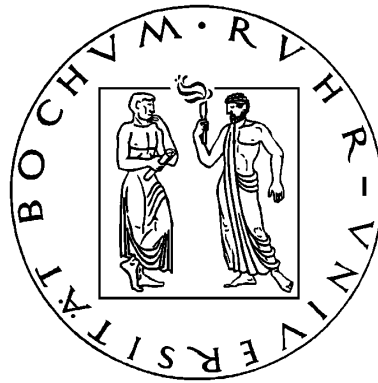


**Entwicklung und Test einer LabVIEW basierten
Steuerung eines Kryopumpstandes für
Polarisationsmessungen**



Ruhr-Universität Bochum

DIPLOMARBEIT

Björn Adebahr

Bochum, 19. Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Die fundamentalen Wechselwirkungen	5
1.2	Grundbausteine der Materie	5
1.3	Polarisierte Festkörpertargets	7
2	Grundlagen	9
2.1	Drehimpuls	9
2.1.1	Magnetisches Moment und Kernspin	10
2.1.2	Zeemann-Effekt	11
2.2	Natürliche Polarisation	12
2.3	Dynamische Polarisation	13
2.3.1	Solid State Effekt	13
2.3.2	Spintemperaturtheorie	14
3	Vakuumtechnik	17
3.1	Grundlagen der Gasdynamik und kinetischen Gastheorie	17
3.1.1	Strömungsarten	18
3.1.2	Saugvermögen und Leitwerte	18
3.2	Vakuumerzeugung	20
3.2.1	Drehschieberpumpen	20
3.2.2	Wälzkolbenpumpen	21
3.3	Pumpstand der PT-Gruppe Bochum	22
3.3.1	Ventil- und Leitungssystem	22
3.3.2	Pumpenkombination	23
3.3.3	Abschätzung des Saugvermögens der Pumpenkombination	23
3.3.4	Leistungsverlust durch Rohrleitungen	24
4	Hardware	27
4.1	Hardwarekomponenten und Datentransfer	27
4.2	Feldbussysteme	28
4.2.1	PROFIBUS DP	29
4.2.2	Kommunikationsprotokoll	29
4.2.3	Hardwarekonfiguration des Feldbussystems	32
5	Software	33
5.1	STEP7	33
5.2	LabVIEW	34
5.2.1	Benutzeroberfläche	36
5.2.2	Blockdiagramm der Applikation	36

6	Messungen am Pumpstand	49
6.1	Messung des Saugvermögens	49
6.1.1	Bestimmung der Kühlleistung	50
7	Zusammenfassung und Ausblick	53
A	Tabellen	55
A.1	Adresszuordnungen der Hardwarekonfiguration	56
A.2	Datenbausteine	57
A.2.1	DB100: Ansteuerung Pumpen/Ventile	57
A.2.2	DB101: Status-/Fehlermeldungen	58
A.2.3	DB103: Druckwerte/Automatikmodus	59
B	IEEE754-Format	61
B.1	Darstellungsformen des IEEE754-Formates	61
B.1.1	Beispiel: Berechnung single IEEE754-Zahl -> Dezimalzahl	62

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Die fundamentalen Wechselwirkungen

Anfang des 19. Jahrhunderts galten vier Kräfte als die Grundkräfte der Natur: Gravitation, Elektrizität, Magnetismus und die wenig verstandenen Kräfte zwischen Atomen und Molekülen. Ende des 19. Jahrhunderts wurde erkannt, dass Elektrizität und Magnetismus lediglich zwei Erscheinungsformen derselben Kraft sind, dem Elektromagnetismus. Etwas später entdeckte man, dass Atome eine Substruktur besitzen und aus einem elektrisch geladenen Kern und Elektronen bestehen, wodurch man erkannte dass Atome durch die elektromagnetische Kraft zusammengehalten werden.

Die daraufhin einsetzende Forschung im Bereich der Kernphysik brachte zwei neue Kräfte hervor: Die Kernkraft, die zwischen Nukleonen herrscht und die schwache Kraft. Spätere Forschungen ergaben, dass die Kernkraft nicht fundamental ist, sondern auf der starken Kraft beruht, die die Quarks zu Protonen und Neutronen bindet.

Diese bisher bekannten Grundkräfte führen zu den vier fundamentalen Wechselwirkungen und deren Austauschbosonen, auf denen alle physikalischen Phänomene beruhen:

- Gravitation¹
- elektromagnetische Wechselwirkung (Photon)
- starke Wechselwirkung (Gluon)
- schwache Wechselwirkung (W^+ -, W^- - und Z^0 -Boson)

Heute weiß man, dass die Wechselwirkungen auf dem Austausch der in Klammern angegebenen Spin-1-Teilchen beruhen, was sich mit Hilfe der Feynman-Diagramme skizzieren lässt.

Zu jeder der drei für die Kern- und Teilchenphysik wichtigen Wechselwirkungen gehört eine Ladung, die elektrische Ladung, die schwache Ladung und die starke Ladung oder Farbladung.

1.2 Grundbausteine der Materie

Nach heutigem Verständnis gibt es drei Arten von fundamentalen Teilchen: Die Leptonen, zu denen Elektron und Neutrino gehören, die Quarks und die Bosonen. Leptonen und Elektronen sind Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, also Fermionen, während Bosonen Spin-1-Teilchen sind. Bisher sind sechs Leptonen und sechs Quarks mit den dazu gehörigen Antiteilchen bekannt.

An die zu den Quarks gehörende Farbladung (rot, grün, blau) koppeln die Gluonen und

¹Die Gravitation spielt in der Kern- und Teilchenphysik eine untergeordnete Rolle, da sie im Vergleich zu den anderen Kräften sehr schwach ist.

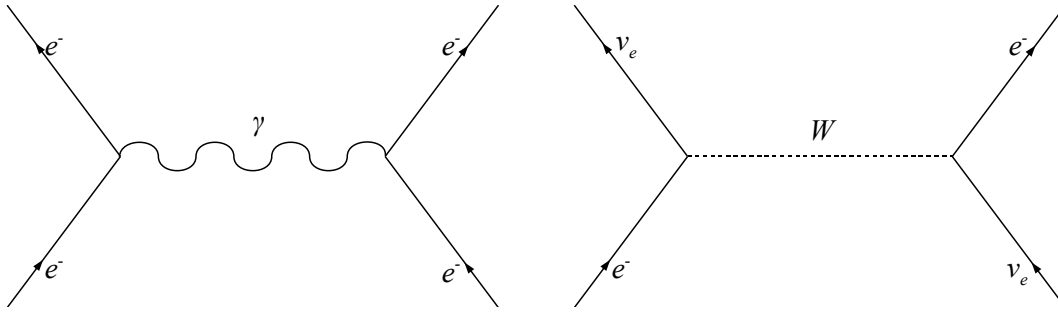


Abb. 1.1: Beispiel eines Feynman-Diagramms der elektromagnetischen Wechselwirkung (Elektron-Elektron) und der schwachen Wechselwirkung (Elektron-Elektronneutrino).

Name	Symbol	el. Ladung	Ruhemasse [$\frac{\text{MeV}}{c^2}$]
Elektron	e^-	-1	0.511
Elektron-Neutrino	ν_e	0	$< 2 \cdot 10^{-6}$
Myon	μ	-1	105.66
Myon-Neutrino	ν_μ	0	< 0.17
Tauon	τ	-1	1777
Tauon-Neutrino	ν_τ	0	< 15.5
Up	u	$\frac{2}{3}$	1.5-3.0
Down	d	$-\frac{1}{3}$	3-7
Charm	c	$\frac{2}{3}$	1250 ± 90
Strange	s	$-\frac{1}{3}$	95 ± 25
Top	t	$\frac{2}{3}$	170900 ± 1800
Bottom	b	$-\frac{1}{3}$	4200 ± 70

Tab. 1.1: Übersicht über die fundamentalen Teilchen. Die oberen sechs sind Leptonen, die unteren sechs Quarks.

formen die Hadronen als Familie der stark wechselwirkenden Teilchen. Kombinationen von Quarks können nur als farbneutrale, d.h. weiße oder schwarze Zustände auftreten.

So sind nur Zustände mit drei Quarks ($qqq/\bar{q}\bar{q}\bar{q}$), die Baryonen, oder einem Quark-Antiquark-Paar ($q\bar{q}$), die Mesonen, zulässig. Auch die Gluonen tragen hierbei eine Farbladung und können untereinander wechselwirken.

Betrachtet man nun die Nukleonen, stellt sich deren Struktur als sehr kompliziert heraus. Man sollte annehmen, dass alle Valenzquarks eines Nukleons, welche in ihrer Summe die Quantenzahlen des Nukleons ausmachen, auch einzeln zu dessen Gesamtspin von $\frac{1}{2}$ addiert werden können. Untersuchungen mit Hilfe von Doppelpolarisationsexperimenten, d.h. sowohl mit spinpolarisiertem Strahl als auch Target, haben jedoch 1987 am CERN² gezeigt, dass die Quarks nur einen Bruchteil des Nukleonenspins tragen. Genauere Messungen haben einen Anteil der Quarks am Nukleonenspin von etwa 30% ergeben. Heutige Forschungen vom HERMES³-Experiment am DESY⁴ und COMPASS⁵-Experiment am CERN versuchen die restlichen Beiträge zum Nukleonenspin zu ermitteln, d.h. die Summanden der Beziehung

$$S_z = \frac{1}{2}(\Delta u + \Delta d + \Delta s) + \Delta G + \langle L_z \rangle = \frac{1}{2} \quad (1.1)$$

sind nicht erklärt.

²Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire

³HERa MEasurement of Spin dependent structure functions

⁴Deutsches Elektronen SYNchrotron

⁵COmmon MUon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy

1.3 Polarisierte Festkörpertargets

Doppelpolarisationsexperimente mit Festkörpertargets sind ein gutes Hilfsmittel zur Erforschung des inneren Aufbaus der Nukleonen und der einzelnen Spinbeiträge, da hierbei eine hohe Luminosität erreicht werden kann und eine direkte Messung der Spinbeiträge durch die Zählratenasymmetrie

$$A_Z = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_-} \quad (1.2)$$

möglich ist. Diese Formel muss noch um die Faktoren P_S (Polarisation des Strahls), P_T (Polarisation des Targets) sowie dem Dilutionfaktor f korrigiert werden. Dieser ist definiert als

$$f := \frac{\text{Zahl polarisierbarer Nukleonen}}{\text{Zahl aller Nukleonen}} \quad (1.3)$$

und ist ein Maß für die Polarisierbarkeit des Targetmaterials. Zusammengefasst ergibt sich also folgende Formel zur Bestimmung der physikalischen Asymmetrie:

$$A \sim \frac{1}{f P_S P_T} A_Z. \quad (1.4)$$

Dabei gibt A das Verhältnis der Reaktionen bzw. Ereignisse eines zum Target antiparallel ausgerichteten Strahls zu einem parallel ausgerichteten Target an.

Nimmt man an, dass der Fehler dieser Beziehung ΔT fast immer nur von dem statistischen Fehler ΔZ der Zählratenasymmetrie gegeben ist, folgt:

$$\Delta T \approx \frac{1}{f P_T} \Delta Z \approx \frac{1}{f P_T} \cdot \frac{1}{\sqrt{N_+ + N_-}} \propto \frac{1}{f P_T} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}}. \quad (1.5)$$

Bei vorgegebenem Fehler ΔT gilt also für die Messzeit $t \propto \left(\frac{1}{f P_T}\right)^2$.

Diese quadratische Abhängigkeit der Messzeit sowohl von der Targetpolarisation P_T als auch vom Dilutionfaktor f zeigt, dass das Produkt der beiden Größen, vom targettechnischen Standpunkt aus gesehen, möglichst groß werden sollte um in möglichst kurzer Zeit eine hohe Polarisation zu erreichen. Durch geeignete Wahl des Targetmaterials lässt sich f optimieren. Die Optimierung von P_T ist nur durch hohe Magnetfelder, tiefe Temperaturen und die in Kapitel 2 erklärten Mechanismen möglich.

Es kann also eine 'figure of merit' FOM definiert werden als:

$$FOM = n_T P_T^2 f^2. \quad (1.6)$$

Dabei ist n_T die Zahl der Targetteilchen pro cm^2 . Je höher also die FOM , desto geringer ist die benötigte Messdauer um eine bestimmte Genauigkeit in der Zählratenasymmetrie zu erreichen.

Die Bochumer PT⁶-Gruppe beschäftigt sich sowohl mit der Suche nach neuen Targetmaterialien als auch der Optimierung bereits bekannter Materialien unter anderen Bedingungen, wie unterschiedlichen Magnetfeldstärken oder Temperaturen. Dazu stehen zur Zeit folgende Apparaturen zur Verfügung:

- ein ^4He -Verdampfer-Kryostat mit 2.5T-Eisenkernmagnet [Har97]
- ein ^3He -Verdampfer-Kryostat mit supraleitendem 5T-Magneten [Sch98]

⁶Polarisiertes Target

- eine X-Band ESR⁷-Apparatur [Dah05]
- ein ^3He - ^4He -Dilution-Kryostat mit supraleitendem 5T-Magneten
- ein ^4He -Verdampfer-Kryostat mit supraleitendem 7.5T-Magneten [Hes]

Die Verwendung von flüssigem Helium und flüssigem Stickstoff als Kühlmittel und den damit erreichten Temperaturen von unter 1K stellt sowohl an die Ventil- und Dichttechnik als auch an die Pumpen hohe Anforderungen in Hinsicht auf die Materialbelastbarkeit.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer auf LabVIEW basierenden Oberfläche zur Steuerung des zu den beiden ^4He -Verdampfer-Kryostaten gehörenden Pumpstands. Diese Steuerungssoftware soll eine bereits vorhandene Visual Basic Oberfläche ersetzen, da diese nicht kompatibel zu den anderen mit LabVIEW betriebenen Geräten ist und somit bisher kein Datenaustausch zwischen am Pumpstand betriebenen Geräten und anderen im Labor vorhandenen Applikationen, wie z.B. SlowControl/DAQ möglich war. Weiterhin ermöglicht eine Erneuerung der Programmierung höhere Sicherheitsvorkehrungen, vor allem in Hinsicht auf Fehlbedienung der angeschlossenen Pumpen und Kryostate, sowie eine auf die Bedürfnisse maßgeschneiderte Benutzeroberfläche.

Zu Beginn dieser Arbeit werden einige Grundlagen zur Erzeugung von Spinpolarisation besprochen. Diesen folgt eine kurze Einführung in die Vakuumtechnik, eine Vorstellung der benutzten Pumpenkombination sowie eine theoretische Betrachtung des Saugvermögens des Pumpstands. Im darauf folgenden Teil der Arbeit wird dann die mit LabVIEW entworfene Benutzeroberfläche vorgestellt sowie deren Datenaustausch mit den vorhandenen Hardware- und Softwarekomponenten erläutert. Diese Applikation wird daraufhin benutzt um das vorher theoretisch ermittelte Saugvermögen des Pumpstands praktisch zu messen.

⁷Electron Spin Resonance

Kapitel 2

Grundlagen

Gegenstand dieses Kapitels ist die quantenmechanische Beschreibung des Spins als Ursache für das kernmagnetische Moment unter Einfluß eines Magnetfeldes sowie die Definition des Begriffs Polarisation. Weiterhin werden Strategien zur Manipulation der Polarisation erklärt.

2.1 Drehimpuls

Der klassische Drehimpuls ist definiert durch:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}. \quad (2.1)$$

In der Quantenmechanik wird ein drehimpulsartiger Zustand durch zwei Quantenzahlen bestimmt:

1. Die Drehimpulsquantenzahl j
2. Die magnetische Quantenzahl m

Die Eigenfunktionen sind durch diese beiden Drehimpulsquantenzahlen festgelegt gemäß den Eigenwertgleichungen

$$\hat{J}^2 |j, m\rangle = \hbar^2 j(j+1) |j, m\rangle \quad (2.2)$$

$$\text{und } \hat{J}_z |j, m\rangle = \hbar m |j, m\rangle. \quad (2.3)$$

Damit erhält man für den Betrag des Drehimpulses

$$|\vec{j}| = \hbar \sqrt{j(j+1)}. \quad (2.4)$$

Für den Operator \hat{J}_z ergibt sich der Eigenwert zu

$$j_z = \hbar m, \quad (2.5)$$

wobei $j = 0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ und $m = -j, -j+1, \dots, j$ ist. Für einen gegebenen Wert von j gibt es also $2j+1$ verschiedene Werte von m . Durch diese Quantelung des Drehimpulses in ganz- oder halbzahlige Werte spricht man oft von Spin-1-Teilchen bzw. Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen.

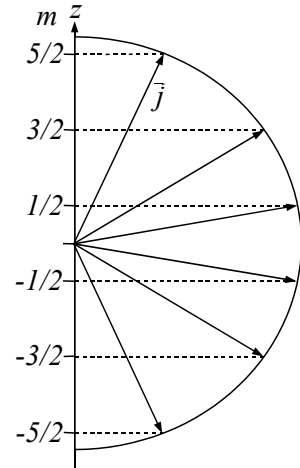


Abb. 2.1: Möglicher Zustand eines Gesamtdrehimpulses $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$ für $l=2$ und $s=1/2$.

2.1.1 Magnetisches Moment und Kernspin

Stellt man sich nun das um einen Atomkern kreisförmig¹ laufende Elektron vor, erkennt man, dass dieses System zweier Teilchen einen Kreisstrom erzeugen muss. Der Wert dieses Stroms ergibt sich zu:

$$I = \frac{q}{t} = -\frac{e\omega}{2\pi} \quad (2.6)$$

Die von der bewegten Ladung umschlossene Fläche ist dabei:

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi L}{m\omega}. \quad (2.7)$$

Dies ergibt sich mit $L = m\omega r^2$ aus (2.1).

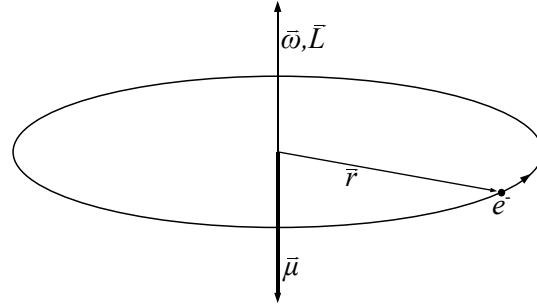


Abb. 2.2: Veranschaulichung der Entstehung des magnetischen Moments durch das kreisende Elektron.

Das magnetische Moment ist durch die Multiplikation beider Größen definiert:

$$\vec{\mu} = I \cdot \vec{A} = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}. \quad (2.8)$$

Wie man aus Abb. 2.2 erkennt, zeigt das magnetische Moment in die dem Drehimpuls entgegengesetzte Richtung; dies entsteht durch das negative Vorzeichen der Ladung des Elektrons.

Diese klassischen Betrachtungen können jedoch nicht komplett auf die Quantenmechanik übertragen werden. So setzt sich das magnetische Gesamtmoment des Elektrons $\vec{\mu}$ aus dem magnetischen Bahnmoment

$$\vec{\mu}_l = -g_l \frac{e}{2m_e} \vec{l} = -g_l \mu_B \frac{\vec{l}}{\hbar} \quad (2.9)$$

und dem magnetischen Spinmoment

$$\vec{\mu}_s = -g_s \frac{e}{2m_e} \vec{s} = -g_s \mu_B \frac{\vec{s}}{\hbar} \quad (2.10)$$

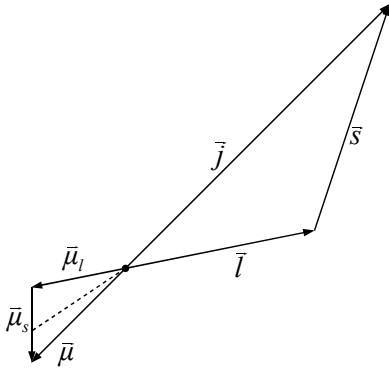


Abb. 2.3: Kopplung von Bahndrehimpuls \vec{l} und Spin \vec{s} zum Gesamtdrehimpuls \vec{j} und der magnetischen Momente $\vec{\mu}_l$ und $\vec{\mu}_s$ zum Gesamtmoment $\vec{\mu}$.

zusammen. Dabei ist $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ das Bohrsche Magneton. Der gyromagnetische Faktor g bestimmt die Proportionalität zwischen Drehimpuls und magnetischem Moment des Elektrons. Dieser ergibt sich für das magnetische Bahnmoment zu $g_l = 1$ und für das magnetische Spinmoment zu $g_s = 2.0023$. Das magnetische Gesamtmoment ergibt sich aus der Summe der beiden Teilmomente:

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_s + \vec{\mu}_l = -\frac{e}{2m_e} (\vec{l} + 2 \cdot \vec{s}). \quad (2.11)$$

Dabei ist das magnetische Gesamtmoment $\vec{\mu}$ des Elektrons nicht antiparallel zum Gesamtdrehimpuls $\vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$ ausgerichtet.

¹wie im Bohrschen Atommodell

Genauso wie Elektronen sind auch Protonen und Neutronen Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen und tragen ein magnetisches Moment. Dieses wird analog zum Elektronenspin definiert:

$$\vec{\mu}_I = g_K \frac{e}{2m_p} \vec{s} = g\mu_K \frac{\vec{I}}{\hbar}. \quad (2.12)$$

Dabei entspricht $\mu_K = \frac{e\hbar}{2m_p}$ dem Kernmagneton in Analogie zum Bohrschen Magneton. Das magnetische Moment eines Korns sollte sich also, wie beim Elektron, aus den einzelnen magnetischen Momenten des Protons und des Neutrons zusammensetzen. Das Neutron sollte, da es elektrisch neutral ist, kein magnetisches Moment besitzen und der Wert für das magnetische Moment des Protons weicht erheblich vom Kernmagneton ab. Diese beiden Feststellungen lassen darauf schließen, dass sowohl Proton als auch Neutron eine Substruktur besitzen und Nukleonen keine punktförmigen Teilchen sind.

2.1.2 Zeemann-Effekt

Bringt man ein H-Atom in ein äußeres Magnetfeld und verwendet ein halbklassisches Modell, bei dem die Umlaufbahn des Elektrons als kreisförmig angenommen wird, jedoch Gleichung (2.4) gilt, ergibt sich die potentielle Energie eines magnetischen Dipols in einem solchen Feld zu:

$$E_{pot} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}. \quad (2.13)$$

Mit Gleichung (2.8) lässt sich dies durch den Drehimpuls \vec{L} ausdrücken:

$$E_{pot} = \frac{e}{2m_e} \cdot \vec{L} \cdot \vec{B}. \quad (2.14)$$

Zeigt nun das Magnetfeld in z -Richtung, so ergibt dies wegen $L_z = m\hbar$:

$$E_{pot} = \frac{e\hbar}{2m_e} m B_z, \quad (2.15)$$

wobei m die magnetische Quantenzahl ist. Die durch das äußere Magnetfeld B bewirkte Zusatzenergie eines Zustands (n, l, m) ist:

$$\Delta E_m = \mu_B m B. \quad (2.16)$$

Damit erhalten wir für die Werte des Wasserstoffatoms im Magnetfeld:

$$E_{n,l,m} = E_{Coul}(n, l) + \mu_B m B. \quad (2.17)$$

Die ohne äußeres Magnetfeld entarteten $2l + 1$ m -Zustände spalten also im Magnetfeld in die $2l + 1$ äquidistanten Zeeman-Komponenten auf, deren Abstand durch

$$\Delta E = E_{n,l,m} - E_{n,l,m-1} = \mu_B B \quad (2.18)$$

gegeben ist. Diese Aufspaltung in $2l + 1$ Komponenten aufgrund des mit dem Bahndrehimpuls verknüpften magnetischen Moments nennt man normalen Zeeman-Effekt².

²Im Gegensatz dazu gibt es noch den anomalen Zeeman-Effekt. Dieser bewirkt eine komplizierte Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld und tritt auf, wenn die an den Übergängen beteiligten Terme keine Spin-Singulets sind.

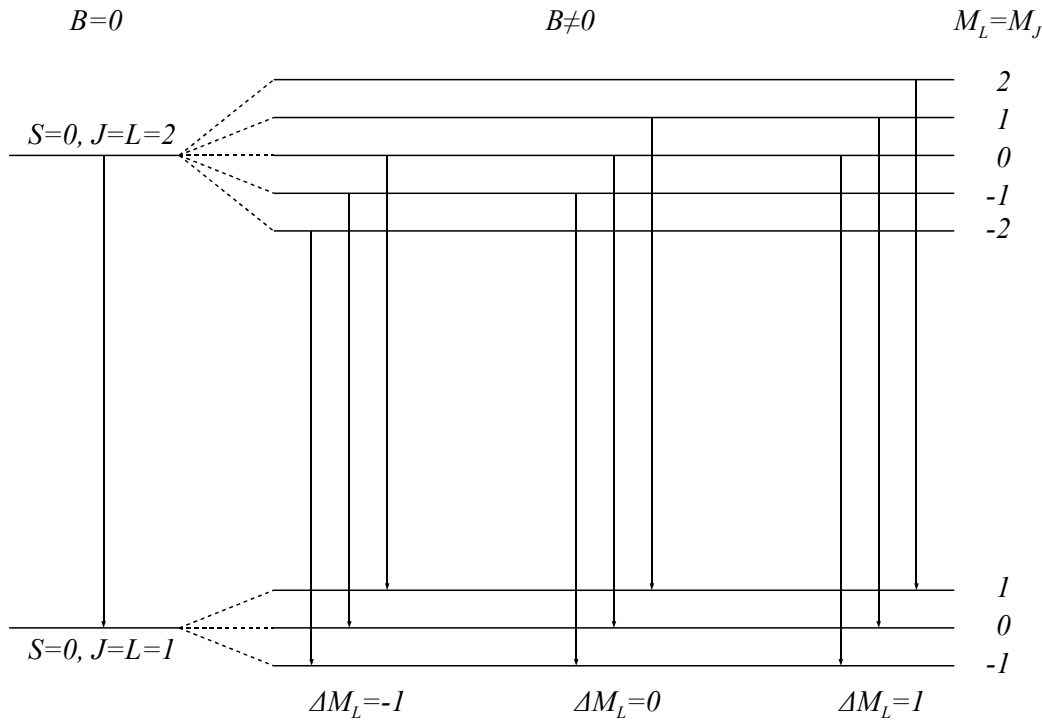


Abb. 2.4: Schema des normalen Zeeman-Effekts in einem Wasserstoffatom. Die Pfeile kennzeichnen die erlaubten Energieübergänge, d.h. Übergänge mit $\Delta M_L = -1, 0, 1$.

2.2 Natürliche Polarisation

Unter Polarisation versteht man eine Überbesetzung einer bestimmten Spinrichtung im Verhältnis zur entgegengesetzten Richtung. Die natürliche Polarisation ist die Polarisation, die sich unter einem Einfluss eines äußeren Magnetfeldes B bei einer Temperatur T einstellt. Die Teilchen folgen der Maxwell-Boltzmann-Statistik, da sie innerhalb eines Körpers lokalisierbar und damit auch unterscheidbar sind.

$$N(E_m + \Delta E) = N(E_m) \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad (2.19)$$

Dabei ist E_m die Energie des m -ten Zustands, k die Boltzmann-Konstante und T die Gittertemperatur.

Man definiert die Vektorpolarisation

$$P_z = \frac{\langle I_z \rangle}{I} \quad (2.20)$$

und die Tensorpolarisation

$$P_{zz} = \frac{\langle 3I^2 - I(I+1) \rangle}{I^2} \quad (2.21)$$

eines Systems mit dem Spin I entlang der Achse z . Für Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen ist die Tensorpolarisation immer Null. Die Polarisation dieser Teilchen innerhalb eines Magnetfeldes B ist gegeben durch:

$$P_z = \frac{N_{+\frac{1}{2}} - N_{-\frac{1}{2}}}{N_{+\frac{1}{2}} + N_{-\frac{1}{2}}} = \tanh \frac{\hat{\mu} B}{k_B T} \quad (2.22)$$

und die Vektor- und Tensorpolarisation der Spin-1-Teilchen durch:

$$P_z = \frac{N_{+1} - N_{-1}}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} = \frac{4 \tanh \frac{\mu B}{2k_B T}}{3 + \tanh^2 \frac{\mu B}{2k_B T}} \quad (2.23)$$

$$P_{zz} = \frac{N_1 + N_{-1} - 2N_0}{N_{+1} + N_0 + N_{-1}} = \frac{4 \tanh^2 \frac{\mu B}{2k_B T}}{3 + \tanh^2 \frac{\mu B}{2k_B T}}. \quad (2.24)$$

Wie man aus (2.22) - (2.24) erkennt, ist die Polarisation nur abhängig vom Verhältnis der Temperatur T , Stärke des Magnetfeldes B sowie dem magnetischen Moment μ des zu polarisierenden Isotops. Will man nun hohe Polarisationswerte erreichen, benötigt man für diese 'Brute-Force-Methode' also möglichst niedrige Temperaturen und hohe Magnetfelder. Diese sind jedoch mit erheblichem technischen Aufwand und hohen Kosten verbunden. Zudem würden die hohen Polarisationsaufbauzeiten der Kerne sehr viel Zeit in Anspruch nehmen.

2.3 Dynamische Polarisation

Die Polarisation bei technisch relativ einfach erreichbaren Temperaturen (1K) und moderaten Magnetfeldern (2.5T) ist für Elektronen schon sehr hoch (93%). Die Polarisation der Protonen beträgt bei diesen Parametern jedoch nur 0.25% und die der Deuteronen sogar nur 0.05%. Die dynamische Nukleonenpolarisation nutzt die hohe Polarisation der Elektronen aus um diese durch Einstrahlung von Mikrowellen auf die Nukleonen zu übertragen.

2.3.1 Solid State Effekt

Schaut man sich nun ein System aus einem Elektron und einem Nukleon, d.h. zwei Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen an, sieht man, dass in einem äußeren Magnetfeld B zwei Zeemanniveaus entstehen (siehe Abb. 2.5). Die dynamische Nukleonenpolarisation benötigt nun aber nicht die paarweise gebundenen Elektronen, die für die eingesetzten Targetmaterialien typisch sind, sondern quasifreie Elektronen. Das Einbringen dieser paramagnetischen Zentren in das jeweilige Material geschieht bei Festkörpern mittels ionisierender Strahlung und bei Flüssigkeiten durch chemische Dotierung mit Radikalen wie TEMPO, Porphyrin oder Tritylradikalen.

Um die hohe Elektronenpolarisation auf die Nukleonen zu übertragen, muss ein Mikrowellenfeld eingestrahlt werden, welches eine Frequenz in der Nähe der elektronischen Larmorfrequenz

$$\omega_e = \frac{\mu_e B}{\hbar} \quad (2.25)$$

hat. Der Frequenzbereich ist deshalb nur abhängig von der Stärke des äußeren Magnetfeldes und dem zu polarisierenden Isotop und nicht von der Temperatur.

Es ist nun z.B. möglich, den verbotenen Übergang $\downarrow\uparrow \rightarrow \uparrow\downarrow$ durch Einstrahlung von Mikrowellen der Frequenz $\omega = \omega_e + \omega_N$ anzuregen, obwohl dieser die Auswahlregel $\Delta m = \pm 1$ für magnetische Dipolübergänge verletzt. Durch diesen Mechanismus ist sowohl die Erzeugung einer positiven Polarisation (Unterbesetzung des Spin-Down-Zustands, Einstrahlung von Mikrowellen der Frequenz $\omega = \omega_e - \omega_N$) als auch die Erzeugung einer negativen Polarisation (Überbesetzung des Spin-Down-Zustands, Einstrahlung von Mikrowellen der Frequenz $\omega = \omega_e + \omega_N$) möglich. Da die Relaxationszeiten der Elektronen im Gegensatz zu denen der Nukleonen, aufgrund der möglichen Wechselwirkungen durch Phononen mit dem Gitter, um Größenordnungen geringer sind, ist diese Besetzungsinversion der Spinzustände erst möglich [Abr78]. Ein relaxiertes Elektron steht für einen neuen Pumpvorgang zur Verfügung bevor ein Nukleon relaxiert. Da jedoch

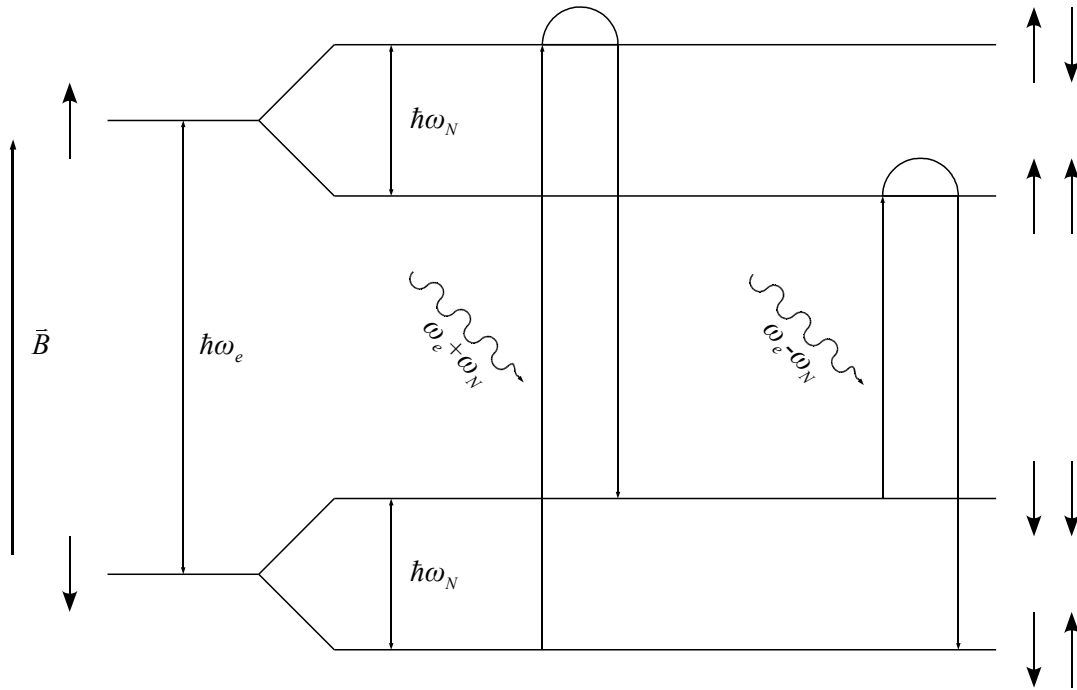


Abb. 2.5: Schema des Solid State Effekts. Die verbotenen Übergänge $\Delta m \neq \pm 1$ werden durch Mikrowellenstrahlung der Frequenz $\nu = \nu_e \pm \nu_N$ angeregt.

die Elektronen im Gitter gebunden sind, können sie nur Nukleonen in der Nachbarschaft polarisieren. Die Polarisation des gesamten Targets geschieht durch 'Spin-Diffusion', d.h. durch die Dipol-Dipol-Wechselwirkung der Nukleonen. Es haben sich Elektronenkonzentrationen im Bereich von $2 \cdot 10^{19} \frac{\text{Spins}}{\text{cm}^3}$ bewährt, um sowohl eine hohe Polarisation zu erreichen, als auch bei einer akzeptablen Aufbaupolarisations- und Relaxationszeit des Targets arbeiten zu können. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die ESR-Linienbreite gering gegenüber der Larmorfrequenz ν_N ist, da ansonsten beide verbotenen Übergänge aus Abb. 2.5 gleichzeitig gepumpt werden und das Target nicht in eine Richtung (positiv oder negativ) polarisiert werden kann.

2.3.2 Spintemperaturtheorie

Die Spintemperaturtheorie versucht mit Hilfe eines thermodynamischen Ansatzes die Theorie zur dynamischen Nukleonpolarisation zu beschreiben. Das einfache Vierniveausystem des Solid State Effects ist zur genauen Beschreibung der Polarisation aufgrund der endlichen ESR-Linienbreite nicht mehr anwendbar. Hier sind die Polarisationsfrequenzen $(\omega_e \pm \omega_N)$ für Kerne mit kleinem magnetischen Moment μ_N nicht mehr separierbar.

Die Elektronen innerhalb des Gitters liegen entgegen der bisherigen Vorstellung im Targetmaterial nicht als einzelne Teilchen ohne gegenseitige Wechselwirkung, sondern als komplettes Teilchenensemble vor, so dass sich die einzelnen Zeeman-Niveaus in Bänder der Breite D aufspalten. Diese folgen immer noch der Boltzmann-Statistik, da die Elektronen weiterhin unterscheidbar und lokalisierbar sind.

Jeder der an der dynamischen Nukleonpolarisation beteiligten Wechselwirkungen wird nun eine Temperatur zugeordnet. So gibt T_{Ze} die Verteilung der Zustände auf das elektronische Zeeman-Reservoir und T_{ZN} die Verteilung auf das Kern-Zeeman-Reservoir an. Dies gibt auch direkt, mit Hilfe von (2.22) - (2.24), die Polarisation der Elektronen bzw. Nukleonen an.

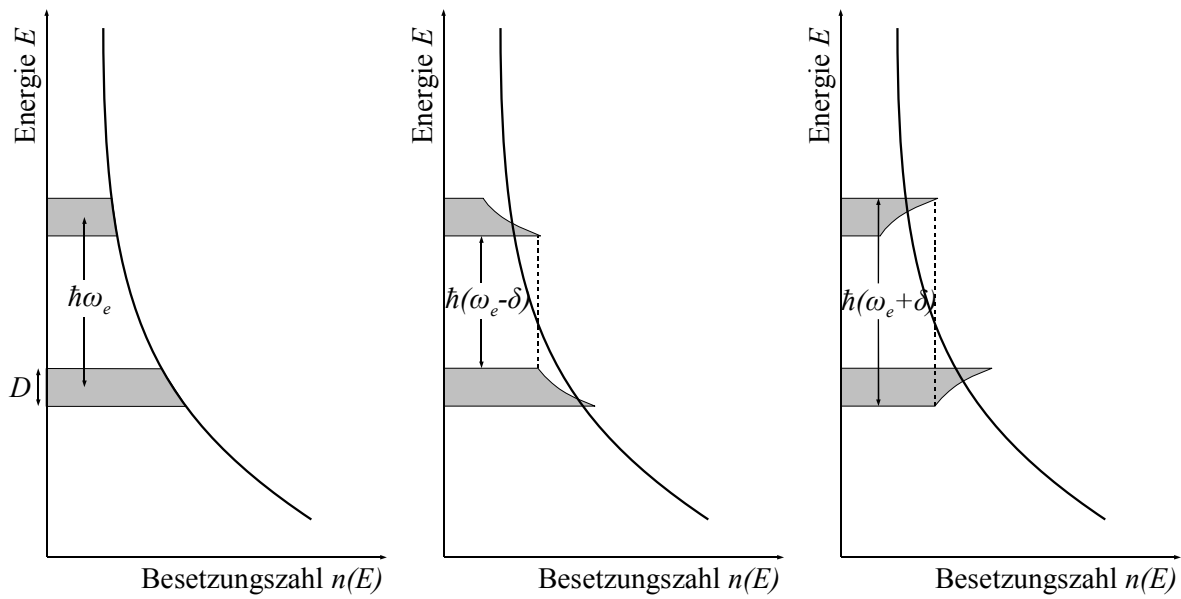


Abb. 2.6: Besetzungszahlverteilungen in der Spintemperaturtheorie. Von links nach rechts: 1. Im thermischen Gleichgewicht mit $T_{SS} = T_{Ze} = T_G$. 2. Kühlen des Spin-Spin-Wechselwirkungsreservoirs (positive Polarisation) mit $0 < T_{SS} < T_{Ze}$. 3. Heizen des Spin-Spin-Wechselwirkungsreservoirs (negative Polarisation) mit $0 < |T_{SS}| < T_{Ze}$, $T_{SS} < 0$.

Die Temperatur T_{SS} beschreibt die Spin-Spin-Wechselwirkung und dient der Beschreibung der Zustandsverteilung innerhalb der einzelnen Zeeman-Bänder, d.h. deren innerer Ordnung. Befindet sich das Target im thermischen Gleichgewicht, sind alle drei Temperaturen gleich der Gittertemperatur T_G .

Strahlt man nun Mikrowellen in der Nähe der Larmor-Frequenz ω_e in das Elektronenspin-system ein, wird dem Spin-Spin-Wechselwirkungsreservoir Energie in Höhe von $\hbar|\delta| = \hbar|\nu - \nu_e|$ entnommen oder zugeführt. Dies führt zu Umordnungsprozessen innerhalb dieses Reservoirs und Übergängen zwischen den einzelnen Bereichen der Zeeman-Bänder. Da Umordnungsprozesse die Entropie und damit auch die Zustandsverteilung und Temperatur T_{SS} des Reservoirs ändern, kann man durch geeignete Wahl der Mikrowellenfrequenz dieses heizen ($\delta > 0$) oder kühlen ($\delta < 0$).

Durch die Hyperfeinwechselwirkung, welche den Spin des Elektrons an den des Nukleons koppelt, besteht zwischen dem nukleonischen Zeeman-Reservoir und dem durch Mikrowellenstrahlung geheizten bzw. gekühlten elektronischen Zeeman-Reservoir eine Wechselwirkung, welche die Temperaturen T_{Ze} und T_{ZN} aneinander koppelt und damit einen Energieaustausch ermöglicht und somit zu einer Polarisation der Nukleonen führt. Dieser Prozess wird 'Thermal Mixing' genannt.

Schaut man sich diesen Prozess im Teilchenbild an, kann er durch den simultanen Flip von zwei Elektronen, genannt Flip-Flop, und einem gleichzeitigen Nukleonenspinflip erklärt werden. Dadurch wird die Elektronenspinpolarisation nicht geändert, dem Nukleonen-Zeeman-Reservoir jedoch mit jedem Spinflip die Energie $\hbar\omega_N$ zugeführt. Eine genauere Abhandlung der Spintemperaturtheorie findet sich in [Goe02].

Kapitel 3

Vakuumtechnik

Dieses Kapitel widmet sich nach einigen thermodynamischen Grundlagen den Modellen und Gleichungen zur Beschreibung der verschiedenen Strömungen und Größen im Vakuum. Darauf folgt eine kurze Vorstellung und Erklärung der von der PT-Gruppe in Bochum eingesetzten Pumpenarten sowie eine Beschreibung des eingesetzten Pumpstands. Abschließend wird noch die theoretisch erreichbare Saugleistung unter Berücksichtigung von Reibungsverlusten berechnet.

3.1 Grundlagen der Gasdynamik und kinetischen Gastheorie

Als Vakuum bezeichnet man den Zustand eines Systems, welcher einen gegenüber der Umgebung, geringeren Druck p besitzt. Die Teilchen eines Gases üben, wenn sie auf ein Hindernis treffen, auf die Fläche A eine Kraft F aus. Der Druck ist also definiert als:

$$p = \frac{F}{A}. \quad (3.1)$$

Die allgemeine Gasgleichung beschreibt den Zustand eines Gases in Abhängigkeit von dessen Temperatur T , Druck p und Volumen V .

$$pV = NkT. \quad (3.2)$$

Dabei ist N die Teilchenzahl und k die Boltzmann-Konstante.

Druckbereich	Druck [mbar]	n [cm ⁻³]
Großvakuum	$10^3 - 10^0$	$10^{19} - 10^{16}$
Feinvakuum	$10^0 - 10^{-3}$	$10^{16} - 10^{13}$
Hochvakuum	$10^{-3} - 10^{-7}$	$10^{13} - 10^9$
Ultrahochvakuum	$10^{-7} - 10^{-12}$	$10^9 - 10^4$

Tab. 3.1: Definition der verschiedenen Bereiche des Vakuums nach [Pfe08].

Die Teilchen eines idealen Gases gehorchen der Maxwell-Boltzmann-Verteilung

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \quad (3.3)$$

und ihre Geschwindigkeitsverteilung entspricht deshalb einer Glockenkurve. Aus ihrem Maximum ergibt sich die wahrscheinlichste Geschwindigkeit c_W zu:

$$c_W = \sqrt{\frac{2RT}{M}}. \quad (3.4)$$

Dabei ist m die Molekülmasse, M die molare Masse und R die allgemeine Gaskonstante. Daraus lässt sich die mittlere thermische Geschwindigkeit \bar{c}

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (3.5)$$

und die mittlere freie Weglänge \bar{l}

$$\bar{l} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi p d_m^2} \quad (3.6)$$

berechnen, wobei d_m^2 den Moleküldurchmesser bezeichnet. Dies ist bedeutsam für die verschiedenen Strömungsarten des Gases im Vakuum.

3.1.1 Strömungsarten

Im Vakuum unterscheidet man grundsätzlich drei verschiedene Strömungsarten. Diese sind abhängig vom Druck und den Bauteilabmessungen d .

Kontinuumsströmung ($p = 10^3 - 10^0 \text{ mbar}$, $\bar{l} \ll d$)

Für die Kontinuumsströmung bezeichnend ist die häufige Wechselwirkung der Teilchen untereinander und weniger mit den Gefäßwänden. Sie kommt vor allem im Grobvakuum vor. Dabei unterscheidet man zwischen laminarer und turbulenter Strömung, die über die dimensionslose Reynoldszahl Re definiert sind:

$$Re = \frac{\rho}{\eta} v d. \quad (3.7)$$

Hierbei ist ρ die Dichte, η die Viskosität und v die Strömungsgeschwindigkeit. Bis zu einem Wert von $Re = 2300$ ist die Strömung laminar und ab einem Wert von $Re = 4000$ turbulent.

Knudsenströmung ($p = 10^0 - 10^{-3} \text{ mbar}$, $\bar{l} \leq d$)

Eine weitere dimensionslose Größe ist die Knudsenzahl Kn . Diese ist definiert als das Verhältnis zwischen mittlerer freier Weglänge und dem Bauteildurchmesser:

$$Kn = \frac{\bar{l}}{d}. \quad (3.8)$$

Herrscht in einem Gebiet Knudsenströmung, ist die mittlere freie Weglänge mit dem Bauteildurchmesser vergleichbar. Diese Art der Strömung liegt im Feinvakuum vor.

Molekulare Strömung ($p = 10^{-3} - 10^{-12} \text{ mbar}$, $\bar{l} > d$)

Die molekulare Strömung ist dadurch ausgezeichnet, dass nahezu keine Wechselwirkung der Teilchen untereinander mehr stattfindet. Sie liegt vor allem im Hochvakuum und Ultrahochvakuum vor.

3.1.2 Saugvermögen und Leitwerte

Der Gasstrom q_{pV} wird durch Division der allgemeinen Gasgleichung durch die Zeit t ermittelt.

$$q_{pV} = \frac{pV}{t} = \frac{mRT}{tM} \quad (3.9)$$

Dieser wird auch pV-Durchfluss genannt und es lässt sich aus der Gleichung erschließen, dass bei gleicher Temperatur ein konstanter Massenstrom gefördert wird. Das Saugvermögen S einer Vakuumpumpe ist definiert als

$$S = \frac{dV}{dt} \quad (3.10)$$

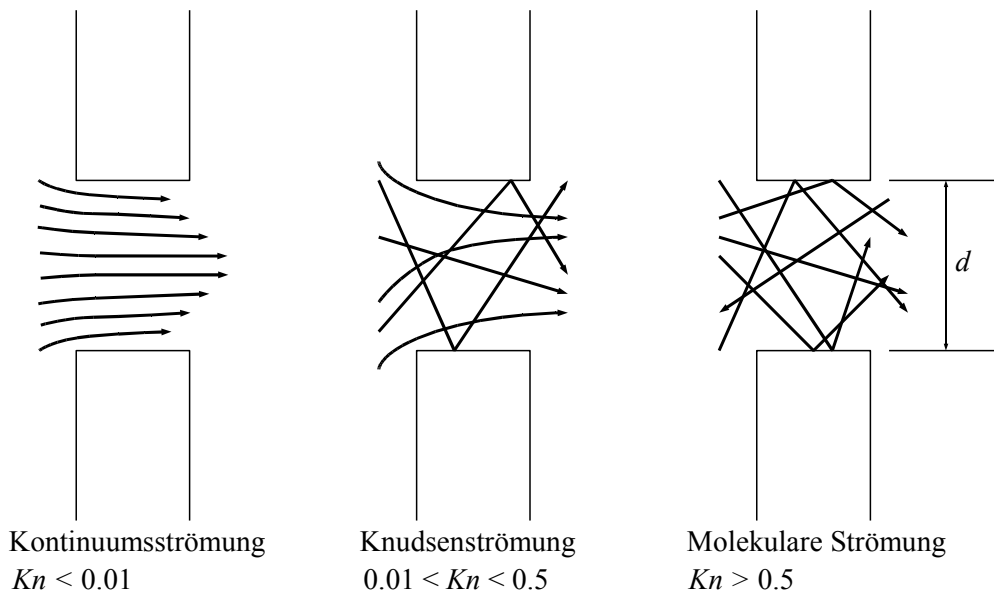


Abb. 3.1: Strömungsarten im Vakuum. Mit zunehmender Knudsenzahl nimmt die Wechselwirkung der Teilchen untereinander ab und ihre Wechselwirkung mit den Wänden zu.

Diese fördert also einen konstanten Volumenstrom. Multipliziert man das Saugvermögen mit dem Eingangsdruck p erhält man die Saugleistung q_{pV} .

$$q_{pV} = Sp = \frac{dV}{dt} p. \quad (3.11)$$

Dies ist der pV-Durchfluss einer Vakuumpumpe.

In der Realität wird die effektive Leistung eines Pumpstandes vor allem durch äußere Reibung der Gasteilchen an den Rohrwänden und innerer Reibung der Gasteilchen untereinander vermindert. Um diese Reibungen quantitativ zu beschreiben, definiert man den Leitwert L . Dieser ist der Kehrwert des Strömungswiderstandes W und wird in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ angegeben. Strömt Gas durch eine Leitung mit der Druckdifferenz Δp , gilt:

$$q_{pV} = L\Delta p. \quad (3.12)$$

Bei einer Parallelschaltung von Leitungen können die einzelnen Leitwerte einfach zu einem Gesamtleitwert L_{ges} addiert werden:

$$L_1 + L_2 + \dots + L_n = L_{ges}. \quad (3.13)$$

Und bei einer Reihenschaltung ergibt sich der Kehrwert des Gesamtleitwertes aus der Summe der einzelnen Kehrwerte:

$$\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} = \frac{1}{L_{ges}}. \quad (3.14)$$

Die Leitwerte von Leitungen sind bei den drei Strömungstypen unterschiedlich. Während der Leitwert bei der Kontinuumsströmung proportional zum mittleren Druck \bar{p} ist, ist er bei der molekularen Strömung druckunabhängig. Im Folgenden werden die Leitwerte von Blenden bzw. Querschnittsvergrößerungen oder -verengungen und Rohrleitungen behandelt.

Herrscht in einem Rohr eine laminare Kontinuumsströmung, gilt für den Leitwert:

$$L_{Rl} = \frac{\pi d^4}{256\eta l} (p_1 + p_2) = \frac{\pi d^4}{128\eta l} \bar{p}. \quad (3.15)$$

Dabei sind p_1 und p_2 die Drücke an den beiden Enden des Rohrs und \bar{p} der mittlere Druck.

Die vorherrschende Strömung innerhalb des Feinvakuumgebiets ist die Knudsenströmung. Für Berechnungen in diesem Gebiet hat Knudsen die Gleichung

$$L_{Rk} = \frac{\pi d^4 \bar{p}}{128 \eta l} + \frac{1}{6} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \frac{d^3}{l} \frac{1 + \sqrt{\frac{M}{RT}} \frac{d\bar{p}}{\eta}}{1 + 1.24 \sqrt{\frac{M}{RT}} \frac{d\bar{p}}{\eta}} \quad (3.16)$$

gefunden.

Bei einer molekularen Strömung ist der Leitwert unabhängig vom Druck, da hier die Teilchen nicht mehr untereinander wechselwirken, sondern nur noch die Wahrscheinlichkeit des Auftreffens auf eine Rohrwand P_{Rm} wichtig für dessen Berechnung ist. Für lange Rohre, d.h. $\frac{U}{A} \gg \frac{16}{3}$, gilt die Beziehung:

$$L_{Rm} = \frac{\bar{c} \pi d^3}{12l}. \quad (3.17)$$

Hier ist U der Umfang und A die Querschnittsfläche des Rohres. Verbindet man zwei Behälter in denen eine molekulare Strömung herrscht mit einer Blende, so gilt für den Blendenleitwert

$$L_{Bm} = \frac{\bar{c}}{4} A \quad (3.18)$$

mit der Querschnittsfläche der Blende A . Diese Beziehung ist wichtig, da auch die Berechnung einer Querschnittsänderung aus dem Leitwert der Blende und denen der beiden anschließenden Rohre berechnet wird. So gilt z.B. für den Leitwert eines gestuften Rohres L_{Rmst} mit den beiden Rohrleitwerten L_1 und L_2 nach (3.14):

$$\frac{1}{L_{Rmst}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_{Bm}} + \frac{1}{L_2}. \quad (3.19)$$

3.2 Vakuumerzeugung

Vakuum kann heutzutage durch verschiedene Pumpenarten und Pumpenkombinationen erzeugt werden. So unterscheidet man grundsätzlich zwischen gasbindenden und gasfördernden Vakuumpumpen. Gasbindende Vakuumpumpen binden das Gas entweder mittels Getterung an ein Substrat oder kondensieren es. Diese Art der Pumpen hat eine beschränkte Gasaufnahmekapazität und diese muss nach einiger Zeit regeneriert werden. Gasfördernde Pumpen kann man zusätzlich in kinetische Vakuumpumpen und Verdrängerpumpen unterteilen. Erstere fördern das Gas durch Beschleunigung in Pumprichtung, letztere fördern es aus abgesperrten Räumen in die Atmosphäre oder in eine weitere Pumpstufe. Die Betriebsdauer der gasfördernden Pumpen ist nur durch den Verschleiß bestimmt.

Die beiden, für einen Vakuumpumpstand eines Kryostaten, typischen Pumpenbauarten, Drehschieberpumpen und Wälzkolbenpumpen, sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

3.2.1 Drehschieberpumpen

Die Drehschieberpumpe gehört zur Gruppe der ölgedichteten Rotations-Vakuumpumpen. Diese werden normalerweise für das Druckgebiet zwischen 1013 mbar und 10^{-3} mbar eingesetzt. In einem mehrstufigen Pumpstand für Kryostate übernimmt sie die Funktion der Vorpumpe.

Den Aufbau einer Drehschieberpumpe zeigt Abb. 3.2. Das zu pumpende Gas strömt durch den Einlass (5) bei einer Stellung des Drehschiebers (3) auf 45° in den Ansaugraum. Dieser wird sowohl durch die Zentrifugalkraft als auch durch die Feder (4) nach außen gedrückt und trennt den restlichen Betriebsraum der Pumpe ab. Dreht sich der exzentrisch gelagerte Rotor (2) nun weiter, erreicht der Schöpfraum bei einer Stellung des Schiebers von ca. 200° sein maximales Volumen. Überschreitet der Drehschieber den Auslass (6), komprimiert er das Gas im Schöpfraum und saugt gleichzeitig neues auf der anderen Seite des Schiebers an.

Für eine ausreichende Abdichtung des Schöpfraums sorgen Ölbohrungen und Ölkanäle, die gewährleisten, dass zwischen dem Stator (1) und den Stirnflächen des Rotors und Drehschiebers ständig Öl vorhanden ist. Dieser schiebt also andauernd einen kleinen Ölsee vor sich her.

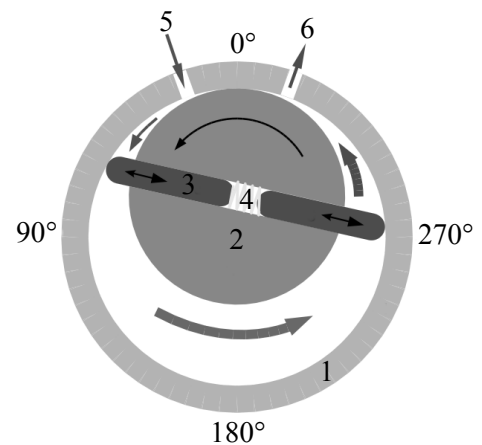


Abb. 3.2: Prinzipzeichnung einer Drehschieberpumpe mit Stator (1), Rotor (2), Drehschieber (3), Feder (4), Einlass (5) und Auslass (6).

3.2.2 Wälzkolbenpumpen

Wälzkolbenpumpen (auch Rootspumpen¹ genannt) gehören der Gruppe der Drehkolbenpumpen an. Lässt man eine solche Pumpe gegen Atmosphärendruck laufen, erreicht sie nur einen Enddruck von ca. 450 mbar. Arbeitet sie jedoch in ihrem optimalen Druckbereich von einigen mbar oder noch darunter, lassen sich, mit entsprechender Dimensionierung der Pumpe, leicht Drücke von 10^{-3} mbar erreichen.

Die Prinzipzeichnung (Abb. 3.3) zeigt, dass die Pumpe hauptsächlich aus zwei achtförmigen Drehkolben (1 und 2) und dem Gehäuse (3) besteht. Die Drehkolben sind über ein Zahnradpaar gleicher Zähnezahls gekoppelt und laufen gegenläufig. Dies ermöglicht die Drehung der beiden Kolben ohne gegenseitige Berührung und damit einen Betrieb der Pumpe ohne Öl innerhalb des Pumpraums (4). Dieses wird nur zur Schmierung der Lager und Zahnräder benutzt.

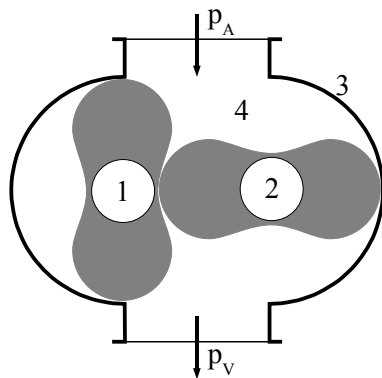


Abb. 3.3: Prinzipzeichnung einer Wälzkolbenpumpe mit den beiden Drehkolben (1 und 2), Gehäuse (3) und Pumpraum (4).

Strömt nun Gas mit dem Druck p_A in den Pumpraum und drehen sich beide Drehkolben um 45° (in Abb. 3.3 Drehkolben 1 gegen den Uhrzeigersinn und Drehkolben 2 im Uhrzeigersinn), vergrößert dies das angesaugte Volumen. Eine weitere Drehung um 45° lässt den rechten Bereich der Pumpe zu einem abgeschlossenen sichelförmigen Raum mit dem Volumen V werden, der nur noch vom rechten Drehkolben (2) und dem Gehäuse begrenzt wird. Dieser Raum wird nun zur Abgasseite hin durch weitere Drehung der Kolben geöffnet und das Gas strömt mit dem Druck p_V aus der Pumpe.

Pro voller Umdrehung der Kolben ist das gepumpte Volumen V_S , sieht man von Verlusten ab, $4 \cdot V$, da zwei Kolben vorhanden sind und jede volle Umdrehung eines Kolbens zwei Pumpvorgänge nach sich zieht. Betreibt man die Pumpe nun mit einer ausreichend hohen Drehzahl (z.B. 60 Hz), erreicht man mit verhältnismäßig kleinen Pumpen ein hohes Saugvermögen.

¹Nach ihrem Einsatz von Philander H. Roots benannt.

Da die Pumpe im Pumpraum ohne Öl läuft, sind entsprechend genau gearbeitete Bauteile für Rotor und Gehäuse nötig um die Spalte und damit die Rückströmung möglichst klein zu halten. Da sich jedoch durch den Strömungswiderstand und die unterschiedliche Erwärmung von Kolben und Gehäuse durch die Kompression, vor allem im Grob- und Feinvakuumbereich, die Bauteile unterschiedlich stark ausdehnen, kann die Pumpe nicht bei beliebig hohen Druckunterschieden betrieben werden. Deshalb benötigen Wälzkolbenpumpen normalerweise eine Vorpumpe.

3.3 Pumpstand der PT-Gruppe Bochum

Der Pumpstand der PT-Gruppe Bochum hat die Aufgabe eine möglichst effektive Kühlleistung der angeschlossenen Kryostate zu gewährleisten. Da Helium als Kühlmittel benutzt wird, müssen alle Bauteile und Verbindungen möglichst heliumdicht und kälteunempfindlich sein. Weiterhin sollte durch die angeschlossenen Pumpen das Helium nicht zu sehr mit Öl verunreinigt werden, da das Abgas der Pumpen zur weiteren Verwendung an eine Gasverflüssigung angeschlossen ist.

3.3.1 Ventil- und Leitungssystem

Das Ventil- und Leitungssystem kann grundsätzlich in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Zum einen der Bereich, der der Kühlung der Kryostate dient (Cavitybereich) und zum anderen der Bereich der der Trennung der Gas- von der Flüssigkeitsphase des zugeführten Heliums dient (Separatorbereich). Im Cavitybereich übernimmt eine Pumpenkombination diese Aufgabe, da hier hohe Saugleistungen erreicht werden müssen. Im Separatorbereich hingegen genügt der Anschluss einer kleinen Drehschieberpumpe, da hier nur geringe Gasmengen bei Drücken von ca. 20 mbar gepumpt werden müssen. Beide Seiten sind sowohl an eine Helium-Gasverflüssigung als auch an einen atmosphärenseitigen Ausgang angeschlossen, so dass auch das Pumpen anderer Gase wie Stickstoff oder Luft möglich ist ohne eine zusätzliche Verunreinigung des Heliums in der Gasverflüssigung. Auf beiden Seiten sind zudem Gasuhren installiert, die eine Kontrolle der benutzten Menge des Heliums gewährleisten. Sollte eine Gasuhr durch zu hohen Heliumfluss überlastet werden, kann ein Bypass geöffnet werden.

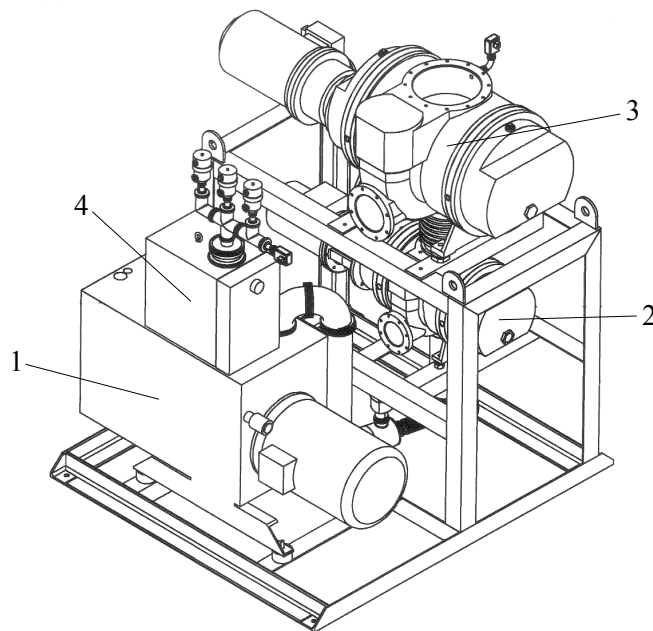


Abb. 3.4: Skizze des Wälzkolbenpumpstands WWD 3600 mit der Drehschieberpumpe DUO 250 (1), den beiden Wälzkolbenpumpen WKP 1000 (2) und WKP 4000 (3) und dem Ölabscheider ONF 100 (4). Abbildung aus [Pfe].

3.3.2 Pumpenkombination

Die Pumpenkombination des Pumpstands der PT-Gruppe Bochum muss die Eigenschaft haben, gasförmiges Helium bei einem geforderten Arbeitsdruck zwischen 0.1 mbar und 1 mbar möglichst effektiv zu pumpen um damit die geforderten geringen Temperaturen von ca. 1K innerhalb der Kryostate zu erreichen.

Deshalb wird seit 2004 eine Drehschieberpumpe (DUO 250), zwei Wälzkolbenpumpen (WKP 1000 und WKP 4000) sowie ein Ölabscheider, der das Helium vor Rückführung in die Gasverflüssigung reinigt, benutzt. Alle Komponenten sind Teil des Komplettpaketes WWD 3600 der Firma Pfeiffer Vacuum.

Da, wie oben beschrieben, Wälzkolbenpumpen nicht gegen Atmosphärendruck verdichten können und ein Einschalten derer bei einem zu hohen Druckunterschied zwischen Ansaugseite und Auspuff zu einer Beschädigung der Pumpen führen könnte, wird die Drehschieberpumpe DUO 250 als Vorpumpe benötigt. Die Betriebsfrequenz der Wälzkolbenpumpe WKP 4000 kann durch einen Frequenzwandler zwischen 20 Hz und 60 Hz geregelt werden, was durch die Veränderung des Saugvermögens und damit Variation des Druckes innerhalb des Kryostaten zu einer Temperaturregelung führt. Alle Pumpen und Ventile werden über eine SPS² mittels einer mit LABView programmierten Oberfläche bedient. Diese wird ausführlich in 5.2.1 vorgestellt.

3.3.3 Abschätzung des Saugvermögens der Pumpenkombination

Die Nennsaugvermögen der im vorigen Abschnitt vorgestellten Pumpen sind in Tab. 3.2 aufgelistet. Diese Nennsaugvermögen werden jedoch aufgrund verschiedener Faktoren nicht erreicht. So geht zum einen Saugleistung dadurch verloren, dass bei allen drei Pumpen eine Rückströmung innerhalb der Pumpen zwischen Rotor(en) und Stator vorliegt. Diese ist abhängig vom Eingangs- und Ausgangsdruck sowie dem gepumpten Gas und, da Helium eine geringe Dichte hat, höher als beim Pumpen von Luft. Zum anderen sind die Strömungsverhältnisse und die Drücke in den Verbindungsstücken zwischen den Pumpen unbekannt.

Schaut man sich Abb. 3.5 an, erkennt man, dass nicht alle Pumpen dauerhaft in ihrem optimalen Druckbereich arbeiten. Dabei ist die logarithmisch aufgetragene Ordinate zu beachten, d.h. eine kleine Abweichung vom optimalen Pumpdruck hat messbare Auswirkungen auf das Saugvermögen.

Pumpe	Nennsaugvermögen [$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$]
DUO 250	320
WKP 1000	1280
WKP 4000	4860

Tab. 3.2: Übersicht der Nennsaugvermögen der einzelnen Pumpen der Pumpenkombination des Pumpstands. Werte aus [PfeP1]- [PfeP3].

Zudem können die Saugvermögen aller drei in Reihe geschalteter Pumpen nicht einfach addiert werden, da durch die verschiedenen Saugvermögen und Drehzahlen der Pumpen, die leistungsstärkste Pumpe am Ende der Reihe durch die weniger leistungsstarken davor ausgebremst wird. Die aufgetragenen Saugvermögen gelten zudem für Luft als Gasgemisch und

nicht für das hier eingesetzte Helium. Dieses ist durch seine geringe Dichte flüchtiger und besitzt eine andere Kompressibilität, was Einfluss auf das Saugvermögen hat.

Schaut man sich jedoch die Leistungswerte von vergleichbaren Pumpenkombinationen in [Wut82] an, lässt sich das Saugvermögen auf ca. 3500m³ abschätzen. Dieser Wert gilt für die Leistung direkt hinter dem Pumpstand, d.h. ohne die Rohrleitungsverbindungen, die zum Kryostaten führen. Eine Abschätzung der dortigen Verluste ist Thema von 3.3.4.

²Speicherprogrammierbare Steuerung

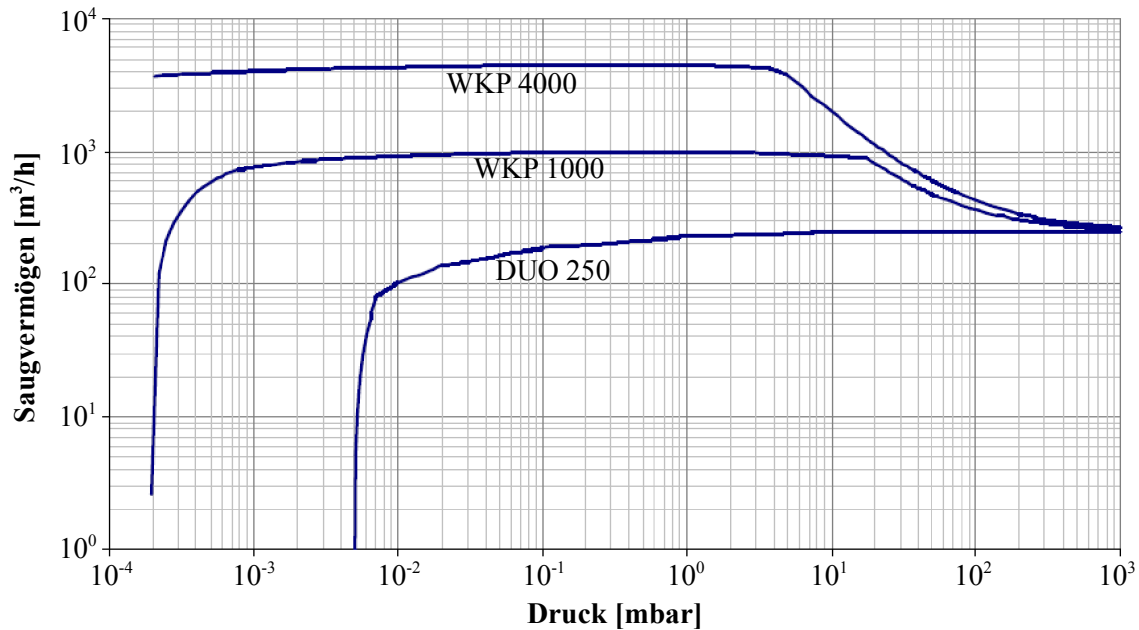


Abb. 3.5: Saugvermögenskennlinien der drei im Pumpstand der PT-Gruppe Bochum verbauten Pumpen bei einer Maximalfrequenz von 60 Hz. Graphen wurden bereitgestellt von Pfeiffer-Vakuum.

3.3.4 Leistungsverlust durch Rohrleitungen

Da die Länge des Rohrleitungssystems vom Gaseingang der Pumpen zu einem der beiden Kryostate zwischen 3.5m bzw 4.5m beträgt, ist eine Abschätzung der Reibungsverluste sinnvoll.

Im Folgenden wird von einem mittleren Druck $\bar{p}=0.175\text{mbar}$ und einer Temperatur von $T=298\text{K}$ ausgegangen. Natürlich ist der mittlere Druck innerhalb der einzelnen Rohrstücke nicht gleich. Da jedoch nur die Möglichkeit einer Druckmessung an der Saugseite des Pumpstands und im Kryostaten besteht, und die Druckdifferenz nicht allzu groß ist, ist diese Näherung ausreichend. Die Temperatur wurde mit einem PT100-Widerstand³ an verschiedenen Stellen des Rohrleitungssystems gemessen. Dies ergab Werte zwischen 303K in der Nähe der Pumpen und 293K in der Nähe des Kryostaten, so dass eine mittlere Temperatur von 298K eine gute Näherung bietet.

Geht man davon aus, dass die Rohrleitungen unter einem Druck von 0.1mbar an der Pumpenseite und 0.25mbar an der Kryostatseite stehen und vergleicht dies mit Tab. 3.1, erreicht man den Grenzbereich zwischen Knudsenströmung und laminarer Kontinuumsströmung. Berechnet man nun noch mit der idealen Gasgleichung die mittlere Teilchenzahl, ergibt dies einen Wert bei einigen $10^{13} \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3}$. Dies würde nach Tab. 3.1 auf den Grenzbereich zwischen Knudsenströmung und molekularer Strömung hinweisen. Beide Werte deuten also auf eine Knudsenströmung innerhalb des Rohrleitungssystems hin.

Berechnung der Leitwerte mit Knudsenströmung

Abb. 3.6 zeigt eine schematische Darstellung des Rohrleitungssystems vom Pumpeneingang der Pumpenkombination zum Ausgang der beiden Kryostate mit allen für eine Berechnung des Leitwertes relevanten Größen. Benutzt man nun (3.13) und (3.14), ergibt sich für den Gesamtleitwert

³Dieser besitzt zwischen 73K und 1123K eine beinahe lineare Charakteristik.

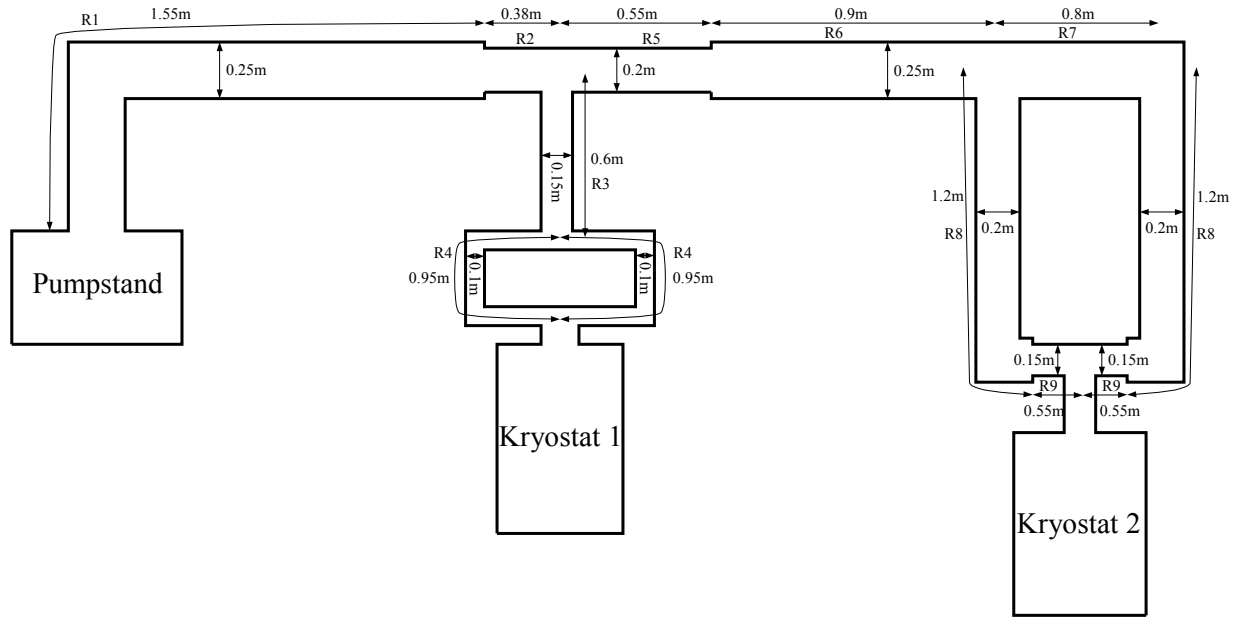


Abb. 3.6: Skizze des Rohrsystems mit dem Pumpstand und den beiden Kryostaten. Größenverhältnisse nicht massstabsgetreu.

bis zum Kryostaten 1 $L_{Rges,K1}$

$$\frac{1}{L_{Rges,K1}} = \frac{1}{L_{R1}} + \frac{1}{L_{R2}} + \frac{1}{L_{R3}} + \frac{1}{2L_{R4}} \quad (3.20)$$

und für den Leitwert bis zum Kryostaten 2 $L_{Rges,K2}$:

$$\frac{1}{L_{Rges,K2}} = \frac{1}{L_{R1}} + \frac{1}{L_{R2}} + \frac{1}{L_{R5}} + \frac{1}{L_{R6}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{L_{R8}} + \frac{1}{L_{R9}}} + \frac{1}{\frac{1}{L_{R7}} + \frac{1}{L_{R8}} + \frac{1}{L_{R9}}}}. \quad (3.21)$$

Für die folgenden Rechnungen wird eine dynamische Viskosität von Helium $\eta_{He} = 19.83 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ angenommen.

Rohrabschnitt	L_{R1}	L_{R2}	L_{R3}	L_{R4}	L_{R5}	L_{R6}	L_{R7}	L_{R8}	L_{R9}
Leitwert	196521	328338	65797	8289	226852	338432	380759	103974	71779

Tab. 3.3: Übersicht über die Leitwerte der einzelnen Leitungsstücke bei Knudsenströmung. Alle Leitwerte in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$.

Aus diesen Werten kann nun mit (3.20) und (3.21) der Gesamtleitwert der Rohrleitungen bis zu den einzelnen Kryostaten berechnet werden. Die effektive Saugleistung am Kryostateingang S_{eff} wird mit folgender Beziehung ermittelt:

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{L_{Rges,K1/K2}}. \quad (3.22)$$

Schaut man sich nun die Werte aus Tab. 3.4 an, erkennt man, dass trotz des längeren Leitungsweges zu Kryostat 2 die Saugleistung dort ca. 91% der Pumpensaugleistung erreicht und damit

	L_{ges}	S_{eff}
Kryostat 1	11954	2707
Kryostat 2	35850	3189

Tab. 3.4: Übersicht der Leitwerte von Pumpeneingang bis zum jeweiligen Kryostaten mit daraus resultierendem effektiven Saugvermögen S_{eff} . Alle Werte in $\frac{m^3}{h}$.

höher ist als am Kryostaten 1, wo sie ca. 77% der Pumpensaugleistung beträgt. Ursache dafür ist vor allem der Durchmesser der beiden dünnen Rohre direkt am Kryostaten 1. Den größten Anteil bei den vorliegenden Strömungsverhältnissen macht nach Gleichung (3.16) der linke Term aus, in den der Durchmesser des Rohres mit der vierten Potenz eingeht, wodurch selbst kurze Rohre mit einem Durchmesser von 0.1m stark zur Reibung beitragen.

Da bei den obigen Berechnungen sowohl Krümmer als auch Ventile vernachlässigt wurden und die effektive Saugleistung an der Oberfläche des Heliumbades durch Bauteile innerhalb des Kryostaten weiter verringert wird, ist die tatsächliche Saugleistung geringer einzuschätzen. Die berechneten Werte sind also nur als obere Grenze zu verstehen.

Kapitel 4

Hardware

Dieses Kapitel widmet sich nach einer Vorstellung der für den Betrieb des Pumpstands nötigen Hardwarekomponenten und einer kurzen Einführung in das benutzte Feldbussystem PROFIBUS DP, der vorhandenen Hardwarekonfiguration des Pumpstands.

4.1 Hardwarekomponenten und Datentransfer

Die Steuerung und Datenaufnahme einer Anlage mit vielen Peripheriegeräten wird normalerweise von einer oder mehreren speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in Kombination mit einer Visualisierung (Computermonitor, Schalttafel) realisiert. Die Bochumer Anlage besteht aus folgenden Komponenten:

- 1x SIEMENS S7 SPS mit CPU 315-2 DP
- 1x SIEMENS Digital In 32 x DC24V
- 1x SIEMENS Digital In 16 x DC24V
- 1x SIEMENS Digital Out 32 x DC24V / 0.5A
- 1x ISDN-Adapter
- 1x KEB COMBIVERT F5 Frequenzumwandler mit PROFIBUS DP
- 2x Pfeiffer Vacuum RPT100-Druckmessröhre mit TIC 251/252 PROFIBUS DP Gateway
- 1x Pfeiffer Vacuum PPT100-Druckmessröhre mit TIC 251/252 PROFIBUS DP Gateway
- 5x Pfeiffer Vacuum CPT100-Druckmessröhre mit TIC 251/252 PROFIBUS DP Gateway
- 1x Pfeiffer Vacuum HPT100-Druckmessröhre mit TIC 251/252 PROFIBUS DP Gateway
- 2x Hilscher GmbH CIF50-DPS PC-Karte

Als Visualisierung dient eine auf LabVIEW basierende Benutzeroberfläche, die direkt auf die SPS zugreift und mittels eines Computers betrieben wird. Diese wird in 5.2.1 genauer erklärt.

Als zentrales Element der Ansteuerungen und Datenauslese dient hier die S7 SPS. An diese sind die Zusatzmodule DI32xDC24V, DI16xDC24V und DO32xDC24V/0.5A zur Erhöhung der Anzahl der digitalen Ein- und Ausgänge angeschlossen. Diese Anschlüsse dienen der Ansteuerung und Statusbestimmung der Pumpen und Ventile. Mittels des Feldbussystems PROFIBUS-DP können Daten aus den neun Druckmessröhren (RPT100, PPT100, CPT100, HPT100) und

dem Frequenzumrichter (KEB COMBIVERT F5) an die SPS gesendet werden. Die beiden PC-Karten der Firma Hilscher wurden nur von der alten Applikation benutzt und sind deshalb noch im PROFIBUS-Netzwerk angeschlossen. Der Computer greift mittels eines Adapters, der die SIEMENS eigene Schnittstelle MPI auf eine serielle Schnittstelle umwandelt, auf die SPS zu. Wahlweise kann hier auch die Verbindung zur SPS getrennt werden und diese über eine ISDN-Verbindung mittels des ISDN-Adapters direkt angesprochen werden. Weitere Daten wie z.B. Widerstandswerte, Temperaturen oder Magnetfeldstärke können mittels einer Netzwerkverbindung von anderen Computern auf den am Pumpstand befindlichen Computer übertragen werden.

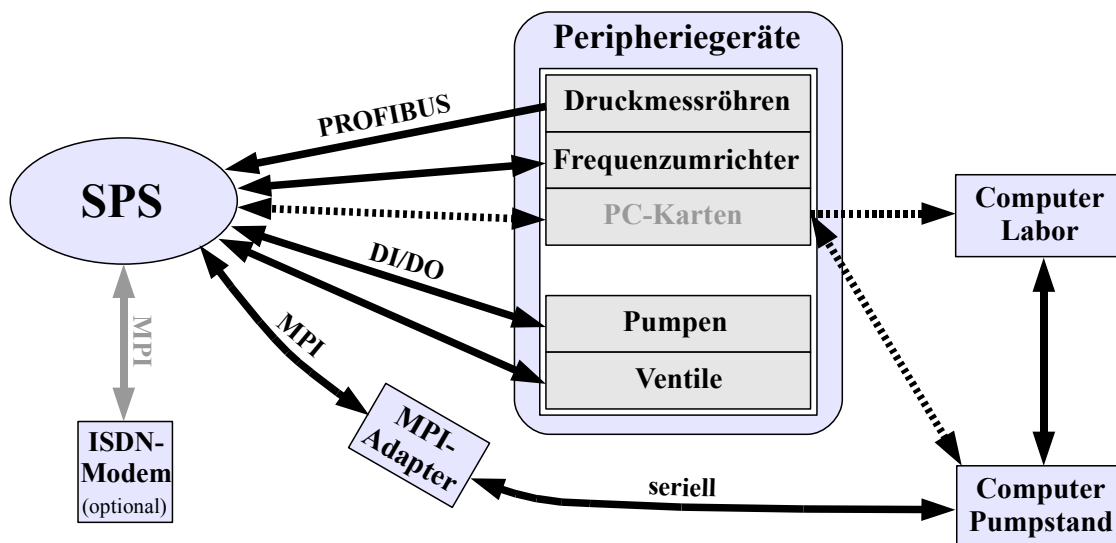


Abb. 4.1: Datenflussdiagramm der zum Pumpstand gehörenden Hardware. Die Pfeilrichtungen geben die Richtung des Datenflusses im normalen Betrieb an. Gestrichelte Linien stehen für nicht mehr nötige Datenflüsse für die LabVIEW-Applikation.

4.2 Feldbussysteme

Für die Datenauslese und Regelung eines Systems sind meist mehrere Sensoren bzw. Aktoren nötig. Bei einer elektrischen Regelung gibt es nun zwei Möglichkeiten diese Geräte miteinander zu verbinden.

1. Parallele Verdrahtung: Von jedem Regelungsgerät wird je ein Kabel zu jedem Sensor und Aktor installiert.
2. Serielle Verdrahtung: Vom Regelungsgerät wird nur ein Kabel installiert, das von jedem Sensor oder Aktor zum nächsten geführt wird.

Bei einer parallelen Verdrahtung wächst der Aufwand der Verdrahtung mit steigender Zahl der angeschlossenen Systeme. Benutzt man aber eine serielle Verdrahtung und einen Standard, an den alle Teilnehmer angepasst sind, verringern sich Kosten und Aufwand. Diese Parameter erfüllt ein Feldbussystem wie z.B. PROFIBUS.

4.2.1 PROFIBUS DP

PROFIBUS wurde 1987 als Folge eines in Deutschland öffentlich geförderten Verbundvorhabens zur Realisierung und Verbreitung eines bitseriellen Feldbusses entwickelt. Zuerst wurde das komplexe Kommunikationsprotokoll PROFIBUS FMS¹ spezifiziert. Dieses war für komplexe Kommunikationsaufgaben zugeschnitten. 1993 wurden dann die Spezifikationen des wesentlich einfacher aufgebauten und damit schnelleren PROFIBUS DP² abgeschlossen.

Die folgenden Abschnitte sollen nur einen groben Überblick über das PROFIBUS-System geben. Eine genauere Beschreibung mit anschaulichen Beispielen findet man in [Fel08] und [Pop00].

4.2.2 Kommunikationsprotokoll

In einem PROFIBUS DP-Netzwerk gibt es normalerweise einen oder mehrere Master (meist SPS) und Slaves (Sensoren und Aktoren). Der Master hat dabei als einziger die Berechtigung Daten von einem Slave anzufordern oder Daten an einen Slave zu senden. Slaves hingegen senden nur Daten auf Anforderung vom Master und können keine Daten von anderen Slaves empfangen. Fordert der Master Daten von einem Slave an, sendet er ein Request-Telegramm. Der Slave antwortet darauf mit einem Response-Telegramm, in dem die angeforderten Daten enthalten sind. Damit die Daten auch eindeutig adressiert werden können, besitzt jeder PROFIBUS-Teilnehmer eine eindeutige Adresse zwischen 0 und 127.

Sind mehrere Master in einem Netzwerk vorhanden, darf immer nur der Master Daten senden und empfangen, der gerade die Berechtigung, genannt Token, besitzt. Ein Token kann zwischen verschiedenen Master eines Netzwerkes weitergegeben werden (Token-Passing).

Die Abfrage der Daten der Slaves durch einen Master geschieht normalerweise zyklisch, d.h. die Daten werden von den Slaves immer in der gleichen Reihenfolge angefordert. Erweiterungen des PROFIBUS-Protokolls stellen jedoch auch azyklischen oder zeitgesteuerten Datenverkehr zur Verfügung. Diese sind nützlich, wenn Einstellungen der Slaves während des laufenden Betriebes geändert werden müssen bzw. Daten immer zu einem bestimmten Zeitpunkt abgefragt werden sollen. Zusätzlich ist in diesen Erweiterungen die Möglichkeit der Benutzung von sogenannten I-Slaves möglich, die Daten, die an den Master gesendet werden, mithören können.

Die Kommunikation in einem solchen PROFIBUS DP-Netzwerk erfolgt allgemein in drei aufeinander aufbauenden Schichten: Der physikalischen Schicht, der Verbindungsschicht und der Anwendungsschicht. Es sind Datenraten von bis zu 12 Mbit/s auf verdrehten Zweidrahtleitungen und/oder Lichtwellenleitern möglich.

Physikalische Schicht

In dieser Schicht werden die Daten von oder zu einem Peripheriegerät in elektrischer Form mit Hilfe von Spannungsänderungen in einem Kabel übertragen. Dabei entspricht eine positive Spannung auf der Leitung dem Ruhezustand, d.h. auch dem Bitwert 0, eine negative Spannung dementsprechend dem Bitwert 1.

Verbindungsschicht

Die Verbindungsschicht arbeitet mit einem hybriden Zugriffsverfahren, das das in 4.2.2 beschriebene Master-Slave-Verfahren mit dem Token-Passing kombiniert. Dabei werden grundsätzlich fünf verschiedene Telegrammtypen benutzt:

¹Fieldbus Message Specification

²Decentralized Peripherals

1. Keine Daten (SD=0x10)



2. Daten variabler Länge (SD=0x68)



3. Daten fester Länge (SD=0xA2)



4. Token (SD=0xDC)



5. Kurzquittung (SC=0xE5)



Die Inhalte der einzelnen Telegramme setzen sich dabei aus den folgenden Teilen zusammen:

- **SD** (Start Delimiter): Anfangsbegrenzer eines Telegramms. Er hat für jeden Telegrammtyp einen festgelegten Wert.
- **ED** (End Delimiter): Endbegrenzer eines Telegramms. Er hat immer den hexadezimalen Wert 0x16.
- **SC** (Short Confirmation): Kurztelegramm zur Bestätigung.
- **DA** (Destination Address): Zieladresse des Telegramms. Sie hat den Wert der PROFIBUS-Adresse des Zielgerätes.
- **SA** (Source Address): Quellenadresse des Telegramms. Sie hat den Wert der PROFIBUS-Adresse des sendenden Gerätes.
- **LE** (Length): Längenangabe des Telegramms. Nur erforderlich bei einem Telegramm variabler Länge. Sie hat einen minimalen Wert von 4 und einen maximalen von 249.
- **LEr** (Length repeated): Wiederholte Längenangabe. Diese dient der Überprüfung bei der Übertragung der Längenangabe.
- **FC** (Function Code): Funktionscode. Dieser kennzeichnet den Telegrammtyp wie Request- oder Response-Telegramm. Zusätzlich enthält der Funktionscode die eigentliche Übertragungsfunktion und Steuerinformationen, die den Nachrichtenverlust und Vervielfältigung verhindern.
- **PDU** (Protocol Data Unit): Nutzdaten. Dies sind die eigentlichen Daten, die an den Slave zur Steuerung gesendet werden oder vom Slave abgefragt werden können. Diese umfassen maximal 246 Byte.
- **FCS** (Frame Check Sequence): Prüfsumme. Diese dient der Kontrolle der korrekten Übertragung des Telegramms.

Zusätzlich zu den obigen Telegrammtypen besteht jedes Telegramm noch aus einem Startbit (Wert 0), einem Paritätsbit (gerade Parität) und einem Stopbit (Wert 1). Um 8 Bit Daten zu übertragen werden somit immer 11 Bit gesendet.

4.2.3 Hardwarekonfiguration des Feldbussystems

Die Hardwarekonfiguration des vorliegenden Feldbussystems mit einer S7-SPS als Master erfordert eine Programmierung mit der SIEMENS eigenen Programmiersprache STEP7. Hier kann man neue PROFIBUS-Teilnehmer installieren und alte deinstallieren sowie den Slaves sogenannte Datenmodule zuweisen, die dann die Daten an Eingangs- und Ausgangsadressbytes der SPS senden. Dort können diese dann weiterverarbeitet werden.

Abbildung 4.3 zeigt die Hardwarekonfiguration des Bochumer Pumpstands. Im oberen Fenster wird das PROFIBUS-Netzwerk mit den angeschlossenen Zusatzmodulen und den PROFIBUS-Slaves gezeigt. Dabei ist links die S7-SPS mit den angeschlossenen Zusatzmodulen zu sehen. Diese hat die PROFIBUS-Adresse 2. Davon geht nach rechts eine sogenannte Rail ab, an der die PROFIBUS-Slaves angeschlossen sind. Vor jedem Slave steht dessen PROFIBUS-Adresse. So belegen die Hilscher PC-Karten die Adressen 3 und 13, der KEB COMBIVERT Frequenzumrichter die Adresse 14 und die Druckmessröhren die Adressen 4 bis 12.

Das untere Fenster zeigt die Eingangs- und Ausgangsadressbytes der Teilnehmer bei Auswahl dieser im oberen Fenster. Eine genaue Liste der Adresszuordnungen findet sich in A.1.

Kapitel 5

Software

Die Software zum Betrieb des Pumpstandes kann grundsätzlich in zwei aufeinander aufbauende Ebenen eingeteilt werden. Die untere Ebene ist eine direkt auf die Hardware zugreifende, die mit STEP7 programmiert ist und in der SPS gespeichert wird. Dort ist es auch möglich diese Programmierung zu Sicherungszwecken auf einen Computer zu kopieren oder auf einer in der SPS befindlichen Speicherkarte zu sichern. Auf diese STEP7-Programmierung greift man mittels einer Benutzeroberfläche, die auf LabVIEW beruht, zu.

5.1 STEP7

STEP7 ist die aktuelle Programmiersprache der Simatic-S7-SPS-Familie der Firma Siemens AG. Sie beinhaltet eine Kombination von graphischen und textbasierten Elementen, mit denen eine Speicherung in Funktionen (ohne Zustandsspeicherung) und Funktionsbausteinen (mit Zustandsspeicherung) möglich ist. Eine genauere Beschreibung von STEP7 mit Programmierbeispielen findet man in [Hab07].

Am Pumpstand in Bochum ist eine STEP7-Programmierung von der vorher benutzten Visual Basic-Programmierung vorhanden, die auch weiter benutzt werden soll. Wichtigster Teil dieser Programmierung sind die Datenbausteine (DB), in denen die Daten aus den Peripheriegeräten gespeichert werden. Es ist auch möglich Werte in diese Datenbausteine im laufenden Betrieb hineinzuschreiben, womit eine Steuerung der Pumpen und Ventile ermöglicht wird. Im Folgenden werden die Datenbausteine, die zur Steuerung des Pumpstandes wichtig sind, genauer erläutert. Eine ausführliche Auflistung der Funktionen der einzelnen Bits und Bytes innerhalb der Datenbausteine findet sich in A.2.

- DB100: Ansteuerung der Pumpen/Ventile und Ein-/Ausschalten des Pumpstands durch Anwahl des Servicemodus. Der Datenbaustein ist so angelegt, dass nur ein Wechsel des Wertes von FALSE auf TRUE einen Schaltvorgang auslöst.
- DB101: Status-/Fehlermeldungen. Ein TRUE in einem der Bits des Datenbausteins bedeutet, dass das jeweilige Gerät eingeschaltet ist. Bei den Fehlermeldungen signalisiert ein TRUE eine Störung. Das Bit für die Druckluftversorgung hat eine inverse Logik, so dass hier ein FALSE signalisiert, dass diese in Ordnung ist.
- DB103: Druckwerte/Automatikmodus. Die Drücke werden im IEEE754-Format übermittelt, so dass immer 4 Byte einen Wert ergeben. Dazu mehr in B. Weiterhin sind hier die Werte für die Kontrollen im Automatikmodus gespeichert.

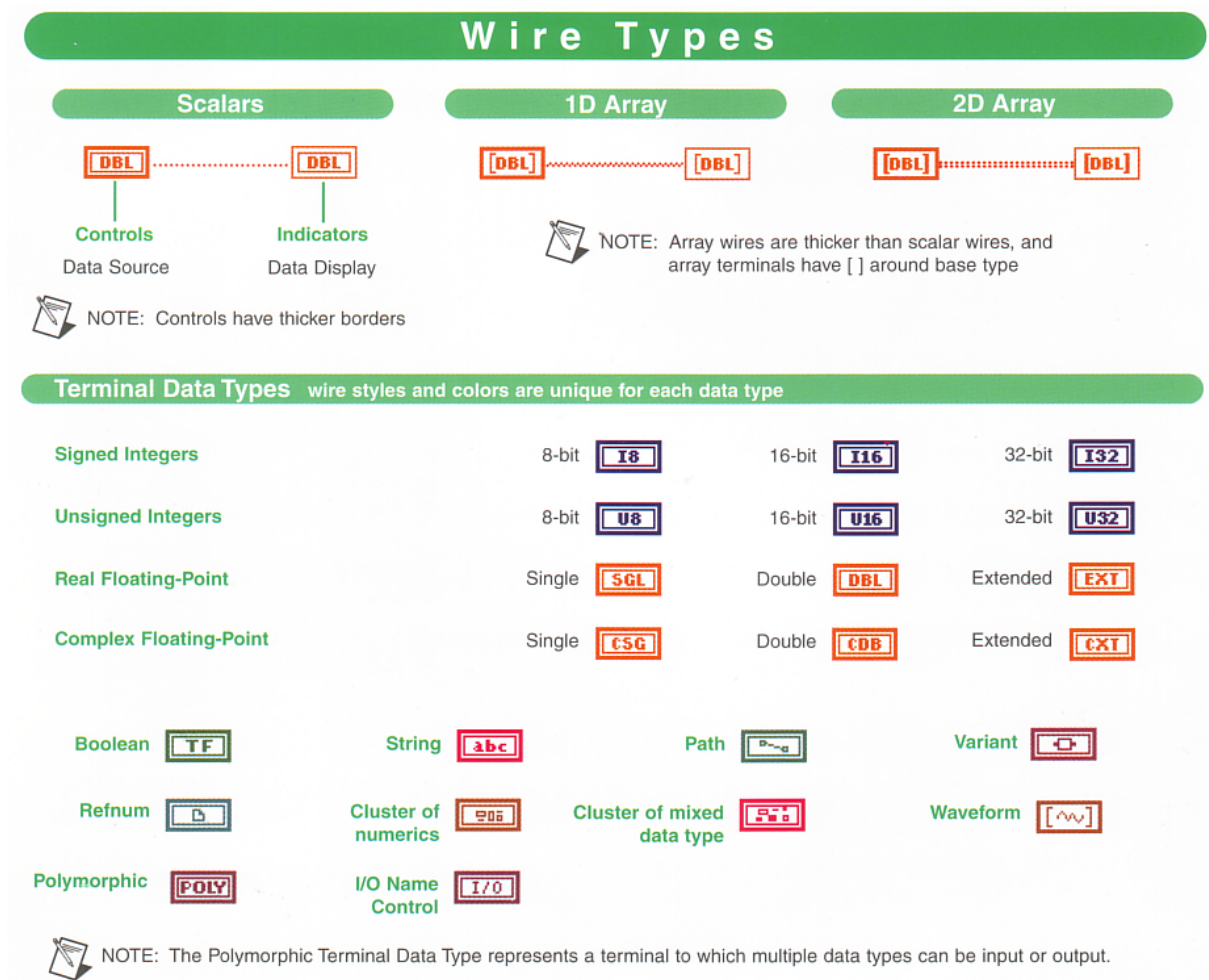


Abb. 5.1: Die verschiedenen Datentypen im Blockdiagramm der Programmiersprache LabVIEW. Oben die Bedienelemente und Anzeigeelemente für Skalare, 1D-Arrays und 2D-Arrays. Unten die verschiedenen Datentypen innerhalb eines Blockdiagramms. Abbildung aus Referenzkarte zu [NI98.1]-[NI98.4].

Automatik- und Servicemodus

Die vorhandene STEP7-Programmierung sieht zwei verschiedene Modi zum Betrieb des Pumpstandes vor. Dies ist zum einen ein Automatikmodus, in dem Sicherheiten zum Schutz der Pumpen sowie eine automatische Regelung der Wälzkolbenpumpe WKP4000 durch eine Ansteuerung des Frequenzumrichters vorgesehen sind und zum anderen der Servicemodus, in dem keinerlei Sicherheiten vorgesehen sind sowie die automatische Regelung nicht verfügbar ist.

Da für die normale Nutzung in Bochum der Automatikmodus zu wenige Freiheiten bietet, erfolgt die LabVIEW-Programmierung auf Basis des Servicemodus.

5.2 LabVIEW¹

LabVIEW ist ein Programmiersystem der Firma National Instruments. Die Programmierung erfolgt mit einer graphischen Programmiersprache, genannt 'G', nach dem Datenfluss-Modell. LabVIEW-Programme werden als Virtual Instruments (VIs) bezeichnet und bestehen aus zwei Komponenten: Dem Frontpanel, das die Benutzerschnittstelle beinhaltet und dem Blockdia-

¹Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

gramm, das den graphischen Programmiercode enthält. Letzterer wird nicht abgearbeitet, sondern kompiliert, wodurch die Performance trotz der graphischen Programmierung gut ist.

Jedes LabVIEW-VI kann als Unterprogramm eines anderen, als sogenanntes Sub-VI, laufen. Jedes VI und jeder Terminal (von LabVIEW vorgegebene Funktionen) hat Ein- und/oder Ausgänge. Diese werden mit sogenannten Drähten verbunden und bilden mit den restlichen Objekten im Blockdiagramm ein Flussdiagramm. Jedes Objekt im Blockdiagramm ist farbkodiert, wobei die Farbe den Datentyp, wie z.B. String, 8-bit Signed Integer usw., angibt.

Weiterhin ist es möglich Arrays und Cluster zu bilden. Arrays sind Tabellen, in denen die Daten in einzelne Elemente geschrieben werden. Mit diesen können dann große Mengen an Daten effektiv verarbeitet werden. Cluster hingegen bündeln Daten zu Datensätzen und dienen meistens nur der Weiterleitung von Daten innerhalb eines Blockdiagramms. Um dieses Attribut der Datenweiterleitung (Skalar, Array, Cluster) im Blockdiagramm anzuzeigen, sind Drähte nicht nur farbkodiert, sondern auch in ihrer Dicke unterschiedlich.

Um eine Verbindung zwischen Blockdiagramm und Frontpanel herzustellen, ist es möglich Bedienelemente und Anzeigen zu erstellen. Diese erscheinen dann im Blockdiagramm als Terminals mit Ausgängen bzw. Eingängen.

Eine genauere Beschreibung des Funktionsumfangs von LabVIEW mit Beispielen und Übungen findet man in [NI98.1]-[NI98.4].

DELTALOGIC ACCON-AGLink

Die Firma DELTALOGIC stellt mit der Software ACCON-AGLink eine Treiberbibliothek zur Verfügung, mit der direkt von LabVIEW aus auf die Datensätze der SPS zugegriffen werden kann. Besonders hervorzuheben ist hierbei die einfache Konfiguration und die vielen Möglichkeiten der Zugriffsmethode auf die SPS. So ist sowohl, wie im vorliegenden Fall, eine Kommunikation über das MPI-Interface möglich als auch über eine TCP/IP-Verbindung, einen USB-Anschluss oder eine PROFIBUS-Masterkarte, die als I-Slave eingerichtet werden muss. Eine genaue Dokumentation der Software mit allen ihren Möglichkeiten findet man in [Del05]. Die beiden in der LabVIEW-Programmierung

aus dem ACCON-AGLink hauptsächlich benutzten VIs sind **Bytes lesen** und **Bytes schreiben**. Damit ist es nun möglich direkt auf die in A.2 aufgelisteten Bytes zuzugreifen, so dass mit **Bytes lesen** Daten ausgelesen und mit **Bytes schreiben** Daten an die SPS gesendet werden können.

Beide VIs sind ähnlich strukturiert und besitzen demnach auch ähnliche Ein- und Ausgänge:

- Typ: Typ der Daten, die aus der SPS gelesen oder an sie gesendet werden sollen. Typischerweise wird hier als Typ Datenbaustein benutzt. Es sind auch andere Typen wie z.B. Eingangs- oder Ausgangsbytes oder Peripheriebytes zulässig. Dies ist jedoch bei einer vorhandenen STEP7-Programmierung nicht zu empfehlen, da dann beide Programme von den oder auf die gleichen Bytes gleichzeitig lesen bzw. schreiben würden.

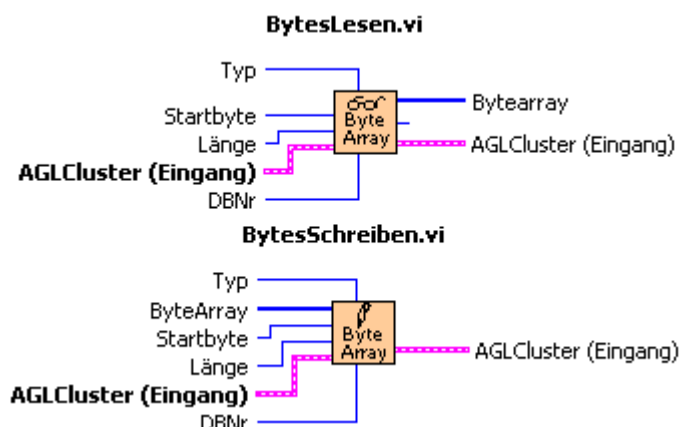


Abb. 5.2: Die beiden Sub-VIs **Bytes lesen** (oben) und **Bytes schreiben** (unten) mit ihren Ein- und Ausgängen.

- DBNr: Nummer des Datenbausteins von dem gelesen oder auf den geschrieben werden soll.
- Startbyte: Nummer des Startbytes innerhalb des Datenbausteins. Dabei ist darauf zu achten, dass das erste Byte immer die Zahl 0 hat.
- Länge: Länge der einzulesenden Anzahl an Bytes.
- Bytearray: Daten, die an die SPS gesendet oder von ihr empfangen werden. Das Bytearray muss immer die Form eines U8-Arrays haben.
- AGLCluster (Eingang): Informationen von der Initialisierung des AGLinks.

5.2.1 Benutzeroberfläche

Die im laufenden Betrieb des Pumpstandes sichtbare Benutzeroberfläche wird in Abb. 5.3 gezeigt. Diese ist in drei Bereiche aufgeteilt.

Der obere Bereich zeigt das Flussdiagramm mit den angeschlossenen Pumpen, Ventilen und Druckmessröhren sowie Informationen zum Kryostateinsatz und einen Schalter zum Beenden der Applikation und damit auch Ausschalten des Pumpstandes. Die Ventilschalter sind so konstruiert, dass sie sowohl den Status des Ventils anzeigen (rote Lampe leuchtet: Ventil geschlossen, blaue Lampe leuchtet: Ventil geöffnet) als auch mit ihnen der Zustand des Ventils geändert werden kann. Ähnlich verhält es sich mit den Pumpenschaltern. Diese signalisieren durch ihre Farbe sowie die Aufschrift den Zustand der jeweiligen Pumpe, so dass es drei verschiedene Zustände gibt:

- Pumpe nicht bereit: Der Pumpenschalter leuchtet rot. Wird trotzdem versucht die Pumpe einzuschalten, erscheint eine Warnung mit den nötigen Bedingungen um die Pumpe betriebsbereit zu machen.
- Pumpe bereit: Der Pumpenschalter leuchtet grün. Die Pumpe ist bereit zum Einschalten.
- Pumpe in Betrieb: Der Pumpenschalter leuchtet blau. Die Pumpe ist in Betrieb.

Alle Pumpenschalter dienen zudem, wie auch die Ventilschalter, zur Steuerung der Pumpen. Zusätzlich befindet sich über der Pumpenkombination auf der Cavityseite ein Schalter um alle Pumpen auf dieser Seite nacheinander in der richtigen Reihenfolge ein- bzw auszuschalten. Dieser Schalter beachtet auch die Sicherheitsbedingungen zum Ein- oder Ausschalten der Pumpen.

Der zweite Bereich der Benutzeroberfläche befindet sich links unten. Dieser dient einer automatischen Aufzeichnung der Schaltvorgänge am Pumpstand in Form einer Textdatei. Möglich ist hier auch ein manuelles Einfügen von Kommentaren und ein Zwischenspeichern der Textdatei. Datum und Uhrzeit werden bei jedem erfolgten Eintrag automatisch eingefügt, so dass ein handschriftliches Führen eines Logbuchs entfallen kann.

Der dritte Bereich der Benutzeroberfläche befindet sich rechts unten. Hier werden, falls es zu Störungen mit einem der Ventile, Pumpen oder der Druckluftversorgung kommt, Warnleuchten aktiv. Zusätzlich wird im Falle einer Störung der Pumpstand angehalten.

5.2.2 Blockdiagramm der Applikation

Da die eigentliche Programmierung in Blockdiagrammen stattfindet, werden diese in den nächsten Abschnitten ausführlich vorgestellt und erklärt.

Die Grundlage der gesamten Programmierung ist das Blockdiagramm des VIs **Applikation Start** (siehe Abb. 5.4). Das Blockdiagramm kann grob in vier unterschiedliche Bereiche eingeteilt werden, die auch gleichzeitig die zeitliche Abfolge des Programms darstellen.

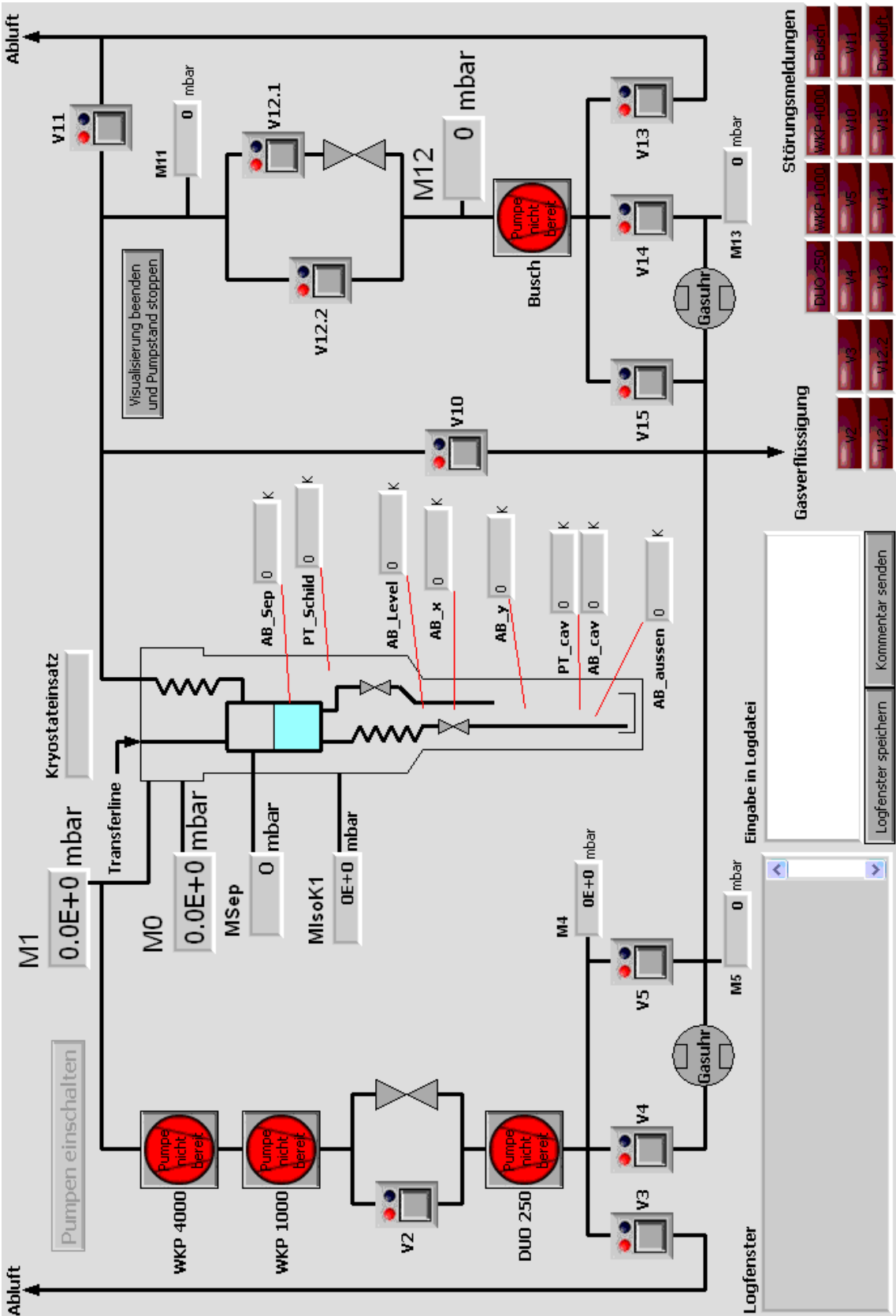


Abb. 5.3: Benutzeroberfläche der LabVIEW-Applikation. Im oberen Bereich ist das Flussdiagramm des Pumpstandes mit den Positionen der Druckmessröhren, Ventile und Pumpen zu sehen. Der untere Bereich beinhaltet ein Logbuch sowie Warnleuchten für Störungsmeldungen.

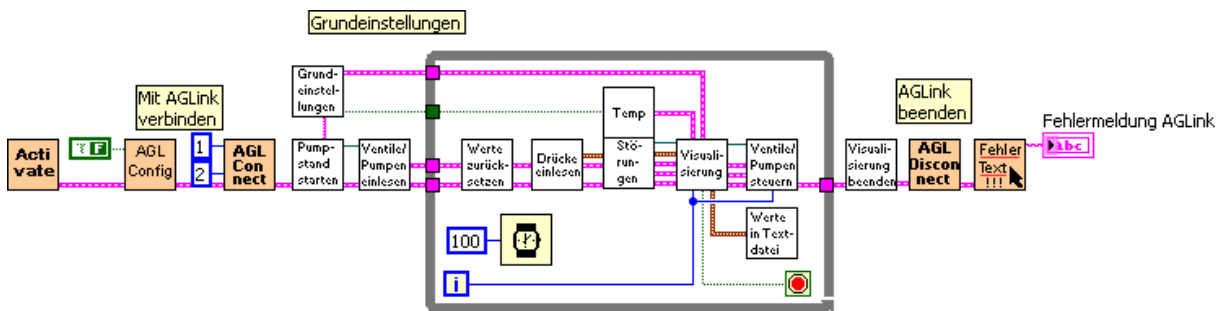


Abb. 5.4: Blockdiagramm des VIs Applikation Start mit den Sub-VIs aus dem DELTALOGIC ACCON-AGLink zum Starten und Beenden der Programmbibliothek sowie den Sub-VIs der erfolgten Programmierung.

1. Mit AGLink verbinden: Hier wird die Verbindung mit dem DELTALOGIC ACCON-AGLink hergestellt. Das VI **Activate** dient dem Aufruf des Zugangsschlüssels um die Programmbibliothek zu registrieren und in der Vollversion zu betreiben. **AGL Config** beinhaltet eine Abfrage, ob beim Start des AGLinks ein Fenster mit den möglichen Verbindungsoptionen, d.h. TCP/IP, USB usw., angezeigt werden soll. Dieses wurde ausgeschaltet, da im vorliegenden Fall immer über das MPI kommuniziert wird. Das VI **AGL Connect** dient der Auswahl der Verbindungsoption. Alle VIs, die mit dem AGLink arbeiten benötigen die hier generierten Informationen.
2. Grundeinstellungen: Mit dem VI **Pumpstand starten** wird der Pumpstand eingeschaltet. Dieser ist nun bereit Steuerbefehle anzunehmen und Daten auszugeben. Die VIs **Grund-einstellungen** und **Ventile/Pumpen einlesen** übermitteln die Starteinstellungen an die Benutzeroberfläche wie z.B. den vorhandenen Ventil- und Pumpenstatus.
3. WHILE-Schleife: Befindet sich das Programm einmal in dieser Schleife, wird diese durchlaufen bis der Pumpstand über die Benutzeroberfläche ausgeschaltet wird oder eine Störung auftritt. In der Schleife werden ständig die Daten der Druckmessröhren und Widerstände eingelesen, kontrolliert, ob ein Schaltvorgang auf der Benutzeroberfläche erfolgt ist und daraufhin die erforderlichen Befehle an die SPS gesendet sowie die eingelesenen und berechneten Daten in eine Tabelle geschrieben.
4. AGLink beenden: Dieser Teil des Blockdiagramms besteht aus den VIs **Visualisierung beenden**, **AGL Disconnect** und **Fehler text!!!**. Ersteres dient dazu einen Befehl zum Abschalten des Pumpstandes an die SPS zu senden. **AGL Disconnect** schließt die Programmbibliothek des AGLinks und **Fehler text!!!** gibt bei einem Verbindungsfehler des AGLinks eine entsprechende Textnachricht an das Ausgabefeld **Fehlermeldung AGLink** weiter.

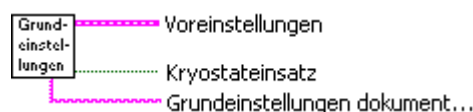
Alle VIs, die den AGLink benutzen, sind mit einem Fehlerstring verbunden, wodurch bei einem Verbindungsfehler die WHILE-Schleife nur einmal durchlaufen wird und der Fehler sofort im Ausgabefeld **Fehlermeldung AGLink** erscheint.

Im Folgenden wird jedes Sub-VI der Applikation mit seiner genauen Funktion und den Ein- und Ausgängen vorgestellt.

Grundeinstellungen

Das Sub-VI **Grundeinstellungen** dient der Einstellung von Startoptionen für die beiden Sub-VIs **Visualisierung** und **Ventile/Pumpen steuern**, damit beim Start des Programms die Applikation mit den am Pumpstand momentan vorhandenen Einstellungen initiiert wird.

Weiterhin startet das Sub-VI zwei Dialogfelder, in dem der Benutzer sowohl den verwendeten Kryostat als auch den Einsatz auswählen muss. Diese Einstellungen werden an das Sub-VI **Temp** sowie **Visualisierung** weitergegeben.



Pumpstand starten

Dieses Sub-VI startet den Pumpstand im Servicemodus, indem es zuerst ein FALSE und dann ein TRUE an Byte 4.1

von DB100 schickt (siehe Abb. 5.5). Zudem wird hier das Logfile der Messung erstellt, indem sowohl die eingestellten Daten aus dem Sub-VI **Grundeinstellungen** als auch ein Kommentar zum Start des Pumpstands in eine Textdatei geschrieben werden.

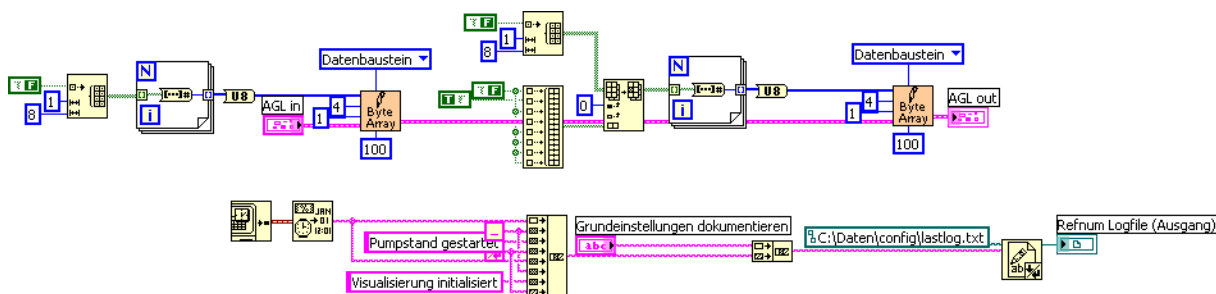
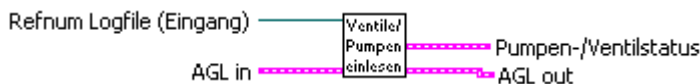


Abb. 5.5: Blockdiagramm des Sub-VIs **Pumpstand starten**. Im oberen Teil wird zuerst ein Array mit acht Zeilen und einer Spalte für jedes Senden an die SPS initialisiert. Links werden dabei zuerst nur acht FALSE gesendet. Rechts wird dann die zweite Zeile des Arrays mit einem TRUE überschrieben und dann an die SPS gesendet, was zu einem Einschalten des Servicemodus führt. Im unteren Teil wird das Starten des Pumpstandes zusammen mit den Informationen zur Wahl von Kryostat und Kryostateinsatz in einen mehrzeiligen String und dann in die Textdatei *lastlog.txt* geschrieben.

Ventile/Pumpen einlesen

Dieses Sub-VI liest beim Start der Applikation den Pumpen- und Ventilstatus aus DB101 ein und leitet diese Informationen weiter an die beiden Sub-VIs **Visualisierung** und **Ventile/Pumpen steuern**. Die Daten haben die Form eines Booleschen Arrays, wobei ein TRUE für eine eingeschaltete Pumpe bzw. ein offenes Ventil und ein FALSE für eine ausgeschaltete Pumpe bzw. ein geschlossenes Ventil steht.

Zusätzlich wird dem Logfile eine Bestätigung dieses Einstellungsvorgangs hinzugefügt.



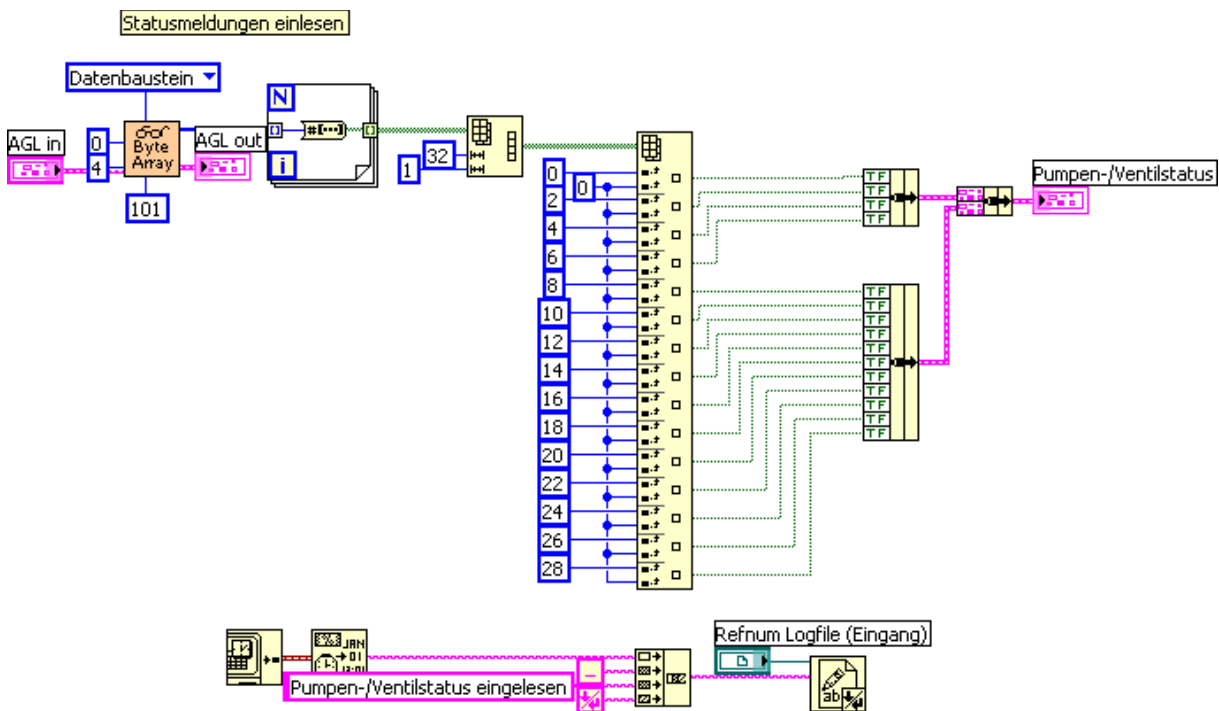


Abb. 5.6: Blockdiagramm des Sub-VIs **Ventile/Pumpen einlesen**. Im oberen Teil werden vier Byte Daten aus DB101 eingelesen und von einem U8-Array in ein Boolesches Array mit 32 Zeilen und einer Spalte umgewandelt. Aus diesem werden dann einzeln die Daten jeder Pumpe und jedes Ventils herausgesucht und zu einem Cluster zusammengefasst. Der untere Teil fügt der Datei lastlog.txt den Eintrag Pumpen-/Ventilstatus eingelesen hinzu.

Werte zurücksetzen

Das Sub-VI **Werte zurücksetzen** schreibt bei jedem Durchlauf der WHILE-Schleife ein FALSE in jede Position des DB100, da die Bits dieses Bausteins nur auf einen Übergang von FALSE auf TRUE reagieren und somit eine Steuerung der Pumpen und Ventile erst möglich ist.



Es muss also nach jeder Änderung eines Zustands eines Ventil- oder Pumpenschalters auf der Benutzeroberfläche dieses Sub-VI einmal durchlaufen werden um beim gleichen Schalter wieder eine Zustandsänderung hervorrufen zu können.

Drücke einlesen

Dieses Sub-VI liest die aus Daten der Druckmessröhren aus DB103 ein. Da diese im single IEEE754-Format (siehe Anhang B) verschlüsselt sind, werden im weiteren Verlauf des Sub-VIs die Daten in eine Dezimaldarstellung umgewandelt und den richtigen Druckmessröhren zugeordnet.



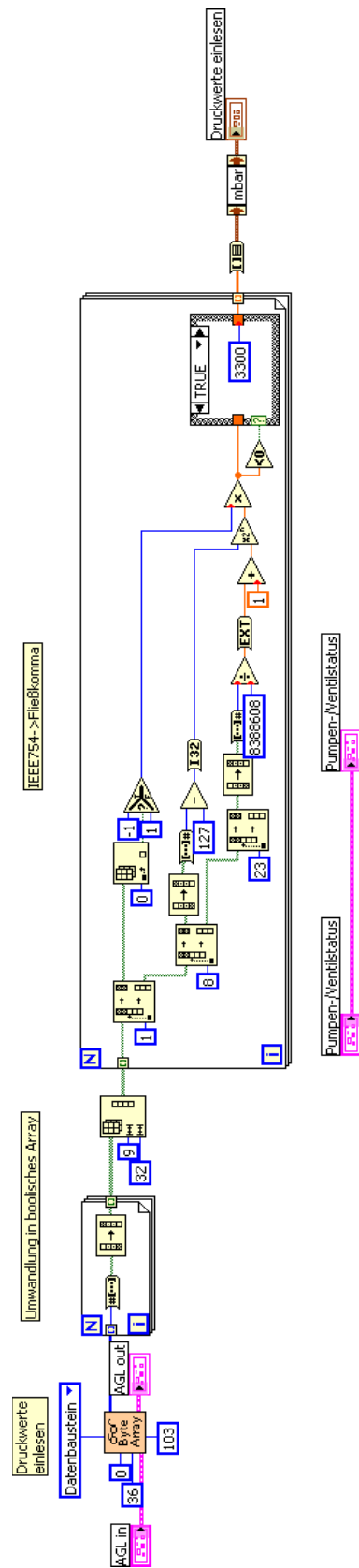
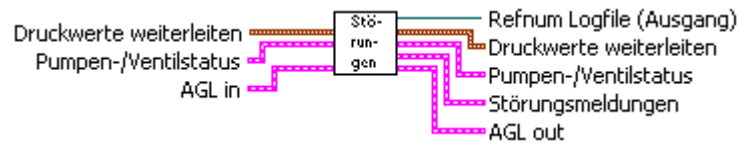


Abb. 5.7: Das Blockdiagramm des Sub-VIs **Drücke einlesen**. Oben links werden zuerst 36 Byte an Daten aus DB103 im U8-Format ausgelesen. Diese werden dann mittels einer FOR-Schleife in ein Boolesches Array mit acht Spalten und 36 Zeilen umgewandelt. Da die Druckwerte im Single IEEE754-Format vorliegen und dort jeder Wert 32 Bit, d.h. 4 Byte Länge hat, wird dieses in ein Array mit neun Zeilen und 32 Spalten umgeschrieben, so dass jede Zeile den Daten eines Druckwertes entspricht. Daraufhin wird jeder Wert wiederum mittels einer FOR-Schleife in Vorzeichen, Exponent und Mantisse aufgeteilt und in Dezimaldarstellung umgewandelt. Die CASE-Struktur am Ende der Schleife wandelt jeden negativen Druckwert in den Wert 3300 um, damit bei einem Verlassen des für eine Druckmessröhre zulässigen Anzeigebereichs dieser Wert angezeigt wird. Nach der Schleife werden die nun in einem Array angeordneten Dezimalzahlen in einen Cluster umgewandelt und jedem Wert die Einheit mbar angefügt.

Störungen

Dieses Sub-VI dient der Datenauslese der Störungsmeldungen aus DB101. Dies erfolgt analog zu der im Sub-VI **Ventile/Pumpen einlesen** benutzten Methode (siehe Abb. 5.6). Weiterhin wird bei einer

Störung dem Logfile eine Meldung mit der Art der Störung hinzugefügt. Alle Daten werden dann an das Sub-VI **Visualisierung** in Form eines Booleschen Arrays weitergeleitet, wo eine Störung zum Beenden der WHILE-Schleife führt und damit den Pumpstand stoppt und das Programm beendet.



Temp

Die Temperaturen innerhalb der Kryostate werden mit Hilfe von Widerständen gemessen und die Werte in eine globale Tabelle eingetragen, so dass jeder Computer im Labor darauf zugreifen kann. Das Sub-VI **Temp** liest diese Werte aus dieser Tabelle aus und rechnet sie mit Hilfe von gefitteten Funktionen in Widerstandswerte um. Da jeder Kryostateinsatz andere Widerstände besitzt, wird die vom Benutzer gewählte Einstellung aus dem Sub-VI **Grundeinstellungen** benötigt.

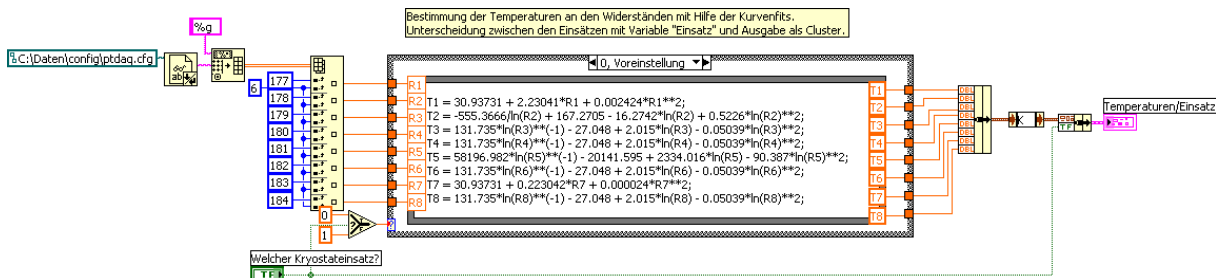
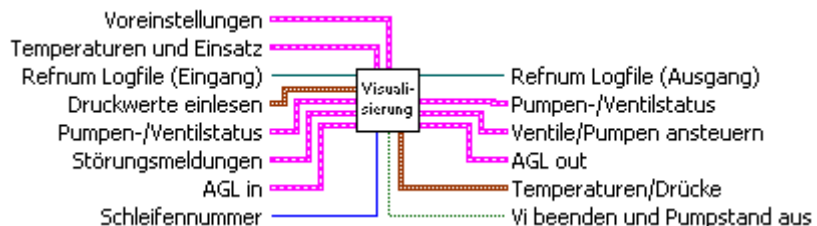


Abb. 5.8: Blockdiagramm des Sub-VIs **Temp**. Im linken Teil werden die entsprechenden Daten aus der globalen Tabelle herausgesucht und an die CASE-Struktur in der Mitte weitergegeben. Das Bedienelement **Kryostateinsatz** dient der Auswahl des für diesen Einsatz bestimmten CASE. Jeder CASE besteht aus einer mathematischen Formelumgebung, die mit den jeweiligen Fitfunktionen gefüllt ist, so dass bei einer Änderung eines Widerstandstyps schnell eine Funktion verändert werden kann. Weiterhin ist das Zufügen neuer CASE für weitere Kryostateinsätze ohne Probleme möglich.

Visualisierung

Das Frontpanel dieses Sub-VIs ist gleichzeitig die Benutzeroberfläche der Applikation (siehe Abb. 5.3), so dass alle Daten in diesem VI ankommen und alle Steuerungen von hier aus vorgenommen werden.

Das Blockdiagramm ist in Form einer geschichteten Sequenzstruktur angeordnet. Dies dient sowohl der Übersichtlichkeit



als auch der Verhinderung des gleichzeitigen Lesens und Schreibens von einer bzw. auf eine Variable.

Zusätzlich wird noch unterschieden zwischen der ersten Ausführung des Sub-VIs nach dem Start der Applikation und allen weiteren Ausführungen. Dazu wird der Schleifeniterationszähler i der WHILE-Schleife benutzt. Ist $i = 0$ entspricht dies einem Booleschen TRUE und alle Programmteile der ersten Ausführung können in einen TRUE-CASE geschrieben werden. Ist $i \neq 0$ entspricht dies einem Booleschen FALSE und der Programmteil für alle weiteren Ausführungen kann in einen FALSE-CASE geschrieben werden.

Das Blockdiagramm besteht insgesamt aus 7 Sequenzen (CASE 0 - CASE 6), die im Folgenden genauer vorgestellt werden.

1. CASE 0: Diese Sequenz setzt im ersten Durchlauf den Schalter für das Beenden der Applikation auf FALSE und sendet den im Sub-VI **Grundeinstellungen** ausgewählten Kryo-
stat an das Frontpanel, so dass diese Information in CASE 4 benutzt werden kann.

Bei allen weiteren Durchläufen werden die Störungsmeldungen an die entsprechenden Warnlampen der Benutzeroberfläche weitergegeben sowie im Falle einer Störung ein TRUE an die Abfrage zur Fortsetzung der WHILE-Schleife, damit diese sofort nach Auftreten einer Störung verlassen und der Pumpstand abgeschaltet wird.

Es existiert eine zusätzliche Abfrage in Form eines Dialogfeldes beim Betätigen des Beenden-Schalters auf der Benutzeroberfläche um ein versehentliches Abschalten des Pumpstands durch den Benutzer zu vermeiden.

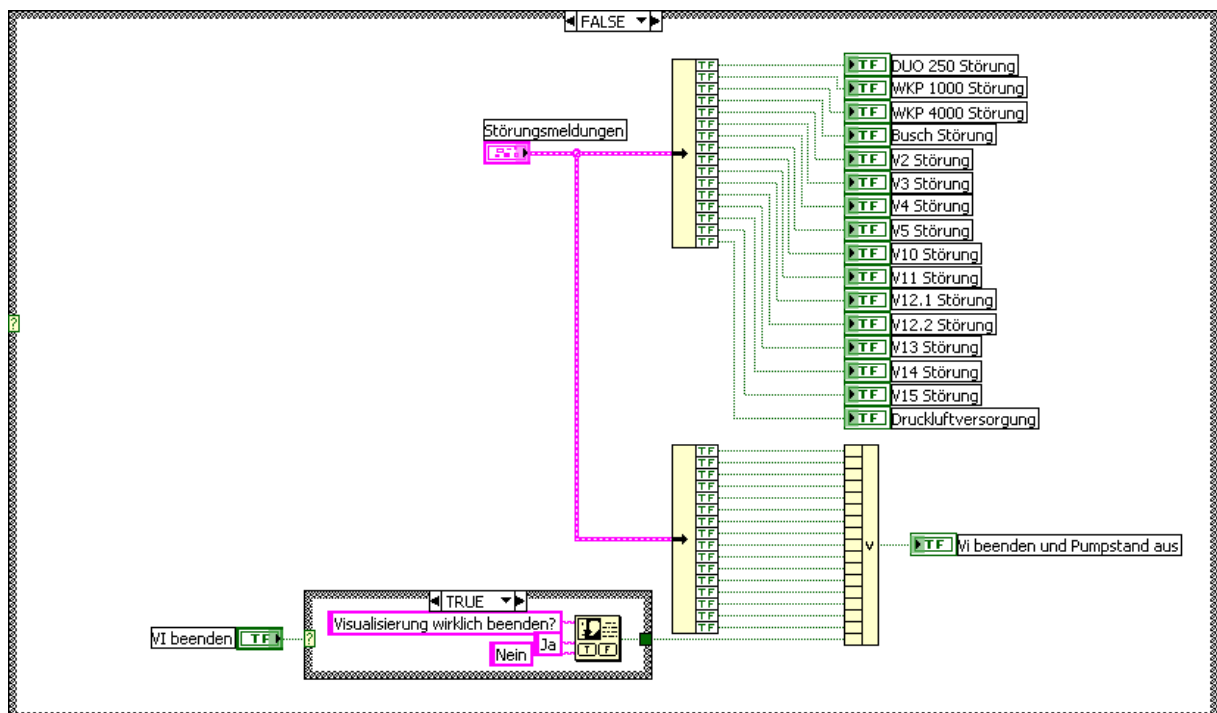


Abb. 5.9: CASE 0 des Sub-VIs **Visualisierung**. Gezeigt wird nur der Teil für $i \neq 0$. Im oberen Bereich kommen die Störungsmeldungen aus dem Sub-VI **Störungen** als Cluster an, werden aufgeschlüsselt und an die entsprechenden Warnlampen weitergegeben. Der untere Teil des Blockdiagramms beinhaltet die Sicherheitsabfrage bei der Betätigung des Beenden-Schalters kombiniert mit einem Baustein für eine ODER-Mehrfacharithmetik, der zusätzlich an den Cluster der Störungsmeldungen angeschlossen ist. Dies bewirkt beim Auftauchen eines oder mehrerer TRUE am Bausteineingang auch ein TRUE am Ausgang, was an die Abfrage zur Fortsetzung der WHILE-Schleife weitergegeben wird.

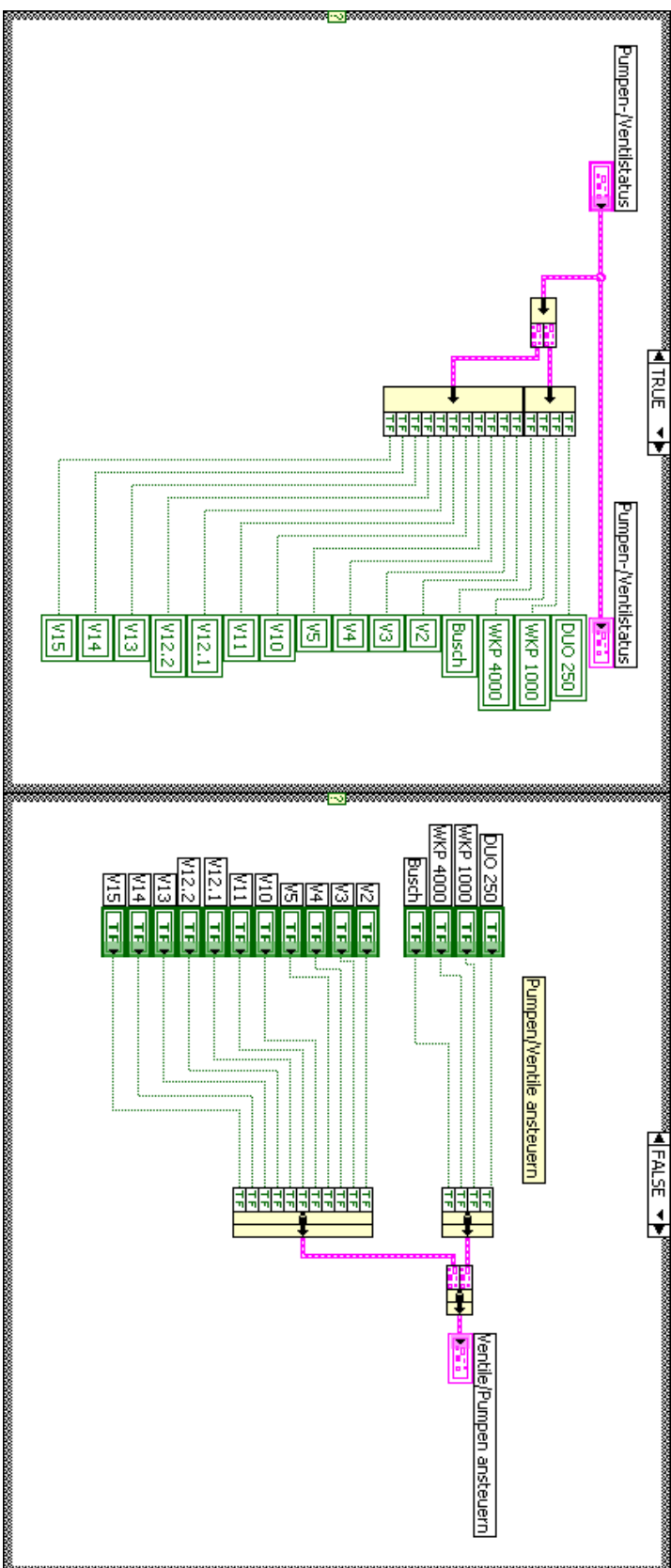


Abb. 5.10: CASE 3 des Sub-VIs **Visualisierung**. Links der Programmteil für $i = 0$, rechts der für $i \neq 0$. Bei der ersten Ausführung ($i = 0$) der Sequenz kommen die Starteinstellungen der Pumpen und Ventile als Cluster gebündelt an, werden in einzelne Boolesche Werte aufgespalten und den entsprechenden Schaltern zugeordnet. Bei jeder weiteren Ausführung ($i \neq 0$) werden die Daten aus den gleichen Schaltern auf der Benutzeroberfläche zu einem Cluster gebündelt und an das Sub-VI **Ventile/Pumpen ansteuern** weitergegeben.

2. CASE 1/2: In CASE 1 werden die Temperaturen und Drücke aus den beiden Sub-VIs **Temp** und **Drücke einlesen** sowie die Auswahl des Kryostateinsatzes aus dem Sub-VI **Grundeinstellungen** an die entsprechenden Anzeigeelemente der Benutzeroberfläche weitergeleitet.

CASE 2 bündelt alle Temperatur- und Druckwerte zu einem Cluster und leitet diesen an das Sub-VI **Werte in Textdatei** weiter. Eine Trennung dieser beiden Vorgänge in zwei unterschiedliche Sequenzen verhindert einen gleichzeitigen Schreib- und Lesevorgang auf diese Variablen.

3. CASE 3: Diese Sequenz erhält während der ersten Ausführung die Daten aus dem Sub-VI **Ventile/Pumpen einlesen** und schreibt mittels dieser Daten die Zustände der Ventile und Pumpen in die Schalter auf der Benutzeroberfläche, damit diese den Anfangszustand beim Start der Applikation anzeigen.

Bei jeder weiteren Ausführung der Sequenz wird der Zustand der Schalter an das Sub-VI **Ventile/Pumpen ansteuern** weitergegeben, wo dann eine mögliche Zustandsänderung, d.h. ein Schaltvorgang auf der Benutzeroberfläche registriert und der entsprechende Befehl an die SPS gesendet wird.

4. CASE 4: Diese Sequenz beinhaltet eine flache Sequenzstruktur, in der alle Kontrollen und automatischen Schaltvorgänge ab dem zweiten Durchlauf der WHILE-Schleife abgearbeitet werden. In den einzelnen Untersequenzen werden dabei die folgenden Programmteile durchgeführt:

- (a) Untersequenz 1 - Bedingung für DUO 250/Überdruckregelung Ventile Gasuhr Cavity: Hier wird darauf geachtet, dass die DUO 250 nur dann eingeschaltet werden darf, wenn eines der Abgasventile offen ist und der Druck an der Abgasseite unter 1100 mbar sowie der im Isoliervakuum des benutzten Kryostaten unter 1 mbar liegt. Weiterhin wird bei einem Druckunterschied vor und hinter der Gasuhr auf der Cavityseite von mehr als 100 mbar automatisch ein Bypassventil geöffnet.
- (b) Untersequenz 2 - Bedingung für WKP 1000/Überdruckregelung Ventile Gasuhr Separator: Alle Bedingungen für die DUO 250 gelten auch für das Einschalten der WKP 1000. Zusätzlich muss jedoch noch die DUO 250 eingeschaltet sein, das Verbindungsventil zwischen den beiden Pumpen offen und der Druck an der Saugseite der WKP 1000 unter 100 mbar liegen. Weiterhin ist die Schaltung der Gasuhr auf der Separatorseite analog zu der auf der Cavityseite, die in (a) erklärt wurde.
- (c) Untersequenz 3 - Bedingung für WKP 4000/Bedingung für Busch: Die Bedingungen aus (a) und (b) für die beiden Pumpen müssen auch für die WKP 4000 gelten. Zusätzlich muss der Druck auf der Saugseite der Pumpe nun unter 10 mbar liegen. Die Pumpe auf der Separatorseite (Busch) muss, analog zu den Pumpen auf der Cavityseite, auch offene Abgasventile und einen Druck auf der Abgasseite von unter 1100 mbar haben, um eingeschaltet werden zu können.
- (d) Untersequenz 4 - Einschaltautomatik: Mit dieser Teilsequenz ist der Schalter **Pumpen einschalten/ausschalten** auf der Benutzeroberfläche verbunden. Dabei handelt es sich um eine Einschaltautomatik die automatisch alle Pumpen auf der Cavityseite in der Reihenfolge DUO 250 -> WKP 1000 -> WKP 4000 einschaltet, sobald die oben genannten Bedingungen erfüllt sind.

Die andauernde Überprüfung des Status der Pumpen- und Ventilschalter und der Bedingungen diese ein- bzw. auszuschalten dient der Sicherheit des gesamten Pumpen- und

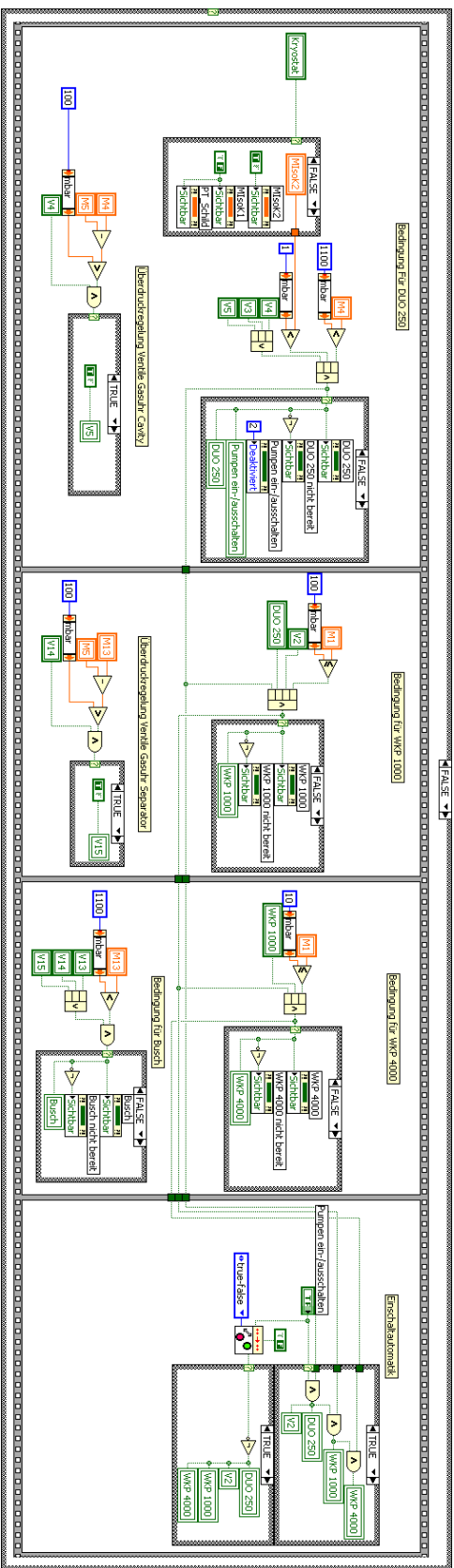


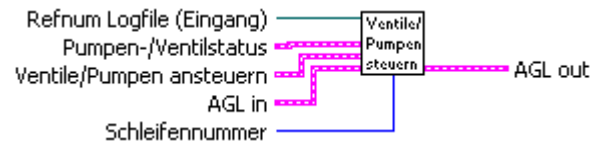
Abb. 5.11: CASE 4 des Sub-VIs Visualisierung. Im oberen Teil der ersten Teilsequenz wird zuerst der ausgewählte Kryostat eingelesen und daraufhin das Anzeigelement für die entsprechende Druckmessröhre sichtbar gemacht. Als nächstes werden die in (a) aufgezählten Bedingungen einzeln überprüft und mittels vergleichender Boolescher Bausteine zusammengeführt, so dass am Ende ein TRUE den Schalter zum Ein- bzw Ausschalten der DUO 250 erscheinen lässt sowie den Schalter **Pumpen einschalten/ausschalten** nicht mehr ausgegraut erscheinen lässt oder ein FALSE das Anzeigelement **Pumpe nicht bereit** sowie den Schalter **Pumpen einschalten/ausschalten** ausgegraut erscheinen lässt. Der untere Teil dieser Teilsequenz überprüft die Druckdifferenz der beiden Druckmessröhren M4 und M5 auf der Cavityseite und den Zustand des Ventils V4. Ist die Druckdifferenz zu hoch, d.h. über 100 mbar, und V4 offen wird automatisch das Bypassventil V5 geöffnet. In der zweiten Teilsequenz wird der Status der DUO 250 überprüft sowie der Zustand des Ventils V2 und der Druck in der Druckmessröhre M1. Ist die DUO 250 eingeschaltet und V2 offen sowie der Druck in M1 unter 100 mbar, erscheint der Schalter zum Ein- bzw Ausschalten der WKP 1000. Andernfalls erscheint das Anzeigelement **Pumpe nicht bereit**. Im unteren Teil dieser Teilsequenz wird der Zustand der Gasuhr auf der Separatorseite überwacht, so dass bei einer Druckdifferenz von über 100 mbar zwischen M13 und M5 sowie einem offenen Ventil V14 automatisch das Ventil V15 geöffnet wird. Die dritte Teilsequenz überprüft die Bedingungen zum Einschalten der WKP 4000 (oberer Teil) und der Busch (unterer Teil). Für die WKP 4000 muss die WKP 1000 eingeschaltet sein sowie alle vorherigen Bedingungen für die DUO 250 und WKP 1000 gelten als auch der Druck in M1 unter 10 mbar betragen. Der Schalter zum Einschalten der Busch erscheint, analog zu den Bedingungen für die DUO 250, erst, wenn eines der Abgasventile V13, V14 oder V15 geöffnet ist sowie auf der Abgasseite ein Druck unter 1100 mbar herrscht. Die vierte Teilsequenz dient der Kontrolle des Schalters **Pumpen einschalten/ausschalten**. Wird dieser durch Öffnen eines der Abgasventile auf der Cavityseite nicht mehr ausgegraut dargestellt und dann aktiviert, d.h. sein Zustand auf TRUE geändert, wird bei jedem Durchlauf der gesamten flachen Sequenzstruktur das ermittelte Ergebnis für die jeweiligen Einschaltbedingungen der Pumpen hierin weitergeleitet und die jeweilige Pumpe bei einem Booleschen TRUE aktiviert. Wird der Zustand des Schalters von TRUE auf FALSE geändert, werden alle Pumpen ausgeschaltet.

Ventilsystems, da ein Einschalten der Pumpen oder Öffnen bzw. Schließen der Ventile bei zu hohen bzw. zu niedrigen Drücken oder ein zu hoher Gasfluss an der Gasuhr diese beschädigen könnte.

5. CASE 5: Diese Sequenz dient der Anzeige von Warnmeldungen beim Versuch des Einschaltens von Pumpen, wenn diese die in CASE 4 aufgezählten Bedingungen noch nicht erfüllen. So erscheint bei jedem nicht erwünschten Einschaltversuch in der Mitte des Bildschirms eine farbig blinkende Warnmeldung mit Anweisungen was zu tun ist um die jeweilige Pumpe betriebsbereit zu machen. Diese Warnmeldungen erscheinen für 5 Sekunden und sind erst ab dem zweiten Durchlauf der WHILE-Schleife aktiv.
6. CASE 6: Diese Sequenz dient der Ausführung des Hinzufügens von Kommentaren zum Logfenster wie auch dem manuellen Speichern des Logfiles. So wird hier dem Logfile bei Betätigung des Schalters **Kommentar hinzufügen** auf der Bentzuoerfläche ein String in einer neuen Zeile mit Datum, Zeit und Inhalt des eingegebenen Kommentars hinzugefügt und der Schalter danach wieder auf seine Ausgangsposition zurückgeschaltet. Weiterhin erscheint bei Betätigung des Schalters **Logfenster speichern** ein Dialogfeld, in dem Name und Zielort der zu speichernden Textdatei einzugeben sind.

Ventile/Pumpen steuern

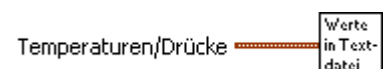
Dieses Sub-VI dient der Weitergabe der Befehle der Benutzeroberfläche an die SPS. Prinzipiell ist es genauso aufgebaut wie das Sub-VI **Werte zurücksetzen**, nur das hier im Falle eines Booleschen Wechsels, d.h. der Änderung eines Zustands von FALSE auf TRUE oder von TRUE auf FALSE, ein TRUE an das entsprechende Bit von DB100 gesendet wird. Damit die Starteinstellungen hier richtig übernommen werden, wird jeder Boolesche Wechsel während des ersten Durchlaufs der WHILE-Schleife mit den Startwerten aus dem Sub-VI **Ventile/Pumpen einlesen** initiiert.



Zusätzlich schreibt dieses Sub-VI für jeden Wechsel einer Einstellung eines Pumpen- oder Ventilstatus einen Kommentar mit Zeit und Beschreibung der Einstellungsänderung in das Logfile.

Werte in Textdatei

Das Sub-VI **Werte in Textdatei** schreibt die umgerechneten bzw. ausgelesenen Werte der Temperaturen bzw. Druckmessröhren sowohl in eine globale Variable als auch in eine Textdatei in Form einer Tabelle mit den Spalten Zeit, der Bezeichnung des Widerstandes bzw. Druckmessröhre, dem jeweiligen Wert und der Einheit K bzw. mbar.



Dies ermöglicht sowohl ein direktes Auslesen der Werte aus der Texttabelle als auch eine Verwendung in anderen VIs durch das Anlegen der globalen Variablen.

Visualisierung beenden

Wird die WHILE-Schleife aus einem der vorher genannten Gründe beendet, durchläuft die Applikation dieses Sub-VI, was dazu führt, dass der Pumpstand analog zum Einschaltvorgang im Sub-VI **Pumpstand starten**, ausgeschaltet wird.



Zusätzlich wird dem Logfile ein Kommentar zum Ausschaltvorgang hinzugefügt.

Kapitel 6

Messungen am Pumpstand

Inhalt dieses Kapitels ist die Messung des Saugvermögens des Pumpstandes der PT-Gruppe Bochum mit der in Kapitel 4 vorgestellten Programmierung. Die Daten werden daraufhin mit denen von [Har97] und denen in 3.3.4 berechneten verglichen.

6.1 Messung des Saugvermögens

Zur Messung des Saugvermögens wurde Kryostat 2, wie bei einer Polarisationsmessung, auf eine Temperatur von ca. 1K heruntergekühlt, so dass realistische Bedingungen vorhanden waren. Nun wurde sowohl über den Zufluss neuen Heliums aus dem Separator als auch über einen Heizdraht die Temperatur und damit auch der Druck innerhalb der Cavity variiert. Damit konnten relativ genau stabile Druckwerte eingestellt und der Gasfluss durch die Gasuhr auf der Cavityseite abgelesen werden. Da diese hinter den Pumpen angebracht ist, müssen die aufgenommenen Werte für den Gasfluss noch in die Werte an der Saugseite der Pumpen umgerechnet werden.

Geht man hier näherungsweise von einem idealen Gas aus, ergibt sich mit 3.11:

$$\dot{V}_{Ausgang} = \frac{p_{Ausgang}}{p_{Eingang}} \dot{V}_{Eingang}. \quad (6.1)$$

Da $\dot{V}_{Ausgang}$ auch direkt dem effektiven Saugvermögen S_{eff} entspricht, kann aus den gemessenen Werten direkt eine Leistungskurve der Pumpenkombination bestimmt werden (siehe Abb. 6.1). Fehler bei dieser Art der Messung entstehen vor allem durch ungenaues Ablesen der Gasuhr.

Zusätzlich wurden die Werte aus [Har97] aufgetragen, um einen Vergleich zwischen dem alten Pumpstand mit einem Nennsaugvermögen von etwa $3000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ und dem seit 2004 im Einsatz befindlichen herzustellen, sowie eine Kurve mit theoretischen Werten. Diesen wurden die Werte aus Abb. 3.5 zu Grunde gelegt und die Reibungsverluste durch die Rohre nach Tab. 3.4 mit einberechnet.

Zu erkennen ist eine starke Zunahme des Saugvermögens durch die Installation der neuen Pumpenkombination von bis zu 100%. Das Maximum des Saugvermögens hat sich jedoch von ca. 0.13 mbar zu etwa 0.4 mbar bis 0.6 mbar verschoben. Ein Vergleich mit den theoretischen Werten ergibt eine ähnliche Kurvencharakteristik. Die starke Abweichung der gemessenen Werte war zu erwarten, da zusätzliche Reibung innerhalb des Kryostaten, Rückströmungen innerhalb der Pumpen sowie die Charakteristiken des gepumpten Gases nicht berücksichtigt wurden.

Auffällig ist die starke Abnahme des Saugvermögens der neuen Pumpenkombination bei Werten für $p_{Cav} < 0.4$ mbar. Vergleicht man diesen Abschnitt der Daten mit Abb. 3.5, erkennt man, dass die Drehschieberpumpe DUO 250 in etwa bei diesen Werten stark an Leistung verliert. So ist zu vermuten, dass hier die Leistung der beiden Wälzkolbenpumpen durch die geringe Leistung der einzelnen Drehschieberpumpe verringert wird.

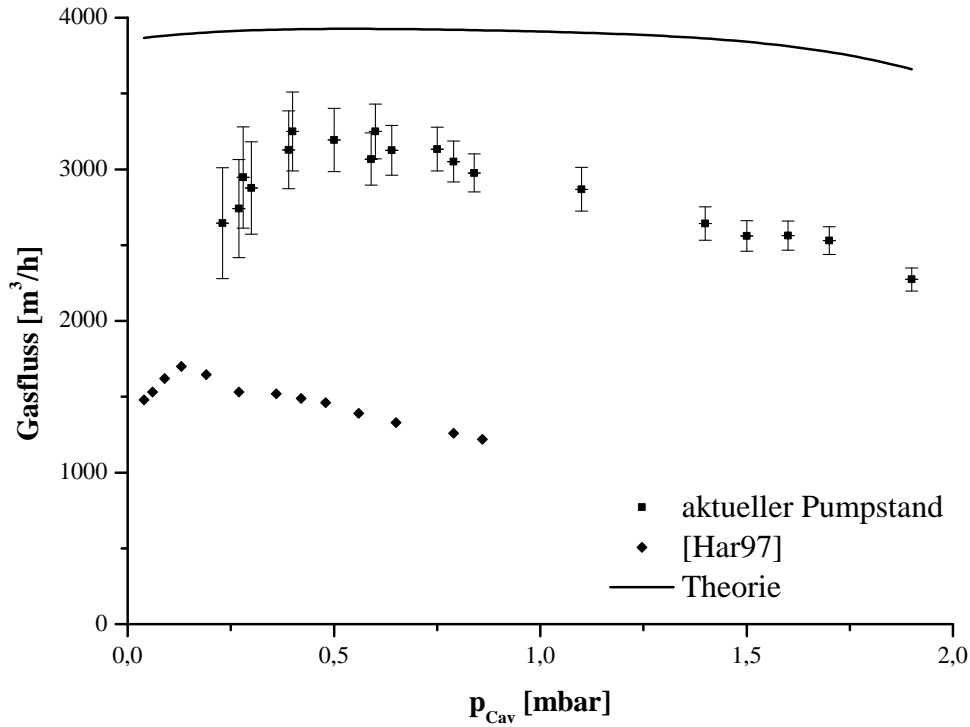


Abb. 6.1: Saugvermögensmessung der Pumpenkombination auf der Cavityseite. Aufgetragen ist das Volumen des transportierten Gases pro Stunde \dot{V} gegen den Druck in der Cavity p_{Cav} .

Zu beachten ist hier, dass in [Har97] die Werte nach einer anderen Methode berechnet wurden. Er setzte ein konstantes Saugvermögen des damaligen Pumpstands über den gesamten Druckbereich voraus und berechnete mit Hilfe der Beziehung

$$\dot{Q} = \frac{L(T)p_{Cav}S_{eff}}{p_0V_0} \quad (6.2)$$

zuerst die abgeführte Wärmemenge und daraus dann das effektive Saugvermögen S_{eff} . In 6.2 ist \dot{Q} die von den Pumpen abgeführte Wärmemenge in Abhängigkeit vom eingestellten Druck, $L(T)$ die Verdampfungsenthalpie von Helium, die aus den Werten aus [Eri54] abgelesen wurde und V_0 das Volumen des Gases unter Normalbedingungen.

6.1.1 Bestimmung der Kühlleistung

Aus den gemessenen Werten für den Heliumfluss hinter der Gasuhr \dot{V}_0 und den zusätzlich gemessenen Werten der Temperaturen in der Cavity, kann nun mit

$$\dot{Q} = \frac{L(T)\dot{V}_0}{V_0} \quad (6.3)$$

die von den Pumpen durch das transportierte Helium abgeführte Wärmemenge \dot{Q} in Abhängigkeit vom eingestellten Druck bestimmt werden. Die für die Bestimmung der Verdampfungsenthalpie benötigten Werte der Temperaturen wurden mit einem LakeShore-Widerstand, der direkt über der Cavity angebracht war, gemessen. Die aufgenommenen Werte sind in Abb. 6.2 aufge-

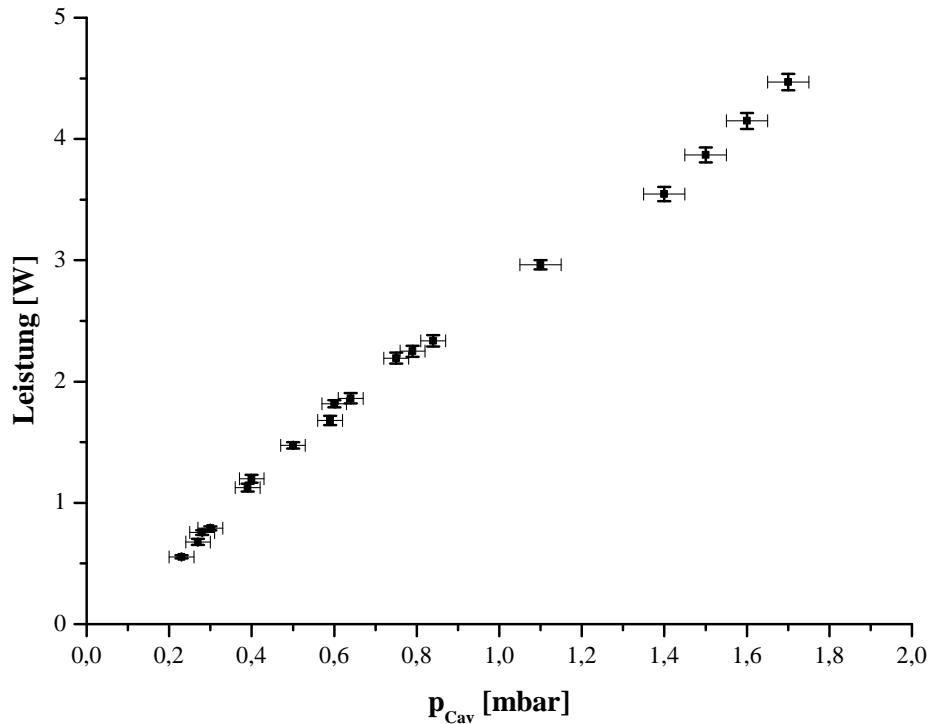


Abb. 6.2: Kühlleistung der Pumpenkombination aufgetragen gegen den Druck in der Cavity p_{Cav} .

tragen. Der Anstieg der abgeführten Wärme in Richtung höherer Drücke entsteht sowohl durch den starken Anstieg der Verdampfungsenthalpie von Helium als auch durch die größere Menge transportierten Gases bei höheren Drücken. Der nahezu lineare Verlauf der Kurve ergibt sich durch den nahezu linearen Verlauf der Verdampfungsenthalpie des Heliums im aufgenommenen Temperaturbereich. Diese Linearität lässt auch vermuten, dass die Isolation des Kryostaten zur Umgebung hin über den aufgenommen Temperatur- bzw. Druckbereich konstant ist.

Bei der niedrigst möglichen Temperatur, d.h. bei einer Isolation der Cavity vom Separator, sollte die abgeführte Wärme der Pumpenkombination auch dem Wärmeinput ohne Zufluss neuen Heliums entsprechen. An dieser Stelle sollte nur noch die Grundbelastung des Kryostaten sowie die abgeführte Wärme der Pumpen zum Temperaturgleichgewicht in der Cavity beitragen¹. Dieser Punkt wurde bei einem Druck von $p = 0.23$ mbar erreicht und ergab bei ca. 1.07K eine abgeführte Wärme und damit eine Kühlleistung von $\dot{Q} = 555 \pm 13$ mW.

Zu beachten ist hier jedoch, dass der minimal erreichte Druck für diese Anlage relativ hoch ist. So waren bisher Drücke von bis zu 0.05 mbar möglich. Dies deutet auf ein Leck innerhalb des Kryostaten hin, wodurch Helium, trotz geschlossener Zuflüsse zur Cavity, in diese gelangt sein könnte und damit den Druck und die Abdampftrate erhöht hat.

Eine theoretische Vorhersage der abgeführten Wärmemenge der Pumpenkombination ergibt einen Wert von $\dot{Q}_{\text{theo}} = 528$ mW. Dieser liegt also nahe beim gemessenen Wert.

¹Das Gas wird auf dem Weg zu den Pumpen noch durch die ca. 300K warmen Rohre weiter erhitzt. Dies ist jedoch für die Kühlung des flüssigen Heliums in der Cavity nicht weiter wichtig, da dies größtenteils außerhalb des Kryostaten geschieht und damit keinen Einfluß mehr auf die Flüssigkeit hat.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Das Erreichen hoher Kühlleistungen ist seit Beginn der Erforschung polarisierter Festkörpertargets ein nötiges und technisch anspruchsvolles Unterfangen. Zum einen wird dieses durch eine gute Isolation der eingesetzten Kryostate gegenüber der Umgebung und zum anderen durch einen entsprechend groß ausgelegten Pumpstand realisiert.

Der im Bochumer PT-Labor eingesetzte Pumpstand mit einem Nennsaugvermögen von ca. $4000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ ermöglicht das Erreichen dieser hohen Kühlleistungen mit beiden angeschlossenen Kryostaten.

Als Teil dieser Arbeit ist das Rohrsystem zwischen Pumpstand und Kryostat hinsichtlich der Reibungsverluste an den Rohrwänden untersucht worden. Es ergibt sich dabei, dass selbst für kurze Rohre ein Durchmesser von 0.1m als kritische Größe zu betrachten ist.

Weiterhin ist das effektive Saugvermögen mit einem der Kryostate gemessen und mit früheren Messungen am gleichen Kryostaten eines Pumpstands, mit einem Nennsaugvermögen von ca. $3000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ verglichen worden. Es ist dabei sowohl eine Steigerung des effektiven Saugvermögens von ca. 100% zu vermerken, als auch eine Verschiebung des Maximums der Saugleistung, in Abhängigkeit vom Druck auf der Saugseite, von 0.13mbar zu 0.4-0.6mbar zu beobachten.

Die Bedienung eines solchen Pumpen- und Ventilsystems erfolgt fast ausnahmslos über eine SPS und ein daran angeschlossenes Feldbussystem, das ein sehr schnelles Ansprechen der installierten Geräte ermöglicht.

Primäres Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Steuerung des Pumpstands mit LabVIEW zu erstellen, da alle weiteren Programme innerhalb des Labors auf dieser Programmiersprache beruhen, und damit ein einfacher Datenaustausch zwischen den Programmen ermöglicht wird. Weiterhin sollen die Sicherheitsroutinen zum Schutz der Pumpen überarbeitet und weitere implementiert werden. Dabei soll das vorhandene Programm der SPS, das mit STEP7 programmiert wurde, benutzt werden.

Als sehr vorteilhaft hat sich die Anschaffung der Software ACCON-AGLink der Firma DELTALOGIC erwiesen, die es ermöglicht, direkt von der LabVIEW-Applikation auf die Daten der SPS zuzugreifen.

Als ungünstig ist jedoch die Benutzung der vorhandenen STEP7-Programmierung zu bewerten, da sowohl durch eine lückenhafte Dokumentation als auch unzureichenden Funktionsumfang nicht alle erwünschten Funktionen der LabVIEW-Applikation realisiert werden konnten. Hier würde eine Überarbeitung der STEP7-Programmierung sowohl zusätzliche Funktionen ermöglichen als auch eine höhere Sicherheit des Pumpstands garantieren.

Anhang A

Tabellen

A.1 Adresszuordnungen der Hardwarekonfiguration

Gerätebezeichnung	PROFIBUS-Adresse	Datenmodul	Eingangs- adresse	Ausgangs- adresse
CPU 315-2 DP	2	-	-	-
DI32xDC24V	-	6ES7 321-1BL00-0AA0	4...7	-
DI16xDC24V	-	6ES7 321-1BH01-0AA0	8...9	-
DO32xDC24V/0.5A	-	6ES7 322-1BL00-0AA0	-	12...15
CIF50-DPS	3	32 byte input con	250...291	-
		32 byte input con	292...323	-
		32 byte output con	-	260...291
		32 byte output con	-	292...323
M0-RPT100	4	Transmitter RPT	338...343	-
			-	341...349
M1-PPT100	5	Transmitter PPT	332...337	-
			-	332...340
M4.1-CPT100	6	Transmitter CPT	396...401	-
			-	368...376
M5-CPT100	7	Transmitter CPT	402...407	-
			-	377...385
Miso-HPT100	8	Transmitter HPT	344...349	-
			-	350...358
M11-CPT100	9	Transmitter CPT	414...419	-
			-	386...394
M12-RPT100	10	Transmitter RPT	420...425	-
			-	449...457
M13-CPT100	11	Transmitter CPT	426...431	-
			-	395...403
Msep-CPT100	12	Transmitter CPT	350...355	-
			-	359...367
CIF50-DPS	13	32 byte input con	510...541	-
		32 byte input con	542...573	-
		32 byte output con	-	510...541
		32 byte output con	-	542...573
KEB DP_F5_OP	14	8 Byte Prozess-Ausgangsdaten	467...474	-
		8 Byte Prozess-Eingangsdaten	-	467...474

A.2 Datenbausteine

A.2.1 DB100: Ansteuerung Pumpen/Ventile

Adresse	Name	Typ	Kommentar
0.0	Service_P1	BOOL	Service Mode Pump P1 an/aus
0.1	Service_P4	BOOL	Service Mode Pump P4 an/aus
0.2	Service_P5	BOOL	Service Mode Pump P5 an/aus
0.3	Service_P6	BOOL	Service Mode Pump P6 an/aus
0.4	Service_VE2	BOOL	Service Mode Ventil VE2 auf/zu
0.5	Service_VE3	BOOL	Service Mode Ventil VE3 auf/zu
0.6	Service_VE4	BOOL	Service Mode Ventil VE4 auf/zu
0.7	Service_VE5	BOOL	Service Mode Ventil VE5 auf/zu
1.0	Service_VE10	BOOL	Service Mode Ventil VE10 auf/zu
1.1	Service_VE11	BOOL	Service Mode Ventil VE11 auf/zu
1.2	Service_VE12.1	BOOL	Service Mode Ventil VE12.1 auf/zu
1.3	Service_VE12.2	BOOL	Service Mode Ventil VE12.2 auf/zu
1.4	Service_VE13	BOOL	Service Mode Ventil VE13 auf/zu
1.5	Service_VE14	BOOL	Service Mode Ventil VE14 auf/zu
1.6	Service_VE15	BOOL	Service Mode Ventil VE15 auf/zu
1.7	Res1.7	BOOL	Reserve
2.0	VE2	BOOL	Taste Ventil VE2 öffnen
2.1	VE5	BOOL	Taste Ventil VE5 öffnen
2.2	VE10	BOOL	Taste Ventil VE10 öffnen
2.3	VE12.1	BOOL	Taste Ventil VE12.1 öffnen
2.4	VE15	BOOL	Taste Ventil VE15 öffnen
2.5	Res2.5	BOOL	Reserve
⋮	⋮	⋮	⋮
3.7	Res3.7	BOOL	Reserve
4.0	Auto	BOOL	Anwahl Automatik
4.1	Service	BOOL	Anwahl Service
4.2	ohne_Vak_Reg	BOOL	Anwahl ohne Vakuumregelung
4.3	Res4.3	BOOL	Reserve
⋮	⋮	⋮	⋮
5.7	Res5.7	BOOL	Reserve
6.0	DW6	INT	
⋮	⋮	⋮	
38.0	DW38	INT	

A.2.2 DB101: Status-/Fehlermeldungen

Adresse	Name	Typ	Kommentar
0.0	P1_an	BOOL	Pump P1 an
0.1	P1_Fehler	BOOL	Pump P1 Fehler
0.2	P4_an	BOOL	Pump P4 an
0.3	P4_Fehler	BOOL	Pump P4 Fehler
0.4	P5_an	BOOL	Pump P5 an
0.5	P5_Fehler	BOOL	Pump P5 Fehler
0.6	P6_an	BOOL	Pump P6 an
0.7	P6_Fehler	BOOL	Pump P6 Fehler
1.0	VE2_offen	BOOL	Ventil VE2 offen
1.1	VE2_Fehler	BOOL	Ventil VE2 Fehler
1.2	VE3_offen	BOOL	Ventil VE3 offen
1.3	VE3_Fehler	BOOL	Ventil VE3 Fehler
1.4	VE4_offen	BOOL	Ventil VE4 offen
1.5	VE4_Fehler	BOOL	Ventil VE4 Fehler
1.6	VE5_offen	BOOL	Ventil VE5 offen
1.7	VE5_Fehler	BOOL	Ventil VE5 Fehler
2.0	VE10_offen	BOOL	Ventil VE10 offen
2.1	VE10_Fehler	BOOL	Ventil VE10 Fehler
2.2	VE11_offen	BOOL	Ventil VE11 offen
2.3	VE11_Fehler	BOOL	Ventil VE11 Fehler
2.4	VE12.1_offen	BOOL	Ventil VE12.1 offen
2.5	VE12.1_Fehler	BOOL	Ventil VE12.1 Fehler
2.6	VE12.2_offen	BOOL	Ventil VE12.2 offen
2.7	VE12.2_Fehler	BOOL	Ventil VE12.2 Fehler
3.0	VE13_offen	BOOL	Ventil VE13 offen
3.1	VE13_Fehler	BOOL	Ventil VE13 Fehler
3.2	VE14_offen	BOOL	Ventil VE14 offen
3.3	VE14_Fehler	BOOL	Ventil VE14 Fehler
3.4	VE15_offen	BOOL	Ventil VE15 offen
3.5	VE15_Fehler	BOOL	Ventil VE15 Fehler
3.6	Res3_6	BOOL	Reserve
3.7	Res3_7	BOOL	Reserve
4.0	PLV_ok	BOOL	Druckluftversorgung in Ordnung
4.1	Lokal	BOOL	Lokalbetrieb vorgewählt
4.2	Fern	BOOL	Fernbetrieb vorgewählt
4.3	Res4_3	BOOL	Reserve
4.4	Res4_4	BOOL	Reserve
4.5	Vek_Reg_aus	BOOL	Vakuumregelung ausgeschaltet
4.6	Res4_6	BOOL	Reserve
⋮	⋮	⋮	⋮
7.7	Res7_7	BOOL	Reserve
8.0	DW8	INT	
⋮	⋮	⋮	
30.0	DW30	INT	

A.2.3 DB103: Druckwerte/Automatikmodus

Adresse	Name	Typ	Kommentar
0.0	Vac_M0	REAL	Vakuum Messröhre M0 (HPT 100)
4.0	Vac_M1	REAL	Vakuum Messröhre M1 (PPT 100)
8.0	Vac_M4.1	REAL	Vakuum Messröhre M4.1 (RPT 100)
12.0	Vac_M5	REAL	Vakuum Messröhre M5 (RPT 100)
16.0	Vac_Miso	REAL	Vakuum Messröhre Miso (PPT 100)
20.0	Vac_M11	REAL	Vakuum Messröhre M11 (PPT 100)
24.0	Vac_M12	REAL	Vakuum Messröhre M12 (RPT 100)
28.0	Vac_M13	REAL	Vakuum Messröhre M13 (RPT 100)
32.0	Vac_M14	REAL	Vakuum Messröhre M14 (CPT 100)
36.0	Res36	REAL	
⋮	⋮	⋮	
48.0	Res48	REAL	
52.0	VSP_P1	REAL	Vakuumschaltpunkt Pumpe P1 einschalten (Miso)
56.0	VSP_P5	REAL	Vakuumschaltpunkt Pumpe P5 einschalten (M1)
60.0	VSP1_VE3	REAL	Vakuumschaltpunkt 1 Ventil VE3 öffnen (M5)
64.0	VSP2_VE3	REAL	Vakuumschaltpunkt 2 Ventil VE3 öffnen
68.0	VSP1_VE4	REAL	Vakuumschaltpunkt 1 Ventil VE4 öffnen (M4)
72.0	VSP2_VE4	REAL	Vakuumschaltpunkt 2 Ventil VE4 öffnen (M5)
76.0	VSP1_VE11	REAL	Vakuumschaltpunkt 1 Ventil VE11 öffnen
80.0	VSP2_VE11	REAL	Vakuumschaltpunkt 2 Ventil VE11 öffnen (M11)
84.0	VSP1_VE13	REAL	Vakuumschaltpunkt 1 Ventil VE13 öffnen (M5)
88.0	VSP2_VE13	REAL	Vakuumschaltpunkt 2 Ventil VE13 öffnen (M13)
92.0	VSP_M0	REAL	Vakuumsollwert M0
96.0	Res96	REAL	
⋮	⋮	⋮	
188.0	Res188	REAL	

Anhang B

IEEE754-Format

Die Norm IEEE754¹ definiert Standardeinstellungen für binäre Gleitkommazahlen in Computern und legt genaue Verfahren für die Durchführung mathematischer Operationen, insbesondere für Rundungen fest.

Die Darstellung einer dieser Gleitkommazahlen

$$x = s \cdot m \cdot b^e \quad (\text{B.1})$$

besteht aus:

- Vorzeichen s (fast ausnahmslos 1 Bit)
- Basis b (bei normalisierten Gleitkommazahlen ist diese 2)
- Exponent e (r Bits)
- Mantisse m (p Bits)

Das Vorzeichen $s = -1^S$ wird in einem Bit S gespeichert, so dass $S = 0$ positive Zahlen und $S = 1$ negative Zahlen bezeichnet.

Der Exponent e ergibt sich aus der nicht negativen Binärzahl E (E wird manchmal auch als Charakteristik oder biased exponent bezeichnet) durch Subtraktion eines festen Biaswertes B : $e = E - B$. Der Biaswert berechnet sich durch $2^{r-1} - 1$, wobei r die Anzahl der Bits von E darstellt.

Die Mantisse $1 \leq m < 2$ hat den Wert, der sich aus den p Mantissenbits mit dem Wert M als $m = 1 + \frac{M}{2^p}$ berechnet.

Dieses Verfahren ist möglich, weil durch Normalisierung die Bedingung $1 \leq m < 2$ für alle darstellbaren Zahlen immer eingehalten werden kann. Da dann die Mantisse immer links mit 1. beginnt, braucht dieses Bit nicht mehr gespeichert zu werden. Damit gewinnt man ein zusätzliches Bit Genauigkeit.

B.1 Darstellungsformen des IEEE754-Formates

Die IEEE754-Norm unterscheidet vier verschiedene Darstellungen, die in Tab. B.1 aufgelistet sind: Die Anordnung einer single IEEE754-Zahl zeigt Abb. B.1. Die genaue Anordnung der Reihenfolge der Bits innerhalb eines Gerätes kann von der gezeigten Abbildung abweichen und hängt von der Bytereihenfolge und weiteren Rechnereigenheiten ab.

¹Institute of Electrical and Electronics Engineers

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiel für ein Feynman-Diagramm mit elektromagnetischer und schwacher Wechselwirkung	6
2.1	Orientierungsmöglichkeiten des Drehimpulses für $l = 2$ und $s = \frac{1}{2}$	9
2.2	Veranschaulichung zur Entstehung des magnetischen Moments	10
2.3	Veranschaulichung zur Kopplung der Drehimpulse und des magnetischen Moments	10
2.4	Schema zum Zeeman-Effekt	12
2.5	Schema zum Solid State Effect	14
2.6	Besetzungszahlverteilungen in der Spintemperaturtheorie	15
3.1	Veranschaulichung der Strömungsarten im Vakuum	19
3.2	Prinzipzeichnung einer Drehschieberpumpe	21
3.3	Prinzipzeichnung einer Wälzkolbenpumpe (Rootspumpe)	21
3.4	Skizze des Pumpstands der PT-Gruppe Bochum	22
3.5	Saugvermögenskennlinien der Pumpen	24
3.6	Skizze des Rohrsystems	25
4.1	Datenflussdiagramm	28
4.2	Beispiel eines PROFIBUS-Datenblocks	31
4.3	Hardwarekonfiguration des Pumpstands	31
5.1	Datentypen in LabVIEW	34
5.2	Sub-VIs Bytes lesen/schreiben	35
5.3	Benutzeroberfläche der LabVIEW-Applikation	37
5.4	Blockdiagramm VI Applikation Start	38
5.5	Blockdiagramm Sub-VI Pumpstand starten	39
5.6	Blockdiagramm Sub-VI Ventile/Pumpen einlesen	40
5.7	Blockdiagramm Sub-VI Drücke einlesen	41
5.8	Blockdiagramm Sub-VI Temp	42
5.9	CASE 0 Sub-VI Visualisierung	43
5.10	CASE 3 Sub-VI Visualisierung	44
5.11	CASE 4 Sub-VI Visualisierung	46
6.1	Saugvermögensmessung der Pumpenkombination	50
6.2	Kühlleistung bei verschiedenen Drücken	51
B.1	Single IEEE754-Zahl	62

Tabellenverzeichnis

1.1	Übersicht über die fundamentalen Teilchen	6
3.1	Einteilung des Vakuums	17
3.2	Übersicht der Nennsaugvermögen der Pumpenkombination	23
3.3	Übersicht der Leitwerte der Rohrstücke	25
3.4	Übersicht über die effektiven Saugvermögen	26
B.1	Darstellungsformen der IEEE754-Norm	62

Literaturverzeichnis

- [Abr78] A. Abragam, M. Goldman. Rep. Prog. Phys. 41 1987 395
- [Dah05] J. Dahmen, *Eine ESR-Apparatur zur Untersuchung von Radikalen in polarisierten Festkörpertargets*. Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum 2005
- [Del05] *Industrial PLC-Communication Suite Win32*. <http://www.deltalogic.de/downloads/SetupAcconAGLink.zip>
- [Dem00] W. Demtröder, *Experimentalphysik 3, Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2000
- [Eri54] R.A. Erickson, L.D. Roberts, *Liquid Vapour Pressure-Temperature Scale* Physical Review 93, 1954
- [Fel08] M. Felser, *PROFIBUS Handbuch, Eine Sammlung von Erläuterungen zu PROFIBUS Netzwerken*. http://www.profibus.felser.ch/technik/PROFIBUS_Technik.pdf
- [Fre81] H. Frey, R. Haefer, *Tieftemperaturtechnologie*. VDI-Verlag GmbH 1981
- [Goe02] St. Goertz, *Spintemperatur und magnetische Resonanz verdünnter elektronischer Systeme. Ein Weg zur Optimierung polarisierbarer Festkörper-Targetmaterialien*. Habilitationsschrift Ruhr-Universität Bochum 2002
- [Hab07] M. Habermann, *STEP7-Crashkurs Extended*. Vde-Verlag 2007
- [Har97] J. Harmsen, *Ein ^4He -Verdampfer-Kryostat zur Entwicklung polarisierter Festkörpertargets*. Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum 1997
- [Hes] Ch. Heß, Dissertation in Vorbereitung
- [Hes05] Ch. Heß, *Ein gepulstes NMR-System zur Polarisationsmessung an Festkörpertargets*. Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum 2005
- [NI98.1] National Instruments, *LabVIEW User Manual*. National Instruments 1998
- [NI98.2] National Instruments, *Function and VI Reference Manual*. National Instruments 1998
- [NI98.3] National Instruments, *Data Acquisition Basics Manual*. National Instruments 1998
- [NI98.4] National Instruments, *G Programming Reference Manual*. National Instruments 1998
- [Pfe] Pfeiffer Vacuum, *Betriebsanleitung Wälzkolben-Vakuumpumpstand WWD 3600*.
- [Pfe08] Pfeiffer Vacuum, *The Vacuum Technology Book - Volume 1*. Pfeiffer Vacuum 2008

- [PfeP1] Pfeiffer Vacuum, *Betriebsanleitung Wälzkolbenpumpen mit Standard- und Spaltrohrmotor WKP 2000/4000 A/AD, WKP 2000/4000 A/AD SPM.*
- [PfeP2] Pfeiffer Vacuum, *Betriebsanleitung Wälzkolbenpumpe mit Magnetkupplung WKP 1000 AM/ADM.*
- [PfeP3] Pfeiffer Vacuum, *Betriebsanleitung Drehschiebervakuumpumpen UNO/DUO 250 A.*
- [Pop00] M. Popp, *PROFIBUS-DP/DPV1. Grundlagen, Tipps und Tricks für Anwender.* Hüthig 2000
- [Sch98] M. Schlüter, *Bau und Test eines ^3He -Verdampferkryostaten.* Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum 1998
- [Sto00] H. Stöcker, *Taschenbuch der Physik.* Verlag Harri Deutsch 2000
- [Wut82] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher, *Theorie und Praxis der Vakuumtechnik.* Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft 1982

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. W. Meyer, der diese Arbeit ermöglicht hat und Herrn Prof. U. Wiedner, der freundlicherweise das Koreferat übernommen hat.

Mein Dank gilt weiterhin der gesamten PT-Gruppe des Bochumer Lehrstuhls, als da wären Dr. G. Reicherz, der mich vorzüglich betreut hat und für jede Frage ein offenes Ohr hatte, Dr. Eric Radtke und Christian Heß, denen ich zusammen mit dem Vorgenannten vor allem für das vorläufige Durchschauen der Arbeit danke, und Dr. Jörg Heckmann, der während der Fertigstellung dieser Arbeit leider aus dem universitären Dienst ausschied.

Für fachliche und nichtfachliche Unterstützung danke ich Jörn Becker, Jan Schulze, Patrick Friedel, Daniel Horn, Lars Triebwasser, Alexander Berlin, Jonas Herick, Sebastian Schrauff, Daniel Kammer und natürlich Jens Philipp, der mich während meines gesamten Studiums begleitet hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Sattler und Herrn Schobert der Firma Pfeiffer Vacuum, der Firma DELTALOGIC und der Abteilung Automatisierungstechnik der Firma Siemens sowie der Firma Hilscher.

Allergrößter Dank gilt auch meinen Eltern, die mich sowohl finanziell unterstützt haben und mir damit dieses Studium ermöglicht haben als auch mich immer wieder motivieren konnten dies doch zu Ende zu bringen.

Und zu guter Letzt möchte ich meiner Freundin danken, zu der ich glücklicherweise noch während meiner Diplomarbeit gefunden habe, und die immer ein offenes Ohr für meine Sorgen hatte.