

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5716

**GEODYNAMO –
Eine Versuchsanlage zum
Nachweis des homogenen
Dynamoeffektes**

R. Stieglitz, U. Müller

Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

Februar 1996

FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE
Technik und Umwelt
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 5716

GEODYNAMO -
Eine Versuchsanlage zum Nachweis
des homogenen Dynamoeffektes

R. Stieglitz, U. Müller
Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1996

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

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

ISSN 0947-8620

GEODYNAMO

Eine Versuchsanlage zum Nachweis des homogenen Dynamoeffektes

Zusammenfassung:

Das Ziel des geplanten Experimentes ist der erstmalige Nachweis des sogenannten "homogenen Dynamoeffektes" ohne den Einsatz ferromagnetischer Materialien. Heute bezeichnet man Dynamos im allgemeinen als Generatoren.

In einem Generator wird mechanische Energie in elektromagnetische Energie umgesetzt. Technische Generatoren besitzen ein kleines magnetisches Restfeld. Beginnt sich dort der Rotor zu drehen, wird in einer Wicklung (Spule) ein Strom induziert, der groß genug sein muß, das magnetische Feld zu verstärken. Infolgedessen wächst der induzierte Strom, danach wächst erneut das magnetische Feld usw. Die Anordnung der magnetischen (Magnetkerne) und elektrischen Komponenten (Wicklungen) in einem technischen Generator ist dabei so gestaltet, daß die Umwandlungsverluste möglichst gering bleiben. Daher ist ein technischer Generator höchstmöglich inhomogen.

Ein homogener Dynamo, wie er in kosmischen Körpern (Planeten) vorkommt, hat keine speziellen elektrischen und magnetischen Systeme. Insbesondere sind seine elektrische Leitfähigkeit und seine magnetische Permeabilität annäherungsweise überall gleich. Im Gegensatz zum technischen Dynamo, in dem ein magnetisches Feld durch die Rotationsbewegung in einer komplexen elektrischen und magnetischen Umgebung erregt und verstärkt wird, erzeugt ein homogener Dynamo ein magnetisches Feld durch eine komplexe Fluidbewegung in einem homogenen Medium. Man nimmt daher an, daß homogene Dynamos der Ursprung der magnetischen Felder von Planeten sind.

Dieser Bericht beschreibt den Aufbau eines homogenen Dynamos im Labormaßstab.

Der geometrische Entwurf des hier vorgestellten Dynamos basiert auf dem Konzept der Skalenseparation, die ihre einfachste Form in räumlich periodischen Dynamos findet. Die kleinskalige Bewegung erfolgt in einem Doppelrohrzylinder, der im weiteren als Drallerzeuger bezeichnet wird. In diesem Drallerzeuger wird im Außenrohr eine Helikalströmung erzeugt. Das Innenrohr wird in gleicher Strömungsrichtung wie das Außenrohr durchströmt. Die Drallerzeuger sind so angeordnet, daß die Durchströmungsrichtung sich beim Übergang von einem zum anderen Drallerzeuger umkehrt. Alle Drallerzeuger sind natriumdurchströmt und befinden sich in einem mit stagnierendem Natrium gefüllten Zylinder.

Die wesentlichen physikalischen Gedankengänge der kinematischen Dynamotheorie werden in diesem Bericht zu Anfang kurz skizziert, damit die geometrische Auslegung, die zu dem aktuellen Design geführt hat, für den Leser transparent wird. Der Kernpunkt der Theorie besteht in der Ableitung einer Bedingung für den kritischen Volumenstrom (kritischen magnetischen Reynoldszahl), der den Beginn des Anwachsens des Magnetfeldes festlegt.

Die weiteren Abschnitte befassen sich mit der Auswahl eines geeigneten Flüssigmetalls sowie mit Vorstellungen über den Dynamotestmodul. Im Anschluß daran erfolgt eine Beschreibung des am IATF zu bauenden Natriumkreislaufs. Dabei werden sowohl die Auslegungskriterien für die wesentlichen Komponenten als auch sicherheits- und betriebstechnische Aspekte beleuchtet.

GEODYNAMO

An experimental facility to demonstrate the homogeneous Dynamo-effect

Abstract:

The aim of the planned experiment is to demonstrate the first time the so called homogenous Dynamo-effect without using any ferromagnetic materials. In dynamos kinetic energy is transferred to electromagnetic energy.

The expression "dynamo" is a traditional term for an electric generator. In magnetohydrodynamics the expression "dynamo" is used to specify the phenomenon of the self-excitation of magnetic fields by a mechanical motion of electrically conducting liquids. The operating principle of continuous dynamos is similar to that of the well known technical electric generators. Generators are commonly designed to transform mechanical energy into electromagnetic energy. In technical applications one of the main design objectives is to minimize the transfer losses through the use of appropriate windings, ferro-magnetic materials and different electrical conductivities. Consequently these dynamos are highly inhomogeneous. Planets and stars in general do not have any special electric or magnetic systems. One can consider them as nearly homogeneous, in particular their magnetic permeability is essentially constant and then regions of high electrical conductivity are singly connected. Like every self-excitation process the dynamo effect represents a bifurcation problem. In a dynamo the flow of an electrically conducting liquid changes from a non-magnetic state into a magnetic state. The dynamo principle is readily explained: The flow of an electrically conducting fluid in the presence of any magnetic perturbation induces an electrical current, which itself creates to a magnetic field. Under certain conditions a magnetic perturbation can be amplified by self-excitation. Thus, an exponential growth of a magnetic perturbation occurs in a way similar to a hydrodynamic shear instability. A saturation of the magnetic field at least in the time average is reached, when the Lorentz-forces generated by the interaction of induced electric currents and the magnetic field are strong enough to act on the velocity field.

In this article a laboratory experiment for a homogeneous dynamo based on a sodium flow is described.

The design utilizes the dynamo concept based on separation of scales, which takes its simplest form in spatially periodic dynamos. The design incorporates nearly periodic small scale helical motions in a sodium filled cylindrical box. Critical volumetric flow rates for the spontaneous magnetic field excitation are derived in an analytical model. The technical arrangement deduced from the model dynamo-criterion leads to a configuration which can be realized on a laboratory scale. The analytical model, the design and operational and safety aspects required for the dynamo experiment are outlined in this paper.

Zusammenfassung	1
Abstract Englisch	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	5
1.1 Motivation	5
1.2 Der Dynamoeffekt	6
1.3 Ziele und Begrenzungen eines Dynamolaborexperimentes	10
2 Die lineare kinematische Dynamotheorie	12
2.1 Achsensymmetrischer homogener Dynamo unendlicher Erstreckung	12
2.2 Achsensymmetrische Dynamolösungen bei elektrisch isolierender Umgebung	18
2.2.1 Elektrisch isolierender Raum in radialer Richtung	19
2.2.2 Elektrisch isolierender Raum in axialer (poloidaler) Richtung	22
2.2.3 Abschließende Bemerkungen über den Einfluß der Randbedingungen	26
3 Der Entwurf des Dynamomoduls	30
3.1 Wahl des Arbeitsfluides	30
3.2 Erzeugung eines Geschwindigkeitsfelds	33
3.3 Transfer der mathematischen Dynamobedingung in ein technisches Kriterium	35
3.4 Optimierung der Geometrieparameter	36
3.5 Optimaler Parametersatz und physikalische Überlegungen im Design des Dynamomoduls	41
4 Die Dynamoversuchsanlage	50
4.1 Das Anlagenkreislaufschema	50
4.1.1 Die Natriumhauptidekreisläufe	50
4.1.2 Der Natriumhilfskreislauf und das Füll- und Abblafsystern	52
4.1.3 Das Inertgassystern	54
4.2 Die Natriumhauptidekreisläufe	55
4.2.1 Die Natriumpumpen	55
4.2.2 Die Absperreinrichtungen des Hauptidekreislaufs	60
4.2.3 Die Natrium-Wasser-Kühler	61
4.2.4 Der Druckbehälter	66
4.3 Der Natriumhilfskreislauf	68
4.3.1 Der Gasseparator	68
4.3.2 Die Kaltfalle und der Wärmetauscher	69
4.3.3 Der Massenstrommesser	71
4.3.4 Der Sumpftank und der Ausgleichsbehälter	72
4.3.5 Die Absperrearmaturen	74
4.4 Das Wasser-Dampf-System	76

4.4.1 Die Behälter des Wasser-Dampf-Systems.....	76
4.4.2 Die Wasserpumpen.....	79
4.4.3 Größter Anzunehmender Unfall und das Sicherheitskonzept.....	79
4.5 Betrieb des Natriumkreislaufs	88
4.5.1 Der Füllvorgang.....	89
4.5.2 Benetzungsphase	93
4.5.3 Der Betrieb.....	94
4.6 Die Meßtechnik	95
4.6.1 Betriebskenngrößen.....	95
4.6.2 Magnetfeldmessung	101
4.6.3 Datenerfassung	105
4.7 Die Betriebsüberwachung (Anlagensteuerung).....	107
4.7.1 Die Heizungssteuerung	107
4.7.2 Die Betriebsinstrumentierung	110
4.8 Die Sicherheitseinrichtungen	117
5 Organisation und Zeitrahmen	118
5.1 Infrastruktur und Arbeitsteam	118
5.2 Zeitplanung.....	119
6 Ausblick.....	121
7 Literaturverzeichnis	122
Anhang A.....	124
A1 Der Einfluß einer turbulenten Strömung auf die elektrische Leitfähigkeit	124
A2 Der Einfluß unterschiedlichen Geschwindigkeitsfelder auf die Dynamobedingung.....	124
Anhang B.....	128
B.1 Ableitung der Druckverlustbeziehungen im Drallerzeuger.....	128
B.1.1 Die Helikalströmung im Drallerzeuger.....	128
B.1.2 Die Axialströmung im Drallerzeuger.....	130
Anhang C.....	132
C1 Berechnung des nötigen Ablaufquerschnitts des Natrium-Wasser-Kühlers	132
C2 Berechnung der Ablaufzeit des Natriums aus der gesamten Dynamoanlage in den Sumpfbehälter	133
Anhang D.....	136
D1 Betriebsmeßstellenliste des Geodynamoversuchsstandes.....	136
D2 Das Programm FÜLLEN auf der SPS	142
D3 Das Programm BENETZEN auf der SPS.....	143
D4 Das Programm BETRIEB auf der SPS.....	156
Abkürzungen, Variablen und Kennzahlen.....	174

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Ursprung planetarischer und astrophysikalischer Magnetfelder stellt für Wissenschaftler unterschiedlichster Fachrichtungen schon seit langer Zeit eine Frage von fundamentalem Charakter dar.

In der Astrophysik sind mehr als 300 magnetische Sterne bekannt, deren magnetische Feldstärke bis zu 3.4 Tesla (34000 Gauß) betragen können. Darüber hinaus wurden vor kurzer Zeit weiße Gnome und Pulsare entdeckt, deren magnetische Felder Werte von 10^8 Tesla erreichen. Ein sehr schwaches Magnetfeld von 10^{-10} Tesla durchdringt unser gesamtes Sonnensystem [Birzvalks, 1986]. Das horizontale Magnetfeld der Erde in unseren Breiten beträgt ca. 1.9 Gauß [Dorn, Bader 1976], es verändert sich ständig in seiner Neigung, insbesondere die Deklination nimmt jährlich um 0.1° ab. Die Feldstärke insgesamt bleibt jedoch annähernd konstant. Da Magnetfelder in elektrisch leitenden Medien jedoch diffundieren, würde ohne einen Dynamomechanismus das Magnetfeld in einem Zeitraum von ca. 10000-30000 Jahren verschwinden. Da jedoch Messungen auf dem Boden der Ozeane zeigen, daß das Erdmagnetfeld schon 3.5 Milliarden Jahre alt ist, muß sich das zur Zeit meßbare Feld durch Strömungen im Erdkern ständig erhalten und erneuert haben. Es muß also ein Dynamoprozeß stattfinden.

Was ist also ein Dynamo? Das Synonym für den Begriff Dynamo ist das uns vertrautere Wort Generator. In der Magnetohydrodynamik (MHD) beschreibt der Ausdruck Dynamo das Phänomen der Selbsterregung magnetischer Felder durch die mechanische Bewegung eines elektrisch leitenden Mediums. Der Dynamo ist also im Prinzip eine Maschine in der mechanische Energie in elektromagnetische Energie umgesetzt wird. Technische Generatoren sind in der Regel so ausgeführt, daß die Umsetzungsverluste bei dem Transferprozeß möglichst gering bleiben. Dazu wird ein räumlich kompliziertes Netzwerk aus elektrischen Wicklungen magnetischen Materialien von unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit eingesetzt. Kosmische Körper wie Planeten oder Sterne aber auch unsere Erde verfügen jedoch über keine derartigen elektrischen und magnetischen Systeme. (Würde man beispielsweise die technische Effektivität des Sonnendynamos berechnen, käme man auf einen Wirkungsgrad von ca. 0.01%; Birzvalks 1986). Ihr Aufbau ist annähernd homogen, das heißt ihre spezifische elektrische Leitfähigkeit σ und ihre magnetische Permeabilität μ sind in etwa überall gleich. Wegen des homogenen Aufbaus der Planeten und der existierenden Magnetfelder wird das zugehörige MHD-Dynamo-Problem auch oft das Problem des "*homogenen Dynamos*" genannt.

1.2 Der Dynamoeffekt

Wie kann ein homogener Dynamo überhaupt arbeiten, wenn er über keine ausgeprägten speziellen magnetische oder elektrische Systeme verfügt? Dazu sollte man sich zunächst das physikalische Wirkprinzip eines Dynamos vergegenwärtigen.

Ist ein sich bewegendes elektrisch leitendes Medium einem kleinen magnetischen Feld (, auch einer Magnetfeldstörung,) ausgesetzt, so wird nach dem Induktionsgesetz ein elektrisches Feld erzeugt. Dieses elektrische Feld treibt in dem leitfähigen Medium einen elektrischen Strom. Jeder elektrische Strom aber bildet wiederum nach dem Ampère'schen Gesetz ein magnetisches Feld. Unter gewissen Bedingungen, die sowohl von der Geometrie als auch der Qualität der Bewegung (Drehsinn, Geschwindigkeit etc.) abhängen, kann das ursprüngliche Magnetfeld verstärkt werden. Es kann also zu einem Anwachsen der Magnetfeldstärke in ähnlicher Weise kommen wie es für Geschwindigkeiten aus thermischen oder hydrodynamischen Instabilitäten bekannt ist. Die Selbsterregung des magnetischen Feldes oder das Dynamoproblem ist ein sogenanntes Verzweigungsphänomen. In einem homogenen Dynamo ändert sich der Zustand des Systems beim Überschreiten einer bestimmten Kenngröße von einem nicht-magnetischen Zustand in einen magnetischen durch die Bewegung eines elektrisch leitenden Mediums.

Nun kann das erzeugte Magnetfeld nicht grenzenlos anwachsen, d.h. das Wachstum des magnetischen Feldes ist dadurch begrenzt, daß das Aufrechterhalten des Magnetfeldes sich mit der mechanisch zugeführten Energie die Waage hält. Wie kann man sich das vorstellen?

Durch die Wechselwirkung von Magnetfeld und den induzierten elektrischen Strömen entstehen Lorentz-Kräfte. Die Lorentz-Kräfte wirken der Strömung des Mediums entgegen. Sind die Lorentz-Kräfte stark genug um auf die Strömung einzuwirken, ergibt sich bei konstanter mechanisch zugeführter Leistung ein Sättigungswert der Magnetfeldstärke, zumindest im zeitlichen Mittel.

Aus dem voran Erläuterten wird deutlich, daß im wesentlichen die Bewegung für die Selbsterregung des Magnetfeldes verantwortlich ist. Eine Selbsterregung ist nur dann möglich, wenn das induzierte Magnetfeld größer ist als die Dissipation (Vernichtung) des Magnetfeldes. Dieses Verhältnis wird durch die sogenannte magnetische Reynoldszahl R_m wiedergegeben, die in folgender Weise definiert ist:

$$R_m = \mu \sigma v a \quad (1.1)$$

Die Variable a beschreibt eine charakteristische Abmessung des Problems, v eine Geschwindigkeit, μ die magnetische Permeabilität und σ die elektrische Leitfähigkeit des Mediums. Anhand dieser Relation wird klar, daß ein Anwachsen des Magnetfeldes nur dann möglich ist, wenn die magnetische Reynoldszahl einen Wert annimmt, der zumindest größer als eins sein muß.

Diese einfache Formulierung der Kennzahl offenbart aber auch die Problematik eines Nachweises des homogenen Dynamos in einem Laborexperiment. Benutzt man keine ferromagnetischen Materialien, so ist die magnetische Permeabilität auf den Wert $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A fixiert. Die elektrische Leitfähigkeit flüssiger Medien ist jedoch ebenfalls auf Größen der Ordnung 10^6 A/(Vm) begrenzt. Daher ist in einem Laborexperiment lediglich durch große Abmessungen, hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder unter Ausnutzung geeigneter Skalenseparationsmethoden eine magnetische Reynoldszahl über eins, wie sie für den Dynamoeffekt benötigt wird, zu erzielen.

Im weiteren wird häufig von Modellen über homogene Dynamos gesprochen werden. Gemeinsam bei allen Modellen ist, daß magnetische Reynoldszahlen größer als eins für den Dynamoeffekt benötigt werden und daß eine Selbsterregung von Magnetfeldern schraubenförmige Fluidbewegungen erfordert. Es existieren eine Vielzahl von Modellen wie das von Steenbeck, das von Herzenberg, von Ponomarenko sowie das von Roberts. Im Abschnitt 2 wird das von Busse modifizierte Robertssche Modell näher erläutert, da es die Basis für den hier beschriebenen Dynamoversuchsstand bildet.

Eine leicht verständliche Übersicht über die anderen Dynamomodelle ist den Büchern von Birzvals [1986] und Moreau [1990] zu entnehmen. Eine detaillierte, wissenschaftlich mathematische Formulierung der homogenen Dynamomodelle ist in den Büchern von Moffat [1978], Krause&Rädler [1980] sowie den Abhandlungen von Gubbins [1974] und Roberts [1970, 1972] beschrieben. Weitere Arbeiten zu diesem Thema stammen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, von Batchelor [1949], Busse [1977], Moffat& Proctor [1985], Ponomarenko [1975], Soward [1987] sowie Soward& Childress [1989].

Ein erster erfolgreicher Dynamoversuch wurde von Lowes und Wilkinson 1963 und 1968 im Labormaßstab durchgeführt. Dabei benutzten beide ferromagnetische Eisenblöcke ($\mu_r \gg 1$), die in einem Quecksilberbad rotierten. Sie erzielten eine Sättigung des Magnetfeldes beim Überschreiten einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit. Dieses Experiment lebte in hohem Maße von der magnetischen Sättigung des Eisens, der magnetischen Remanenz der Eisenblöcke und den damit verbundenen Hystereseeffekten. Es weist jedoch durch die magnetische Inhomogenität keinerlei Ähnlichkeit mit dem Selbsterregungsverhalten von homogenen Dynamos, insbesondere von Planeten oder kosmischen Körpern auf.

Das bisher einzige Experiment, in dem der homogene Dynamoeffekt ohne den Einsatz ferromagnetischer Stoffe nachgewiesen werden sollte, wurde von Gailitis 1989 durchgeführt. Das Experiment basierte auf dem Dynamomodell von Ponomarenko und bestand aus einem 3m langen Doppelrohrzylinder. Durch das Innenrohr wurde flüssiges Natrium, das sich auf schraubenförmigen Bahnen bewegte, gepumpt. Am Ende des Zylinders wurde das Fluid um 180° umgelenkt und strömte zurück. Der Selbsterregungspunkt wurde bei diesem Experiment nicht erreicht, da mechanische Vibrationen den Modul vor dem Erreichen der kritischen magnetischen Reynoldszahl zerstörten. Dennoch wurde in diesem Experiment bei einem

abrupten Ausschalten eines äußeren Magnetfeldes eine signifikante Verzögerung des Magnetfeldabfalls gemessen.

Trotz des relativ einfachen mechanischen Aufbaus des Ponomarenkodynamos wurde aus prinzipiellen physikalischen Überlegungen dieses Modell nicht für das im IATF/FZK geplante Experiment ausgewählt. Denn die kritischen magnetischen Reynoldszahlen für das Ponomarenkomodell sind so groß, daß ein eventuell erregtes magnetisches Feld höchstwahrscheinlich durch die hohe Konvektionsgeschwindigkeit aus dem Modul herausgetragen wird, bevor ein signifikantes Anwachsen eintritt.

In diesem Zusammenhang sei auch angemerkt, daß wegen der hohen zum Teil drallbehafteten Natriumvolumenströme und der geometrischen Gegebenheiten in Brutreaktoren auf ein unkontrolliertes Auftreten eines homogenen Dynamos im Prinzip spekuliert wird, so schlossen Bevir [1973] und Pierson [1975] anhand ihrer Arbeiten das Auftreten eines solchen Phänomens nicht aus. Eine Vermessung der Brutreaktoren in Rußland [Kirko 1989] wie auch in Frankreich [Prudhon et al. 1994] haben bisher keinerlei Anhaltspunkte für das Auftreten des Dynamoeffektes gezeigt.

Im Gegensatz zur theoretischen Analyse der Fragestellung, die zumindest auf dem Gebiet der linearen kinematische Dynamotheorie seit längerer Zeit ausgiebig diskutiert wird, fehlt auf experimenteller Seite immer noch eine Bestätigung des Dynamophänomens. Die Möglichkeiten der theoretischen Arbeiten sind jedoch bei weitem nicht ausgeschöpft. Sowohl im Rahmen der linearen Phänomene und noch ausgeprägter im Bereich der nichtlinearen Phänomenen besteht noch eine Vielzahl von Unsicherheiten.

Bei den linearen Phänomenen gilt es folgende Fragen zu klären:

- ◆ Wie sehen die Magnetfeldmoden der niedrigsten Eigenwerte im symmetrischen wie auch im Fall des nichtsymmetrischen Dynamos aus ?
- ◆ Welchen Einfluß haben Störungen des Geschwindigkeitsfeldes und des Druck auf das sich entwickelnde Magnetfeld ?
- ◆ Welchen Einfluß haben die elektrischen Randbedingungen auf die kritische magnetische Reynoldszahl und die Art des Magnetfeldes ?
- ◆ Wie hängt die Gleichgewichtsamplitude des Magnetfelds von den Strömungsparametern ab?
- ◆ Wie beeinflussen externe angelegte Magnetfelder den Typ des entstehenden Magnetfeldes. Entwickelt sich ein Dipolfeld oder ein Quattropfeld ? Ist das Feld achsensymmetrisch oder nicht ?

Die Bandbreite der noch nicht verstandenen Aspekte im Bereich der nichtlinearen Phänomene ist bei weitem größer. Es ist zwar vor kurzen gelungen die Entstehung des Erdmagnetfeldes durch eine numerische Simulation zumindest angenähert zu berechnen [Glatzmaier & Roberts

1995]. Aber beide gehen in ihrem Modell von vielen Annahmen und Randbedingungen aus, die wissenschaftlich noch nicht abgesichert sind. Bemerkenswert in dieser Simulation hingegen ist, daß ein Polaritätswechsel des Erdmagnetfeldes, wie er auf der Erde durch Messungen nachgewiesen worden ist, nachberechnet werden konnte. Dennoch bleiben bis heute noch viele Fragen ungeklärt.

- ◆ Unklar ist beispielsweise, inwieweit das entstehende Magnetfeld auf die Strömung rückwirkt. Inwieweit beeinflusst eine turbulente Strömung die kritische magnetische Reynoldszahl? Durch das selbsterregte Magnetfeld kann die Strömung relaminarisieren. Zu welchen Veränderungen hinsichtlich des Magnetfeldes führt dieser Effekt?
- ◆ Von welcher Art sind die Verzweigungsphänomene beim Übergang in den magnetischen Zustand? Gibt es unterkritische Verzweigungen, überkritische Verzweigungen oder gar eine Hopfverzweigung?
- ◆ Von welcher Qualität ist der überkritische Gleichgewichtszustand? Ist er insbesondere stationär oder oszillatorisch?
- ◆ Gibt es eine Wechselwirkung von unsymmetrischen und symmetrischen Magnetfeldmoden?

Alleine die Vielzahl der hier aufgeworfenen und weitgehend unbeantworteten Fragen verdeutlicht, daß die nichtlineare homogene Dynamotheorie noch in ihren Kinderschuhen steckt. Die Ergebnisse, die bisher auf diesem Gebiet von Zhang&Busse [1988] und Busse [1992] veröffentlicht wurden, liefern keine befriedigende Erklärung für Dynamos in kosmischen Dimensionen. Die Pfade zur Lösung liegen dabei nicht nur im Bereich einer vollständigen numerischen Simulation des Problems, vielmehr sollten auch analytische bzw. halbanalytische Methoden und Modelle entwickelt werden, die einen tieferen Einblick in die auftretenden Prozesse geben.

Abschließend sei noch einmal ausdrücklich betont, daß es bisher kein Experiment gibt, indem der homogene Dynamoeffekt nachgewiesen wurde. Die Durchführung eines entsprechenden Experimentes muß daher als eine wissenschaftliche Herausforderung angesehen werden. Denn ohne eine experimentelle Bestätigung grundlegender Effekte und ohne Meßergebnisse ist die weitere Entwicklung bestehender Modelle nur sehr eingeschränkt möglich. Daher ist ein Dynamoexperiment zum Nachweis dieses Phänomens ein Meilenstein auf dem Weg zu einem generellen Verständnis planetarischer und astrophysikalischer Dynamos.

1.3 Ziele und Begrenzungen eines Dynamolaborexperimentes

Primäres Ziel eines Dynamoexperimentes ist der Nachweis, daß bei geeigneter Strömung eines elektrisch leitenden Mediums ein Magnetfeld erregt wird, das sich in der Folge **selbst** bis zu einer gewissen Größe verstärkt. In den ersten Versuchsphasen wird daher die Abhängigkeit des kritischen Kontrollparameters, der kritischen magnetischen Reynoldszahl, von den anderen Strömungsparametern untersucht. Weiterhin ist die Größe der Amplitude des Magnetfeldes in Abhängigkeit von der Zeit und den Strömungsparametern von wesentlichem Interesse. Man kann spekulieren, daß die räumliche Verteilung des entstehenden Magnetfeldes nicht von der Anfangsstörung abhängt; ein experimenteller Nachweis für diese Hypothese muß jedoch angetreten werden.

In einer zweiten Experimentierphase sollen im wesentlichen die nichtlinearen Phänomene genauer untersucht werden. Einen breites Untersuchungsfeld werden die schon im vorangegangenen Abschnitt angesprochenen Verzweigungsphänomene bieten. Eine nähere Spezifikation für ein entsprechendes Experimentierprogramm kann im jetzigen Stadium noch nicht angegeben werden, da eine genaue Definition der Fragestellung wesentlich von den experimentellen Befunden der ersten Versuchsphase abhängt.

Da das geplante Laborexperiment zur Klärung der Entstehung planetarischer Magnetfelder beitragen soll, ist es von essentieller Bedeutung, die grundlegenden Gemeinsamkeiten aber auch die Unterschiede zwischen dem Experiment und den Vorgängen im Inneren eines Planeten herauszuarbeiten.

Die Basis für jedes Dynamomodell sind Wechselwirkungen zwischen verschiedenen schraubenförmigen Strömungswirbeln eines sehr gut elektrisch leitenden Mediums. Solche "helikalen" und "axialen" Strömungen können auf ganz unterschiedliche Art erzeugt werden.

In einem Planeten existiert zwischen dem äußeren festen Mantel und dem inneren festen Kern ein großer Temperaturunterschied. Bei der Erde beträgt dieser ca. 3700°K . Dadurch kommt es durch Dichtedifferenzen getrieben zu einer Konvektionsströmung. Unter der Einwirkung der Corioliskräfte aus der Erdrotation werden die bei der Naturkonvektionsströmung zunächst entstehenden Walzen mit ihrer Achse in Richtung der Achse der Erdrotation ausgerichtet. Die Fluidteilchen bewegen sich innerhalb der Konvektionswalzen auf Schraubenlinien. Auf dem Rand der Walze bewegen sie sich zum festen Rand der Kugelschale hin. Im Zentrum ist die Bewegung einwärts gerichtet. Diese Schraubenbewegung wird von dem sogenannten Eckmandrift in der Grenzschicht am Rand der Kugelschale ausgelöst. Wie man sich eine solche Bewegungsform vorstellen muß ist in der Prinzipskizze 1.1 schematisch aufgezeigt.

In einem Laborexperiment sind die Kennzahlen schwerkraftgetriebener Konvektionsströmungen in der Größe wie sie in Planeten aufgrund der hohen Temperaturgradienten und der großen Abmessungen auftreten nicht realisierbar. Auch eine entsprechende Rotationsbewegung der

Strömungsanordnung läßt sich in einem Experiment mit vertretbarem Kostenaufwand nicht durchführen.

In dem hier vorgestellten Experiment wird deshalb eine ähnliche Strömungsform, wie sie in Planeten existiert und in kleinen Experimenten schon gezeigt wurde [Busse&Carrigan 1974], dadurch erzielt, daß das Fluid durch eine bestimmte Strömungsgeometrie gezwungen wird. Die Tatsache, daß Planeten zumeist kugel- oder ellipsenförmig sind und das Experiment eine Zylindergeometrie aufweist ist dabei von der Strömungsstruktur her gesehen von untergeordneter Bedeutung und beeinträchtigt lediglich die Größe der kritischen magnetischen Reynoldszahl in moderater Weise aber nicht grundsätzlich.

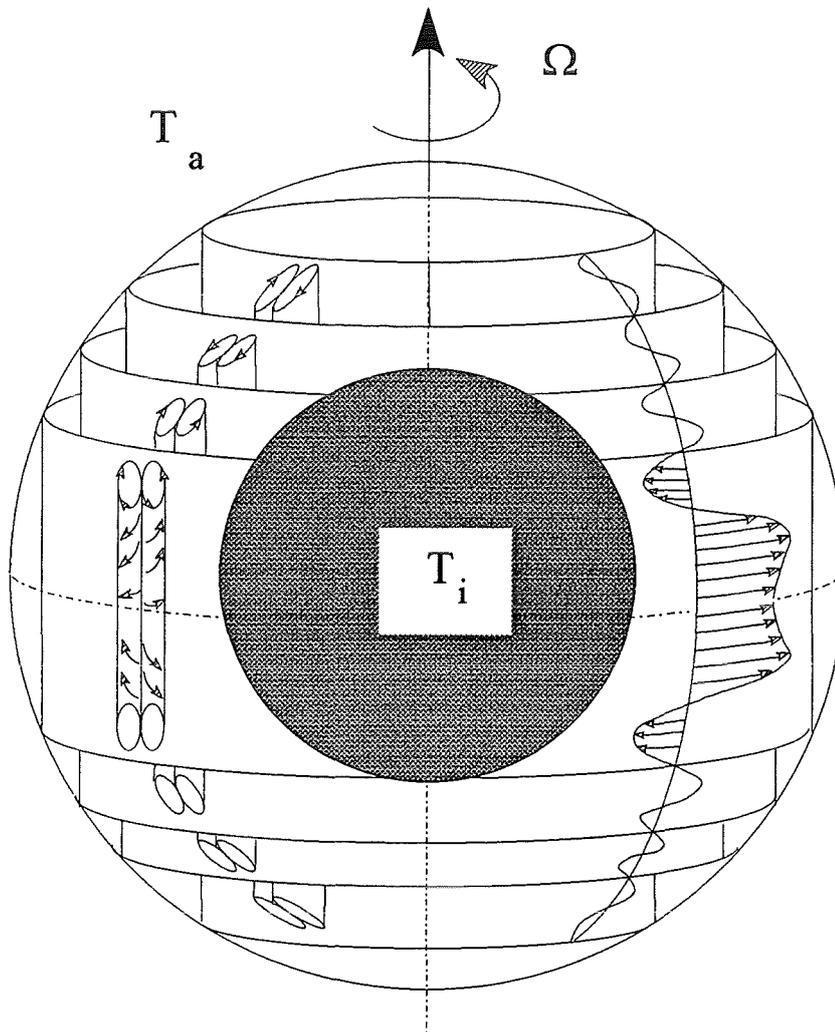


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau der Erde mit einem heißen festen inneren Kern und einem kalten festen äußeren Kern. Die Konvektionsrollen, die durch den Temperaturunterschied ($T_i - T_a$) entstehen, werden durch die Erdrotation in Richtung der Rotationsachse ausgerichtet. Das gestaffelte, walzenartige Strömungsmuster, das im linken Teil der Kugel zu sehen ist, ist vermutlich die Ursache für die Erzeugung des Erdmagnetfeldes. Das Geschwindigkeitsprofil der relativen Driftbewegung der Walzen gegeneinander ist schematisch im rechten Teil der Kugel abgebildet.

2 Die lineare kinematische Dynamotheorie

Dieses Kapitel beschreibt die kinematische lineare Dynamotheorie, die dem Laborversuch zugrunde liegt. Naturgemäß beinhaltet dieser Abschnitt eine Vielzahl mathematischer Formulierungen. Dennoch soll versucht werden, dem Leser die Grundgedanken dieses Modells aufzuzeigen. Darüber hinaus werden die Vereinfachungen des Modells erläutert und deren Auswirkungen auf die technische Ausführung des Laborversuchs diskutiert.

2.1 Achsensymmetrischer homogener Dynamo unendlicher Erstreckung

Die theoretische Formulierung des Dynamoeffektes basiert auf den Maxwell'schen Gleichungen, also dem Ampère'schen Gesetz und dem Induktionsgesetz. Diese Gleichungen lassen sich zusammen mit dem Ohm'schen Gesetz für bewegte elektrische Leiter zu einer Transportgleichung für das zeitliche Anwachsen des magnetischen Feldes B in Form der Gleichung 2.1 umschreiben.

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) B &= (B \cdot \nabla) \mathbf{v} + \lambda \Delta B \quad \text{oder} \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \lambda \nabla^2 \right) B &= \nabla \times (\mathbf{v} \times B) \end{aligned} \tag{2.1a,b}$$

Die Konstante λ beschreibt eine Stoffkonstante des Dynamos und ist umgekehrt proportional dem aus Produkt aus der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit σ des Fluids und der spezifischen magnetischen Permeabilität μ des Mediums. \mathbf{v} stellt das zur Erzeugung des Magnetfelds benötigte Geschwindigkeitsfeld dar.

Beide Formulierungen 2.1 sind identisch. Die obere Gleichung ist vielen Lesern von Charakter her bekannt. Sie ist vollständig analog zur Wirbeltransportgleichung der Hydrodynamik und soll im weiteren kurz diskutiert werden.

Der erste Term $\partial B / \partial t$ stellt die zeitliche Änderung des Magnetfeldes dar.

Der zweite Term repräsentiert den konvektiven Transport des Magnetfeldes in einem Kontrollvolumen. Der Ausdruck $(B \cdot \nabla) \mathbf{v}$ beschreibt die Produktion des Magnetfeldes durch die Streckung der magnetischen Flußlinien.

Der letzten Ausdruck $\lambda \Delta B$ beschreibt die Vernichtung des Magnetfeldes durch Diffusion. Dieser Term drückt den diffusiven Transport des Magnetfeldes aus Gebieten mit großer elektrischer Stromdichte in Gebiete mit niedrigerer elektrischer Stromdichte aus. Aus der Größenordnungsbetrachtung ergibt sich unmittelbar, daß das Diffusionsgebiet mit $\sqrt{\lambda t}$ skaliert. In der mathematischen Beschreibung, wie sie hier gewählt worden ist, diffundiert das Magnetfeld. Im physikalischen Sinne beschreibt dieser Term nicht die Diffusion des Magnetfeldes sondern die des elektrischen Stroms, der in Joulesche Wärme umgesetzt wird. Dieser Term $\lambda \Delta B$ drückt das Bestreben des elektrischen Stroms aus, sich in einem Gebiet zu homogenisieren. Über das Ampère-Maxwell'sche Gesetz ist die elektrische Stromdichte \mathbf{j} mit

dem Magnetfeld über die Relation $\nabla \times \mathbf{B} = R_m \mathbf{j}$ gekoppelt. In einem Gebiet der Länge a ergibt dieser Effekt eine charakteristische Diffusionszeit t der Größenordnung $t \sim (a^2/\lambda)$.

Zur Lösung der Gleichung 2.1 soll im weiteren ein Zylinder mit dem Radius r_0 und der Höhe d betrachtet werden, der mit einem Medium der homogenen elektromagnetischen Diffusivität λ gefüllt ist. Im weiteren wird angenommen, daß in diesem Zylinder ein periodisches Geschwindigkeitsfeld \mathbf{v} existiert, das lediglich von den x und y -Koordinaten eines kartesischen Geschwindigkeitsfeldes abhängt. \mathbf{v} sei folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{v} = \nabla \Psi \times \mathbf{k} + k w \quad , \quad (2.2)$$

wobei \mathbf{k} der Einheitsnormalenvektor in z -Koordinatenrichtung ist und Ψ und w skalare Funktionen sind. Beide sind folgendermaßen definiert:

$$\Psi = \frac{A}{C} w = A \sin(\alpha x) \sin(\alpha y) \quad . \quad (2.3)$$

A und C sind unbekannte Amplituden des Geschwindigkeitsfeldes. In der Ermittlung dieser Amplituden besteht die Aufgabe des zu lösenden Problems.

Da es sich bei der gewählten Geometrie um einen Zylinder handelt, ist es zweckmäßig ein zylindrisches Koordinatensystem einzuführen. Es ist in folgender Weise definiert:

$$x = r \cos \varphi \quad ; \quad y = r \sin \varphi \quad . \quad (2.4)$$

Weiterhin soll zusätzlich angenommen werden, daß $\alpha \gg 1/r_0$. Damit werden die Randbedingungen für das Strömungsfeld am oberen und unteren Zylinderrand nicht wesentlich eingeschränkt. Durch die Wahl eines kleinskaligen periodischen Geschwindigkeitsfeldes kann man ein periodisches Dynamomodell für ein räumlich begrenztes Volumen, wie es ursprünglich von Roberts 1972 vorgeschlagen wurde, einführen. Die periodische geometrische Anordnung des Strömungsfeldes ist in der Abbildung 2.1 schematisch dargestellt.

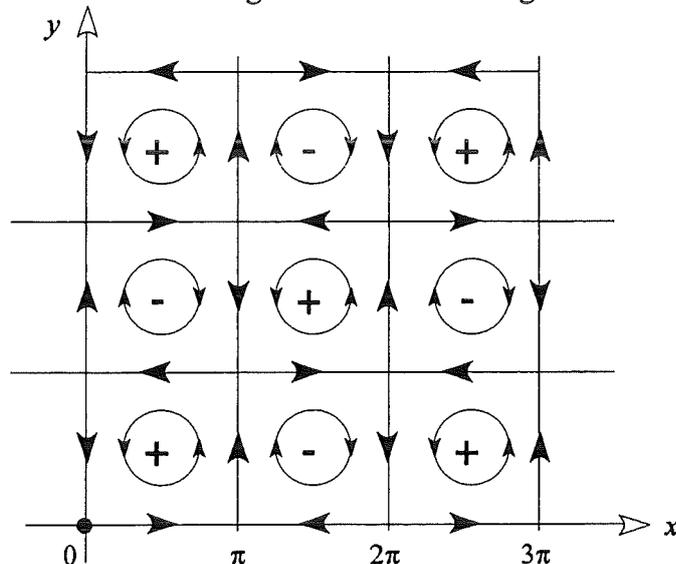


Abbildung 2.1: Projektion der Stromlinien in der (x,y) -Ebene. Die "+" und "-" Zeichen zeigen die Richtung des Geschwindigkeitsfeldes in z -Koordinatenrichtung an.

Nimmt man an, daß \mathbf{v} ein stationäres Geschwindigkeitsfeld ist, so kann man ohne Einschränkung der Allgemeinheit einen Exponentialansatz für das Magnetfeld einführen. Zweckmäßigerweise spaltet man das Magnetfeld in ein mittleres Feld $\bar{\mathbf{B}}$ und ein fluktuierendes Feld $\hat{\mathbf{B}}$ auf. $\bar{\mathbf{B}}$ bezeichnet ein räumlich über alle Zellen gemitteltes Magnetfeld. Mathematisch läßt sich dieser Separationsansatz in folgender Form wiedergeben:

$$\mathbf{B} = (\bar{\mathbf{B}} + \hat{\mathbf{B}}) \exp(p \cdot t) , \quad (2.5)$$

Als Vorteil dieser Methode ergeben sich bei einer Mittelung über ein Quadrat der Seitenlänge $2\pi/\alpha$ in der x - y Ebene folgende Zusammenhänge:

$$\bar{\Psi} = \bar{w} = \bar{\hat{\mathbf{B}}} = 0 . \quad (2.6)$$

Eine entsprechende räumliche Mittelung der Gleichung 2.1b ergibt für das mittlere Feld $\bar{\mathbf{B}}$ die Gleichung 2.7

$$(p - \lambda \nabla^2) \bar{\mathbf{B}} = \nabla \times (\overline{\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}}}) . \quad (2.7)$$

Setzt man den Ansatz 2.5 in die Gleichung 2.1b ein und subtrahiert man die Gleichung 2.7 erhält man eine Transportgleichung für das fluktuierende Magnetfeld $\hat{\mathbf{B}}$, die folgendes Erscheinungsbild hat:

$$(p - \lambda \nabla^2) \hat{\mathbf{B}} = (\bar{\mathbf{B}} \cdot \nabla) \mathbf{v} - (\mathbf{v} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{B}} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}} - \overline{\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}}}) , \quad (2.8)$$

Bei der Herleitung der Gleichung 2.8 wurden zwei wesentliche Beziehungen genutzt. Es sind dies die Quellenfreiheit des Geschwindigkeitsfeldes $(\nabla \cdot \mathbf{v})=0$ und der magnetischen Induktion \mathbf{B} , ausgedrückt durch $(\nabla \cdot \mathbf{B})=0$.

Setzt man im weiteren voraus, daß die Amplitude des räumlich fluktuierenden Magnetfeldes sehr viel kleiner als die des mittleren Magnetfeldes ist, also

$$|\hat{\mathbf{B}}| \ll |\bar{\mathbf{B}}| , \quad (2.9)$$

so kann man den letzten Term in Gleichung 2.8, nämlich $\nabla \times (\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}} - \overline{\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}}})$, vernachlässigen.

Betrachtet man im weiteren lediglich zeitlich sehr langsam anwachsende Magnetfelder, für die gilt $p \ll \lambda \alpha^2$, so läßt sich die Gleichung 2.8 näherungsweise lösen. Eine solche Lösung für das fluktuierende Magnetfeld $\hat{\mathbf{B}}$ ist die Relation 2.10.

$$\hat{\mathbf{B}} = \frac{\nabla \times (\mathbf{v} \times \bar{\mathbf{B}})}{2 \lambda \alpha^2} . \quad (2.10)$$

An das fluktuierende Magnetfeld $\hat{\mathbf{B}}$ werden bei der Lösung der Gleichung 2.8 keine Randbedingungen gestellt, da $\hat{\mathbf{B}}$ lediglich in kleinen geometrischen Skalen variiert. Dabei liegt die Annahme zugrunde, daß Abweichungen vom exakten Wert durch die Wahl von Gleichung 2.10 und die nicht vorgegebenen Randbedingungen an den Deckflächen des Zylinders zu keinen signifikanten Änderungen der Lösung führen.

Setzt man nun den Ansatz 2.10 in die Gleichung 2.7 ein, so erhält man nach längerer Rechnung eine Gleichung für das uns interessierende mittlere Magnetfeld $\bar{\mathbf{B}}$ in folgender Form:

$$(p - \lambda \nabla^2) \bar{\mathbf{B}} = -\frac{AC}{4\lambda} \nabla \times [\bar{\mathbf{B}} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \bar{\mathbf{B}})] - \frac{1}{8\lambda} \nabla \times \left[\frac{C^2}{\alpha^2} \mathbf{k} \times \mathbf{k} \cdot \nabla \bar{\mathbf{B}} + A^2 (\nabla - \mathbf{k}\mathbf{k} \cdot \nabla) \times \bar{\mathbf{B}} \right]. \quad (2.11)$$

Zweckmäßigerweise führt man eine Darstellung für das mittlere Magnetfeld $\bar{\mathbf{B}}$ mithilfe zweier skalarer Vektorpotentiale h und g ein. Da das magnetische Feld quellenfrei ist $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ kann $\bar{\mathbf{B}}$ in folgender Art dargestellt werden:

$$\bar{\mathbf{B}} = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{k} h) + \nabla \times \mathbf{k} g, \quad (2.12)$$

g stellt dabei ein skalares Vektorpotential in Umfangsrichtung des Zylinders dar und h ein skalares Vektorpotential in Achsenrichtung des Zylinders. Da beliebige Funktionen von z zu h und g addiert werden können, ohne daß sich $\bar{\mathbf{B}}$ ändert, ergibt sich eine weitere Randbedingung. Sie besagt, daß das räumliche Mittel von g und h , also \bar{g} und \bar{h} , null sind.

$$\bar{g} = \bar{h} = 0. \quad (2.13a, b)$$

Diese Bedingung schränkt die Lösungen für die Vektorpotentiale nicht grundlegend ein.

Setzt man im weiteren den Ansatz 2.12 in die Gleichung 2.11 ein, multipliziert die Gleichung 2.11 mit \mathbf{k} und wendet die mathematische Operation $\mathbf{k} \cdot \nabla \times$ an, so erhält man schließlich zwei linear unabhängige skalare partielle Differentialgleichungen für die Vektorpotentiale h und g . Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} \left[p - \lambda \left(1 + \frac{A^2}{8\lambda^2} \right) \nabla^2 + \frac{1}{8\lambda^2} \left(\frac{C^2}{\alpha^2} - A^2 \right) (\mathbf{k} \cdot \nabla)^2 \right] \Delta_2 h &= -\frac{AC}{4\lambda} \Delta_2 g, \\ \left[p - \lambda \left(1 + \frac{A^2}{8\lambda^2} \right) \nabla^2 + \frac{1}{8\lambda^2} \left(\frac{C^2}{\alpha^2} - A^2 \right) (\mathbf{k} \cdot \nabla)^2 \right] \Delta_2 g &= \frac{AC}{4\lambda} (\mathbf{k} \cdot \nabla)^2 \Delta_2 h. \end{aligned} \quad (2.14a, b)$$

Der in beiden DGL'n auftretende Operator Δ_2 ist der zweidimensionale Laplaceoperator in der r - φ -Ebene. Er ist folgendermaßen definiert:

$$\Delta_2 = \left(\frac{1}{r} \partial_r (r \partial_r) + \frac{1}{r^2} \partial_\varphi^2 \right). \quad (2.15)$$

Die Gleichungen 2.14 können einfach gelöst werden, wenn lediglich eine Randbedingung für den elektrischen Strom auf der Zylinderoberfläche berücksichtigt werden muß. Diese Randbedingung besagt anschaulich, daß die Normalkomponente des elektrischen Stromes \mathbf{j} auf der Zylinderoberfläche verschwindet. Sie lautet:

$$\mathbf{j} \cdot \mathbf{n} = -\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{k} \Delta h) + \mathbf{n} \cdot [\nabla \times (\nabla \times \mathbf{k} g)] = 0. \quad (2.16)$$

In dieser Gleichung beschreibt \mathbf{n} den Einheitsnormalenvektor auf der Zylinderfläche.

Beschränkt man nun die Betrachtung im weiteren auf den achsensymmetrischen Fall, so erhält man folgende Randbedingungen für das Potential g :

$$g = 0 \text{ bei } z = \pm \frac{1}{2}d; \quad \frac{\partial g}{\partial r} = 0 \text{ bei } r = r_0 . \quad (2.17a, b)$$

Die Randbedingung 2.16 legt dem Potential h keinerlei Beschränkung auf, da es bezüglich der elektrischen Stromdichte j lediglich Umfangskomponenten erzeugt. Die Stromrandbedingung alleine aber führt lediglich zu Lösungen, in denen außerhalb des betrachteten Zylinders in periodischer Weise das Geschwindigkeitsfeld in radialer und axialer Richtung fortgesetzt wird. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt eine ausführliche Diskussion über Veränderungen für den Fall, daß diese periodische Fortsetzung nicht auftritt und statt dessen in axialer beziehungsweise radialer Richtung ein elektrisch isolierender Raum existiert.

Die Gleichungen 2.14 lassen sich zusammen mit der Bedingung 2.17 im achsensymmetrischen Fall durch die folgende Funktion lösen:

$$g = J_0(\beta r) \cos\left(\pi \frac{z}{d}\right) , \quad (2.18)$$

wobei J_0 eine Besselfunktion nullter Ordnung ist. Die Funktion 2.18 erfüllt die Randbedingung bei $r=r_0$, wenn (βr_0) der ersten Nullstelle der Besselfunktion erster Ordnung J_1 entspricht, wobei

$$J_1(\beta r_0) = \frac{1}{\beta} \partial_r J_0(\beta r) \Big|_{r=r_0} \quad \text{für } (\beta r_0) = \alpha_{11} = 3.83 , \quad (2.19)$$

ist.

Damit ergibt sich die nachstehende Dynamobedingung für ein langsam anwachsendes Magnetfeld ($p>0$):

$$\frac{AC}{\lambda^2} > 4\pi \left[1 + \frac{C^2}{8\lambda^2\alpha^2} + \left(\frac{3.83d}{\pi r_0}\right)^2 \left(1 + \frac{A^2}{8\lambda^2}\right) \right] . \quad (2.20)$$

Die ursprüngliche Ableitung dieser Bedingung von Busse (1992) beinhaltet keine Terme der Ordnung C^2 und A^2 auf der rechten Seite der Gleichung, da diese um die Größenordnung $(\alpha r_0)^{-1}$ kleiner sind als die anderen Terme und $(\alpha r_0)^{-1}$ in der hier betrachteten Zweiskalen-Approximation einen kleinen Parameter darstellt. Physikalisch bedeutet die Erweiterung um diese Terme, daß das Geschwindigkeitsfeld in einer endlichen Geometrie zu einer erhöhten Diffusion des Magnetfeldes führt.

Die Ungleichung 2.20 läßt sich auch in Form von magnetischen Reynoldszahlen ausdrücken. Dabei führt man die magnetischen Reynoldszahlen R_A und R_C ein, die auf den Maximalamplituden des gegebenen Geschwindigkeitsfeldes beruhen. Beide lassen sich wie folgt definieren:

$$R_A = \frac{A\alpha r_0}{\lambda}; \quad R_C = \frac{Cd}{\lambda} ; \quad (2.21)$$

Man erhält dann für die Ungleichung 2.20 den folgenden Ausdruck:

$$R_A R_C > \frac{4\pi}{\alpha r_0} \left[1 + \frac{R_C^2}{8d^2 \alpha^2} + \left(\frac{3.83d}{\pi r_0} \right)^2 \left(1 + \frac{R_A^2}{8\alpha^2 r_0^2 \lambda^2} \right) \right] . \quad (2.22)$$

Man sollte dennoch nicht vergessen, daß die abgeleitete Dynamobedingung 2.20 nicht exakt ist und zusätzliche Überlegungen notwendig sind, um eine erheblich bessere Abschätzung für das Design einer Laboreinrichtung zu erhalten. Die Lösung 2.22 beschreibt dem Fall, wenn die zylindrische "Dynamobox" in axialer Richtung in periodischen Abständen fortgesetzt wird und wenn das leitfähige Fluid in radialer Richtung ebenfalls in Form ringartiger Zylinder, deren Radien den Nullstellen der Besselfunktion erster Ordnung $J_1(\beta r)$ entsprechend fortgesetzt wird. Die geometrische Anordnung der bisher abgeleiteten Dynamobedingung ist der Grafik 2.2 zu entnehmen.

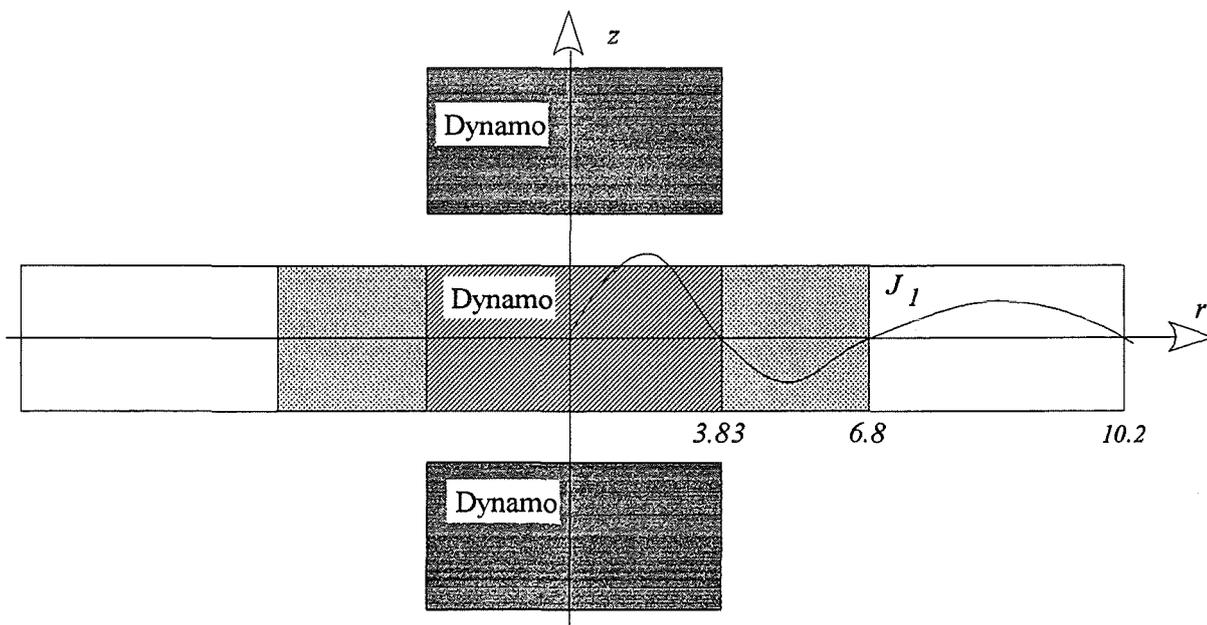


Abbildung 2.2: Geometrische Anordnung des Dynamos, sofern lediglich die Randbedingung gestellt wird, daß der Strom im eigentlichen Dynamomodell den schraffierten Kontrollraum nicht verläßt.

In den vorangegangenen Überlegungen wurde der Term $\nabla \times (\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}} - \overline{\mathbf{v} \times \hat{\mathbf{B}}})$ der Gleichung 2.8 nicht berücksichtigt. Dies kann jedoch bis zu einem gewissen Umfang geschehen, wenn man die berechnete Dynamobedingung 2.21 in eine Potenzreihe nach Ausdrücken mit den magnetischen Reynoldszahlen R_A und R_C in der Art,

$$\left(\frac{AC}{8\lambda\alpha^2} \right) = \frac{R_A R_C}{8r_0 d \alpha^2} , \quad (2.23)$$

entwickelt und die Lösungsstruktur der approximierten Dynamobedingung mit der Lösung des unendlich ausgedehnten Dynamos von Roberts (1972) vergleicht.

Diese numerische Entwicklung wurde von Tilgner [1995] durchgeführt und führt zu einer verbesserten Abschätzung der Dynamobedingung in der Form:

$$\left[1 - \kappa \frac{R_A R_C}{8r_0 d \alpha^2} + \mu \frac{R_A^2 R_C^2}{(8r_0 d \alpha^2)^2} \right] R_A R_C > \frac{4\pi}{\alpha r_0} \left[1 + \frac{R_C^2}{8d^2 \alpha^2} + \left(\frac{3.83d}{\pi r_0} \right)^2 \left(1 + \frac{R_A^2}{8\alpha^2 r_0^2 \lambda^2} \right) \right], \quad (2.24)$$

Die Anpassungskoeffizienten nehmen in dieser Abschätzung die Werte $\kappa=0.693$ und $\mu=0.454$ ein. Physikalisch bedeutet das Ergebnis, daß die zusätzlichen Terme auf der linken Seite der Ungleichung zu einem Anwachsen der kritischen magnetischen Reynoldszahl führen.

Im weiteren erweist es sich als vorteilhaft, das Verhältnis zwischen den zwei senkrecht aufeinanderstehenden Geschwindigkeitskomponenten A und C als $\eta=A\alpha/C$ einzuführen. Desweiteren bietet es sich an, eine weitere Variable R , die sich aus A und C , wie folgt, zusammensetzt,

$$R^2 = \frac{AC}{8\lambda^2 \alpha}, \quad (2.25)$$

einzuführen. Damit reduziert sich die Gleichung 2.24 auf die nachstehende Form:

$$\left[1 - \kappa R^2 + \mu R^4 \right] R^2 > \frac{\pi}{2\alpha d} \left[1 + \frac{R^2}{\eta} + \left(\frac{3.83d}{\pi r_0} \right)^2 (1 + \eta R^2) \right]. \quad (2.26)$$

2.2 Achsensymmetrische Dynamolösungen bei elektr. isolierender Umgebung

Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich im wesentlichen auf den Einfluß realistischerer magnetischer und elektrischer Randbedingungen auf die kritische magnetische Reynoldszahl.

Da eine vollständige Lösung des zylindrischen Dynamos in einem elektrisch isolierenden Außenraum ohne einen beträchtlichen numerischen Aufwand kaum möglich ist, werden im folgenden zwei Spezialfälle eines partiell isolierenden Außenraumes betrachtet, wie sie schematisch in der Abbildung 2.3 dargestellt sind. Man kann annehmen, daß diese beiden Grenzfälle einen tieferen Einblick in die Mechanismen der Magnetfeldselbsterregung erlauben. Darüber hinaus geben beide Grenzfälle an, inwieweit sich die kritischen magnetischen Reynoldszahlen in Abhängigkeit von den elektrischen Randbedingungen verändern. Damit läßt sich aus der Betrachtung eine bestmögliche Abschätzung der kritischen magnetischen Reynoldszahl für das Laborexperiment ableiten.

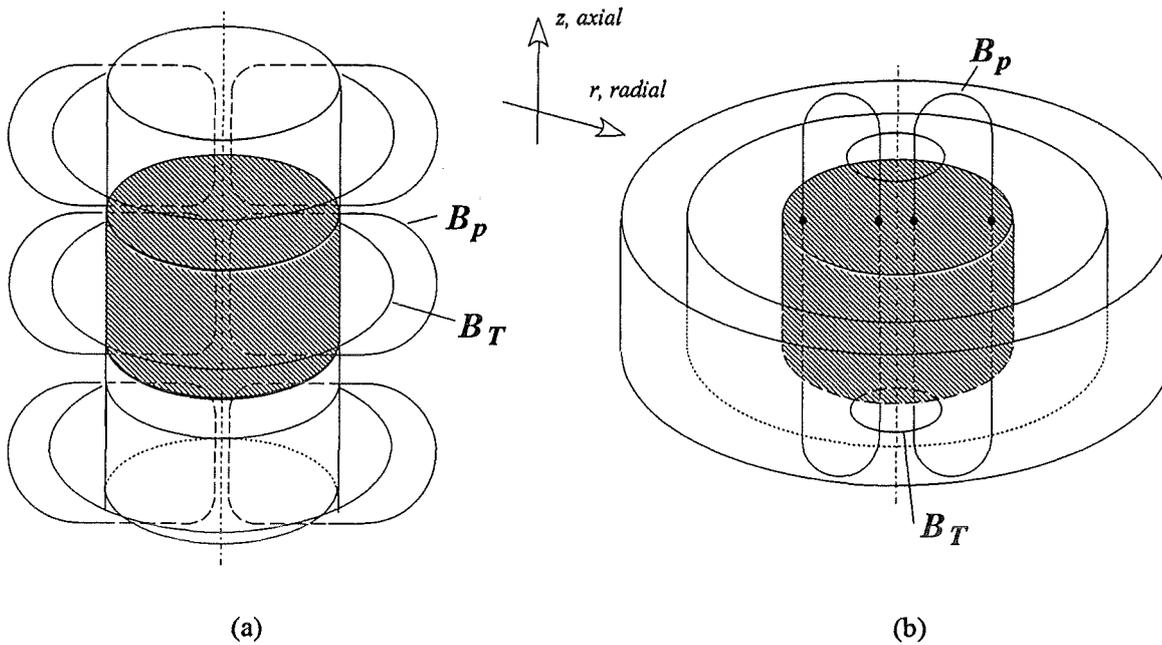


Abbildung 2.3: Qualitative Schemaskizze des erzeugten poloidalen Magnetfeldes B_p und des toroidalen Magnetfeldes B_t in Abhängigkeit von den elektrischen Randbedingungen.

a.) zylindr. Dynamo mit elektrisch isolierender Umgebung in radialer Richtung. Das poloidale Feld wird in z -Richtung "zusammengedrückt" und kann sich in Umfangsrichtung entfalten.

b.) zylindr. Dynamo mit elektrisch isolierendem Raum in z -Richtung. Das poloidale Feld wird in radiale Richtung im Dynamo "eingesperrt" und das toroidale Feld entfaltet sich in axialer Richtung.

2.2.1 Elektrisch isolierender Raum in radialer Richtung

Ist der Raum außerhalb des zylindrischen Dynamobehälters für $r > r_0$ elektrisch isolierend, siehe Abbildung 2.3a, so kann man das magnetische Potential g als Summe von Besselfunktionen nullter Ordnung wie folgt darstellen:

$$g = [A_0 J_0(\beta r) + B_0 I_0(\beta' r) + C_0] \cos\left(\pi \frac{z}{d}\right), \quad (2.27)$$

wobei $I_0(r)$ die modifizierte Besselfunktion erster Art und nullter Ordnung ist. Setzt man diesen Ansatz für g in die Gleichung 2.14a ein, so erhält man folgende Lösung für h :

$$h = \left[\frac{A_0}{\beta^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \tau} J_0(\beta r) + \frac{B_0}{\left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \tau - \beta'^2} I_0(\beta' r) + \left(\frac{d}{\pi}\right)^2 \tau C_0 \frac{AC}{4\lambda\lambda_e} \cos\left(\frac{\pi}{d} z\right) \right]. \quad (2.28)$$

In der angegebenen Lösung gelten folgende Relationen:

$$\beta^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \tau = \frac{AC\pi}{4\lambda\lambda_e d}; \beta'^2 - \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \tau = \frac{AC\pi}{4\lambda\lambda_e d}; \tau = \frac{1 + \frac{R^2}{\eta}}{1 + \eta R^2}; \lambda_e = \lambda(1 + \eta R^2). \quad (2.29a-d)$$

Das poloidale Magnetfeld verschwindet nun außerhalb des Zylinderkörpers nicht, vielmehr klingt es exponentiell ab. Also muß das poloidale Feld h mit einem äußeren Potentialfeld, das im weiteren h^e genannt wird, verknüpft werden. Das äußere Feld wird durch die nachstehende Funktion beschrieben:

$$h^e = h_0^e K_0(\beta^e r) \cos\left(\frac{\pi}{d} z\right) \quad \text{mit } \beta^e = \frac{\pi}{d}. \quad (2.30)$$

Darin ist $K_0(r)$ die modifizierte Besselfunktion zweiter Art nullter Ordnung.

Die Randbedingungen für die Potential g und h auf der Mantelfläche des Zylinders in radialer Richtung sind durch die Stetigkeit des Magnetfeldes bei $r=r_0$ und durch das Verschwinden der Normalkomponente der elektrischen Stromdichte bei $r=r_0$ gegeben. Beide Bedingungen lauten mathematisch:

$$\Delta_2(h-h^e) = \frac{\partial}{\partial r}(h-h^e) = \frac{\partial}{\partial r}g = 0 \quad \text{bei } r=r_0. \quad (2.31a-c)$$

Mit diesen Randbedingungen ergeben sich zwei Bestimmungsgleichungen für die Konstanten A_0 und B_0 . Sie lauten:

$$A_0\beta J'_0(\beta r_0) + B_0\beta' I'_0(\beta' r_0) = 0;$$

$$\left(\beta J'_0 + \frac{\beta^2 K'_0}{\beta^e K_0} J_0\right)_{r=r_0} \frac{1}{\left(\beta^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \tau\right)} A_0 + \left(\beta' I'_0 - \frac{\beta^2 K'_0}{\beta^e K_0} I_0\right)_{r=r_0} \frac{1}{\left(\left(\frac{\pi}{d}\right)^2 \tau - \beta'^2\right)} B_0 = 0. \quad (2.32a, b)$$

Wie zu erwarten war, beeinflusst die Konstante C_0 nicht das Ergebnis, da sich das magnetische Feld nicht mit dieser Größe ändert. Benutzt man die Beziehung $(2\beta^{e2}\tau = \beta'^2 - \beta^2)$ erhält man für den Spezialfall $r_0=d$ als Lösungsbedingung für die Gleichungen 2.32 den Zusammenhang 2.33.

$$\left[\tilde{s} I'_0(\tilde{s}) - \frac{\tilde{s}^2 K'_0(\pi)}{\pi K_0(\pi)} I_0(\tilde{s})\right] \left(\frac{s}{\pi^2 \tau - \tilde{s}^2}\right) J'_0(s) - \left[s J'_0(\tilde{s}) + \frac{s^2 K'_0(\pi)}{\pi K_0(\pi)} J_0(s)\right] \left(\frac{\tilde{s}}{\pi^2 \tau - s^2}\right) I'_0(\tilde{s}) = 0. \quad (2.33)$$

Dabei sind folgende Zusammenhänge benutzt worden $s=r_0\beta$ und $\tilde{s} = r_0\beta'$.

Für $\eta=1$ ergibt die Gleichung 2.33 das Ergebnis $\beta r_0=3.55$. Dieser Wert liegt um 7% unter dem Wert von $\alpha_{11}=\beta r_0=3.83$ des in jeder Richtung unendlichen Dynamos. Offensichtlich führt ein elektrisch isolierender Außenraum zu einer geringeren magnetischen Reynoldszahl für die Selbsterregung des Dynamos. Eine physikalische Erklärung hierfür ist möglicherweise, daß sich das Magnetfeld in radiale Richtung ungehindert ausbreiten kann, ohne daß es durch einen Nachbardynamo in seinen eigenen Zylinder "eingezwängt" wird.

Man kann nun, was insbesondere für die technische Auslegung von Relevanz ist, einige Sensitivitätsstudien im Hinblick auf die Geometrie durchführen.

Variiert man das Verhältnis r_0/d im technisch interessanten Bereich von 1 bis 1.3, so wächst das Verhältnis $\beta r_0=3.55$ lediglich äußerst wenig auf $\beta r_0=3.60$ an. Dies entspricht einer Vergrößerung um ca. 1.6%. Verändert man das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten zueinander, so zeigt sich ebenfalls eine geringe Sensitivität des Ergebnisses. Bei einer Erniedrigung von $\eta=1$ auf $\eta=R^2=1/\sqrt{2}$ und vorgegebenem Verhältnis $r_0/d=1$ steigt βr_0 von 3.55 auf 3.56 an. Bei einem Verhältnis $r_0/d=1.3$ und derselben Erniedrigung wächst βr_0 von 3.60 auf den Wert 3.61 an.

Da die elektrische Leitfähigkeit des Außenraumes anscheinend die kritische magnetische Reynoldszahl beeinflusst, kann man in einem weiteren Schritt untersuchen, inwieweit eine den Zylinder umgebende stagnierende Fluidschicht das Produkt βr_0 beeinflusst. Dazu nimmt man zunächst an, daß den Dynamozyylinder ein weiterer Zylinder konzentrisch umgibt, der mit stagnierendem Fluid gleicher Leitfähigkeit gefüllt ist. Die Spaltweite betrage D . Da das Fluid im stagnierenden Raum kein Feld erzeugt, muß für das Potential g die Laplacegleichung gelten.

$$\Delta g = 0. \quad (2.34)$$

Die Randbedingung für die Normalkomponente des elektrischen Stroms an der Stelle $r=r_0$ ändert sich jedoch durch die stagnierende Fluidschicht. Die Modifikation der Randbedingung für g führt zu folgender Gleichung.

$$\frac{\partial^2 g}{\partial r^2} + \frac{\pi}{d} \coth\left(\frac{\pi D}{d}\right) \frac{\partial g}{\partial r} = 0 \quad \text{bei } r = r_0. \quad (2.35)$$

Die Formulierung 2.35 impliziert, daß $D \ll r_0$. Die Randbedingungen für das Potential h bleiben unverändert, siehe Gleichung 2.31a und 2.31b. Die Bedingung 2.35 führt zusammen mit den verbleibenden Gleichungen 2.31 zu der Gleichung 2.36.

$$\left[-s^2 J_0(s) + s J_1(s) - s \frac{\pi r_0}{d} \coth\left(\frac{\pi D}{d}\right) J_1(s) \right] A_0 + \left[\tilde{s}^2 I_0(\tilde{s}) - \tilde{s} I_1(\tilde{s}) + \tilde{s} \frac{\pi r_0}{d} \coth\left(\frac{\pi D}{d}\right) I_1(\tilde{s}) \right] B_0 = 0. \quad (2.36)$$

Die zweite Gleichung 2.32b zur Bestimmung von A_0 und B_0 ändert sich nicht.

Betrachten wir nun die Auswirkung dieses stagnierenden Fluidvolumens auf den Wert βr_0 und wählen hierzu einen Wert $D/r_0=0.1$, dann ergeben sich die der Tabelle 2.1 zu entnehmenden Werte. Generell führt der stagnierende Fluidraum außerhalb des Dynamos zu einer Erniedrigung der Werte βr_0 und damit zu kleineren magnetischen Reynoldszahlen.

η	r_0/d	βr_0
1	1	3.3
1	1.3	3.35
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1	3
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1.3	3.35

Tabelle 2.1: Einfluß eines sich in radial Richtung an den Dynamozyylinder anschließenden stagnierenden Fluidvolumens der Dicke $D/r_0=0.1$ auf den Wert βr_0 .

2.2.2 Elektrisch isolierender Raum in axialer (poloidaler) Richtung

Betrachtet man nun den entgegengesetzten Grenzfall, daß der Außenraum für $z>d/2$ und $z<d/2$ elektrisch isolierend ist, erhält man für g einen Lösungsansatz in der Form:

$$g = J_0(\beta r) [A_0 \cos(\gamma z) + B_0 \cos(\tilde{\gamma} z)] \quad (2.37)$$

In diesem Zusammenhang muß darauf hingewiesen werden, daß sich in radialer Richtung das Gebiet des Geschwindigkeitsfeldes entsprechend der Nullstellen der Besselfunktion quasiperiodisch fortsetzt.

Mit dem Ansatz für g ergibt sich auch eine Lösung für h . Sie lautet:

$$h = -\frac{AC}{4\lambda\hat{\lambda}_e} J_0(\beta r) \left[\frac{A_0}{\left(\gamma^2 + \frac{\beta^2}{\tau}\right)} \cos(\gamma z) + \frac{B_0}{\left(\tilde{\gamma}^2 + \frac{\beta^2}{\tau}\right)} \cos(\tilde{\gamma} z) \right] \quad (2.38)$$

Dabei sind γ und $\tilde{\gamma}$ durch die folgenden Beziehungen bestimmt:

$$\gamma = \frac{AC}{8\lambda\hat{\lambda}_e} - \sqrt{\left(\frac{AC}{8\lambda\hat{\lambda}_e}\right)^2 - \left(\frac{\beta^2}{\tau}\right)} \quad ; \quad \tilde{\gamma} = \frac{AC}{8\lambda\hat{\lambda}_e} + \sqrt{\left(\frac{AC}{8\lambda\hat{\lambda}_e}\right)^2 - \left(\frac{\beta^2}{\tau}\right)} \quad (2.39a, b)$$

mit

$$\hat{\lambda}_e = \left(1 + \frac{R^2}{\eta} \right) \quad (2.40)$$

Als Randbedingungen für das Problem müssen wie im vorangegangenen Fall der stetige Anschluß des Magnetfeldes an das Außenfeld h^e (Gl. 2.41a), die Differenzierbarkeit des Magnetfeldes (2.41b) sowie das Verschwinden der Normalkomponente der elektrischen Stromdichte (2.41c) gestellt werden. Es kommt daher:

$$\left. \begin{aligned} h &= h^e \\ \frac{\partial h}{\partial z} &= \frac{\partial h^e}{\partial z} \\ g &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ bei } z = \pm \frac{d}{2} \quad (2.41a-c)$$

Dabei muß das Außenfeld im elektrisch isolierenden Raum der Laplacegleichung ($\Delta h^e=0$) gehorchen. Das Außenfeld h^e wird durch die folgende Gleichung beschrieben.

$$h = h_0^e J_0(\beta r) \exp\left[-\beta \left|z \pm \frac{d}{2}\right|\right] \quad \text{bei } z \begin{cases} > d/2 \\ < -d/2 \end{cases} \quad (2.42)$$

Mit den Randbedingungen 2.41 erhält man die nachstehenden Bestimmungsgleichungen für A_0 und B_0 .

$$\begin{aligned} \cos\left(\frac{\gamma d}{2}\right) A_0 + \cos\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right) B_0 &= 0 \quad , \\ \frac{\beta \cos\left(\frac{\gamma d}{2}\right) - \gamma \sin\left(\frac{\gamma d}{2}\right)}{\gamma^2 + \frac{\beta^2}{\tau}} A_0 + \frac{\beta \cos\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right) - \tilde{\gamma} \sin\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right)}{\tilde{\gamma}^2 + \frac{\beta^2}{\tau}} B_0 &= 0 \quad . \end{aligned} \quad (2.43a, b)$$

Die Lösbarkeitsbedingung dieses homogenen Gleichungssystems lautet:

$$\cos\left(\frac{\gamma d}{2}\right) \frac{\beta \cos\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right) - \tilde{\gamma} \sin\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right)}{\tilde{\gamma}^2 + \frac{\beta^2}{\tau}} - \cos\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right) \frac{\beta \cos\left(\frac{\gamma d}{2}\right) - \gamma \sin\left(\frac{\gamma d}{2}\right)}{\gamma^2 + \frac{\beta^2}{\tau}} = 0 \quad . \quad (2.44)$$

In dieser Gleichung läßt sich für $\tilde{\gamma}$ die Relation $\tilde{\gamma} = \beta^2 / \tau$ benutzen. Die Werte für γ ergeben sich aus der numerischen Lösung der nichtlinearen Beziehung.

Betrachtet man einen elektrisch isolierenden Außenraum außerhalb der Zylinderdeckflächen, muß die Gleichung 2.26 durch die nachfolgende Gleichung ersetzt werden. Es gilt dann:

$$\left[1 - \kappa R^2 + \mu R^4\right] R^2 > \frac{\gamma}{2\alpha} \left[1 + \frac{R^2}{\eta} + \left(\frac{3.83}{\pi \gamma r_0}\right)^2 (1 + \eta R^2)\right] \quad . \quad (2.45)$$

Ausgehend von der numerischen Berechnung ergibt sich ein Wert γd . Ein großer Wert dieses Produktes führt zu einer Erhöhung der kritischen magnetischen Reynoldszahl. Eine Variation der Geometrie, wie auch der Strömungskonfiguration führt zu den in der Tabelle 2.2 aufgeführten Werten des Produktes γd . Physikalisch bedeutet die Erhöhung des Produktes, daß das Magnetfeld durch die radial benachbarten Dynamos so in z -Richtung deformiert wird, daß ein erhöhter Fluidvolumenstrom zur Felderzeugung benötigt wird.

Generell führt ein elektrisch isolierender Außenraum in z -Richtung zu einer Erhöhung der kritischen magnetischen Reynoldszahl. Auslöser für diesen negativen Effekt ist die Auslöschung des induzierten Feldes durch die ungünstige Korrelation der poloidalen und toroidalen magnetischen Felder, die aus den Randbedingungen herrührt. Dieser ungünstigen

Korrelation kann durch die Einführung einer weiteren Randbedingung entgegengewirkt werden, die es dem toroidalen Feld erlaubt, etwas aus dem Zylinderbereich in die Umgebung auszuweichen. Diese Randbedingung betrifft wie im vorangegangenen Fall eine stagnierende Fluidschicht der Dicke D , die über den planaren Seiten des Dynamozyinders bei $z=\pm d/2$ angeordnet ist.

$\eta=R^2$	r_0/d	βr_0	γd
0	1.0	3.83	7.056
0	1.0	3.55	6.550
0	1.3	3.60	5.320
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1.0	3.83	6.000
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1.0	3.30	5.280
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	1.3	3.55	4.680

Tabelle 2.2: Einfluß eines elektrisch isolierenden Außenraumes für $z \geq |\pm d/2|$ auf das Produkt γd .

Die Einführung einer stagnierenden Fluidschicht bedeutet, daß die Laplacegleichung (2.34) für g im Bereich $d/2 \leq z \leq d/2 + D$ und im Bereich $-d/2 - D \leq z \leq -d/2$ erfüllt werden muß. Bei $z = |\pm d/2|$ muß $g=0$ gelten. Diese Bedingungen führen zur folgenden Randbedingung:

$$\frac{\partial g}{\partial z} + g\beta \coth(\beta D) + 2R^2 \alpha \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad \text{bei } z = \pm \frac{d}{2} \quad (2.46)$$

Dadurch ändert sich auch die Gleichung 2.43a und es entsteht an ihrer Stelle der Zusammenhang 2.47.

$$\left[\beta \coth(\beta D) \cos\left(\frac{\gamma d}{2}\right) - \gamma \sin\left(\frac{\gamma d}{2}\right) \left(1 + \frac{4R^4 \alpha^2}{\left(\gamma^2 + \frac{\beta^2}{\tau}\right)} \frac{\lambda}{\hat{\lambda}_e} \right) \right] A_0 +$$

$$\left[\beta \coth(\beta D) \cos\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right) - \tilde{\gamma} \sin\left(\frac{\tilde{\gamma} d}{2}\right) \left(1 + \frac{4R^4 \alpha^2}{\left(\tilde{\gamma}^2 + \frac{\beta^2}{\tau}\right)} \frac{\lambda}{\hat{\lambda}_e} \right) \right] B_0 = 0 \quad (2.47)$$

Der letzte Term auf der linken Seite der Gleichung 2.46 entsteht durch den Term $\overline{\mathbf{v} \times \mathbf{B}}$, der die Stetigkeit der Tangentialkomponente des elektrischen Feldes in z-Richtung berücksichtigt. Bei einer rein zylindrischen (axialsymmetrischen) Konfiguration, wie sie in Abschnitt 2.2.1 betrachtet wurde, verschwindet dieser Anteil. Siehe dazu beispielsweise Gleichung 2.35.

Die Lösung der Gleichungen 2.43b und 2.47 ergibt folgende Ausdrücke:

$$\gamma r_0 \tan\left(\frac{\gamma d}{2}\right) = \beta r_0 \quad \text{und} \quad \beta \coth(\beta D) = \left(1 + \frac{4R^4 \alpha^2}{\left(\gamma^2 + \frac{\beta^2}{\tau}\right) \hat{\lambda}_e} \right) \lambda \quad (2.48)$$

Die in Gleichung 2.48 vorgestellte Lösung ist nicht notwendigerweise die beste Lösung, aber es gibt auch weniger günstige Lösungen. Die berechneten Ergebnisse für den Spezialfall $D/d=0.1$ zeigen eine deutlich günstigere Dynamobedingung bei einer stagnierenden Fluidschicht über den Zylinderdeckeln, siehe Tabelle 2.3.

Da γ für unterschiedliche r_0/d wie auch für verschiedene η Werte in einem weiten Bereich variieren kann, soll das Problem im weiteren als Funktion der Schichthöhe D betrachtet werden. Die numerischen Rechnungen zeigen, daß der niedrigste Eigenwert γ verschwindet, wenn D einen kritischen Wert D_c überschreitet. Dies ist in den Abbildungen 2.4a, b für den Fall $r_0/d=1$ und $\beta r_0=3.3$ bzw. $\beta r_0=3.83$ dargestellt. Der kritische Wert von D_c ist von besonderem Interesse, da er dem "optimalen" Dynamo entspricht.

$\eta=R^2$	D/d	r_0/d	βr_0	γd
0	0.100	1.0	3.55	6.47
0	0.100	1.3	3.60	4.97
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0.100	1.0	3.30	7.28
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0.100	1.3	3.55	4.02
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0.043	1.0	3.30	2.86
$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0.057	1.0	3.83	3.32

Tabelle 2.3: Einfluß der Schichthöhe D über dem Dynamozyylinder auf den Eigenwert γd .

Sobald der kritische Wert der Schichthöhe D überschritten wird, erfolgt ein Sprung in der Dynamobedingung. Numerischen Berechnungen zeigen, daß bevor der nächst höhere Eigenwert γ ($\gamma \geq \beta/\sqrt{\tau}$) erreicht wird, der sich aus der Wurzel der Determinante der Gleichungen 2.43b und 2.47 ergibt, sich ein anderes Ergebnis einstellt, welches einer antisymmetrischen Lösung entspricht. Der nächst höhere Eigenwert von γ ist in den Abbildungen 2.4 als gestrichelte Kurve eingezeichnet. Bisher wurden nur symmetrische Dynamolösungen betrachtet. Es existieren aber auch noch antisymmetrische Lösungen, in denen sowohl die toroidalen als auch die poloidalen Komponenten des Dynamofeldes in der Äquatorebene ($z=0$) verschwinden.

Die Werte γ und $\tilde{\gamma}$ der antisymmetrischen Lösungen treten auf, sobald die Terme $\cos(\gamma d/2)$ und $\cos(\tilde{\gamma} d/2)$ durch $\sin(\gamma d/2)$ und $\sin(\tilde{\gamma} d/2)$ ersetzt werden beziehungsweise die Terme $\sin(\gamma d/2)$ und $\sin(\tilde{\gamma} d/2)$ durch $-\cos(\gamma d/2)$ und $-\cos(\tilde{\gamma} d/2)$ in den Gleichungen 2.43b und 2.47 ersetzt werden. Die in dem antisymmetrischen Fall auftretenden Lösungen sind in den Abbildungen 2.4 durch strichpunktierte Linien gekennzeichnet. Es ist daher in einem Experiment sehr gut möglich, daß bei Überschreiten einer kritischen Schichthöhe ein antisymmetrischer Dynamo mit einem Quattropfeld eher angeregt wird als ein symmetrischer Dynamo mit einem Dipolfeld.

2.2.3 Abschließende Bemerkungen über den Einfluß der Randbedingungen

Gegenüber früheren Betrachtungen des Dynamoproblems zeigt die hier dargestellte Erweiterung, die sowohl durch eine höhere Approximation in der Ordnung $1/(\alpha r_0)$ als auch durch die Erfassung der endlichen Erstreckung des Dynamomoduls durch die Einbeziehung modifizierter Randbedingungen erzielt wurde, folgende qualitative Ergebnisse:

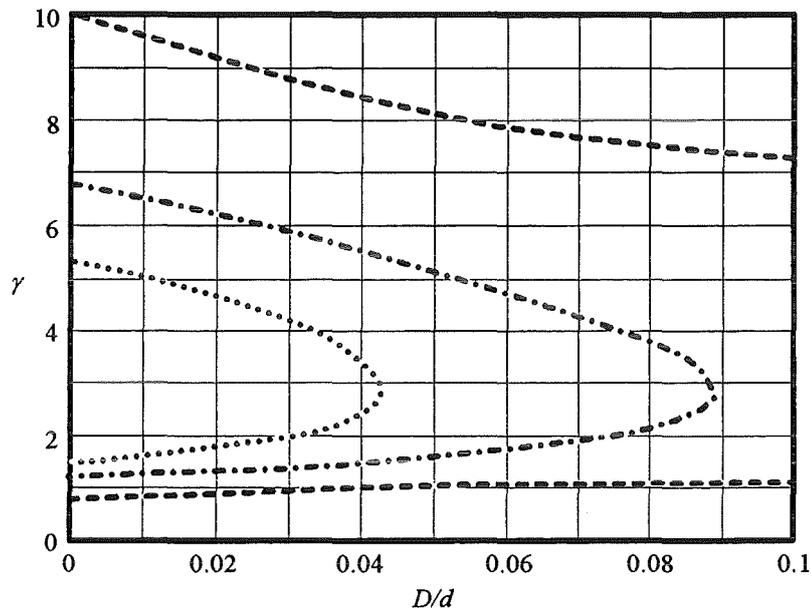
Die Einbeziehung von Termen höherer Ordnung des Skalierungsparameters $1/(\alpha r_0)$ in die partiellen Differentialgleichungen führt zu höheren kritischen magnetischen Reynoldszahlen, da diese Terme die Diffusion des Magnetfeldes begünstigen.

Ein elektrisch isolierender Außenraum, in den das Magnetfeld entweichen kann, führt im allgemeinen zu höheren kritischen magnetischen Reynoldszahlen. Es können abhängig von den Randbedingungen jedoch gegenläufige Effekte auftreten:

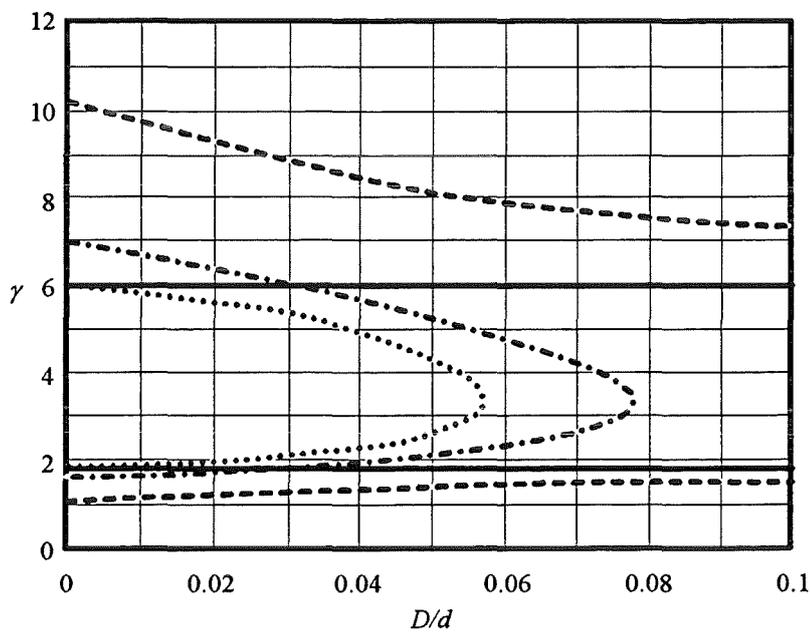
a.) Eine elektrisch isolierender Raum außerhalb der poloidalen Zylinderdeckel führt zu den höchsten kritischen R_m , da das magnetische Feld auf seinen Zylinderraum beschränkt bleibt und lediglich in Richtung der Zylinderachse ausweichen kann.

Eine Erniedrigung von R_m kann durch ein stagnierendes Fluidvolumen im Außenbereich der Zylinderdeckflächen erzielt werden. Aber überschreitet die Schichthöhe einen kritischen Wert, so erhöht sich R_m erneut signifikant und es können antisymmetrische Dynamos entstehen.

b.) Ein elektrisch isolierender Raum in radialer Erstreckung, zeigt kleinere kritische R_m als der erstere Fall. Weil das magnetische Feld in radiale Richtung entweichen kann, ergibt sich eine Reduktion von R_m um ca. 8%. Eine weitere, allerdings marginale, Erniedrigung von R_m um 1.6% ist ebenfalls durch ein stagnierendes Fluidvolumen in radialer Richtung zu erzielen.



(a)



(b)

Abbildung 2.4: Einfluß der Schichthöhe D eines stagnierenden Fluids auf den Dynamozyylinderdeckelflächen auf den Eigenwert γ für den Fall $r_0/d = 1$ und $\eta = 1/\sqrt{2}$. a.) $\beta r_0 = 3.3$ bzw. b.) $\beta r_0 = 3.83$. (.....) optimale Schichthöhe; (----) nächst höheres γ ; (- · - · -) antisymmetrische Lösung.

In diesem Zusammenhang sollte allerdings erwähnt werden, daß trotz aller Erweiterungen des Modells lediglich asymptotische Grenzfälle betrachtet wurden, das heißt in einem Fall wurde eine unendliche radiale, im anderen eine unendlich axiale Erstreckung des Geschwindigkeitsfeldes angenommen.

Die Variation aller in das Modell eingehenden Geometrieparameter, relevanten Strömungsgrößen wie auch unterschiedlicher elektrischer Randbedingungen zeigen nach der Berücksichtigung der Terme höherer Ordnung, daß die berechnete kritische Volumenstrombedingung angewandt auf das im Abschnitt 3.5 dargestellte technische Design lediglich zu Unterschieden im kritischen Volumenstrom von maximal 20% führt. Ausgehend von diesen Resultaten kann man das hier aufgeführte Modell als hinreichend gut betrachten, daß es eine größtmögliche sichere Abschätzung liefert.

Es soll ebenfalls nicht verschwiegen werden, daß weitere in diesem Modell nicht berücksichtigte Unsicherheiten auftreten können.

Zum einen könnte eine turbulente Rohrströmung, wie sie mit Sicherheit in den Strömungskanälen auftritt, die effektive elektrische Leitfähigkeit des Fluids beeinträchtigen und damit die Diffusion des Magnetfeldes verstärken.

Nimmt man an, daß das Strömungsfeld lokal isotrop turbulent ist, kann man die turbulente magnetische Diffusivität berechnen. Der Wert für die berechnete magnetische Diffusivität λ_t beträgt dann $3 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ [Moffat, 1978]. Die molekulare Diffusivität λ hat einen Wert von $10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$. Da das Verhältnis der beiden Größen sich um mehr als zwei Zehnerpotenzen unterscheidet, wird im weiteren der Einfluß der Turbulenz auf die Fluideigenschaften als vernachlässigbar gering erachtet und wird in den Auslegungsrechnungen nicht berücksichtigt. Eine detaillierte Rechnung zur Ermittlung der zusätzlichen turbulenten magnetischen Diffusivität λ_t ist dem Anhang A1 zu entnehmen.

Inwieweit die Annahme einer lokal isotropen Turbulenz in der Gegenwart eines schwachen Magnetfeldes gerechtfertigt ist, ist schwer zu sagen. Die Messung turbulenter magnetohydrodynamischer Strömungen bei großen Magnetfeldern zeigen ein deutlich anisotropes Verhalten [Moreau, 1990]. Es wird in derartigen Messungen eine quasi-zweidimensionale Turbulenz beobachtet, in der sich die Achsen der turbulenten Wirbel in Magnetfeldrichtung ausrichten. Wie sich diese Art der Turbulenz auf die für den Dynamoprozess relevante turbulente magnetische Diffusivität λ_t auswirkt, ist derzeit noch nicht geklärt.

Ein technisch realisierbares Geschwindigkeitsfeld kann sich deutlich von dem zu Beginn vorgestellten Geschwindigkeitsfeld unterscheiden. Nachrechnungen von Tilgner [1995] mit unterschiedlichen technisch wahrscheinlichen Geschwindigkeitsprofilen zeigen jedoch, daß sich

der Einfluß des Geschwindigkeitsfeldes auf die kritische magnetische Reynoldszahlbedingung lediglich in der Größenordnung von ca. 5% auswirkt. Ein Beispiel für ein anderes Geschwindigkeitsfeld als dem zu Anfang angenommen ist in Anhang A2 aufgeführt.

Es wurde im vorangegangenen viel über das sich selbst verstärkende Magnetfeld gesprochen. Wie muß man sich aber das entstehende Feld räumlich vorstellen?

Gehen wir von dem Fall aus, der die höchsten magnetischen Reynoldszahlen benötigt und daß ein achsensymmetrisches Magnetfeld entsteht, so könnte das Magnetfeld die in der Abbildung 2.5 aufgezeigte Verteilung haben. 1

In dem Bild 2.5 sind zwei Feldlinien eingezeichnet. Die Feldlinien verlaufen schraubenförmig um die Zylinderachse, wobei die Windungszahl um so größer ist, je näher die Feldlinie an die Ränder der Zelle gelangt.

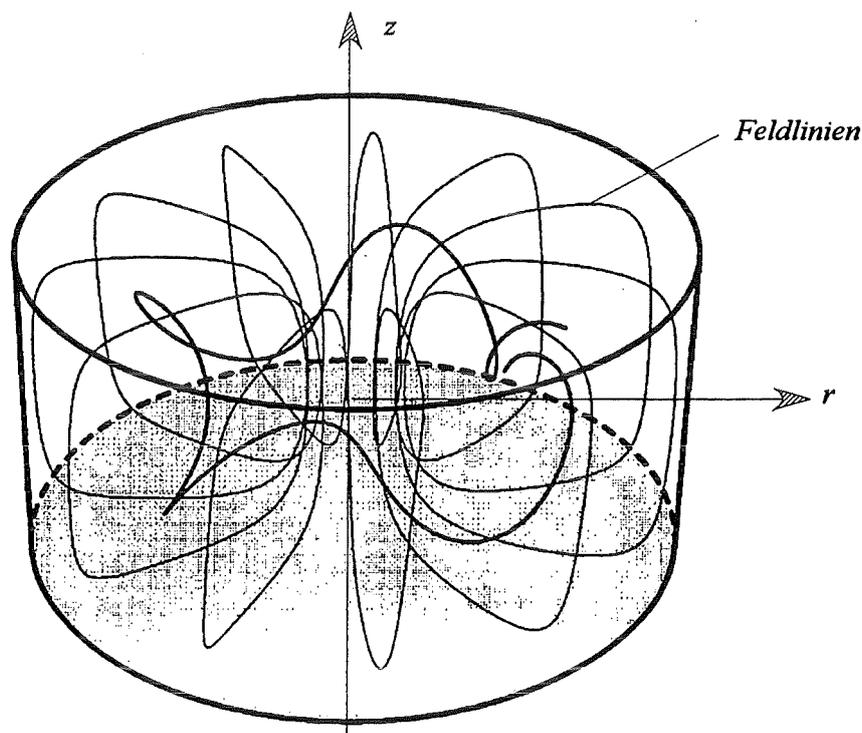


Abbildung 2.5: Skizze mit den zu erwartenden Magnetfeldlinien in einem zylindrischen homogenen Dynamomodell endlicher Erstreckung.

3 Der Entwurf des Dynamomoduls

Die mathematische Approximationslösung für den sogenannten Busse-Roberts-Dynamo bildet die Basis für die Auslegung des Laborexperimentes. Da dieser Dynamotyp die niedrigsten kritischen magnetischen Reynoldszahlen im Vergleich mit anderen Modellen benötigt, ist bei ihm mit einer Selbsterregung des magnetischen Feldes unter den technisch günstigsten Bedingungen zu rechnen.

Wenngleich in der Dynamobedingung die kritische magnetische Reynoldszahl R nur quadratisch auftritt (, siehe Gleichung 2.45) sollte man nicht vergessen, daß sich R^2 aus einer Kombination einer helikalen und einer axialen Komponente zusammensetzt.

Es ist zweckmäßig im ersten Schritt die mathematische Dynamobedingung in ein technisches Kriterium zu überführen. Aus der Gleichung 2.45 wird ersichtlich, daß sowohl die Stoffeigenschaften des Fluids wie auch die geometrischen Abmessungen eine entscheidende Rolle spielen. Darüber hinaus wird als Voraussetzung für die Erzeugung des Dynamos ein Strömungsfeld benötigt, das über eine gewisse Helizität verfügt. Damit sind im wesentlichen die drei Kernpunkte für die Auslegung eines Laborexperimentes fixiert:

- Wahl des Arbeitsfluids,
- Erzeugung eines Geschwindigkeitsfeldes mit ausreichend hoher Helizität,
- Optimierung der geometrischen Längenskalen.

Alle drei Gesichtspunkte müssen sich dabei so zusammenfügen, daß sie mit technischen Mitteln bei einem vernünftigen Aufwand realisierbar sind und einen genügend hohen Spielraum im Experimentalbetrieb ermöglichen.

3.1 Wahl des Arbeitsfluides

Beim "Zusammenschrumpfen" der geometrischen Dimensionen von einem Planeten auf den Labormaßstab spielen die Fluideigenschaften eine herausragende Rolle. In Verbindung mit dem Dynamoproblem ist die elektromagnetische Diffusivität $\lambda=(\mu\sigma)^{-1}$ von besonderer Bedeutung. Da die magnetische Permeabilität der Fluide mit Ausnahme einiger exotischer ferromagnetischer Suspensionen auf die magnetische Permeabilität des Vakuums $\mu_0=4\cdot\pi\cdot 10^{-7}$ [Vs/(Am)] begrenzt ist, wird, um eine niedrige Diffusivität zu erzielen, ein Fluid mit einer hohen spezifischen elektrischen Leitfähigkeit benötigt. Betrachtet man die magnetische Diffusivität gebräuchlicher Laborflüssigmetalle in ihrem typischen Arbeitsbereich, der der Abbildung 3.1 zu entnehmen ist, so zeigt lediglich Natrium einen hinreichend kleinen Wert der elektromagnetischen Diffusivität. Alleine schon die Wahl von Lithium, dessen Diffusivität um den Faktor zwei größer ist als die von Natrium, würde die Dimensionen der Versuchsanlage oder den zur Erzeugung der kritischen magnetischen Reynoldszahl notwendigen

Volumenstrom vervierfachen (!), da die magnetische Diffusivität quadratisch in die technische Dynamobedingung eingeht, siehe Abschnitt 3.3.

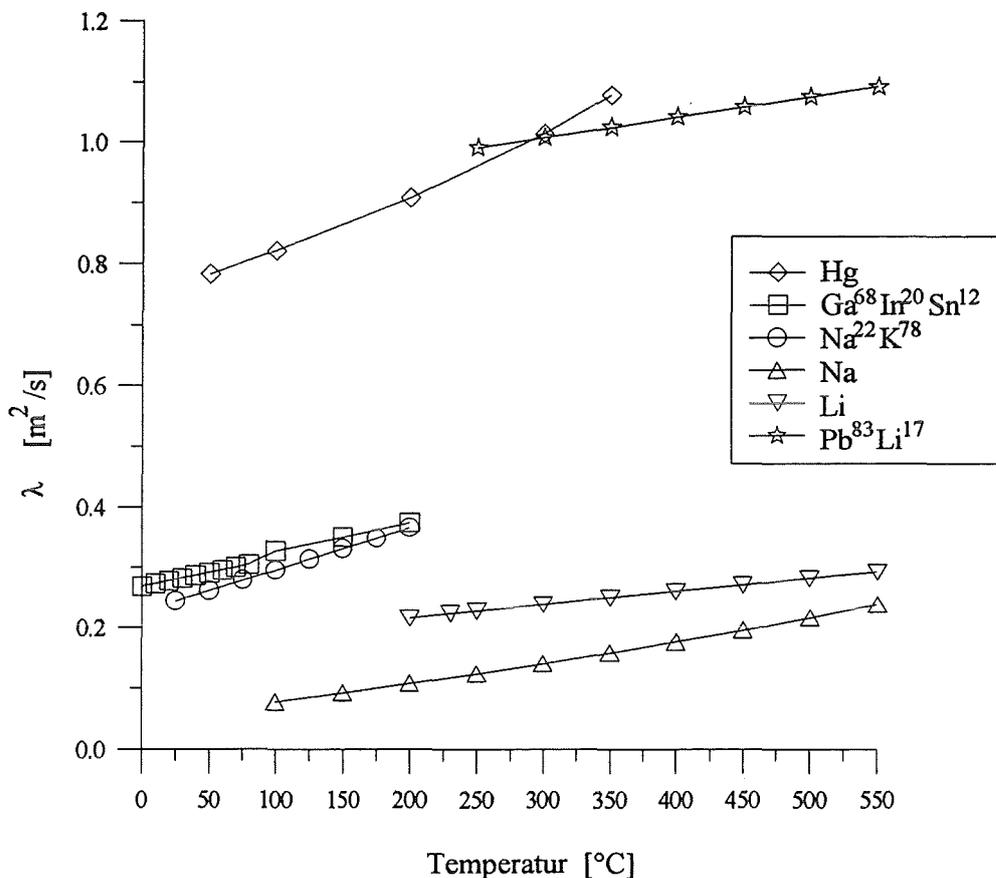


Abbildung 3.1: Magnetische Diffusivität λ einiger gängiger Laborflüssigmetalle in Abhängigkeit von der Temperatur.

Obwohl Natrium zu den Alkalimetallen zählt und sich durch eine extrem hohe Reaktivität insbesondere gegen Sauerstoff und Halogene auszeichnet, die die Wahl der kompatiblen Laborwerkstoffe und die Handhabbarkeit stark beeinträchtigen, liegt bei diesem Flüssigmetall eine langjährige Betriebserfahrung vor. Flüssiges Natrium wurde als Arbeitsmedium und Kühlmedium in schnellen Brutreaktoren verwendet. Aus dieser Zeit liegen sowohl vielfältige großtechnische Komponenten, wie Pumpen, Ventile, etc. als auch thermohydraulische Daten vor, die einen Aufbau einer Versuchsanlage wesentlich erleichtern. Die thermohydraulischen Daten von Natrium, die später im Zusammenhang mit der Auslegung von Kühlern, dem Druckverlust, etc. von Bedeutung sind, sind als Funktion der Temperatur der Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Ein weitere für die technische Auslegung des Dynamos entscheidende Frage ist, wie gut die elektrisch leitenden Kanalwände, in denen das Geschwindigkeitsfeld erzeugt wird, an das Flüssigmetall elektrisch angekoppelt sind. Anzustreben ist ein Zustand ohne elektrischen Übergangswiderstand, der nur bei vollständiger Benetzung der Oberfläche gegeben ist. Diese

Frage ist deshalb so entscheidend, da die im Modell beschriebene Skalenseparationsmethode nur dann "funktioniert", wenn die elektrischen Ströme großräumig fließen können. Ergibt sich ein großer, elektrischer Übergangswiderstand beim Übergang von einem Drallerzeuger in den nächsten, so ist der Stromfluß unterbrochen und ein Dynamoeffekt damit nicht realisierbar.

Natrium	Schmelzpunkt SMP [°C]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärme- kapazität c_p [J/(kgK)]	kin. Viskosität ν [m ² /s] *10 ⁻⁶	elektr. Leitfähig. σ [A/(Vm)] *10 ⁶	therm. Leitfähig. λ_{therm} [W/(mK)]	Vol.- änderung beim Schmelzen
C ₁	97.82	950.46	1437.08	0.93678	13.1155	91.752	2.5%
C ₂		-0.2307	-0.5806	-0.00258	-0.03344	-0.0487	
C ₃		1.8E-5	4.6E-4	2.57E-6	2.9E-5	-3.03E-7	
Temp.-bereich in [°C]		98°- 1370°	100°- 600°	100°- 300°	100°- 400°	100°- 550°	

Tabelle 3.1: Thermohydraulische Stoffdaten von Natrium als Funktion der Temperatur in [°C]. Die Regressionsfunktionen sind über Polynome $C_1 + C_2 T + C_3 T^2$ mit T in [°C] zu berechnen. Die Werte stammen aus Lyon [1952]; Foust [1972]; Addison [1984].

Es ist hier deutlich zu betonen, daß mit dem terminologischen Begriff der Benetzung nicht die physikalische Benetzung durch Adhäsionskräfte, die im wesentlichen durch die Oberflächenspannung gegeben ist, gemeint ist, sondern ein direkter elektrischer Kontakt des Flüssigmetalls mit dem Strukturmaterial. Der Unterschied läßt sich einfach an einem Beispiel erläutern. Eine InGaSn-Legierung benetzt bedingt durch ihre Oberflächenspannungskräfte ($\alpha = 0.353$ N/m) physikalisch nahezu jede Oberfläche, dennoch verbleibt ein elektrischer Übergangswiderstand. Im folgenden sei der Benetzungsbegriff nur noch als elektrische Benetzung zu verstehen.

Die meisten verwendeten Strukturmaterialien, wie zum Beispiel Edelstahl, haben eine passivierte Oberfläche, die vorwiegend aus Oxiden, Verunreinigungen und/oder Legierungsbestandteilen besteht. Diese Passivschicht, im Regelfall elektrisch isolierend, verhindert eine Benetzung der Wand und bewirkt einen Übergangswiderstand. Die Benetzung des Strukturmaterials kann dabei auf verschiedenen Wegen erfolgen. Am einfachsten ist der Weg der direkten Benetzung ohne Drittmaterialien oder Überzugsschichten. Die Methode der direkten Benetzung ist nur bei Flüssigmetallen möglich, die eine höhere Affinität zum Sauerstoff haben als die Legierungsbestandteile des Strukturmaterials und das Strukturmaterial selbst. Diese Metalle sind durch Reduktion in der Lage, den Sauerstoff aus der oxidischen Oberflächenschicht herauszulösen. Die dabei entstehende blanke Oberfläche kann dann vom Flüssigmetall gut benetzt werden. Der Reaktionsprozeß der Reduktion verläuft umso besser, je unedler das

Flüssigmetall gegenüber dem Strukturmaterial in der chemischen Spannungsreihe der Metalle steht. Daraus resultierend benetzt Natrium als Alkalimetall aufgrund seines unedlen Charakters zum Beispiel rostfreien Edelstahl gut. Da der Prozeß der Reduktion an der Oberfläche des Strukturmaterials im wesentlichen diffusionsgesteuert ist, läuft er umso schneller ab je höher die Temperatur in der Wand und in der Flüssigkeit ist.

Bei der notwendigen elektrischen Benetzung des Strukturmaterials mit Natrium werden die Verunreinigungen im Natrium gelöst. Dies führt jedoch zu einer Veränderung der Stoffeigenschaften insbesondere zu einer Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit des Fluids, die im Experiment nicht erwünscht ist. Es muß daher in den Kreislauf eine Recyklier-einrichtung implementiert werden, um konstante Stoffdaten garantieren zu können.

Im Fall des Natrium und Natrium-Kaliums erfolgt eine Recyklierung unter Ausnutzung des höheren Schmelzpunktes des Oxids und der Verunreinigungen gegenüber dem Basismetall. Diese Art der Purifikation läßt sich einfach in einen Kreislauf implementieren (, zum Beispiel über einen Reinigungskreislauf, der im Bypass zum Hauptkreis betrieben wird). Dabei wird das Flüssigmetall in der Nähe seines Schmelzpunktes durch engmaschige Siebe geleitet, an denen sich dann die Verunreinigungen aufgrund ihres höheren Schmelzpunktes in fester Form abscheiden. Der mit dieser Reinigungsmethode erzielbare Reinheitsgrad liegt sehr hoch (>99.99%).

3.2 Erzeugung eines Geschwindigkeitsfelds

Der helikale Charakter der Geschwindigkeitsfeldes, das in Gleichung 2.2 angegeben ist, ist ein wesentlicher Bestandteil jedes kinematischen Dynamos. In dem in der Gleichung 2.2 beschriebenen Geschwindigkeitsfeld verändert sich der Neigungswinkel der helikalen Stromlinien von 0° am Umfang auf 90° im Zentrum des Drallerzeugers. Ein solches Geschwindigkeitsfeld technisch zu erzeugen ist kaum möglich. Abschätzungen haben jedoch gezeigt, daß es vollkommen ausreichend ist, einen mittleren Neigungswinkel zu realisieren, da es im Rahmen der Näherungen nur auf die mittleren Eigenschaften des Strömungsfeldes ankommt.

Aus diesem Grund ist es zweckmäßig, das Strömungsfeld mit technischen Mitteln zu approximieren. Hierzu wird ein Doppelrohrzylinder verwendet. Im Zentralrohr des Doppelrohrzylinders erfolgt die Strömung in achsparallele Richtung. Im Spalt zwischen den konzentrischen Rohren werden Leitbleche so angebracht, daß die Strömung in axiale und gleichzeitig in Umfangsrichtung geführt wird. Damit läßt sich ein mittlerer Strömungs-neigungswinkel erzielen. Eine Schemaskizze einer solchen, im weiteren "Drallerzeuger" genannten, Anordnung ist in der Abbildung 3.2 zu sehen. Der Abbildung 3.2 sind ebenfalls die Bezeichnungen der geometrischen Abmessungen zu entnehmen.

Dabei bezeichnen im Bild 3.2 die Ausdrücke \dot{V}_a, \dot{V}_h den axialen Volumenstrom bzw. den helikalen Volumenstrom durch den Drallerzeuger. d ist die Höhe des Drallerzeuger und a der Durchmesser. Δr beschreibt die Breite des Zylinderspalts und h die Steigung der Wendeln.

Das globale Strömungsfeld wird dadurch erzeugt, daß die Drallerzeuger periodisch in einem großen Zylinder angeordnet werden.

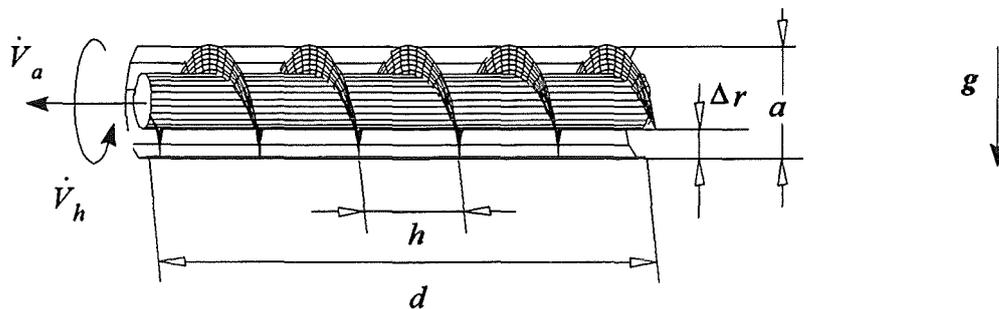


Abbildung 3.2: Technischer Vorschlag für einen Drallerzeuger, der das Strömungsfeld der Gleichung 2.2 im geometrischen Mittel erzeugen soll.

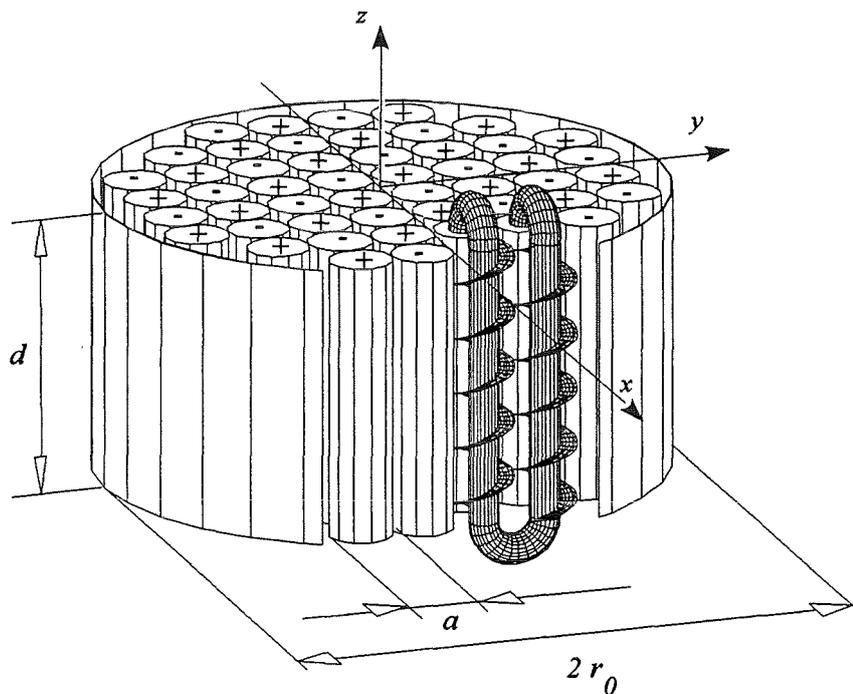


Abbildung 3.3: Schemaskizze der räumlichen Verteilung der Drallerzeuger in einem Zylinder.

Die Aus- bzw. Einläufe benachbarter Drallerzeuger sind dabei so angeordnet, daß sich bei dem Übergang von einem Zylinder zum nächsten sowohl die Drehrichtung als auch die Strömungsrichtung in den axialen wie auch den helikalen Strömungskanälen umkehrt.

Die Abbildung 3.3 zeigt die räumliche Verteilung der Drallerzeuger in einem solchen Dynamozyylinder.

3.3 Transfer der mathematischen Dynamobedingung in ein technisches Kriterium

Im Abschnitt zwei wurde eine Bedingung für die kritische magnetische Reynoldszahl abgeleitet, in die im wesentlichen die Stoffdaten und die geometrischen Größen eines Körpers eingehen (Gleichung 2.26 beziehungsweise 2.45). Nach der Definition der technischen Ausführung der Geometrie müssen im nächsten Schritt die Bedingungen in ein Kriterium überführt werden, das die Geometriedaten des Drallerzeugers wie die des Laborzylinders enthält. Ziel ist es, eine Bedingung für die kritischen Volumenströme zu formulieren, mit der eine Selbsterregung des Magnetfeldes stattfindet. Anhand dieses Kriteriums erfolgt in Abschnitt 3.4 eine Optimierung der Geometrie so, daß in einem Laborexperiment ein hinreichend großer technischer Spielraum zum Erreichen der Dynamobedingung bei gleichzeitig vertretbarem technischen Aufwand besteht.

Gegeben ist also ein Zylinder der Höhe d mit dem Radius r_0 , in den Drallerzeuger mit dem Durchmesser a eingepaßt werden sollen. Wie im Abschnitt 2 dargelegt wurde, soll die Abmessung der Drallerzeuger klein gegenüber dem Radius des Zylinders sein, damit die kleinskaligen Bewegungen gegenüber der großen Skala vernachlässigt werden können. Es sollen also möglichst viele Drallerzeuger im Zylinder untergebracht werden. Andererseits bedeutet eine hohe Anzahl der Drallerzeuger einen hohen technischen Aufwand und einen hohen Druckverlust, da alle Drallerzeuger mit großer Geschwindigkeit durchströmt werden müssen. Darüber hinaus würde eine große Anzahl von Drallerzeugern im Zylinder durch die Vielzahl der Leitbleche die magnetische Diffusivität unangemessen erhöhen.

Um die Vielzahl der Möglichkeiten zu begrenzen, kann die Anzahl Z der Drallerzeuger die Werte $Z=24, 32, 52, 69$ und 80 annehmen. Eine größere Anzahl erscheint sowohl aus fertigungstechnischen Aspekten und wie auch später zu sehen sein wird unter dem Aspekt der verfügbaren Pumpleistung wenig sinnvoll. Da durch das Einbringen der zylindrischen Drallerzeuger der gesamte Zylinderraum nur annäherungsweise ausgefüllt wird, denn es verbleiben nicht durchströmte Zwickel, ergibt sich aus der Anzahl der Drallerzeuger ein neuer effektiver Dynamoradius r_0 , der sich mit der nachfolgenden Beziehung berechnen läßt.

$$r_0 = \sqrt{\frac{Z}{4}} a \quad (3.1)$$

Da die geometrischen Abmessungen während des Experimentes nicht variiert werden können, verbleiben im einem Dynamokriterium lediglich zwei technisch frei wählbare Variablen, nämlich die Amplituden des Geschwindigkeitsfeldes A und C . Es ist im weiteren sinnvoll, diese Amplituden durch entsprechende Volumenströme auszudrücken. Integriert man das Strömungsfeld (Gleichung 2.2) in einem Drallerzeuger, so erhält man für den helikalen Volumenstrom und für den axialen Volumenstrom die folgenden Beziehungen:

$$\dot{V}_a = C \int_{y=0}^{y=\frac{\pi}{\alpha}} \int_{x=0}^{x=\frac{\pi}{\alpha}} \sin(\alpha x) \sin(\alpha y) dx dy = \frac{4C}{\alpha^2} , \quad (3.2)$$

$$\dot{V}_h = A d \alpha \int_{x=0}^{x=\frac{\pi}{2\alpha}} \cos(\alpha x) dx = A d .$$

Man kann nun die Amplituden C und A durch die entsprechenden Volumenströme ersetzen. Ebenso ergibt sich aus einfachen Überlegungen, daß $\pi = \alpha a$ ist. Die Anzahl der helikalen Windungen in einem Drallerzeuger wird im weiteren mit χ bezeichnet. Die aktive Höhe d des Zylinders, in dem der Dynamoeffekt erzeugt wird entspricht also nicht der geometrischen Höhe, vielmehr ist d durch den Zusammenhang 3.3 gegeben.

$$d = \chi h . \quad (3.3)$$

Formuliert man nun einen globalen Volumenstrom \dot{V} , so lautet der Zusammenhang zwischen axialem und helikalem Volumenstrom wie folgt:

$$\dot{V}_h \cdot \dot{V}_a = 2 \chi \dot{V}^2 . \quad (3.4)$$

Zuletzt fehlt noch der Zusammenhang zwischen R und dem Volumenstrom \dot{V} . Benutzt man die Gleichung 2.25 sowie die Gleichungen 3.1-3.4, erhält man folgende Relation zwischen den genannten Größen:

$$\dot{V}^2 = \frac{16}{\pi} \lambda_m^2 a h R^2 . \quad (3.5)$$

λ_m bezeichnet in dieser Gleichung nicht die molekulare Diffusivität, sondern eine modifizierte magnetische Diffusivität. Diese modifizierte Diffusivität ergibt sich aus der Tatsache, daß die Leitbleche, die aus Stahl aufgebaut sind, eine deutlich niedrigere elektrische Leitfähigkeit besitzen als das Fluid Natrium. λ_m läßt sich durch eine geometrische Mittelung über den Dynamozyylinder berechnen und hängt in hohem Maße sowohl von der Wandstärke des Strukturmaterials, wie auch von der Geometrie und der Anzahl der Drallerzeuger ab. Für die in Abschnitt 3.4 beschriebene Optimierung ergeben sich damit zusätzliche Parameter.

Mit der Beziehung 3.5 und der Ungleichung (2.45), die die größte magnetische Reynoldszahl erfordert, läßt sich nun eine Optimierung der Geometrieparameter durchführen.

3.4 Optimierung der Geometrieparameter

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Optimierung der Geometrieparameter ist der Druckverlust sowohl in den helikalen als auch den vertikalen Natriumkreislaufsystemen. Die Drallerzeuger müssen daher in ihren geometrischen Abmessungen so ausgelegt werden, daß bei einer gegebenen Pumpencharakteristik das technische Dynamokriterium mit einem ausreichenden Sicherheitsspielraum erfüllt werden kann.

Als Sicherheitsspielraum, der überschritten werden muß, wurde beim Design der Geometrie ein **Minimalwert** von 50% festgelegt.

Basierend auf theoretischen Überlegungen und mehreren Wassereperimenten wurde die folgende Druckverlustbeziehung für die Helikalströmung in einen Drallerzeuger in Abhängigkeit von der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} abgeleitet:

$$\Delta p = Z \left[1.2 \chi \left(\frac{r_m}{\Delta r} \right)^{-0.79} \left(\frac{\Delta r}{h} \right) + 0.55 \right] \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (3.6)$$

r_m beschreibt darin den mittleren Radius der Helikalströmung und ρ die Dichte von Natrium. Die Qualität der aufgeführten Druckverlustbeziehung wurde abschließend in der Helikalströmung eines Drallerzeugers, dessen Geometrie mit dem späteren optimalen Parametersatz übereinstimmt, in einem 1:1 Modell vermessen. Die Abbildung 3.4 zeigt einen Vergleich der experimentellen Daten mit denen der Korrelation. Es wurde im Hinblick auf das spätere Experiment eine gute Übereinstimmung gefunden.

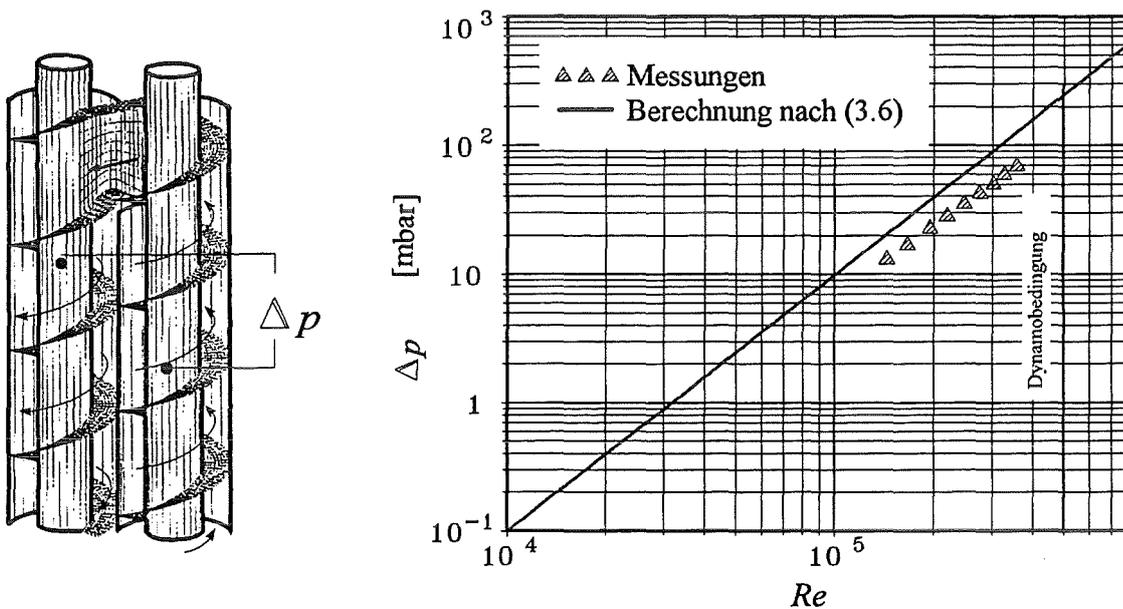


Abbildung 3.4: Druckverlust in der Helikalströmung über drei Wendeln und eine Umlenkung in einem 1:1 Modell des Drallerzeugers des späteren optimalen Parametersatzes als Funktion der Reynoldszahl [$\alpha=0.21\text{m}$; $\Delta r=0.055\text{m}$; $h=0.19\text{m}$].

Die Druckverlustbeziehung für die axiale Strömung inklusive einer 180°-Umlenkung ist in der folgenden Relation beschrieben:

$$\Delta p = \left[\zeta_1(Re) + 1.7 \zeta_2 \right] \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad ; \quad (3.7)$$

Darin ist ζ_1 eine Funktion der Reynoldszahl und kann mit der Prandtlbeziehung, die für hydraulische Reynoldszahlen bis $Re=3 \cdot 10^6$ gültig ist, berechnet werden; und ζ_2 ist ein

Verlustfaktor, der von der Rohrbiegung abhängt. Eine detaillierte Ableitung der Druckverlustbeziehung in einem Drallerzeuger ist dem Anhang B1.1 zu entnehmen.

Für das Laborexperiment stehen sowohl drei elektromagnetische Pumpen mit einer Druckhöhe von 3 bar bei einem Volumenstrom von 150m³/h zur Verfügung wie auch zwei mechanische Pumpen, die eine Druckhöhe von 9.2bar bei 500m³/h besitzen. Da sich die elektromagnetischen Pumpen speziell im unteren Volumenstrombereich (<100m³/h) besser regeln lassen, wurde entschieden, das Experiment in zwei Stufen aufzubauen. In der ersten Stufe soll in jedem Fall die kritischen Dynamobedingung erreicht und damit das Dynamomodell verifiziert werden. Eine zweite Ausbaustufe, in der die Sicherheit von 1.8 existieren soll, sollen dann nichtlineare Phänomene des homogenen Dynamoproblems untersucht werden.

Mit den Druckverlustbeziehungen, den zur Verfügung stehenden technischen Ressourcen und der "ungünstigsten" Volumenstrombedingung wurde ein Optimierungsprozeß eingeleitet, dessen Ziel es war, die Dynamovolumenstrombedingung mit hinreichendem Sicherheitspielraum zu übertreffen. Dem Optimierungsprozeß wurden folgende Größen unterworfen:

- Z Anzahl der Drallerzeuger,
- χ Anzahl der Windungen im Drallerzeuger,
- a äußerer Drallerzeugerdurchmesser,
- Δr Spaltweite im Doppelrohr,
- h Höhe der Steigung im Drallerzeuger.

Zunächst sollten noch einige Bemerkungen über die Abhängigkeiten des Druckverlustes von den Geometriedaten gemacht werden, bevor über die Ergebnisse des Optimierungsprozesses berichtet wird.

Das Verhältnis d/h , das indirekt in der Gleichung 3.6 enthalten ist, beeinflusst den Druckverlustkoeffizienten stark, so daß in der Optimierung prinzipiell auf ein kleines d/h Verhältnis geachtet werden soll. Ebenso negativ wirkt sich eine hohe Windungszahl χ im Drallerzeuger auf den Druckverlust aus. Die Anzahl der Drallerzeuger geht linear in die Druckverlustbeziehung ein. In einem viel höheren Maß als die im vorangegangenen angesprochenen Verhältnisse wirkt sich der Durchmesser der Drallerzeuger auf den Druckverlust aus, denn eine Größenordnungsabschätzung zeigt, daß $\Delta p \sim 1/a^3$ ist.

Erste Basisüberlegungen bezüglich des Druckverlusts haben gezeigt, daß es sinnvoll ist, die Helikalströmung auf zwei unabhängige Teilkreisläufe aufzuteilen, die von je einer Pumpe im Fall des Einsatzes der elektromagnetischen Pumpen oder von einer großen mechanischen Pumpe gespeist werden sollen. Die axiale Durchströmung des Zentralrohres erfolgt mit einer Pumpe (im ersten Schritt eine elektromagnetische und in der zweiten Stufe eine mechanische Pumpe), egal welche Ausbaustufe betrachtet wird.

Da hier nicht der gesamte numerisch durchgeführte Optimierungsvorgang dargestellt werden soll, wird in diesem Abschnitt der Einfluß der variierten Parameter auf den Volumenstrom und den Druckverlust aufgezeigt. Dabei wird angenommen, daß die Natriumtemperatur im Dynamozyylinder 130°C betrage und daß das Strukturmaterial (rostfreier Stahl) eine Dicke von 1mm besitzt.

Wir betrachten zunächst als Basisgeometriedatensatz einen Dynamobehälter der folgende Daten besitzt: $a=0.21\text{m}$; $h=0.19\text{m}$; $\chi=4$. Wir variieren die Anzahl der Drallerzeuger Z und erhalten das in der Tabelle 3.2 dargestellte Ergebnis, unter Benutzung der ungünstigsten Dynamobedingung (Gl. 2.45).

Es ist deutlich zu sehen, daß bei Erhöhung der Anzahl der Drallerzeuger, der benötigte Volumenstrom sinkt. Gleichzeitig steigt jedoch der Druckverlust in den Helikalkanälen an, da bei der erhöhten Drallerzeugerzahl der Strömungsweg länger wird und damit naturgemäß der Druckverlust steigt. In diesem Zusammenhang sollte ebenfalls erwähnt werden, daß eine Drallerzeugerzahl von $Z=32$ bzw. $Z=69$ Drallerzeugern aus geometrischen Gründen wenig vorteilhaft ist.

Die in den Tabellen 3.2-3.5 angegebenen Druckverluste sind die Druckverluste, die bei der helikalen Strömung durch alle Drallerzeuger des Dynamomoduls entstehen.

Z	32	52	69	80
$\dot{V}_{kritisch} \text{ [m}^3/\text{h]}$	180.1	141.3	126.1	117.6
$\Delta p \text{ [mbar]}$	3930	4174	4312	4457

Tabelle 3.2: Abhängigkeit des kritischen Volumenstroms zum Erreichen der Dynamobedingung als Funktion der Anzahl der Drallerzeuger. Δp ist der Gesamtdruckverlust der Helikalströmung.

Bei 32 Drallerzeugern ist die kleinskalige Bewegung im Vergleich zu den Dynamoabmessungen (a/r_0) von der Ordnung 1, exakt 0.31, sodaß einige Vereinfachungen im Modell nicht mehr gültig sind. Gegen den Fall von 69 Drallerzeugern spricht der Sachverhalt, daß keine symmetrische Anordnung möglich ist; zudem ist das schachbrettartige Strömungsmuster in diesem Fall kaum zu realisieren. Die weitere Diskussion beschränkt sich auf die Fälle $Z=52$ bzw. $Z=80$, eine höhere Zahl ist aus fertigungstechnischen Aspekten aus Kostengründen und auch unter dem Gesichtspunkt des Druckverlustes wenig praktikabel.

Variieren wir im nächsten Schritt die Anzahl der Windungen der Drallerzeuger. Gegeben sei ein Parametersatz: $Z=52$; $a=0.21\text{m}$; $h=0.19\text{m}$. Die Ergebnisse dieser Variation sind der Tabelle 3.3 zu entnehmen:

χ	3.5	4	4.5	5
$\dot{V}_{kritisch}$ [m ³ /h]	144.3	141.3	140.6	140.4
Δp [mbar]	4013	4174	4465	4785

Tabelle 3.3: Abhängigkeit des kritischen Volumenstroms zum Erreichen der Dynamobedingung als Funktion der Anzahl der Windungen χ des Drallerzeugers. Δp ist der Gesamtdruckverlust der Helikalströmung.

Aus den numerischen Ergebnissen wird klar, daß sich eine Erhöhung der Windungszahl im Drallerzeuger auf den benötigten Volumenstrom nur gering auswirkt, während der Druckverlust hingegen dramatisch ansteigt. Physikalisch ist der nur geringe Abfall des Volumenstroms bei der Erhöhung der Windungszahl leicht ersichtlich. Durch eine erhöhte Windungszahl ändert sich die mittlere Helizität der Strömung nur wenig. Die numerischen Ergebnisse des Optimierungsprozesses zeigen schließlich, daß ein Optimum der Windungszahl zwischen 3.5 und 4 liegt (, exakt liegt es bei 3.7). Für eine größere Anzahl von Drallerzeugern fällt bei steigender Windungszahl zwar die Dynamobedingung steiler ab, aber die Erhöhung des Druckverlustes wächst noch stärker an als bei 52 Drallerzeugern, sodaß dieser Vorteil nicht zum tragen kommt.

Im nächsten Schritt wird der Drallerzeugerdurchmesser a variiert. Der Standardsatz der Daten sei jetzt: $Z=52$; $\chi=3.5$; $h=0.19\text{m}$. Zu erwarten ist, daß bei kleineren Durchmessern von a der kritische Durchsatz deutlich kleiner ausfällt, da die mittlere Helizität der Strömung stärker wird. In der Tabelle 3.4 ist eine solche Parametervariation durchgeführt worden.

a [mm]	160	180	200	210	220
$\dot{V}_{kritisch}$ [m ³ /h]	113.5	127.7	141.9	144.3	146.6
Δp [mbar]	5846	5018	4541	4013	3792

Tabelle 3.4: Abhängigkeit des kritischen Volumenstroms zum Erreichen der Dynamobedingung als Funktion des Außendurchmessers a des Drallerzeugers. Δp ist der Gesamtdruckverlust der Helikalströmung.

Wie zu erwarten, führt eine Verringerung von a zu niedrigeren kritischen Volumenströmen, jedoch wird dies mit einem Anstieg des Druckverlustes erkaufte, der den Rahmen der technischen verfügbaren Pumpleistung sprengt. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, daß ab einem Durchmesser von ca. $a=200\text{mm}$ der kritische Volumenstrom nicht mehr so stark

ansteigt. Bei größeren Durchmessern sinkt durch die geringere Anhäufung von Strukturmaterial die modifizierte elektromagnetische Diffusivität und damit wächst der kritische Volumenstrom langsamer.

Zuletzt wird schließlich der Windungsabstand h verändert. Grundlage für die Variation seien folgende Daten: $Z=52$; $\chi=3.5$; $a=0.21\text{m}$. Da sich an der Helizität der Strömung durch die Veränderung von h nichts Grundlegendes ändert, ist lediglich ein geringer Einfluß der Geometriediffusion auf den kritischen Volumenstrom zu erwarten. In der Tabelle 3.5 sind die numerisch erzielten Ergebnisse festgehalten. Dabei zeigt sich, daß die Nachteile, die man sich durch eine Verringerung des Windungsabstands in Form eines erhöhten Druckverlustes erkauft in keinem Maße durch die Erniedrigung des kritischen Volumenstroms aufgewogen werden.

h [mm]	160	180	190	200
$\dot{V}_{kritisch}$ [m^3/h]	141.1	142.7	144.3	146.5
Δp [mbar]	5796	4458	4013	3668

Tabelle 3.5: Abhängigkeit des kritischen Volumenstroms zum Erreichen der Dynamobedingung als Funktion des Windungsabstands h des Drallerzeugers. Δp ist der Gesamtdruckverlust der Helikalströmung.

3.5 Optimaler Parametersatz und physikal. Überlegungen im Design des Dynamomoduls

Wie schon im vorangegangenen angesprochen erfolgte die Optimierung auf numerischen Weg. Dabei hat sich der in der Tabelle 3.6 angegebene "optimale" Parametersatz in Hinblick auf den Druckverlust und den benötigten Volumenstrom ergeben.

Z	a	Δr	χ	h	r_0	d
52	0.21m	0.055m	3.7 (gemittelt)	0.19m	0.85m	0.703

Tabelle 3.6: Optimaler Parametersatz für das geplante Dynamoexperiment.

Bei dem gewählten Parametersatz ergibt sich ein weiterer in elektrodynamischer Hinsicht günstiger Aspekt, der bei der Auslegung nicht primär betrachtet wurde.

Analytische Überlegungen von Gailitis (1967) bezüglich der elektrischen Stromdichteverteilung zeigen, daß eine Eliminierung der induzierten elektrischen Ströme in polare Richtung (z -Richtung) zu niedrigeren magnetischen Reynoldszahlen führen, ohne die Größe des zu

erwartenden Magnetfelds wesentlich zu verkleinern. Er zeigt, daß bei einem Geometrieverhältnis von Zylinderradius r_0 zu Zylinderhöhe d von der Größe $r_0/d \approx 1$ ein Minimalwert der magnetischen Reynoldszahl zu erwarten ist. Im gewählten Parametersatz beträgt dieses Verhältnis 1.21 und liegt somit günstig.

Anhand der verfügbaren Pumpen ergeben sich für beide Ausbaustufen die folgenden in der Abbildung 3.5 gezeigten Betriebsdiagramme. Ausgehend von diesen Betriebsdiagrammen bietet die erste Ausbaustufe bei einer konservativen Abschätzung, wie sie hier vorgenommen wurde, die Möglichkeit die kritische magnetische Reynoldszahl im Versuch zu erreichen. In der zweiten Ausbaustufe wird mit den aktuell verfügbaren Pumpenressourcen ein Sicherheitsfaktor von 1.8 erreicht. Damit wird die kritische magnetische Reynoldszahl nahezu um den Faktor zwei überschritten. Aufgrund der vielfältigen Grenzfälle und Randbedingungen, die im Rahmen der Dynamotheorie untersucht wurden, erscheint den Autoren, der Sicherheitsfaktor mehr als ausreichend um eventuelle Unsicherheiten, die sich durch Approximationen in der Theorie ergeben, zu kompensieren.

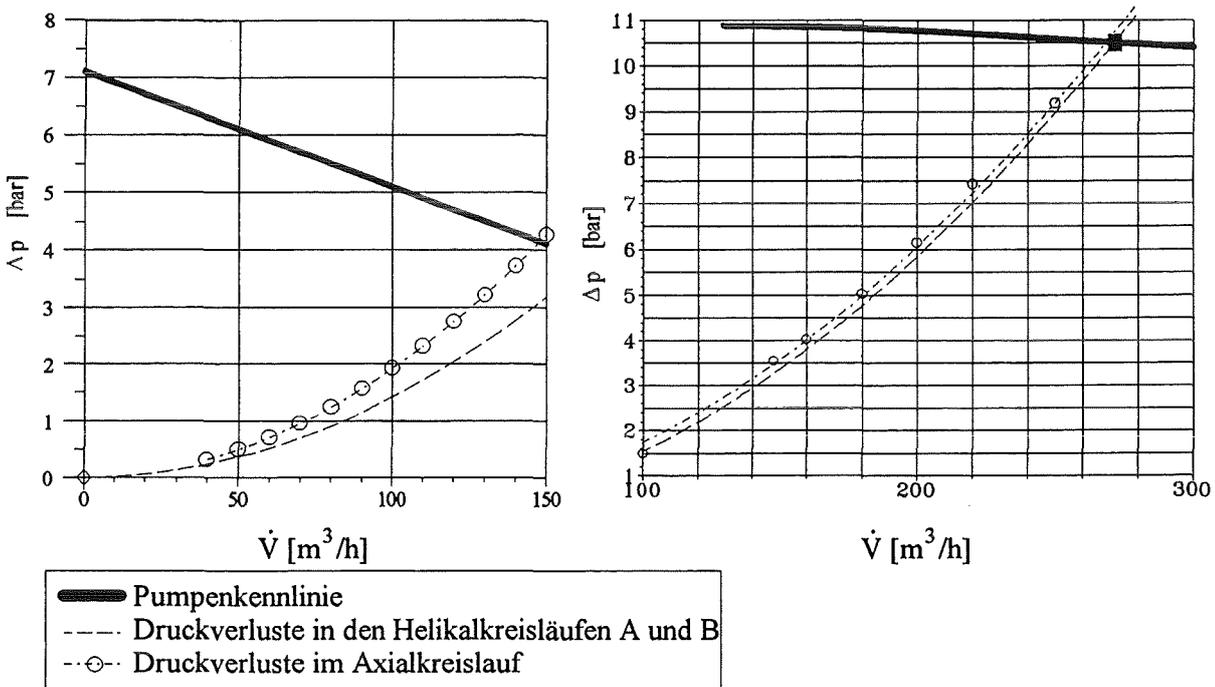
In dem im Abschnitt 2 beschriebenen Modell wurden lediglich achsensymmetrische Dipol-Lösungen betrachtet, die häufig zu größeren kritischen magnetischen Reynoldszahlen führen als antisymmetrische Quattropol-Lösungen. Desweiteren sind Bedingungen, die sich durch die Konstruktion des Dynamomoduls ergeben deutlich besser als die im Modell angenommenen Randbedingungen. Im folgenden wird die Konstruktion des Dynamomoduls beschrieben. Desweiteren werden Aspekte beleuchtet, die sich durch die Konstruktion ergeben und die Auswirkungen auf den Betrieb in einem Kreislauf haben.

Die Drallerzeuger sind entsprechend der Abbildung 3.2 aus rostfreiem Stahl aufgebaut. Das Innenrohr hat eine Wandstärke von 1.5mm und einen Außendurchmesser von 103mm, das Außenrohr besitzt einen Außendurchmesser von 212mm bei einer Wandstärke von 1mm. Die in dem Spalt zwischen den konzentrischen Rohren eingeschweißten Leitbleche werden aus 1mm starken Stahlblech ausgestanzt, anschließend gebogen und abschließend erodiert. Entsprechend dem vom Technischen Überwachungsverein (TÜV) herausgegebenen AD-Merkblätter B6 ergibt sich die erforderliche Wandstärke s in mm für druckbelastete Rohre nach der Formel 3.8

$$s = \frac{(a+s) \cdot p}{20 \frac{K}{S} V + p} \quad , \quad (3.8)$$

Dabei ist der Rohraußendurchmesser $(a+s)$ in Millimetern und der maximale Betriebsüberdruck p in bar einzusetzen. Der Sicherheitsfaktor S wird mit 1.5 angesetzt, die Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in der Schweißnaht beträgt $V=0.85$. Der Werkstoffkennwert

entspricht der 1%-Dehngrenze des eingesetzten Werkstoffes bei der Berechnungstemperatur. Da die maximalen Belastungen der Struktur lediglich bei den hohen Durchsätzen während der Experimente auftreten, wurde dem Festigkeitsnachweis eine Temperatur von 150°C zugrundegelegt, um die Menge des eingesetzten Strukturmaterials zu minimieren. Geringere Belastungen bei höheren Temperaturen (beispielsweise 350°C beim Benetzen der Struktur) sind ebenfalls mit Sicherheit abgedeckt.



(a)

(b)

Abbildung 3.5: Betriebskennlinien der Pumpen und Druckverlust des Rohrleitungssystems inklusive des Dynamomoduls in beiden Ausbaustufen. Die Druckverlustkurven wurden für eine Fluidtemperatur von $T=130^{\circ}\text{C}$ berechnet. Als Kreislauf wurde ein System bestehend aus 12 Krümmern und ca. 40m Rohrleitung angenommen. a.) Ausbaustufe 1 mit drei EM-Pumpen. b.) Ausbaustufe 2 mit zwei mechanischen Pumpen.

Besonders kritisch ist bei einer solchen Konstruktion die Belastung speziell des dünnen Außenrohres gegenüber äußerem Überdruck. Die Druckbelastbarkeit des Außenrohres gegenüber äußerem Überdruck beträgt für eine elastische Einbeulung max. $p=3.1\text{bar}$. Die Druckbelastbarkeit sinkt jedoch rapide bei einer Temperaturerhöhung auf 400°C auf einen Wert von lediglich 2.0bar . Diesem Umstand ist im Hinblick auf Befüllungsvorgänge und auch im Kreislaufbetrieb durch geeignete Sicherungsmaßnahmen Rechnung zu tragen.

Die Berechnungsergebnisse wurden durch eine Druckprobe an einem 1:1 Modell eines Drallerzeugerpaars bestätigt, sodaß der maximal durch die eingesetzten Pumpen erzeugte Differenzdruck von 11bar mit hinreichender Sicherheit ertragen werden kann. Im Betrieb ist

lediglich darauf zu achten, daß zwischen dem Innen- und dem Außenrohr nicht zu große Druckunterschiede auftreten.

Alle Drallerzeuger sind in einem zylindrischen Außenbehälter eingebaut. Der Zwischenraum zwischen den Drallerzeugern, wir wollen ihn "Zwickelraum" nennen, sei ebenfalls mit Natrium gefüllt. Wie schon im Abschnitt 3.4 angesprochen, kann aufgrund des hohen Druckabfalls in der Helikalströmung der Helikalkreislauf zumindest in der ersten Ausbaustufe nicht von einer Pumpe gespeist werden. Daher erfolgte eine Aufteilung in zwei Helikalkreisläufe, die von je einer Pumpe gespeist werden. Der Axialkreislauf wird ebenfalls von einer Pumpe gespeist. Da bevor der Dynamoversuch begonnen werden kann, auch die Außenflächen des Drallerzeugers benetzt werden müssen, um elektrischen Übergangswiderstände zwischen den Drallerzeugern zu eliminieren, muß der Zwickelraum ebenfalls durchströmt werden. Hierzu werden in den Dynamozyylinder Leitbleche eingeschweißt. Die Zwangskonvektion wird über einen Abzweig aus dem Axialkreislauf realisiert. Näherers hierzu ist den Abschnitten 4.1 bzw. 4.5.2 zu entnehmen.

Die Strömungsführung im Dynamomodul wurde so gewählt, daß sich für die festgelegte Aufteilung in Teilkreisläufe eine günstige Lage der Rohranschlüsse ergibt und dadurch ein sicheres Befüllen beziehungsweise Entleeren aller Drallerzeuger ohne zusätzlichen Aufwand möglich ist.

Die Anordnung der Umlenkungen im zentralen wie auch den helikalen Kreisläufen beim Übergang von einem Drallerzeuger in den nächsten ist sowohl in mechanischer wie auch elektrodynamischer Hinsicht ein wichtiger Punkt. Erfolgt die Anordnung der Umlenkungen beim Übergang von einem Drallerzeuger in den anderen gleichsinnig, siehe Abbildung 3.6a, so ergibt der Effektivvektor an den Stirnseiten des Zylinders eine Art Ringströmung. Eine Ringströmung kann in elektrodynamischen Sinn zu einer Erhöhung der kritischen magnetischen Reynoldszahl führen. Darüber hinaus ist es möglich, daß durch diesen Randeffekt andere unerwünschte Nebeneffekte auftreten. Die Anordnung der helikalen und zentralen Umlenkungen, siehe Abbildung 3.6b, ist daher bewußt gegenläufig gewählt, um den Auswirkungen einer globalen Ringströmung entgegenzuwirken.

Die örtlich auftretenden Differenzdrücke zwischen helikalem und zentralem Kreislauf können aufgrund der Abmessungen des Innenrohres ($\varnothing 103\text{mm} \times 1.5\text{mm}$) mit Sicherheit ertragen werden. Während des Betriebes ist jedoch unbedingt darauf zu achten, daß der Differenzdruck zwischen den helikalen Kreisläufen und dem Zwickelraum (,der Druck dort entspricht dem Druckniveau am Ausgang des zentralen Kreislaufs), das heißt der maximale äußere Überdruck auf die Drallerzeuger, einen Betrag von einem bar (!) nicht überschreitet. Für den Betrieb des Natriumkreislaufes sind aus diesem Grund entsprechende Sicherheitsabschaltungen vorgesehen.

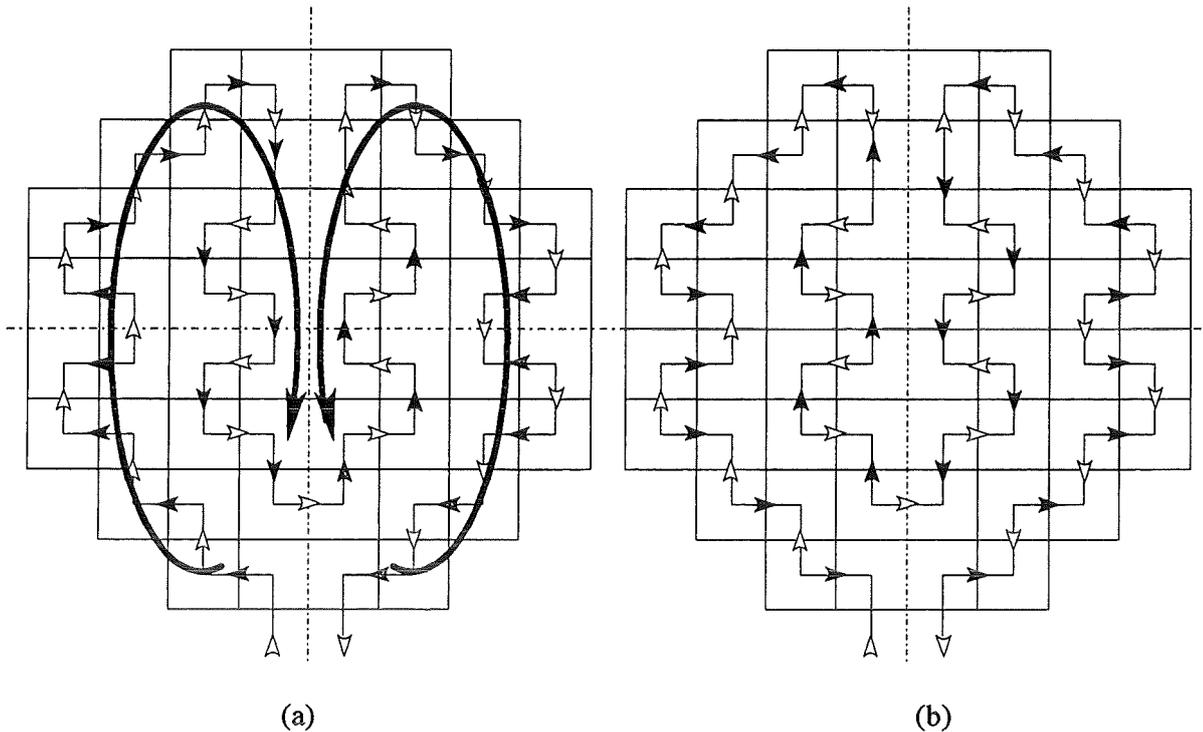


Abbildung 3.6: Schemaskizze der Umlenkungsrichtungen an der Stirnseite des Dynamozyinders. Die offenen Pfeile zeigen die Umlenkung des zentralen Kreislaufs, die gefüllten bzw. schraffierten Pfeile zeigen die Umlenkungsrichtung der Helikalkreisläufe A und B beim Übergang von einem Drallerzeuger in den anderen. a.) Ausbildung einer globalen Ringströmung bei gleichsinniger Umlenkung an den Stirnseiten des Zylinders. b.) Gegensinnige Umlenkung der Zentral- und Helikalkreisläufe.

In der Abbildung 3.7 ist die im Design ausgeführte Strömungsführung der helikalen und der zentralen Kreisläufe dargestellt.

Neben dem festigkeitstechnischen Aspekten, die sich aus der Konstruktion eines Drallerzeugers und der damit verbundenen Kreislaufgestaltung ergeben, muß ein wesentlicher anderer Punkt beleuchtet werden, der die Dynamobedingung und damit die benötigten Volumenströme zur Magnetfelderzeugung wesentlich beeinflussen kann. Wie im Abschnitt 2.2.2 diskutiert worden ist, kann ein stagnierendes Natriumvolumen auf den Deckelflächen des Dynamos sowohl zu einer Erniedrigung des benötigten Durchsatzes führen; aber ist diese stagnierende Natriumschicht zu groß, kann es auch zu einer Erhöhung des benötigten Durchsatzes kommen.

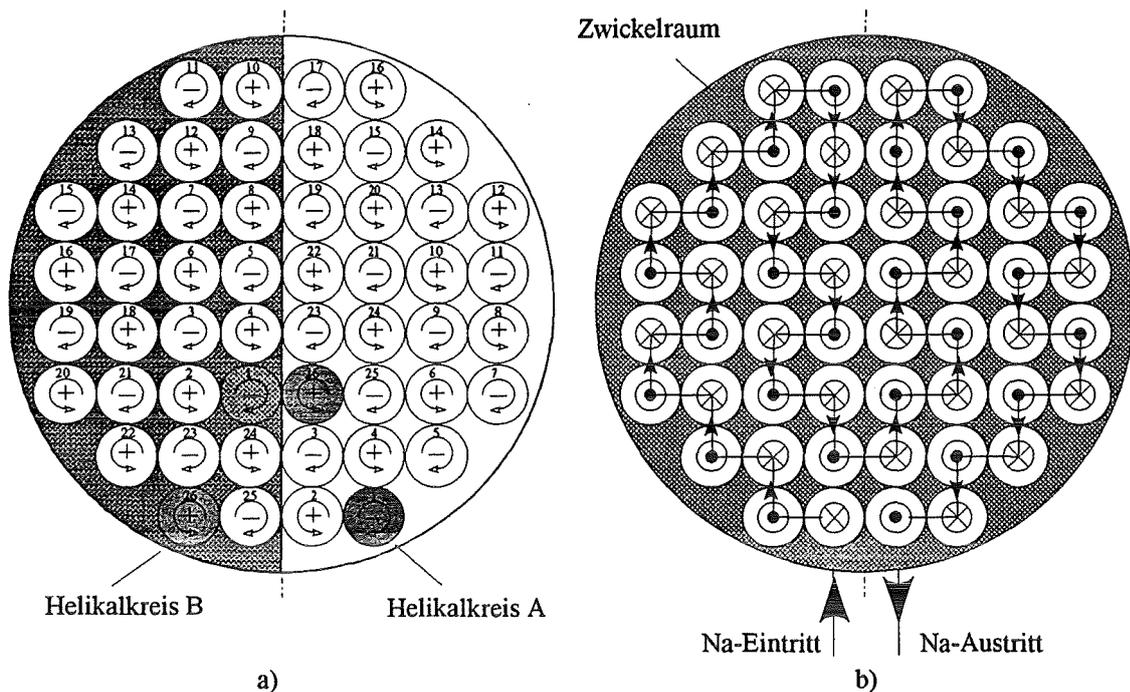


Abbildung 3.7: Schematische Skizze der Strömungsführung im Dynamomodul. Die Nummerierung gibt den Strömungspfad an. a.) Helikale Kreisläufe mit Angabe des Drehsinns der Strömung. b.) Axialer Kreislauf mit Angabe der Strömungsrichtung.

Es ist also konstruktiv bei der Auslegung der Umlenkungen auf den Stirnseiten des Zylinders darauf zu achten, daß das stagnierende Natriumvolumen über dem Drallerzeuger möglichst einen Wert von 8% gemittelt über der ganzen Deckfläche nicht übersteigt.

Damit die Drallerzeuger aus schwingungstechnischen Aspekten nicht unbefestigt in den großen Dynamozyylinder eingefügt werden können, werden sie jeweils am Innenrohr mit dem Zylinderdeckel des Dynamos verschweißt. Damit eine Schweißung erfolgen kann, muß zu dem Drallerzeuger ein Abstand von ca. 5mm zur Stirnfläche vorliegen, siehe Abbildung 3.8. Damit ergibt sich ein erstes stagnierendes Natriumvolumen auf den Deckflächen.

Ein zweites viel größeres stagnierendes Volumen ergibt sich durch die Steigung des Drallerzeugers selbst. Da der Drallerzeuger eine Wendelsteigung von 190mm besitzt und die Strömung in einem geschlossenen Kanal erfolgt, bleibt bei jeder Umlenkung ein keilartiger zylinderförmiger Raum nicht durchströmt, wie er in der Abbildung 3.8 schraffiert zu sehen ist. Ein weiterer Raum, der ebenfalls nicht an der Erzeugung des Dynamoeffektes beteiligt ist, und daher als stagnierender Raum angesehen werden muß, wird von den Ablaufrohren gebildet, sie sind in der Abbildung 3.7 punktiert dargestellt. Die Ablaufrohre sind deshalb erforderlich, damit ein vollständiges Abfließen des Fluids möglich wird. Die sich aus dieser Anordnung ergebende Nebenströmung beträgt 5.5% und ist in allen anderen Berechnungen zur Hydraulik des Systems berücksichtigt worden.

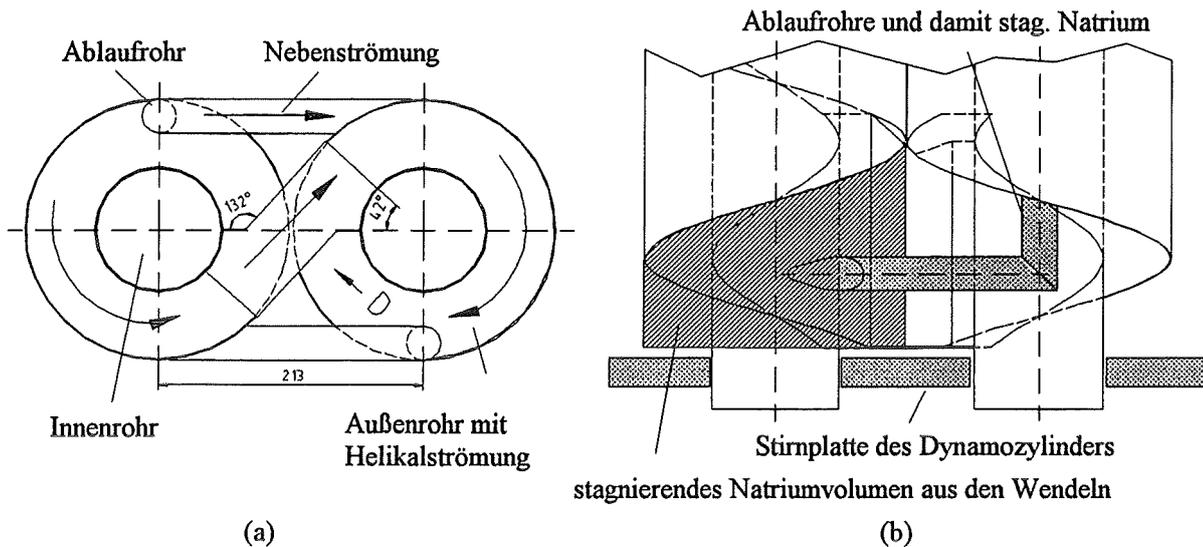


Abbildung 3.8: Sich aus der konstruktiven Ausführung ergebendes stagnierendes Natriumvolumen an den Stirnseiten des Dynamomoduls.
 a.) Draufsicht auf ein Drallerzeugerpaar. b.) Seitenansicht eines Drallerzeugerpaars.

Die konstruktive Ausführung des Drallerzeugers wurde so ausgeführt, daß der stagnierende Natriumraum möglichst den angestrebten Wert von 8% nicht übersteigt. Dieses Ziel konnte nicht erreicht werden. Eine geometrische Mittelung des stagnierenden Natriumvolumens im Bereich des Zylinderdeckels über den gesamten Dynamozyylinder ergibt einen Wert der mittleren stagnierenden Natriumschichtdicke von 90mm auf jeder Stirnseite. Entsprechend der in Kapitel 2.2.2 eingeführten Nomenklatur von D/d , wobei $d=3.75 \cdot l=665\text{mm}$ lang ist, konnte lediglich ein Verhältnis von 12.6% realisiert werden. Dieser Wert wurde jedoch in der Berechnung des kritischen Volumenstroms, der im ungünstigsten Falle $144.3 \text{ m}^3/\text{h}$ beträgt bereits berücksichtigt. Hätte ein Wert von beispielsweise 4.3% erzielt werden können, wäre der kritische Durchsatz auf $131 \text{ m}^3/\text{h}$ gesunken (!).

Eine ähnliche Betrachtung wie im obigen Fall läßt sich auch in radialer Richtung anstellen. Dadurch, daß das Feld der Drallerzeuger von einem zwangsläufig größerem Zylinder eingeschlossen ist, ergibt sich in den Randbereichen ein stagnierendes Fluidvolumen. Integriert man das stagnierende Natriumvolumen in den Randbereichen über den Behälter auf, so erhält man ein Verhältnis von D/r_0 von 0.104. dieses Verhältnis entspricht nahezu dem Wert, der in der approximierten Betrachtung in Kapitel 2.2.1 betrachtet wurde. In diesem Fall wirkt jedoch das stagnierende Volumen positiv auf den Dynamoeffekt. Der kritische Volumenstrom würde geringfügig auf einen Wert von $139.7 \text{ m}^3/\text{h}$ sinken.

Eine gewisse Unsicherheit in der experimentellen Konfiguration, die von der Theorie nicht erfaßt werden kann, verbleibt in der Konstruktion.

In den zentralen Kreisläufen der Axialströmung erfolgt bei jedem Übergang von einem Drallerzeuger in den anderen eine 180°-Umlenkung des Fluids. Inwieweit diese Umlenkung sich positiv oder eventuell auch negativ auf den Dynamoprozeß auswirkt läßt sich nicht abschätzen. Die Umlenkungen können einen Magnetfeldverlust durch konvektiven Transport verursachen, der nicht im Modell berücksichtigt wurde, der aber eine höhere kritische magnetische Reynoldszahl zur Folge haben kann. Der umgekehrte Effekt ist jedoch auch möglich, daß die Feldlinien durch die Umlenkung gekrümmt werden und ins Gebiet der Felderregung zurück transportiert werden. Dies hätte eine Verringerung der kritischen magnetischen Reynoldszahl zur Folge.

Schlußendlich wird in den weiteren Betrachtungen in diesem Bericht angenommen, daß der ungünstigste Fall eintritt und der kritische Volumenstrom $144.3\text{m}^3/\text{h}$ beträgt.

Der Dynamomodul selbst befindet sich für das geplante Laborexperiment in einem Schutzbehälter, siehe Abbildung 3.9.

Die Anschlußleitungen des Moduls werden durch die Unterseite des Behälters nach außen geführt. Die Verbindung zwischen den entsprechenden Rohrleitungen und der Behälterwand erfolgt über Kompensatoren. Die Kompensatoren werden erforderlich, um die Wärmedehnungen zwischen dem Modul und dem Kreislauf auszugleichen, da beide sowohl bei 400°C bei der Benetzung wie auch bei der späteren Betriebstemperatur von 120°C betrieben werden müssen.

Die für den Versuch geplanten Meß- und Überwachungseinrichtungen innerhalb des Dynamomoduls werden in den Abschnitten 4.7 und 4.8 beschrieben.

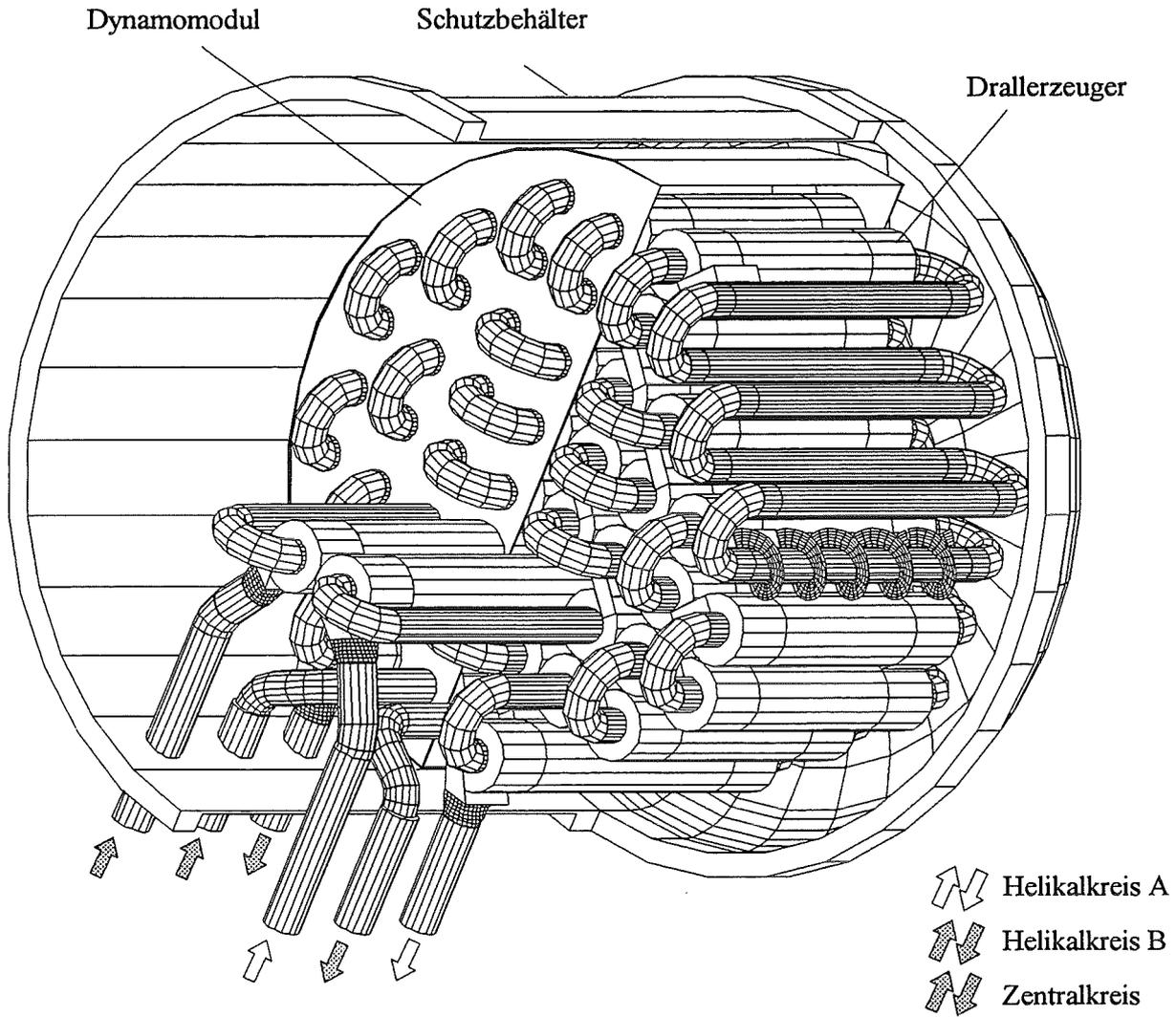


Abbildung 3.9: Dreidimensionale Ansicht des Dynamomoduls im Schutzbehälter der geplanten Laboreinrichtung.

4 Die Dynamoversuchsanlage

4.1 Das Anlagenkreislaufschema

Eine Schemazeichnung des Leitungssystems der geplanten Dynamoeinrichtung ist der Abbildung 4.1 zu entnehmen. Darin sind alle Komponenten des Natriumkreislaufs in der ersten Ausbaustufe enthalten. In der Abbildung ist ebenfalls eine Legende aufgeführt, die die Zugehörigkeit der einzelnen Komponenten zu den unterschiedlichen Kreislaufsegmenten regelt. Alle aufgeführten Komponenten wie Pumpen (Abkürzung PPE_x), Ventile (x.x); Gebläse (Abkürzung G_x) etc. werden von einer räumlich von der Versuchsanlage getrennten Schaltwarte bedient. Die räumliche Anordnung des Kreislaufs, dargestellt als Rohrleitungsplan, in der Versuchshalle 272 des Forschungszentrums Karlsruhe ist den Abbildungen 4.2 in der ersten Ausbaustufe, respektive der Abbildung 4.3 in der zweiten Ausbaustufe zu entnehmen. Alle natriumführenden und damit beheizten Leitungen sind aus sicherheits- und bedientechnischen Aspekten steigend verlegt.

Das gesamte in den Abbildungen 4.1-4.3 zu entnehmende Kreislaufschema besteht im wesentlichen aus drei Systemen:

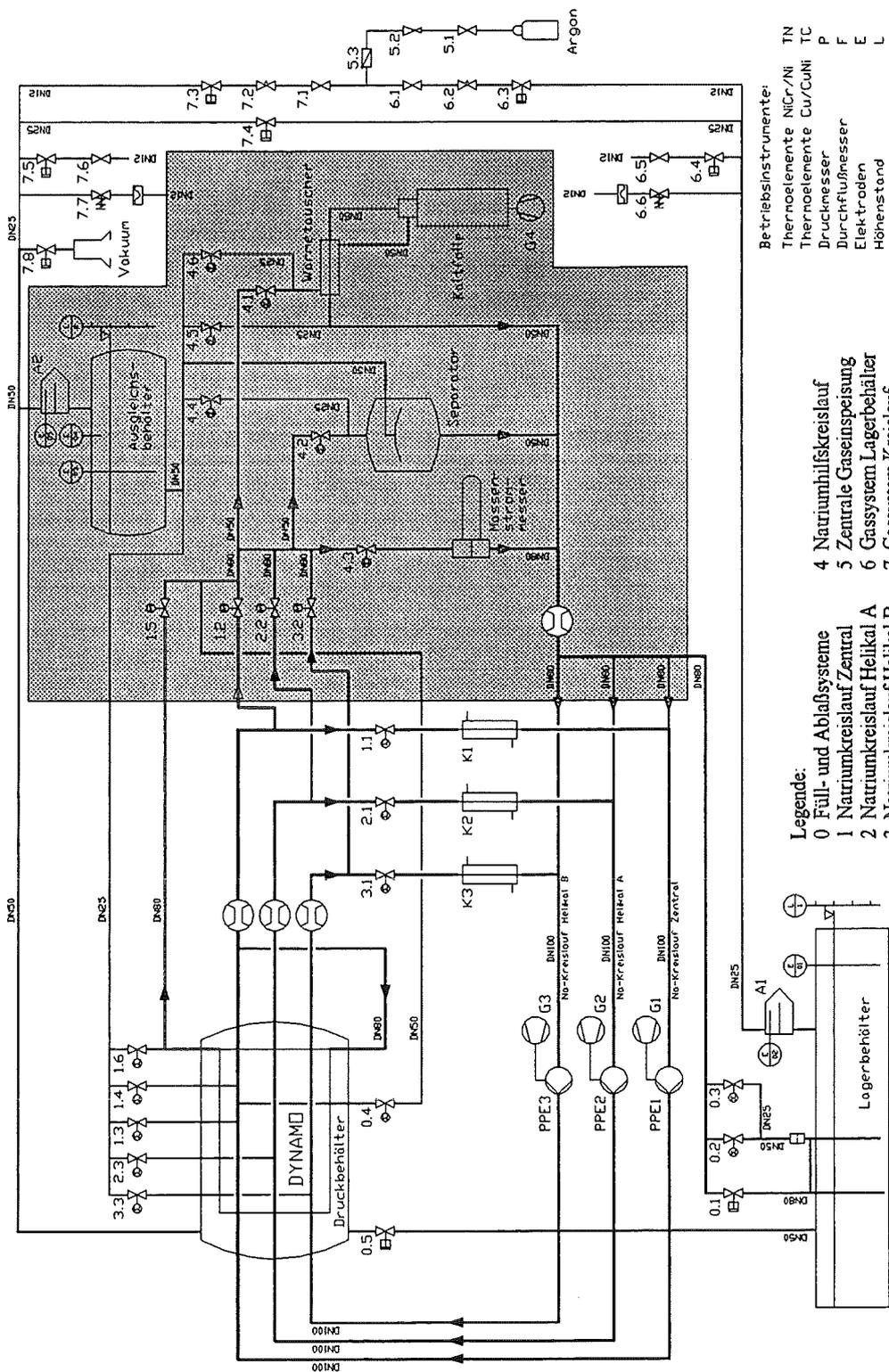
1. den Natriumhauptideisläufen,
2. dem Natriumhilfskreislauf und dem Füll- Ablaßsystem,
3. dem Inertgassystem.

In diesem Abschnitt werden lediglich die Hauptaufgaben der drei einzelnen Systeme stichwortartig angegeben. Eine detaillierte Beschreibung der Auslegung und des technischen Aufbaus der Komponenten ist den jeweiligen Unterkapiteln zu entnehmen.

4.1.1 Die Natriumhauptideisläufe

Die Aufgabe der Natriumhauptideisläufe besteht im wesentlichen darin, einen frei wählbaren Natriumvolumenstrom durch den Dynamomodul zu pumpen, um eine Selbsterregung des Magnetfeldes zu erzeugen. Da in Folge der hohen Druckverluste in den Drallerzeugern eine der zur Verfügung stehenden MHD-Pumpen nicht ausreicht, um den notwendigen Volumenstrom durch den gesamten Helikalkreislauf des Moduls zu fördern, ist das helikale Strömungssystem in zwei Teilkreisläufe aufgeteilt worden. Beide Helikalkreise A und B werden von je einer Pumpe gespeist. Da im Experiment die geometrischen Abmessungen nicht variierbar sind, kann als Variationsparameter das Verhältnis der Helikalströmung zur Axialströmung als zusätzlicher Variationsparameter eingeführt werden. Die genaue Abstimmung der Volumenströme in den Teilkreisläufen zueinander erfolgt zum einen über die elektrische zugeführte Pumpleistung und zum anderen über die in den Hauptideisläufe eingebauten Absperrarmaturen. Bei den Absperrarmaturen (1.1, 2.1 bzw. 3.1) handelt es sich um Regelschieber der Nennweite DN100. Zur Volumenstrommessung wird je Einzelkreislauf ein elektromagnetischer Durch-

flußmesser eingesetzt. Um die in den Kreislauf durch die Pumpen und die Druckverluste in den Rohren eingebrachte Wärme abzuführen werden Natrium-Wasser-Sprühkühler eingesetzt. Die Auslegung der Kühler ist im Abschnitt 4.2.3 ausführlich beschrieben.



Betriebsinstrumente:
 Thermolemente NiCr/Ni TN
 Thermolemente Cu/CuNi TC
 Druckmesser P
 Durchflußmesser F
 Elektroden E
 Höhenstand L

- Legende:
 0 Füll- und Ablaufsysteme
 1 Natriumkreislauf Zentral
 2 Natriumkreislauf Helikal A
 3 Natriumkreislauf Helikal B
 4 Natriumhilfskreislauf
 5 Zentrale Gaseinspeisung
 6 Gassystem Lagerbehälter
 7 Gassystem Kreislauf

Abbildung 4.1: Schemazeichnung des Rohrleitungssystems der geplanten Dynamoeinrichtung am Forschungszentrum Karlsruhe mit den Rohrleitungsabmessungen und den Ventilbezeichnungen. Der Natriumhilfskreislauf ist punktiert unterlegt.

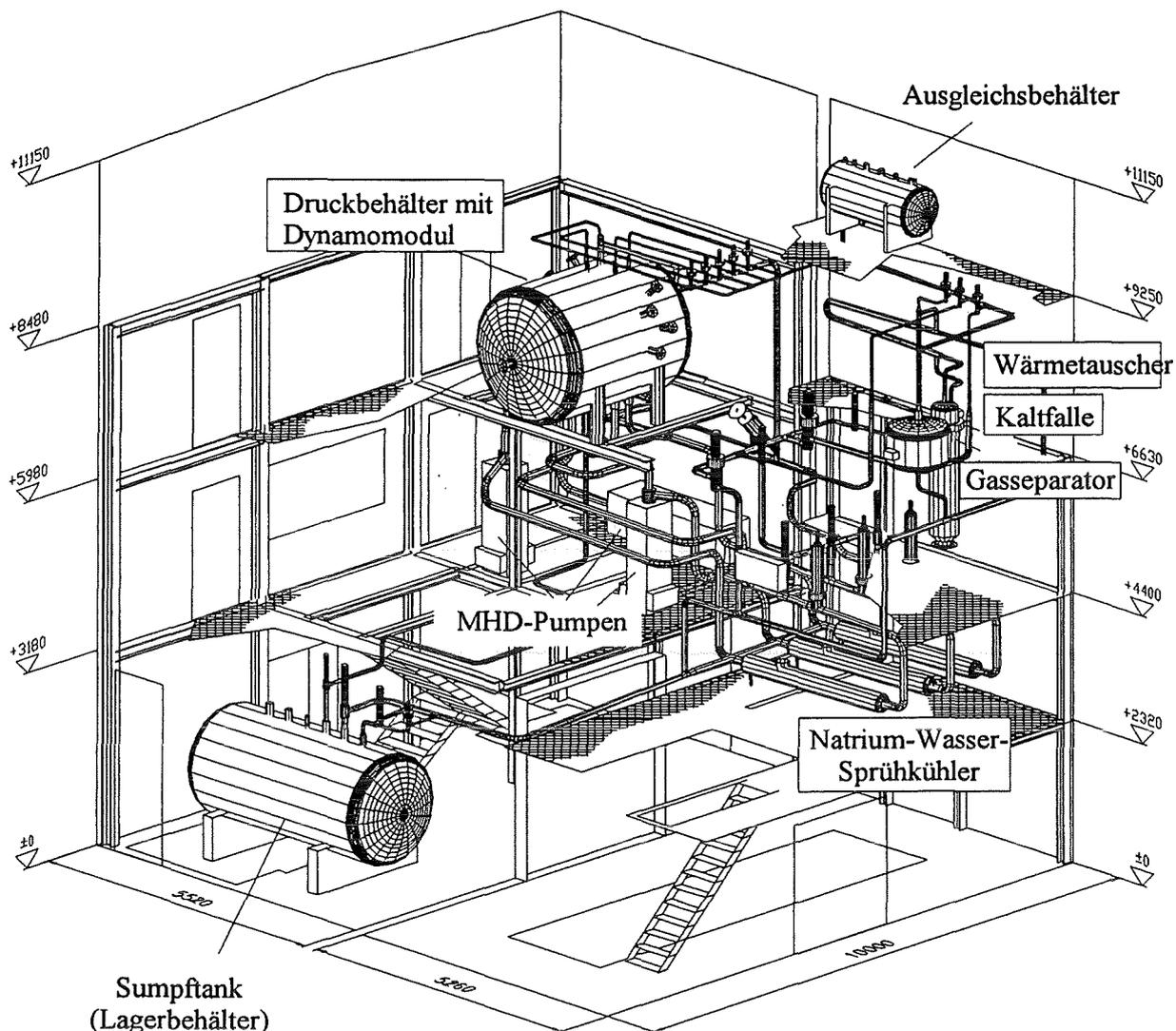


Abbildung 4.2: Räumliche Anordnung der Kreislaufkomponenten im Rohrleitungsnetz der geplanten Dynamoeinrichtung in Bau 272 in der ersten Ausbaustufe.

4.1.2 Der Natriumhilfskreislauf und das Füll- Ablaßsystem

Der Natriumhilfskreislauf ist in der Abbildung 4.2 durch die grau unterlegten Komponenten und Leitungen gekennzeichnet. Der Hilfskreislauf hat im wesentlichen fünf Aufgaben.

a.)

Reinigung des Natriums während der Benetzungsphase und möglicherweise auch während des Betriebs der Hauptkreisläufe, um konstante thermophysikalische Bedingungen während des gesamten Versuchsbetriebes zu garantieren. Dieser Reinigungsvorgang erfolgt in einer sogenannten Kaltfalle. Da in der Kaltfalle das Natrium so stark abgekühlt wird, daß die Verunreinigungen an einem Maschengitter abgeschieden werden können, ist der Kaltfalle ein Wärmetauscher vorgeschaltet. Dieser Wärmetauscher kühlt das Natrium bevor es in die Kaltfalle eintritt ab beziehungsweise heizt es nach dem Austritt aus der Kaltfalle wieder auf.

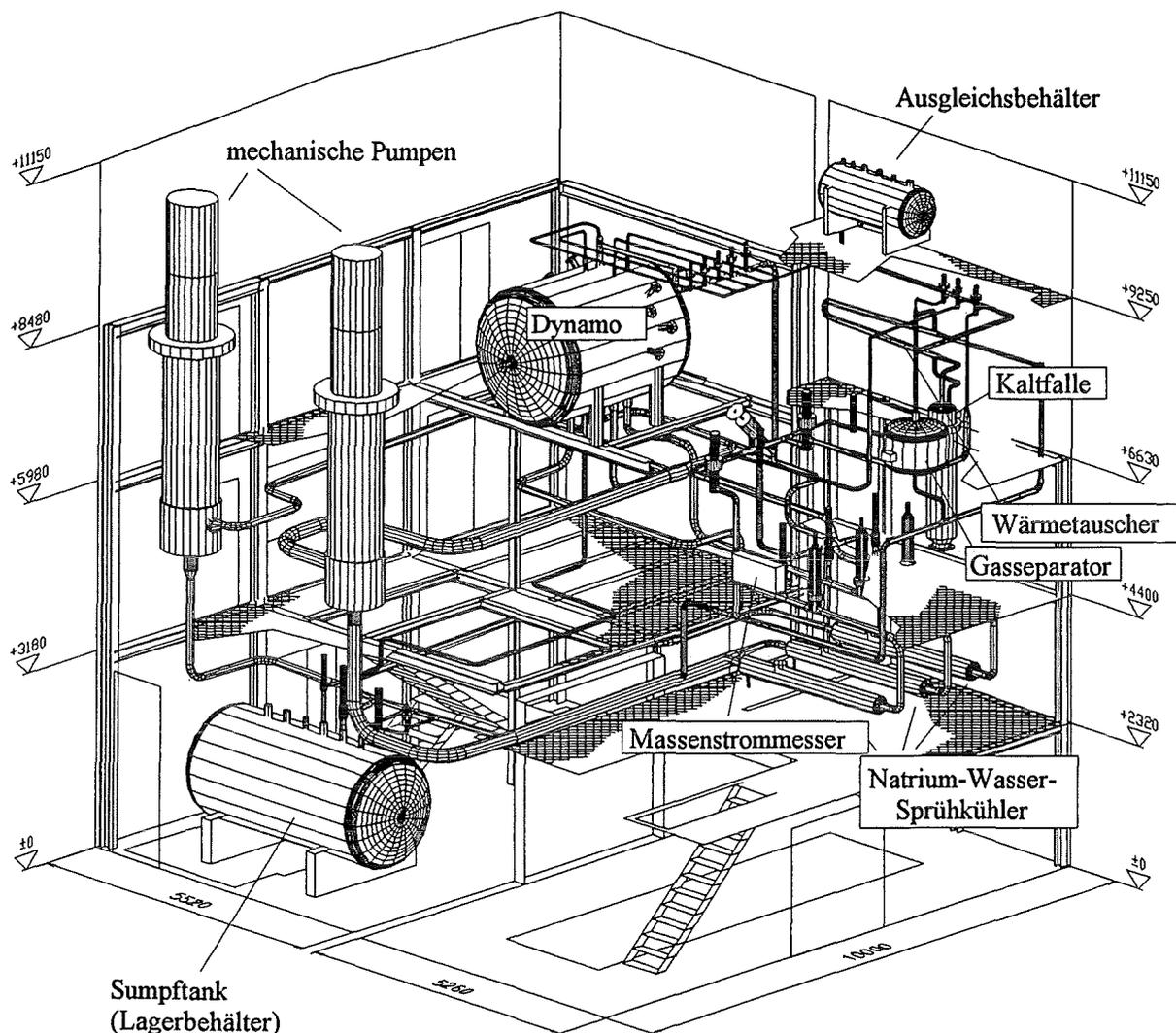


Abbildung 4.3: Räumliche Anordnung der Kreislaufkomponenten im Rohrleitungsnetz der geplanten Dynamoeinrichtung in Bau 272 in der zweiten Ausbaustufe.

b.)

Die zweite Aufgabe des Hilfskreislaufes liegt in der Gasseparation. Obwohl vorgesehen ist, den Dynamomodul gegen Vakuum zu füllen, können in der komplexen Geometrie des Moduls wie auch des Leitungssystems während des Füllvorgangs Gasblasen verbleiben. Die Existenz von Gasblasen stört jedoch die elektrische Homogenität innerhalb des Dynamomoduls empfindlich, sodaß im Gasseparator das Restgas über den Ausgleichsbehälter dem Leitungsnetz entzogen wird.

c.)

Im Hilfssystem befindet sich ebenfalls ein Absolutmassenstrommesser. Mithilfe dieses Meßgerätes, das unabhängig von der Temperatur den Massenstrom mißt, werden alle im Kreislauf eingebauten elektromagnetischen Durchflußmesser kalibriert.

d.)

Der Ausgleichsbehälter hat im wesentlichen zwei Funktionen. Beim Befüllen der Anlage gibt er nach Überschreiten eines Minimalpegels an, daß der Kreislauf gefüllt ist. Während der Benetzungsphase nimmt er das Volumen auf, das durch die Ausdehnung von Natrium bei den hohen Temperaturen zusätzlich anfällt.

e.)

Wie auf der Grafik 4.1 zu sehen ist besitzt der Hilfskreislauf keine Absperrung in seinem Rücklauf. Während des Dynamoversuchsbetriebes sind die Ventile 1.2, 2.2, 3.2 und 1.5 geschlossen, während alle Ventile 4.x geöffnet sind. Damit ist der Druck auf der Saugseite der Pumpen im Natriumhauptkreislauf überall gleich. Das Gasvolumen im Ausgleichsbehälter und das stagnierende Natrium in allen Komponenten des Hilfskreislaufs wirkt als Druckhalter auf das gesamte System. Damit werden Druckschwankungen zwischen den einzelnen Teilkreisläufen im Hauptsystem ausgeschlossen.

Für den Betrieb des Natriumhilfskreislaufs ist folgende Prozedur vorgesehen.

Es wird jeweils nur einer der Teilkreisläufe einem Kaltfallenbetrieb, einer Gasseparation oder einer Durchflußmesserkalibrierung unterzogen. Die anderen Teilkreisläufe werden dann nicht betrieben.

Ein weiteres Problem ergibt sich für den Raum innerhalb des Dynamomoduls, in dem das Natrium stagniert. Dieser Raum muß jedoch auch benetzt werden. Zu diesem Zweck erfolgt aus dem Zentralkreislauf 1 nach dem Durchlauf durch das Dynamomodul ein Abzweig dort zurück in den Modul, wo sich der Raum mit stagnierendem Natrium befindet. Durch geeignete Leitbleche im Zwickelraum wird die Strömung geführt, verläßt den Modul wieder und kann über das geöffnete Ventil 1.5 in den Hilfskreislauf und in die Kaltfalle strömen.

Das Füll- und Ablaßsystem, das in der Legende der Grafik 4.1 mit 0.x bezeichnet ist, besteht im wesentlichen aus dem Sumpftank, den beiden Füllventilen (0.2, 0.3) und dem Schnellablaßventil (0.1). Im Zusammenspiel mit dem Schutzgassystem soll eine hinreichend große Druckdifferenz erzeugt werden, damit sowohl der Hauptkreislauf wie auch der Natriumhilfskreislauf befüllt werden kann. Im Falle eines schwerwiegenden Anlagendefekts soll das Schnellablaufventil (0.1), das pneumatisch betrieben wird, das schnelle Abfließen des Fluids in den Sumpftank erlauben. Tritt ein Leck im Druckbehälter auf, so öffnet sich das Ventil 0.5, damit das austretende Natrium sicher in den Sumpftank abfließt.

4.1.3 Das Inertgassystem

Das Inertgassystem selbst besteht aus drei Segmenten. Es sind dies die zentrale Gaseinspeisung (Ventile 5.x), das Sumpftankgassystem (Ventil 6.x) und das Kreislaufgassystem (Ventile 7.x).

Als Inertgas oder Schutzgas wird das Edelgas Argon benutzt. Das Gassystem als solches erfüllt drei Aufgaben.

a.)

Schutz des Natriums in den Leitungen und den Behältern vor der Oxidation mit Sauerstoff.

b.)

Aufnahme des bei dem Gasseparationsvorganges anfallenden Gases.

c.)

Die wesentliche Aufgabe des Schutzgassystems besteht jedoch in der Erzeugung einer hinreichend großen Druckdifferenz zum Befüllen des Kreislaufs mit Natrium oder bei zu geringem Füllstand in der Anlage zum Nachfüllen von Natrium.

Beim Befüllen der Anlage werden das Gassystem 6 und 7 voneinander getrennt. Dabei wird das komplette Gassystem 7 wie auch in allen anderen Anlagenkomponenten (Natriumhauptkreislauf und Natriumhilfskreislauf) bei geschlossenen Ventilen 0.x über den Vakuumanschluß abgepumpt. Gleichzeitig wird der Schutzgasdruck im Sumpfbehalter erhöht. Durch ein Betätigen des Füllventils 0.2 beziehungsweise 0.3 kann das Natrium in den Kreislauf aufgrund des Druckunterschiedes einströmen, wobei über den Vakuumanschluß ständig das Restgas weiter abgepumpt werden muß und in den Sumpftank weiter Inertgas nachströmen sollte. Die Methode der Befüllung gegen Vakuum besitzt den Vorteil, daß komplexe Strukturen, in denen sich leicht Gasblasen halten können, wie beispielsweise Sacklöcher, gefüllt werden.

Ist der Kreislauf befüllt, läßt sich eine derartige Prozedur nicht anwenden. Das Grundprinzip bleibt jedoch erhalten. Durch eine Trennung des Systems 6 und 7 werden unterschiedliche Druckniveaus erzeugt. Durch ein Öffnen der Füllventile kann Natrium aus dem Sumpftank in den Kreislauf nachgefördert werden, bis das gewünschte Füllniveau erreicht wird.

Natriumabscheider, die sich hinter dem Sumpftank beziehungsweise hinter dem Ausgleichsbehälter befinden, verhindern eine Kontamination des Gassystems mit Natrium. Dies ist deshalb besonders wichtig, da die Gasleitungen im Gegensatz zu den Natriumleitungen nicht beheizt werden, und bei eventuellem Eindringen von Natrium in das Gassystem das Natrium bei Erstarrung die Gasleitungen versperrt.

4.2 Die Natriumhauptkreisläufe

4.2.1 Die Natriumpumpen

Für die zum Erreichen der kritischen Dynamobedingung erforderlichen hohen Natriumvolumenströme ist der Einsatz hinreichend leistungsfähiger Pumpen unabdingbar. Da die Regelbarkeit der mechanischen Pumpen insbesondere bei niedrigen Durchflußraten stark eingeschränkt ist, ist das Experiment in zwei Ausbaustufen unterteilt worden.

In der ersten Ausbaustufe sollen MHD-Pumpen, die nach dem Induktionsprinzip arbeiten, eingesetzt werden. Mit ihnen soll die kritische Volumenstrom zur Erzeugung eines homogenen Dynamos bestimmt werden und darüber hinaus die Dynamobedingung erreicht werden. Die mechanischen Pumpen, mit denen erheblich höhere Volumendurchsätze erzielbar sind, sind für die zweite Ausbaustufe vorgesehen, um nichtlineare Dynamophänomene zu untersuchen.

Betrachten wir zunächst die MHD-Induktionspumpen.

In einer Induktionspumpe wird der elektrische Strom im zu fördernden Fluid durch dasselbe Magnetfeld induziert, das danach mit diesem elektrischen Strom wechselwirkend die elektromotorische Kraft erzeugt. Damit das Magnetfeld einen Strom induziert, muß es zeitlich veränderlich sein; es wird ein magnetisches Wanderfeld eingesetzt. Das wandernde Magnetfeld hat entlang der Laufrichtung eine sinusförmige Verteilung. Durch dieses wandernde Magnetfeld wird im Fluid ein elektrischer Strom induziert, der ähnlich sinusförmig wie das Feld entlang der Laufrichtung verteilt ist. Die durch die Wechselwirkung von Strom und Magnetfeld entstehende Lorentz-Kraft zieht das Flüssigmetall entlang der Achse mit. Die Fluidtransportgeschwindigkeit ist immer kleiner als die Laufgeschwindigkeit des Magnetfeldes (, wären beide gleich, würde kein Strom induziert, und damit kein Fluid transportiert). Eine Induktionspumpe arbeitet daher immer asynchron.

Es gibt verschiedenen Arten von Induktionspumpen, zum einen flache lineare Pumpen, sogenannte FLIP-Pumpen (Flat-Linear-Induction-Pump) und zum anderen Zylinderpumpen. Das Wirkprinzip der FLIP-Pumpe wurde oben schon angesprochen. In einer Zylinderpumpe schließt sich der induzierte Strom entlang einer Kreisbahn und nicht wie in der Linearpumpe in den Kanalwänden. Deshalb ist auch kein elektrischer Kontakt zwischen dem flüssigen Metall und den Kanalwänden erforderlich. Aus diesem Grund sind Zylinderpumpen effektiver als FLIPs. Ihre Vorteile kommen daher besonders bei großen Durchflüssen zum Tragen, jedoch ist ihre Konstruktion deutlich komplizierter als die der FLIPs.

Die Kanalwände aller Induktionspumpen müssen möglichst dünn und von möglichst niedriger spezifischer elektrischer Leitfähigkeit sein, damit die Ohmschen Verluste gering bleiben. Die von ihnen erzeugte Druckdifferenz hängt nicht nur von der Netzspannung, sondern auch vom Durchfluß ab. Je mehr sich die Fluidgeschwindigkeit der Geschwindigkeit des wandernden Magnetfeldes nähert desto geringer wird die erzeugte Druckdifferenz in der Pumpe.

In der ersten Aufbaustufe werden beide Typen von Induktionspumpen eingesetzt. Der Volumenstrom im Axialkreislauf wird durch eine FLIP-Pumpe erzeugt. Die beiden Helikalkreisläufe werden von Zylinderpumpen gespeist.

Die im Experiment zum Einsatz kommende FLIP-Pumpe des Herstellers ZUR BONSEN hat eine elektrische Leistungsaufnahme von 210kW und wurde ursprünglich zur Förderung einer flüssigen Natrium-Kalium-Legierung (NaK) eingesetzt. Die hydraulischen Kenndaten der Pumpe für dieses Fluid betragen 115m³/h bei einem Druck von 4.8bar. Eine konservative

Extrapolation der Daten auf Natrium liefert, da Natrium eine höhere Leitfähigkeit aber auch eine höhere Dichte als NaK besitzt, die folgenden hydraulischen Eckdaten:

$$\dot{V} = 150\text{m}^3 / \text{h} \quad \text{bei} \quad \Delta p = 4,12\text{bar}.$$

Die Spulen in der Pumpe werden aufgrund der hohen elektrischen Speiseströme von bis zu 600 Ampère mit Luft über ein Gebläse gekühlt. Der erforderliche Kühlmitteldurchsatz beträgt dabei $6000\text{m}^3/\text{h}$ Luft.

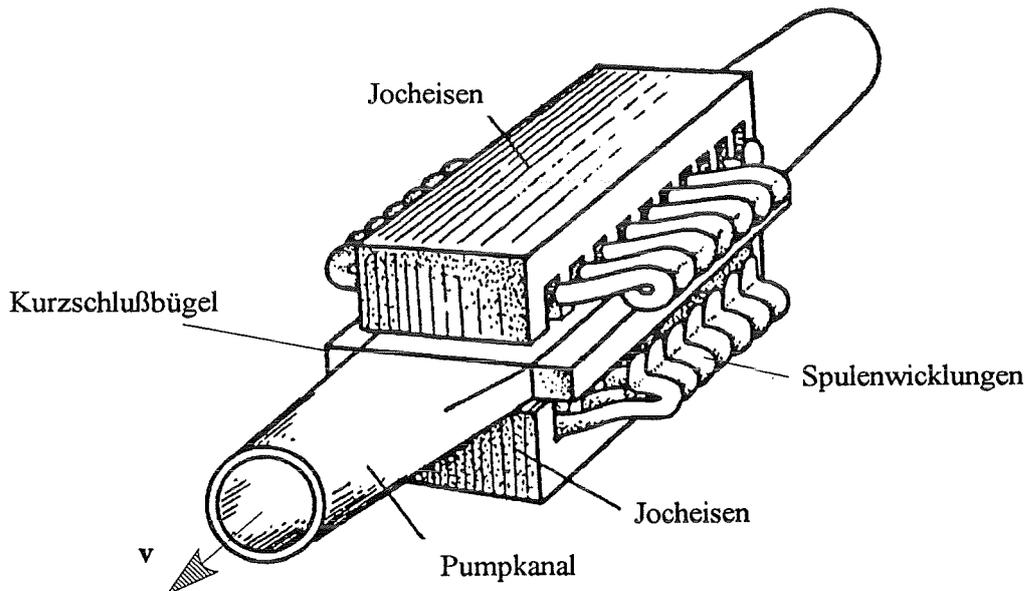


Abbildung 4.4: Schemabild einer FLIP-Pumpe, wie sie zur Förderung des Fluids im Axialkreislauf vorgesehen ist.

Bei den beiden Pumpen, die zur Speisung der Helikalkreisläufe vorgesehen sind handelt es sich um Zylinderpumpen des Herstellers SIEMENS. Aufgrund der hohen benötigten Volumenströme im Experiment mußte die Leistungsfähigkeit der Pumpen durch eine geeignete Umkonstruktion gesteigert werden. Ursprünglich waren diese Pumpen als Doppelrohrpumpen entsprechend der Skizze 4.5 konstruiert. Eine weitere Durchsatzerhöhung ließ sich bei der in der Skizze dargestellten Strömungsführung durch die sich am Kopfende der Pumpe befindliche 180° Umlenkung nicht mehr realisieren. Daher wurden beide Pumpen in ihrer Strömungsführung grundlegend umkonstruiert. Von den ursprünglichen Pumpenbauteilen wurde lediglich die innere Tragstruktur mit den Trafoblechen sowie das Magnetspulenspulensystem beibehalten. Die Zylinderpumpe in der Neukonstruktion ist nun eine Durchlaufpumpe. Das sich aus der Neukonstruktion ergebende Kennliniendiagramm mit den geänderten Spaltweiten im Kanal wurde inklusive der Strömungsverluste neu berechnet. Es ist in der Abbildung 3.5a im Zusammenhang mit dem Dynamomodul dargestellt. Bei der Neuberechnung konnten die Zu- und Abläufe in den Zylinderspalt aus numerischen Gründen nicht einbezogen werden. Bei der Berechnung wurde eine deutlich schlechtere Geschwindigkeitsverteilung zugrunde gelegt als

sie bei der Neukonstruktion zu erwarten ist, sodaß die Leistungsfähigkeiten der Pumpen konservativ abgeschätzt sind.

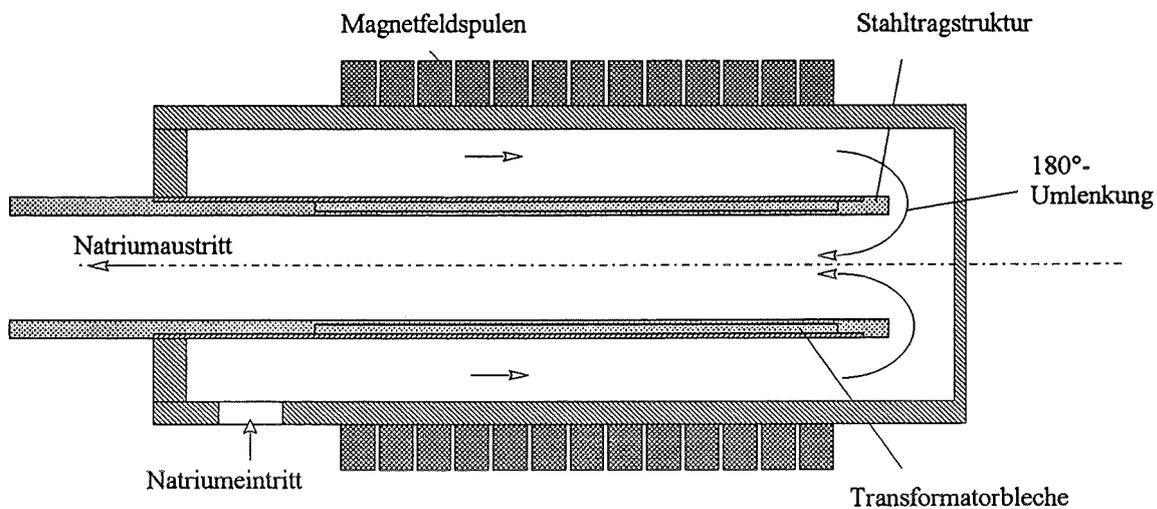


Abbildung 4.5: Skizze der ursprünglichen Strömungsführung in den SIEMENS MHD-Zylinderpumpen.

Die Neukonstruktion der MHD-Zylinderpumpen in ihren Abmessungen ist der Abbildung 4.6 zu entnehmen. Die elektrische Leistungsaufnahme der Pumpen beträgt im Ursprungszustand 176kW. Durch eine geeignete Kühlung der Spulenkörper ist eine Erhöhung der elektrischen Stromaufnahme und damit des erzeugten magnetischen Wanderfeldes möglich. Damit ergibt sich schließlich eine realisierbare elektrische Leistungsaufnahme von 209kW. Die elektrische Leistungssteigerung der Pumpen wurde bei den Auslegungsrechnungen nicht berücksichtigt, sodaß die Kennlinienwerte aus Abbildung 3.5a im Realfall höher liegen müßten. Durch den Umbau auf eine Durchlaufpumpe mußte ebenfalls der mechanische Körper, die Spulenwicklungen hält, umkonstruiert werden, da sich die Last- und Torsionsmomente auf das Pumpenrohr in ihrer Qualität geändert haben. Da das äußere Pumpenrohr extrem dünn ist (144x2mm), muß der mechanische Außenkörper den Großteil der Kräfte und Momente abfangen, sodaß die Integrität des Pumpenrohres nicht gefährdet wird. In den mechanischen Außenkörper wird ein Gebläse eingebaut, das die Spulenwicklungen während des Pumpenbetriebs kühlt.

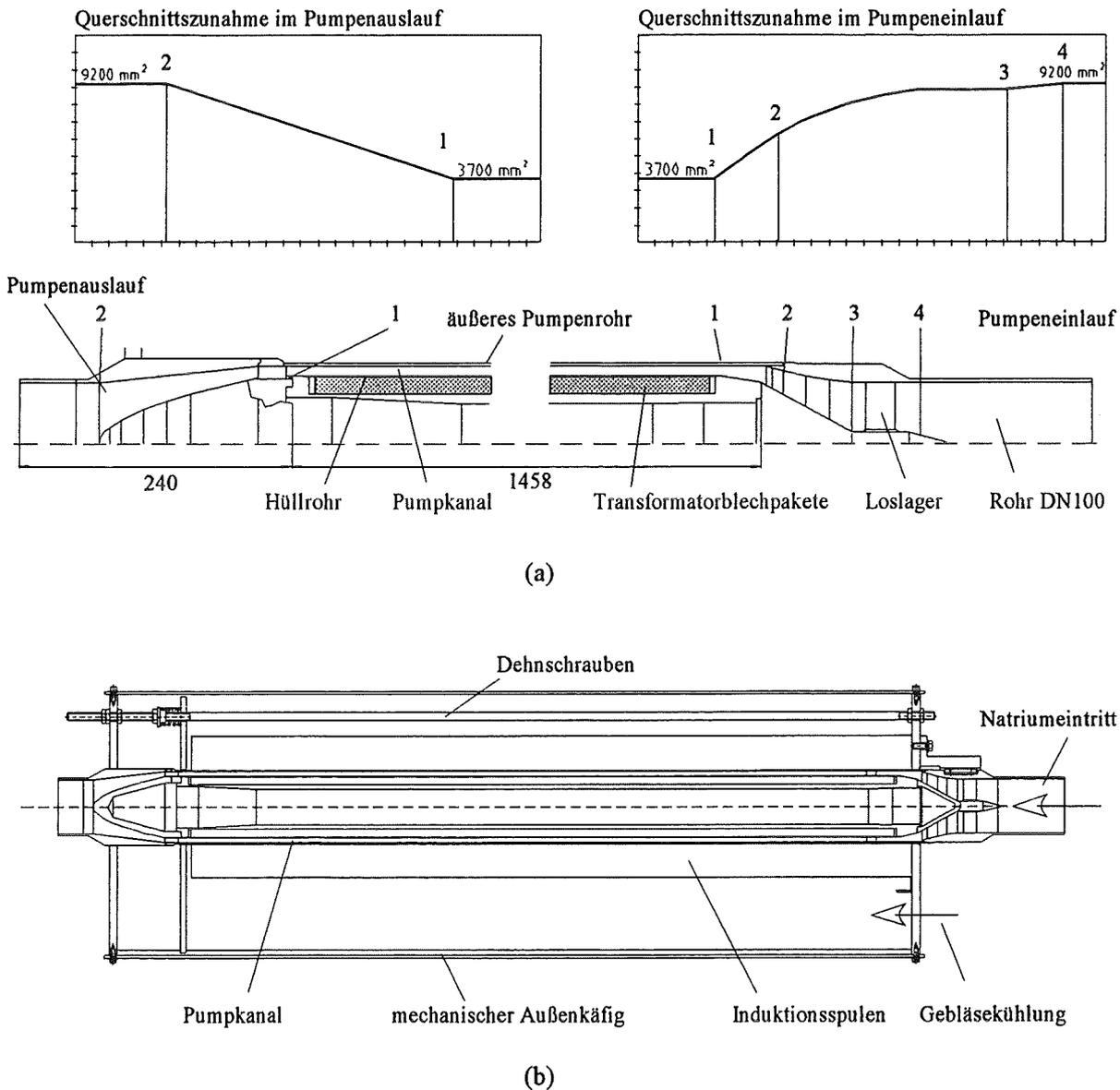


Abbildung 4.6: Technische Ausführung der MHD-Zylinderpumpen nach dem Umbau.
a.) Optimierte Querschnittszunahme im Pumpenzulauf und Pumpenausstritt. b.) Gesamtseitenansicht der Pumpe mit dem Aufbau des mechanischen Außenkörpers.

Bei den mechanischen Pumpen, die in der zweiten Ausbaustufe zum Einsatz kommen, handelt es sich um einstufige Radialkreiselpumpen der Firma KSB. Sie wurden ursprünglich als Sekundärkreislaufpumpen der kompakten natriumgekühlten Kernanlage (KNK) des Forschungszentrums Karlsruhe eingesetzt. Das hydraulische Kennliniendiagramm der Pumpen ist der Abbildung 3.5b zu entnehmen. Die effektive mechanische maximale Leistung auf der Pumpenwelle beträgt 196kW. Die gesamte Pumpe ist aus Reaktorstahl mit der Zusammensetzung 10CrMoNiNb9 10 gefertigt und hat eine höchstzulässige Betriebstemperatur von 560°C. Die Maximaldrehzahl der Pumpe ist auf 1430 U/min festgelegt und ihr Antrieb erfolgt über einen drehzahlgeregelten Gleichstrommotor. Die Pumpenanschlußnennweite beträgt DN200.

Die Rollenlager der Pumpe im kalten oberen Teil werden über eine elektrisch betriebene Druckölversorgungsanlage geschmiert. Im unteren heißen Teil der Pumpe ist ein hydrostatisches Radiallager eingebaut, in dem Natrium als Schmiermittel eingesetzt wird. Das Natrium wird hierzu aus dem Druckraum der Pumpe über Drosselbohrungen in die Lagertaschen gepreßt. Daher darf beim Betrieb eine Mindestdrehzahl nicht unterschritten werden. Die Abgrenzung des Natriumraums vom Schutzgasraum erfolgt über zwei mechanische Gleitringdichtungen. Die Außenabmessungen der Pumpen inklusive des elektrischen Antriebsmotors betragen $\varnothing 1300\text{mm} \times 5500\text{mm}$; ihr Gewicht beläuft sich auf 6.3 Tonnen. Das Betriebskennliniendiagramm bestehend aus Wirkungsgrad η , Leistung P_{mech} und förderbarer Flüssigkeitshöhe h als Funktion des Volumenstroms ist der Abbildung 4.7 zu entnehmen.

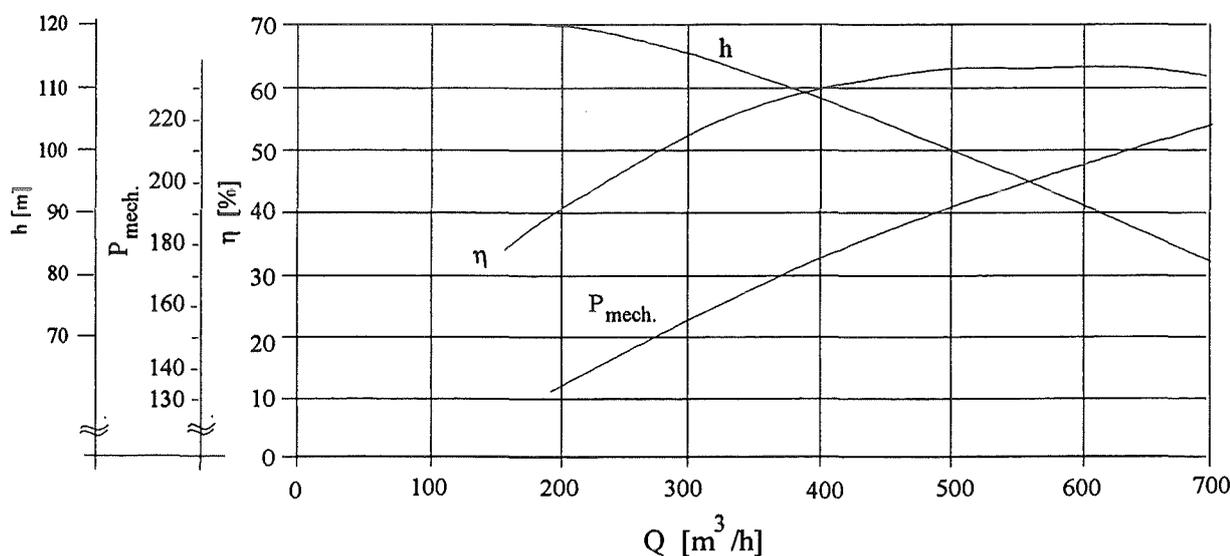


Abbildung 4.7: Kennliniendiagramm der Radialkreiselumpen der Firma KSB als Funktion des Volumenstroms.

4.2.2 Die Absperrrichtungen des Hauptkreislaufs

Bei den Absperrvorrichtungen des Hauptkreislaufs (1.1, 2.1 und 3.1) handelt es sich um Keilplattenschieber, die elektrisch über einen Stellmotor von der Schaltwarte aus betrieben werden. Die Keilplattenschieber sind als Regelschieber ausgeführt. Sie sind aus 10CrMoNiNb9 10 Reaktorstahl gefertigt und haben einen zulässigen Betriebsdruck von 13 bar. Die zulässige Betriebstemperatur beträgt 545°C . Ihre Nennweite ist DN100. Die Schieberarmatur hat eine Außenabmessung von $\varnothing 350\text{mm} \times 1300\text{mm}$ und ihr Gewicht beträgt 120kg. Die Trennung zwischen dem Natriumraum und der Umgebung erfolgt über zwei redundante Vorrichtungen. Die erste Barriere zwischen dem Natrium und dem Außenraum bildet eine Sicherheitsstopfbuchse bestehend aus 2x2 Graphitringen. Nach den ersten zwei Graphitringen befindet sich ein weiterer Ring, der an das Schutzgas angeschlossen ist und somit als Sperraum wirkt.

Nach diesem Sperraum schließen sich die beiden anderen Graphitringe an. Durch ein oftmaliges Betätigen des Schiebers könnte das Natrium diese Barriere überwinden und an der Schieberwelle weiter Richtung Außenraum kriechen. Daher schließt sich an die Stopfbuchsenpakete ein weiterer enger Ringspalt an, der nicht beheizt ist. Diesen Ringspaltraum umschließt eine Schutzgasatmosphäre. Im nichtbeheizten Ringspalt friert das Natrium aus und wirkt damit selbst als Dichtmaterial. Die Verschiebung der Welle, die beim Betätigen des Ventils eintritt, bricht das gefrorene Natrium in gewissem Maß und erfordert ein hinreichend großes Moment des Ventilantriebs. Diese Art der Gefrierstreckentechnik hat sich im Bereich natriumgekühlter Reaktoren jedoch jahrzehntelang bewährt.

4.2.3 Die Natrium-Wasser-Kühler

Aufgrund des großen Leistungseintrages der Pumpen, der im Maximalfall in jedem Teilkreislauf den Wert von ca. 100kW betragen wird ein leistungsfähiges Kühlsystem benötigt, um die Temperatur während des Versuchsbetriebes möglichst konstant zu halten. Aus der Abbildung 3.1 wird ersichtlich, daß bei einer steigenden Temperatur die magnetische Diffusivität beständig ansteigt. Da die magnetische Diffusivität jedoch in die Bedingung für den kritischen Volumenstrom quadratisch eingeht, erfordern schon geringe Temperatursteigerungen während des Versuches einen drastisch höheren Volumenstrom, mit dem dann die Temperatursteigerung weiter zunimmt. Um also einen stationären Versuchsbetrieb zu gewährleisten, müssen die Kühler jedes Teilkreislaufs jederzeit in der Lage sein, die in das Fluid eingebrachte Wärme abzuführen.

An die Kühler werden noch weitere, deutlich kritischere Anforderungen gestellt.

Da das in dem Experiment eingesetzte Natriuminventar aus sicherheitstechnischen Aspekten relativ klein ist und lediglich ca. 8m³ beträgt, muß die Kühlung bei großen Fluidgeschwindigkeiten von bis zu 10m/s hinreichend effektiv sein. Das Gesamtvolumen des Arbeitsfluides wird bei maximalem Durchfluß pro Minute sechs mal (!) umgewälzt.

Eine mindestens ebenso kritische Anforderung ist, daß die Kühlung lediglich über eine kleine Temperaturdifferenz bei gleichzeitig großer Wärmeabfuhr aus dem Fluid erfolgen kann. Da für den Kreislauf eine Natriumbetriebstemperatur von 120°-130°C vorgesehen ist, und Natrium einen Schmelzpunkt von 97.83°C hat, ist die zur Kühlung zur Verfügung stehende Temperaturdifferenz auf max. 20°-30° eingeschränkt. Diese Temperaturdifferenz verringert sich noch weiter, da das Strukturmaterial der Kühlrohre aus rostfreiem Stahl, der eine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{st}=15W/(mK)$ besitzt, besteht. Darüber hinaus müssen die Stahlrohre mindestens dem maximalen Kreislaufdruck von 12bar standhalten. Bei einem Rohrdurchmesser von DN100 bedeutet dies eine Rohrwandstärke von 3 mm. Damit ist die zur Verfügung stehende Temperaturdifferenz auf einen Wert von maximal 12-16°C geschrumpft. Da bereits der hydraulische Druckverlust in den Drallerzeugern die Leistungsfähigkeit der Anlage einschränkt, soll nach Möglichkeit der Druckabfall in den Kühlern möglichst klein sein. Dies bedeutet aber, daß die Wärmeübertragungsfläche ebenfalls sehr klein sein sollte.

Aufgrund dieses Anforderungsbildes an den Kühler, große Wärmeabfuhrleistungsdichte bei kompakten äußeren Abmessungen und einer kleinen zur Verfügung stehenden Temperaturdifferenz, kommen nach der Tabelle 4.1 lediglich Verdampfungskühler in Frage.

Da als Medium Wasser eine der höchsten Verdampfungswärmen aufweist, wird als Kühler ein Wasser-Verdampfungskühler gewählt. Dabei soll vorgewärmtes Wasser auf ein gerades, natriumdurchströmtes Rohr aufgesprüht werden. Der entstehende Wasserdampf soll über eine Steigleitung in einen Kondensator geführt werden. Das bei dem Sprühvorgang anfallende überschüssige Wasser muß aus den Kühlern gesichert ablaufen.

Bauart	Rohrbündel Gaskühlung	Rohrbündel Fluidkühlung	Doppelrohrwärmetauscher	Kondensator Verdampfer
k -Wert [W/(m ² K)]	5-35	300-600	300-1000	1900-4200

Tabelle 4.1: Wärmetauscherbauarten und die Bandbreite des Wärmeübertragungsbeiwertes k aus VDI-Wärmeatlas, 4. Auflage, 1984.

Im weiteren werden die Grundlagen für die Kühlerauslegung aufgezeigt. Ziel ist die Festlegung der erforderlichen Kühlerlänge. Mit der Festlegung der Kühlerdaten, werden ebenfalls die Eckdaten des in Abschnitt 4.3.5 beschriebenen Wasser-Dampf-Systems festgelegt. Die geometrische Form des Verdampfungskühlers entspricht der eines Doppelrohrwärmetauschers. In das Außenrohr werden Wasserdüsen eingeschraubt, die vorgewärmtes Wasser von ca. 70°-80°C auf ein gerades, natriumdurchströmtes Rohr aufsprühen. Als vereinfachte Wärmeübertragungsgeometrie kann man sich das in der Abbildung 4.8 gezeigte Rohr vorstellen. In einem Stahlrohr der Dicke 3.2mm strömt ein Fluid mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} . Bei $x=0$ tritt das Fluid mit der Temperatur T_0 in den Wärmeübertrager ein.

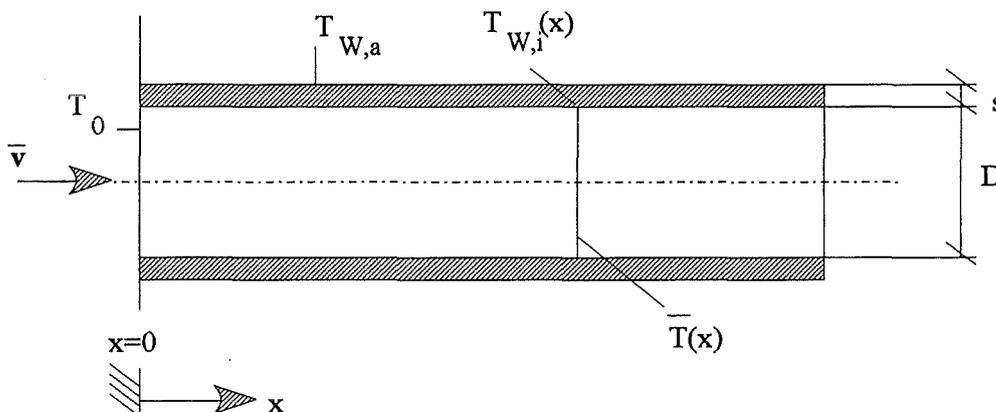


Abbildung 4.8: Schemabild des Wasser-Natrium-Verdampfungskühlers.

Bei der Auslegung sind nun mehrere Wärmeübertragungsprozesse gekoppelt. Nehmen wir zunächst eine konstante Temperatur im Verdampfer an, bsp. $T_{w,a}=100^\circ\text{C}$, bei ein Druck von

$p=1000\text{mbar}$. Zunächst liegt im Stahlrohr ein reiner Wärmeleitungsvorgang vor, der mit der Gleichung 4.1a beschrieben wird (1. Fourier'sche Gleichung). Daran schließt sich ein Wärmeübertragungsvorgang an einer fest-flüssig Grenzfläche an, der durch die Gleichung 4.1b beschrieben wird. Unbekannt in der Gleichung 4.1b ist die auftretende Temperaturdifferenz. Der lokale Wärmeübertragungskoeffizient $\alpha(x)$, der durch die Gleichung 4.1c beschrieben wird, kann aus einer im VDI-Wärmeatlas angegebenen Korrelation berechnet werden, siehe hierzu Gleichung 4.1d [VDI, 1984]. Der lokal abgeführte Wärmestrom $q(x)$ entspricht der Abnahme der Wärmeenergie im Fluid.

$$q(x) = \lambda_{st} \frac{(T_{W,a} - T_{W,i}(x))}{s_0} ;$$

$$q(x) = \alpha(x) (T_{W,i}(x) - \bar{T}(x)) \quad \text{mit}$$

$$\alpha(x) = \frac{Nu(x) \lambda_{Na}}{D} \quad \text{wobei}$$

$$Nu(x) = \frac{\zeta}{8} (Re - 1000) Pr \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{1}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{\zeta}{8}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \right] ;$$

$$\text{für } 2300 < Re < 10^6; 0.1 < Pr < 10^4; 0 < \frac{d}{l} < 1$$

$$\text{und } \zeta = [1.82 \lg(Re) - 1.64]^{-2}.$$

(4.1a-e)

λ_{st} bzw. λ_{Na} beschreiben die Wärmeleitfähigkeiten des Stahlrohrs und des Fluids Natrium. $Nu(x)$ ist die lokale Nusselt-Zahl und ζ der Druckverlustkoeffizient der Strömung im Rohr. Alle Gleichungen 4.1 lassen sich zu der Relation 4.2 zusammenfassen. Die Gleichung läßt sich jedoch nur numerisch lösen.

$$\bar{T}(x) - T_0 = \int_{x=0}^{x=l} \frac{\alpha(x) (T_{W,i}(x) - \bar{T}(x))}{\dot{m} c_p} \pi D dx \quad (4.2)$$

c_p ist die Wärmekapazität des Fluids und \dot{m} der durch das Rohr mit dem Durchmesser D und der Wandstärke s_0 strömende Massenstrom.

Aufgrund der räumlichen Beschränktheit der Anlage läßt sich pro Einzelkreislauf lediglich ein Kühler der Länge $l=3.3$ m bauen. Bei einem Pumpenwirkungsgrad von 64% und einem Volumenstrom von $250\text{m}^3/\text{h}$ bei einem Druckabfall von 9bar im Einzelkreislauf wird eine Wärme von 97.6kW in das Fluid eingebracht. Dies entspricht einem Wärmestrom von $q=87.4\text{kW/m}^2$. Der dabei verdampfende Wasserstrom beträgt 155.74 kg/h je Kühler. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Stahl ergibt sich ein großer Temperatursprung über die Stahlrohrwand und es zeigt sich schnell, daß für den Normdruckbetrieb $p=1\text{bar}$ bei

$T_{W,a}=100^{\circ}\text{C}$ lediglich eine Wärmeabfuhr von 44kW möglich ist. Bei Erniedrigung der Verdampferraumtemperatur, die über die Wahl des Druckniveaus sich relativ einfach realisieren, ist bei einer Verdampferraumtemperatur von $T_{W,a}=85^{\circ}\text{C}$ ($p_{\text{Kondensator}}=0.5\text{bar}$) eine Wärmeabfuhr von 97.2kW erzielbar. Durch eine geschickte Wahl der Kondensatorbedingungen läßt sich ein isothermer Betrieb in jedem Teilkreislauf realisieren.

Für die zuletzt geschilderten Bedingungen ist der Verlauf der mittleren Fluidtemperatur, der lokalen Nusseltzahl und des lokalen Wärmestroms über der Kühlerlänge in der Abbildung 4.9 dargestellt.

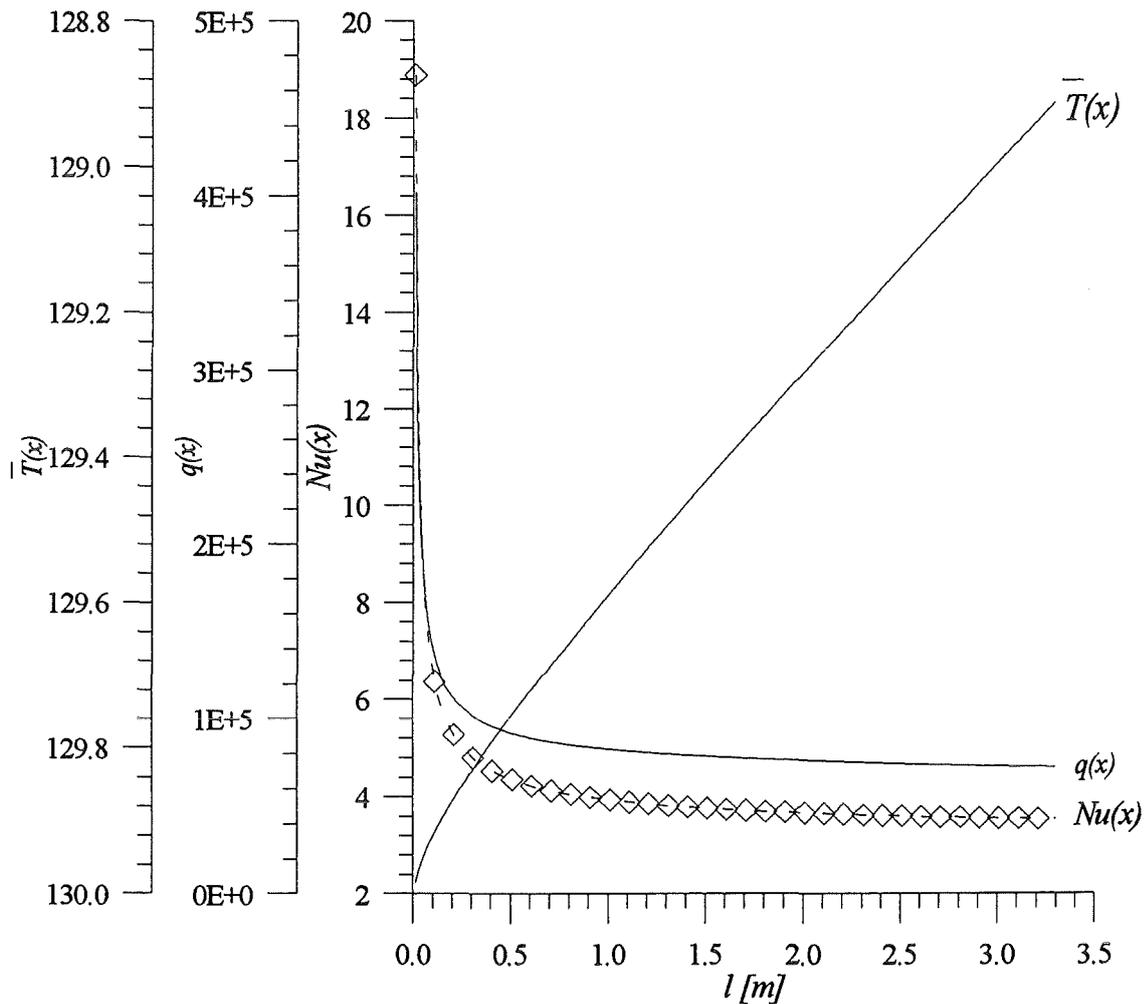


Abbildung 4.9: Mittlere Fluidtemperatur $\bar{T}(x)$, lokale Nusseltzahl und lokaler Wandwärmestrom $q(x)$ als Funktion der Lauflänge des Kühlers bei folgenden Eintrittsbedingungen in den Natrium-Wasser-Sprühkühler: $T_{W,a}=85^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{Kondensator}}=0.52\text{bar}$; $T_0=130^{\circ}\text{C}$; $\dot{V}_{\text{Natrium}}=250\text{m}^3/\text{h}$; $\Delta p=9\text{bar}$.

Die technische Ausführung des Sprühkühler ist in der Abbildung 4.10 schematisch dargestellt.

Natürlich ergeben sich beim Einsatz von Wasser in einem Natriumkreislaufsystem zusätzliche Anforderungen an die Anlagensicherheit. Ungewöhnlich ist jedoch der Einsatz von

Wasserkühlungen in Natriumkreislaufsystemen nicht, da auch in Natriumbrutreaktoren Wasser als Wärmeübertragungsmedium eingesetzt worden ist.

Die sich durch den Einsatz der Sprühkühler ergebenden sicherheitsrelevanten Probleme werden in Abschnitt 4.3.5 Wasser-Dampf-System und dem Kapitel 4.8 Sicherheitseinrichtungen beleuchtet.

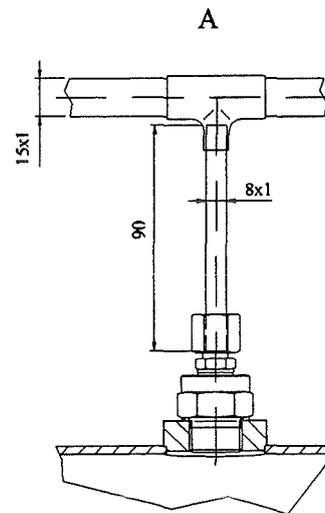
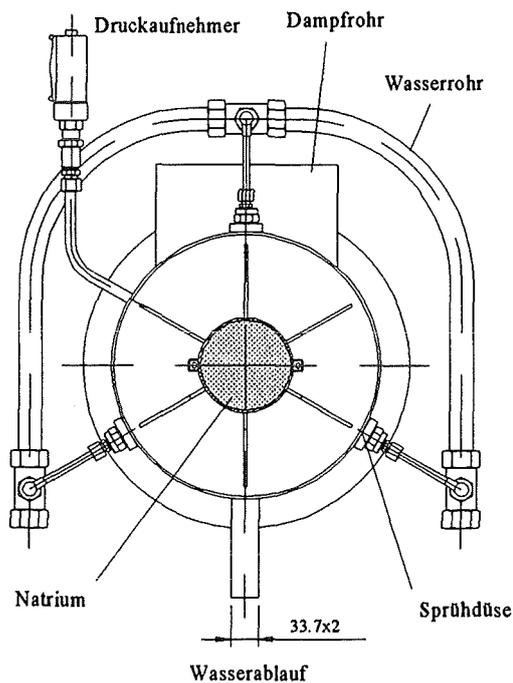
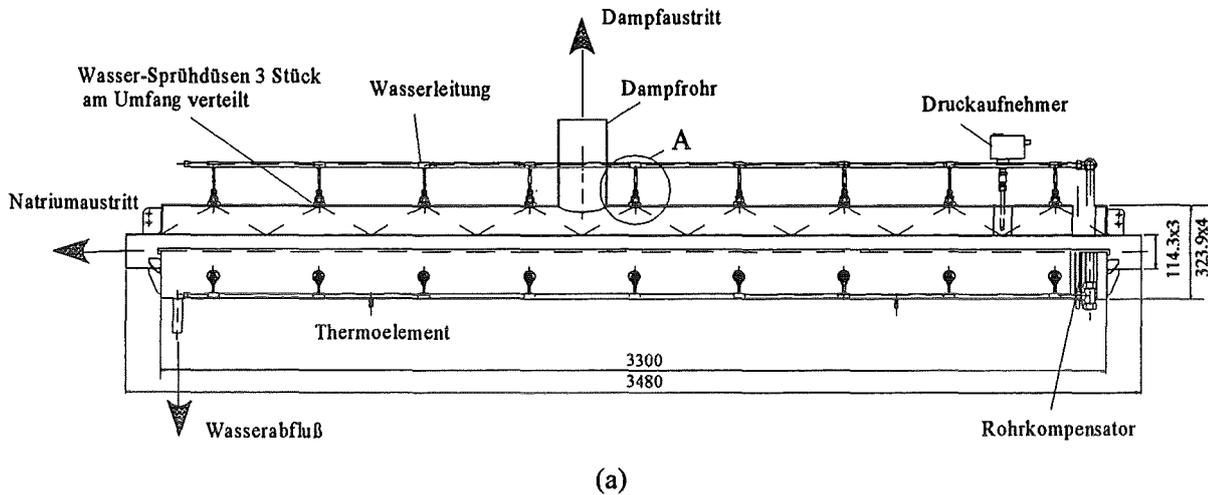


Abbildung 4.10: Schemaskizze des für das Dynamoexperiment vorgesehenen Natrium-Wasser-Sprühkühlers. a.) Schnitt der Seitenansicht. b.) Frontansicht. c.) Einzelansicht der Wassersprühdüse in den Verdampferraum.

Nach der thermohydraulischen Auslegung des Kühlers ergeben sich weitere technische Probleme.

Im wesentlichen sind zwei Problemkreise zu lösen.

1. Aufsprühen des Wassers so, daß die natriumführenden Rohre ständig wasserbedeckt sind und eine möglichst geringe Düsenanzahl gebraucht wird. Gleichzeitig darf die Dampfaustrittsgeschwindigkeit nicht so groß werden, daß der Wassernebel vom Dampfstrom weggetragen wird.
2. Ebenso muß der Wasseraustritt so groß sein, daß das Wasserinventar im Doppelrohr möglichst klein bleibt, damit im Falle eines Natriumlecks, die Unfallfolgen in einem überschaubaren Rahmen bleiben.

Eine vollständige Bedeckung der Natriumrohre mit einem Wasserfilm wird durch Vollkegeldüsen mit einem Sprühwinkel von 120° gewährleistet. Die kommerziell erwerblichen Sprühdüsen, die diese Aufgabe erfüllen, benötigen jedoch bei einem Druckabfall von 0.5bar einen Volumenstrom von 0.36l/min, ohne daß der Strahl in sich zusammenfällt. Bei einer Anordnung von 9 Sprühdüsenreihen mit je drei Düsen pro Reihe, ist der Wasserverbrauch deutlich größer als er zur Kühlung benötigt wird (; es werden lediglich 2.7l/min benötigt). Damit muß der Wasserablauf so dimensioniert werden, daß das überschüssige Wasser sicher abläuft. Das im Kühler entstehende Dampfvolumen von ca. $200\text{m}^3/\text{h}$ ergibt in einer Dampfleitung mit dem Durchmesser DN150 eine Dampfgeschwindigkeit von 2.7-3.0m/s. Durch die zentrale Unterbringung des Dampfrohres im Kühler besteht lediglich in der Nähe des Dampfrohres die Gefahr daß der Wassernebel durch den entstehenden Dampf weggerissen wird. Da aber zum einen die Geschwindigkeit der zersprühten Wasser deutlich über der Dampfgeschwindigkeit in jedem Rohrabschnitt liegt und zum anderen der Großteil der Wärme aus dem Natrium im Anfangsbereich des Kühlers abgeführt wird, besteht keinerlei Auswirkung auf die Funktionsfähigkeit des Kühlers.

Damit ein Ablauf des Kühlwassers allein durch die Erdschwere erfolgen kann, wird der gesamte Kühler unter einer leichten Neigung gegenüber der Horizontalen eingebaut. Da im Wasserrücklaufleitungen aus dem Kühler aus sicherheitstechnischen Aspekten einige Einbauten vorgenommen werden müssen (siehe Kapitel 4.3.5), muß der Ablaufquerschnitt aus dem Behälter so groß gewählt, daß alleine durch die aus der Erdschwere resultierende Druckdifferenz zum Wasservorratsbehälter alles Wasser ablaufen kann. Bei der Annahme einer geodätischen Höhe von 1m und diverser Einbauten wird ein Ablaufquerschnitt von $d=17\text{mm}$ benötigt. Für die technische Ausführung wurde ein Ablaufrohr der Größe DN30 gewählt. Damit ist in jedem Fall ein sicheres Abfließen gewährleistet. Eine detaillierte Berechnung des notwendigen Ablaufquerschnittes ist dem Anhang C3 zu entnehmen.

4.2.4 Der Druckbehälter

Der Druckbehälter ist aus rostfreiem Stahl der Qualität 1.4541 gefertigt und ist in der Lage sowohl Vakuum als auch einem Überdruck von 3bar bei einer maximalen zulässigen Temperatur von 350°C zu ertragen. Er besitzt an jeder Kopfseite einen Flansch, der über 88

Halteschrauben mit dem zylindrischen Körper verschraubbar ist. Das Innenvolumen des Druckbehälters beträgt 11m^3 .

Die Zuführung und Ableitung der drei Natriumhauptkreisläufe erfolgt auf der Behälterunterseite. Die Verbindung zwischen den entsprechenden Anschlußleitungen und der Behälterwand erfolgt über zwischengeschweißte Kompensatoren. Damit können unterschiedliche Wärmedehnungen von Rohrleitungen, Dynamomodul und Behälter kompensiert werden. Die Ableitung der Füllleitungen erfolgt auf der Oberseite des Behälters. Das Dynamomodul liegt auf zwei in dem Druckbehälter eingeschweißten Schienen. Über zwei an einem der Klöpperböden angebrachten Schaugläsern kann eine Sichtprüfung erfolgen. Der Druckbehälter verfügt darüber hinaus über eine Vielzahl von weiteren Flanschen, in denen beispielsweise die elektrische Leistungsversorgung der Heizungen, Meßwerterfassungskabel etc. durchgeführt werden können. Eine Ansicht des Druckbehälters ist in der Abbildung 4.11 zu sehen.

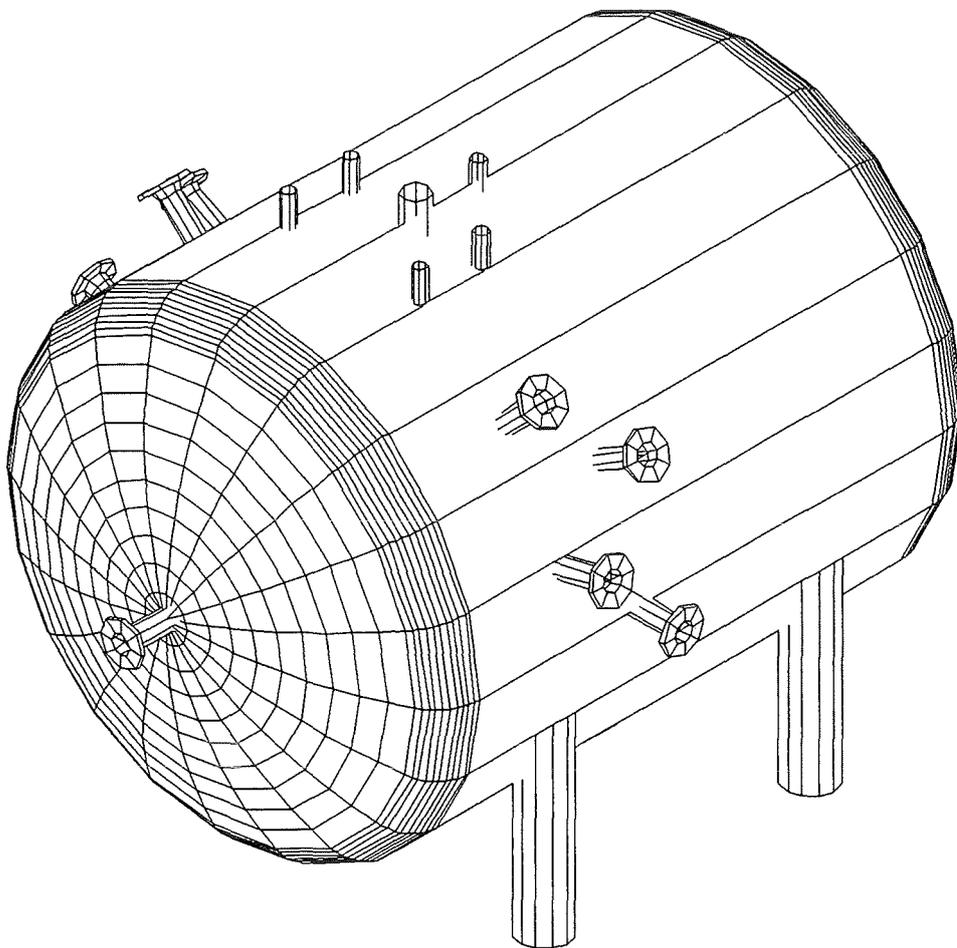


Abbildung 4.11: Dreidimensionale Schemaskizze des Druckbehälters, in dem sich der Dynamomodul befindet.

4.3 Der Natriumhilfskreislauf

4.3.1 Der Gasseparator

Der Gasseparator ist aus rostfreiem Edelstahl der Werkstoffqualität 1.4541 gefertigt und faßt ein Natriumvolumen von 500l. Der maximale Betriebsüberdruck ist auf 6bar bei einer Temperatur von 350°C begrenzt.

Der Gasseparator hat wie schon im vorangegangenen angesprochen die Aufgabe, eventuell im Kreislauf im Natrium transportierte Gasblasen aus dem Fluid abzuscheiden. Diese Abscheidung ist jedoch nur dann möglich, wenn die Auftriebsgeschwindigkeit der Gasblasen größer ist als die Fluidgeschwindigkeit. Hierzu muß die Strömungsgeschwindigkeit in einem Behälter so stark herabgesetzt werden, daß die Aufstiegs geschwindigkeit der Gasblasen größer wird als die Transprotgeschwindigkeit des Fluids. Technisch erfolgt die Herabsetzung der Fluidgeschwindigkeit durch Zunahme des Strömungsquerschnitts. Im Gasseparator wird dies, wie in der Schemaskizze 4.12b angezeigt, realisiert. Durch die drastische Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit können die Gasblasen aufsteigen und sich in der Glocke sammeln. Durch das Einbringen einer Glocke reißt die Strömung beim Verlassen der Glocke ab und es bilden sich Wirbel, die eine transport der Gasblasen in Richtung der Glockenspitze begünstigen. Die Rohrleitung der Glocke ist direkt mit dem Ausgleichsbehälter verbunden. In dem für das Laborexperiment vorgesehenen Gasseparator, der in den Hauptabmessungen in Abbildung 4.12a zu sehen ist, wird die Fluidgeschwindigkeit im Absetzraum um den Faktor 60 erniedrigt. Da aber die Gasaufstiegsgeschwindigkeit sehr klein ist, ist eine Gasseparation lediglich bei Volumenströmen unter 40m³/h durch den Gasseparator möglich.

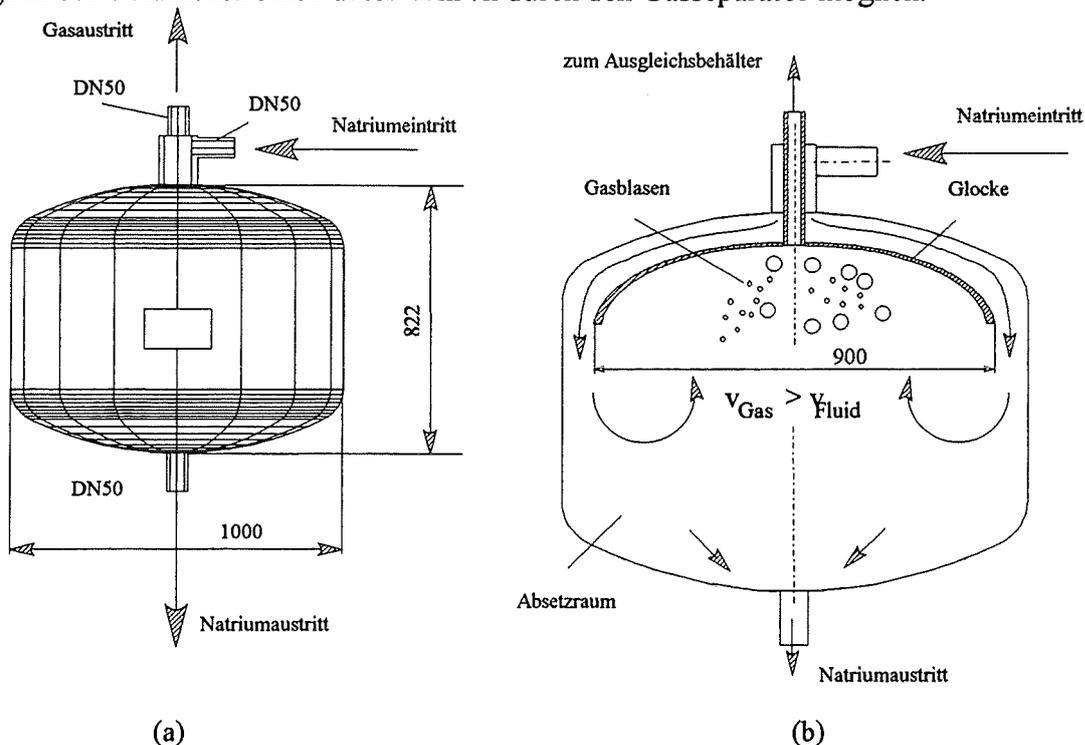


Abbildung 4.12: a.) Außenabmessungen und Rohranschlüsse des Gasseparators.
b.) Schemaskizze zum "Innenleben" des Gasseparators.

4.3.2 Die Kaltfalle und der Wärmetauscher

In der Kaltfalle erfolgt eine Reinigung des Natriums von im Fluid gelösten Oxiden und anderen Verunreinigungen. Die größte Menge an Verunreinigungen fällt beim ersten Betrieb der Versuchsanlage an, da dort die riesigen Stahloberflächen des Leitungsnetzes wie auch der anderen Kreislaufkomponenten benetzt werden müssen. Das Herauslösen der Oxide und Legierungsbestandteile aus den Stahloberflächen ist ein diffusionsgesteuerter Prozeß und läuft daher umso schneller ab, je höher die Temperatur des Natriums ist. Daher erfolgt die Benetzung der Leitungen und Komponenten bei Temperaturen bis 370°C.

Wie schon im Abschnitt 3.1 erläutert, erfolgt der Abscheidungsprozeß der Verunreinigungen dadurch, daß das Natrium in der Kaltfalle unter die Sättigungstemperatur abgekühlt wird. Wird die Sättigungskonzentration bei der Temperaturabsenkung überschritten, so fallen die Verunreinigungen aus. Damit die Verunreinigungen nicht von dem abfließenden Fluidstrom mitgerissen werden, müssen sie herausgefiltert werden. Eine effektive Filterung wird durch das Einbringen großer Filterflächen erreicht. Technisch geschieht dies dadurch, daß Drahtgewebepackungen in den zylindrischen Bereich eingebracht werden. Die Packungsdichte des Drahtgewebes darf jedoch nicht zu groß sein, damit die Pumpleistungen, die erforderlich sind, um das Fluid durch die Kaltfalle zu fördern, nicht unrealistisch groß werden.

Um ein schlagartiges Ausfällen der Verunreinigungen zu vermeiden, und eine gleichmäßige Abscheidung über der gesamten Kaltfallenlänge zu erzielen, erfolgt eine graduelle Abkühlung über der Laufrichtung x , siehe Abbildung 4.13. Hierzu wird ein im Durchsatz regelbares Gebläse am unteren Kaltfallende angebracht. Der Luftstrom wird am zylindrischen Außenkörper der Kaltfalle vorbeigeführt.

Damit eine effektive Kühlung des Fluids erfolgt, ist die Kaltfalle als Gegenstromwärmetauscher ausgeführt. Aus thermodynamischen Gründen ist der Kaltfalle zumeist ein Wärmetauscher (Rekuperator) vorgeschaltet. Dies geschieht aus folgenden Gesichtspunkten. Bei der Benetzung werden hohe Temperaturen benötigt; aus der Kaltfalle tritt das Fluid jedoch kalt aus. Wird es hingegen über den Wärmetauscher geführt, kann es über das der Kaltfalle zugeführte heiße Fluid wieder aufgewärmt werden und es werden keine zu großen Heizleistungen auf den Rohrheizkörpern benötigt. Umgekehrt wird das der Kaltfalle zuströmende Fluid im Wärmetauscher etwas abgekühlt. Der Einsatz eines Wärmetauschers vor der Kaltfalle verfolgt also das Ziel, allzu große Wärmesenken im Kreislauf zu vermeiden. Damit wird die erforderliche Heizleistung auf den Rohrheizkörpern wie auch die Materialbelastung minimiert.

Die technische Ausführung der Kaltfalle für das Dynamoexperiment ist in der Abbildung 4.13 schematisch dargestellt. Sie ist aus rostfreiem Stahl 1.4541 gefertigt, faßt ein Natriumvolumen von 245l und verfügt über 5 Drahtgewebepackungen. Der mechanische Körper hat eine

Druckfestigkeit von 6bar bei einer Temperatur von maximal 600°C. Die Anschlußrohre am Eintritt und Austritt haben die Größe DN50. Auf die Kaltfalle mit ihren Daten abgestimmt ist der entsprechende Wärmetauscher, der als Doppelrohrgegenstromwärmetauscher ausgeführt ist. Er ist in der Abbildung 4.13 schematisch abgebildet.

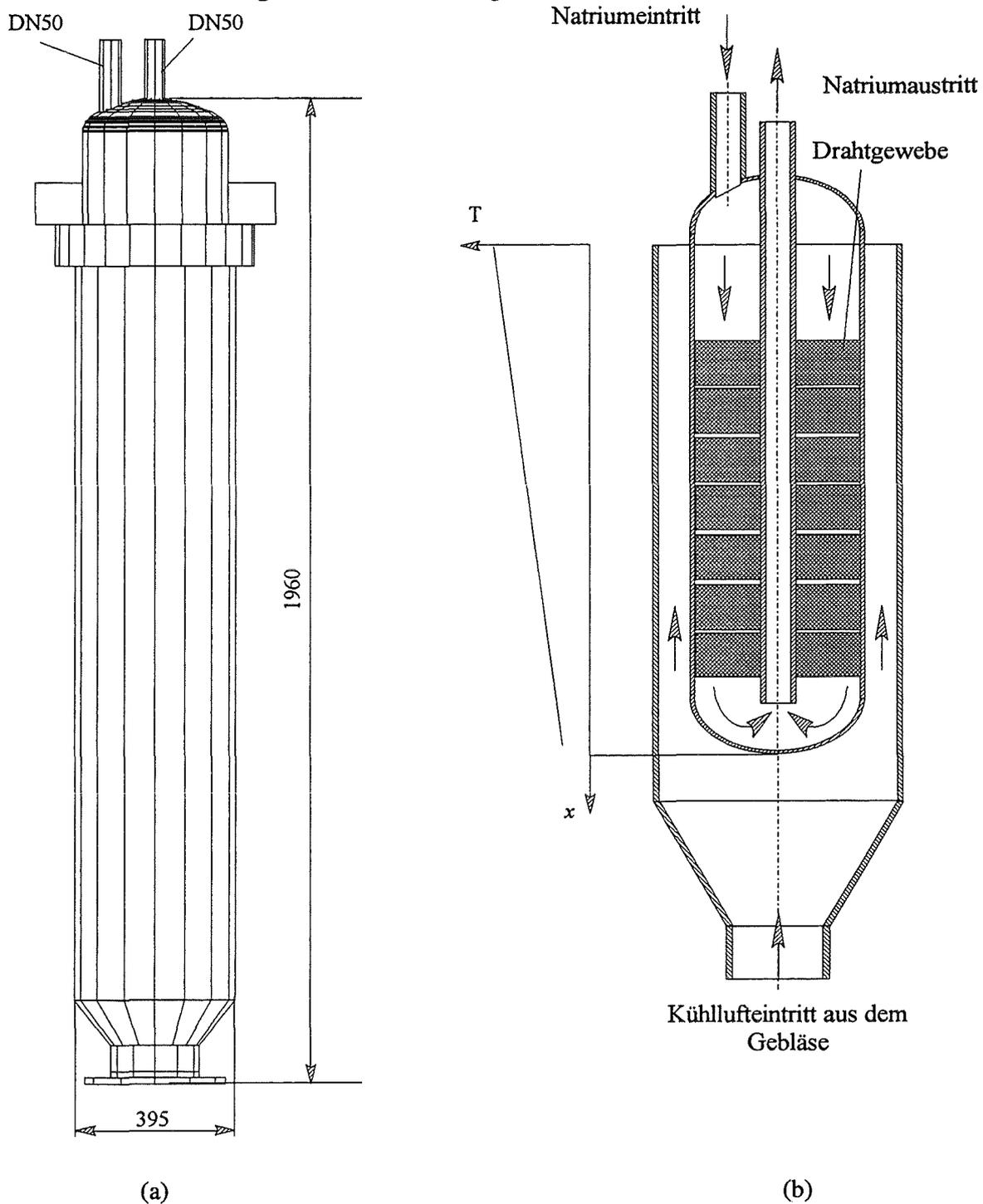


Abbildung 4.13: a.) Abmessungen der in der Versuchsanlage eingesetzten Kaltfalle. b.) Schematisch dargestellte Strömungsführung von Natrium in der Kaltfalle und qualitative Darstellung des Temperaturverlaufs beim Durchtritt von Natrium durch die Drahtgewebepackungen.

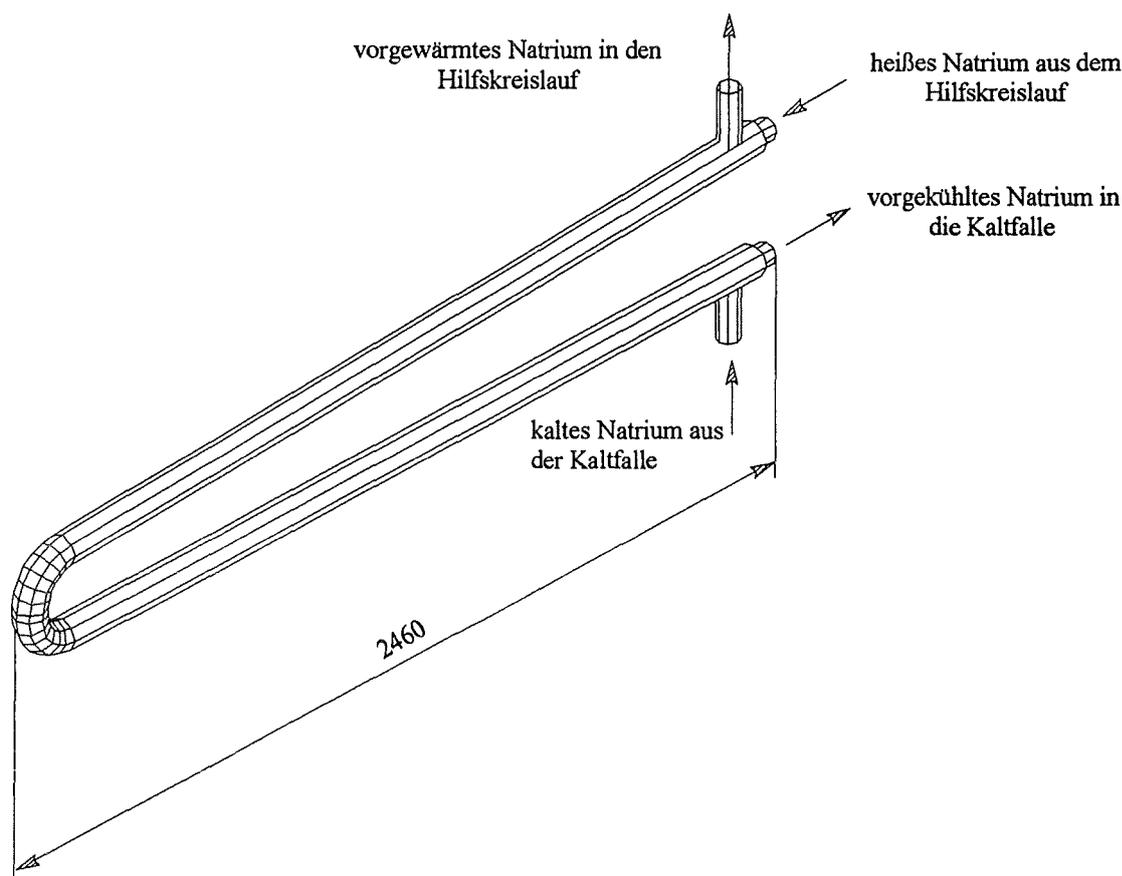


Abbildung 4.14: Abmessungen des Wärmetauschers, der der luftgekühlten Kaltfalle vorgeschaltet ist.

4.3.3 Der Massenstrommesser

Für die Bildung der charakteristischen hydraulischen und magnetischen Reynoldszahl spielt die genaue Kenntnis der mittleren Geschwindigkeit \bar{v} eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund werden im Experiment sowohl elektromagnetische als auch ein gyrostatischer Durchflußmesser eingesetzt. Da elektromagnetische Durchflußmesser durch die Alterung des Magneten wie auch Temperaturänderungen in ihren Charakteristiken variieren, ist es unabdingbar in einen derartigen Kreislauf ein Absolutmassenstrommeßgerät einzusetzen, mit dem die elektromagnetischen Durchflußmesser exakt kalibriert werden können. Ein Absolutmassenstrommeßgerät, das sowohl Dichte als auch den Massenstrom mißt, ist der gyrostatische Durchflußmesser.

Das Meßprinzip des gyrostatischen Durchflußmessers sei im folgenden kurz erläutert und im Bild 4.15 graphisch dargestellt. Der gyrostatische Durchflußmesser (GD) mißt temperaturunabhängig direkt den Gesamtmassenstrom im Kreislauf. Er ist in seinem Meßbereich stufenlos von 0-3.4t/h bis 0-272t/h verstellbar. Der maximale Meßfehler beträgt 0.3% des gewählten Meßbereichsmaximalwertes.

Strömt durch ein mit konstanter Erregerfrequenz um die Schwingachse A angeregtes U-Rohr ein Fluid, so treten in den beiden Schenkeln des U-Rohrs Corioliskräfte entgegengesetzter

Richtung auf, die eine Taumelbewegung um die Drehachse B zur Folge haben. Die Größe des Drehwinkels χ um die Achse B ist direkt proportional zum Massenstrom durch das U-Rohr.

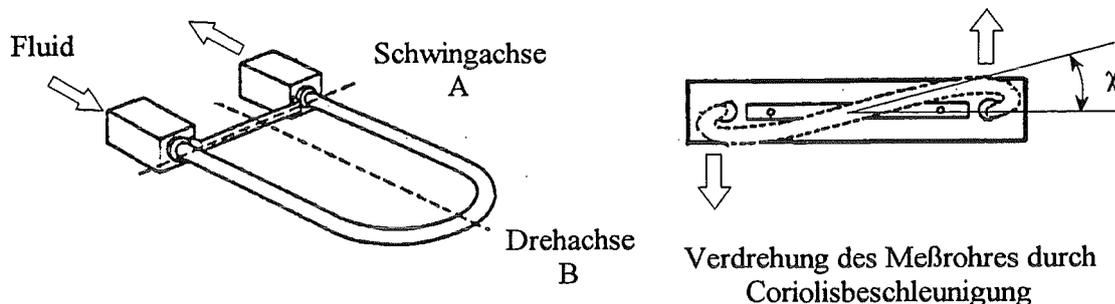


Abbildung 4.15: Prinzipskizze der Wirkungsweise eines gyrostatischen Durchflußmessers.

Der für das Experiment vorgesehene Massenstrommesser der Firma ROSEMOUNT ist über eine Elektronik (Fernbedienung) stufenlos in seinem Meßbereich einstellbar. Er hat einen Rohranschluß der Größe DN80 und ist auf einen zulässigen Rohrrinnendruck von 100bar geprüft. Er hat einen Arbeitstemperaturbereich bis 210°C. Die maximale Temperaturbelastbarkeit im ausgeschalteten Zustand beträgt 250°C, das heißt bei der Hochtemperaturbenetzungsphase sollte das Ventil 4.3 vor dem gyrostatischen Durchflußmesser abgesperrt sein, damit seine Integrität erhalten bleibt. Der Massenstrommesser ist deshalb in den Hilfskreislauf eingebaut, da er einen hohen Druckverlust verursacht und damit die Leistungsfähigkeit der Hauptkreisläufe stark beeinträchtigen würde.

4.3.4 Der Sumpftank und der Ausgleichsbehälter

Der Sumpftank ist in Edelstahl der Güte 1.4541 ausgeführt und hat ein Volumen von 8m³, wovon aus Sicherheitsaspekten jedoch nur 7.2m³ mit Natrium gefüllt sind. Er ist auf einen höchstzulässigen Druck von 5.2 Atmosphären geprüft. Die höchste zulässige Betriebstemperatur beträgt 450°C. Die Größe des Nutzvolumens erfolgt aus der Aufgabe des Sumpfbehälters, das gesamte Flüssigmetall des Kreislaufs und der Teststrecke aufzunehmen. Der Sumpfbehälter hat die Aufgabe das Flüssigmetall während längerer Stillstandszeiten, sowie bei allen Arbeiten am Kreis und an den Teststrecken unter einem Schutzgasüberdruck (im Regelfall 0.2-0.4 bar) sicher zu verwahren. Bei Auftreten eines Lecks wird das gesamte Flüssigmetall des Kreislaufs und der Teststrecke über ein pneumatisches Schnellablaßventil (0.1) in den Sumpftank abgelassen. Um einen schnelleren Abfluß des Natriums in den Sumpftank zu ermöglichen können zusätzlich die beiden Motorventile 0.2 beziehungsweise 0.3 geöffnet werden. Elektrische Grenzkontaktgeber überwachen den Höchst- und Tiefstand des Mediums im Behälter. Darüber hinaus ist in den Sumpfbehälter eine kontinuierlich messende Höhenstandssonde eingebaut.

Zum Befüllen des Kreises und der Teststrecke wird der Schutzgasdruck über dem Flüssigmetallspiegel im Sumpftank erhöht, während in der Teststrecke und im Kreis mit einer Vakuumpumpe der Schutzgasdruck erniedrigt wird. Durch ein leichtes Öffnen der motorbetätigten Füllventile (0.2 oder 0.3) erfolgt durch die Druckdifferenz zwischen beiden Systemen ein Befüllen des Betriebskreises. Das Absaugen von Kreis und Testvolumen auf Werte von 10^{-3} bis 10^{-2} mbar hat den Vorteil, daß beim Füllvorgang auch Sacklöcher gefüllt werden, sodaß keine aufwendige Entgasung, die durch Gaspolster in komplizierten Geometrien entstehen können, vor dem Versuchsbetrieb notwendig wird. Der Füllvorgang gegen Vakuum setzt jedoch voraus, das die Systeme untereinander und darüber hinaus gegen die Atmosphäre leckdicht sind.

Die geometrischen Abmaße des verwendeten Sumpfbehälters sind der Abbildung 4.16 zu entnehmen.

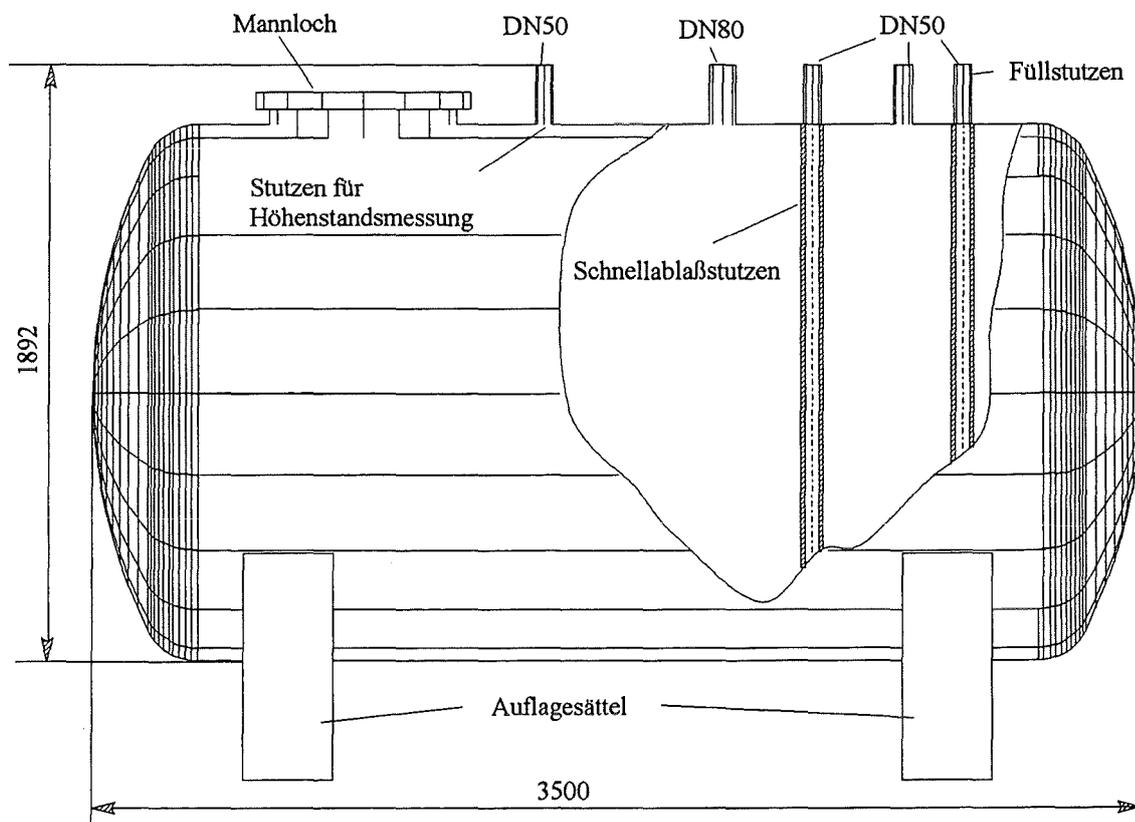


Abbildung 4.16: Geometrische Abmessungen und Rohranschlüsse des Sumpfbehälters.

Der Ausgleichsbehälter dient einmal zum Ausgleich der Differenzvolumina beim Aufheizen und Abkühlen, zum anderen dient er dazu, eventuelle Gasblasen aus dem Kreis zu sammeln. Die Entgasung der Teststrecke erfolgt über den zuvor beschriebenen Gaseparator.

Der Ausgleichsbehälter ist die höchste Stelle im Kreislauf. Sein Volumen beträgt 1m^3 . Der maximale Betriebsdruck des aus Edelstahl der Qualität 1.4541 gefertigten Kessels beträgt 6bar. Die Höhe des Flüssigmetallspiegels im Behälter, die im Versuchsbetrieb einen Minimalpegel

immer überschreiten muß, wird zum einen mit einer kontinuierlich messenden elektromagnetischen Höhenstandssonde mit einer Genauigkeit von ± 1 mm ermittelt. Zum anderen stehen zwei Elektroden zur Verfügung, mit denen die oberen und unteren zulässigen Flüssigmetallpegel überwacht werden. Überschreitet beim Füllvorgang der Spiegel den Maximalpegel wird der Füllvorgang durch zwei simultan ablaufende Vorgänge gestoppt. Dabei werden die Druckausgleichsventile des Gassystems 6.4 und 7.4 geöffnet, damit ein Druckausgleich zwischen Sumpftank und Kreis stattfindet, und das Füllventil 0.2 bzw. 0.3 geschlossen. Als akustisches Warnsignal ertönt eine Hupe.

Die geometrischen Abmessungen des Ausgleichsbehälters sind im Bild 4.17 festgehalten.

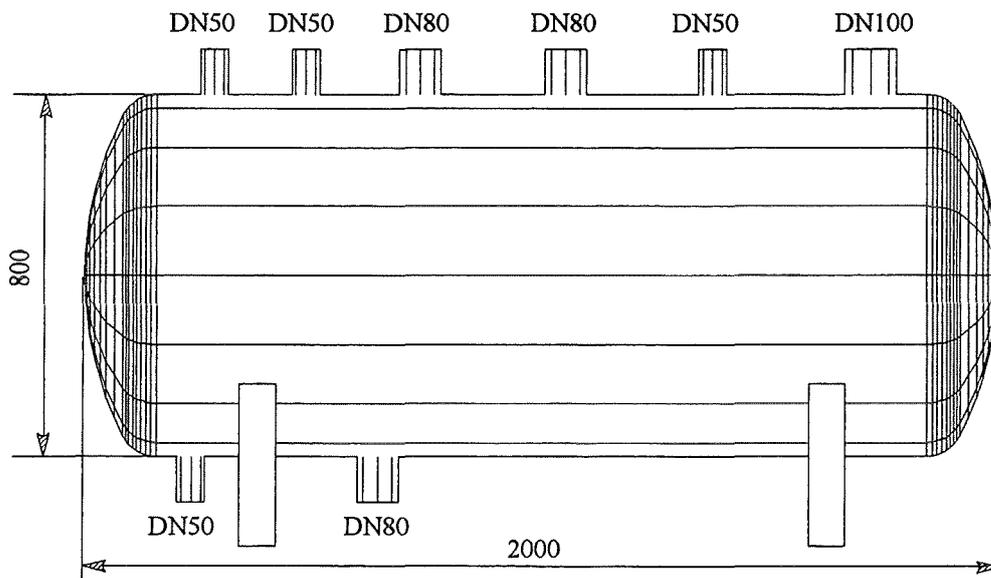


Abbildung 4.17: Geometrische Abmaße des Ausdehnungsbehälters der Dynamoversuchsanlage

4.3.5 Die Absperrarmaturen

Alle im Hilfskreislauf verwendeten Ventile sind aus Edelstahl (1.4550 bzw. 1.4948) gefertigte Faltenbalgventile mit metallischem Sitz. Die Bedienung der Ventile erfolgt extern von der Schaltwarte aus. Die Rückmeldung der Ventilstellung in die Schaltwarte erfolgt im Fall der pneumatisch und elektromotorbetriebenen Steuerventile über Endschalter, die die jeweilige Stellung, also AUF oder ZU anzeigen. Im Fall der elektrisch betriebenen Füllventile erfolgt zusätzlich zu den Endschaltern über Potentiometer eine Rückmeldung über den Öffnungsquerschnitt in Prozent der Öffnung. Die Faltenbalgventile (0.x bzw. 4.x) sind auf einen zulässigen Betriebsüberdruck von 15bar bei einer Temperatur von 555°C ausgelegt. Der maximal zulässige Differenzdruck beträgt 17bar. Alle Ventile müssen zuverlässig schließen und dicht sein. Besonders hohe Dichtheitsanforderungen werden an die folgenden Ventile gestellt; das Schnellablaßventil 0.1 und die Füllventile 0.2 und 0.3. Die Gründe hierfür sind:

- a.) Im Versuchsbetrieb darf das Fluid nicht aus dem Kreisläufen in den Sumpftank gelangen.
- b.) Beim Öffnen des Kreises für Reparaturarbeiten muß der Sumpftank vor einem Sauerstoffeinbruch gesichert werden.
- c.) Beim Füllvorgang des Kreises herrscht ein höherer Druck im Sumpftank als im Kreis, der zur Befüllung gebraucht wird. Sind die Ventile nicht dicht, erfolgt eine vorzeitige Befüllung, die die Erzeugung eines guten Vakuums kaum erlaubt.

Die gute Dichtwirkung dieser Ventile liegt in der Feinstbearbeitung der Edelstahldichtkörper, die durch Polieren erzeugt wird. Alle Natriumventile sind als Drossel- bzw. Asperrventile ausgeführt. Der prinzipielle Aufbau der elektrisch betriebenen Natriumventile ist der Abbildung 4.18 zu entnehmen. Als Sicherung der Ventile gegen ein Auslaufen von Natrium in die Atmosphäre ist in jedem Ventil neben dem Faltenbalg noch eine Stopfbuchsenpackung bestehend aus 3-5 Graphitdichtungen am Ventilschaft eingebaut, siehe Abbildung 4.18.

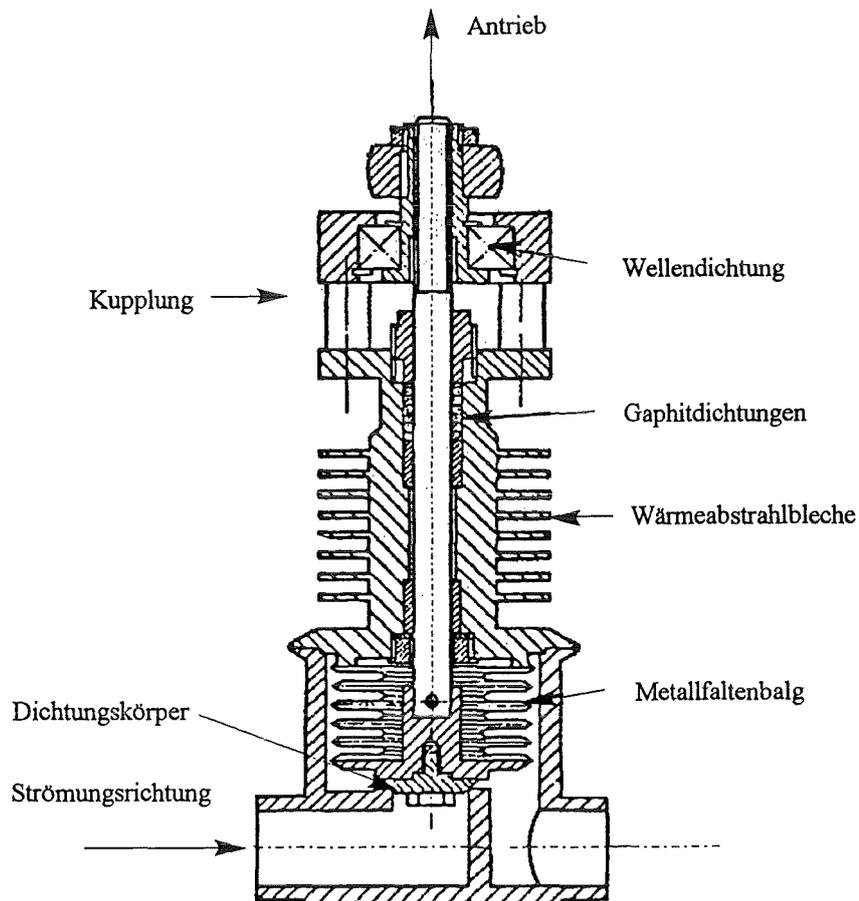


Abbildung 4.18: Prinzipskizze des Schnittes eines Natriumabsperrentils in den Hilfskreisläufen bzw. dem Füll-/Ablaßsystem.

4.4 Das Wasser-Dampf-System

Da verdampfendes Wasser zur Abfuhr der Wärme aus dem Natriumkreis vorgesehen ist, muß sich dem Verdampfungskühler ein geschlossenes Wasser-Dampf-System anschließen. Ein Fließschema des Wasser-Dampf-Systems ist in der Abbildung 4.19 zu sehen.

Die wesentlichen Komponenten des Kreislaufs sind der Kondensator, die Kondensatpumpe die Wasserringpumpe, der Speisewasserbehälter, die Druckwasserpumpe, sowie Heizungseinrichtungen, Meßgeräte und Ventile. Die wesentlichen Kenndaten der angesprochenen Komponenten werden in den Abschnitten 4.4.1 und 4.4.2 angesprochen.

Da Natrium-Wasser-Reaktionen, die bei Leckagen im Natriumkreislauf entstehen können, eine Gefahr darstellen, die die Anlage zerstören können, muß bei der Auslegung des Wasser-Dampf-Systems auf den Aspekt Sicherheit maßgeblich eingegangen werden, siehe hierzu Kapitel 4.4.3.

4.4.1 Die Behälter des Wasser-Dampf-Systems

Der zentrale Behälter des Wasser-Dampf-Systems ist der Kondensator. Er ist aus rostfreiem Stahl aufgebaut und besitzt bei 150°C eine Druckfestigkeit von 4bar im Dampfraum. Der maximal zulässige Betriebsüberdruck beträgt 2bar. Auf der Kühlwasserseite ist ein Druck von max. 10bar zulässig. Eine Übersichtsskizze des Kondensators ist in der Abbildung 4.20 zu sehen. Auf der Unterseite des Kondensator befindet sich ein Kondensatsammelbehälter. Aus diesem saugt die Kondensatpumpe bei Überschreiten eines frei einstellbaren Kondensathöhenstands das Wasser aus dem Kondensatraum ab. Auf der Oberseite des Kondensators befindet sich neben dem Dampfanschluß mit der Nennweite DN200 ein weiterer Rohrstutzen, der mit einer Wasserringpumpe verbunden werden kann. An den Seiten des Kondensators befinden sich je ein Wasserzulauf bzw. Wasserablauf, die mit einem zentralen externen Kühlsystem verbunden sind.

Je nach Wahl des Druckniveaus im Kondensatraum, der über die Wasserringpumpe eingestellt werden kann, und der Kühlwasserzulauftemperatur bzw. des Kühlwasservolumenstroms kann der Kondensator bis zu 450kW Wärmeleistung abführen.

Der über die Kondensatpumpe mit dem Kondensator verbundene Speisewasserbehälter ist ebenfalls aus rostfreiem Stahl (1.4541) gefertigt und besitzt eine maximale Druckbelastbarkeit von 3bar. Er verfügt über ein Innenvolumen von 1m³. Vorgesehen ist eine Befüllung mit 700l Wasser. Da vorgesehen ist, die natriumführenden Rohre im Sprühkühler mit vorgewärmtem Wasser zu besprühen und eine direkte Beheizung des Wassers auf den Wasserrohren vor dem Kühler über eine große Temperaturspanne zu aufwendig ist, ist vorgesehen, das Wasser im Speisewasserbehälter auf ca. 60° vorzuheizen. Eine Prinzipskizze des Speisewasserbehälters ist in der Abbildung 4.21 zu sehen.

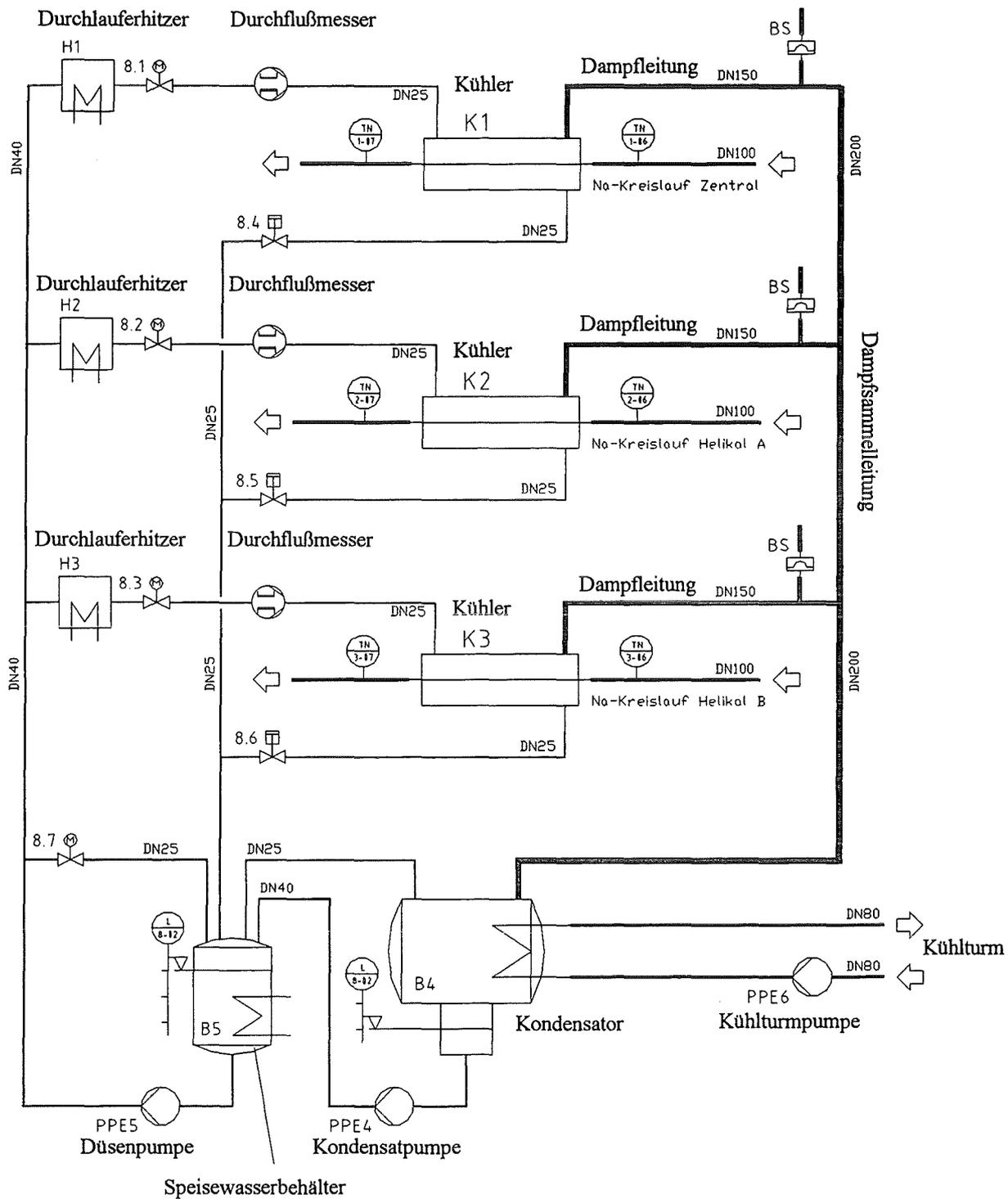


Abbildung 4.19: Schemaskizze des Wasser-Dampf-Systems der Geodynamo-versuchsanlage mit Angabe der Leitungsgrößen und der Komponentenbezeichnung.

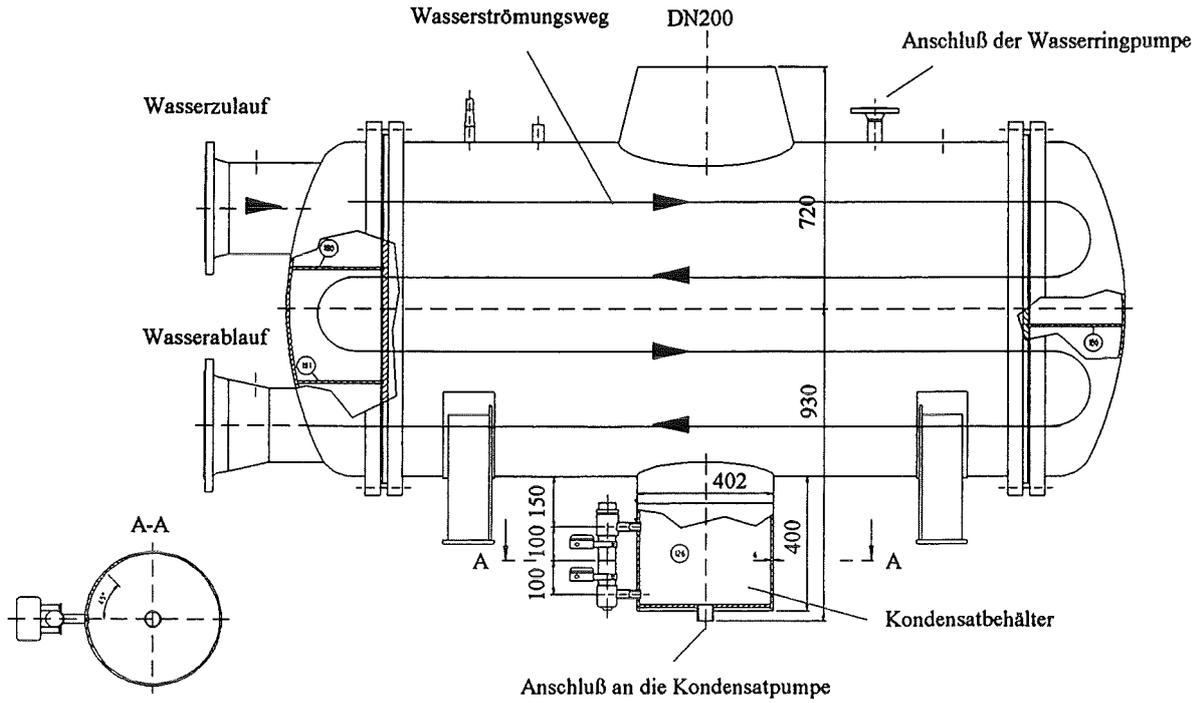


Abbildung 4.20: Der Kondensator im Wasser-Dampf-System der Dynamoanlage.

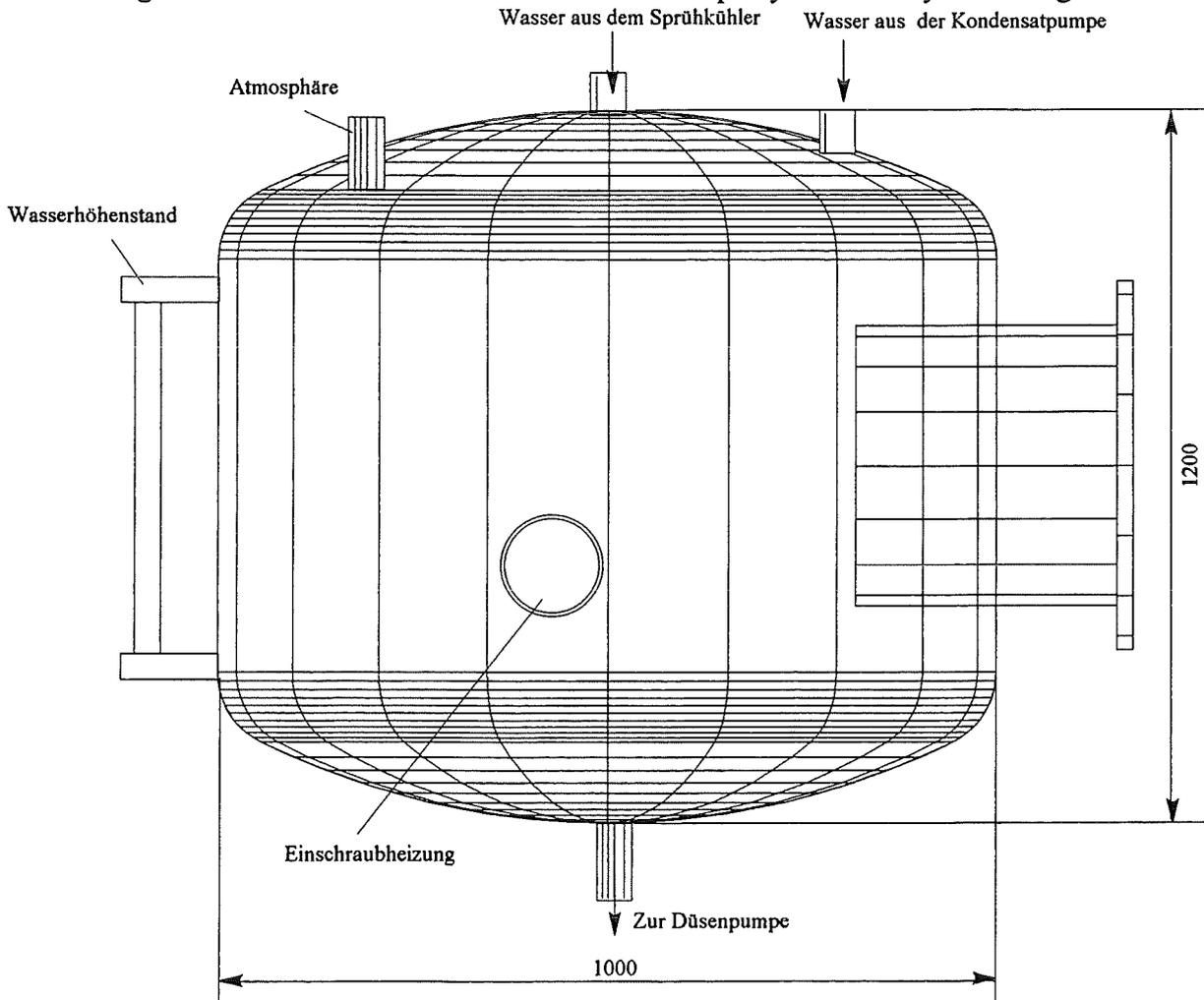


Abbildung 4.21: Der Speisewasserbehälter im Wasser-Dampf-System der Dynamoanlage.

4.4.2 Die Wasserpumpen

Bei der Sprühdüsenpumpe (PPE5, Druckwasserpumpe) handelt es sich um einen konventionelle Radialverdichter, der bei einem Druck von 6bar einen Volumenstrom von $3\text{m}^3/\text{h}$ fördert. Um eine Kavitation in der Pumpe und damit eine Zerstörung der Pumpe zu vermeiden, sollte eine Wassertemperatur von 65°C nicht überschritten werden.

Bei der Kondensatpumpe (PPE4) handelt es sich ebenfalls um einen Radialverdichter. Im Gegensatz zur Druckwasserpumpe ist die Kondensatpumpe selbstansaugend. Ihre maximale Druckhöhe beträgt 10m. Sie wird über den sich im Kondensatraum befindlichen Kondensat-höhenstandsmesser bei Bedarf an- bzw. abgeschaltet.

Die Wasserringpumpe ist hinsichtlich der aus dem Kreislauf abzuführenden Wärme von wesentlicher Bedeutung, denn durch die Wahl des Druckniveaus im Kondensator wird die Verdampfungstemperatur in den Natrium-Wasser-Sprühkühlern bestimmt und damit die abführbare thermische Leistung aus dem Natriumkreislauf. Im Prinzip handelt es sich hierbei um eine Wasserstrahl-Luftpumpe in der Luft isotherm verdichtet wird. Mit dieser Pumpenart lassen sich Drücke bis 50-60mbar relativ schnell erzeugen und damit eine schnelle Inbetriebnahme des Kondensators realisieren. Diese Pumpenbauart ist im Betrieb sehr unempfindlich.

4.4.3 Größter anzunehmender Unfall und das Sicherheitskonzept

Da die Funktionsfähigkeit des Kühlsystems und dessen Sicherheit von elementarer Bedeutung für die Anlage sind, wird hier ausführlich auf die sicherheitstechnischen Aspekte eingegangen und die technische Auslegung bzw. die Sicherheitsinstrumentierung ausführlich dargelegt. Wesentlich für die Abschätzung der möglichen Unfallfolgen bei einem Natrium-Wasser-Kontakt ist das dabei zur Reaktion kommende Inventar von Wasser und Natrium. Deshalb muß im ersten Schritt eine Bestandsaufnahme des Inventars erfolgen.

Natrium-Inventar

Rohrleitungen der Hauptkreisläufe	ca. 3 x 200 l	
Dynamo-Modul	ca. 540 l + 840 l	(zentraler Kreislauf und Zwickelraum mit stagnierendem Natrium)
	ca. 2 x 710 l	(helikale Kreisläufe A und B)
Rohrleitungen Hilfssysteme	ca. 250 l	
Kaltfalle	ca. 250 l	
Separator	ca. 500 l	
Ausgleichsbehälter (Füllzustand)	ca. 600 l	

Rohrleitungsdynamik

Rohrinnendurchmesser (DN100)	$d_i = 107.9 \text{ mm}$
maximaler Volumenstrom je Hauptkreislauf	ca. $280 \text{ m}^3/\text{h} = 78 \text{ l/s}$
Natriumtemperatur	$130^\circ\text{C} - 140^\circ\text{C}$

Betriebsüberdruck (Niederdruckseite) $p = 0.4 \text{ bar}$

Natriumstoffdaten (sofern nicht in Tabelle 3.2 angegeben)

Molmasse Na $m = 0.023 \text{ kg/mol}$

Molmasse NaOH $m = 0.040 \text{ kg/mol}$

Wasser-Wasserdampf-Inventar

Wasser-Sprühraum ca. $3 \times 220 \text{ l}$ (außen DN300, innen DN100, Länge 3.48 m)

Einzel-Dampfleitungen ca. $3 \times 190 \text{ l}$ (Leitungen DN150, Länge je ca. 9 m)

Dampfsammelleitung ca. 615 l (Leitung DN200, Länge ca. 11 m)

Kondensator ca. 850 l ($\varnothing 1 \text{ m}$, Länge 2.7 m, Versperrung 60 %, max. Druckbelastbarkeit $p_{\text{max}} = 3 \text{ bar}$, Betriebsüberdruck $p = 2 \text{ bar}$)

max. benötigte Kühlwassermenge (Sprühwasser bei $T = 70^\circ\text{C}$) ca. $120 \text{ kg/h} \approx 2 \text{ l/min}$

Wasserablaufdurchmesser im Kühler $d = 30 \text{ mm}$

→ max. Wasserablaufmenge bei diesem Querschnitt beträgt $\dot{m} = 0.67 \text{ kg/s} \approx 2435 \text{ kg/h}$
(bei $T=100^\circ\text{C}$, $v_{\text{Ablauf,man.}}=1.5 \text{ m/s}$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}(100^\circ\text{C})=957.1 \text{ kg/m}^3$)

Für die Auslegungsrechnungen werden folgende Annahmen über das Wasser-Wasserdampf-inventar im Betrieb im Sprühraum und einer Einzeldampfleitung angenommen:

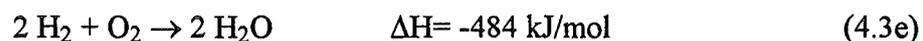
- Es seien ca. 2 l flüssiges Wasser im Sprühraum und in der Dampfleitung vorhanden, dessen Temperatur ca. 80°C - 100°C beträgt.
- Der gesamte Dampfraum des Kühlers und der Dampfleitung sei mit Wasserdampf gesättigt. Damit ergibt sich ein Dampfvolumen von ca. 410 l bei einer Dampfdichte von $\rho_{\text{Dampf}, 100^\circ\text{C}}=0.598 \text{ kg/m}^3$ (angenommen sind 1bar und 100°C)

Im nächsten Schritt müssen die bei einer Natrium-Wasser-Reaktion auftretenden Wärmen und damit die Reaktionschemie betrachtet werden. Bei Natrium-Wasser-Reaktionen treten im wesentlichen die folgenden chemischen Reaktionen auf [siehe Addison 1973]. Das negative Vorzeichen der Reaktionsenthalpien ΔH gibt an, daß die Reaktionen exotherm verlaufen.



Die Reaktionen (c) und (d) werden dabei kaum in Reaktionen beobachtet (siehe auch Experimente von J. Bray bzw. R.N. Newmann et al. aus dem gleichen Buch S. 85-91 bzw. S.109-114). Reaktionskinetische numerische Studien liegen für Natrium-Wasser Reaktionen von Tregonning (Liquid Alkali Metals, J.Board, C.C. Addison eds.; ISBN0901948772; 1973; pp. 116-122) vor, allerdings beziehen sie sich auf Wärmetauscher mit Hochdruckwasser. Die typische Reaktionszeit beträgt dort bis zur Umsetzung ca. 100 Milisekunden. Diese Zeiten werden auch im Versuch gemessen. Andere experimentelle Untersuchungen an Wärmetauschern aus O.J. Foust; Sodium-NaK Engineering Handbook Vol.II; 1976; ISBN 0677030304;

S.378; zeigen ähnliche Reaktionszeiten. Im Anschluß an die Wasserstofffreisetzung kann durch im Dampfraum verbleibenden Sauerstoff und den Natriumbrand eine praktisch sofortige Knallgasreaktion entstehen. Bei der Berechnung wird angenommen, daß sich der gesamte im Dampfraum befindliche Sauerstoff an Ort der chemischen Reaktion befindet. Dies tritt im Realfall sicher nicht auf, da der Sauerstoff wahrscheinlich homogen im Dampfraum verteilt ist. Die getroffene Annahme ist mit Sicherheit jedoch sehr konservativ:



Sie führt zu einer zusätzlichen Steigerung der Temperatur im System.

Nehmen wir nun den größtmöglichen Unfallschaden an, nämlich einen vollständigen Bruch der Natriumleitung, einen sogenannten Guillotinenbruch. Dies ist zwar wenig wahrscheinlich, da nach den in der Schadenskunde gewonnenen Erkenntnissen in der Regel zunächst ein Riß auftritt bevor es zu einem vollständigen Bruch kommt. Dennoch gehen wir zunächst von einem vollständigen Bruch der Leitung aus. Dabei nehmen wir folgendes Szenario an:

0. Die Anlage wird bei maximalen Betriebsbedingungen im Kühler und im Natriumkreis gefahren.
1. Das natriumführende Kühlrohr bricht schlagartig.
2. Natrium dringt in den Sprühraum ein, reagiert mit dem dort vorhandenen Wasser innerhalb 100 ms vollständig.

Um eine vollständige Anlagensicherheit bei einem solchen Unfall gewährleisten zu können, müssen in die Anlage implementierten Sicherheitssystem sowohl im Hinblick auf das Kurzzeitverhalten als auch das Langzeitverhalten beleuchtet und ausgelegt werden.

Betrachten wir zunächst die Anforderungen, denen die Anlage hinsichtlich des Kurzzeitverhaltens gewachsen sein muß.

1. Der sich bei der Reaktion aufbauende Druck darf den zulässigen Kondensatordruck nicht übersteigen. Bei Überschreitung wird über Berstscheiben der Druck abgebaut. Dabei müssen die Abblaseleitungen so verlegt werden, daß im Falle eines Natriumaustritts kein Natrium in die Versuchshalle gelangt. Pro Einzeldampfleitung ist eine Graphitberstscheibe DN150, die außerhalb des Gebäudes montiert ist, vorgesehen.
2. Thermoelemente und Druckaufnehmer müssen durch die bei der Reaktion entstehende Wärme und den Druck die Wasserzufuhr stoppen, damit die Reaktion stoppt.
3. Schnellschlußventil des Dynamos muß öffnen damit das Natrium aus der Anlage in den Sumpfbehalter abfließen kann.

Im nächsten Schritt müssen die Langzeitanforderungen nach einem Unfall definiert werden.

1. Das Natrium kann solange durch das Leck im Kühler austreten, wie der Natriumspiegel in der Dynamoanlage über der geodätischen Höhe des Kühlers liegt. Diese Anforderung bedingt zum einen eine Berechnung der Ablaufzeit des gesamten

Natriuminventars in den Sumpftank. Damit kein Natrium in den Kondensator gelangt, in dem sich eine größere Wassermenge befindet, müssen die Dampfleitungen so verlegt werden, daß dieser Vorgang ausgeschlossen ist

2. Der natriumgefüllte Dampfraum sollte mit Inertgas geflutet werden, um die Natriumreaktionen durch Sauerstoffeinbruch in das System solange klein zu halten, bis das Natrium erstarrt ist. Damit muß die Zeit für das Erstarren des Natriums und für das Gasblasen berechnet werden.

Es empfiehlt sich nach der Definition der Sicherheitsanforderungen weiter Aspekte genereller Natur an die Anlage zu stellen.

1. Ein direkter Kontakt Natrium-Wasser sollte vermieden werden. Das Wasserinventar im Sprühraum und im Ablauf wird so klein als möglich gehalten.
2. Natrium-Wasserdampfreaktionen verlaufen in der Reaktionskinetik sehr langsam ab, sodaß durch diese Reaktionen keine Explosionen zu erwarten sind. Dennoch wird in der Anlagensicherheitsauslegung von einer instantanen Natrium-Wasserdampfreaktion ausgegangen (konservative Abschätzung!).
3. Aus Sicherheitsaspekten sollte eine größtmögliche Entkoppelung von Dampf-Wasser und Natriumraum erfolgen. Sollten alle Sicherheitsbarrieren nicht ausreichend sein und es kommt zu einem großen Natrium-Wasser-Schadensfall, sind alle Wasservolumina außerhalb des Gebäudes zu plazieren und auf Umgebungsdruck zu halten, damit alle Explosionsvorgänge in Verpuffungen und Verformungen umgesetzt werden können.

Betrachten wir zunächst die Thermohydraulik im Sprühraum-Dampfraum und gehen dabei von folgenden Annahmen aus:

Nach dem Rohrbruch erfolgt innerhalb von 100 ms eine vollständige molare Umsetzung des Natriums mit dem gesamten Wasser und Wasserdampfvolumen im Sprühraum und der Dampfleitung. Simultan läuft mit der Wasserstofffreisetzung sehr schnell eine Knallgasreaktion entsprechend Gleichung (4.3e) ab.

Wasserinventar 2 l bei 100°C	111.11 mol H ₂ O (l)
Dampfinventar Sprühraum+ 1/2 Einzeldampfraum (220 l + 95 l ≈ 320 l bei Normdruck 191.4 g)	10.6 mol H ₂ O (g)

Die aus den Reaktionen resultierende freiwerdende Wärmemenge beträgt:

1. Natrium-Wasser-Reaktion	$Q_{H_2O(l)}$	=	16348,89 kJ
2. Natrium-Dampfreaktion	$Q_{H_2O(g)}$	=	1993,86 kJ
3. Knallgasreaktion	$Q_{H_2O_2}$	=	14726,91 kJ

Gesamtwärmemenge der Reaktion	Q	=	33069,66 kJ
-------------------------------	---	---	-------------

Aus der Wasser-Natriumreaktion (4.3a) entsteht Wasserstoff, der zur Volumenvergrößerung beiträgt und damit auch zur Druckerhöhung im System. Das bei Normbedingungen entstehende Wasserstoffvolumen beträgt $V = 0.5 \times 121.71 \text{ mol} \times 22.4 \text{ l/mol} = 1363,16 \text{ l}$. Bei 100°C und 1 bar beträgt die Dichte von Wasserstoff 0.06 kg/m^3 . Damit entstehen bei vollständiger Reaktion und den genannten Bedingungen $1,9\text{m}^3$ Wasserstoff. Die Reaktionen laufen schnell ab. Es wird keine Wärme nach außen abgeführt (adiabat) und die Reaktionsprodukte Natriumhydroxid und Wasserstoff und das von der Pumpe noch geförderte Natrium nehmen die gesamte Reaktionswärme auf (konservative Abschätzung).

Nach einem Leck kann die Pumpe bestenfalls bei maximalen Betriebsbedingungen noch 2 Sekunden Natrium fördern, dann ist die Saugleitung vollständig entleert, da der Kühler auf der Rücklaufseite liegt. Das Fördervolumen V_{Na} der Pumpe bei 2 Sekunden Förderzeit beträgt 156l , entsprechend einer Masse von 143 kg Natrium. Damit ergibt sich nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik folgende Rechnung:

$$Q + p dV = \Delta U = m_{NaOH} c_v (T_{end} - T_0) + m_{H2} c_{v,H2} (T_{end} - T_0) + \text{Wärmeübergang im System} \quad (4.4)$$

a.) Beim Wärmeübergang im System wird lediglich das nachfließende Natrium berücksichtigt.

b.) $p dV = 0$, da der Raum konstant groß ist.

$$\rightarrow T_{end} = \frac{Q + (m_{NaOH} c_{v,NaOH} + m_{H2} c_{v,H2} + m_{Na} c_{v,Na}) T_0}{(m_{NaOH} c_{v,NaOH} + m_{H2} c_{v,H2} + m_{Na} c_{v,Na})} \quad (4.5)$$

$$\rightarrow T_{end} = 564 \text{ °K} = 290 \text{ °C}$$

Die aus der Wärmefreisetzung durch die chemische Reaktion entstehende Temperatur im Verdampferraum liegt deutlich unter den Werten von ca. 700°C , die vom Material ohne Schäden ertragen werden können. In der Rechnung wurden folgende Werte benutzt:

$Q=33069.66\text{kJ}$, $m_{NaOH}=4.44\text{kg}$, $m_{H2}=243.5\text{g}$, $m_{Na}=143\text{kg}$; $c_{v,NaOH}=1702.5\text{J}/(\text{kgK})$ aus Landolt-Börnstein; $T_0=130^\circ\text{C}=403.15^\circ\text{K}$; $c_{v,Na} = 1369 \text{ J}/(\text{kg K})$ aus Lyon et al. 1952; $c_{v,H2}=c_p,H2 (150^\circ\text{C})-R$ mit $R=8.314\text{J}/(\text{mol K})$; $M=2\text{g/mol}$ ist $R=R/M=4157\text{J}/(\text{kg/K})$; $c_p=14500\text{J}/(\text{kg K})$ aus Dubbel, 15.Auflage 1986; S.1358; $c_{v,H2}=10343\text{J}/(\text{kgK})$.

Da sich der maximale Druck innerhalb der Reaktionszeit von 100 ms aufbaut, muß über eine Berstsicherung oder ein Sicherheitsventil im Dampfraum nachgedacht werden. Da die Reaktion sehr schnell ist kann die Strömung in erster Näherung als isotherm angesehen werden (, siehe G. Bozóki 1986). Der Druck in isothermen Strömungen ist höher als der der adiabaten Strömung. Der maximal zu erwartende Druck durch die Wasserstofffreisetzung läßt sich damit berechnen. Das gesamte Dampfraumvolumen (alle Dampfleitungen, Kondensator etc.) $V_{Dampfraum}$ beträgt 2.695m^3 . In diesem wird ein Wasserstoffvolumen V_{H2} von 1.9 m^3 freigesetzt. Damit ergibt sich ein maximaler Druckaufbau von 1.7bar , der deutlich unter dem

des zulässigen Kondensatordrucks ist. Jeweils eine Berstscheibe DN150 mit einem Ansprechüberdruck von 1bar wird am Ende der steigenden Einzeldampfleitungen angebracht, damit die Druckwelle die Berstscheibe optimal auslösen kann. Die Berstscheibe muß eine Vakuumstütze enthalten, da im Kondensatorbetrieb Unterdruck auftreten kann. Am Austritt der Berstscheibe in die freie Umgebung muß eine Leiteinrichtung vorgesehen werden, damit Natrium sofern es in den Austritt gelangt, gezielt gerichtet abgeleitet werden kann. Selbst bei Versagen dieser Sicherung erreicht der maximale Überdruck nicht den zulässigen Wert für den Kondensator. Die Kühlereinheiten und die Dampfleitungen bis zum Kondensator werden für einen Betriebsüberdruck von 10 bar ausgelegt. Eine explosionsartige Knallgasreaktion tritt im System nicht auf, sofern keine externe Zündquelle vorliegt, da Sauerstoff im Unterschuß vorliegt. Im Falle einer Explosion müßte trägheitsbehafet gerechnet werden. Eine detaillierte Analyse eines äußerst unwahrscheinlichen Explosionsfalls zeigt, daß der sich aufbauende Druck maximal 8.45 bar beträgt und somit von den Rohrleitungen ertragen werden kann. Das gesamte Wasser-Wasserdampfsystem in seiner räumlichen Anordnung ist in der Abbildung 4.22 dargestellt.

Was geschieht mit dem Natrium, das sich nach dem Leitungsbruch im Verdampferraum befindet ?

Nach einem Rohrbruch auf der Natriumseite kann Natrium in den Dampfbereich des Sprühkühlers gelangen. Nach Auslösen der Sicherheitseinrichtungen, speziell des Natriumschnellablaßventils auf der Natriumseite braucht das Natrium eine gewisse Zeit bis es in den Sumpfbehälter abgelaufen ist. Solange die Natriumsäule mit ihrem Schutzgasüberdruck über dem Kühler steht wird, Natrium aus dem Kühler in den Dampfraum abfließen. Die Ablaufzeit des Natriums aus der Anlage in den Sumpfbehälter beträgt ca 30 Minuten. Die detaillierte Berechnung dieser Zeit ist dem Anhang C2 zu entnehmen Die lange Ablaufdauer bedeutet technisch, daß die Dampfleitung in jedem Fall bis zur Höhe des Ausgleichsbehälters gezogen werden muß, damit ein Abfließen des Natrium aus der Dampfsammelleitung bis in den Kondensator sicher ausgeschlossen werden kann.

Zur frühzeitigen Erkennung eines Natriumlecks im Kühler und zur Schadensbegrenzung nach dem Auftreten eines Lecks sind für das Natrium-Wasser-System eine Reihe von Sicherheitsdetektoren vorgesehen.

Zur Betriebs- und Störfallüberwachung des Sprühkühlers im Sprüh-/Dampfraum sind im wesentlichen 2 verschiedene Systeme denkbar.

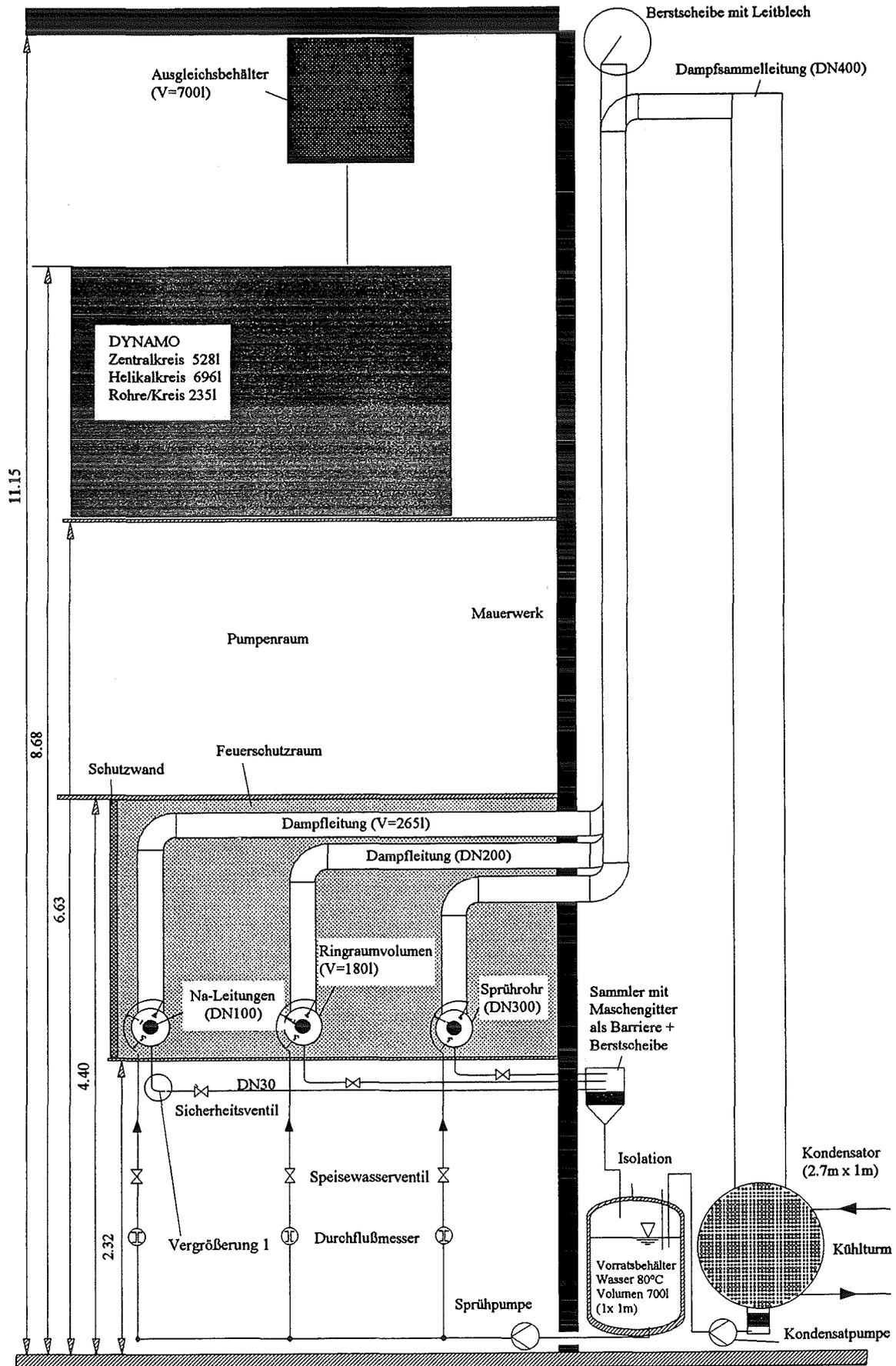


Abbildung 4.22: Räumliche Anordnung des Wasser-Wasserdampfsystems der Versuchsanlage.

A.) Thermoelementüberwachung.

Bei Natrium-Wasser-Reaktionen entstehen Temperaturen, die oberhalb der Dampftemperatur von 100 °C liegen. Bei Erreichen von einer Grenztemperatur von $T=250$ °C lösen sie eine Sicherheitsabschaltung aus, die folgende Punkte enthält:

1. Stopp der Wasserzufuhr in den Kühlraum. Stopp der Wasserabfuhr aus dem Ablauf.
2. Öffnen des Schnellablaßventils.
3. Abschaltung der Natriumpumpen.
4. Öffnen aller Natriumventile für schnellen Natriumablauf in den Sumpfbehälter.

Für die Benetzungsphase bei der das Natrium ca. 350°C-375°C heiß ist, ist die Sicherheitsabschaltung zu deaktivieren. Da in diesem Fall der Kühler nicht benutzt wird, ist auch kein Gefährdungspotential zu erwarten.

B.) Druckaufnehmersysteme

Durch lokale Piezoelemente kann der Druckanstieg im System ermittelt werden. Bei Überschreiten eines kritischen Grenzdrucks erfolgt derselbe Abschaltmechanismus wie bei einem Ansprechen der Temperaturanzeige.

Die Sicherungsmaßnahmen im Verdampferraum des Natrium-Wasser-Sprühkühlers sind in der Schemaskizze 4.23 dargestellt.

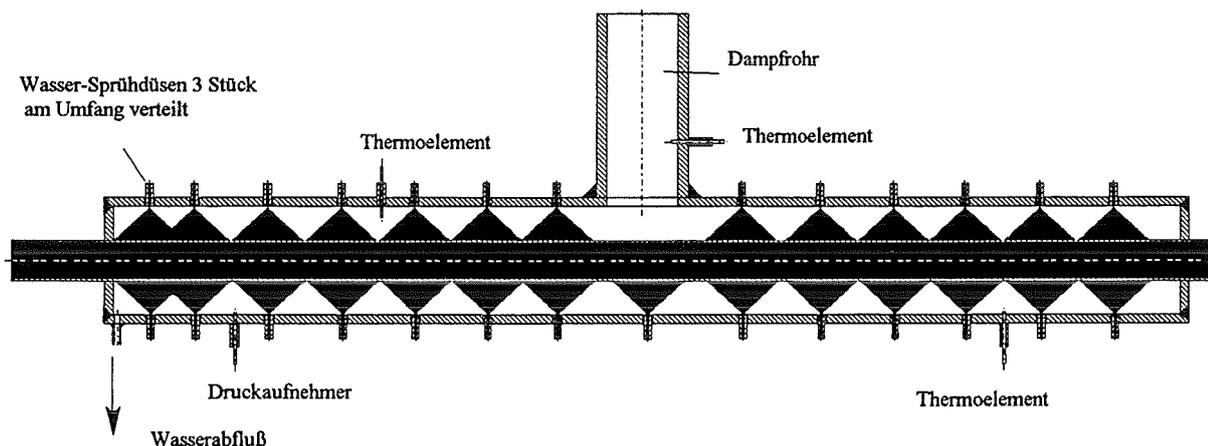


Abbildung 4.23: Schemaskizze des Natrium-Wasser-Sprühkühlers mit den eingebauten Sicherheitsaggregaten.

Im Wasserablauf aus dem Sprühraum kann es ebenfalls zu einer Natrium-Wasser-Reaktion kommen. Dabei ist ein folgendes Szenario denkbar. Natrium läuft durch die gebrochenen Leitung in den Sprühraum und von dort durch den Wasserablauf. Die Wasserablaufkapazität

durch das Ablaufrohr DN30 mit einem eingebauten, eng gepackten Stahlmaschensieb beträgt 2435kg Wasser pro Stunde. Das Ablaufrohr werde nicht beheizt. Bei einem Natriumdurchfluß durch das Rohr trifft das Natrium auf das Maschensieb, indem sich noch Wasser befindet. Für das Maschensieb werden folgende Daten angenommen:

1. Feststoffanteil 10 %;
2. Drahtdurchmesser 1 mm;
3. Maschenzahl/Flächeneinheit 500; Sieblänge 0.1 m

Die sich im Maschengitter befindliche Wassermenge m beträgt dann maximal 63.6g Wasser. Die Natrium-Wasser-Reaktion wird wie die vorangegangenen beschriebene ablaufen, aber das Natrium wird durch die große Fläche und die Maschengitterversperrung lediglich auf einer Tiefe von ca. 1cm mit dem Wasser reagieren. Damit ergeben sich folgende Reaktionswärmen: Aus der Wasser-Natrium-Reaktion entstehen 52kJ und aus der Knallgasreaktion entstehen 42.75kJ. Die entstehende Wasserstoffmenge beträgt 52.5 l. Die entstehende Wärme wird sich dem Stahlsieb, dem Wasser und dem Rohr mitteilen ($c_{Stahl}=400 \text{ J/(kgK)}$). Die daraus im Stahlrohr entstehende Endtemperatur nach der Reaktion beträgt $T_{end}=618^{\circ}\text{K}=345^{\circ}\text{C}$ und liegt damit unter den für das Material zulässigen Wert. Durch die Wasserstofffreisetzung kann es auch hier zu einer Druckwelle kommen. Der gesamte Rohrleitungsraum (Länge max. 20 m) hat bis zum Abscheider ein Volumen von ca. 14 Liter. Der Sammelabscheider wird mit 20 Liter veranschlagt. Der sich aufbauende Überdruck beträgt damit $p_{max}=2.54\text{bar}$ und ist für eine vorgesehene Rohrwandstärke von 2 bis 3 mm unkritisch. Die erste schnell laufende Druckwelle kann über eine Berstscheibe mit einem Ansprechüberdruck von 2bar am Wassersammelbehälter abgefangen werden.

Für den Fall, daß die Sicherheitsabschaltung am Wasserablaufventil nicht anspricht und die Berstscheibe nicht reißt, kann der Überdruck durch den Ablauf in den Wasservorratsbehälter, der zur Atmosphäre hin offen ist, abgefangen werden. Falls Natrium durch das Maschengitter hindurchläuft, löst es eine Natrium-Wasser-Reaktion aus, bei der Wärme entsteht. Durch Thermoelemente, die bei Überschreitung einer Grenztemperatur von 250°C einen Alarm auslösen, wird eine Sicherheitsabschaltung ausgelöst. Neben den Thermoelemente wird als zweite unabhängige Messung ein pH-Meter am Ende des Siebs angebracht, mit dem eventuell auftretende Natronlauge detektiert werden kann. Damit kann, sofern kleinere Lecks auftreten, ebenfalls eine Sicherheitsabschaltung mit den nachstehend genannten Einzeloperationen erfolgen. Die Sicherheitsabschaltung beinhaltet die drei simultan ablaufenden Operationen:

1. Stop der Wasserzufuhr in den Kühlraum und Stopp des Wasserablaufs im Ablaufrohr
2. Öffnen des Schnellablaßventils der Natriumseite
3. Abschaltung der Natrium-Pumpen.

Nach dem Auslösen der Wasserzu- bzw. Wasserablaufverriegelung können weitere Natrium-Wasser-Reaktionen ablaufen. Ein Druckausgleich kann in diesem Fall lediglich über den großen Dampfraum im Sprühkühler erfolgen. Die entstehenden Wasserstoffmenge sind jedoch so klein, daß sie dort zu keinem nennenswerten Druckanstieg ($p < 0.1$ bar) führen. Die Reaktion von Natrium zu Natronlauge verläuft durch Volumenvergrößerung, damit ergeben sich nach der ersten Reaktion im Sieb keine größeren nennenswerten Reaktionsumsätze mehr.

Die Sicherheitseinrichtungen im Ablaufrohr des Natrium-Wasser-Sprühkühlers sind in der Grafik 4.24 dargestellt.

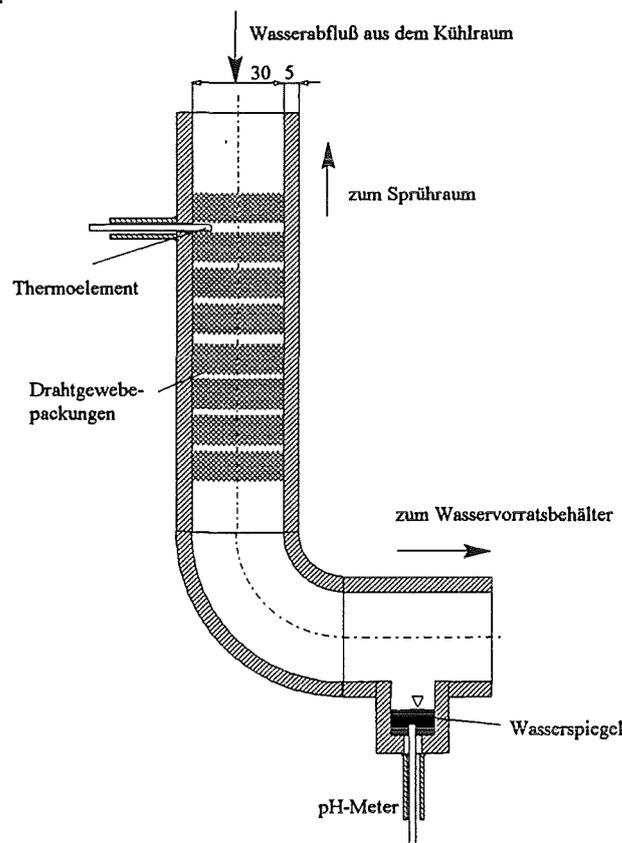


Abbildung 4.24: Sicherheitseinrichtungen in jedem Ablaufrohr eines Sprühkühlers

4.5 Betrieb des Natriumkreislaufs

Beim Betrieb des Natriumkreislaufs in der Dynamoanlage ist prinzipiell von drei unterschiedlichen Betriebsphasen auszugehen. Es sind dies:

1. Der Füllvorgang
2. Die Benetzungsphase
3. Der eigentliche Betrieb, in dem die Messungen stattfinden.

In den folgenden Abschnitten werden die drei Betriebszustände beschrieben. Besondere Aufmerksamkeit wird bei den geschilderten Bedienphasen den einzelnen für den Anlagen-

bediener wichtigen Komponentenstellungen geschenkt. Es wird daher für den Anlagenbediener eine Art Checkliste vorgestellt.

Im Vorgriff auf die Abschnitte 4.7 (Betriebsüberwachung) und 4.8 (Sicherheitseinrichtungen) sollte bemerkt werden, daß ein grobes Fehlbedienen der Anlage durch die vorgesehenen Bedien- und Sicherheitseinrichtungen ausgeschlossen sein muß. Aufgrund der Vielzahl der Bedienelemente erfolgen diese Verriegelungen über zwei speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) der Firma SIEMENS (Simatic S5). Eine der SPS sorgt für die Verriegelung und die Sicherheit der Hardwarekomponenten der Versuchsanlage (Betriebs-SPS), während die andere SPS (Heizungs-SPS) die Beheizung der natriumführenden Bauteile überwacht und steuert.

Da die drei Betriebsphasen in ihrem Profil gänzlich unterschiedlich sind und daher verschiedene Verriegelungen benötigen, ist für jede der drei Bedienphasen ein eigenes Programm auf der Betriebs-SPS vorgesehen, das vom Anlagenbetreiber ausgewählt werden muß.

4.5.1 Der Füllvorgang

Der Füllvorgang erfolgt dadurch, daß zwischen dem gesamten Kreislaufsystem (inklusive aller Behälter und der Teststrecke) und dem Sumpftank eine Druckdifferenz aufgeprägt wird. Damit in den zu füllenden, zum Teil sehr komplexen Geometrien keine Gasblasen verbleiben, wird der gesamte natriumführende Kreislauf auf Vakuumdruck abgepumpt. Um ein Kollabieren des gegen äußeren Überdruck empfindlichen Dynamomoduls zu vermeiden, wird der Druckbehälter ebenfalls mit abgepumpt.

1. Damit alle Komponenten des Kreislaufs gefüllt werden, müssen alle Ventile 1.x, 2.x, 3.x, 4.x geöffnet sein. Das Gassystem des Kreislaufs wird sowohl von der Gaseinspeisung durch das Schließen der Ventile 7.1, 7.3, 7.4 getrennt wie auch vom Natriumkreislauf.
2. Die Füllventile 0.2, 0.3 und 0.5 wie auch das pneumatisch betätigte Schnellablaßventil 0.1 müssen sich im geschlossenen Zustand befinden. Das Ventil 0.4 hingegen ist offen.
3. Im Gassystem des Sumpftanks wird der Schutzgasdruck auf 0.5-0.7 bar erhöht. Die Ventile 6.5 und 6.6 müssen sich im geschlossenen Zustand zu befinden, während die Einspeiseventile 6.3 und 6.4 offen sind.
4. Sind alle Schaltstellungen überprüft, wird die Vakuumpumpe angeschlossen. Die Vakuumpumpe muß bei geschlossenem Ventil 7.8 anlaufen, damit kein Sauerstoff in den Kreislauf gelangt. Erst bei hinreichend gutem Vakuum wird das Ventil 7.8 geöffnet.
5. Ein Öffnen der Füllventile 0.2 bzw. 0.3 darf lediglich dann möglich sein, wenn sowohl alle Rohrleitungen, Behälter und die Teststrecke, wie auch das Fluid im Sumpftank eine Temperatur von 160°C erreicht haben.
6. Der Füllvorgang beginnt dann mit einem leichten Öffnen des großen Füllventils 0.2. Während des gesamten Füllvorgangs muß gewährleistet sein, daß Schutzgas in den

Sumpftank gespeist wird und daß die Vakuumpumpe weiterläuft, damit die zum Füllen notwendige Druckdifferenz aufrechterhalten wird.

7. Der Pegelstand des Natriums wird während des Füllens über in die Rohrleitungen eingebaute Thermoelemente verfolgt.
8. Überschreitet der Pegelstand den unteren Grenzkontakt im Ausgleichsbehälter, so leuchtet die Elektrode E0-06 in der Schaltwarte auf und es ertönt ein akustisches Signal. Es wird dann solange weitergefüllt bis das gewünschte Niveau erreicht ist. Danach ist das Füllventil zu schließen.
9. Der Füllvorgang endet damit, daß das Ventil 7.8 geschlossen wird. Die Ventile 7.1, 7.3 und 7.4 sind zu öffnen, damit ein Druckausgleich zwischen dem Kreislauf- und Sumpftankgassystem gewährleistet wird.
10. Den Abschluß des Füllvorgangs bildet das Einstellen der Gasregelventile 6.2 und 7.2 auf einen konstanten Schutzgasüberdruck in Kreislauf und Sumpftank auf 0.2 bar. Die Natriumventile 1.3, 1.4, 1.6, 2.3 und 3.3 sind vor einem Versuchslauf zu schließen.
11. Das Anfahrprogramm auf der SPS ist im Anschluß daran außer Betrieb zu nehmen.

Während des Betriebs kann es durch Undichtigkeiten der Ventile 0.1, 0.2 oder 0.3 zu einem Unterschreiten des Höhenstands unter die Grenzkontaktelektrode E0-06 im Ausgleichsbehälter kommen. Tritt dies ein, kann entweder der Füllvorgang in den Schritten 1.-11. wiederholt werden oder es kann lediglich Natrium aus dem Sumpftank nachgedrückt werden.

Während des Füllens ist sowohl eine Aktivierung der Pumpen, der Gebläse und auch der Natrium-Wasser-Sprühkühler nicht möglich.

Tritt während des Anlagenbetriebs der Fall ein, daß der Höhenstand unter die Elektrode E0-06 fällt, so schaltet die SPS sofort die Pumpen PPE1, PPE2, PPE3 wie auch alle sich im Kreislauf befindlichen Gebläse aus. Simultan dazu wird auch die Wasserzufuhr zum Natrium-Wasser-Sprühkühler unterbrochen.

Eine Checkliste mit dem vor dem Füllen vorhandenen ISTZUSTAND ist der Tabelle 4.2 zu entnehmen.

Besonders kritisch vor dem Befüllen ist die Aufheizphase des Rohrleitungssystems und insbesondere des Dynamomoduls. Dabei ist, um die kritischen zulässigen Wärmespannungen im Dynamomodul nicht zu überschreiten, auf mehrere Punkte zu achten.

1. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen dem Dynamozyylinder am Außenmantel und der Achse des Dynamobehälters darf nicht mehr als 100°C überschreiten.
2. Viel kritischere Wärmespannungen ergeben sich zwischen dem Dynamozyylinder-außenmantel und dem Außenmantel eines Drallerzeugers, wenn die Temperaturdifferenz mehr als 50°C beträgt.

Daher dürfen die Begleitheizungen für den Dynamobehälter nicht sofort auf den Sollwert von 160°C hochgeschaltet werden, sondern müssen schrittweise in ihrem Stellbereich angehoben werden. Zur Überwachung der Temperaturen im Dynamomodul ist eigens in der Schaltwarte die in der Abbildung 4.25 zu sehende Schalttafel aufgestellt. In ihr sind alle kritischen Temperaturüberwachungsmeßstellen aufgeführt. Die Thermoelemente im Modul bestehen alle aus nicht ferromagnetischen Materialien. Es handelt sich hierbei um Kupfer-Konstantan-Thermoelementpaarungen.

Da als Strukturmaterial im gesamten Kreislauf rostfreier Stahl mit einer sehr schlechten thermischen Leitfähigkeit eingesetzt wird ($\lambda_{\text{Stahl}}=15\text{W}/(\text{mK})$), und folglich der Wärmetransport lediglich über Wärmestrahlung und Wärmeleitung durch das Edelgas Argon erfolgen kann, zeigt eine Überschlagsrechnung, daß diese Aufheizphase bis zu 2-3 Tagen dauern kann.

Ventilbeschreibung	V.-nr.	AUF	ZU	Ventilbeschreibung	V.-nr.	AUF	ZU
Schnellablaß	0.1		x	Gasflaschenanschl.	5.1	x	
Füllventil (groß)	0.2		x	Druckminderer	5.2	x	
Füllventil (klein)	0.3		x	Rückschlagventil	5.3		
Ablaß Modul	0.4	x		Gassperre Sumpft.	6.1	x	
Ablaß Druckbehälter	0.5		x	Regelventil Sumpftank	6.2	x	
Schieber-Zentral	1.1	x		Sumpfspeisevent.	6.3	x	
Zentral-Hilfskreislauf-V.	1.2	x		Gasablaß Sumpftank	6.4	x	
Entlüftung 1 Zentr.	1.3	x		Gasablaß Sumpf.	6.5		x
Entlüftung 2 Zentr.	1.4	x		Überdruck-Sumpf	6.6		
Zentral-Mantelventil	1.5	x		Gassperre Kreis	7.1		x
Entlüftung Mantel	1.6	x		Regelventil Kreis	7.2		x
Schieber Helikal A	2.1	x		Kreisspeisev.	7.3		x
Heli. A-Hilfskreisl.	2.2	x		Druckausgleichsv.	7.4		x
Entlüftung Heli. A	2.3	x		Gasablaß Kreis	7.5		x
Schieber Helikal B	3.1	x		Gasablaß Kreis	7.6		x
Heli. B-Hilfskreisl.	3.2	x		Überdruckv. Kreis	7.7		
Entlüftung Heli. B	3.3	x		Vakuumventil	7.8		x
Zulauf Kaltfalle	4.1	x					
Zulauf Separator	4.2	x					
Zulauf Massenstrom	4.3	x					
Entlüftung Separator	4.4	x					
Entlüftung Hilfskreislauf	4.5	x					
Entlüftung Kaltfalle	4.6	x					

Tabelle 4.2: Erforderliche Ventilstellungen, bevor der Füllvorgang der Dynamoanlage beginnen kann.

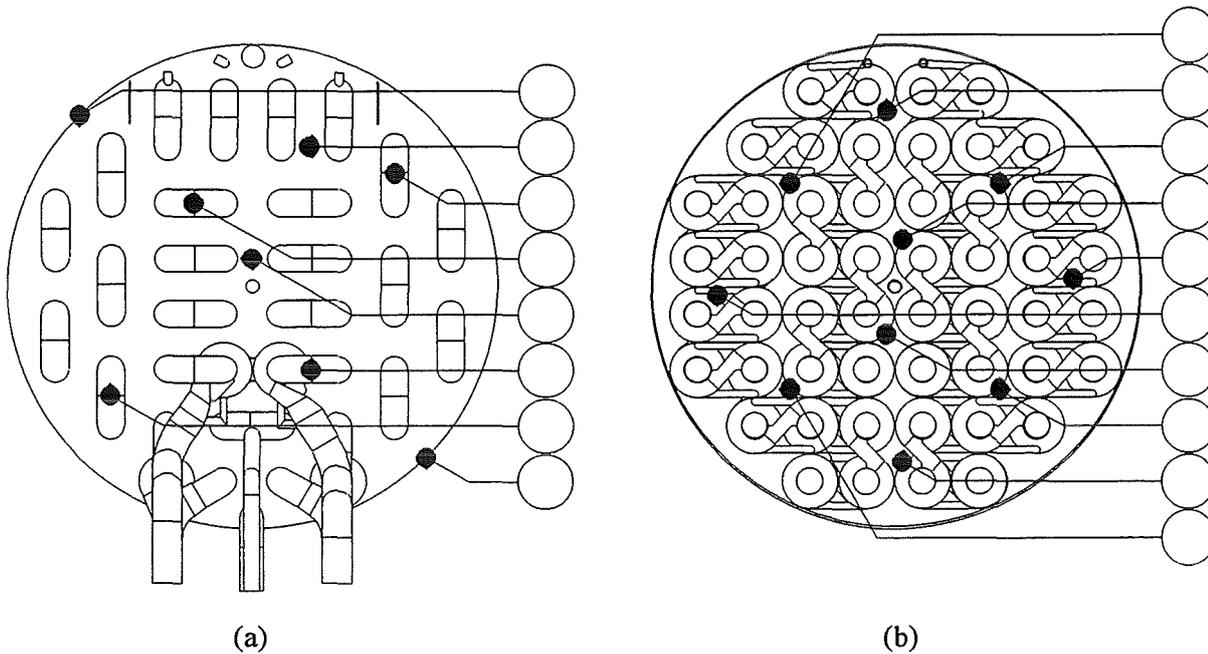


Abbildung 4.25: Thermoelementanzeigen des Dynamomoduls in der Schaltwarte des Dynamoversuchsstandes. a.) Stirnplatte des Dynamomoduls. b.) Innenthermoelemente im Modul.

Ein Abpumpen des Kreislaufs und des Moduls nachdem sich alle Komponenten auf dem zum Füllen erforderlichen Temperaturniveau von 200°C befinden ist möglich, wenn zunächst lediglich eine kleine Gasmenge abgesaugt wird. (Ein sofortiges vollständiges Öffnen des Vakuumventils 7.8 würde aufgrund der hohen Gastemperaturen zur Zerstörung der Vakuumpumpe führen. Zudem erniedrigt sich bei zu schnellem Abpumpen die Temperatur im Kreislauf zu stark). Die Abpumpdauer läßt sich folgendermaßen berechnen.

Die bei Beendigung des Aufheizvorgangs im Argon gespeicherte Wärmemenge Q errechnet sich aus der Gleichung 4.6a. Die Dichte des Argon, die für die Berechnung erforderlich ist ergibt sich aus der idealen Gasgleichung 4.6b.

$$Q = \rho_{\text{Argon}} V_{\text{Gas}} c_p (T_{\text{Gas}} - T_{\text{Umgebung}}) ,$$

mit $V_{\text{Gas}} = 6.5\text{m}^3$, $c_p = 523\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $T_{\text{Gas}} = 200^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{Umgebung}} = 30^{\circ}\text{C}$.

$$\rho_{\text{Argon}} = \frac{p \cdot m_{\text{Argon}}}{\mathfrak{R} \cdot T_{\text{Gas}}} = 1.42271\text{kg}/\text{m}^3 ,$$

mit $p = 1.4\text{bar}$, $\mathfrak{R} = 8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, $m_{\text{Argon}} = 39.948\text{g}/\text{mol}$.

(4.6a, b)

Die gespeicherte Wärmemenge beträgt $8.22 \cdot 10^5$ Joule. Bei einer angenommenen Abpumpdauer von 10 Minuten für die Erzeugung des Vakuums, muß auf dem Gasleitungen zur Vakuumpumpe hin lediglich eine Leistung von 1.37kW in die Umgebung abgeführt werden. Bei der Annahme einer nichtbeheizten Gasleitungslänge von 3 Metern und dem Einsatz eines 1 Meter langen Vakuumwellschlauches DN50 beträgt die Argongastemperatur an der Vakuumpumpe maximal 52°C und stellt somit keine kritische Größe mehr dar.

Sind alle Bedingungen zum Füllen des Kreislaufs erfüllt, so kann eines der beiden Füllventile (0.2 oder 0.3) geöffnet werden. Der Öffnungszustand des Ventils in Prozent des Öffnungsquerschnittes wird auf der Schalttafel angezeigt. Beim Füllen ist stets auf den Druck im Kreislauf und im Sumpftank zu achten. Wenn die Druckdifferenz zwischen beiden Systemen weniger als 1 bar (entspricht ca. 11m Förderhöhe) unterschreitet, so muß vom Bedienpult aus das Füllventil geschlossen werden. Eine Fortsetzung des Füllvorgangs kann erst dann weiter erfolgen, wenn die Druckdifferenz zwischen Kreislauf und Sumpftank den Wert von 1 bar deutlich überschreitet.

Da der gesamte Versuchsstand eine Höhe von ca. 11m hat und der Füllvorgang eine ähnliche Zeitgröße benötigt wie der Schnellablaß (siehe Anhang C2), ist in der Schaltwarte eine Tafel angebracht, in der der jeweilige Füllhöhenstand über eine Kontrollampe angezeigt wird. Die Messung erfolgt über in den Kreislauf eingeschraubte Thermoelemente. Damit kann die Füllgeschwindigkeit der Komplexität der zu füllenden Geometrie angepaßt werden.

Um eine grobe Fehlbedienung der Anlage zu vermeiden, ist auf der speicherprogrammierbaren Steuerung der Anlage das Programm **FÜLLEN** zu wählen. Mit dem Programm FÜLLEN sind nahezu alle kritischen Anlagenfehlbedienungen verriegelt. Eine Auflistung der Verriegelungen und Sicherheitsabschaltungen ist dem Anhang D2 in tabellarischer Form aufgeführt.

4.5.2 Benetzungsphase

Die physikalische Notwendigkeit einer Benetzung des Strukturmaterials, die bei der Materialkombination Stahl/Natrium erforderlich ist, wurde im Kapitel 3.1 (Wahl des Arbeitsfluides) erläutert. Die Prozedur dient im wesentlichen dazu, die elektrische Kopplung zwischen dem Strukturmaterial und dem Arbeitsfluid sicherzustellen.

In der Benetzungsphase wird das Natrium in nahezu dem gesamten Kreislauf und dem Dynamomodul auf 350°-375°C erwärmt. Die einzige Ausnahme, in der die Temperatur nicht über 250°C erhöht werden darf, bildet der Massenstrommesser. Da dieser lediglich eine Temperaturverträglichkeit bis zu 250°C besitzt, muß bei der Benetzungsphase, das Ventil 4.3 sich stets im geschlossenen Zustand befinden. Darüber hinaus muß der Massenstrommesser ausgeschaltet sein, da sonst die Erregerelektronik des Meßgerätes, die lediglich bis 204°C arbeitet, zerstört wird. Beide Verriegelungen (Ausschalten des Meßgerätes und Schließen des Ventils 4.3) erfolgen über das vom Bediener einzuschaltende Benetzungsprogramm. Tritt dennoch eine größere Temperatur auf, ist die thermische Isolation des Meßgerätes zu entfernen.

Ebenso wie bei Füllvorgang ist beim Benetzungsvorgang darauf zu achten, daß die Temperaturunterschiede im Modul nicht zu groß werden. Dabei ist aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Natriums voraussehbar, daß dies keine kritische Belastungsgröße darstellt.

Hat die Temperatur das vorgesehene Niveau von 350°-375°C erreicht, ist der Kreislauf mehrere Stunden lang zu durchströmen, damit eine Reinigung der Stahloberflächen eintritt. Anschließend wird jeder der drei Natriumteilkreisläufe einzeln gereinigt. Dies geschieht dadurch, daß alle Regelschieber x.1 geschlossen werden. Anschließend wird beispielsweise das Ventil 1.2 geöffnet und ebenso das Kaltfallenventil 4.1. Wird die Kaltfalle durchströmt- dies ist am Durchsatz durch das Flowmeter F4-06 zu erkennen- so wird das Kühlgebläse G4 gestartet. Während des Betriebs des Kühlluftgebläses G4 ist darauf zu achten, daß die Temperatur im Absatzbecken der Kaltfalle 110°C nicht unterschreitet, damit es nicht zu einem Verplacken der Kaltfalle kommt und das Natrium durch Unterschreiten der Schmelztemperatur einfriert. Tritt ein Unterschreiten unter 110°C ein, so ist der Kühlluftstrom zur Kaltfalle zu unterbrechen. Hierzu wird eine Absperrklappe, die im Rohr zwischen der Kaltfalle und dem Kühlgebläse G4 eingebaut ist, betätigt.

Lediglich in der Benetzungsphase wird der Zwickelraum zwischen den einzelnen Drallerzeugern durchströmt. Das Ziel der Durchströmung ist es, eine elektrische Ankoppelung aller Drallerzeuger aneinander ohne einen elektrischen Übergangswiderstand zu erzeugen. Die Zwangsdurchströmung des Zwickelraums erfolgt über einen Abzweig aus dem Zentralen Natriumkreislauf. Hierzu läuft die Pumpe PPE1 im Zentralen Kreislauf bei niedrigem Durchsatz. Danach ist **zuerst** das Ventil 1.5 zu öffnen, anschließend wird der Absperrschieber 1.1 und das Ventil 1.2 geschlossen. Bevor das Natrium aus dem Zwickelraum in der Kaltfalle gereinigt wird, sollte der Zwickelraum mehrere Stunden ggf. (1-2 Tage) bei der Benetzungstemperatur durchströmt werden. Dies ist deshalb erforderlich, da selbst durch die in den Modul eingebauten Leitbleche in einigen Teilbereichen des Zwickelraums lediglich eine sehr geringe Strömungsgeschwindigkeit realisierbar ist. Dadurch ergibt sich naturgemäß ebenfalls ein erhöhter Zeitbedarf bei der Benetzung.

Da während des Benetzens ebenfalls eine Fehlbedienung des Geodynamoversuchsstandes möglich ist, der ernsthafte Anlagenschäden nach sich ziehen kann, ist für den Benetzungsvorgang das Programm "**BENETZEN**" auf der speicherprogrammierbaren Steuerung des Betriebs vom Bediener zu wählen. Eine Auflistung der Verriegelungen und der Sicherheitsabschaltungen dieses Programms ist dem Anhang D3 in tabellarischer Form zu entnehmen.

4.5.3 Der Betrieb

Für den Betrieb der Geodynamoversuchsanlage muß das Programm **BETRIEB** an der SPS des Kreislaufs betätigt werden. Mit dieser vom Bediener auszuführenden Wahl werden alle sicherheitsrelevanten Verriegelungen der Betriebs-SPS und der SPS der Heizungssteuerung aktiviert. Damit wird die Gefahr einer Fehlbedienung der Anlage minimiert. Ein Sicherheits- und Verriegelungsplan kann dem Anhang D4 in Tabellenform entnommen werden. Da durch Betriebsfehler, die Anlagensicherheit in Frage gestellt wird, ist das Betriebsprogramm wie alle

anderen SPS-Programme auch ein Sicherheitsprogramm. Die Diskussion der einzelnen Abschaltungen erfolgt daher im Abschnitt 4.8.

Auf dem sich in der Schaltwarte des Geodynamoversuchstandes befindlichen Schalttafeln kann, sofern keine Verriegelung mehr aktiviert ist, die Anlage in Betrieb genommen werden. Die eigentliche Anlagensteuerung erfolgt über Taster, die auf den Schalttafeln angebracht sind. Die Anordnung der Schalttafeln der unterschiedlichen Systeme in der Schaltwarte des Geodynamoversuchsstandes ist der Abbildung 4.26 zu entnehmen.

Im Betrieb muß von Meßkampagnendauern in der Größenordnung von 2-3 Wochen ausgegangen werden. Da aber schon das Vorbereiten der Anlage und das Füllen mehrere Tage in Anspruch nimmt, wird während einer Meßkampagne das Fluid nicht abgelassen. Ist die Meßkampagne beendet, so werden zunächst die Natrium-Wasser-Sprühkühler ausgeschaltet und im Anschluß daran die Natriumpumpen. Da sich im Meßbetrieb das Natrium nahe des Schmelzpunktes befindet und dies im unbewachten Übernachtbetrieb ein erhöhtes Gefährdungspotential darstellt, werden die Begleitheizungen für den Übernachtbetrieb gesammelt auf eine Solltemperatur von 200°C eingestellt. Damit existiert im Falle eines Schadens (Ausfall des Stroms) eine hinreichend lange Zeitspanne, mit der ein sicheres Abfließen des Natriums in den Lagerbehälter gewährleistet ist.

4.6 Die Meßtechnik

Die meßtechnischen Geräte, die im Geodynamoversuchsstand eingesetzt werden sollen, können im wesentlichen in drei Gruppen aufgeteilt werden. Es ist dies zum ersten die Messung der magnetischen Feldstärke und zum zweiten die Messung der Betriebsparameter, wie zum Beispiel der Temperatur, des mittleren Volumenstroms, der Druckdifferenz etc. Die dritte Gruppe bilden die Geräte, die zu Sicherheitsabschaltungen oder als Überwachungseinheiten in Subsystemen eingesetzt werden, beispielsweise ein pH-Meter zur Prüfung der Dichtigkeit der Natrium-Wasser-Kühler.

4.6.1 Betriebskenngrößen

a.) Volumenstrommessung

Die genaue Kenntnis des Volumenstroms in jedem der Teilkreisläufe ist von herausragender Bedeutung bei Geodynamoexperiment, da sie den einzigen Kontrollparameter, der frei wählbar ist, im gesamten Experiment darstellt. Eine Änderung der Geometrie ist ausgeschlossen. Die mittlere Geschwindigkeit wird ebenso zur Berechnung der charakteristischen Kennzahlen, wie der magnetischen und hydraulischen Reynoldszahl benötigt. Aus diesem Grund ist vorgesehen, zwei in ihrem Meßaufnahmeprinzip gänzlich verschiedene Gerätearten einzusetzen.

Ein Durchflußmesser, der direkt den durch das Rohr strömenden Massenstrom aufnimmt ist der in Kapitel 4.3.3 beschriebene gyrostatistische Massendurchflußmesser. Da aber dieses Gerät

Der zweite eingesetzte Typus von Durchflußmessern ist ein elektromagnetischer (EM-) Durchflußmesser. Die Meßgröße ist die bei der Strömung eines elektrisch leitenden Mediums durch ein konstantes Magnetfeld induzierte Spannung. Der EM-Durchflußmesser kann nur mit dem jeweiligen Flüssigmetall und nach vollständiger Benetzung der Wand geeicht werden; das heißt, eine Eichung kann nur im Kreislauf selbst vorgenommen werden. Er wird mit Hilfe des gyrostatischen Durchflußmessers (GD) bei einem Durchsatz geeicht, der eine möglichst hohe Auflösung des gyrostatischen Durchflußmessers gewährleistet. Bei größeren Durchsätzen wird dann das experimentell abgesicherte lineare Verhalten des EM-Durchflußmessers zur Messung genutzt. Der Durchfluß \dot{V} läßt sich aus der induzierten Spannung $U_{\text{induziert}}$ ermitteln und ergibt sich zu,

$$\dot{V} = k_0 U_{\text{Induziert}} \left[m^3 / h \right] , \quad (4.7)$$

wobei k_0 den bei der Eichung ermittelten Proportionalitätsfaktor darstellt.

Die systematische Genauigkeit des EM-Durchflußmessers ist durch die Qualität der Benetzung der Wand, der Homogenität des Mediums (z.B. Gasblasen im Fluid ergeben ein kleineres Signal) sowie der Qualität der Eichung bestimmt. Da die Größe des Meßsignals durch die Größe des am EM-Durchflußmesser anliegenden Magnetfelds bestimmt ist, ist beim Einbau des Durchflußmessers darauf zu achten, daß kein anderes magnetisches Feld das Meßfeld stört, da sonst langwierige Kalibrierungen durchgeführt werden müssen. Das heißt, beim Einbau ist darauf zu achten, daß die EM-Durchflußmesser weder in direkter Nähe von Magnetfeldern noch in der Nähe von Starkstromleitungen angebracht werden.

b.) Thermoelemente

Für die Temperaturmessung im Geodynamoversuchsstand werden zwei Arten von Thermoelementpaarungen eingesetzt. Die Thermoelemente dienen dabei sowohl zur Temperaturüberwachung (Anzeigegrößen und Meßgrößen) als auch als Stellgrößen (Steuerung der Heizung). Im Bereich des Dynamomoduls werden keine ferromagnetischen Thermoelementpaarungen eingesetzt. Alle Thermoelemente dort sind Kupfer-Konstantan-Thermoelemente; sie sind im Betriebsinstrumentierungsplan (Abbildung 4.xx) mit der Abkürzung TC eingezeichnet. Auch für die Steuerung der Rohrbegleitheizungen auf dem Druckbehälter und am Modul werden lediglich Kupfer-Konstantan Thermoelemente eingesetzt. Alle anderen Thermoelemente des Kreislaufs also Betriebsanzeigen, Meßanzeiger und Heizungs-Ist-Größen sind Ni-CrNi-Thermoelementpaarungen. Sie sind im Betriebsinstrumentierungsplan mit dem Kürzel TN versehen.

Die elektrische Spannung beider Thermoelementpaarungen in Abhängigkeit von der Temperatur, sowie eine Korrelationsfunktion ist der Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Temperatur	Cu-Konst.	Ni-CrNi	Temperatur	Cu-Konst.	Ni-CrNi
0°	0.00	0.00	210°	9.74	8.54
10°	0.40	0.40	220°	10.29	8.94
20°	0.80	0.80	230°	10.85	9.34
30°	1.21	1.20	240°	11.41	9.75
40°	1.63	1.61	250°	11.98	10.16
50°	2.05	2.02	260°	12.55	10.57
60°	2.48	2.43	270°	13.13	10.98
70°	2.91	2.85	280°	13.71	11.39
80°	3.35	3.26	290°	14.30	11.80
90°	3.80	3.68	300°	14.90	12.21
100°	4.25	4.10	310°	15.50	12.63
110°	4.71	4.51	320°	16.10	13.04
120°	5.18	4.92	330°	16.70	13.46
130°	5.65	5.33	340°	17.31	13.88
140°	6.13	5.73	350°	17.92	14.29
150°	6.62	6.13	360°	18.53	14.71
160°	7.12	6.53	370°	19.14	15.13
170°	7.63	6.93	380°	19.76	15.55
180°	8.15	7.33	390°	20.38	15.98
190°	8.67	7.73	400°	21.00	16.40
200°	9.20	8.13	410°	21.62	16.82
Fitfunktion Polynom	A ₀	A ₁	A ₂	Temperatur Bereich	
Cu-Konst.	3.4834965	23.22235	-0.2128265	0°-410°C	
Ni-CrNi	-0.4179542	24.79475	-0.0201893	0°-380°C	

Tabelle 4.3: Elektrische Spannung der Thermolementpaarung Kupfer-Konstantan und Ni-CrNi als Funktion der Temperatur im Bereich von 0°-400°C. Die Temperaturfunktion berechnet sich aus der elektrischen Spannung U [mV] des Thermolementes zu $T [^{\circ}\text{C}] = A_0 + A_1 \cdot U [\text{mV}] + A_2 \cdot U^2 [\text{mV}]$.

c.) Druckmesser

Im Kreislauf sind drei Arten von Druckmeßgeräten eingebaut.

Auf der Gasseite befinden sich konventionelle Absolutdruckmanometer (P6-01, P7-01) mit elektrischen Ferngebern. Neben der Analoganzeige auf dem Zifferblatt wird der Druck auf

einem LED-Display in der Schaltwarte angezeigt. Die gleiche Bauart von Manometern wird auch auf der Wasserseite des Wasser-Wasserdampfsystems eingesetzt.

Im Sprühraum des Natrium-Wasser-Sprühkühlers kommen Piezoelemente zum Einsatz. Sie agieren als Grenzkontakte. Im Fall eines Natriumlecks im Kühler kommt es zu einer Wasserstoffproduktion und damit zu einem Druckanstieg. Übersteigt der Druck mehr als 1.8bar wird der Piezokristall so zusammengedrückt, daß die in ihm entstehende elektrische Spannung eine Sicherheitsabschaltung auslöst.

Alle für den Betrieb des Kreislaufs und die Durchführung der Experimente wichtigen Absolutdrücke (P1-01, P2-01, P3-01) und Druckdifferenzen (P1-04/2-04, P1-04/3-04) im Natriumkreislauf werden mit Hilfe unipolarer kapazitiver Membrandifferenzdruckmesser ermittelt. Das Arbeitsprinzip der Meßdosen ist in Graphik 4.27a. dargestellt. Die Meßmethode beruht darauf, daß bei der Auslenkung der Meßmembrane durch unterschiedliche Drücke in den Zuleitungen eine Kapazitätsdifferenz entsteht, die anschließend elektronisch in ein Signal 4-20 Milliampère in Zweileitertechnik umgewandelt wird.

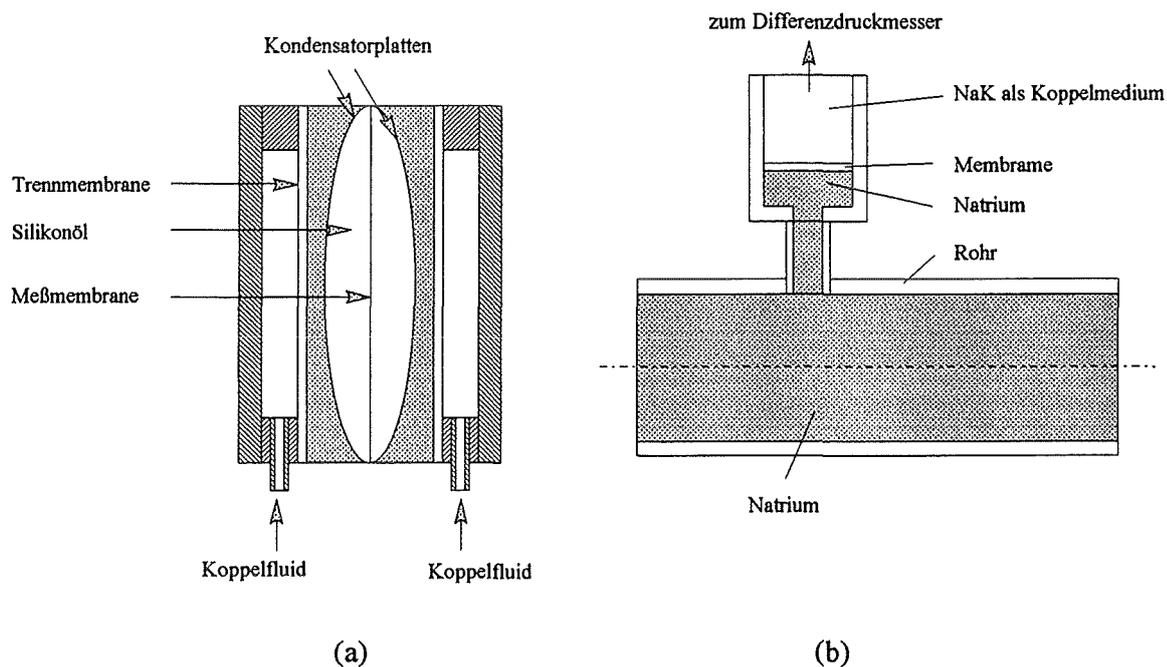


Abbildung 4.27: a.) Meßprinzip eines kapazitiven Differenzdruckmessers im GEODYNAMO-Versuchsstand. b.) Anschluß eines Differenzdruckmessers an eine natriumführende Rohrleitung.

Bei den Absolutdruckmessern ist die Niederdruckseite der Differenzdruckmesser mit der Atmosphäre verbunden. Da zum einen die hohe Temperatur des Natriums zu einer Zerstörung der Meßwertelektronik führen kann und darüber hinaus Natrium in der Meßmembran bei der

Nichtbeheizung der Membran einfrieren kann und damit die Membran zerstört, sind die Druckmeßgeräte mit einer Kopplungseinrichtung ausgerüstet. Die Verbindung der Meßzelle mit dem Natrium erfolgt über sogenannte NaK-Koppler. Diese NaK-Koppler sind Schläuche, die mit dem bei Raumtemperatur flüssigem Eutektikum Natrium-Kalium gasfrei gefüllt sind. Das an der Meßmembran anliegende Fluid ist also Natrium-Kalium. Die Einheit Meßmembran plus NaK-Koppler ist kommerziell erwerblich. Eine Schemaskizze des Druckmeßanschlusses ist der Abbildung 4.27b zu entnehmen.

Die Differenzdruckmesser haben einen maximalen Druckmeßbereich von 1bar. Da die Außenrohre der Drallerzeuger des Dynamos gegenüber äußerem Überdruck sehr empfindlich sind, erfolgt bei einem Differenzdruck, der an den beiden Meßstellen größer als 0.6bar ist eine Abschaltung der Axialkreislaufpumpe PPE1. Überschreitet der Absolutdruck am Eingang in den Dynamomodul 12bar so wird die jeweilige Pumpe über die Betriebs-SPS abgeschaltet.

d.) Höhenstandsmesser

Zur Höhenstandsmessung in den zwei relevanten Behältern (Ausgleichsbehälter, Lagerbehälter) werden zwei nach unterschiedlichen Meßmethoden arbeitende Höhenstandsmeßgeräte eingesetzt.

Die erste Meßmethode arbeitet nach dem Prinzip eines elektrischen Schalters. Es handelt sich hierbei um eine stromgespeiste Elektrode (eingesetzt in den Anzeigen E0-03, E0-06, E0-07, E6-02 und E7-02). Berührt flüssiges Natrium die Elektrode so entsteht ein elektrischer Kurzschluß. Mit dieser Meßmethode werden die Grenzwerte detektiert.

Speziell im Ausgleichsvolumen wird jedoch eine kontinuierliche Höhenstandsmessung benötigt, da sich das Natriumvolumen von 8m^3 bei einer Temperaturänderung von 100°C auf 350°C um ca. 435 Liter ausdehnt. Hierzu wird eine nach dem Induktionsprinzip arbeitende Füllstandsmeßsonde eingesetzt. Der eigentliche Meßkörper ist in einem Edelstahlhüllrohr eingelassen, damit er nicht mit Natrium in Kontakt kommt. Der zylindrische Meßkörper besteht aus zwei Induktionsspulen, einer sogenannten Primärspule und einer Sekundärspule. Beide Spulen sind ineinander gewickelt, aber hochohmig voneinander getrennt und liegen dicht beisammen. Die Primärspule wird mit einem Wechselstrom (Frequenz ca. 2-3kHz) erregt. Die Primärspule ist ohne das Flüssigmetall magnetisch dicht mit der Sekundärspule gekoppelt. Der physikalische Effekt des Flüssigmetalls beruht in einer Abschwächung dieser Kopplung. Wenn das Flüssigmetall um das Hüllrohr herum steigt, wird die gegenseitige Induktion entsprechend abgeschwächt, und die in der Sekundärspule induzierte Spannung sinkt. Sowohl im Lagerbehälter als auch im Ausgleichsbehälter ist ein derartiges Sondensystem eingebaut. Im Lagerbehälter beträgt die Meßlänge der Sonde 1200mm, im Ausgleichsbehälter ca. 800mm.

Aufgrund des Spulenmaterials ist der Einsatzbereich der Sonden auf 550°C beschränkt. Die Genauigkeit der Meßmethode beträgt $\pm 3\%$ der Meßlänge.

4.6.2 Magnetfeldmessung

Das sich bei dem homogenen Dynamoeffekt ausbildende Magnetfeld ist in seiner Grundstruktur dreidimensional. Die sich nach ersten Abschätzungen einstellende maximale Feldstärke wird in der Größenordnung 10-100 Gauss betragen und ist damit größer als die des Erdmagnetfeldes von 1.9 Gauss. Die Fluktuationen des Magnetfeldes liegen im Bereich um 0.1 Herz. Im Laboraufbau ist nicht vorgesehen, daß das Erdmagnetfeld, beispielsweise durch Helmholtzspulen kompensiert wird. Im Experiment sind zwei Meßmethoden vorgesehen um die magnetische Induktion sowohl lokal als auch global zu messen. Mit einer weiteren Meßmethode wird das elektrische Potential auf dem Modul gemessen.

Die lokale Messung der magnetischen Feldstärke erfolgt in der Zylinderachse des Dynamomoduls. In den Modul ist hierzu ein durchgehendes Rohr mit dem Innendurchmesser von 52mm eingelassen. In diesem Rohr soll eine zweiachsige Hall-Sonde, die das poloidale wie auch das toroidale Feld mißt, entlang der Modulachse verfahren werden. Die Meßaufnehmer sind hinreichend klein (ca. 1cm), um die Magnetfeldschwankungen zu detektieren. Die Sensitivität solcher kommerziell erhältlicher Hall-Sonde beträgt ± 0.01 Gauss und ist somit hinreichend gut für das Experiment. Da die Hall-Sonden jedoch nur bis maximal +125°C betrieben werden können, werden sie mit Preßluft zwangsgekühlt.

Die zweite Meßmethode beruht auf dem Induktionsprinzip. Hierzu werden Induktionsspulen eingesetzt. Ändert sich die Magnetfeldstärke zeitlich, so induziert sie in den Spulen eine elektrische Spannung. Diese Spannung ist umso größer je mehr Wicklungen n die Spule besitzt. Damit beide Komponenten des Magnetfeldes lokal erfaßt werden, werden zwei Induktionsspulen, deren Achsen senkrecht aufeinanderstehen zusammen mit der Hall-Sonde im Modul verfahren.

Analog zu den lokalen Sonden werden zwei Induktionsspulen zur Messung des globalen Magnetfeldes eingesetzt. Eine Spule, die um den zylindrischen Mantel des Moduls gewickelt ist, mißt das poloidale zeitlich veränderliche Feld. Die andere Induktionsspule, die durch die Modulachse und dann um den Außenraum gewickelt ist, mißt das toroidale zeitlich veränderliche Feld. Die Anordnung der globalen Magnetfeldspulen ist der Abbildung 4.28 zu entnehmen.

Da die Magnetfelder durch einen elektrischen Stromfluß im fließenden Medium entstehen, ergeben sich elektrische Potentialdifferenzen, die den elektrischen Strom treiben. Da in den Modul selbst keine weiteren Potentialsonden eingebaut werden sollen, um die magnetische Diffusion dort nicht weiter herabzusetzen, werden am elektrisch leitenden Außenmantel

elektrische Potentialsonden angebracht. Durch ein ganzes Feld von elektrischen Potentialsonden können somit die elektrischen Ströme, die auf den Mantelflächen fließen abgebildet werden. Mithilfe einer schnellen Datenerfassung kann der zeitliche Ablauf des Stromflusses erfaßt und visualisiert werden. Vorgesehen ist zunächst der Einsatz von 64 Potentialsonden auf dem zylindrischen Außenmantel des Moduls. Die Oberflächenpotentialmessung ergibt sich aus der Messung eines diskreten Punktes gegenüber einem Referenzpunkt. Da die Messung stromlos erfolgt, und die Spannungsquelle extrem niederohmig ist, müssen keine besonderen Korrekturen berücksichtigt werden. Es muß lediglich ein elektrischer Kontakt zwischen dem Meßstift und der Wand vorliegen.

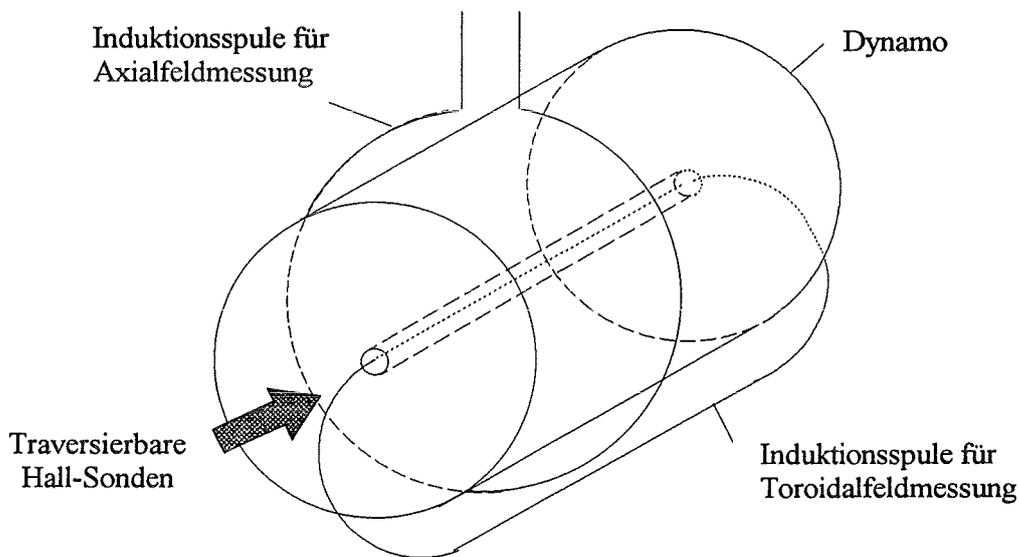


Abbildung 4.28: Anordnung der Induktionsspulen zur Messung des poloidalen und toroidalen zeitlich veränderlichen Magnetfeldes in der Dynamoanlage.

In den ersten Versuchsläufen soll die kritische magnetische Reynoldszahl, also der kritische Durchsatz, bestimmt werden, ab dem es zu einem zeitlichen Anwachsen des Magnetfeldes kommt. Eine Methode, mit der dieser kritische Volumenstrom ermittelt werden kann, besteht darin, daß ein hinreichend starkes äußeres Magnetfeld als Anfangsstörung angelegt wird. Dieses Störfeld wird zum Zeitpunkt $t=t_0$ ausgeschaltet. Nach dem Ausschalten des Störfeldes kommt es zu einem Abklingen des Magnetfeldes. Nähert sich der im Experiment eingestellte Volumenstrom dem kritischen Durchsatz, so wird die Abklingzeit des Magnetfeldes immer länger, bis schließlich beim Überschreiten des kritischen Durchsatzes die Magnetfeldstärke langsam anwächst. Aus der Ermittlung der Zeit, in denen das äußere Feld auf den x-ten Teil seines Ursprungswertes abgefallen ist, läßt sich der kritische Volumenstrom zum Erreichen der Dynamobedingung mit großer Genauigkeit ermitteln. Dieses Verfahren erlaubt es, den kritischen Durchsatz zu ermitteln, ohne die Anlage auf Vollast zu belasten.

Bei diesem Verfahren müssen jedoch mehrere Punkte berücksichtigt werden. Das angelegte Störfeld kann aufgrund der räumlichen Gegebenheiten lediglich ein Feld sein, dessen Achse parallel zur Zylinderachse des Dynamos verläuft (Poloidalfeld). Aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkung zwischen dem angelegten Feld und der Strömung werden elektrische Ströme induziert. Diese elektrischen Ströme bewirken eine Lorentz-Kraft, die der Strömungsrichtung entgegengesetzt wirkt, und damit einen erhöhten Druckverlust im Leitungssystem bewirkt. Damit die Lorentz-Kräfte nicht zu groß werden, darf die Kennzahl, die das Verhältnis von elektromagnetischen Kräften zu viskosen Kräften beschreibt, allerhöchstens von der Größenordnung eins (!) sein. Die Kennzahl, die elektromagnetische Kräfte und viskose Kräfte gegeneinander wichtet, ist die Hartmann-Zahl M . Sie ist wie folgt definiert.

$$M = \sqrt{\frac{\text{elektromagnetische Kräfte}}{\text{viskose Kräfte}}} = a B_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho v}} \quad (4.8)$$

Das Poloidalfeld beeinträchtigt nicht die Strömung im axialen Kreislauf, da dort Geschwindigkeit und Magnetfeldvektor parallel sind.

Der kritische Bereich ist die Helikalströmung, in der durch die Wendeln die Strömung nahezu senkrecht zum Störfeld verläuft. Als charakteristische Abmessung a geht somit in die Gleichung das Produkt aus Wendelabstand und Neigung der Wendel ein. Läßt man eine maximale Hartmann-Zahl von 3 zu ergibt sich eine höchstzulässige Störfeldmagnetstärke von 130Gauss. Die Zahl $M=3$ erscheint groß. Dennoch muß man folgendes bedenken:

Das äußere angelegte Störfeld entspricht bei weitem nicht dem am meisten begünstigten Magnetfeldtypus. Nach dem Abschalten des Störfeldes muß sich im Dynamo zuerst der am meist begünstigte Mode ausbilden - dabei klingt das Störfeld schon stark ab-. Erst im Anschluß daran klingt das Feld entsprechend dem Abklingen des am meisten begünstigten Modes ab. Ist also das Ursprungsstörfeld zu klein, so kann man das zeitliche Abklingen des am meist begünstigten Magnetfeldmodes nicht mehr auflösen und somit den kritischen Durchsatz nicht mehr bestimmen. Rein qualitativ kann man sich das zeitliche Abklingen des Magnetfeldes nach dem Abschalten des äußeren angelegten Störfeldes wie in Grafik 4.29 abgebildet vorstellen.

Darüber hinaus bietet das Anlegen eines äußeren Störfeldes die Möglichkeit zu Untersuchungen, ob ein Magnetfeld mit einer entgegengesetzten Polarität möglich ist.

Es ist im Experiment vorgesehen, daß ein Magnetfeld der geplanten Stärke mittels zweier Helmholtzspulen erzeugt wird. Die zylindrischen Spulen sollen so im Druckbehälter angeordnet werden, daß deren Verbindungsachse mit der Achse des Dynamos zusammenfällt, siehe Abbildung 4.30. Die Spulen werden mit Gleichstrom beaufschlagt. Die stromführenden Leitungen werden durch den Druckbehälter geführt.

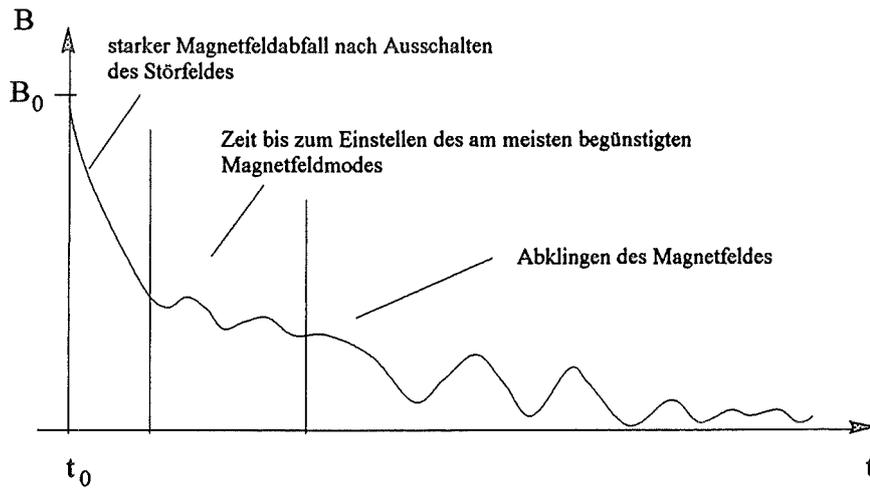


Abbildung 4.29: Qualitativer Verlauf des zeitlich abklingenden Magnetfeldes.

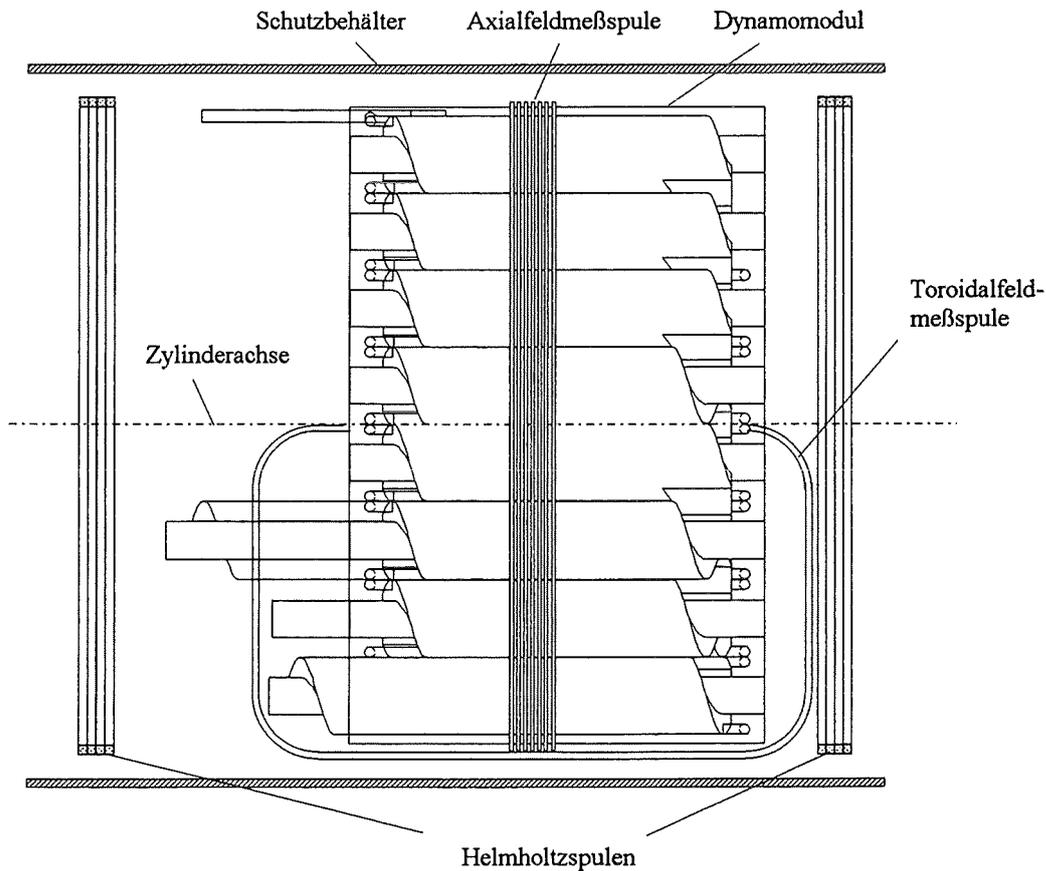


Abbildung 4.30: Anordnung der Helmholtzspulen im Dynamo der Geodynamo-versuchsanlage.

4.6.3 Datenerfassung

Die Datenerfassung für die Dynamoversuchsmessung erfolgt über einen IBM-kompatiblen Personal-Computer (PC). Der PC übernimmt während des Versuchs folgende Aufgaben:

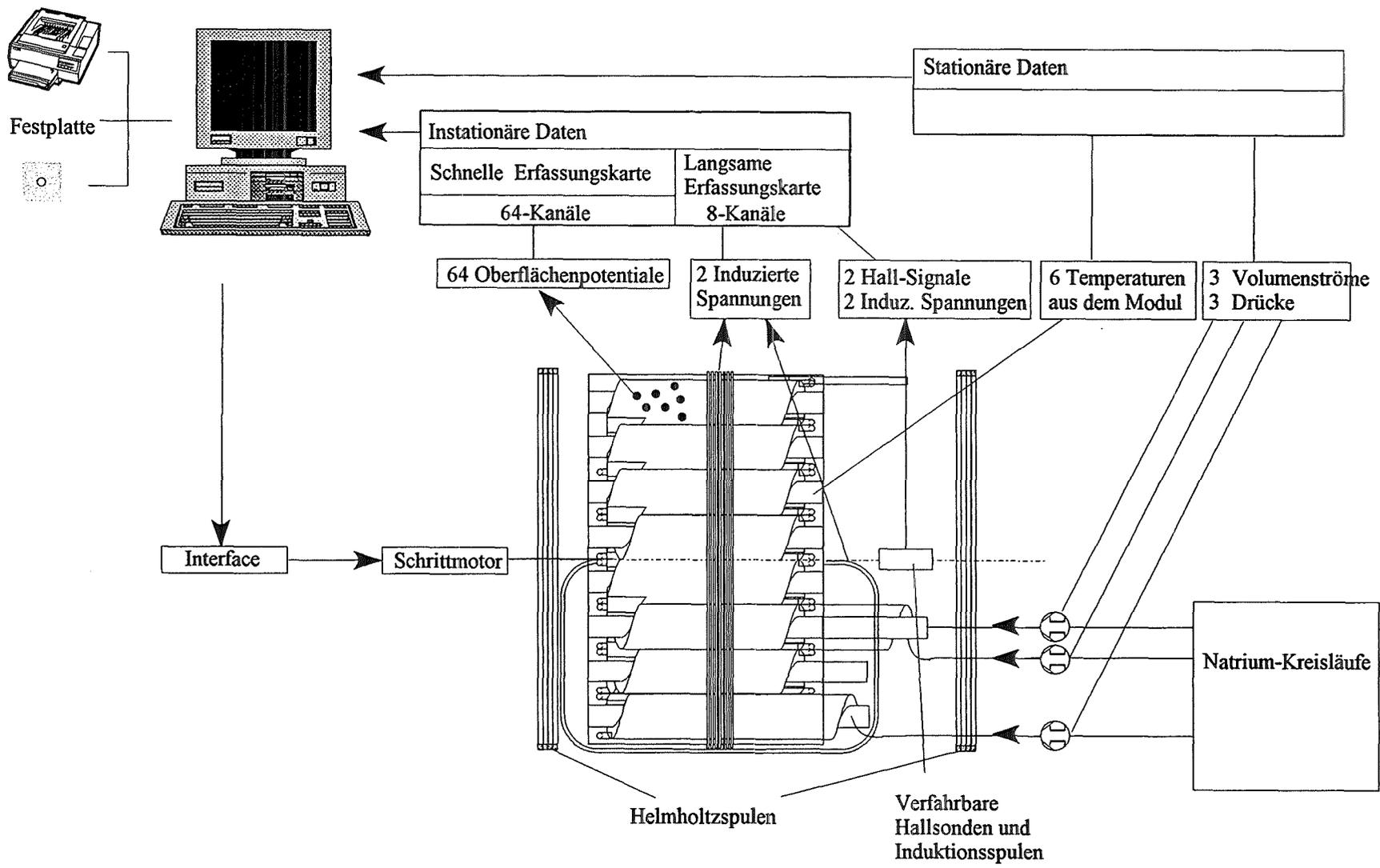
1. Ansteuerung der Datenerfassungshardware (Meßgeräte, Datenerfassungskarten, Schrittmotoren, Interface, etc.)
2. Datenreduktion und Datensicherung (Softwaresteuerung)
3. Anlagensteuerung (Verfahren der Schrittmotoren und Sonden)

Den Kernpunkt der Datenerfassung stellt die Meßstellenliste dar. Innerhalb der Meßstellenliste ist zwischen stationären und instationären Erfassungswerten zu unterscheiden. Ein Blockschaltbild der Datenerfassung ist in der Abbildung 4.31 zu sehen. Eine voraussichtliche Meßstellenliste ist der Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Meßstellennr.	Bezeichnung	Meßart		Meßzweck
		stationär	instationär	
1	Hall-Sonde 1		x	Magnetfeld poloidal (lokal)
2	Hall-Sonde 2		x	Magnetfeld toroidal (lokal)
3	Ind.-Spule 1		x	Magnetfeld poloidal (lokal)
4	Ind.-Spule 2		x	Magnetfeld toroidal (lokal)
5	Ind.-Spule 3		x	Magnetfeld poloidal (global)
6	Ind.-Spule 4		x	Magnetfeld toroidal (global)
7 → 70	Potentiale		x	Oberflächenpotentiale
71 → 77	Temp. im Modul 1-6	x		Berechnung der mittleren Modultemperatur
78 → 80	Volumenströme in den Natrium-Kreisläufen	x		Berechnung der magnetischen Reynoldszahl
81 → 83	Druck in den Natrium-Kreisläufen	x		

Tabelle 4.4: Vorläufige Meßstellenliste für den Geodynamoversuchsstand

Abbildung 4.31: Geplantes Datenerfassungssystem des Geodynamoversuchsstandes.



4.7 Die Betriebsüberwachung (Anlagensteuerung)

Die Betriebsüberwachung erfolgt grundsätzlich über zwei speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), die weitestgehend getrennt voneinander operieren. In der einen SPS sind alle sicherheitsrelevanten Abschaltungen und Verriegelungen der die Kreisläufe betreffenden Komponenten festgehalten. In dieser Betriebs-SPS sind, wie in Kapitel 4.5 aufgeführt, drei unterschiedliche Programme wählbar. Die Sicherheitsabschaltungen und Verriegelungen der drei Programme sind im Anhang D2-D4 tabellarisch aufgeführt.

Mit der Heizungs-SPS werden alle Rohrbegleitheizungen entsprechend dem vom Benutzer vorgewählten Programm in ihren relevanten Parametern eingestellt. Eine nähere Erläuterung findet sich im Kapitel 4.7.1.

Für beide SPS besteht eine Pufferung über ein Notstromaggregat, sodaß bei Stromausfall ein sicheres Abfahren der Anlage gewährleistet ist. Sollte die Betriebs-SPS ausfallen, so werden alle Ventile über eine Automatik aufgefahren und alle anderen Aggregate abgestellt. Hierfür stehen batteriebetriebene Energiespeicher zur Verfügung. Für den Fall eines Ausfalls der Heizungs-SPS existieren mehrere Reglergruppen, mit denen die Natriumleitungen solange beheizt werden können, bis das Natrium sicher in den Lagerbehälter abgelaufen ist. Eine detailliertere Schilderung der einzelnen Abläufe erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

Ein Bedienungsflußschema ist in der Abbildung 4.32 zu sehen.

4.7.1 Die Heizungssteuerung

Ein zweites von dieser Betriebsüberwachung unabhängiges System ist die Heizungsansteuerung. Kernstück der Heizungssteuerung ist eine speicherprogrammierbare Steuerung der Firma SIEMENS (Simatic S5). In ihr erfolgt ein Sollwert (Temperaturbereich, der vom Anlagenbediener vorgegeben wird) Istwert (Temperatur, die das Thermoelement an der jeweiligen Teststrecke mißt) Vergleich. Mit diesem Soll-Istwert-Vergleich werden die Leistungsteile der Rohrheizkörper angesteuert.

Die Heizungs-SPS wird über einen PC gesteuert, der über eine Schnittstelle mit der SPS kommuniziert. In diesem PC läuft eine Software ab, mit der zum einen die SPS die aktuellen Istwerte der Heizung an den PC meldet und zum anderen die charakteristischen Daten der Heizung festgelegt werden können. Das Heizungsprogramm läuft somit auf zwei Ebenen.

Im Heizungsprogramm auf dem PC gibt der Benutzer vor, welche Art der Aufheizung erfolgen soll. Dabei sind die Standardprogramme wählbar, wie zum Beispiel:

ANWÄRMEN (Vorwärmen der Anlage wird für den Füllvorgang benötigt)

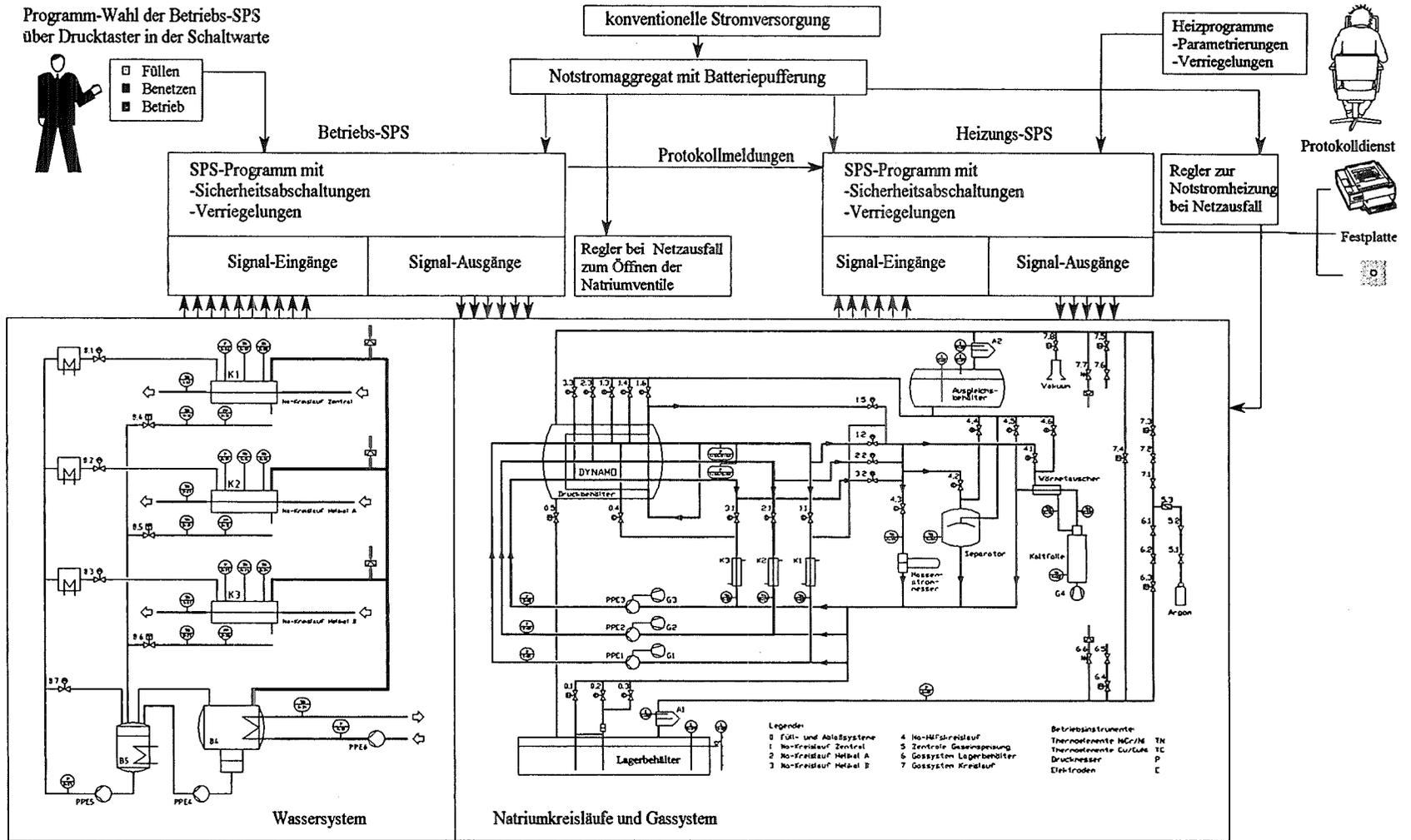
FÜLLEN

BENETZEN (Kaltfallenbetrieb)

BETRIEB

Abbildung 4.32:

Steuerschema für den Betrieb der Geodynamoversuchsanlage.



Diese Programme sind mit all ihren Daten schon in einer Bibliothek abgelegt. In dieser Bibliothek des jeweiligen Programms sind für alle Heizstrecken die folgenden Daten schon enthalten:

1. Minimaltemperatur
2. Solltemperatur
3. Voralarmtemperatur
4. Maximaltemperatur

Die Software überprüft weiterhin ob die Thermoelemente kurzgeschlossen sind, bzw. ob sie offen sind (Drahtbruchsicherung) und gibt in diesem Fall eine Meldung mit der entsprechenden Meßstelle auf dem Bildschirm und gegebenenfalls auf dem Drucker aus.

Als weitere frei wählbare Methode zum Fahren der Anlage können eigene Heizprogramme erstellt werden. Dieses Programm erlaubt es jeder Heizung einzeln die 4 charakteristischen Werte zuzuweisen. Da das Gesamtsystem aus ca. 350 Heizstrecken besteht- jede Heizstrecke besteht aus einem Thermoelement und einem Rohrheizkörper- sind einzelne Abschnitte in Gruppen unterteilt. Über eine Steuerungssoftware kann der Benutzer die oben angegebenen Werte 1.-4. gesammelt einer Gruppe zuweisen, aber auch einzelne Werte einstellen. Die einzelnen Heizungsgruppen sind am PC in einem zentralen Prozeßschaltbild farbig unterschiedlich dargestellt. In der Abbildung 4.33 ist dieses zentrale Prozeßschaltbild dargestellt. Die Wahl, welche Heizungsgruppe der Benutzer einstellen möchte bzw. bearbeiten möchte, erfolgt in der Software über Funktionstasten. Generell schließt die Software die Eingabe unsinniger oder sich widersprechender Daten aus.

Die Software erlaubt eine zeitgesteuerte Datensicherung. Eventuell auftretende Fehler (Überschreiten der Maximaltemperatur etc.) werden in einem Fehlerprotokoll als Datei abgelegt, auf dem Bildschirm visualisiert und können sofern vom Bediener gewünscht auf einem Drucker ausgegeben werden.

Die Daten der Temperaturen werden in Dateien in Tabellenform abgelegt, sodaß sie von kommerziellen Softwarepaketen weiterverarbeitet werden können.

Um die zeitlichen Aufheizraten auf dem Bildschirm mitverfolgen zu können, steht dem Benutzer eine Trendanzeige zur Verfügung. Durch eine Wahl Taste kann er bis zu 6 beliebige Meßstellen herausgreifen und auf dem Bildschirm im zeitlichen Verlauf anzeigen lassen.

Werden Heizungsprogramme vom Bediener geändert, so kann man sie vom Rechner über die Schnittstelle an die SPS der Heizungssteuerung senden. Die SPS übernimmt dann die weitere Ansteuerung der Heizungen.

Der Informationsweg der gesamten Heizungssteuerung des Geodynamoversuchsstandes ist der Abbildung 4.34 zu entnehmen. Ausgehend vom Heizungsüberwachungs-PC erfolgt über eine Schnittstelle die Kommunikation mit der SPS der Heizungen (SIEMENS Simatic S5-135U). Das jeweilige Heizprogramm mit allen Grenzwerten wird vom PC über die Schnittstelle und die Zentralrecheneinheit (CPU) der SPS an den Speicher der SPS gesendet. In der CPU der SPS erfolgt ein Vergleich des IST-Wertes des Thermoelementes mit den jeweiligen Grenzwerten. Entsprechend diesem Vergleich wird über die digitalen Ausgänge der SPS der jeweilige Zweipunktregler angesteuert.

Je nach Signal von der SPS schließt der Zweipunktregler den Heizkreis und der Rohrheizkörper heizt oder er öffnet den Heizkreis.

Am Thermoelement, das sich auf dem Rohrheizkörper befindet, liegt je nach Temperatur eine gewisse Spannung an. Sie stellt den IST-Wert dar. Über eine Vergleichsstelle und einen Multiplexer, der der Meßstelle eine bestimmte Adresse zuweist, gelangt das Signal in den Analogeingang der SPS. Dort findet wieder der SOLL-IST-Wert Vergleich statt.

Zeigen die Rohrheizkörper auf den Natriumventilen eine Temperatur, die in der Nähe des Schmelzpunktes des Natriums liegt, so meldet die SPS der Heizungssteuerung dies der SPS, die den Betrieb der Anlage steuert.

Wenn es zu einem Ausfall der Heizungssteuerungs-SPS kommt, muß eine Notheizung vorgesehen werden. Zu diesem Zweck stehen 10 Regler bereit, die die Rohrbegleitheizungen bis zu ca. 2 Stunden so beheizen, daß das Natrium in den Leitungen nicht eingefriert und ein geordnetes Ablassen des Natriums in den Sumpfbehälter gewährleistet wird. Diese Notheizung wird automatisch beim Ausfall der Heizungs-SPS aktiviert.

4.7.2 Die Betriebsinstrumentierung

Die Überwachung der Eckdaten der Natriumkreisläufe, des Wasser-Wasserdampfsystems, des Dynamotestmoduls sowie des Gassystems erfolgt für jedes der vier Systeme in drei Ebenen. Es ist vorgesehen aktuell vorliegende charakteristische Daten über Anzeigeelemente (Display), die in der Schaltwarte in die Bedientafeln integriert sind, in ihrem ISTWERT anzuzeigen. Um die zeitliche Entwicklung einiger spezifischer Meßdaten verfolgen zu können, sind zwei 32-Kanal-Schreiber in der Schaltwarte eingebaut. Mit den Schreibern kann der Verlauf der Betriebsmeßdaten abgelesen und analysiert werden. Die Betriebsinstrumente, die hauptsächlich bei Überschreiten bestimmter Grenzwerte eine Sicherheitsabschaltung auslösen, sind lediglich mit der speicherprogrammierbaren Steuerung des Betriebs gekoppelt und werden weder in einem Anzeigedisplays noch auf einem Schreiber visualisiert.

Die vollständige Liste der Betriebsinstrumente mit ihren Bezeichnungen, der Art des Meßaufnehmertyps und der Visualisierungsart ist der Tabelle im Anhang D1 zu entnehmen. Auf den Schemaskizzen 4.35-4.36 sind die Orte der einzelnen Meßaufnehmer und die Meßstellenbezeichnungen für die entsprechenden Systeme angegeben. Die Anzeigeelemente,

die in den Schalttafeln in der Schaltwarte integriert sind, können den Abbildungen 4.37 und 4.38 entnommen werden.

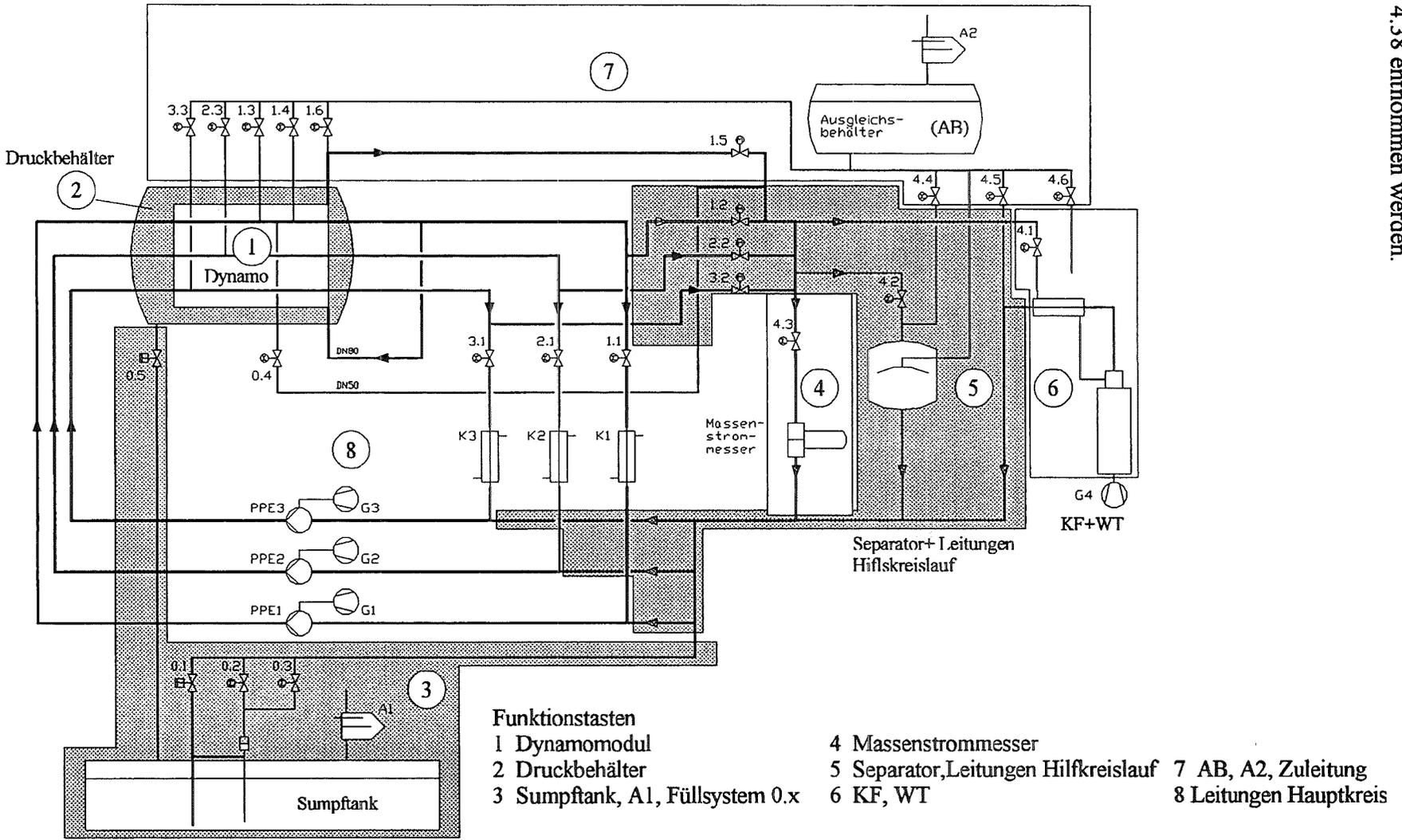


Abbildung 4.33: Zentrales Prozessschaltbild des PC's der Heizungssteuerung.

- Funktionstasten**
- 1 Dynamomodul
 - 2 Druckbehälter
 - 3 Sumpftank, A1, Füllsystem 0.x
 - 4 Massenstrommesser
 - 5 Separator, Leitungen Hilfskreislauf
 - 6 KF, WT
 - 7 AB, A2, Zuleitung
 - 8 Leitungen Hauptkreis
- Funktionstasten-Service**
- D Protokolldienst
 - P Programme
 - M Messen
 - T Trendanzeige
- ESC Programm beenden

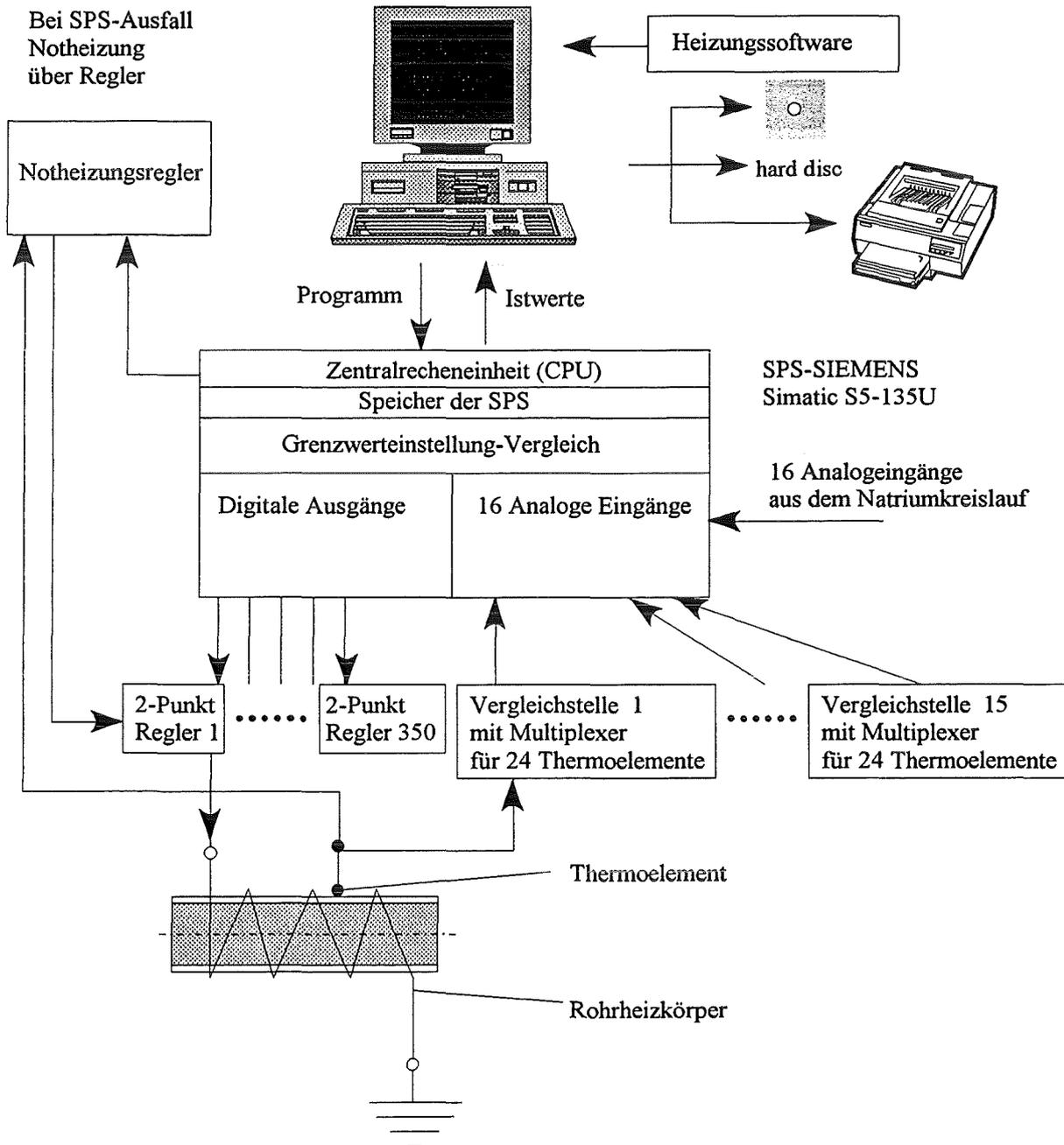
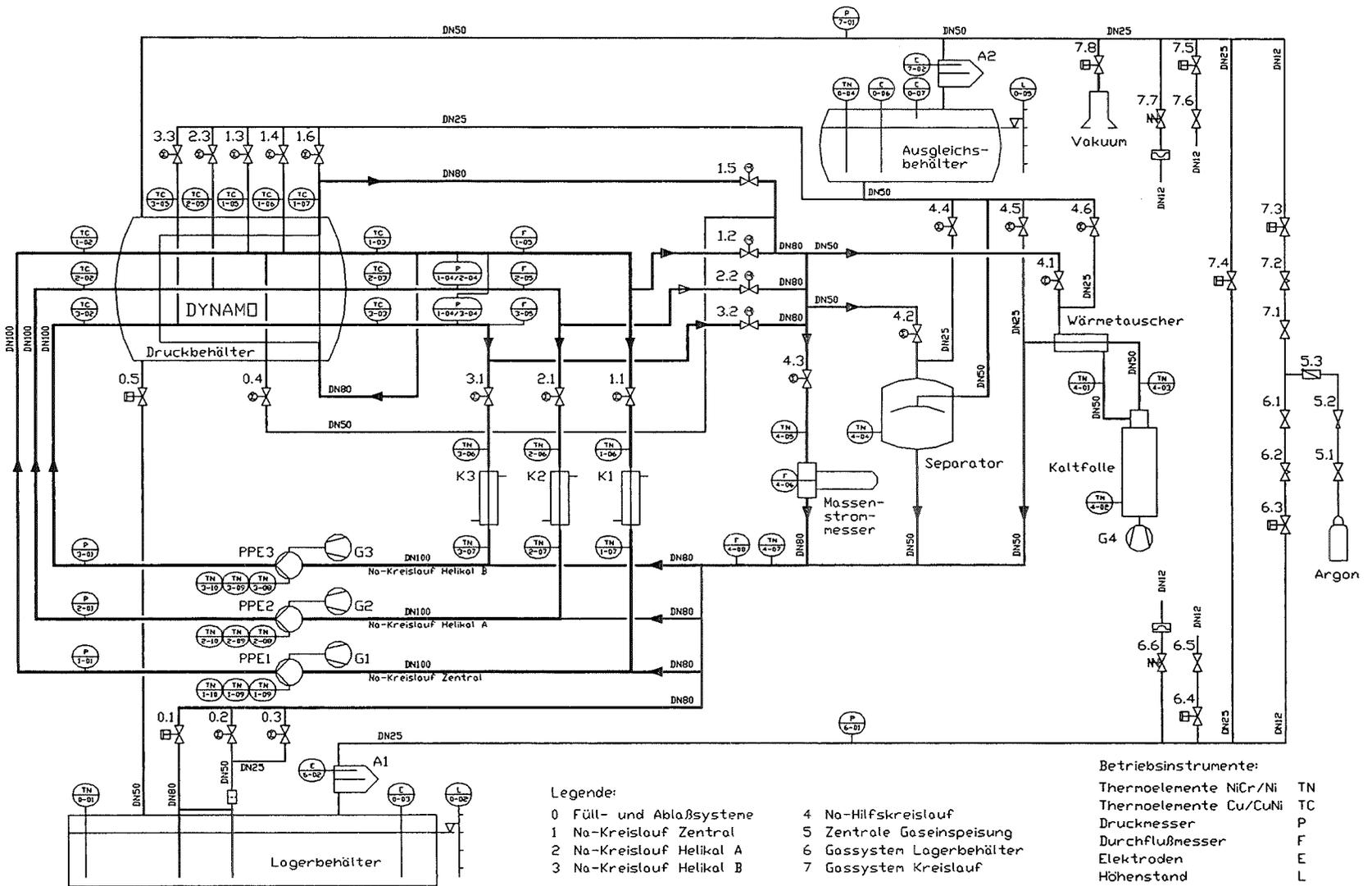


Abbildung 4.34: Signalverarbeitung der Heizungsteuerung im Geodynamoversuchsstand.

Abbildung 4.35: Betriebsinstrumente der Natriumkreisläufe und des Gassystems des Geodynamversuchsstandes.



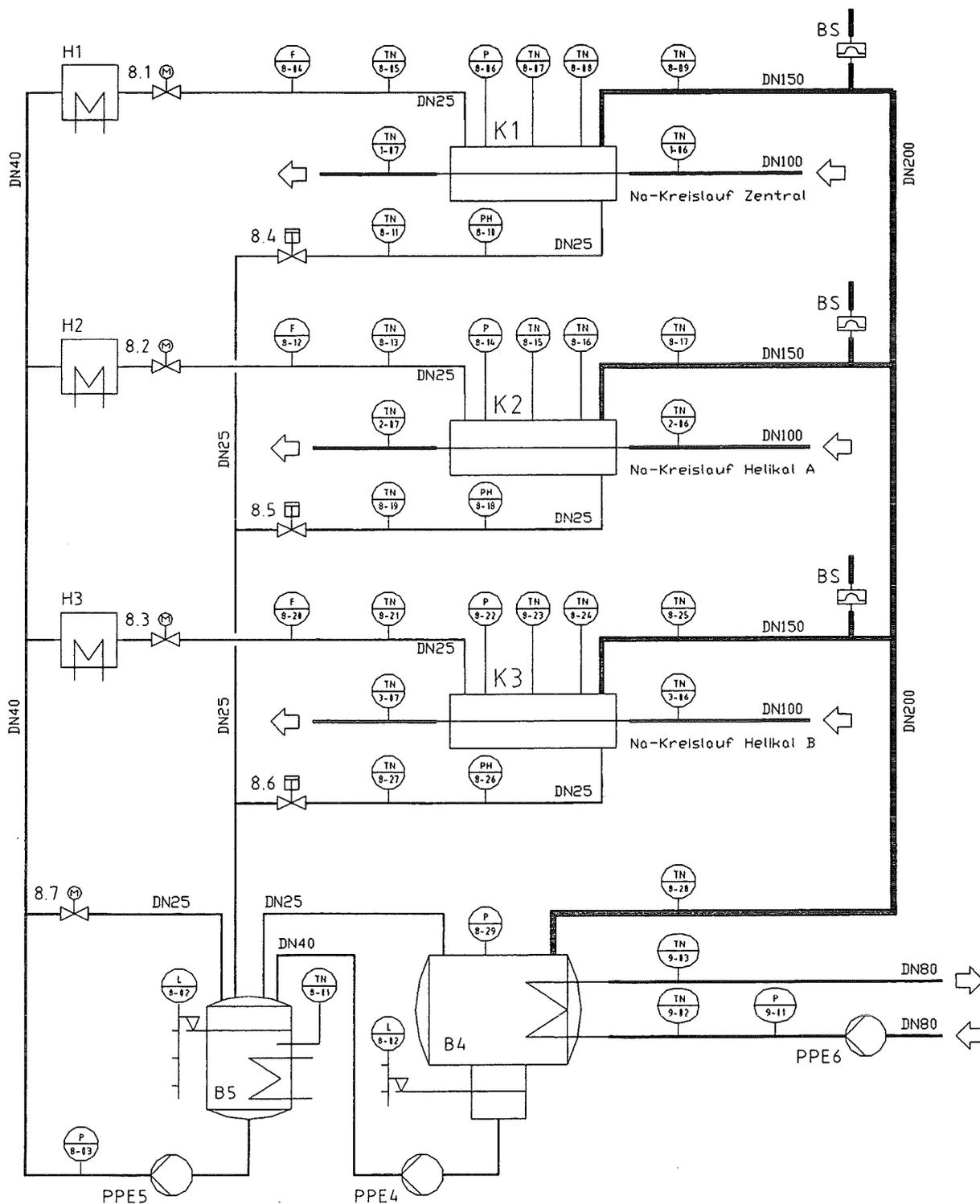
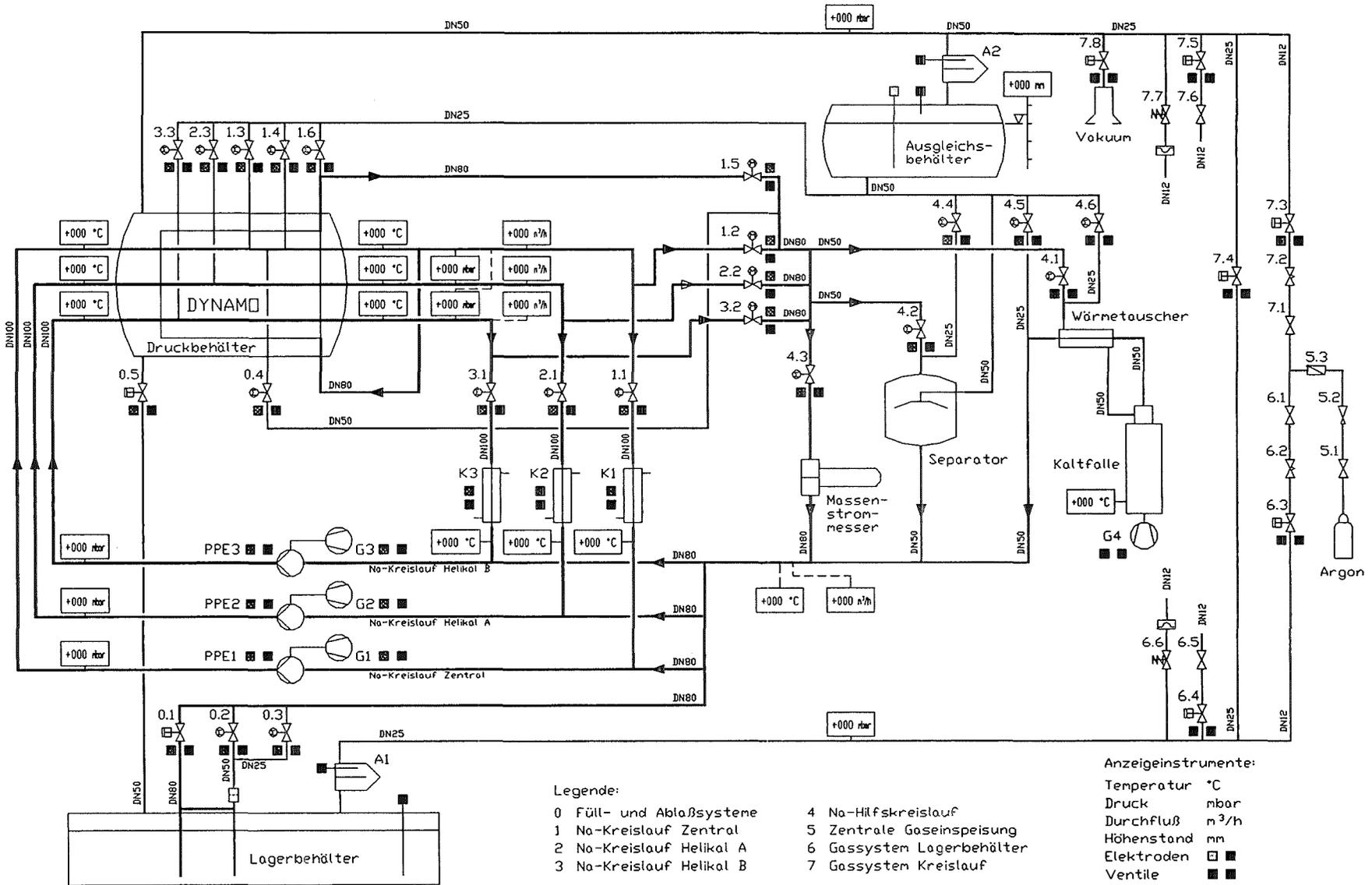


Abbildung 4.36: Betriebsinstrumente des Wasser-Wasserdampfsystems des Geodynamo-versuchsstandes.

Abbildung 4.37: Anzeiginstrumente der Natriumkreisläufe und des Gassystems des Geodynamversuchsstandes.



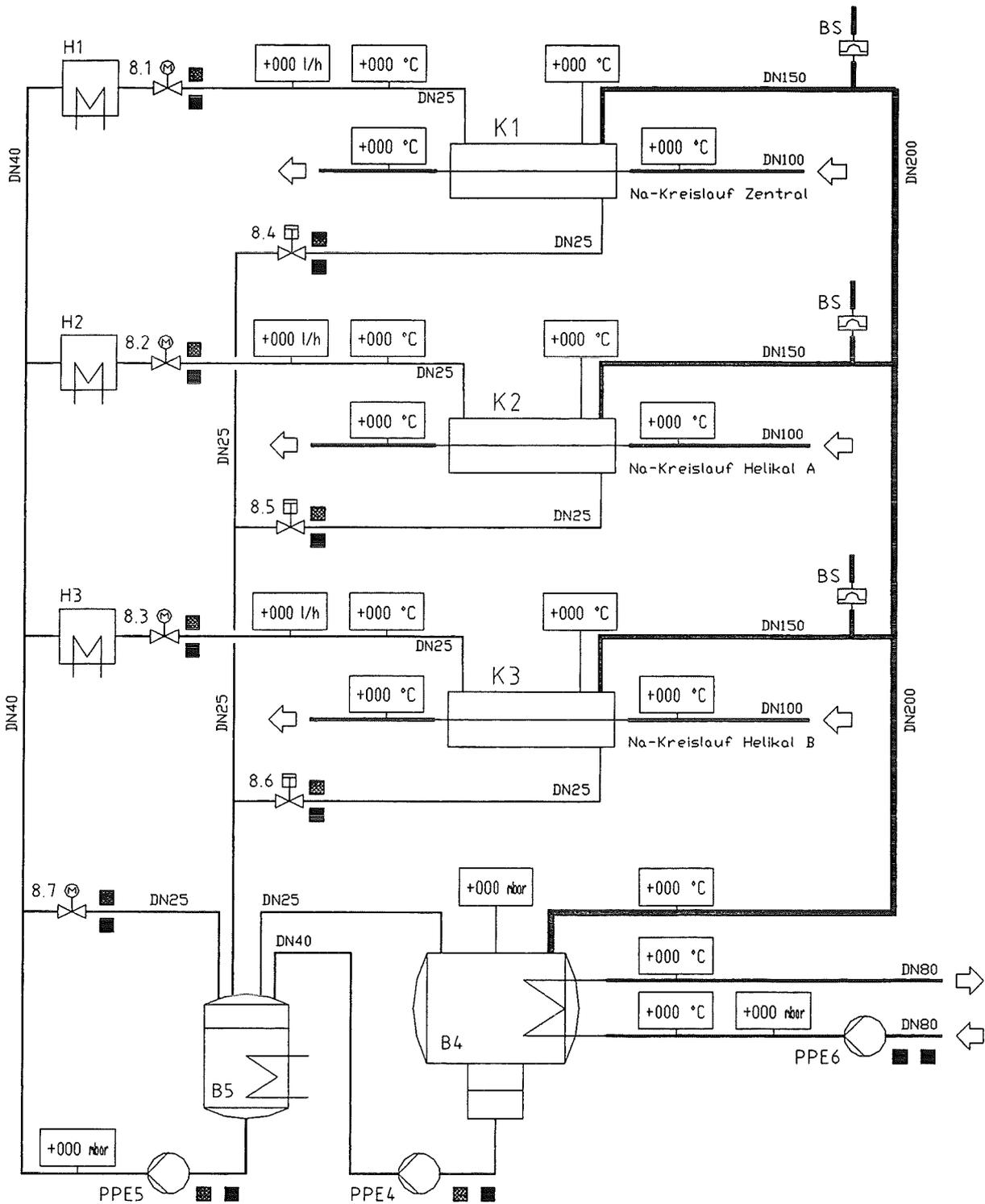


Abbildung 4.38: Anzeigeeinstrumente des Wasser-Wasserdampfsystems des Geodynamo-versuchsstandes.

4.8 Die Sicherheitseinrichtungen

Im Geodynamoversuchsstand bestehen generell vier Sicherheitsebenen.

Die erste und wichtigste Sicherheitsebene bildet das Design des Versuchsstandes.

Der Versuchsstand ist so ausgelegt, daß selbst bei extremen Bedienungsszenarien keinerlei Gefahr für den Anlagenbetreiber besteht. Dies bezieht sich sowohl auf das Rohrleitungsnetz als auch auf alle eingesetzten Behälter. Ihre Temperatur- und Druckverträglichkeit liegt deutlich über den von den aktiven Anlagenelementen erzeugbaren Belastungen. Für die Behälter, für die dies nicht zutrifft, ist eine passive Art der Sicherung vorgesehen. Dies gilt für den Dynamomodul, den Gasseparator und den Ausgleichsbehälter.

Der Dynamomodul ist von einem Druckbehälter umgeben, dessen Volumen so groß ist, daß er mehr Volumen faßt als das Natriuminventar der Gesamtanlage beträgt. Im Fall eines Natriumlecks sind elektrische Kontaktleckmelder auf dem Boden des Druckbehälters ausgelegt, die bei einem Kurzschlußkontakt einen Notablaß des Natriums in den Lagerbehälter einleiten. Die Leckmelder bestehen aus zwei ohmisch getrennten auf einer elektrisch isolierenden Matrix angebrachten Leiterschleifen. Sie werden mit 20mA gespeist. Bei einem Natriumleck schließt das Natrium die beiden Leiterschleifen elektrisch kurz. Das Kurzschlußsignal wird an die SPS weitergeleitet, die ihrerseits mit dem Ablaß des Natriums in den Sumpfbehälter reagiert.

Der Ausgleichsbehälter ist so angeordnet, daß in ihm keine Drücke über 3 bar auftreten können. Der Gasseparator befindet sich auf der Niederdruckseite hinter dem Modul, so daß die möglichen Drücke dort ebenfalls klein sind. Die Absperrereinrichtung ist vor dem Separator angebracht, sodaß bei einem Schließen der Hauptventile des Kreislaufs (1.1, 2.1, 3.1) und dem Schließen des Ventils 4.2 der eventuell hohe Druck am Ventil und nicht am Behälter anliegt.

Die zweite Sicherheitsebene, die die Anlage im wesentlichen vor groben Bedienungsfehlern schützt, wird durch die SPS des Betriebs und der Heizungen gebildet.

Beide SPS sind weitestgehend getrennt, damit bei einem Ausfall eines der beiden Systeme die Verfügbarkeit der Anlage geringstmöglich beeinträchtigt wird. In beiden Systemen besteht eine Vielzahl von Sicherheits- und Verriegelungssperren. Für beide SPS besteht eine detaillierte Ereignis-Maßnahmenliste in der alle möglichen Ereignisse erfaßt sind, die zu einem Anlagenschaden führen könne. Sie ist im Anhang D ausführlich in Tabellenform aufgelistet. Aufgrund der unterschiedlichen Bedienungszustände existieren unterschiedliche Ereignis-Maßnahmen-Listen. Die SPS-Sicherheitsebene ist bei einem Stromausfall über ein Notstromsystem, das batteriegepuffert ist, so geschützt, daß die Anlage gesichert abfahren kann.

Die dritte Sicherheitsebene, die automatisch aktiviert wird, sofern die beiden Steuerungssysteme (Betriebs- und Heizungs-SPS) ausfallen, bilden Ventilsteuerung und ein Notheizungssystem. Diese Sicherheitsebene wird vom Notstromsystem gespeist und garantiert eine sichere Abschaltung der Anlage so, daß der Betrieb aufrechterhalten werden kann, bis sich das gesamte Natriuminventar im Lagerbehälter befindet.

Die vierte Sicherheitsebene bilden die Anlagenbetreiber.

Für den extremen Notfall, in der die zuvor angesprochenen Sicherheitsebenen durch Materialversagen und/oder höhere Gewalt ausfallen, sind alle sicherheitsrelevanten Systeme manuell über die Schalttafel einstellbar und verfahrbar.

5 Organisation und Zeitrahmen

5.1 Infrastruktur und Arbeitsteam

Das Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik (IATF) besitzt einen Erfahrungsschatz von über zwanzig Jahren im Betrieb und Design von Natriumanlagen. Das IATF hat sich seit seinem Bestehen hauptsächlich der Erforschung fundamentaler wissenschaftlicher Fragen sowie der Entwicklung technischer Lösungen auf den Gebieten der Hydraulik wie auch der Thermohydraulik gewidmet. Auf dem Gebiet der Magnetohydrodynamik (MHD), die in diesem Experiment von großer Relevanz ist, besteht eine breite Wissensbasis sowohl in theoretischer als auch in experimenteller Hinsicht. Die Kompetenz auf diesem Fachgebiet wurde in einer nun mehr als neun Jahre andauernden Forschungstätigkeit im Bereich flüssigmetallgekühlter Fusionsreaktorblankets erworben. Die Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der MHD dokumentiert sich alleine im Jahr 1994 in mehr als 40 Einzelpublikationen.

Die Arbeitsgruppe, die sich sowohl für das Design, den Aufbau und auch für den späteren Betrieb verantwortlich zeichnet, besteht im Mittel aus sieben bis acht Personen. Das Projekt wird nach außen vom Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Müller vertreten. Die technische Leitung und die Koordination der einzelnen Untergruppen obliegt Herrn Dr.-Ing. R. Stieglitz. Die technische Leitung vor Ort für den Aufbau und den Betrieb wird zu gleichen Teilen von Herrn Schlindwein und Herrn Rackel getragen. Im Bereich der elektrotechnischen Sicherheit liegt die Verantwortung bei Herrn Dipl.-Ing. W. Rapp. Alle angesprochenen Personen zeichnen sich durch mehrjährige Tätigkeit und Erfahrung im Betrieb und Bau flüssigmetallbetriebener Kreisläufe aus. Diese Mitarbeiter werden in technischer Hinsicht von den Mitgliedern der Fusionsgruppe am IATF und allen Einrichtungen der Infrastruktur des Instituts unterstützt.

Herrn Prof. F.H. Busse sowie Dr. A. Tilgner vom Physikalischen Institut der Universität Bayreuth begleiten das Experiment durch theoretische Arbeiten. Professor Busses Kompetenz auf den Gebieten der Dynamotheorie, der Flüssigmetall-MHD und der Naturkonvektion, die er sich in den letzten 20 Jahren Forschungstätigkeit erworben hat, dokumentiert sich in zahlreichen Publikationen. Aufgrund seiner Erfahrungen auf dem Fachgebiet der Dynamotheorie steht er in enger Verbindung mit nahezu allen anderen kompetenten Arbeitsgruppen. Herauszuheben sind in diesem Zusammenhang die Arbeitsgruppen von Herrn Prof. P.H. Roberts (Universität von Californien UCLA, Los Angeles, USA), Prof. D. Gubbins (Universität Leeds, England) und Prof. C.A. Jones (Universität Exeter, England).

Darüber hinaus besteht zwischen dem IATF und der Lettischen Akademie der Wissenschaften in Riga (LAS), die ebenfalls auf den Gebieten der Dynamotheorie und der Flüssigmetall-MHD tätig ist, eine langjährige Partnerschaft und Zusammenarbeit.

Zwischen dem IATF und vielen anderen Partnern, die hinsichtlich dieses geplanten Experimentes eine wissenschaftliche Kompetenz aufweisen, bestehen lange zum Teil persönliche Kontakte. Herauszuheben sind hierbei:

Prof. A. Alemany (IMG-LEGI-CNRS, Grenoble, Frankreich)

Dr. Ph. Marty (IMG-LEGI-CNRS, Grenoble, Frankreich)

Dr. M.R.E. Proctor (Universität Cambridge, England)

Prof. K.-H. Rädler (Astrophysikalisches Institut Potsdam)

5.2 Zeitplanung

In der Abbildung 5.1 ist der für den Aufbau des Experiments vorgesehene Zeitplan illustriert. Der Zeitplan datiert von der Jahresmitte 1995 und es haben sich noch keine nennenswerten Zeitverschiebungen durch technische Probleme oder ähnliche andere Ereignisse ergeben.

Die Designphase ist abgeschlossen und es liegen technische Einzelteilzeichnungen für alle Hauptkomponenten der Versuchsanlage vor. Der Dynamomodul befindet sich aktuell im Bau. Die Natriumventile, der Druckbehälter, der Lagerbehälter, die Kaltfalle und der Vorwärmetauscher sind bereits verfügbar. Andere Komponenten befinden sich in der Umrüstung auf die neuen Anforderungen.

Die Implementierung der Versuchsanlage in das Gebäude 272 des Institutes für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik am Forschungszentrum Karlsruhe wird schätzungsweise 2 Jahre dauern. Der Umbau des Baus 272 hat begonnen, sodaß der Aufbau mit Beginn des Kalenderjahres 1996 starten kann.

Mit einem Beginn der ersten Messungen ist im Jahr 1998 zu rechnen.

Beschreibung	1995				1996				1997				1998			
	I	II	III	IV												
Design des Natriumkreislaufs	■															
Komponenten-Design (Behälter, Pumpen, Hilfsaggregate incl. TÜV-Vorabnahmen, etc.)	■	■														
Erstellen eines Rohrleitungsplanes inklusiver aller Komponenten sowie Einplanung einer Anlagen-erweiterung	■	■														
Gebäudemodifikationen zum Einbau der Dynamoeinrichtung		■	■	■												
Behälterbau Rohrleitungsbau		■	■	■	■	■	■	■	■	■						
Design des Dynamomoduls (Wassertestmodul im Maßstab 1:1, Druckabfallmessung, Konstruktion des Gesamtmoduls in allen Einzelteilen, TÜV-Vorabnahme)	■	■	■	■												
Bau des Dynamomoduls incl. Meß- und Heizelemente Drucktests und TÜV-Abnahme)			■	■	■	■	■	■								
Elektrotechnik -Erstellen von Bedarfsplänen (Leistungsversorgung, Meßstellen, Meßgrößen, Ablaufschemata) -Umsetzung des Bedarfsplanes in ein Gesamtanlagensteuerungs- und -regelungskonzept - Erstellen von Kabel- und Belegungsplänen - Verkabelung aller Meß- und Regelungseinrichtungen - Testen der Einzelkomponenten - Erstellen der Meßwerterfassung																
Austesten des Natriumkreislaufs (Pumpen, Hilfsaggregate, Kühlung etc.)														■	■	
Verbindung des Dynamomoduls mit dem Natrium-Kreislauf und Messungen																■

Abbildung 5.1: Geplanter Zeitrahmen für den Aufbau des GEODYNAMO-Versuchsstandes.

6 Ausblick

In diesem Bericht wird der aktuelle Stand des Dynamolaborexperimentes, das wesentlich auf den erstmaligen experimentellen Nachweis des homogenen Dynamoeffektes abzielt, aufgezeigt. Der momentane Stand entspricht dem Zeitpunkt November 1995.

Das beschriebene Anlagendesign basiert auf analytischen Überlegungen. Im analytischen Modell wurden verschiedene asymptotische Grenzfälle mit einer unterschiedlichen Zahl von Randbedingungen betrachtet. Ausgehend von der Randbedingung, die die höchsten Anforderungen an die technisch verfügbaren Ressourcen stellt, wurde ein technisches Dynamokriterium entwickelt. Auf der Basis dieses Kriteriums ist ein Dynamotestmodul entwickelt worden, der in der Lage ist, dieses technische Kriterium mit einer Sicherheitsreserve von fast 80% zu übertreffen.

Die Anlage ist so konzipiert, daß die Strömungsgeschwindigkeiten in den einzelnen Teilkreisläufen unabhängig voneinander variiert werden können. Damit kann ein wesentlicher Aspekt nämlich die Abhängigkeit der magnetischen Energie von der Strömungsgeschwindigkeit untersucht werden. Die Fähigkeit der konzipierten Anlage das Dynamokriterium um einen gewissen Betrag zu übertreffen bietet die Möglichkeit nichtlineare Dynamoeffekte zu untersuchen. Damit offeriert dieser Versuchsstand die Möglichkeit, eine Datenbasis für das Gebiet der nichtlinearen Dynamotheorie zu schaffen, die für die Entwicklung einer nichtlinearen Dynamotheorie von großem Interesse ist. Denn lediglich das Verständnis nichtlinearer Phänomene ist die Voraussetzung für tiefere Einblicke in den Ablauf geo- und auch astrophysikalischer Prozesse.

Danksagung:

Die Autoren dieses Berichts möchten sich bei folgenden Personen für ihre Beiträge und ihre Mitarbeit bedanken, ohne die der aktuelle Stand dieses Projektes nicht erreicht worden wäre. Der Dank gilt Dr. Helmut Hoffmann, Herrn Klaus Marten, Herrn Jochen Meinel, Herrn Dieter Rackel, Herrn Wilhelm Rapp, Dr. Jörg Reimann, Herrn Dieter Schlindwein und vielen anderen nicht namentlich erwähnten Personen des Institutes für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik und des Forschungszentrums Karlsruhe.

7 Literaturverzeichnis

- Addison, C.C (1973)** Liquid Alkali Metals, ISBN 0901948772. John Wiley & Sons Ltd; pp. 107.
- Addison, C.C. (1984)**; The chemistry of the liquid alkali metals; John Wiley & Sons Ltd; ISBN 0471905089.
- Armour; Cannon (Anhang C 1984)** Druckverluste in porösen Medien; Diplomarbeit TU-Berlin.
- Batchelor, G.K. (1949)** On the spontaneous magnetic field in a conducting liquid in turbulent motion; Proc. Roy. Soc. of London; Vol. 201; pp. 405-416.
- Bevir, M.K. (1973)** Possibility of electromagnetic self excitation in liquid metal flows in fast reactors; J. of the British Nuc. Energy Soc.; Vol. 12; pp. 455- 458.
- Birzvalks, J. (1986)**; Streifzug durch die Magneto hydrodynamik; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig; 1986; ISBN 3-342-001 14-3.
- G. Bozóki; (1986)** Überdrucksicherungen für Behälter und Rohrleitungen; Verlag TÜV Rheinland 1986.
- Busse, F.H.; Carrigan, C.R. (1974)** Convection induced by centrifugal buoyancy; Journal of Fluid Mechanics; Vol. 62; pp. 579-592.
- Busse, F.H. (1975)** A model of the Geodynamo; Geophys. Journal R. Astr. Soc.; Vol. 42; pp. 437-459.
- Busse, F. H. (1992)** Dynamo theory of planetary magnetism and laboratory experiments; in Evolution of Dynamical Structures in Complex Systems (ed. R. Friedrich & A. Wunderlin); Springer Proceedings in Physics; Vol. 69; pp. 197-207.
- Dorn, Bader (1976)** Physik Oberstufe E; Hermann Schroedel Verlag; Hannover; 1976; ISBN 3-507-86 156-9.
- Dubbel (1986)** Taschenbuch des Maschinenbaus; Springer-Verlag ; 15. Auflage; S. 1358.
- Eck, B. (1966; Anhang A2)** Technische Strömungslehre; Springer Verlag; 7th edition; ISBN 66-24839; chapter 50 bend-flows (Krümmer); p. 209-221.
- Foust, O.J; (1972)**, Sodium-NaK engineering Handbook; Vol.1; Sodium chemistry and physical properties; Gordon and Breach SCIENCE Publishers; ISBN 0677030204.
- Gailitis, A. (1967)** Self-excitation conditions for a laboratory model of a geomagnetic dynamo; Magnetohydrodynamics; Vol. 3; No. 3; S. 45-54.
- Glatzmaier, G.A.; Roberts, P.H. (1995)** A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal; Nature; Vol. 377; 21st Sept. 1995; pp. 203-209.
- Gubbins, D. (1974)** Theories of geomagnetic and solar dynamos; Reviews of Geophysics and Space Physics; Vol. 12; No. 2; p. 137-154.
- Krause, F.; Rädler, K.-H. (1980)** Mean-field magnetohydrodynamic and dynamo theory; Akademie-Verlag; Berlin and Pergamon Press; Oxford.

- Kirko, G.E. (1989)** MHD-phenomena in fast neutron reactors with a liquid metal heat carrier; Liquid metal magnetohydrodynamics; Kluwer academic publishers (J. Lielpetris, R. Moreau editors); ISBN 0-7923-0344-X; p. 425.
- Landolt-Börnstein (1961)** 4. Teil, Springer-Verlag ; p.502;
- Lowes, F. J.; Wilkinson, I. (1963)** Geomagnetic dynamo: A laboratory experiment; Nature; Vol. 198; pp.1158-1160.
- Lowes, F. J.; Wilkinson, I. (1968)** Geomagnetic dynamo: An improved laboratory experiment; Nature; Vol. 219; pp.717-718.
- Lyon, R.N. (1952)** Liquid metals handbook; Navexos P-733; Second edition.
- Moffat, H.K. (1978)** Magnetic field generation in electrically conducting fluids; Cambridge University Press.
- Moffat, H. K.; Proctor M. R. E. (1985)** Topological constraints associated with fast dynamo action; J. Fluid. Mechanics; Vol. 154; pp. 493-507.
- Moreau, R. (1990)** Magnetohydrodynamics; Kluwer Academic Publishers; ISBN 0-7923-0937-5, pp. 272.
- Pierson, E. S. (1975)** Electro- magnetic self-excitation in the liquid-metal fast breeder reactor; Nuclear Science and Engineering; Vol. 57; pp. 155-163.
- Ponomarenko, Yu. B. (1975)** Theory of the hydromagnetic generator; Magneto-hydrodynamics; Vol 14; No. 1; pp. 775-778.
- Prudhon, P.; Chevalier, P.; Alemany, A.; Marty, P. (1994)** Superphenix between industry and research: MHD-experiments; Proc. of the 2nd Int. Conf. on Energy and Mass Transfer in Magnetohydrodynamic Flows; Sept. 26-30; Aussois (France), pp.193-202.
- Roberts, G. O. (1970)** Spatially periodic dynamos; Philosophical Transactions of the Roy. Soc. of London; Series A; Vol. 266; pp. 535-558.
- Roberts, G. O. (1972)** Dynamo action of fluid motion with two-dimensional periodicity; Philosophical Transactions of the Roy. Soc. of London; Series A; Vol. 271; pp. 411-454.
- Soward, A. M. (1987)** Fast dynamo action in a steady flow; J. Fluid Mechanics; Vol. 180; pp. 267-295.
- Soward, A. M.; Childress, S. (1989)** Dynamo action at large magnetic Reynolds number in spatially periodic flow with mean motion; Proc. of the IUTAM-Symp. Cambridge; Topological Fluid Mechanics (Moffat, H.K and Tsinober, A. editors); pp. 127-137.
- Tilgner, A.** private communication, 1995.
- VDI-Wärmeatlas (1984);** 4. Auflage; ISBN 3-18-4004-15-5
- Zhang, K. H.; Busse, F. H. (1988)** Finite amplitude convection and magnetic field generation in a rotating spherical cell; Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics; Vol. 44; pp. 33-53.
- Zierep, J. (1982; Anhang A2)** Grundzüge der Strömungslehre; G. Braun Verlag; 2nd edition; ISBN 3-7650-2033-8.
- Zierep, J; Bühler, K.. (1991; Anhang A2)** Strömungsmechanik; Springer Verlag; ISBN 3-540-53827-5.

Anhang A

A1 Der Einfluß einer turbulenten Strömung auf die elektrische Leitfähigkeit

Prinzipiell kann eine turbulente Rohrströmung die spezifische elektrische Leitfähigkeit des Fluids verschlechtern. Ausgehend von der Theorie der isotropen Turbulenz, die im Buch von Moffat (1978) geschildert wird, gibt es neben der molekularen Diffusivität λ des Fluids eine zusätzliche turbulente Diffusivität λ_{turb} . Diese zusätzliche Diffusivität resultiert aus der fluktuierenden kleinskaligen Bewegung einer turbulenten Strömung. Die zusätzliche turbulente Diffusivität wirkt damit auf das magnetische Feld. Die Induktionsgleichung 2.1 sollte daher in einer modifizierten Form geschrieben werden.

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\lambda + \lambda_{turb}) \nabla^2 \right] \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad . \quad (A1)$$

In der Gleichung A1 ist die turbulente Diffusivität durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\lambda_{turb} = \frac{2}{3} \lambda \iint \frac{k^2 E(k, \omega)}{\omega^2 + \lambda^2 k^4} dk d\omega \quad . \quad (A2)$$

Die typischen Wellenzahlen k der fluktuierenden Geschwindigkeitskomponenten im Helikalkreislauf sind von der Größenordnung 10^2 m^{-1} , sodaß $\omega^2 \ll \lambda^2 k^4$ ist. Für diesen Fall ergibt sich folgender mathematischer Ausdruck:

$$\lambda_{turb} \approx \frac{2}{3\lambda} \int_{k=0}^{k=\infty} \frac{E(k)}{k^2} dk \quad . \quad (A3)$$

Darin gilt der nachstehende Ausdruck A4.

$$\int_{k=0}^{k=\infty} E(k) dk = \frac{1}{2} |\mathbf{v}^2| \quad . \quad (A4)$$

Das Integral stellt in A4 die Energiedichte der fluktuierenden Geschwindigkeitskomponente \mathbf{v} dar. Benutzt man die oben genannten Werte für k und λ sowie einen Maximalwert der Geschwindigkeitsschwankung von $|\mathbf{v}|$ in der Größenordnung 1m/s, wie er im Experiment auftreten könnte, so erhält man als Wert für die turbulente magnetische Diffusivität $\lambda_{turb} = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Der Wert der turbulenten magnetischen Diffusivität ist damit klein gegenüber dem der molekularen Diffusivität, der ca. $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ beträgt, und wird daher in der theoretischen Ableitung nicht weiter berücksichtigt.

A2 Der Einfluß unterschiedl. Geschwindigkeitsfelder auf die Dynamobedingung

In der Ableitung der Dynamobedingung, wie sie in Kapitel 2 aufgezeigt wurde, wird von einem reichlich idealisierten Geschwindigkeitsfeld ausgegangen. Technisch ist ein derartiges Geschwindigkeitsfeld wohl kaum realisierbar. Das in der Theorie angenommene

Geschwindigkeitsfeld liefert die Möglichkeit einer vollständig analytischen Lösung der linearen Theorie. Es ist aber in Hinblick auf den Entwurf einer technischen Anlage zu überprüfen, inwieweit die Wahl des gegebenen Geschwindigkeitsfelds die Dynamobedingung beeinträchtigt oder gar drastisch verschlechtert.

Exemplarisch wird hierzu folgendes Geschwindigkeitsfeld in die in der Abbildung A1 dargestellten Geometrie in die Magnetfeldtransportgleichung (Gl. 2.1) eingesetzt:

$$\begin{aligned} \text{Zwickel:} & \quad \mathbf{v} = 0 \\ \text{Außenrohr:} & \quad \mathbf{v} = \omega r_{\varphi} + u_2 \mathbf{e}_z \\ \text{Innenrohr:} & \quad \mathbf{v} = u_1 \mathbf{e}_z \end{aligned} \quad (\text{A5a, b, c})$$

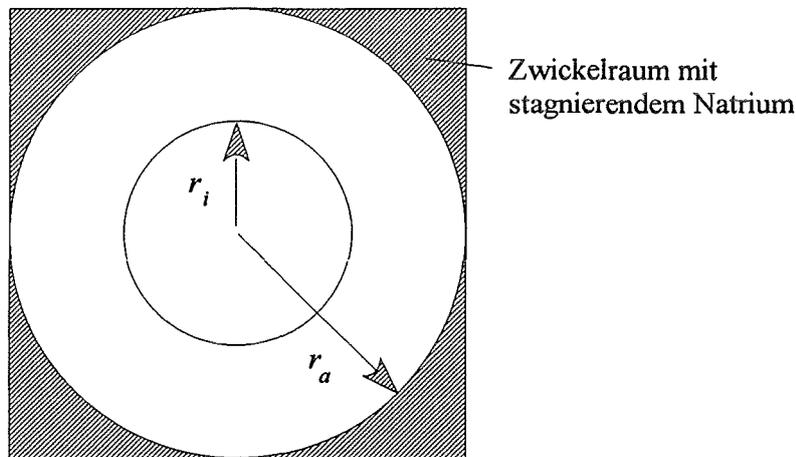


Abbildung A1: Schemaskizze des Doppelrohrzylinder aus dem Experiment.

Der Term $\mathbf{B}\nabla\mathbf{v}$, der für die Streckung der Magnetfeldlinien verantwortlich ist, ist lediglich im Außenrohr von Null verschieden.

Berechnen wir zunächst den Produktionsterm $\mathbf{B}\nabla\mathbf{v}$, in dem wir die Gleichung A5c in $\mathbf{B}\nabla\mathbf{v}$ einsetzen.

$$\begin{aligned} (\mathbf{B} \cdot \nabla)(\omega r_{\varphi} + u_2 \mathbf{e}_z) &= B_r \omega \mathbf{e}_{\varphi} + B_r \Delta u \delta(r - r_i) \mathbf{e}_z + B_r (-u_2 \mathbf{e}_z) \delta(r - r_a) \mathbf{e}_z \\ &\quad B_r \omega r_i \delta(r - r_i) \mathbf{e}_{\varphi} - B_r \omega r_a \delta(r - r_a) \mathbf{e}_{\varphi} \end{aligned} \quad (\text{A6})$$

Darin sind \mathbf{e}_{φ} und \mathbf{e}_z die Einheitsvektoren in Umfangsrichtung bzw. in z-Richtung. Δu bezeichnet die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen u_2 und u_1 . Im nächsten Schritt wird der Ausdruck $\mathbf{v} \times (\mathbf{B}\nabla)\mathbf{v}$ berechnet. Nach längerer Rechnung ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\begin{aligned} (\omega r_{\varphi} + u_2 \mathbf{e}_z) \times (\mathbf{B} \cdot \nabla)(\omega r_{\varphi} + u_2 \mathbf{e}_z) &= -B_r \omega u_2 \mathbf{e}_r + B_r \Delta u \omega r \delta(r - r_i) \mathbf{e}_r - B_r u_2 \omega r \delta(r - r_a) \mathbf{e}_r \\ &\quad + B_r \omega \Delta u r_i \delta(r - r_i) \mathbf{e}_r - B_r \omega r_a u_2 \delta(r - r_a) \mathbf{e}_r \end{aligned} \quad (\text{A7})$$

Darin ist \mathbf{e}_r der Einheitsnormalenvektor in radialer Richtung und B_r ist wie folgt definiert:

$$B_r \cdot \mathbf{e}_r = -(B_x \cos \varphi + B_y \sin \varphi) \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{A8})$$

Nach einer Mittelung des Terms über das Quadrat der Länge $2r_a$ erhält man für den Term $\mathbf{v} \times (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ den nachstehenden Ausdruck:

$$\overline{\mathbf{v} \times (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{v}} = -\frac{\omega u_2}{2} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} + \Delta u \omega \frac{r_i^2}{r_a^2} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} - u_2 \omega \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} - \omega u_2 \frac{(r_i^2 - r_a^2)}{r_a^2} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} \quad (\text{A9})$$

Für den Term $(p - \lambda \Delta) \mathbf{B}$ ergibt sich die Beziehung A10.

$$(p - \lambda \Delta) \mathbf{B} = \frac{1}{2\alpha^2 \lambda} \left[-\frac{3}{2} \omega u_2 + \Delta u \omega \frac{r_i^2}{r_a^2} - \omega u_2 \frac{(r_i^2 - r_a^2)}{r_a^2} \right] \nabla \times \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A10})$$

Für den Wert α läßt sich näherungsweise die Beziehung $\alpha = \pi/2r_a$ ansetzen, sodaß die Beziehung A10 zu der Relation A11 modifiziert werden kann.

$$(p - \lambda \Delta) \mathbf{B} = \frac{1}{4\lambda} \left[-3\omega u_2 \frac{4r_a^2}{\pi^2} + 2\Delta u \omega \frac{r_i^2}{r_a^2} \frac{4r_a^2}{\pi^2} - 2\omega u_2 \frac{(r_i^2 - r_a^2)}{r_a^2} \frac{4r_a^2}{\pi^2} \right] \nabla \times \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{A11})$$

Der in den eckigen Klammern aufgeführte Ausdruck entspricht dem Produkt AC des Roberts Dynamos in der Gleichung 2.20. Damit lautet die Dynamobedingung für das in der Gleichung A5 angenommene Strömungsfeld:

$$-3\omega u_2 \frac{4r_a^2}{\pi^2} + 2\Delta u \omega \frac{4r_i^2}{\pi^2} - 2\omega u_2 \frac{4(r_i^2 - r_a^2)}{\pi^2} \geq \frac{4\pi\lambda^2}{d} \left[1 + \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^2 \right] \quad (\text{A12})$$

Im nächsten Schritt wird diese Formulierung in das technische Kriterium transferiert. Ebenso wie im Abschnitt 3 wird angenommen, daß der Volumenstrom im Innenrohr und im Außenrohr gleich groß ist. Damit ergeben sich für den axialen Volumenstrom \dot{V}_a und den helikalen Volumenstrom \dot{V}_h die nachfolgenden Relationen.

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= 2u_1 \pi r_i^2 = 2u_2 \pi (r_a^2 - r_i^2) = \frac{3}{2} u_2 \pi r_a^2 \\ \dot{V}_h &= d\omega \int_{r_i}^{r_a} r dr = \frac{d\omega}{2} (r_a^2 - r_i^2) = \frac{3}{8} d\omega r_a^2 \end{aligned} \quad (\text{A13})$$

In den Gleichungen A13 wurde im weiteren angenommen, daß $r_i = 1/(2r_a)$ ist. Für den Ausdruck Δu ergab sich folgende Relation:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = -\frac{4}{3} \frac{\dot{V}_a}{\pi r_a^2} \quad (\text{A14})$$

Ein Einsetzen der Gleichungen A13 in die Dynamobedingung liefert für den Volumenstrom \dot{V}^2 , der sich aus dem axialen und dem helikalen Kreislauf entsprechend der Gleichung 3.4 ($\dot{V}_h \cdot \dot{V}_a = 2 \chi \dot{V}^2$) zusammensetzt, folgendes Ergebnis:

$$\dot{V}^2 > \frac{\lambda^2 r_a^2}{\chi} \frac{9\pi^4}{80} \left[1 + \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^2 \right] \quad (\text{A15})$$

Man kann dieses Ergebnis nun mit der Volumenstrombedingung vergleichen, die man für das ursprüngliche Geschwindigkeitsfeld (Gl. 2.3) erhält. Dort ergibt sich der in der Gleichung A16 dargestellte Zusammenhang.

$$V^2 > \frac{\lambda^2}{\chi} \frac{8\alpha^2}{\pi} \left[1 + \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^2 \right] \quad (\text{A16})$$

Bildet man nun Verhältnis beider Volumenströme in der Art A15/A16, so erhält man ein Verhältnis von $\pi^5/320 \approx 0.9563$. Es zeigt sich damit, daß das ursprünglich angesetzte Geschwindigkeitsfeld zu einer um 2.5% höheren Volumenstrombedingung führt. Man kann sich nun die Frage stellen, warum dies eintritt.

Im neu gewählten Geschwindigkeitsprofil ist vor allem der Term $\mathbf{v} \times (\mathbf{B} \nabla) \mathbf{v}$ groß, der für die Produktion des Magnetfeldes verantwortlich ist. Dies kommt daher, daß \mathbf{v} durch den Sprung der Geschwindigkeit zwischen dem Innenrohr und dem Außenrohr groß ist. Dies entspricht mehr dem Fall, wie er im Experiment auftritt. Gleichzeitig ist zwar die Diffusion des Magnetfeldes, die hauptsächlich in den kleinen Längenskalen ($< \pi/\alpha$) auftritt, ebenfalls größer als im ursprünglichen Geschwindigkeitsfeld, da durch die Kolbenströmung im Zentralrohr (Strömung dort besitzt keine Helizität) kein Magnetfeld erzeugt wird. Dieser Effekt ist jedoch kleiner als der zuvor angesprochene.

Anhang B

B.1 Ableitung der Druckverlustbeziehungen im Drallerzeuger

B.1.1 Die Helikalströmung im Drallerzeuger

Die Strömung im Drallerzeuger kann in erster Näherung als Strömung in einem Krümmer aufgefaßt werden. Betrachtet man zunächst einen 90°-Krümmer, so treten dort im wesentlichen drei Quellen für die hydraulischen Verluste auf:

1. Rezirkulationsgebiete am inneren Radius,
2. Reibungsverluste,
3. Verluste in Sekundärströmungen, z.B. in sog. Dean-Wirbeln.

Die Druckverluste können jedoch erheblich reduziert werden, wenn Rezirkulationsgebiete (Totwasserzonen) vermieden werden. Generell führen dabei zwei Leitlinien zu einer Erniedrigung der Druckverluste. Es ist dies zum ersten ein relativ großer Innenradius und zum zweiten eine Beschleunigung der Hauptströmung in der Umlenkung. Der Druckverlust in einer 90°-Umlenkung läßt sich für ein glattes Rohr als Funktion des Verhältnisses von mittlerem Radius zur Spaltweite durch die folgende Relation angeben:

$$\Delta p = \zeta \left(\frac{r_m}{\Delta r} \right)^{-0.79} \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (\text{B1})$$

Der Verlustfaktor ζ beträgt bei einem 90°-Krümmer $\zeta=0.3$ und entsprechend bei einem 360°-Krümmer $\zeta=1.2$. Da die Experimentgeometrie einen rechteckförmigen Strömungskanal aufweist, muß ein zweiter Verlustkoeffizient eingeführt werden. Dieser berücksichtigt die Verluste, die durch Sekundärströmungen in den Ecken auftreten, und er setzt sich aus dem Verhältnis von Kanalbreite zur Kanalhöhe zusammen, also hier aus dem Verhältnis $\Delta r/l$. Es zeigt sich, daß nur die Betrachtung von Aspektverhältnissen kleiner als eins im Hinblick auf den Druckverlust sinnvoll ist. Die modifizierte Druckverlustkorrelation für die helikale Durchströmung einer Wendel ergibt sich schließlich zu:

$$\Delta p = 1.2 \left(\frac{r_m}{\Delta r} \right)^{-0.79} \left(\frac{\Delta r}{h} \right) \rho \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (\text{B2})$$

Selbstverständlich muß die Beziehung B2 bei einem ganzen Dynamo zusätzlich mit der Anzahl der Windungen χ sowie der Anzahl der Drallerzeuger multipliziert werden.

Ein Verlustfaktor, der die Strömungsverluste beim Übergang der Helikalströmung von einem Drallerzeuger in den nächsten beschreibt muß ebenfalls noch ermittelt werden.

Um die Verluste bei diesem Übergang klein zu halten, erfolgt der Übergang tangential von einem Drallerzeuger in den nächsten.

Ein Schemabild wie auch eine Fotografie eines solchen Überganges ist dem Bild B1 zu entnehmen.

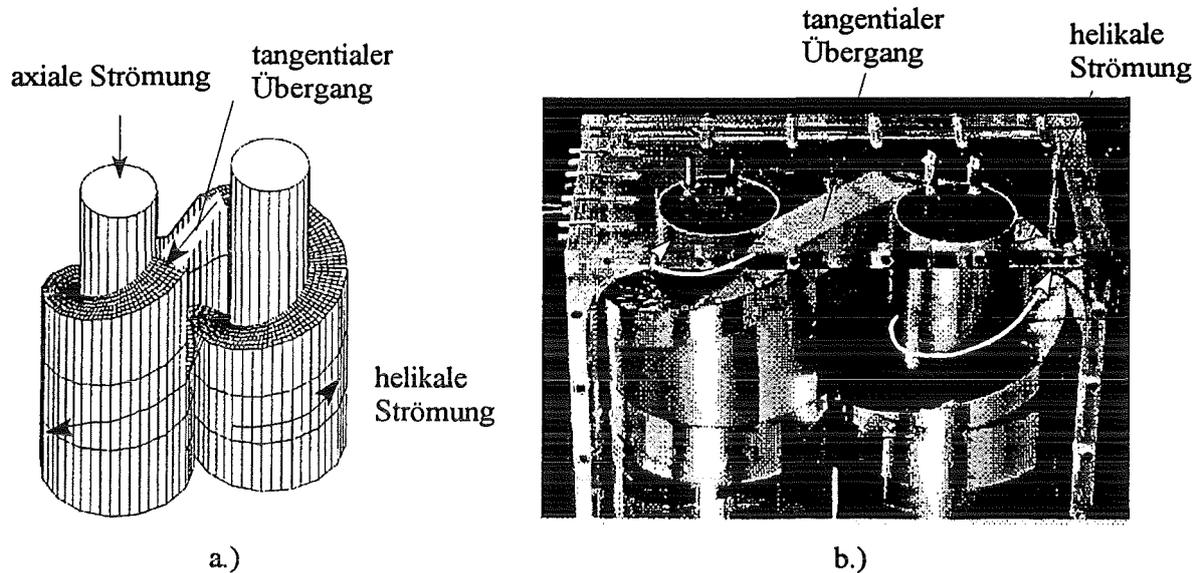


Abbildung B1: a.) Schemabild der tangentialen Strömungsführung beim Übergang von einem Drallerzeuger in den nächsten. b.) Fotografie desselben Übergangs in einem Wassermodell.

Da die Geometrie bei diesem Übergang komplex ist, wurde in einer Meßreihe experimentell ein Verlustfaktor ermittelt. Dieser ergab sich zu $\zeta_t=0.55$.

Im Anschluß daran wurde eine erste Teststrecke bestehend aus 18 Windungen in zwei Drallerzeugern und einem tangentialen Übergang gebaut. Die aus dem Experiment erhaltenen Ergebnisse wurden mit denen aus der Gleichung 3.6 berechneten Werten verglichen. Es zeigte sich wie die Abbildung B2 dokumentiert eine exzellente Übereinstimmung von Theorie und Experiment.

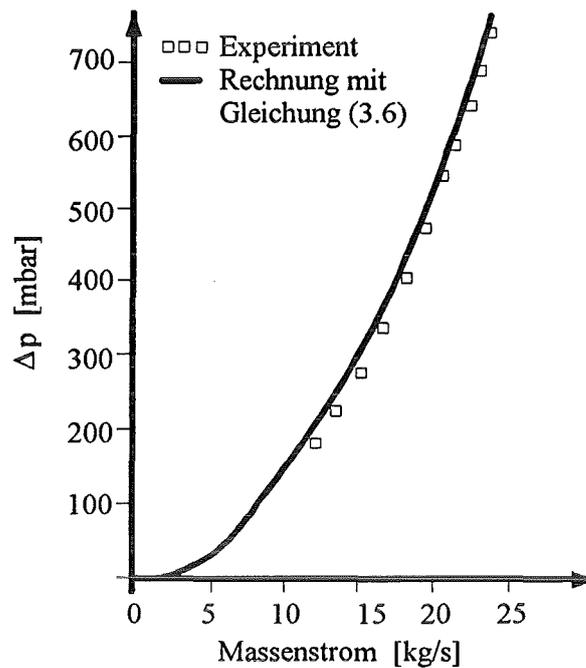


Abbildung B2: Druckverlust in einer Helikalströmung eines Drallerzeugerpaars mit 9 Windungen pro Drallerzeuger als Funktion des Massenstroms in einem Wassereperiment.

B.1.2 Die Axialströmung im Drallerzeuger

Die Strömung durch Kreisrohre ist wohl eine der am besten bekannten Strömungsformen in der Hydrodynamik. Die Druckverluste in einem Kreisrohr hängen im wesentlichen von der Reynoldszahl ab. Für das Dynamoexperiment lassen aufgrund der hohen Volumenströme hydraulische Reynoldszahlen im Bereich von 10^4 - 10^6 berechnen, die einer Strömungsgeschwindigkeitsbandbreite von ungefähr 0.1m/s bis 10m/s entsprechen. Der Druckverlustkoeffizient ζ läßt sich mit der bekannten Relation von Prandtl berechnen. Sie lautet, siehe beispielsweise in Zierep&Bühler [1991]:

$$\zeta = \frac{d}{2r} \cdot \Gamma \quad \text{mit} \quad \frac{1}{\Gamma} = 2 \lg(Re \sqrt{\Gamma}) - 0.8 \quad . \quad (\text{B3})$$

Der Druckverlust in einer 180°-Umlenkung eines Rohres ist abhängig vom Radienverhältnis der Umlenkung. Die Berechnung des Druckverlustfaktors erfolgt über das Schaubild B3 für eine 90°-Umlenkung in einem glatten Rohr, aus Zierep&Bühler [1991]. Da im Experiment eine 180°-Umlenkung vorliegt, muß der entnommene Wert mit einem Formfaktor von 1.7 multipliziert werden.

Es ergibt sich schließlich der Zusammenhang 3.7, der im Hauptteil dieses Berichts angegeben ist.

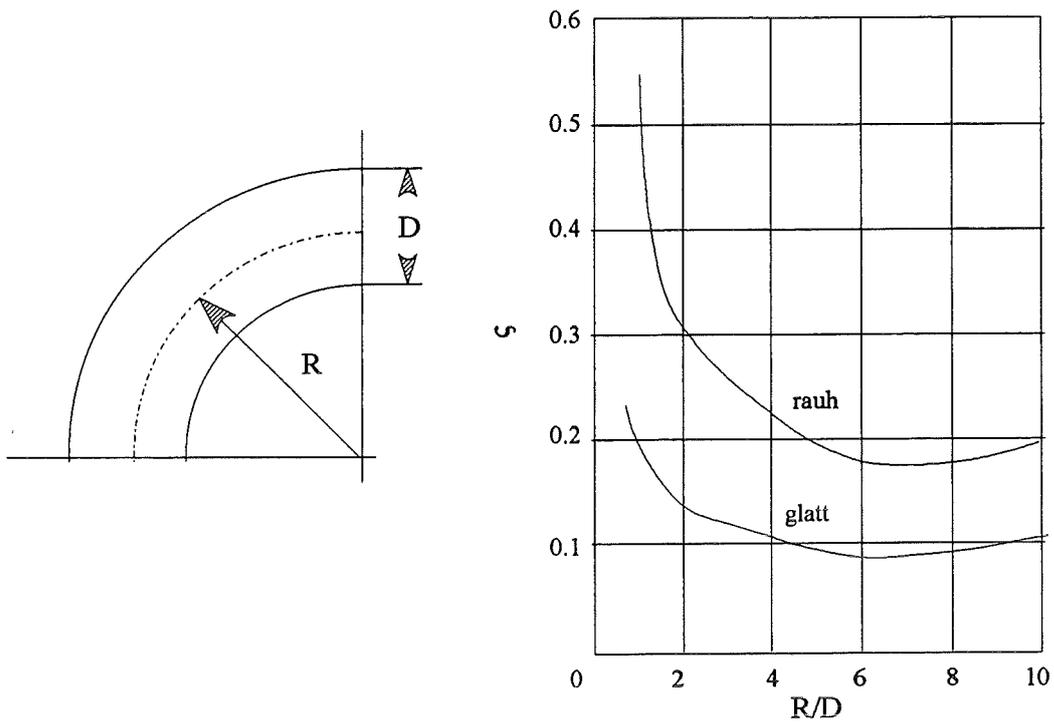


Abbildung B3: Druckverlustbeiwert ζ in einem 90°-Kreisrohrkrümmer als Funktion des Biegungsradius-Durchmesser-Verhältnisses.

Anhang C

C1 Berechnung des nötigen Ablaufquerschnitts des Natrium-Wasser-Kühlers

Um das Wasserinventar in Natrium-Wasser-Sprühkühler für den Fall eines eventuellen Lecks in der Natriumleitung klein zu halten und damit die Anlage keinem unnötig hohen Sicherheitsrisiko auszusetzen, muß der Wasserablaufquerschnitt im Kühler hinreichend groß gestaltet sein.

Die treibende Druckdifferenz, die das Wasser ablaufen läßt, wird nach dem Zusammenhang C1 berechnet, wobei für den geodätischen Höhenunterschied Δh 1m angenommen wurde.

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad . \quad (C1)$$

Der Druckverlust in der Rohrleitung setzt sich aus dem der 90°- Krümmer (angenommen werden 6) einer 180°-Umlenkung, der Rohrlänge l (angenommen $l=10\text{m}$), sowie dem Druckverlust in einem Maschensieb zusammen. Der Druckverlust in einem Maschensieb läßt sich nach Armour& Cannon [1984] wie folgt angeben:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \bar{v}^2 \frac{f}{\varepsilon} \left(\frac{1}{0.25 \sqrt{\varepsilon / Z}} \right) l_{\text{Sieb}}$$

darin ist

(C2)

$$f = \frac{34}{Re_{\varphi}} + \frac{0.9}{Re_{\varphi}^{0.12}} \quad \text{mit} \quad Re_{\varphi} = \frac{\bar{v} d_f}{\nu} \frac{1}{1-\varepsilon} \quad .$$

In diesen Gleichungen ist f ein Formfaktor, ε die mittlere Porosität des Siebs, Z die Maschenanzahl des Siebs pro Flächeneinheit, d_f der Durchmesser des Drahtgewebes und l_{Sieb} die Länge des Maschengitters in Strömungsrichtung. Re_{φ} ist eine hydraulische Reynoldszahl des Maschengitters und ν die kinematische Viskosität des Wassers. Die mittlere Porosität berechnet sich aus der Relation C3.

$$\varepsilon = \frac{V - V_{\text{fest}}}{V} \quad , \quad \text{wobei} \quad \text{meist ein Feststoffvolumenanteil} \quad V_{\text{fest}} = 0.05 - 0.1 \quad (C3)$$

angenommen wird.

Die hydraulischen Druckverlustkoeffizienten der Krümmer sind $\zeta_{90^\circ}=0.2$ und $\zeta_{180^\circ}=0.34$. Die Strömung im Wasserablaufrohr wird als turbulent angenommen; damit ergibt sich ein Verlustbeiwert von $\lambda=0.3164 \cdot Re^{-1/4}$ nach Blasius.

Für die Ablaufleitung des Rohres werden weitere nachstehend angegebenen Geometrieabmessungen angenommen:

Drahtgewebe: $\varepsilon=0.1$; $Z=500$; $d_f=1\text{mm}$; $l_{\text{Sieb}}=0.1\text{m}$
Rohrabmessungen: $d=0.05\text{m}$

Mit diesen Annahmen ergibt sich eine mittlere Abflußgeschwindigkeit von $\bar{v}=0.612\text{m/s}$ und damit ein mögliches Abflußwasservolumen von ca. 72l/min . Die Abflußrate liegt somit um einiges höher als die 5.4l/min , die an überschüssigem Wasser aus dem Sprühvorgang des Kühlers anfallen.

C2 Berechnung der Ablaufzeit des Natriums aus der gesamten Dynamoanlage in den Sumpfbehälter

Eine wichtige Anlagenkenngröße, nicht nur für den Fall eines Natriumlecks, sondern auch für eventuelle Störfälle ist eine hinreichend genaue Abschätzung der Zeit, die das Fluid benötigt, um in den Sumpftank zu gelangen und damit sicher verwahrt ist.

Betrachten wir zunächst den Dynamomodul.

Die komplexeste Ablaufstruktur ist die der Helikalströmung. Aus den schraubenförmig gewundenen Kanälen dieses Kreislaufs muß das Fluid in die Entlüftungsleitungen mit dem Durchmesser DN25 gelangen aus denen es in die nächsttieferliegende Ebene gelangt. Da dieser Abflußvorgang sehr schwierig inklusive aller Reibungsverluste zu betrachten ist, wird er in erster Näherung reibungsfrei als ein Abfluß aus einem freien Behälter betrachtet und die Zeit mit einem Sicherheitsfaktor von 2 versehen.

Für den reibungsfreien Abfluß aus einem Behälter, siehe hierzu Prinzipskizze C2.1, wird die Torricellische Ausflußformel C4 angesetzt.

$$t = -\frac{A_1}{A_2} \int_{h_0}^{h_1} \frac{1}{\sqrt{2gh}} dh = \frac{2A_1}{A_2} \frac{1}{\sqrt{2g}} (\sqrt{h_0} - \sqrt{h_1}) \quad . \quad (C4)$$

Da im Dynamo im ungünstigsten Fall 8 Drallerzeuger senkrecht zum Erdschwerefeld angeordnet sind muß, die Formel C4 mit 8 multipliziert werden. Da sich mit Abnahme des Flüssigkeitshöhenstandes ebenfalls die Oberfläche A_1 ändert, nehmen wir im weiteren vereinfachend eine mittlere Oberfläche von A_1 an (man kann dies auch exakt berechnen, aber dies würde die Rechnung beliebig verlängern), mit der man anschließend eine mittlere Ablaufhöhe berechnen kann.

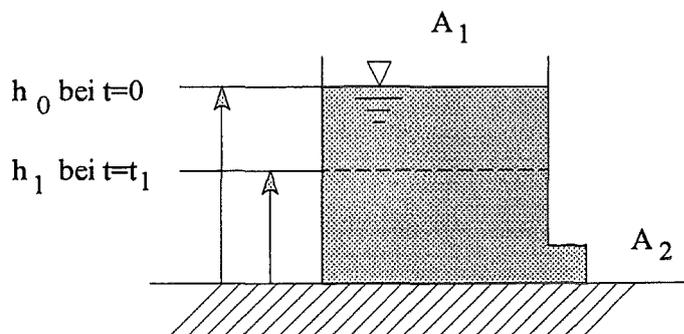


Abbildung C1: Schemaskizze Abfluß aus einem Behälter

Setzt man nun die Geometriedaten aus dem Dynamomodul ein und berücksichtigt man den Sicherheitsfaktor von 2, so erhält man eine Ablaufdauer von ca. 14 Minuten alleine für den Dynamomodul.

Für die anderen Behälter, den Ausgleichsbehälter (halb gefüllt) und den vollständig gefüllten Gasseparator erhält man entsprechend den Leitungsanschlüssen bei einer ähnlichen Betrachtung eine Zeit von 2.5 Minuten.

Für die Rohrleitungen kann man einen vergleichbaren Ansatz wie für den Ablaufquerschnitt aus dem Wasser-Natrium-Sprühkühler ansetzen. Als treibende Druckdifferenz (Gleichung C1) wird die geodätische Höhe von $\Delta h=8\text{m}$ angesetzt. Die Druckverluste im Leitungsnetz bei einer angesetzten Natriumtemperatur von 130°C lassen sich unter den in den Unterpunkten a.) bis c.) zu den Gleichungen C5 und C6 zusammenfassen.

a.) Entlüftungsleitung: Durchmesser DN50
 Länge ca. 10 m
 1 Ventil $\xi = 3.9$
 10 Krümmer $\xi = 0.18$

b.) Natrium-Kreislauf Durchmesser DN100
 Länge ca. 20 m
 1 Ventil $\xi = 3.9$
 15 Krümmer $\xi = 0.18$

c.) Ablaufleitung zum Sumpf: Durchmesser DN80
 Länge 10 m
 1 Ventil $\xi = 3.9$
 5 Krümmer $\xi = 0.18$

Die Leitungsdruckverluste aus a.) + b.) + c.) werden summiert, wobei angenommen wird, daß die Strömung turbulent ist (Druckverlustbeiwert nach Blasius $\lambda = 0.3164 Re^{-1/4}$)

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left[\sum_i \frac{1}{A_i^2} 3.9 + \sum_i \frac{1}{A_i^2} \cdot 0.18 + \lambda_{Lofl} \frac{l_{Lofl}}{d_{50}} \left(\frac{4}{\pi d_{50}^2} \right)^2 + \lambda_{Ablauf} \frac{l_{Abl.}}{d_{80}} \left(\frac{4}{\pi d_{80}^2} \right)^2 + \lambda_{Kreis} \frac{l_{Kreis.}}{d_{100}} \left(\frac{4}{\pi d_{100}^2} \right)^2 \right] \dot{V}^2 \quad (C5)$$

Damit ist

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} 1838.542 \dot{V}^2 + \frac{\rho}{2} 232.393 \dot{V}^{\frac{7}{4}} \quad (C6)$$

Es ergibt sich damit ein maximaler Ausflußvolumenstrom aus den Leitungen in den Sumpftank von $\dot{V} = 0.27 \text{ m}^3 / \text{s}$.

Setzt man auch hier einen Sicherheitsfaktor von 1.5 an, so ergibt sich schließlich eine Zeit von 21 Minuten bis das Natrium aus der gesamten Versuchsanlage in den Sumpftank abgeflossen ist.

Die Größe der Abflußzeit gibt damit auch einen Hinweis auf die Zeitgrößen, die zum Füllen des Versuchsstandes zu veranschlagen sind. Da die Druckdifferenz beim Füllen der Anlage als kleiner anzusetzen sind als beim Ablassen, kann zum Füllen der Anlage mit Natrium im Minimalfall von ca. 1 Stunde ausgegangen werden (!).

Anhang D

D1 Betriebsmeßstellenliste des Geodynamoversuchsstandes

Im nachfolgendem Abschnitt sind alle Betriebsinstrumente aufgeführt, die im Geodynamoversuchsstand eingesetzt werden. Dabei werden folgende Kurzbezeichnungen in den Tabellen verwendet.

1. Betriebsinstrumente (B)
2. Anzeiginstrumente in der Schaltwarte (A)
3. BetriebsSelemente auf einem MeßwertSchreiber (S)

Da in der Schaltwarte zwei 32-KanalmeßwertSchreiber eingesetzt werden, sind die Schreiber aufgeteilt in S1 und S2.

00 - Füll- und Abblaßsysteme

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
0-01	TN	B - S 1	Thermoelement NiCr/Ni	Lagerbehälter
0-02	L	B - S 2	Höhenstand	Lagerbehälter
0-03	E	B A -	Elektrode min	Lagerbehälter
0-04	TN	B - S 3	Thermoelement NiCr/Ni	Ausdehnungsbehälter
0-05	L	B A S 4	Höhenstand	Ausdehnungsbehälter
0-06	E	B A -	Elektrode min	Ausdehnungsbehälter
0-07	E	B A -	Elektrode max	Ausdehnungsbehälter

Tabelle D4.1: Betriebsinstrumente des Füll- Abblaßsystems

01 - Na-Kreislauf Zentral

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
1-01	P	B A -	Druckmesser	PPE1
1-02	TC	B A S 5	Thermoelement Cu/CuNi	Zulauf DYNAMO
1-03	TC	B A S 6	Thermoelement Cu/CuNi	Rücklauf DYNAMO
1-04	P	B A -	Differenzdruckmesser	Rücklauf DYNAMO Zentral/Helikal
1-05	F	B A S 7	Durchflußmesser	
1-06	TN	B - -	Thermoelement	Zulauf Kühler
1-07	TN	B A S 8	Thermoelement	Rücklauf Kühler

Tabelle D4.2: Betriebsinstrumente des Zentralkreislaufs

02 - Na-Kreislauf Helikal A

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
2-01	P	B A -	Druckmesser	PPE1
2-02	TC	B A S 9	Thermoelement Cu/CuNi	Zulauf DYNAMO
2-03	TC	B A S 10	Thermoelement Cu/CuNi	Rücklauf DYNAMO
2-04	P	B A -	Differenzdruckmesser	Rücklauf DYNAMO Zentral/Helikal
2-05	F	B A S 11	Durchflußmesser	
2-06	TN	B - -	Thermoelement	Zulauf Kühler

2-07	TN	B A S 12	Thermoelement	Rücklauf Kühler
------	----	-------------------	---------------	-----------------

Tabelle D4.3: Betriebsinstrumente des Helikalkreislaufs A

03 - Na-Kreislauf Helikal B

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
3-01	P	B A -	Druckmesser	PPE1
3-02	TC	B A S 13	Thermoelement Cu/CuNi	Zulauf DYNAMO
3-03	TC	B A S 14	Thermoelement Cu/CuNi	Rücklauf DYNAMO
3-04	P	B A -	Differenzdruckmesser	Rücklauf DYNAMO Zentral/Helikal
3-05	F	B A S 15	Durchflußmesser	
3-06	TN	B - -	Thermoelement	Zulauf Kühler
3-07	TN	B A S 16	Thermoelement	Rücklauf Kühler

Tabelle D4.4: Betriebsinstrumente des Helikalkreislaufs B

04 - Na-Hilfskreislauf

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
4-01	TN	B - S 17	Thermoelement NiCr/Ni	Zulauf Kaltfalle
4-02	TN	B A S 18	Thermoelement NiCr/Ni	Kaltfalle

4-03	TN	B - S 19	Thermoelement NiCr/Ni	Rücklauf Kaltfalle
4-04	TN	B - S 20	Thermoelement NiCr/Ni	Separator
4-05	TN	B - S 21	Thermoelement NiCr/Ni	Zulauf Massenströmmesser
4-06	F	B - -	Massenströmmesser	
4-07	TN	B A S 22	Thermoelement NiCr/Ni	Rücklauf
4-08	F	B A S 23	Durchflußmesser	Rücklauf

Tabelle D4.5: Betriebsinstrumente des Natriumhilfskreislaufs

05 - Zentrale Gaseinspeisung

06 - Gassystem Lagerbehälter

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
6-01	P	B A -	Druckmesser	
6-02	E	B A -	Elektrode	Abscheider A1

Tabelle D4.6: Betriebsinstrumente des Gassystems des Lagerbehälters

07 - Gassystem Kreisläufe

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
7-01	P	B A -	Druckmesser	
7-02	E	B A -	Elektrode	Abscheider A2

Tabelle D4.7: Betriebsinstrumente des Gassystems der Kreisläufe.

08 - Kühlwasserkreislauf

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
8-01	TN	B A S 24	Thermoelement NiCr/Ni	Speisewasserbehälter
8-02	L	B - -	Höhenstand	Speisewasserbehälter
8-03	P	B A -	Druckmesser	PPE5
8-04	F	B A S 25	Durchflußmesser	Zulauf Kühler K1
8-05	TN	B A S 26	Thermoelement NiCr/Ni	Zulauf Kühler K1
8-06	P	B - -	Druckmesser max	Sprühraum Kühler K1
8-07	TN	B A -	Thermoelement NiCr/Ni	Sprühraum Kühler K1
8-08	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Sprühraum Kühler K1
8-09	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Dampfleitung Kühler K1
8-10	PH	B - -	pH-Meter	Rücklauf Kühler K1
8-11	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Rücklauf Kühler K1
8-12	F	B A S 27	Durchflußmesser	Zulauf Kühler K2
8-13	TN	B A S 28	Thermoelement NiCr/Ni	Zulauf Kühler K2
8-14	P	B - -	Druckmesser max	Sprühraum Kühler K2

8-15	TN	B A -	Thermoelement NiCr/Ni	Sprühraum Kühler K2
8-16	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Sprühraum Kühler K2
8-17	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Dampfleitung Kühler K2
8-18	PH	B - -	pH-Meter	Rücklauf Kühler K2
8-19	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Rücklauf Kühler K2
8-20	F	B A S 29	Durchflußmesser	Zulauf Kühler K3
8-21	TN	B A S 30	Thermoelement NiCr/Ni	Zulauf Kühler K3
8-22	P	B - -	Druckmesser max	Sprühraum Kühler K3
8-23	TN	B A -	Thermoelement NiCr/Ni	Sprühraum Kühler K3
8-24	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Sprühraum Kühler K3
8-25	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Dampfleitung Kühler K3
8-26	PH	B - -	pH-Meter	Rücklauf Kühler K3
8-27	TN	B - -	Thermoelement NiCr/Ni	Rücklauf Kühler K3
8-28	TN	B A S 31	Thermoelement NiCr/Ni	Dampfleitung
8-29	P	B A S 32	Druckmesser	Kondensator

Tabelle D4.8: Betriebsinstrumente des Wassersystems

09 - Kühlturm

Nr.	Typ		Bezeichnung	Bemerkung
9-01	P	B A -	Druckmesser	PPE6
9-02	TN	B A -	Thermoelement NiCr/Ni	Zulauf Kondensator
9-03	P	B A -	Thermoelement NiCr/Ni	Rücklauf Kondensator

Tabelle D4.9: Betriebsinstrumente des Kühlturmsystems.

D2 Das Programm FÜLLEN auf der SPS

Das Programm Füllen entspricht bis auf wenige Verriegelungen dem SPS-Programm BETRIEB.

Die Verriegelungen betreffen im wesentlichen die Nichtzuschaltbarkeit der Pumpen und der Gebläse wie auch die Nichtzuschaltbarkeit der Natrium-Wasser-Kühler.

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
1	Notaus	O			O		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
2	Modulleck	O			O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
3	Stromausfall																							
4	Pressluftausfall																							
5	Argongas min																							
	HÖHENSTÄNDE																							
6	E 0-03 Kontakt aus		X	X																				
7	E 6-02 Kontakt ein																							
8	E 0-06 Kontakt aus																							
9	E 0-07 Kontakt ein		X	X																				
10	E 7-02 Kontakt ein																							
	GERÄTEDEFEKT																							
11	Gebläse G1																							
12	Gebläse G2																							
13	Gebläse G3																							
14	Gebläse G4																							

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
1													O					A	A	A	A	A	A	A
2													O					A	A	A	A	A	A	A
3													O											
4																								
5													O											
H																								
6													O											
7													O											
8													O					A	A	A	A	A	A	A
9													O					A	A	A	A	A	A	A
10													O											
G																								
11																								
12																								
13																								
14																								

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
1		E	X	X	X						A			Abschaltung der Anlage
2		E	X	X	X						A			Natrium im Druckbehälter
3		E									A*1		Notprogramm	*1 Bei Wiedereinschaltung des Stroms darf die Pumpe nicht anlaufen
4		E												Preßluft überprüfen
5		E												Argon überprüfen (Gasstation)
H														
6		E												Sumpftank leer -Natrium-LECK!
7		E												Natrium im Gassystem
8		E									A			Natriumhöhenstand Minimum
9		E									A			Zuviel Natrium Gefahr für Gassystem
10		E												Natrium im Gassystem
G														
11		E												Gebläseausfall löst lediglich Alarm aus
12		E												bei Pumpenüberhitzung führt der jeweilige
13		E												Temp.-meßwert zur Abschaltung
14		E												

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf						
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	
15	Na-Pumpe PPE1																								
16	Na-Pumpe PPE2																								
17	Na-Pumpe PPE3																								
18	Wasserpumpe PPE5																								
19	Wasserpumpe PPE6																								
	Grenzkontakte																								
	Testmodulschutz																								
20	P1-04/2-04>max																								
21	P1-04/3-04>max																								
22	(P2-01)- (P1-04/2-04)>max																								
23	(P3-01)- (P1-04/3-04)>max																								
	Pumpenschutz																								
24	Temp. PPE1>max																								
25	Temp. PPE2>max																								
26	Temp- PPE3>max																								

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
15																					A			
16																						A		
17																							A	
18																								
19																								
GK																								
MS																								
20																		A			A			
21																		A			A			
22																			A			A		
23																				A			A	
PS																								
24																		A						
25																			A					
26																				A				

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
15		E	X											Bei Na-Pumpenausfall müssen zugehörige
16		E		X										Gebälse aus, sonst Einfrieren von Natrium
17		E			X									.Beim Benetzungslauf ist die Wasser-
18		E	XV	XV	XV						V	V		zufuhr immer unterbrochen.
19		E	XV	XV	XV						V	V		Keine Kühlturmkühlung mehr möglich
GK														
MS														
20		E	X											Druck im Mantelraum zu groß→ Drückt
21		E	X											Helikalaußenrohre zusammen
22		E		X										Mathematische Operation; Druck im Helikal A zu groß
23		E			X									Mathematische Operation; Druck im Helikal B zu groß
PS														
24		E	X											Na-Pumpenüberhitzung
25		E		X										Na-Pumpenüberhitzung
26		E			X									Na-Pumpenüberhitzung

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf						
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	
	Anlagenschutz																								
27	TN4-05>max																								
28	Temp. V0.1<min	V																							
29	Temp. V0.2<min		V																						
30	Temp. V0.3<min			V																					
31	Temp. V0.4<min				V																				
32	Temp. V0.5<min					V																			
33	Temp. V1.1<min						V																		
34	Temp. V1.2<min							V																	
35	Temp. V1.3<min								V																
36	Temp. V1.4<min									V															
37	Temp. V1.5<min										V														
38	Temp. V1.6<min											V													
39	Temp. V2.1<min												V												
40	Temp. V2.2<min													V											
41	Temp. V2.3<min														V										
42	Temp. V3.1<min															V									
43	Temp. V3.2<min																V								

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
AS																								
27																								
28																								
29																								
30																								
31																								
32																								
33																								
34																								
35																								
36																								
37																								
38																								
39																								
40																								
41																								
42																								
43																								

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alar m	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
AS														
27													Heiz. aus	Temp. Massenstromm. zu groß
28														Die Punkte 28-50 dienen, dazu, daß bei einem Absinken der Ventilttemperatur unter einen Grenzwert, das Ventil nicht versehentlich geöffnet wird.
29														
30														
31														
32														Bei Öffnen besteht die Gefahr der Zerstörung des Ventiltaltenbalgs.
33														
34														
35														
36														
37														
38														
39														
40														
41														
42														
43														

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf						
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	
	Anlagenschutz																								
44	Temp. V3.3<min																	V							
45	Temp. V4.1<min																		V						
46	Temp. V4.2<min																			V					
47	Temp. V4.3<min																				V				
48	Temp. V4.4<min																					V			
49	Temp. V4.5<min																						V		
50	Temp. V4.6<min																							V	
	Kaltfallenschutz																								
51	TN4-01<min																								
52	TN4-02<min																								
53	TN4-03<min																								

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
AS																								
44																								
45																								
46																								
47																								
48																								
49																								
50																								
KFS																								
51																								A
52																								A
53																								A

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
AS														
44														
45														
46														
47														
48														
49														
50														-> 50 Schutz der Ventile vor Betätigung bei zu niedriger Temperatur.
KFS														
51		E												Bei zu niedrigen Kaltfallentemperaturen
52		E												besteht Gefah des Natrium einfireirens
53		E												

BENETZUNGSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V Verriegelung des E-Anschlußes der Ventile

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
1	Notaus	O			O		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
2	Modulleck	O			O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
3	Stromausfall																							
4	Pressluftausfall																							
5	Argongas min																							
	HÖHENSTÄNDE																							
6	E 0-03 Kontakt aus		X	X																				
7	E 6-02 Kontakt ein																							
8	E 0-06 Kontakt aus																							
9	E 0-07 Kontakt ein		X	X																				
10	E 7-02 Kontakt ein																							
	GERÄTEDEFEKT																							
11	Gebläse G1																							
12	Gebläse G2																							
13	Gebläse G3																							
14	Gebläse G4																							

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
1													O					A	A	A	A	A	A	A
2													O					A	A	A	A	A	A	A
3													O											
4																								
5													O											
H																								
6													O											
7													O											
8													O					A	A	A	A	A	A	A
9													O					A	A	A	A	A	A	A
10													O											
G																								
11																								
12																								
13																								
14																								

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
1		E	X	X	X						A			Abschaltung der Anlage
2		E	X	X	X						A			Natrium im Druckbehälter
3		E									A*1		Notprogramm	*1 Bei Wiedereinschaltung des Stroms darf die Pumpe nicht anlaufen
4		E												Preßluft überprüfen
5		E												Argon überprüfen (Gasstation)
H														
6		E												Sumpftank leer -Natrium-LECK!
7		E												Natrium im Gassystem
8		E									A			Natriumhöhenstand Minimum
9		E									A			Zuviel Natrium Gefahr für Gassystem
10		E												Natrium im Gassystem
G														
11		E												Gebälseausfall löst lediglich Alarm aus
12		E												bei Pumpenüberhitzung führt der jeweilige
13		E												Temp.-meßwert zur Abschaltung
14		E												

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf						
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	
15	Na-Pumpe PPE1																								
16	Na-Pumpe PPE2																								
17	Na-Pumpe PPE3																								
18	Wasserpumpe PPE5																								
19	Wasserpumpe PPE6																								
	Grenzkontakte																								
	Testmodulschutz																								
20	P1-04/2-04>max																								
21	P1-04/3-04>max																								
22	(P2-01)- (P1-04/2-04)>max																								
23	(P3-01)- (P1-04/3-04)>max																								
	Pumpenschutz																								
24	Temp. PPE1>max																								
25	Temp. PPE2>max																								
26	Temp- PPE3>max																								

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
15																					A			
16																							A	
17																								A
18																								
19																								
GK																								
MS																								
20																		A			A			
21																		A			A			
22																			A			A		
23																				A			A	
PS																								
24																		A						
25																			A					
26																				A				

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
15		E	X											Bei Na-Pumpenausfall müssen zugehörige
16		E		X										Gebälse aus, sonst Einfrieren von Natrium
17		E			X									ebenso Kühlwasser aus.
18		E												
19		E												Keine Kühlturmkühlung mehr möglich
GK														
MS														
20		E	X											Druck im Mantelraum zu groß → Drückt
21		E	X											Helikalaußenrohre zusammen
22		E		X										Mathematische Operation; Druck im Helikal A zu groß
23		E			X									Mathematische Operation; Druck im Helikal B zu groß
PS														
24		E	X											Pumpenüberhitzung
25		E		X										Pumpenüberhitzung
26		E			X									Pumpenüberhitzung

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
	Na-H ₂ OKühlerschutz																							
27	Temp. TN1-07<min																							
28	Temp. TN2-07<min																							
29	Temp. TN3-07<min																							
30	TN8-07>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
31	TN8-08>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
32	TN8-11>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
33	TN8-15>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
34	TN8-16>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
35	TN8-19>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
36	TN8-23>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
37	TN8-24>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
38	TN8-27>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
39	P8-06>max	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
40	P8-14>max	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
41	P8-22>max	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
42	P8-29>max	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
KS																								
27																								
28																								
29																								
30													O					A	A	A	A	A	A	A
31													O					A	A	A	A	A	A	A
32													O					A	A	A	A	A	A	A
33													O					A	A	A	A	A	A	A
34													O					A	A	A	A	A	A	A
35													O					A	A	A	A	A	A	A
36													O					A	A	A	A	A	A	A
37													O					A	A	A	A	A	A	A
38													O					A	A	A	A	A	A	A
39													O					A	A	A	A	A	A	A
40													O					A	A	A	A	A	A	A
41													O					A	A	A	A	A	A	A
42													O					A	A	A	A	A	A	A

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen	
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6			
KS															
27		E	X												Gefahr des Natriumeinfrierens Kühler K1
28		E		X											Gefahr des Natriumeinfrierens Kühler K2
29		E			X										Gefahr des Natriumeinfrierens Kühler K3
30		E	X			X									Im Dampfraum können keine Temperaturen
31		E	X			X									über 150°C auftreten, es sei denn, daß
32		E	X			X									Natrium in den Wassersprühraum einge-
33		E		X			X								drungen ist.
34		E		X			X								Die Abschaltung gilt für 30-38
35		E		X			X								
36		E			X			X							
37		E			X			X							
38		E			X			X							
39		E	X			X									Ein Druck über 1.5bar kann nur bei Natrium
40		E		X			X								Wasser-Reaktionen auftreten -> Anlage
41		E			X			X							abschalten; Punkte 39-42
42		E	X	X	X	X	X	X			X				

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
	Na-H ₂ O Kühlerschutz																							
43	pH8-10>max	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
44	pH8-18>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
45	pH8-26>max.	O					O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
46	p8-03<min																							
47	p9-01<min																							
48	TN9-03>max																							
	Analgenschutz																							
49	TN4-05>max																							
50	Temp. V0.1<min	V																						
51	Temp. V0.2<min		V																					
52	Temp. V0.3<min			V																				
53	Temp. V0.4<min				V																			
54	Temp. V0.5<min					V																		
55	Temp. V1.1<min						V																	
56	Temp. V1.2<min							V																
57	Temp. V1.3<min								V															

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
KS																								
43													O					O	O	O	O	O	O	O
44													O					O	O	O	O	O	O	O
45													O					O	O	O	O	O	O	O
46																								
47																								
48																								
AS																								
49																								
50																								
51																								
52																								
53																								
54																								
55																								
56																								
57																								

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen	
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6			
KS															Ein pH-Wert von größer als 10 kann nur bei
43		E	X			X									Natrium-Wasser-Reaktionen auftreten ->
44		E		X				X							Anlage abschalten
45		E			X				X						
46		E													Druck der Düsenpumpe zu klein
47		E													Druck der externen Kühlpumpe zu klein
48		E													Wärmeabfuhr aus Kondensator zu klein
AS															
49													Heiz. aus		Temp. Massenstromm. zu groß
50															Die Punkte 50-72 dienen, dazu, daß bei
51															einem Absinken der Ventiltemperatur
52															unter einen Grenzwert, das Ventil nicht
53															versehentlich geöffnet wird.
54															Bei Öffnen besteht die Gefahr der Zerstörung
55															des Ventiltaltenbalgs.
56															
57															

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Ereignis/Maßnahme	Füll- Ablaßsystem					Natriumkreis Zentral						Helikal A			Helikal B			Hilfskreislauf					
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6
	Anlagenschutz																							
58	Temp. V1.4<min									V														
59	Temp. V1.5<min										V													
60	Temp. V1.6<min											V												
61	Temp. V2.1<min												V											
62	Temp. V2.2<min													V										
63	Temp. V2.3<min														V									
64	Temp. V3.1<min															V								
65	Temp. V3.2<min																V							
66	Temp. V3.3<min																	V						
67	Temp. V4.1<min																		V					
68	Temp. V4.2<min																			V				
69	Temp. V4.3<min																				V			
70	Temp. V4.4<min																					V		
71	Temp. V4.5<min																						V	
72	Temp. V4.6<min																							V

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
 A Gerät AUS X Ventil ZU
 V E-Antrieb gesperrt

Nr.	Gas Zentral			Gassystem Sumpftank						Gassystem Kreislauf								Na-Pumpen			Gebläse			
	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	PPE1	PPE2	PPE3	G1	G2	G3	G4
AS																								
58																								
59																								
60																								
61																								
62																								
63																								
64																								
65																								
66																								
67																								
68																								
69																								
70																								
71																								
72																								

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V E-Antrieb gesperrt

Nr.	V.-Alarm	Alarm	Wasser-Wasserdampfsystem							Wasserpumpen			Heizungen	Bemerkungen
			8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	PPE4	PPE5	PPE6		
AS														
58														
59														
60														
61														
62														
63														
64														
65														
66														
67														
68														
69														
70														
71														-> 72 Schutz der Ventile vor Betätigung bei
72														zu niedriger Temperatur.

BETRIEBSPROGRAMM des GEODYNAMO-Versuchsstandes

Legende: E Gerät EIN O Ventil AUF
A Gerät AUS X Ventil ZU
V Verriegelung des E-Anschlußes der Ventile

Abkürzungen, Variablen und Kennzahlen

Abkürzungen

CPU	Central Processing Unit (Zentralrecheneinheit)
DN	DIN Nennweite in Millimetern
Ex	Elektrode
FLIP	Flat linear induction pump (lineare Induktionspumpe)
FZK	Forschungszentrum Karlsruhe
IATF	Institut für Angewandte Thermo- und Fluidodynamik
KNK	Kompakte natriumgekühlte Kernanlage
LAS	Latvian Academy of Sciences (Lettische Akademie der Wissenschaften)
MHD	Magnetohydrodynamik
NaK	eutektische Natrium-Kalium Legierung $\text{Na}^{22}\text{K}^{78}$
PC	Personal Computer
pH	Maß für die Anzahl der H_3O^+ -Ionen Konzentration in einer wässrigen Lösung
PPE	Pumpe
SMP	Schmelzpunkt eines Mediums
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung

Vektoren (fett gedruckt)

B	magnetische Induktion
\hat{B}	fluktuierende Magnetfeld
\bar{B}	räumlich gemittelte Magnetfeld
e_r, e_φ, e_z	Einheitsvektoren in r, φ und z -Richtung
j	elektrische Stromdichte
k	Einheitsvektor in z -Richtung
n	Einheitsnormalenvektor auf eine Fläche
r	Radiusvektor
v	charakteristische Geschwindigkeit

Variablen (kursiv)

<u>Abkürzung</u>	<u>phys. Einheit</u>	<u>Beschreibung</u>
<i>A</i>	[/]	dimensionslose Amplitude des Geschwindigkeitsfeldes in axiale Richtung
<i>C</i>	[/]	dimensionslose Amplitude des Geschwindigkeitsfeldes in helikale Richtung
<i>D</i>	[m]	Schichtstärke von stagnierendem Fluid in axiale bzw. radiale Richtung

<u>Abkürzung</u>	<u>phys. Einheit</u>	<u>Beschreibung</u>
$E(k)$	[J]	turbulente kinetische Energie
ΔH	[J/mol]	chemische Reaktionsenthalpie
K	[N/mm ²]	1% Dehngrenze eines Materials
K_0	[/]	modifizierte Besselfunktion zweiter Art nullter- Ordnung
I_0	[/]	modifizierte Besselfunktion erster Art nullter- Ordnung
I_1	[/]	modifizierte Besselfunktion erster Art und erster- Ordnung
J_0	[/]	Besselfunktion nullter-Ordnung
J_1	[/]	Besselfunktion erster-Ordnung
M	[kg/mol]	Molmasse eines Mediums
Q	[J]	In ein System zugeführte Wärmeenergie
R	[J/(kgK)]	spezifische Gaskonstante
\mathfrak{R}	[J/(kgK)]	universelle Gaskonstante
S	[/]	Sicherheitsfaktor bei der technischen Dimensionierung
T, T_0, T_w	[K]	Temperaturen
$\bar{T}(x)$	[K]	mittlere Temperatur
U	[V]	elektrische Spannung
ΔU	[J]	Innere Energie in einem System
dV	[m ²]	Volumenänderung
V	[/]	Bearbeitungsfaktor für Materialien
\dot{V}_a	[m ³ /s]	Volumenstrom durch den axialen Kreislauf des Dynamos
\dot{V}_h	[m ³ /s]	Volumenstrom durch die helikalen Kreisläufe des Dynamos
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom durch den Dynamo
Z	[/]	Anzahl der Drallerzeuger im Dynamomodul
a	[m]	Außendurchmesser des Drallerzeugers
c_p	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck eines Mediums
c_v	[J/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen eines Mediums
d	[m]	Höhe des Dynamobehälters
f	[/]	Formfaktor
g, h	[/]	Vektorpotentiale
h^e	[/]	Potential des Magnetfeld außerhalb des Dynamos

Abkürzung	phys. Einheit	Beschreibung
k	[/]	Wellenzahl
l	[m]	charakteristische Länge, beim Kühler bezeichnet es die Kühlerlänge
m	[kg]	Masse eines Kontrollvolumens
Δp	[Pascal]	hydraulische Druckdifferenz
p	[/]	Anwachsrate des magnetischen Feldes
$q(x)$	[W/m ²]	Wärmestromdichte
r_0	[m]	Radius des Dynamobehälters
r	[/]	Radiuskoordinate (Zylinderkoordinate)
r_m	[m]	mittlere Radius des Drallerzeugers
Δr	[m]	Abstand zwischen Innen- Außenrohr im Drallerzeuger
s, \tilde{s}	[m]	Produkt aus dem Radius und einer Besselnullstelle
s	[m]	Wandstärke eines Materials
t	[s]	Zeit
v	[m/s]	charakteristische Geschwindigkeit
\bar{v}	[m/s]	mittlere Geschwindigkeit im Kanal
w	[/]	dimensionslose Funktion
x, y, z	[/]	kartesische Koordinaten
α	[/]	Geometrieverhältnis
$\alpha(x)$	[W/(mK)]	Wärmeübertragungskoeffizient
β^e	[/]	Nullstelle der Besselfunktion für das äußere Potentialfeld
βr	[m]	Nullstelle einer Besselfunktion in Längsrichtung
χ	[/]	Anzahl der Windungen eines Drallerzeugers
ε	[/]	mittlere Porosität einer Fläche
$\gamma, \tilde{\gamma}$	[/]	Expansionsskalare der Besselfunktion
η	[/]	Verhältnis der Amplituden des Geschwindigkeitsfeldes A, C normiert mit dem Verhältnis der Skalenlänge der kleinen Skala
φ	[/]	Umfangsrichtungscoordinate (Zylinderkoordinate)
κ	[/]	Fitkoeffizient bei der Berechnung eines räumlich endlichen Dynamos
$\hat{\lambda}_e$	[/]	Volumenstrom-Skalenverhältnis, bezeichnet die Diffusion des Magnetfeldes
λ_e	[m ² /s]	effektive elektromagnetische Diffusivität hervorgerufen durch die endliche Erstreckung des Dynamos

Abkürzung	phys. Einheit	Beschreibung
λ_m	[m ² /s]	modifizierte elektromagnetische Diffusivität
λ_{therm}	[W/(mK)]	thermische Leitfähigkeit des Mediums
λ_{turb}	[m ² /s]	turbulente elektromagnetische Diffusivität
λ	[m ² /s]	elektromagnetische Diffusivität
μ	[/]	Fitkoeffizient bei der Berechnung eines räumlich endlichen Dynamos
μ	[Vs/(Am)]	magnetische Permeabilität
μ_0	[Vs/(Am)]	magnetische Permeabilität des Vakuums
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	spezifische Dichte eines Mediums
σ	[A/(Vm)]	spezifische elektrische Leitfähigkeit
ξ	[/]	hydraulischer Druckverlustkoeffizient in einem speziellen Bauteil, bsp. Krümmer
ζ_x	[/]	hydraulischer Druckverlustkoeffizient in einem Kanal
Ψ	[/]	Stromfeld

Operatoren

∇	Gradient eines Vektors
∂	partielle Ableitung eines Vektors
Δ	Laplace Operator angewandt auf einen Vektor $\Delta = \partial_{xx} + \partial_{yy} + \partial_{zz}$
$(\nabla \cdot)$	Divergenz eines Vektors
$(\nabla \times)$	Rotation angewandt auf einen Vektor
\bar{A}	räumliche Mittelung eines Vektor über eine bestimmte Skalenlänge oder bei nicht fett gedruckten Größen räumliche Mittelung über die Größe

Kennzahlen

M	Hartmann-Zahl
Nu	Nusseltzahl
Re	hydraulische Reynoldszahl
R_A	magnetische Reynoldszahl in axiale Richtung
R_C	magnetische Reynoldszahl in helikale Richtung
R	magnetische Reynoldszahl gebildet aus R_A, R_C und Längenskalen
R_m	magnetische Reynoldszahl