 100	DB 50, DW 2	Read-Write
Stell_001-100	102	Array 100, Integer 16	DB 22, DW 1 - 100	DB 50, DW 4	Read
Soll_Allg	103	Array 100, Integer 16	DB 20, DW 101 - 200	DB 50, DW 6	Read-Write
Temp_201-250	104	Array 50, Integer 16	DB 21, DW 101 - 150	DB 50, DW 8	Read
Temp_401-450	105	Array 50, Integer 16	DB 21, DW 151 - 200	DB 50, DW 10	Read
Alarmer	106	Array 20, Integer 16	DB 22, DW 101 - 120	DB 50, DW 12	Read
Zustandsbits	107	Array 20, Integer 16	DB 22, DW 121 - 140	DB 50, DW 14	Read
Lifecounter	108	Integer 16	DB 20, DW 0	DB 50, DW 16	Read-Write Lifecounter Bit 0.
Ist_Allg	109	Array 50, Integer 16	DB 21, DW 201 - 250	DB 50, DW 18	Read

Tabelle 7-1: Über LAN verfügbare OPC-Variablen ALINA

## 7.2 Messdatenerfassung, ZEUS-System

Da die Messwerte nun in digitaler Form auf einem PC des LAN vorhanden sind, können sie auch sehr leicht gespeichert und in anderen Programmen benutzt werden. Die verwendeten OPC-Variablen können je nach Definition (Tabelle 7-1) aber auch beschreibbar sein, d.h. es ist auch möglich, Sollwerte in die SPS zu schreiben. Im KALLA (**K**arlsruhe **L**iquid Metal **L**aboratory) wurde das so genannte ZEUS-System (**Z**entrale **E**rfassung **u**nd **S**teuerung) entwickelt, das mit einer speziellen MySQL-Datenbank zusammenarbeitet.

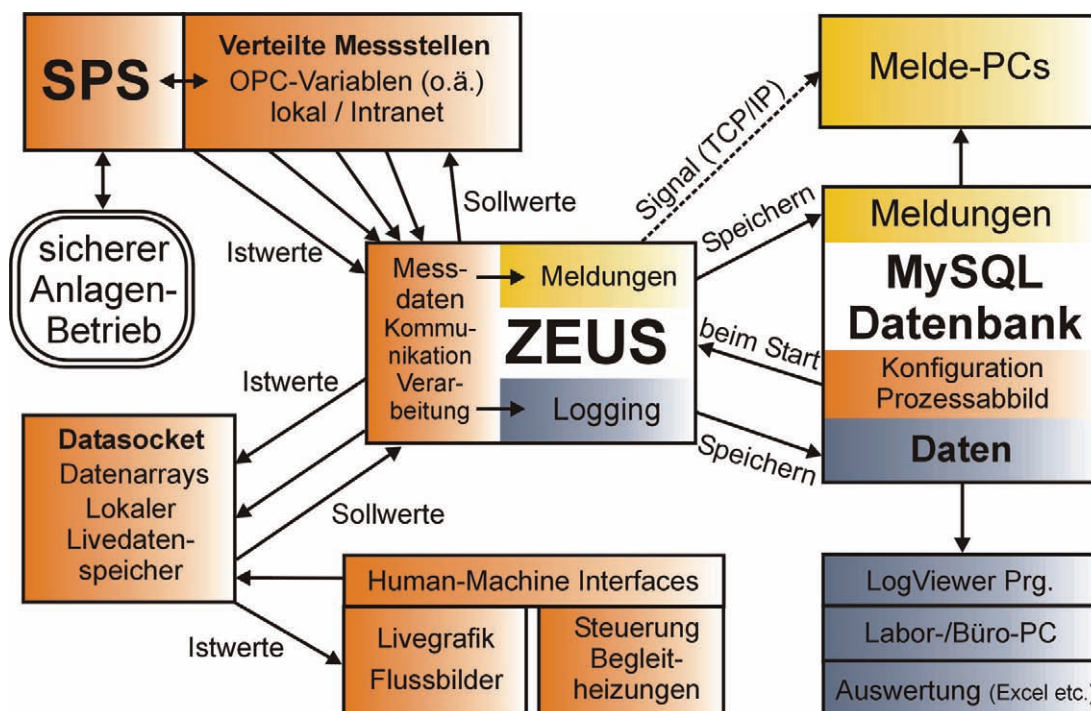


Abb. 7-2 Prinzip des ZEUS-Systems

Das System ist sehr variabel und kann auf nahezu jede Anlage angepasst werden. Wie in Abbildung 7-2 erkennbar, handelt es sich um ein zentrales Programm, das zunächst im LAN Daten sammelt und sie gegebenenfalls umrechnet. Die Information, wo die Daten zu finden sind und was damit zu tun ist, wird beim Start aus dem Konfigurationsbereich der Datenbank entnommen. Dann werden einerseits die Daten in die Datenbank geloggt und andererseits fortlaufend in einen LabVIEW-eigenen Datenpuffer (Datasocket) geschrieben und somit anderen im Netz befindlichen PCs zur Verfügung gestellt. So genannte Human-Machine-Interfaces (HMIs), wie z.B. eine Livegrafik, ein Flussbild (Abbildung 7-3) oder eine Bedienoberfläche für Begleitheizungssollwerte (Abbildung 7-4) greifen dann online auf die akquirierten Werte bzw. die Einstellvariablen zu.

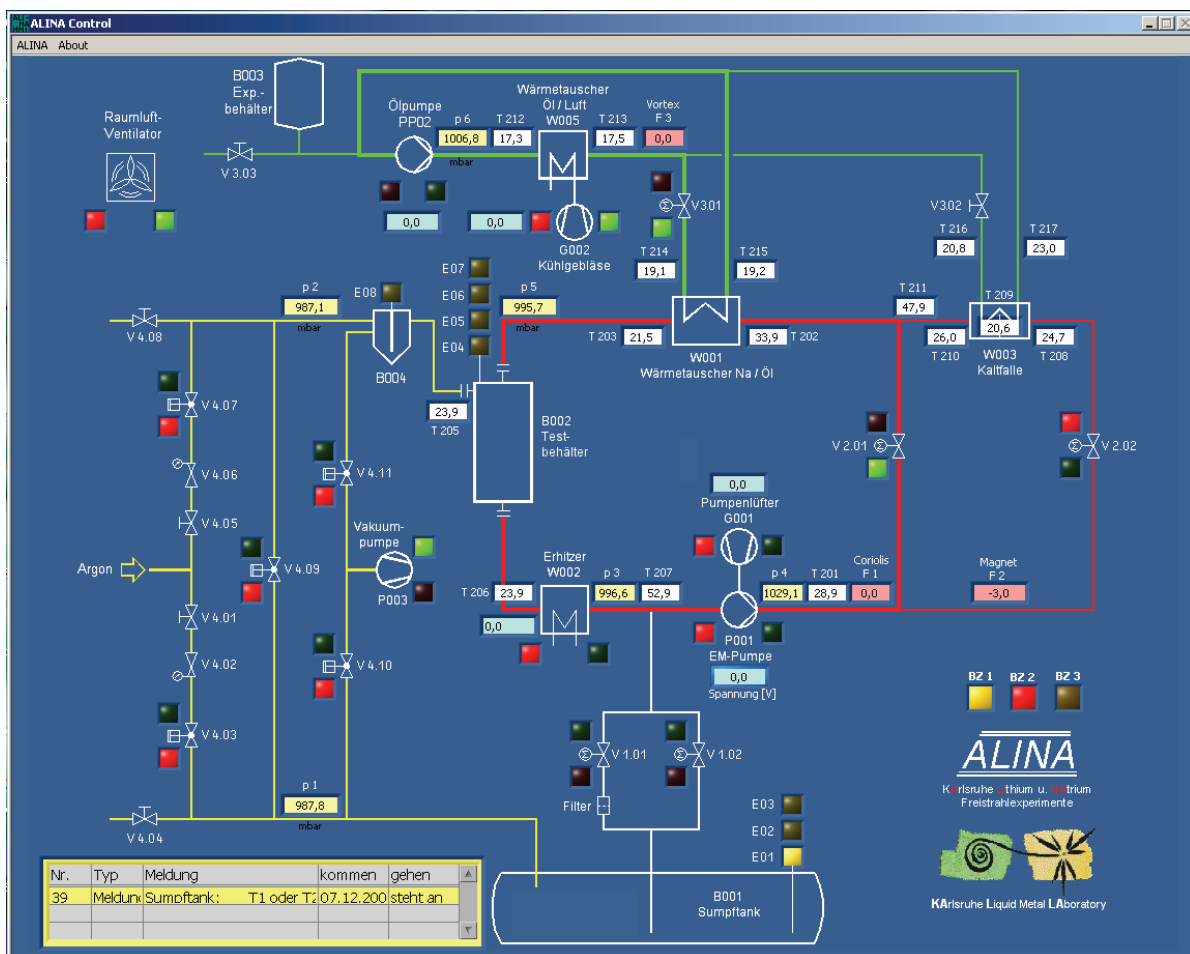


Abb. 7-3 Flussbild-HMI der ALINA-Anlage

Für das Datalogging werden spezielle Speichergruppen gebildet, für die unterschiedliche Abspeicher-Intervalle definiert werden und die aus unterschiedlichen Messgruppen oder Messwerten zusammengesetzt sein können. Die Einstellung der Intervalle kann natürlich über das HMI jederzeit beliebig angepasst werden. Die Datenbank kann komfortabel verwaltet und nach beendeter Messkampagne archiviert werden. Mit einem speziellen Sichtungsprogramm, dem so genannten Logviewer können sowohl aktuelle, als auch archivierte Daten schnell im Diagramm dargestellt werden und falls erforderlich im Textformat exportiert werden für weitere Auswertungen.

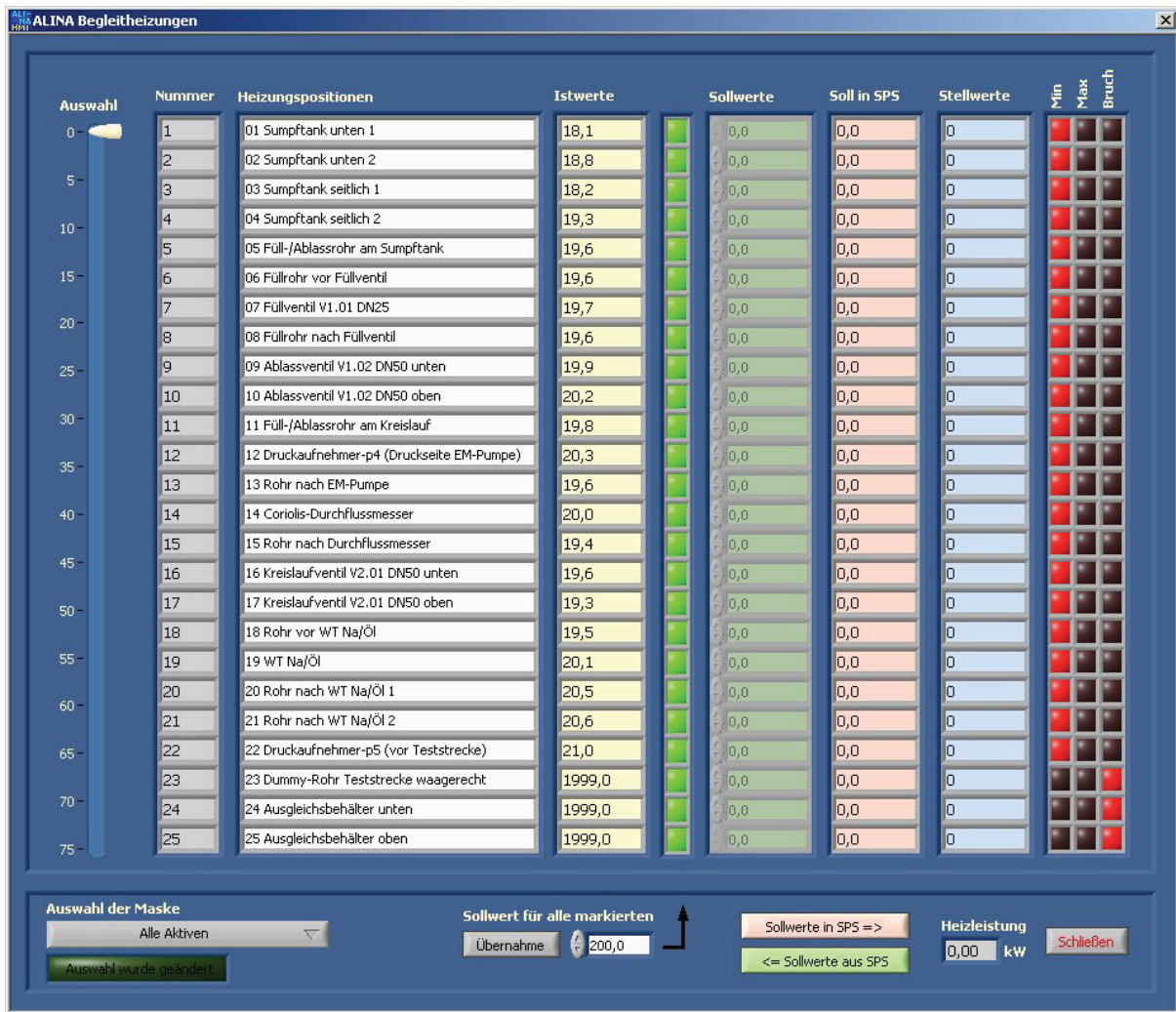


Abb. 7-4 Sollwerteingabe-HMI für Begleitheizungen

Das ZEUS-Programm enthält außerdem noch eine Grenzwertüberwachungsfunktion, die je nach Definition Meldungen oder Alarme in die Datenbank protokolliert und gleichzeitig den Melde-PCs einen Hinweis zukommen lässt, worauf diese den aktuellen Meldezustand aus der Datenbank laden. Somit wird sichergestellt, dass einerseits alle Ereignisse in der Datenbank festgehalten werden, andererseits dem Anlagenbediener die Alarme sofort mitgeteilt werden.

## 8 Literatur

- [1] An International Accelerator Facility for Antiproton and Ion Research, Conceptual Design Report, Gesellschaft für Schwerionenforschung, 2001.
- [2] V. Mikhailov, V. Evtikhin, et al., Lithium for fusion reactors and space nuclear power systems of the XXI century. Energoatomisdat-Moskau, ISBN-5-283-03634-0, 1999.
- [3] H.H. Liebermann, Planar and cylindrical jet streaming of water and of molten Fe<sub>40</sub>Ni<sub>40</sub>B<sub>20</sub> alloy, J. Appl. Physics 50, p. 6773, 1979.
- [4] P.M. Moretti & W.M. Kays, Heat Transfer to a Turbulent Boundary Layer with Varying Free-Stream Velocity and Varying Surface Temperature - An Experimental Study, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 8, (Sept. 1965), p. 1187-1202
- [5] Gordeev, S., Strömungsmechanische Analyse von Hochgeschwindigkeits-Flüssigmetall Targets mit freien Oberflächen für kerntechnische Anwendungen, Dissertation, Universität Karlsruhe-KIT, Juli 2008.
- [6] Hillenbrand, M, Qualifizierung einer Messtechnik zur Erfassung freier Grenzflächen bei Flüssigmetallen, Dissertation, Universität Karlsruhe-KIT, Juli 2008.
- [7] Stieglitz, R., Müller, U., Geodynamo - Eine Versuchsanlage zum Nachweis des homogenen Dynamoeffektes, FZKA 5716, IATF, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Februar 1996
- [8] Wild, E., Mack, K.J., Drechsler, G., Das Verschleißverhalten von Werkstoffkombinationen in flüssigem Natrium - Versuchseinrichtungen und experimentelle Ergebnisse, KfK1659, IRB, Kernforschungszentrum Karlsruhe, November 1972.
- [9] Mausteller, J.W., Tepper, F., Rodgers, S.J., Alkali Metal Handling and System Operation Techniques, American Nuclear Society, New York, 1967.
- [10] VDI-Wärmeatlas, Springer, Berlin; 10. Auflage, bearb. u. erw. A., Dezember 2005.
- [11] Wagner, W., Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen, 1. Auflage, 1994.
- [12] Tischler, W., Natriumstoffwerte , Technischer Bericht Nr.ITB76.128, Interatom, 1976.





# Anhang A Messstellenliste

Ifd. Nr.	Art	Bez.	Messstelle	Messgerät	Klemmen-Typ-Nr.	Physikalischer Messwert	Mess-Signal
1	Temperatur	T 1	Sumpftank unten 1	TE-Typ K Ø3mm	3312_1_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
2	Temperatur	T 2	Sumpftank unten 2	TE-Typ K Ø3mm	3312_1_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
3	Temperatur	T 3	Sumpftank seitlich 1	TE-Typ K Ø3mm	3312_2_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
4	Temperatur	T 4	Sumpftank seitlich 2	TE-Typ K Ø3mm	3312_2_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
5	Temperatur	T 5	Füll-/Ablassrohr ST.	TE-Typ K Ø3mm	3312_3_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
6	Temperatur	T 6	Füllrohr vor Füllventil	TE-Typ K Ø3mm	3312_3_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
7	Temperatur	T 7	Füllventil V1.01	TE-Typ K Ø3mm	3312_4_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
8	Temperatur	T 8	Füllrohr n. Füllventil	TE-Typ K Ø3mm	3312_4_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
9	Temperatur	T 9	V1.02 unten	TE-Typ K Ø3mm	3312_5_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
10	Temperatur	T 10	V1.02 oben	TE-Typ K Ø3mm	3312_5_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
11	Temperatur	T 11	Füll-/Ablassrohr KL	TE-Typ K Ø3mm	3312_6_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
12	Temperatur	T 12	Druckaufnehmer-p4	TE-Typ K Ø3mm	3312_6_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
13	Temperatur	T 13	Rohr n. EM-Pumpe	TE-Typ K Ø3mm	3312_7_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
14	Temperatur	T 14	Coriolis-FM	TE-Typ K Ø3mm	3312_7_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
15	Temperatur	T 15	Rohr nach FM	TE-Typ K Ø3mm	3312_8_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
16	Temperatur	T 16	Ventil V2.01 unten	TE-Typ K Ø3mm	3312_8_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
17	Temperatur	T 17	Ventil V2.01 oben	TE-Typ K Ø3mm	3312_9_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
18	Temperatur	T 18	Rohr vor WT Na/Öl	TE-Typ K Ø3mm	3312_9_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
19	Temperatur	T 19	WT Na/Öl	TE-Typ K Ø3mm	3312_10_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
20	Temperatur	T 20	Rohr n. WT Na/Öl 1	TE-Typ K Ø3mm	3312_10_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
21	Temperatur	T 21	Rohr n. WT Na/Öl 2	TE-Typ K Ø3mm	3312_11_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
22	Temperatur	T 22	Druckaufnehmer-p5	TE-Typ K Ø3mm	3312_11_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
23	Temperatur	T 23	Dummy-Rohr	TE-Typ K Ø3mm	3312_12_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
24	Temperatur	T 24	Ausgl.beh. unten	TE-Typ K Ø3mm	3312_12_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
25	Temperatur	T 25	Ausgl.beh. oben	TE-Typ K Ø3mm	3312_13_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
26	Temperatur	T 26	Dummy-Rohr	TE-Typ K Ø3mm	3312_13_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
27	Temperatur	T 27	Teststrecke 1	TE-Typ K Ø3mm	3312_14_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
28	Temperatur	T 28	Teststrecke 2	TE-Typ K Ø3mm	3312_14_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
29	Temperatur	T 29	Teststrecke 3	TE-Typ K Ø3mm	3312_15_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
30	Temperatur	T 30	Teststrecke 4	TE-Typ K Ø3mm	3312_15_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
31	Temperatur	T 31	Teststrecke 5	TE-Typ K Ø3mm	3312_16_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
32	Temperatur	T 32	Erhitzer 36kW	TE-Typ K Ø3mm	3312_16_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
33	Temperatur	T 33	Rohr vor EM-Pp.	TE-Typ K Ø3mm	3312_17_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
34	Temperatur	T 34	Druckaufnehmer-p3	TE-Typ K Ø3mm	3312_17_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
35	Temperatur	T 35	Nebenkreis vor EMF	TE-Typ K Ø3mm	3312_18_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
36	Temperatur	T 36	Ventil V2.02 unten	TE-Typ K Ø3mm	3312_18_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
37	Temperatur	T 37	Ventil V2.02 oben	TE-Typ K Ø3mm	3312_19_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
38	Temperatur	T 38	Rohr vor Kaltfalle	TE-Typ K Ø3mm	3312_19_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
39	Temperatur	T 39	Kaltfalle oben	TE-Typ K Ø3mm	3312_20_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
40	Temperatur	T 40	Kaltfalle unten	TE-Typ K Ø3mm	3312_20_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
41	Temperatur	T 41	Rohr nach Kaltfalle	TE-Typ K Ø3mm	3312_21_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
42	Temperatur	T 42	Rohrerhitzer 1	TE-Typ K Ø3mm	3312_21_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
43	Temperatur	T 43	Rohrerhitzer 2	TE-Typ K Ø3mm	3312_22_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
44	Temperatur	T 44	WT Öl/Luft 1	TE-Typ K Ø3mm	3312_22_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
45	Temperatur	T 45	WT Öl/Luft 2	TE-Typ K Ø3mm	3312_23_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
46	Temperatur	T 46	Ölvorlauf in Labor	TE-Typ K Ø3mm	3312_23_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
47	Temperatur	T 47	Ölrohr nach Vortex	TE-Typ K Ø3mm	3312_24_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV

## Messstellenliste

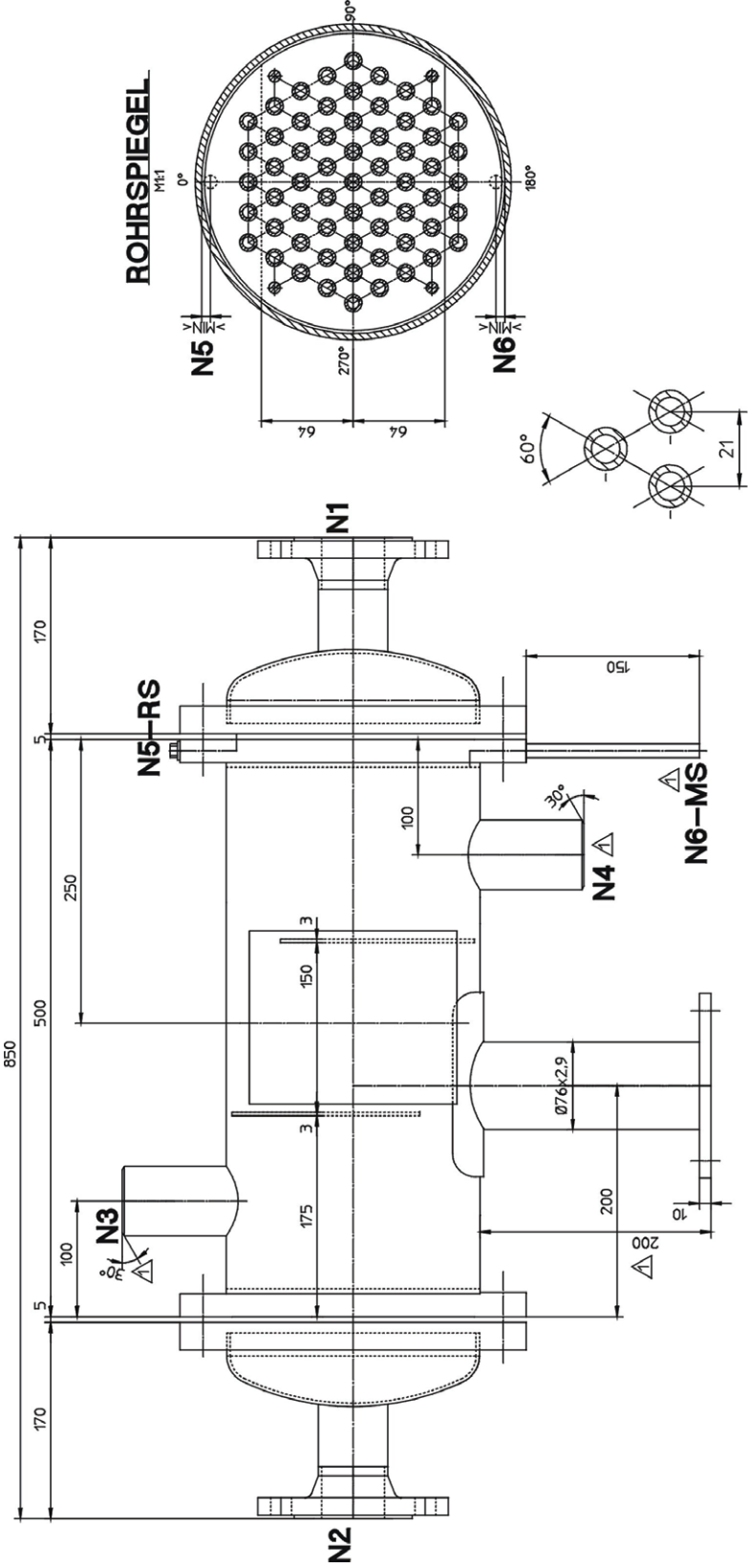
lfd. Nr.	Art	Bez.	Messstelle	Messgerät	Klemmen-Typ-Nr.	Physikalischer Messwert	Mess-Signal
48	Temperatur	T 48	Ölrohr vor WT Na/Öl	TE-Typ K Ø3mm	3312_24_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
49	Temperatur	T 49	WT Na/Öl Eintritt	TE-Typ K Ø3mm	3312_25_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
50	Temperatur	T 50	WT Na/Öl Austritt	TE-Typ K Ø3mm	3312_25_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
51	Temperatur	T 51	Ölrohr n. WT Na/Öl	TE-Typ K Ø3mm	3312_26_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
52	Temperatur	T 52	Ölrücklaufrohr	TE-Typ K Ø3mm	3312_26_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
53	Temperatur	T 53	Vor Ölpumpe	TE-Typ K Ø3mm	3312_27_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
54	Temperatur	T 54	Druckaufn. p6	TE-Typ K Ø3mm	3312_27_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
55	res.	-	-	-	3312_38_1	-	-
56	Temperatur	T 201	Na - EM-Pp. Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_38_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
57	Temperatur	T 202	Na - W001-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_39_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
58	Temperatur	T 203	Na - W001-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_39_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
59	Temperatur	T 204	Na - Testbox-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_40_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
60	Temperatur	T 205	Na - Ausgl.-Beh.	TE-Typ K Ø3mm	3312_40_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
61	Temperatur	T 206	Na - Erhitzer-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_41_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
62	Temperatur	T 207	Na - Erhitzer-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_41_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
63	Temperatur	T 208	Na - Kaltfalle-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_42_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
64	Temperatur	T 209	Na - Kaltf. unten	TE-Typ K Ø3mm	3312_42_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
65	Temperatur	T 210	Na - Kaltfalle-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_43_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
66	Temperatur	T 211	Na - Nebenkr.-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_43_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
67	Temperatur	T 212	Öl - W005-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_44_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
68	Temperatur	T 213	Öl - W005-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_44_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
69	Temperatur	T 214	Öl - W001-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_45_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
70	Temperatur	T 215	Öl - W001-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_45_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
71	Temperatur	T 216	Öl - Kaltfalle-Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_46_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
72	Temperatur	T 217	Öl - Kaltf.-Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_46_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
73	res.	-	-	-	3312_53_1	-	-
74	Temperatur	T 401	EM-Pp. Spulen 1	TE-Typ K Ø2mm	3312_53_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
75	Temperatur	T 402	EM-Pp. Spulen 2	TE-Typ K Ø2mm	3312_54_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
76	Temperatur	T 403	EM-Pp. Spulen 3	TE-Typ K Ø2mm	3312_54_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
77	Temperatur	T 404	EM-Pp. Spulen 4	TE-Typ K Ø2mm	3312_55_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
78	Temperatur	T 405	EM-Pumpe Kanal 1	Typ T Ø0,5mm	3312_55_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
79	Temperatur	T 406	EM-Pumpe Kanal 2	Typ T Ø0,5mm	3312_56_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
80	Temperatur	T 407	EM-Pumpe Kanal 3	Typ T Ø0,5mm	3312_56_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
81	Temperatur	T 408	EM-Pumpe Kanal 4	Typ T Ø0,5mm	3312_57_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
82	Temperatur	T 409	EM-Pumpe Kanal 5	Typ T Ø0,5mm	3312_57_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
83	Temperatur	T 410	Pumpenkühlung Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_58_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
84	Temperatur	T 411	Pumpenkühlung Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_58_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
85	Temperatur	T 412	W005-Kühlerluft Ein	TE-Typ K Ø3mm	3312_59_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
86	Temperatur	T 413	W005-Kühlerluft Aus	TE-Typ K Ø3mm	3312_59_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
87	Temperatur	T 414	EMF +	TE-Typ K Ø3mm	3312_60_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
88	Temperatur	T 415	EMF -	TE-Typ K Ø3mm	3312_60_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
89	Temperatur	T 416	Raumtemperatur	TE-Typ K Ø3mm	3312_61_1	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
90	Temperatur	T 417	Außentemperatur	TE-Typ K Ø3mm	3312_61_2	-100...+1.370 °C	-3,553...+54,807 mV
91	res.	-	-	-	3312_65_1	-	-
92	Durchfluss	F2	Na-Nebenkreislauf	EMF	3312_65_2	-30 ... +30mV	-30 ... +30mV
93	Druck	p1	Sumpft.druck (abs.)	Ceravac CTR90	3064_66_1	0...1333 mbar(a)	0 ... +10V
94	Druck	p2	Kreisl.druck (abs.)	Ceravac CTR90	3064_66_2	0...1333 mbar(a)	0 ... +10V
95	Druck	p3	EM-Pumpe-Ein	Kulite 3,5bar	3064_66_3	0 ... 3500mbar(a)	0 ... +10V
96	Druck	p4	EM-Pumpe-Aus	Kulite 3,5bar	3064_66_4	1 ... 3500mbar(a)	0 ... +10V
97	Druck	p5	Eintritt Testbox	Kulite 3,5bar	3064_67_1	2 ... 3500mbar(a)	0 ... +10V
98	Druck	p6	Ölkreis Pumpe-Aus	Amos 5bar	3064_67_2	3 ... 5000mbar(a)	0 ... +10V

lfd. Nr.	Art	Bez.	Messstelle	Messgerät	Klemmen-Typ-Nr.	Physikalischer Messwert	Mess-Signal
99	Druck	p7	Druck in Teststrecke	Ceravac CTR90	3064_67_3	0...13,33 mbar(a)	0 ... +10V
100	res.	-	-	-	3064_67_4	-	-
101	Durchfluss	F1	Na-Hauptkreislauf	Coriolis-FM	3054_68_1	0...300 kg/min	4 ...20mA
102	Durchfluss	F3	Öl-Kreislauf	Vortex-FM 8800C	3054_68_2	0 ... 20 m3/h	4 ... 20mA
103	res.	-	-	-	3054_68_3	-	5 ...20mA
104	res.	-	-	-	3054_68_4	-	5 ... 20mA
105	Mittl. Spg.	U1	EM-Pumpe P001	Simovert	Simatic	0 ... 400 V	digital
106	Mittl. Strom	I1	EM-Pumpe P001	Simovert	Simatic	0 ... 160 A	digital
107	Frequenz	f1	EM-Pumpe P001	Simovert	Simatic	0 ... 50 Hz	digital
108	Frequenz	f2	Gebläse G002	Micromaster	Simatic	0 ... 50 Hz	digital
109	Frequenz	f3	Ölpumpe P002	Micromaster	Simatic	0 ... 50 Hz	digital
110	Frequenz	f4	Raumluft-Ventilator	Micromaster	Simatic	0 ... 50 Hz	digital
111	El. Leistung	Pe1	Erhitzer W002	Thyro-P	Simatic	0 ... 50 Hz	digital
112	Höhenstand	E1	Sumpftank H1	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
113	Höhenstand	E2	Sumpftank H2	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
114	Höhenstand	E3	Sumpftank H3	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
115	Höhenstand	E4	Ausgl.beh. 302mm	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
116	Höhenstand	E5	Ausgl.beh. 261mm	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
117	Höhenstand	E6	Ausgl. 142mm	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
118	Höhenstand	E7	Ausgl. 100mm	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital
119	Na-Detekt.	E8	Abscheider 304mm	Elektrode	Simatic DI	0 / 1	digital

Tabelle A-1: Messstellenliste ALINA



# Anhang B Ergänzende Zeichnungen und Fotos



Wärmetauscher Typ BEM 219/500

Abb. B-1 Natrium-Diphenyl-Wärmetauscher W001

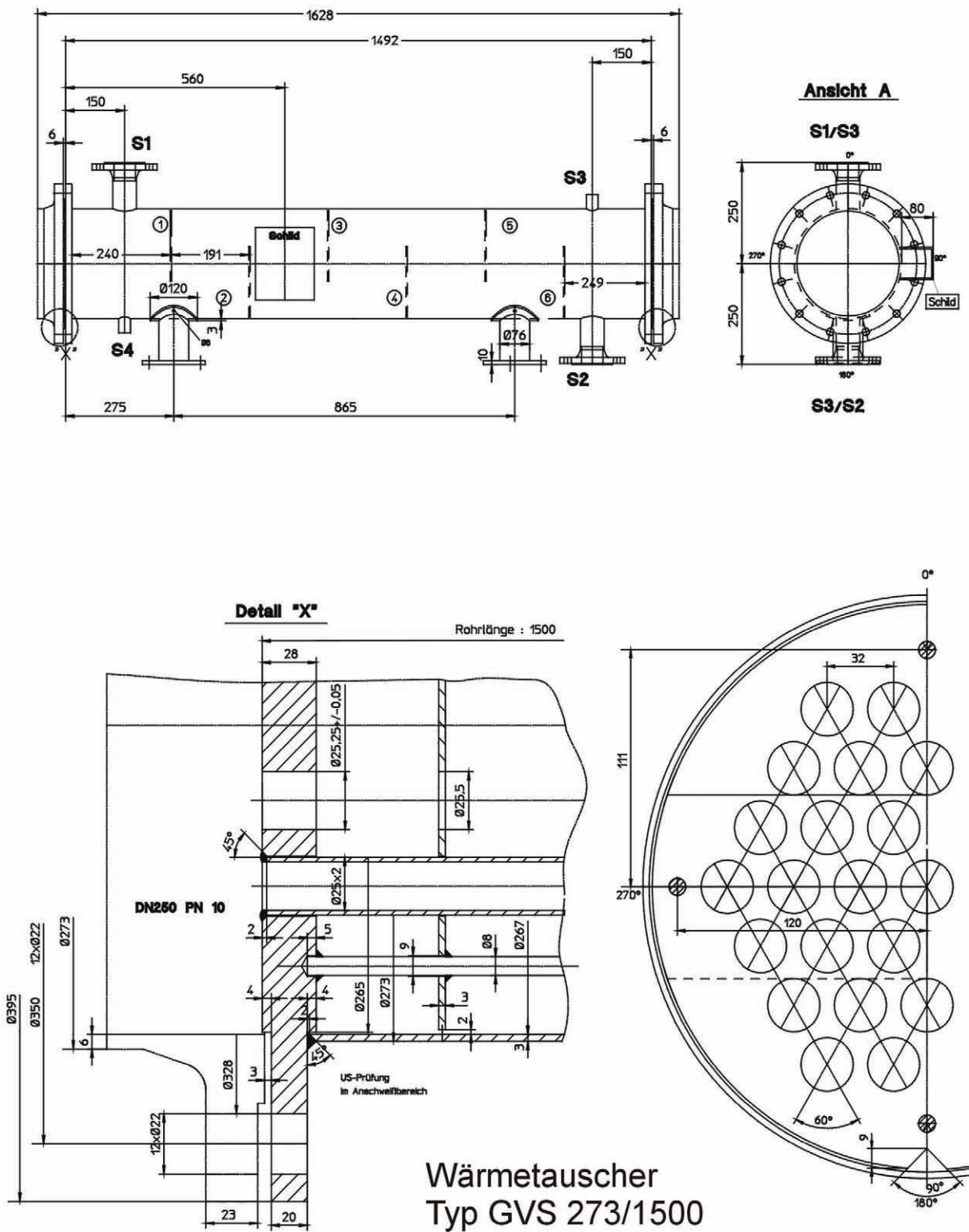


Abb. B-2 Diphyl-Luft-Wärmetauscher W005

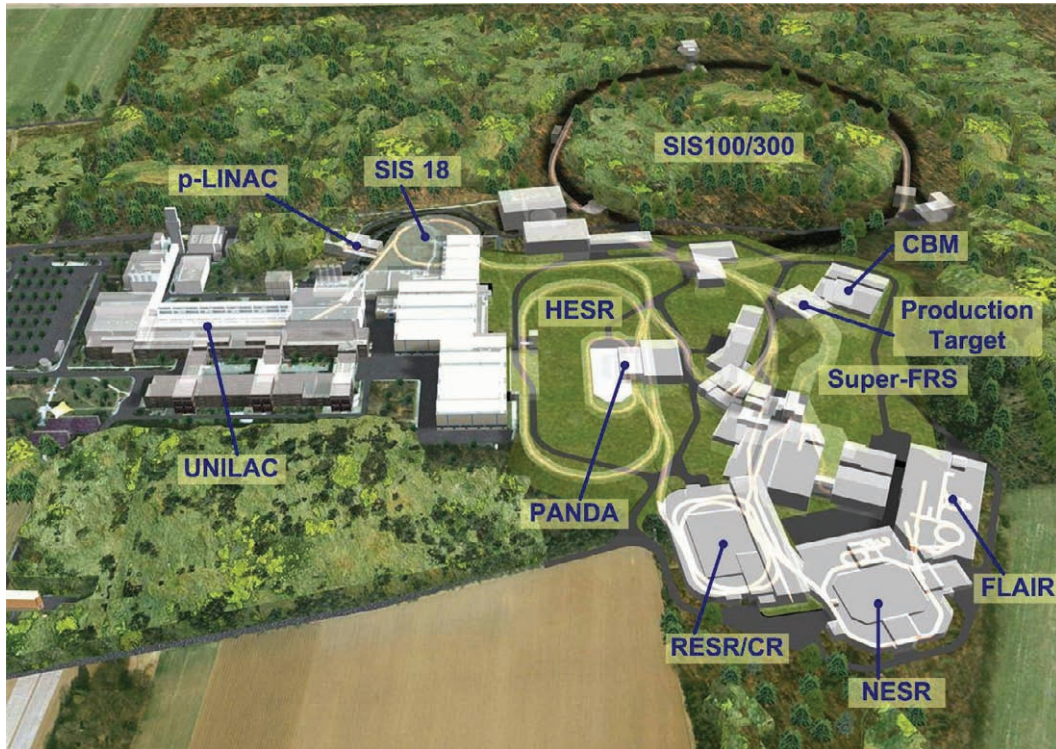


Abb. B-3 Gebäudeübersicht der geplanten Beschleunigeranlage FAIR am GSI

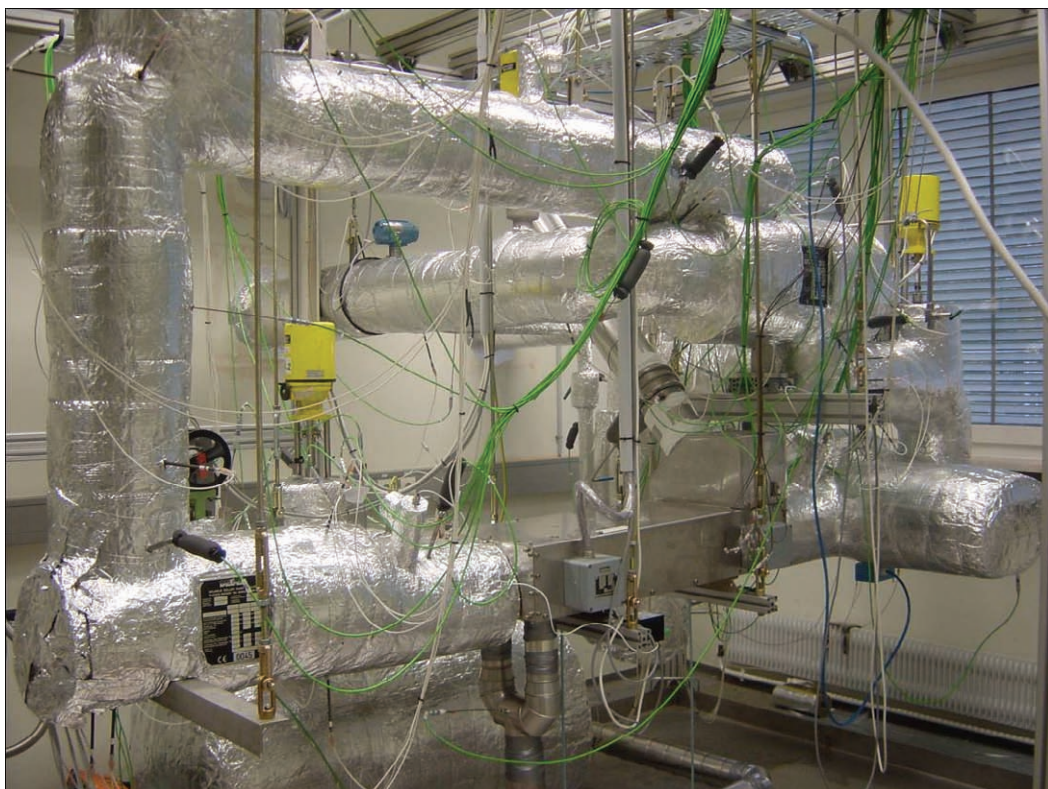
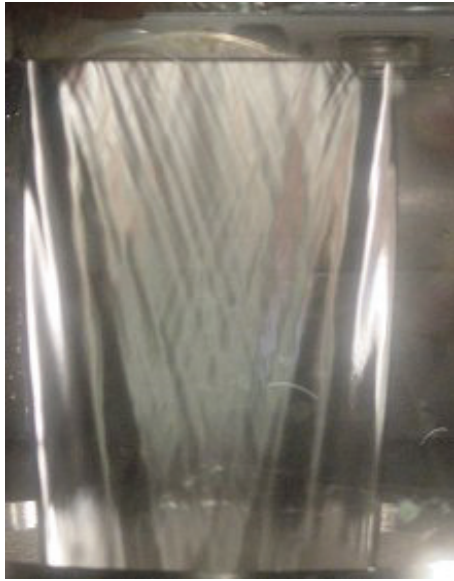
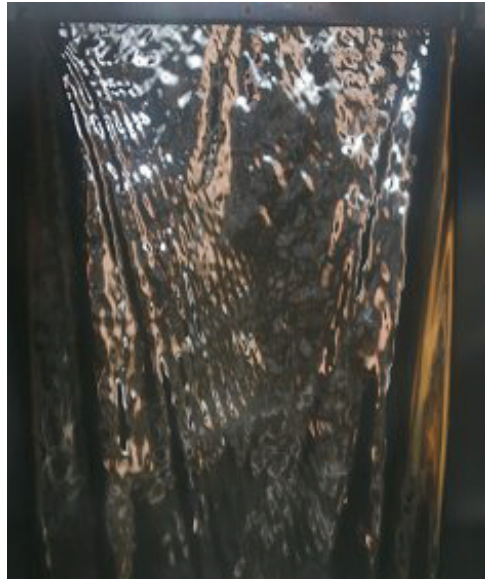


Abb. B-4 Foto der ALINA-Anlage mit thermischer Isolation bei Inbetriebnahme



Bel.zeit 1/60 s



Bel.zeit 1/2000 s

Abb. B-5 Natriumfreistrahel mit einer mittleren Geschwindigkeit von 2,5m/s und einer Temperatur von 200°C am Austritt aus der Rechteckdüse

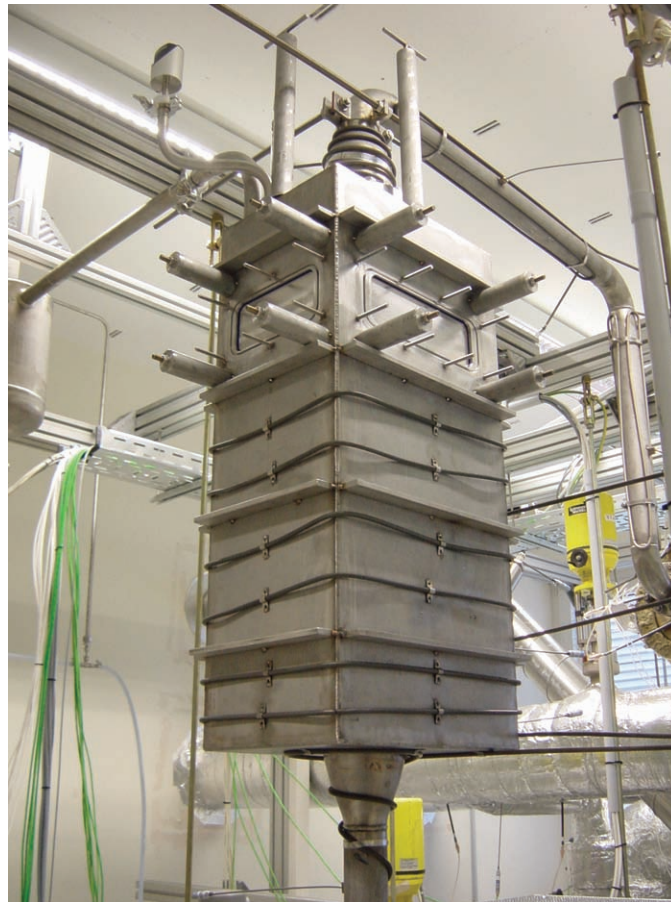


Abb. B-6 Freistrahelteststrecke ohne thermische Isolation



## Anhang C Stoffeigenschaften von Natrium

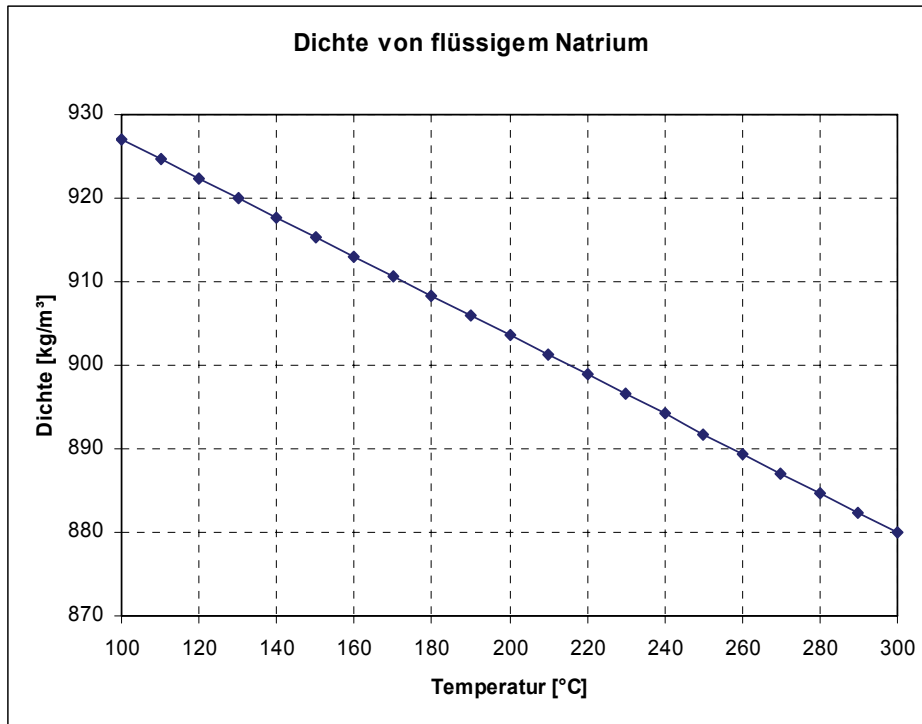


Abb. C-1 Dichte des Natriums im Temperaturbereich von ALINA

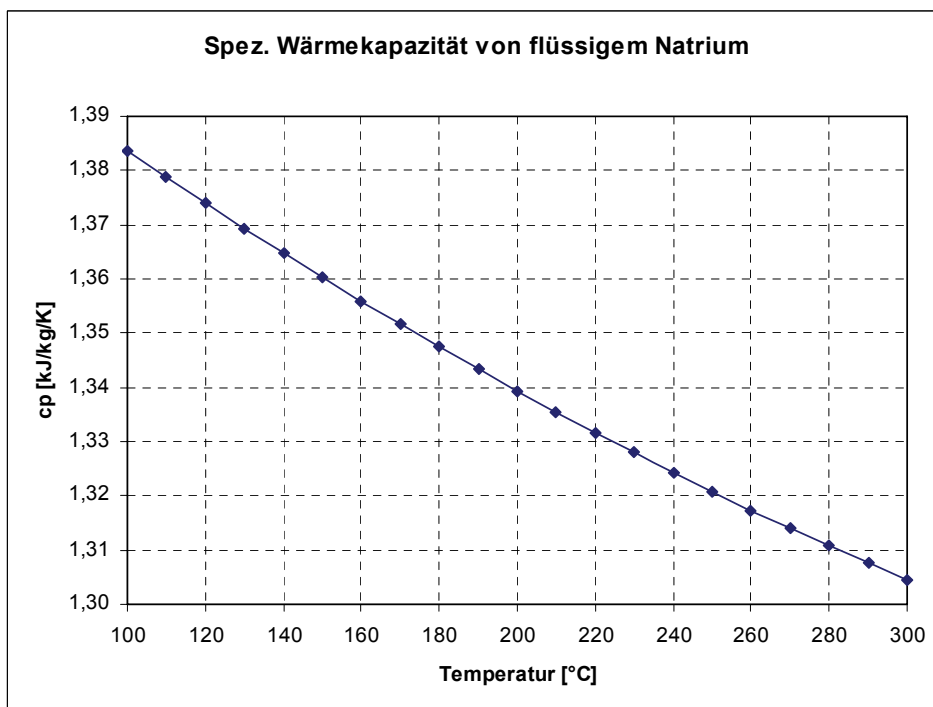


Abb. C-2 Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des Natriums

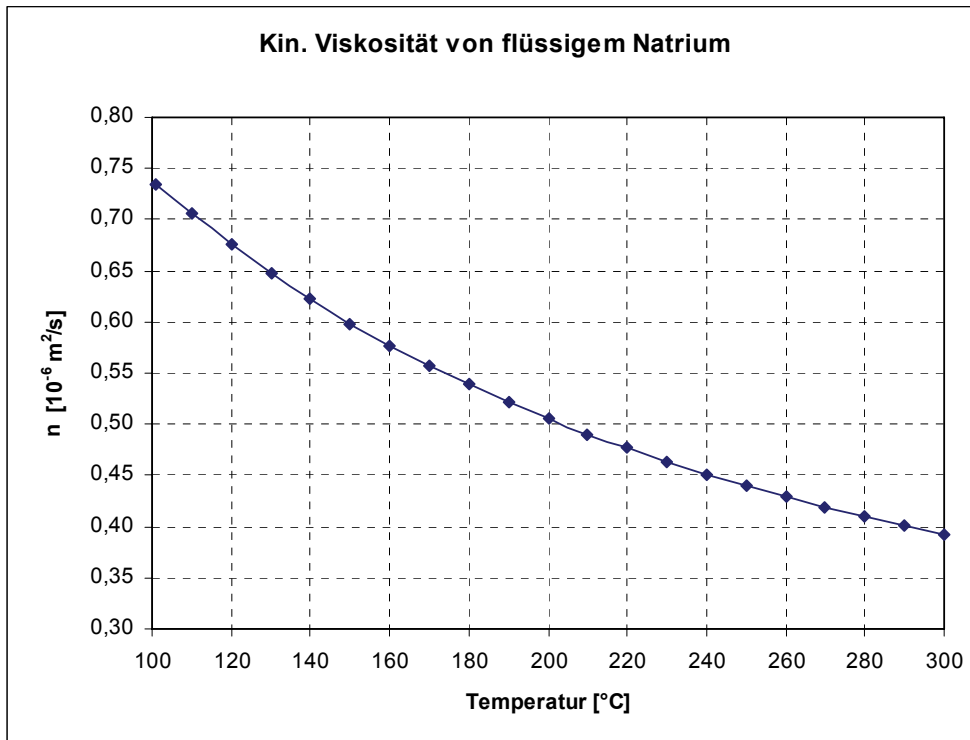


Abb. C-3 Temperaturabhängige kinematische Viskosität des Natriums

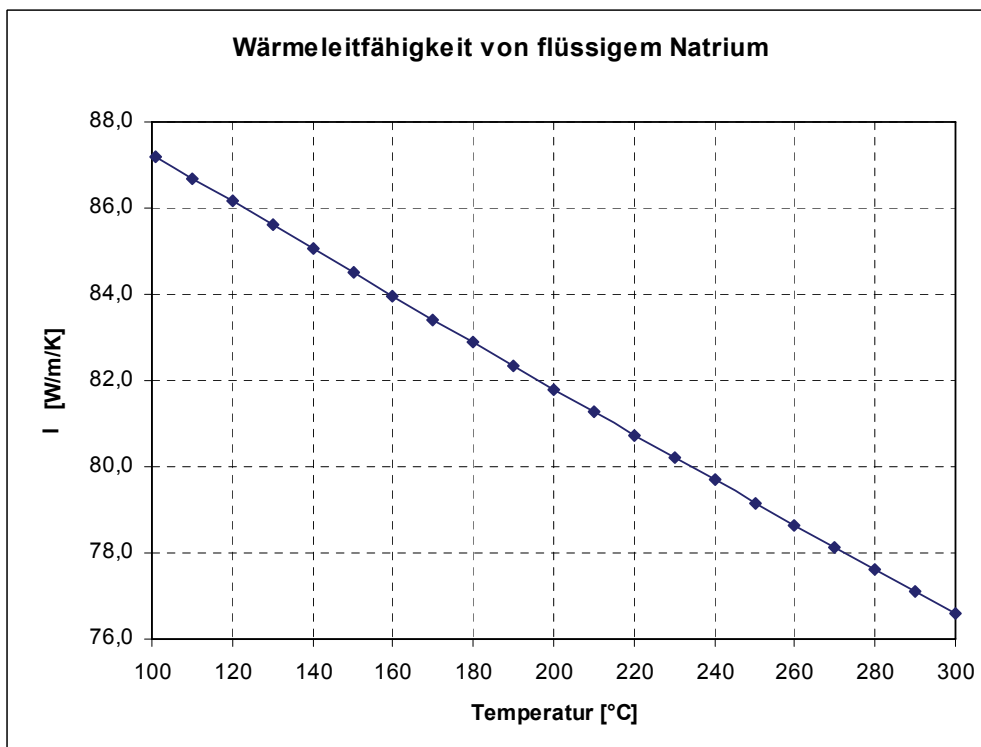


Abb. C-4 Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit des Natriums

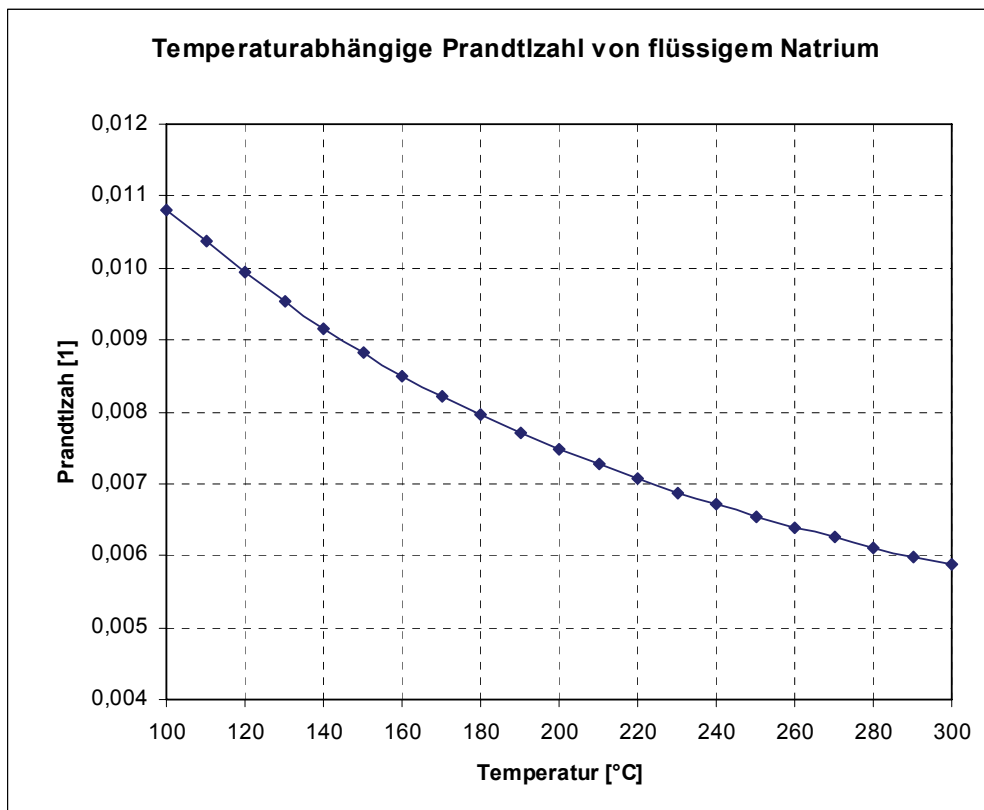
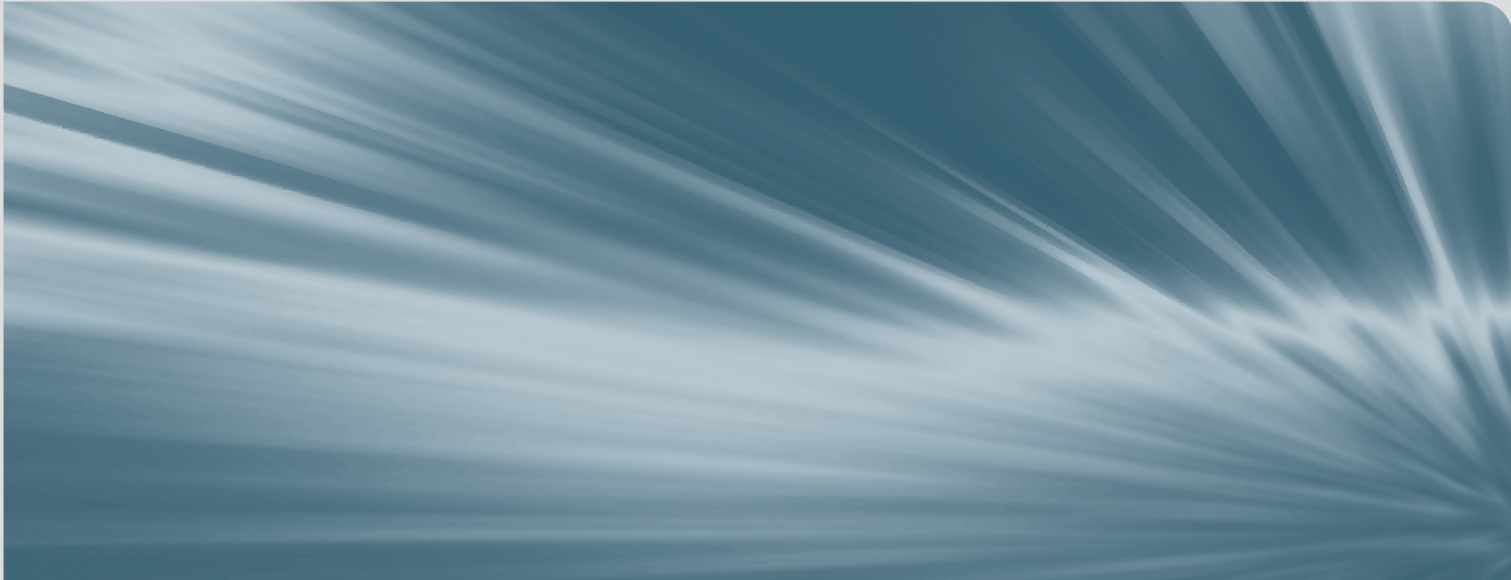


Abb. C-5 Temperaturabhängige Prandtlzahl des Natriums



ISSN 1869-9669  
ISBN 978-3-86644-620-5

