

Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Kernphysik
WS 2006/2007

Diplomarbeit in Physik

**Aufbau einer vollautomatischen
Ultraschallreinigungsanlage für die
Drahtelektrode des
KATRIN-Hauptspektrometers**

Kim Temming

26. Februar 2007

Betreut durch Prof. Dr. C. Weinheimer
Korreferent: Prof. Dr. J. Wessels

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Neutrino-physik	5
2.1	Grundlagen der Neutrino-physik	8
2.2	Die Neutrino-masse in der aktuellen Forschung	13
2.3	Methoden zur Bestimmung der Neutrino-masse	16
2.3.1	Bestimmung der Neutrino-masse aus Supernova-Explosionen	16
2.3.2	Neutrino-loser Doppelbetazerfall	17
2.3.3	Betazerfall-Experimente	18
3	Das KATRIN-Experiment	25
3.1	Überblick über den Gesamtaufbau des KATRIN-Experiments	25
3.2	Das Hauptspektrometer mit Drahtelektrode	27
4	Reinigungsprozedur der Drahtelektrode für das KATRIN-Hauptspektrometer	33
4.1	Die Wirkungsweise von Ultraschallreinigung	33
4.2	Die ASTeC-Reinigungsprozedur als Richtlinie für KATRIN	35
4.3	Für die Drahtelektrode angepasste Reinigungsprozedur	37
4.3.1	Auswahl der Reinigungsmittel und Reinigungsschritte	37
4.3.2	Die in der Ultraschallanlage eingesetzte Reinigungsprozedur	41
5	Technischer Aufbau der Reinigungsanlage	43
5.1	Konzeption der Ultraschallanlage	43
5.2	Überblick über den Gesamtaufbau	46
5.2.1	Reinstwasserbereitung	52
5.2.2	Konzepte zur Drahtreinigung	53
5.2.3	Beschreibung und Funktionsweise der verwendeten Hardware	55
6	Elektrische Ansteuerung der Ultraschallanlage	59
6.1	Schnittstelle zwischen PC und Hardware	60
6.2	Die Elektroinstallation der Schaltelemente	61
6.3	Statusüberwachung mittels Sensorik	64
6.3.1	Temperaturüberwachung	66
6.3.2	Einsatz und Entwicklung von Füllstandssensoren	69

7	Realisierung der Softwaresteuerung mittels LabVIEW-Programmierung	75
7.1	Interaktive Steuerung der Ultraschallreinigungsanlage	78
7.2	Vollautomatisches Reinigungsprogramm	82
8	Der Ultrahochvakuumofen für Ausgastests	87
8.1	Überblick über den Aufbau des UHV-Ofens	88
8.2	Entwicklung einer automatischen Heizsteuerung für den Ausgasofen	90
8.2.1	Aufbau und Funktionsweise der Heizsteuerung	90
8.2.2	Programmierung des Microcontrollers	95
8.2.3	Erster Test der Ausheizsteuerung	96
9	Zusammenfassung	99
A	Belegungspläne der PCI-Karten	101
B	Schaltpläne	105
C	Programmtabellen und LabVIEW - Programme	117
D	Heizsteuerungsprogramm	127
	Literaturverzeichnis	139
	Danksagung	141

1 Einleitung

Die Kenntnis der Neutrino-Ruhemassen ist von großer Bedeutung nicht nur in der Teilchenphysik, sondern auch in der Astrophysik und der Kosmologie. Zahlreiche aktuelle Experimente befassen sich mit der Untersuchung der Eigenschaften von Neutrinos, insbesondere der Ruhemassen, sowie mit dem Nachweis von Neutrinos kosmischen Ursprungs. Als in den Jahren 1998 und 2001 durch Super-Kamiokande [Fuk98] in Japan und SNO [Ahm02] in Kanada Neutrinooszillationen nachgewiesen werden konnten, war auch die Existenz einer von Null verschiedenen Neutrinomasse eindeutig belegt. Da Oszillationsexperimente nur auf die Differenzen der Massenquadrate Δm_{ij}^2 sensitiv sind, konnten sie zwar eine untere Grenze von etwa 0,003 eV [Fuk98] für die Neutrinomasse angeben, jedoch keine Aussage über die absolute Massenskala machen.

Auch $0\nu\beta\beta$ -Experimente sind in der Lage, Aufschlüsse über die absolute Neutrinomassenskala zu liefern. Im Jahre 2002 veröffentlichte ein Teil der Forschungsgruppe des Heidelberg-Moskau-Experiments am Klapdor-Kleingrothaus ein in der wissenschaftlichen Gemeinschaft umstrittenes Ergebnis für die effektive Elektronneutrinomasse von (0,2-0,6) eV [Kla04]. Derzeit arbeiten viele Forschungsgruppen an der Überprüfung dieses Wertes durch neue, verbesserte Experimente.

Aus Messungen zur kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung in Kombination mit weiteren astronomischen Beobachtungsdaten lassen sich Obergrenzen für die Summe der Neutrinomassen ableiten. Von besonderem Interesse sind dabei die Ergebnisse von WMAP aus dem Jahre 2003, aus denen sich eine modellabhängige Obergrenze von $\Sigma_i m_i \leq (0,7 - 2)$ eV erschließen lässt [Spe03, Han03]. Im Umkehrschluss könnte ein unabhängig ermittelter Wert für die absolute Neutrinomasse als fester Parameter in den Analysen dieser Beobachtungen einen wichtigen Beitrag liefern.

Insgesamt ergibt sich eine hohe Motivation für eine modellunabhängige Bestimmung der Neutrinomasse im Labor. Die Kenntnis der Neutrinomassenskala kann aufgrund der großen Zahl von Neutrinos aus dem Urknall einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der Evolution des Universums und der Bildung der Strukturen auf großen Skalen leisten. Ebenso ist sie von großer Bedeutung in der Teilchenphysik jenseits des Standardmodells.

Das zurzeit im Aufbau befindliche KATRIN-Experiment wird den Endbereich des Energiespektrums des Tritiumzerfalls untersuchen, um aus der Kinematik des β -Zerfalls die Masse des Elektronneutrinos zu bestimmen. Seine Sensitivität wird im Sub-eV-Bereich liegen und damit diejenige der Vorgängerexperimente aus Mainz und Troitsk um eine Größenordnung verbessern. Als Hauptbestandteile enthält das KATRIN-Experiment eine fensterlose, gasförmige T₂-Quelle sowie ein elektrostatisches Retardierungs-Spektrometer (MAC-E-Filter).

Das KATRIN-Experiment ist in der Lage, die Obergrenze für die Masse des Elektroneneutrinos auf $m(\nu_e) < 0,2 \text{ eV}$ zu senken [KDR04]. Im Falle eines positiven Signals kann eine Neutrinomasse bei $0,35 \text{ eV}$ ($0,3 \text{ eV}$) mit 5σ (3σ) bestimmt werden. KATRIN ist damit in der Lage, das Ergebnis der Klapdor-Kleingrothaus-Gruppe entweder zu bestätigen oder weitgehend zu widerlegen.

Die Sensitivität des KATRIN-Experiments wird wesentlich beeinflusst durch die zu erwartende Untergrundrate. Eine der wichtigsten Untergrundquellen sind Elektronen, die entweder aufgrund von radioaktiven Verunreinigungen des Spektrometerstahls oder durch einfallende Myonen der Höhenstrahlung aus der Spektrometerwandung emittiert werden. Tests am Mainzer Neutrinomassen-Experiment haben ergeben, dass die Verwendung einer gegenüber der Spektrometerwandung negativ geladenen Drahtelektrode den Untergrund um mehr als eine Größenordnung senken kann [Fla04]. Um auch den Untergrund zu minimieren, der sich durch Stöße von Elektronen mit Restgasatomen im Spektrometer ergibt, wird der Hauptspektrometertank bis auf 10^{-11} mbar evakuiert. Dies stellt höchste Anforderungen an die Ausgasrate und damit die Sauberkeit des Spektrometers und der darin befindlichen Drahtelektrode.

Zur UHV-tauglichen Reinigung der Bauteile der Drahtelektrode wurde eine vollautomatische Ultraschallreinigungsanlage entwickelt. Die Konzeption der Anlage, die Aufstellung der Reinigungsprozedur in Anlehnung an die Empfehlungen des Accelerator Science and Technology Centres (ASTeC), sowie der Aufbau und die Programmierung der Steuerung bilden den Hauptbestandteil der vorliegenden Arbeit.

Gliederung der Arbeit

Eine kurze Gliederung soll einen Überblick über den Inhalt dieser Arbeit verschaffen:

- Kapitel 2 gibt dem Leser einen Überblick über den theoretischen und historischen Hintergrund der Erforschung der Neutrinos sowie der Neutrinomasse. Zudem werden die theoretischen Grundlagen erläutert, nach denen die Experimente zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse arbeiten.
- Der Aufbau sowie die Funktionsweise der einzelnen Komponenten des KATRIN-Experiments werden in Kapitel 3 dargestellt. Dabei wird auch auf den Aufbau der Drahtelektrode für das Hauptspektrometer näher eingegangen.
- Anforderungen und Vorgaben für die Reinigung der UHV-Komponenten für die Hauptspektrometer-Drahtelektrode werden in Kapitel 4 erläutert. Dort wird auch die gewählte Reinigungsprozedur vorgestellt.
- Die technische Realisierung der Reinigungsprozedur und der Aufbau der vollautomatischen Reinigungsanlage werden in Kapitel 5 beschrieben. Kapitel 6 beinhaltet die Dokumentation der Hardware zur Ansteuerung der elektrischen Komponenten.
- Die mittels LabVIEW erstellten Programme zur manuellen sowie zur vollautomatischen Kontrolle der Anlage werden in Kapitel 7 vorgestellt und erläutert.
- Kapitel 8 legt den Aufbau und die Funktion des Ausheizofens dar, der für die Überprüfung der Modulsauberkeit nach Durchlaufen der entwickelten Reinigungsprozedur eingesetzt werden soll. Außerdem wird ein Ausblick auf die kommenden Tests zur Überprüfung der Reinigungswirkung der Anlage gegeben. Diese Tests konnten aufgrund von mechanischen Problemen mit einer extern gefertigten Komponente der Ultraschallanlage im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.
- Eine Zusammenfassung bildet den Abschluss dieser Arbeit.

2 Neutrinophysik

Der Beginn des 20. Jahrhunderts war eine Zeit großer Entdeckungen in vielen Bereichen der Physik. Einstein formulierte 1916 die allgemeine Relativitätstheorie und lieferte damit ein allgemeingültiges Modell für die Beschreibung der Gravitation.

Wenige Jahre später wurde durch die Entwicklung der Quantenmechanik das Verständnis der Struktur der Materie und ihrer Wechselwirkungen revolutioniert. Mit Hilfe dieser Theorie konnten viele grundlegende Phänomene erklärt werden, wie zum Beispiel diskrete Anregungsenergien bei Atomen oder auch der Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts.

Auch die Erforschung der bereits 1896 von Henri Becquerel entdeckten Radioaktivität wurde Anfang des Jahrhunderts durch die intensive Untersuchung von α -, β - und γ -Strahlung vorangetrieben. Dabei fanden Rutherford und Geiger heraus, dass α -Strahlung aus Heliumkernen besteht, die mit einer diskreten Energie emittiert werden. Auch das Energiespektrum der Gammastrahlung wurde 1914 von Rutherford untersucht [Rut14]. Er zeigte, dass es sich bei γ -Strahlung um elektromagnetische Strahlung mit diskreten Energien handelt, die noch über der Energie von Röntgenstrahlung liegt. Auch die β -Strahlung wurde von einer Reihe von namhaften Wissenschaftlern erforscht, darunter Pierre und Marie Curie, H. Becquerel und W. Kaufmann. Doch hierbei ergab sich ein großes Rätsel. Zwar war man sich nach einiger Zeit einig, dass es sich bei β -Strahlung um Elektronen handeln muss, die aus dem Kern emittiert werden. Das Energiespektrum erwies sich jedoch nach genauen Vermessungen durch Chadwick im Jahr 1914 als kontinuierliche Verteilung [Cha14].

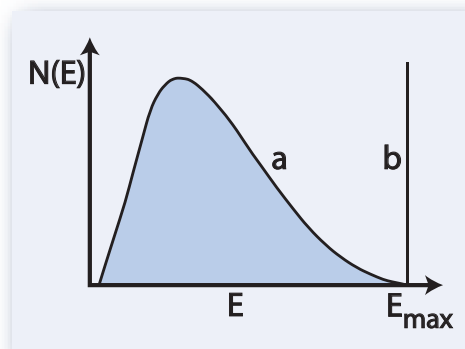
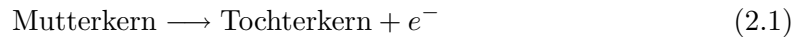


Abbildung 2.1: (a) Skizze eines kontinuierlichen Betaspektrums, wie es 1914 von Chadwick gemessen wurde; (b) bei einem Zweikörperzerfall würde eine diskrete Energie E_{max} des Elektrons erwartet.

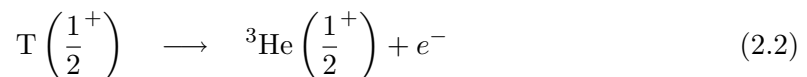
Zu dieser Zeit waren lediglich Protonen und Elektronen als kleinste Bausteine der Materie bekannt, und man ging somit davon aus, dass es sich beim β -Zerfall um einen Zweikörperzerfall handelt. Unter dieser Annahme stand jedoch das kontinuierliche Zerfallsspektrum im Widerspruch zu den als allgemeingültig anerkannten Sätzen der Energie- und Impulser-

haltung, denn man erwartete wie bei α - und γ -Strahlung ein für einen Zweikörperzerfall typisches, diskretes Energiespektrum, siehe auch Abbildung 2.1.

Zusätzlich stellte sich in diesem Zusammenhang eine weitere Frage, nämlich die nach der Erhaltung des Drehimpulses und der quantenmechanischen Spinstatistik. Im Falle eines β -Zerfalls nach dem Schema



ist die Drehimpulserhaltung verletzt. Dies lässt sich am Beispiel des Tritiumzerfalls erläutern. Ohne das Neutrino sähe dieser folgendermaßen aus:



Das emittierte Elektron trägt nach dem Zerfall einen Spin von $\frac{1}{2}$ mit sich fort. Der gekoppelte Spin der Zerfallsprodukte kann nur 0 oder 1 betragen, also ($\uparrow\downarrow$) oder ($\uparrow\uparrow$), damit wäre der Drehimpuls als Erhaltungsgröße verletzt.

Postulierung des Neutrinos

Den Wissenschaftlern blieben somit nur zwei Möglichkeiten, entweder die Allgemeingültigkeit der Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltung anzuzweifeln oder den Weg zu wählen, den Pauli 1930 in seinem Brief an die „Radioaktiven Damen und Herren“ aufzeigte [Pau30]. Dieser Brief war an H. Geiger und L. Meitner gerichtet, die sich zu jener Zeit auf einer Konferenz in Tübingen aufhielten. Um die Erhaltungssätze zu retten, wählte Pauli „einen verzweifelten Ausweg“, indem er ein drittes am β -Zerfall beteiligtes, jedoch bisher unbeobachtetes Teilchen postulierte. Er nannte es wegen seiner Eigenschaft als ungeladenes Teilchen zunächst „Neutron“. Der später gebräuchliche Name „Neutrino“ (kleines Neutron) wurde durch Enrico Fermi eingeführt, da der von Chadwick 1932 entdeckte Kernbaustein, welcher heute als Neutron bekannt ist, wegen seiner hohen Masse nicht dem von Pauli postulierten Teilchen entsprechen konnte. Nach Pauli sollte das Neutrino während des β -Zerfalls ebenso wie das Elektron aus dem Kern emittiert werden, und zwar so, dass die Summe der Energien dieser beiden Teilchen konstant ist. Der Dreikörperzerfall erklärt damit die kontinuierliche Verteilung des Energiespektrums der Elektronen. Die Masse des damals noch unbeobachteten Neutrinos schätzte Pauli bereits zu jener Zeit als sehr gering ein, sie müsse etwa im Bereich der Elektronenmasse liegen, jedoch keinesfalls über einem Hundertstel der Protonenmasse. Das Neutrino sollte einen Spin von $1/2$ haben, damit der β -Zerfall als Dreikörperprozess die Drehimpulserhaltung und die quantenmechanische Spinstatistik erfüllen kann. Der Zerfallsprozess kann somit wie folgt beschrieben werden:

β^- -Zerfall:



Ein freies oder im Kern gebundenes Neutron zerfällt unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos in ein Proton.

 β^+ -Zerfall:

Der β^+ -Zerfall des Protons ist wegen der geringfügig höheren Masse des Neutrons nur in Kernen möglich, bei denen sich durch Umwandlung eines Protons in ein Neutron ein energetisch günstigerer Zustand ergibt.

Elektroneneinfang:

Dieser Prozess findet ebenfalls nur bei in Kernen gebundenen Protonen statt, bei denen durch Einfang eines Elektrons aus einer inneren Schale der Elektronenhülle eine energetisch günstigere Kern-Konfiguration entsteht.

Erster experimenteller Nachweis des Neutrinos

Eine wichtige Frage stellte Pauli bereits in seinem Brief in den Raum, nämlich die nach dem Nachweis dieses bisher unbeobachteten neutralen Teilchens. Pauli befürchtete sogar, dass dieser gänzlich unmöglich sein könnte. Dennoch gelang es Reines und Cowan 1956, zwei Jahre vor Paulis Tod, die Existenz des Neutrinos experimentell nachzuweisen [Rei59]. Reines erhielt dafür 1995 den Nobelpreis. Der Grund dafür, dass 26 Jahre nach der Postulierung des Neutrinos vergingen, bis man es zweifelsfrei nachweisen konnte, liegt darin, dass die Neutrinos nur an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen. Für die Reaktion (2.6) ergab sich der Wirkungsquerschnitt zu $\sigma = (1,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2$. Dieser Wert stimmte gut mit der Theorie des β -Zerfalls überein, die Fermi bereits 1934 formulierte [Fer34] und nach Lee und Yang um einen paritätsverletzenden Anteil erweitert wurde. Sie bildet die Basis der heutigen Theorie der schwachen Wechselwirkung. Zum Nachweis von Neutrinos war wegen des geringen Wirkungsquerschnitts eine hohe Intensität nötig, daher verwendeten Reines und Cowan in ihren Experimenten seit Beginn der 50er Jahre Kernreaktoren als Neutrino-Quellen. Die Spaltprodukte in einem Reaktor sind wegen ihres hohen Neutronen-Überschusses starke β^- -Strahler. Ein Reaktor emittiert somit eine hohe Zahl von Antineutrinos $\bar{\nu}_e$. Diese können mittels der Reaktion des inversen β -Zerfalls



nachgewiesen werden. Eine schematische Anordnung des Experimentaufbaus findet sich in Abbildung 2.2.

Ein Behälter befindet sich zwischen zwei Szintillatoren und enthält mit Kadmiunchlorid versetztes Wasser. Das im Bild von links ankommende Neutrino wechselwirkt nach Gleichung (2.6) mit einem Proton, das sich in der wässrigen Lösung befindet. Das e^+ wird schnell abgebremst und annihiliert bereits sehr kurz nach seiner Entstehung mit einem e^- in zwei Photonen der Energie 511 keV. Sie werden sofort in beiden Szintillationszählern detektiert. Das aus der Reaktion hervorgehende Neutron wird durch Stöße mit den Wasserstoffkernen des Wassers moderiert und von einem Kadmiukern eingefangen, bevor es zerfällt. Kadmiun hat einen sehr großen Einfangquerschnitt für Neutronen und ist daher

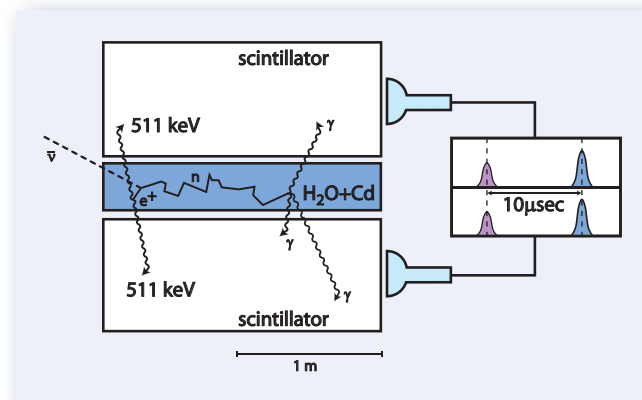


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung des Experimentaufbaus zum Nachweis des Neutrinos von Reines und Cowan.

besonders geeignet für dieses Experiment. Der durch den Einfang angeregte Cd-Kern geht unter Emission eines γ -Quants in den Grundzustand über. Dieses Signal wird ebenfalls durch die Szintillatoren registriert, es besteht jedoch eine signifikante Verzögerung zwischen beiden Gammasignalen von einigen μsec . Diese ist das charakteristische Merkmal, das eine Reaktion nach Gleichung (2.6) eindeutig belegt.

2.1 Grundlagen der Neutrinophysik

Die fundamentale Theorie zur Beschreibung der kleinsten Bausteine der Materie und ihrer Wechselwirkungen ist das Standardmodell der Teilchenphysik. In ihm haben auch die Neutrinos ihren Platz und werden durch ihre Eigenschaften und durch die Wechselwirkung mit anderen Teilchen charakterisiert. Dies soll im Folgenden kurz dargestellt werden, um einen Überblick über den theoretischen Hintergrund der Neutrinophysik zu geben. Außerdem wird auf die Phänomene und Theorien eingegangen, die zu der Annahme von massebehafteten Neutrinos führen.

Das Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik umfasst die Quantenchromodynamik sowie die Theorien der Elektrodynamik und der schwachen Wechselwirkung, die 1967 durch S. L. Glashow, A. Salam und S. Weinberg zur Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung vereinheitlicht werden konnten.

Es sind drei verschiedene elementare Wechselwirkungen bekannt, die durch den Austausch von Vektorbosonen vermittelt werden. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Wechselwirkungen und ihre Austauschteilchen.

Auch die Teilcheneigenschaft, an die die jeweilige Wechselwirkung koppelt, ist aufgeführt. Bei der elektromagnetischen ist dies die elektrische Ladung, bei der schwachen Wechselwirkung die schwache Ladung. Gluonen tragen selber eine Farbladung (rot, grün oder blau) und agieren untereinander nach der starken Wechselwirkung.

Tabelle 2.1: Die Austauschbosonen im Standardmodell

Wechselwirkung	koppelt an	Austauschteilchen	Masse	Spin
stark	Farbe	8 Gluonen (g)	0	1
elektromagnetisch	elektrische Ladung	Photon (γ)	0	1
schwach	schwache Ladung	W^\pm, Z^0	$\approx 10^2 \text{ GeV}$	1

Neben den Austauschbosonen mit ganzzahligem Spin existieren die Fermionen, die halbzahligen Spin tragen. Diese sind in Quarks und Leptonen unterteilt und können in drei sogenannte Familien gegliedert werden, siehe dazu Tabelle 2.2. Aus den experimentellen Messungen zur Breite der Z^0 -Resonanz lässt sich folgern, dass die Zahl der leichten Neutrinoarten und damit auch die Zahl der Leptonenfamilien mit 3 übereinstimmt [PDG04]. Jedes Fermion besitzt im Standardmodell ein Antiteilchen mit identischer Masse, jedoch entgegengesetzter Ladung und Farbe.

Die Leptonzahl L ist eine additive Quantenzahl, die sich für Leptonen bei Teilchen und Antiteilchen im Vorzeichen unterscheidet und den Betrag 1 hat. Die Leptonzahlen für Neutrinos und Antineutrinos sind der Tabelle 2.3 zu entnehmen, ebenso wie für die zugeordneten geladenen Leptonen. Im Standardmodell wird davon ausgegangen, dass die Leptonzahl L_α innerhalb jeder der drei Leptonenfamilien eine Erhaltungsgröße ist.

Die Reichweiten der verschiedenen Wechselwirkungen sind sehr unterschiedlich. Grundsätzlich ist eine Wechselwirkung langreichweitiger, je geringer die Masse ihres Austauschteilchens ist. Die elektromagnetische Wechselwirkung besitzt eine unendliche Reichweite, da das vermittelnde Photon masselos ist. Die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung sind dagegen mit einer Masse von $\approx 10^2 \text{ GeV}$ verhältnismäßig schwer. Die zugehörige schwache Wechselwirkung hat daher nur eine Reichweite von etwa 10^{-3} fm . Ein anderes Phänomen tritt bei der starken Wechselwirkung auf. Ihre Reichweite ist beschränkt, ob-

Tabelle 2.2: Eigenschaften von Quarks und Leptonen im Standardmodell

Fermionen	Familie			elektrische Ladung in Einheiten von e	Farbe	Spin
	1	2	3			
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	-	$\frac{1}{2}$
	e	μ	τ	-1		
Quarks	u	c	t	$+\frac{2}{3}$	r, b, g	$\frac{1}{2}$
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$		

Tabelle 2.3: Leptonenzahlen von Neutrinos und geladenen Teilchen

Teilchen	Leptonzahl	Teilchen	Leptonzahl
$\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$	-1	ν_e, ν_μ, ν_τ	1
e^+, μ^+, τ^+		e^-, μ^-, τ^-	

wohl auch die Gluonen keine Masse besitzen. Entfernt man zwei Quarks weiter als etwa 1 fm voneinander, kommt es zur Bildung eines Quark-Antiquark-Paares durch die hohe im Farbfeld enthaltene Energie. Daraus folgt, dass freie Teilchen nach außen immer farbneutral sind, dies wird auch als Confinement bezeichnet.

Das Standardmodell ist eine äußerst erfolgreiche Theorie, deren Vorhersagen in zahlreichen Experimenten bestätigt werden konnten. Viele der Teilchen und Teilchenbausteine, die erst später experimentell nachgewiesen werden konnten, wurden durch das Standardmodell bereits lange zuvor vorhergesagt. Dennoch bestehen auch in der heutigen Zeit noch viele offene Fragen in der Teilchenphysik, die auch das Standardmodell nicht erklären kann.

- Woher kommt die Mischung der Leptonenfamilien und der Quarkfamilien? Warum sehen die Mischungsmatrizen gerade so aus, wie man sie bislang bestimmt hat?
- Worin ist die Verletzung der CP-Symmetrie begründet?
- Ist es möglich, starke und elektroschwache Wechselwirkung zur sogenannten „Grand Unified Theory“ (GUT) zusammenzufassen?
- Kann man darin eventuell sogar die Gravitation einbinden?
- Wie kann das Standardmodell erweitert werden, um eine Neutrinomasse größer als Null oder Neutrinos als Majoranateilchen zu erklären?

Des Weiteren konnte das vom Standardmodell vorhergesagte Higgs-Boson noch nicht experimentell nachgewiesen werden. Kommende Experimente am LHC in Genf werden hoffentlich schon bald erste Ergebnisse bei der Suche nach dem Higgs liefern können.

Neutrinos jenseits des Standardmodells: Neutrinooszillationen

Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik sind Neutrinos per Annahme masselose Leptonen, die in drei Flavour-Generationen auftreten. Als Ende der 1960er Jahre Raymond Davis begann, den von der Sonne emittierten Neutrinostrom zu untersuchen, musste er feststellen, dass die gemessene Zahl der Neutrinos nicht einmal die Hälfte der aufgrund der Luminosität der Sonne erwarteten Anzahl erreichte [Dav94, Cle95, Dav96]. Unter der Annahme, dass die Modelle der in der Sonne ablaufenden Prozesse ausreichend zuverlässig

sind, konnte man ausschließen, dass die Sonne nur den gemessenen Bruchteil der Neutrinos emittiert. Es schien, als gingen auf dem Weg von der Sonne zur Erde Neutrinos verloren.

Dieses Phänomen lässt sich durch sogenannte Neutrinooszillationen erklären, darunter versteht man den Übergang einer Neutrinoart in eine mit anderem Flavour, also z.B. $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$. Voraussetzung für das Auftreten solcher Oszillationen ist, dass zumindest eine Neutrinoart Masse besitzt, jedoch dürfen nicht alle Arten die gleiche Masse haben. Außerdem müssen die Neutrinoarten untereinander mischen, ihre Leptonflavourzahl L_α darf nicht streng erhalten bleiben. Obwohl das Standardmodell masselose Neutrinos und eine Erhaltung der Flavourzahl L_α vorsieht, widerspricht die Annahme einer Neutrinomasse keinem fundamentalen physikalischen Prinzip, wie z.B. einem Eichprinzip. Neutrinooszillationen treten somit zwar nicht im Standardmodell auf, werden aber nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Eine Erweiterung der Theorie bei eindeutiger Evidenz für Neutrinooszillationen und damit auch für massebehaftete Neutrinos ist somit möglich.

Mathematisch lassen sich Neutrinooszillationen wie folgt beschreiben. Die drei in der schwachen Wechselwirkung auftretenden Neutrinoarten ν_α mit $\alpha = e, \mu, \tau$ heißen Flavour-eigenzustände $|\nu_\alpha\rangle$ und besitzen ein festes L_α . Es gilt

$$L_\alpha |\nu_\alpha\rangle = \delta_{\alpha\beta} |\nu_\beta\rangle, \quad L_\alpha |\bar{\nu}_\beta\rangle = -\delta_{\alpha\beta} |\bar{\nu}_\beta\rangle \quad (2.7)$$

Diese Flavourzustände sind jedoch keine Eigenzustände zum Massenoperator M , sondern vielmehr Linearkombinationen von nicht-entarteten Masseneigenzuständen $|\nu_i\rangle$ mit festen Massen m_i und $i = 1, 2, 3$:

$$\langle \nu_i | M | \nu_j \rangle = m_i \delta_{ij} \quad \text{und} \quad m_i - m_j \neq 0 \quad \text{für} \quad i \neq j \quad (2.8)$$

Die drei Masseneigenzustände $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) und drei Flavoureigenzustände $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) sind über eine unitäre Transformation gekoppelt, welche durch eine 3×3 Matrix U beschrieben wird:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle, \quad |\nu_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i}^* |\nu_\alpha\rangle \quad (2.9)$$

Eine unitäre 3×3 Matrix besitzt neun Parameter. Es ist jedoch möglich, die relativen Phasen der sechs Neutrinozustände so zu wählen, dass nur vier Parameter unabhängig voneinander sind. Im Drei-Flavour-Formalismus werden diese unterteilt in die drei schwachen Mischungswinkel $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ mit $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ und die CP-verletzende Phase δ mit $-\pi \leq \delta \leq \pi$. Daraus ergeben sich zwei unabhängige Massendifferenzen δm_{ij}^2 . Wenn man

nun für die Mischungswinkel die Euler-Winkel einer Rotation im dreidimensionalen Raum annimmt, kann man U wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & s_2 \\ 0 & -s_2 & c_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_3 & s_3 \\ 0 & -s_3 & c_3 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} c_1 & s_1 c_3 & s_1 s_3 \\ -s_1 c_2 & c_1 c_2 c_3 - s_2 e^{i\delta} & c_1 c_2 s_3 + s_2 c_3 e^{i\delta} \\ s_1 s_2 & -c_1 s_2 c_3 - c_2 s_3 e^{i\delta} & -c_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (2.10) \\
 &\text{mit } s_i = \sin(\theta_i), \quad c_i = \cos(\theta_i)
 \end{aligned}$$

Diese Matrix hat eine Form analog zur CKM-Matrix im Quarksektor. Die Masseneigenzustände $|\nu_i\rangle$ entwickeln sich mit der Zeitabhängigkeit aus Gleichung 2.11 aufgrund der unterschiedlichen Masseneigenwerte mit unterschiedlichen Phasen.

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle \quad \text{mit} \quad E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (2.11)$$

Ein reiner Flavoureigenzustand $|\nu_\alpha\rangle$ bekommt somit eine zeitabhängige Beimischung der anderen Flavours.

$$|\nu(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i\rangle = \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} |\nu_\beta\rangle \quad (2.12)$$

Daher wird in Flugstrecken-Oszillationsexperimenten nach einer gewissen Zeit, bzw. nach der entsprechenden Flugstrecke, mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine andere als die in der Quelle emittierte Neutrinoart detektiert. Bei solaren Oszillationsmessungen werden daher viel weniger Elektronneutrinos nachgewiesen als die laut den solaren Modellen vorhergesagte Anzahl. Die fehlenden Elektronneutrinos haben sich auf dem Weg von der Sonne zur Erde in ν_μ oder ν_τ umgewandelt.

Die zeitabhängige Übergangsamplitude für einen Flavourübergang $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ kann somit angegeben werden mit

$$A(\alpha \rightarrow \beta; t) = \langle \nu_\beta | \nu(t) \rangle = \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} = (UDU^+)_{\alpha\beta} \quad (2.13)$$

$$\text{mit } D_{ij} = \delta_{ij} e^{-iE_i t}$$

Die Übergangswahrscheinlichkeiten $P(\alpha \rightarrow \beta; t)$ ergeben sich durch Bildung des Betragsquadrats aus den Übergangsamplituden

$$\begin{aligned}
 P(\alpha \rightarrow \beta; t) &= |A(\alpha \rightarrow \beta; t)|^2 = \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} \right|^2 \\
 &= \sum_i |U_{\alpha i} U_{\beta i}^*|^2 + 2\text{Re} \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\alpha j}^* U_{\beta i}^* U_{\beta j} e^{-i\Delta_{ij} t}
 \end{aligned} \quad (2.14)$$

mit der Phasendifferenz

$$\Delta_{ij} = (E_i - E_j)t = \frac{\Delta m_{ij}^2}{2} \cdot \frac{L}{E}, \quad \text{wobei } \Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2 \text{ ist.} \quad (2.15)$$

Der zweite Term der Übergangswahrscheinlichkeit in (2.14) beschreibt die eigentlichen, von der Zeit bzw. vom Abstand L abhängigen Neutrinooszillationen, während der erste bei Mittelung über die Zeit oder die Energie E eine mittlere Übergangswahrscheinlichkeit darstellt. Somit können Messungen der mittleren Übergangswahrscheinlichkeit zwar Informationen über die Parameter in der Mischungsmatrix, nicht aber über die Differenzen der Massenquadrate Δm_{ij}^2 liefern. Diese Informationen lassen sich nur aus der direkten, vom Abstand abhängigen Messung der Neutrinooszillationen gewinnen. Für drei Flavourarten von Neutrinos ergeben sich somit drei quadratische Massendifferenzen, die die Bedingung $\Delta m_{32}^2 + \Delta m_{21}^2 + \Delta m_{13}^2 = 0$ erfüllen müssen. Aus atmosphärischen bzw. solaren Oszillationsdaten stammen zwei Werte für verschiedene Massenquadrat-Differenzen, $\Delta m_{atm}^2 \lesssim 3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ [Ash04] sowie $\Delta m_{solar}^2 \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ [Ahm03]. Diese Werte sind von unterschiedlicher Größenordnung, und es ist nicht bekannt, welcher Massenordnung diese Differenzen entsprechen. Es ist sowohl eine „normale“ Hierarchie denkbar, bei der $m_1 < m_2 < m_3$ gilt, aber auch eine „invertierte“ Hierarchie mit $m_3 < m_1 < m_2$, die in Abbildung 2.3 dargestellt sind. Letztendlich wird nur eine genaue Vermessung aller drei Massenquadrat-Differenzen eine Entscheidung zwischen den möglichen Massenordnungen herbeiführen können, da sowohl $0\nu\beta\beta$ -Zerfallsexperimente als auch die Betazerfallsexperimente nur auf die Elektronneutrinomasse sensitiv sind, die eine Mischung der Masseneigenwerte ist.

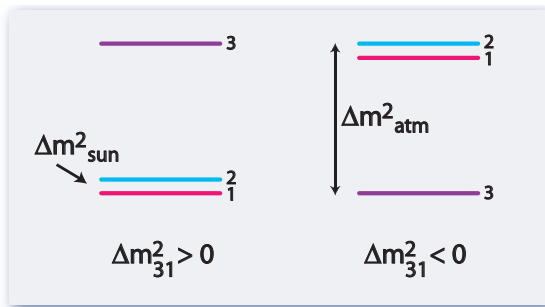


Abbildung 2.3: Hierarchie der Neutrinomassen; „normale“ Hierarchie mit $\Delta m_{31}^2 > 0$ und „invertierte“ Hierarchie mit $\Delta m_{31}^2 < 0$.

2.2 Die Neutrinomasse in der aktuellen Forschung

Seit dem Beweis für Neutrinooszillationen durch die Ergebnisse von SNO und Super-Kamiokande ist die Existenz von massiven Neutrinos und deren Mischung zweifelsfrei belegt. Die Frage nach der absoluten Größe der Neutrinomasse ist ein Thema, das derzeit von großem Interesse ist, da sie Auswirkungen auf weite Teile der Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie haben kann.

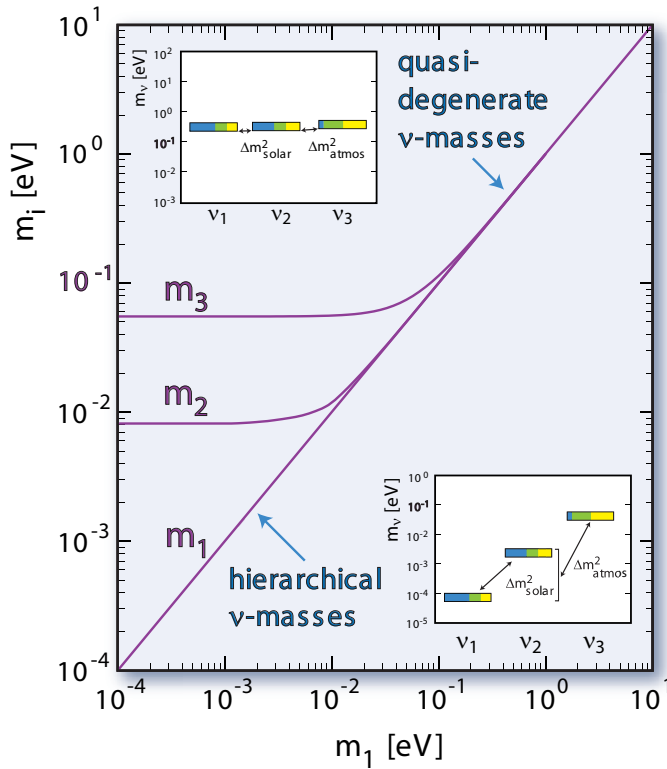


Abbildung 2.4: Mögliche Strukturen für die Neutrino-Masseneigenzustände. Auf der Massenskala über etwa 0,1 eV sind die Masseneigenwerte quasi entartet, ihre Unterschiede sind klein im Vergleich zum absoluten Wert. Darunter spalten sich die Eigenwerte auf und bilden eine hierarchische Struktur, wie sie sich bei den Quarks und geladenen Leptonen widerspiegelt. Die farbigen Kästchen geben den jeweiligen Flavouragehalt der drei Massenzustände wieder: blau ν_e , grün ν_μ und gelb ν_τ , bei Annahme von $\Delta m_{21}^2 = \Delta m_{solar}^2$ und $\Delta m_{32}^2 = \Delta m_{atm}^2$.

Teilchenphysik

Das Standardmodell bietet eine sehr präzise Beschreibung der bisherigen Teilchenphysik, aber es erklärt nicht die Existenz von Neutrinomassen und deren Mischung. Die aktuellen Forschungsergebnisse im Bereich der Neutrinooszillationen geben somit Raum für Physik jenseits des Standardmodells. Viele der neuen Theorien basieren auf dem Konzept der Supersymmetrie. Einige arbeiten mit dem sogenannten *Seesaw-Mechanismus*, um den Neutrinos Masse zu geben, aber auch andere mögliche Ursprünge der Neutrinomasse werden erwogen.

Die Theorien, die sich mit der Beschreibung der Phänomene jenseits des Standardmodells beschäftigen, lassen sich grob in zwei verschiedene Gruppen teilen. Die einen führen auf eine hierarchische Struktur der Neutrinomassen in Anlehnung an die Quarkmassen und die Massen der geladenen Leptonen $m_1 \ll m_2 \ll m_3$, während andere Theorien eine degenerierte Massenstruktur vorsehen, bei der $m_1 \approx m_2 \approx m_3$ ist. Abbildung 2.4 zeigt die beiden möglichen Strukturen im Falle einer Normalordnung $m_1 < m_2 < m_3$.

Oszillationsexperimente sind nur sensitiv auf die Differenzen der Massenquadrate und können damit aber eine Untergrenze für die absolute Neutrinomassenskala setzen, denn für jede Differenz von Massenquadraten Δm_{ij}^2 muss wenigstens eine der beiden Neutrinomassen folgende Ungleichung erfüllen:

$$m_i \text{ oder } m_j \geq \sqrt{|\Delta m_{ij}^2|} \quad (2.16)$$

Super-Kamiokande gibt derzeit für m_3 eine Untergrenze von etwa (0,04 - 0,07) eV an [Fuk98, Fuk00]. Die tatsächlichen Werte im Falle einer degenerierten Massenstruktur können jedoch auch 1 - 1,5 Größenordnungen darüber liegen. Um sicher zwischen hierarchischen oder degenerierten Neutrinomassen unterscheiden zu können, benötigt man somit ein Experiment mit einer Sensitivität auf die absolute Neutrinomassenskala im Sub-eV-Bereich. Dieses könnte auch einen Beitrag liefern für die Fragestellung, ob es sich bei Neutrinos um Majorana- oder Dirac-Teilchen handelt, zu der es verschiedene theoretische Ansätze gibt.

Kosmologie und Astrophysik

Die Neutrinomassen und deren Mischung spielen in vielen Szenarien der Kosmologie und Astrophysik eine bedeutende Rolle, beispielsweise bei der Entstehung der leichten Kerne im frühen Universum, der Bildung von Strukturen auf großen Skalen bis hin zur Sternentwicklung und Supernova-Explosionen. Besonderes Interesse gilt dabei den *relic neutrinos*, die ähnlich der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung beim Urknall erzeugt wurden und auch heute noch existieren. Aus der Urknalltheorie geht hervor, dass die Zahl der *relic neutrinos* mit etwa 336 cm^{-3} sehr hoch ist, ihr Verhältnis zu der Zahl der Baryo-

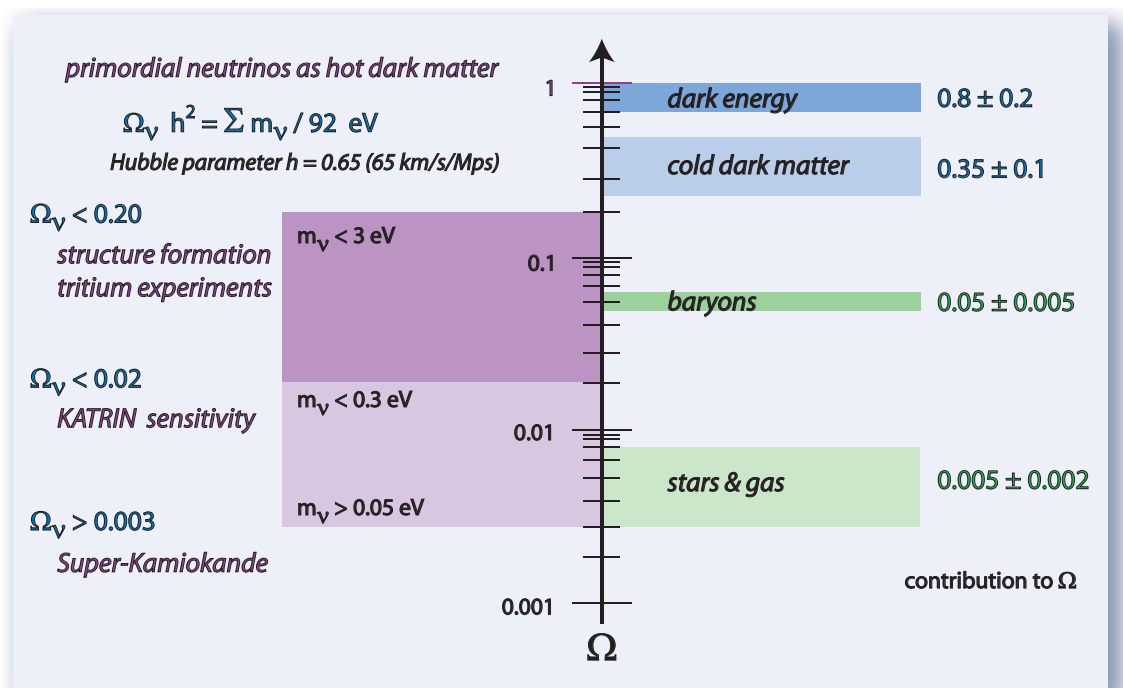


Abbildung 2.5: Beiträge der verschiedenen Materieanteile zur Gesamtenergiedichte im Universum (rechts), sowie der Anteil der Neutrinomassendichte zur HDM (links). Das KATRIN-Experiment wird einen großen Teil des noch offenen Bereichs des Neutrinomassenbeitrags untersuchen und kann damit zur Entscheidung beitragen, ob Neutrinos eine signifikante Rolle bei der Strukturbildung auf großen Skalen spielen.

nen wird zu $N_\nu/N_b \approx 10^9$ berechnet. Daher kann selbst äußerst kleinen Neutrinomassen eine signifikante Bedeutung zukommen und es ist möglich, dass sie einen nennenswerten Anteil zur dunklen Materie im Universum beitragen. Dabei unterscheidet man zwischen Hot Dark Matter (HDM), zu der auch die Neutrinos gehören und der Cold Dark Matter (CDM), für die mögliche Kandidaten supersymmetrische Teilchen sind. Kosmologische Modelle und Theorien zur Strukturbildung hängen vom Verhältnis zwischen HDM und CDM ab. Ein absoluter Wert für die Neutrinomasse kann somit das Verständnis der Vorgänge bei der Strukturbildung im frühen Universum deutlich verbessern. Abbildung 2.5 stellt rechts die verschiedenen Beiträge der einzelnen Materiearten zur Energiedichte im Universum Ω dar, sowie links den Anteil der Neutrinomassendichte Ω_ν an der HDM, der über mehrere Größenordnungen im Intervall $0,003 < \Omega_\nu < 0,25$ variieren kann. Die Ergebnisse aus Oszillationsmessungen von Super-Kamiokande liefern dabei eine untere Schranke für die Neutrinomasse [Fuk98, Fuk00]. Tritium-Betazerfall-Experimente [Yao00] sowie unabhängig davon Messungen der *large-scale-structure* (LSS) im Universum [Teg01] geben Anhaltspunkte für die obere Grenze. Das KATRIN-Experiment kann die bisherige Obergrenze um eine Größenordnung senken oder eventuell sogar einen Wert für die Neutrinomasse auf Sub-eV-Ebene modellunabhängig festlegen. Der zugehörige Wert für Ω_ν könnte dann als fixer Parameter in die kosmologischen Theorien einfließen. Dies wäre von großer Bedeutung für die Datenanalyse von Hochpräzisionsexperimenten, die den CMBR (Cosmic Microwave Background Radiation) vermessen, wie z.B. der WMAP-Satellit oder das zukünftige PLANCK-Experiment.

2.3 Methoden zur Bestimmung der Neutrinomasse

Mit der Entdeckung von Neutrinooszillationen ist bewiesen, dass Neutrinos eine Masse größer als Null besitzen und dass somit ihre derzeitige Beschreibung im Standardmodell der Teilchenphysik unvollständig ist. Oszillationsexperimente wie z.B. Super-Kamiokande, SNO oder OPERA sind nur sensitiv auf die Differenzen der Neutrinomassenquadrate $\Delta m_{ij}^2 = |m^2(\nu_i) - m^2(\nu_j)|$, jedoch nicht auf die absolute Neutrinomassenskala selbst. Dennoch sind diese Informationen sehr hilfreich: Wenn eine der Neutrinomassen durch ein anderes Experiment absolut bestimmt wird, kann damit das gesamte Neutrinomassenspektrum erschlossen werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, aus Beobachtungen oder Experimenten Rückschlüsse auf die Neutrinomasse zu ziehen.

2.3.1 Bestimmung der Neutrinomasse aus Supernovaexplosionen

Ein Hinweis auf die Existenz von massebehafteten Neutrinos könnte sich aus kosmischen Beobachtungen von Supernovae ergeben. Falls Neutrinos eine Masse besitzen, resultieren für verschiedene Emissionsenergien der Neutrinos bei einer Supernovaexplosion unterschiedliche Laufzeiten zur Erde. Aufgrund der großen kosmischen Entfernungen könnte dieser Zeitunterschied auf der Erde von großen Neutrino-Detektoren wie z.B. Super-Kamiokande oder ICECUBE festgestellt werden. Bisher wurden jedoch nur 19 Neutri-

nos nachgewiesen, die sicher aus einer Supernovaexplosion stammen, und zwar 1987 im Kamiokande-Detektor in Japan [Hir88], sowie im IMB-Detektor in den USA [Vel04]. Die Neutrinos wurden in der Supernovaexplosion SN1987A in der großen Magellanschen Wolke emittiert. Die Beobachtungen der Ankunftszeiten der Neutrinos sind verträglich mit $m(\nu_e) = 0 \text{ eV}$, lassen es aber zu, eine Obergrenze für die Neutrinomasse von $m(\nu_e) < 5,7 \text{ eV}$ abzuleiten [Lor02]. Zur Untersuchung geeignete Supernovae sind sehr seltene Ereignisse und zudem noch nicht gut genug verstanden, um aufgrund der bisherigen Messungen weitergehende Ergebnisse zu liefern.

2.3.2 Neutrinoloser Doppelbetazerfall

Auch die aktuellen Forschungen bezüglich des neutrinolosen Doppelbetazerfalls könnten Aufschluss über die Existenz einer von Null verschiedenen Neutrinomasse liefern. Mit einer Evidenz für einen solchen Prozess wäre nach theoretischen Berechnungen ein eindeutiger Beweis für eine nichtverschwindende Neutrinomasse erbracht. Der $0\nu\beta\beta$ -Zerfall ist nur möglich, wenn das Neutrino Majoranacharakter besitzt. Nach dem Schechter-Valle-Theorem besitzen Neutrinos in diesem Fall eine von Null verschiedene Masse, unabhängig davon, wie der $0\nu\beta\beta$ -Prozess abläuft, denkbar wären z.B. auch rechtshändige Ströme oder andere Reaktionsmechanismen [SVa00].

Falls also Neutrinos und Antineutrinos dieselben Teilchen sind, kann der Doppelbetazerfall ohne Emission von Neutrinos ablaufen. Dabei wird ein rechtshändig emittiertes

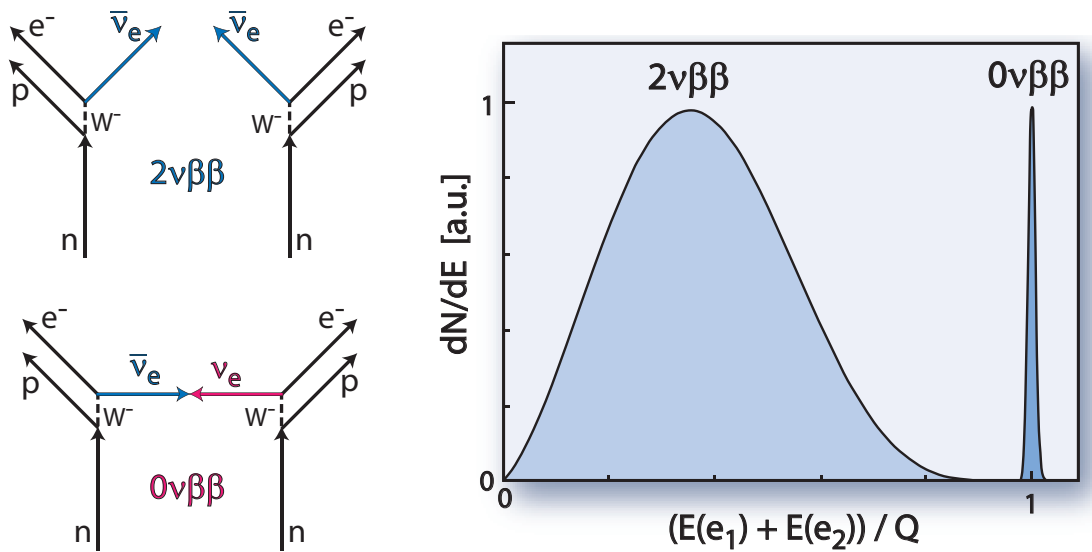


Abbildung 2.6: Darstellung des neutrinolosen Doppelbetazerfalls: Links: Feynman-Graphen des normalen sowie im Vergleich dazu des neutrinolosen Doppelbetazerfalls; rechts: entsprechende erwartete Energieverteilung mit $2\nu\beta\beta$ - und $0\nu\beta\beta$ -Peak.

Antineutrino als linkshändiges Neutrino reabsorbiert. Ein solcher Prozess ist nur unter einer Helizitätsumkehr möglich, was auf eine von Null verschiedene Masse des Neutrinos schließen lässt. Die Grafik in Abbildung 2.6 soll dies veranschaulichen.

Bei dem Prozess entstehen lediglich zwei Elektronen, welche die gesamte Energie des Zerfalls im Detektor deponieren. Werden beide Elektronen nachgewiesen, erzeugt der Zerfall somit eine scharfe Linie im Energiespektrum. Aus der Halbwertszeit des $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls kann man unter Vernachlässigung eventueller rechtshändiger Beimischungen die sogenannte effektive Neutrinomasse m_{ee} berechnen [Mut88]:

$$T_{1/2}^{0\nu} = \left[F^{0\nu} \cdot (M_{GT}^{0\nu} - M_F^{0\nu})^2 \cdot \left(\frac{m_{ee}}{m_e} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (2.17)$$

wobei $F^{0\nu}$ das Phasenraumintegral, $M_{GT}^{0\nu}$ das Gamow-Teller-Matrixelement und $M_F^{0\nu}$ das Fermi-Matrixelement des zugehörigen Übergangs ist. Die effektive Majorana-Neutrinomasse ist dabei eine Mischung der Neutrinomassen-Eigenwerte mit den Elementen U_{ei} der Mischungsmatrix:

$$m_{ee} = \sum_i |U_{ei}^2 \cdot m(\nu_i)| \quad (2.18)$$

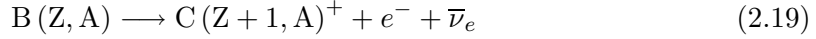
Der deutsche Teil der Heidelberg-Moskau-Kollaboration um die Arbeitsgruppe von Klapdor-Kleingrothaus hat eine, allerdings umstrittene, Evidenz für diesen Zerfall veröffentlicht. Das Experiment untersuchte den Doppelbetazerfall von ${}^{76}\text{Ge}$, wobei dieses Material zugleich als Detektor fungierte („active source“ Setup) und so eine hohe Nachweiswahrscheinlichkeit erreicht werden konnte. Aufgrund von Problemen mit dem experimentellen Untergrund der Messung ist dieses Resultat jedoch nicht allgemein anerkannt. Als Ergebnis wird ein Wert von $m_{ee} = (0,2 - 0,6)$ eV (99,73% C. L.) angegeben [Kla04].

Messungen der Neutrinomasse über den neutrinolosen Doppelbetazerfall sind zudem modellabhängig. Die zur Berechnung erforderlichen Übergangsmatrixelemente konnten aufgrund theoretischer Unsicherheiten bislang nur bis auf einen Faktor 2 bestimmt werden, und die Elemente der Mischungsmatrix U_{ei} sind noch relativ unbekannt. Derzeit sind einige Doppelbetazerfallsexperimente der nächsten Generation mit höherer Sensitivität wie GERDA und CUORE im Aufbau. Sie werden bald weitere Daten liefern, die den von Klapdor-Kleingrothaus et al. veröffentlichten Wert bestätigen oder widerlegen können. Auch das KATRIN-Experiment wird mit einer Sensitivität von 0,2 eV in diesen Massenbereich vorstoßen, hat aber, im Gegensatz zu Doppelbetazerfall-Experimenten, nicht mit Modellunsicherheiten zu kämpfen, da es die Neutrinomasse rein kinematisch bestimmt.

2.3.3 Betazerfall-Experimente zur direkten Bestimmung der Neutrinomasse

Eine modellunabhängige Methode zur Bestimmung der absoluten Neutrinomassenskala ist die Untersuchung von β -Zerfallsspektren in der Umgebung ihres Endpunkts. Die Neutrinomasse wird dabei kinematisch nach der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ bestimmt.

Beim β^- -Zerfall eines Atomkerns $B(Z, A)$ wandelt sich ein im Kern gebundenes Neutron unter Emission eines Elektrons sowie eines Antineutrinos in ein Proton um:



Dabei bleibt die Massenzahl A unverändert, während sich die Ordnungszahl Z beim Tochterkern C um 1 erhöht. Die gesamte beim Zerfall freiwerdende Energie wird auf das emittierte Elektron und das Neutrino aufgeteilt, da der Tochterkern aufgrund seiner hohen Masse eine vernachlässigbar geringe kinetische Energie erhält.

Aus der Form des β^- -Zerfallsspektrums lassen sich Rückschlüsse über die Energie des Neutrinos und seine Masse ziehen. Im Fall von masselosen Neutrinos würde man den Endpunkt des entstehenden β^- -Spektrums exakt bei der in der Reaktion freiwerdenden Gesamtenergie erwarten. Ist die Masse des Neutrinos $m(\nu_e)$ jedoch von Null verschieden, kann das emittierte Elektron höchstens eine um den Betrag der Ruheenergie des Neutrinos verringerte Energie erhalten. Der Endpunkt im Spektrum verschiebt sich dadurch um $m(\nu_e)c^2$ nach links, dieser Wert könnte im Prinzip aus dem Spektrum entnommen werden. Abbildung 2.7 zeigt beispielhaft die Auswirkungen einer Neutrinomasse von 1 eV auf die Endregion des Tritium- β^- -Spektrums.

Bei dieser einfachen Methode zur Bestimmung der Neutrinomasse tritt jedoch ein Problem auf. Die Zerfallsenergie E des vermessenen β^- -Übergangs muss dazu sehr exakt bekannt sein. Außerdem verschwindet der Energiebereich, in dem die Zählrate theoretisch bis auf

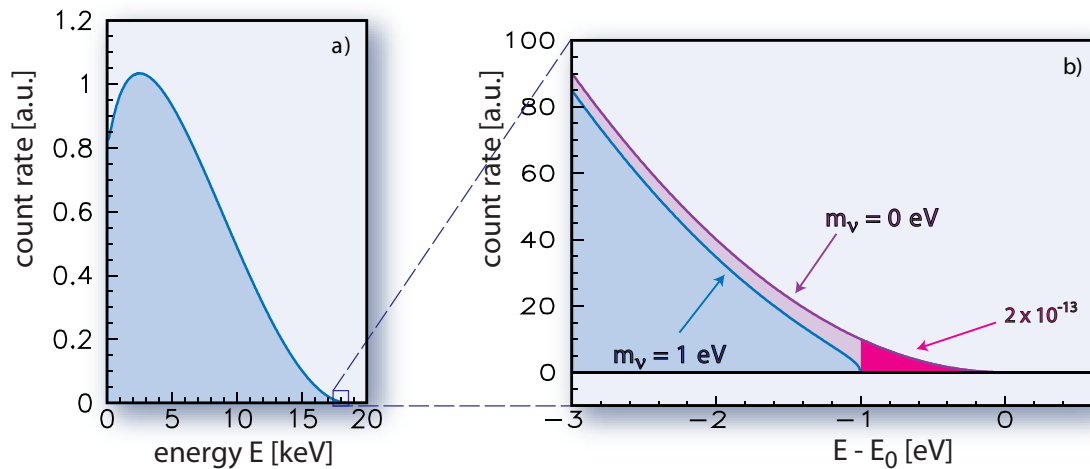


Abbildung 2.7: Elektronenergie-Spektrum des Tritiumzerfalls: a) vollständiges Spektrum und b) kleiner Ausschnitt aus der Region um die Endpunktenergie $E_0 = 18,6$ keV. Das Spektrum zeigt je eine Kurve für masselose Neutrinos $m(\nu_e) = 0$ eV sowie zum Vergleich für eine Neutrinomasse von $m(\nu_e) = 1$ eV. Unterschiede im Energiespektrum aufgrund einer von Null verschiedenen Neutrinomasse treten über den gesamten Energiebereich auf, werden jedoch besonders deutlich sichtbar in der Endpunktregion.

Null abfallen sollte, im realen Experiment im Untergrund. Um diesem Problem zu begegnen, vermisst man einen größeren Teil des hochenergetischen Spektrums und führt daran einen Fit durch, der unter anderem $m(\nu_e)$ sowie die Position des Endpunktes als freien Parameter enthält.

Um diesen Zusammenhang zu verstehen, betrachtet man die Form des β^- -Spektrums genauer. Darin wird die Zahl der emittierten Elektronen in einem Energieintervall dE gegen ihre kinetische Energie E aufgetragen. Die Zerfallsrate berechnet sich mit Hilfe von Fermis Goldener Regel zu

$$\frac{d^2 N}{dt dE} = \frac{2\pi}{\hbar} \cdot |M^2| \cdot \rho(E). \quad (2.20)$$

Dabei ist M das Übergangsmatrixelement und $\rho(E)$ die Phasenraumdichte des Endzustands. Ist das Matrixelement unabhängig von der Elektronenergie E , lässt sich die Form des β^- -Spektrums schreiben als:

$$\frac{d^2 N}{dt dE} = A(E) \sqrt{(E_0 - E) - m^2(\nu_e) c^4} \cdot \Theta(E_0 - E - m(\nu_e) c^2) \quad (2.21)$$

mit

$$A(E) = \frac{G_F^2 \cdot \cos^2 \Theta_C}{2\pi^3 \hbar^7} \cdot |M_{had}^2| \cdot F(E, Z + 1) \cdot p_e \cdot (E + m_e c^2) \cdot (E_0 - E) \quad (2.22)$$

Dabei ist G_F die Fermi-Kopplungskonstante, Θ_C der Cabibbo-Winkel, M_{had} das Kernmatrixelement des Übergangs und F die Fermifunktion, welche die elektromagnetische Wechselwirkung des emittierten Elektrons mit dem aus dem Zerfall entstandenen Tochterkern beschreibt. Durch die Stufenfunktion $\Theta(E_0 - E - m(\nu_e) c^2)$ wird die Energieerhaltung sichergestellt. Die für das Neutrino verfügbare Energie muss größer oder gleich seiner Ruhemasse sein, damit es erzeugt werden kann.

Da bei einem erlaubten oder übererlaubten Übergang das Kernmatrixelement M_{had} unabhängig von der Elektronenergie und von $m(\nu_e)$ ist [Alt03], findet sich die einzige Abhängigkeit der Form des Energiespektrums von der Neutrinomasse im Phasenraumfaktor

$$p_e \cdot (E + m_e c^2) \cdot (E_0 - E) \cdot \sqrt{(E_0 - E)^2 - m^2(\nu_e) c^4}. \quad (2.23)$$

und in der Fermifunktion F .

Durch eine genaue Vermessung der Form eines β^- -Zerfallspektrums lässt sich somit Aufschluss über die absolute „Masse des Elektronneutrinos“ gewinnen. Diese ist jedoch eine Mischung aus den drei Masseneigenzuständen m_i ($i=1, 2, 3$)

$$m^2(\nu_e) = \sum_i |U_{ei}|^2 m^2(\nu_i). \quad (2.24)$$

Theoretisch ist es möglich, die Neutrino-Masseneigenzustände aus dem Energiespektrum des Elektrons abzuleiten. An den Stellen, an denen ein weiterer Massenzustand m_i zugänglich wird, fällt die Elektronenzählrate leicht ab. Dies ist jedoch in der Praxis nicht möglich, da die Auflösung der Spektrometer zur Vermessung der Elektronenergie nicht ausreicht, um die geringen Massendifferenzen der Masseneigenzustände abzubilden.

Um die Veränderungen der Form des β -Spektrums möglichst genau zu vermessen, bieten sich als Quellen besonders Kerne an, bei deren Zerfall ein hoher relativer Anteil der Elektronen mit Energien in der wichtigen Endpunktregion nahe E_0 emittiert werden. Dies ist gerade dann der Fall, wenn das erlaubte Energiespektrum für die emittierten Elektronen schmal ist. Daher eignen sich für die Neutrinomassenbestimmung mittels β^- -Zerfallsanalyse besonders Rhenium ($E_0 = 2,6 \text{ keV}$) und Tritium ($E_0 = 18,6 \text{ keV}$). Der Zerfall von Tritium ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

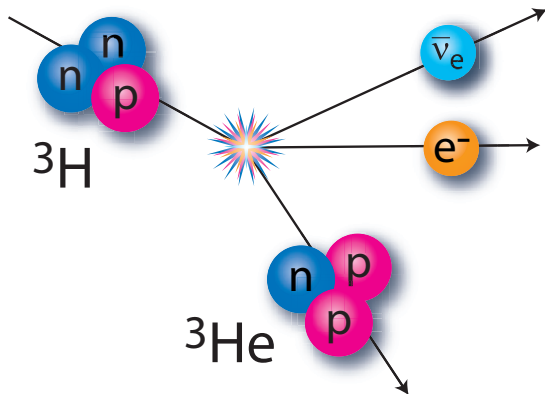


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Tritiumzerfalls mit ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}^+ + e^- + \bar{\nu}_e$.

Obwohl Tritium im Vergleich zu Rhenium eine sieben mal höhere Endpunktenergie besitzt, hat es einige entscheidende Vorteile:

- Die Halbwertszeit des übererlaubten Tritiumzerfalls beträgt nur 12,3 Jahre, wohingegen die des ${}^{187}\text{Re}$ -Zerfalls $4,25 \cdot 10^{10}$ Jahre beträgt. Die geringe Halbwertszeit von Tritium führt zu einer hohen Zerfallsaktivität schon bei geringen Tritiumdichten in der Quelle.
- Das Übergangsmatrixelement ist bei dem übererlaubten Tritiumzerfall unabhängig von der Elektronenergie. Das Spektrum wird allein über den Phasenraumfaktor bestimmt.
- Die einfache Elektronenkonfiguration von Tritium erleichtert und minimiert die nötigen Korrekturen aufgrund der elektromagnetischen Wechselwirkungen der emittierten Elektronen mit der Hülle von Mutter- und Tochterkern.

Die Vorteile der niedrigeren Endpunktenergie von ${}^{187}\text{Re}$ können nur durch einen experimentellen Aufbau ausgeschöpft werden, bei dem die Quelle zugleich als Detektormaterial fungiert, wie es zum Beispiel bei Kryo-Bolometern realisiert ist.

Daher verwenden die meisten β^- -Zerfallsexperimente Tritium als Quelle in Kombination mit einem hochauflösenden Spektrometer. Trotz der geringen Endpunktenergie von Tritium ist die Anzahl der in den relevanten Energiebereich emittierten Elektronen äußerst klein. Auf die pinkfarbene Fläche in Abbildung 2.7 entfallen z.B. nur $2 \cdot 10^{-13}$ aller Zerfälle.

Die Tritium- β^- -Experimente, die bislang die höchste Sensitivität auf die Neutrinomasse erreicht haben, sind die Experimente aus Mainz und Troitsk. Beide verwenden Spektrometer vom Typ des MAC-E-Filters. Diese Abkürzung steht für Magnetic Adiabatic Collimation followed by an Electrostatic Filter. Dieser Spektrometertyp ermöglicht Energiemessungen von geladenen Teilchen bei sehr geringem Untergrund und hoher Luminosität und bietet gleichzeitig eine sehr hohe Energieauflösung. Eine schematische Darstellung eines solchen Spektrometers ist in Abbildung 2.9 gezeigt.

Durch supraleitende Magnete wird ein Magnetfeld über die gesamte Länge des Spektrometers erzeugt. Elektronen werden von der Quelle im linken Solenoiden emittiert und magnetisch in einer Zyklotronbewegung entlang der Magnetfeldlinien durch das Spektrometer

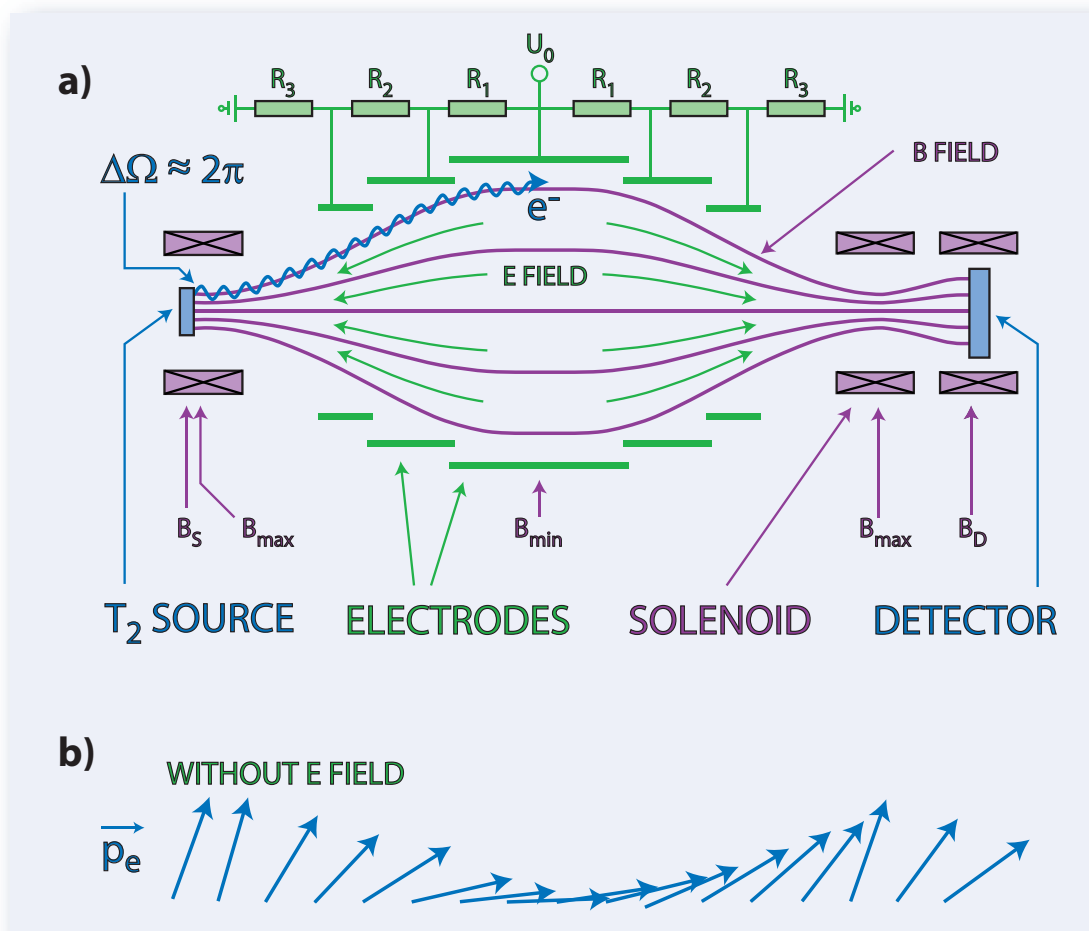


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung eines Spektrometers vom Typ MAC-E-Filter: a) Experimenteller Aufbau b) Transformation des Impulses aufgrund der magnetischen Gradientenkräfte.

geführt. Die Stärke des Magnetfelds B verringert sich von den Positionen der Solenoiden zur Mitte des Spektrometers hin um mehrere Größenordnungen. Dadurch bedingt transformiert die magnetische Gradientenkraft einen großen Teil der Zyklotronenergie E_{\perp} in Longitudinalenergie E_{\parallel} . Veranschaulicht wird dies in Abbildung 2.9 b). Der Impulsvektor der emittierten Elektronen verliert zur Analysierebene des Spektrometers hin seine Transversalkomponente, die sich in die Longitudinalbewegung umwandelt. Diese Transformation der Elektronenenergie im MAC-E Filter ist adiabatisch, da sich das Magnetfeld auf dem Weg der Elektronen stetig und nur langsam verändert. In diesem Fall bleibt $\gamma \cdot \mu_e = \text{const}$, wobei γ der relativistische Lorentz-Faktor und μ_e das magnetische Bahndrehmoment des Elektrons ist. Für den Tritiumzerfall gilt $\gamma \approx 1$ und somit kann nicht-relativistisch genähert werden:

$$\mu_e = \frac{E_{\perp}}{B} = \text{const}. \quad (2.25)$$

Aus den in der Quelle isotrop emittierten Elektronen wird somit ein magnetisch geführter Elektronenstrom, der in der Mitte des Spektrometers nahezu parallel zu den Magnetfeldlinien und damit auch senkrecht zur Analysierebene ist. Eine zylindrische Elektrode baut ein elektrostatisches Gegenpotential auf, das symmetrisch zur Mittelebene des Spektrometers verläuft. Nur ein Teil der Elektronen besitzt eine ausreichende Energie, um die elektrostatische Barriere zu überwinden. Sie werden im hinteren Teil des Spektrometers wieder beschleunigt und im Detektor nachgewiesen. Ein MAC-E-Filter agiert somit als integrierender Hochpass für Elektronen. Seine relative Auflösung $\Delta E/E$ wird bestimmt durch das Verhältnis der Beträge des Führungsmagnetfelds in der Analysierebene (B_{min}) und an der Stelle des größten Magnetfelds (B_{max}) zwischen Spektrometer und Quelle:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{min}}{B_{max}}. \quad (2.26)$$

Um den Endpunktbereich der Elektronen des Tritiumzerfalls zu vermessen, wird das Analysierpotential in kleinen diskreten Schritten im Messintervall variiert. Durch Aufsummieren aller Elektronen, die in der vorgegebenen Zeit den Detektor erreichen, erhält man ein integriertes Spektrum. Um ausreichend kleine statistische Fehler zu erreichen, ist bei gegebener Quelluminosität eine lange Messzeit erforderlich. Für das KATRIN-Experiment beträgt diese etwa 1000 Tage, also ca. 3 Jahre.

Ein Nachteil von Spektrometern vom Typ des MAC-E-Filters ist ihre beachtliche Größe. Diese wird vor allem dadurch bedingt, dass die Auflösung vom Verhältnis der Maximal- und Minimalwerte des B-Felds abhängt. Um ein großes Verhältnis $\frac{B_{max}}{B_{min}}$ zu erlangen, muss das Magnetfeld in der Analysierebene klein sein. Damit die Energietransformation adiabatisch bleibt, darf das Magnetfeld zudem gegenüber dem Feld innerhalb der Solenoiden nur langsam variieren, und der magnetische Gesamtfluss muss erhalten bleiben, wodurch der Elektronenstrom in der Analysierebene stark auffächert. Dies kann bei hohen gewünschten Auflösungen sehr schnell sowohl zu einer enormen Länge als auch zu einem großen Durchmesser des Spektrometers führen. Somit bildet die Größe der Experimente ein praktisches Limit für ihre erreichbare Auflösung. Auch das geplante KATRIN-Experiment (Karlsruher

(Tritium Neutrino-Experiment) wird diesen Spektrometertyp verwenden. Um eine Sensitivität im Sub-eV-Bereich auf die Neutrinomasse zu erreichen wird das Experiment die Grenzen des zurzeit technisch Möglichen nahezu vollständig ausreizen.

Durch die Verwendung des MAC-E-Filters konnten die Experimente in Troitsk und Mainz die Neutrinomasse mit hoher Auflösung untersuchen. Das Troitsk-Experiment gibt für die Elektronneutrinomasse einen Wert von $m_\nu \leq 2,05 \text{ eV}$ (95% C.L.) an [Lob03]. Es beobachtete jedoch eine bislang ungeklärte Anomalie im Energiespektrum, die das Mainzer Experiment nicht bestätigen konnte. Daher wurde die zurzeit niedrigste Obergrenze mit $m_\nu \leq 2,3 \text{ eV}$ (95% C.L.), die aus einer direkten, modellunabhängigen Messung der Neutrinomasse hervorgeht, von der Mainzer Kollaboration veröffentlicht [Kra05].

Das Nachfolge-Experiment KATRIN wird eine Elektronneutrinomasse bis hinunter zu $m_\nu = 0,2 \text{ eV}$ bestätigen oder ausschließen können. Dies stellt eine Verbesserung gegenüber den Vorgängerexperimenten in Mainz und Troitsk um einen Faktor 10 dar. Diese Sensitivitätsverbesserung wird hauptsächlich bedingt durch die Vergrößerung des MAC-E-Spektrometers, sowie einer deutlichen Reduzierung des Untergrunds durch den Einsatz einer abschirmenden Drahtelektrode.

3 Das KATRIN-Experiment

Das KATRIN-Experiment wird am Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) aufgebaut, da dort ideale Voraussetzungen vorzufinden sind. Das FZK verfügt über ein eigenes Tritiumlabor, das in der Lage ist, die vom Experiment benötigte Menge Tritium zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich bietet das FZK die nötige technische Infrastruktur und Organisation, um ein großes Projekt wie das KATRIN-Experiment durchzuführen. Dazu wurde für das KATRIN-Experiment neben dem Tritiumlabor eine neue Halle gebaut, die den fast 70 Meter langen Aufbau von Quelle, Strahlführung und Hauptspektrometer beherbergen wird.

3.1 Überblick über den Gesamtaufbau des KATRIN-Experiments

Der Gesamtaufbau des KATRIN-Experiments ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Er besteht aus verschiedenen Einzelkomponenten wie der Quelle, der differentiellen Pump- und Transportstrecke, dem Vor- und Hauptspektrometer sowie dem Detektor. Im Folgenden sollen diese Komponenten kurz vorgestellt und ihre Funktionen und Besonderheiten erläutert werden. Auf das Hauptspektrometer und die zugehörige Drahtelektrode wird in Kapitel 3.2 ausführlich eingegangen.

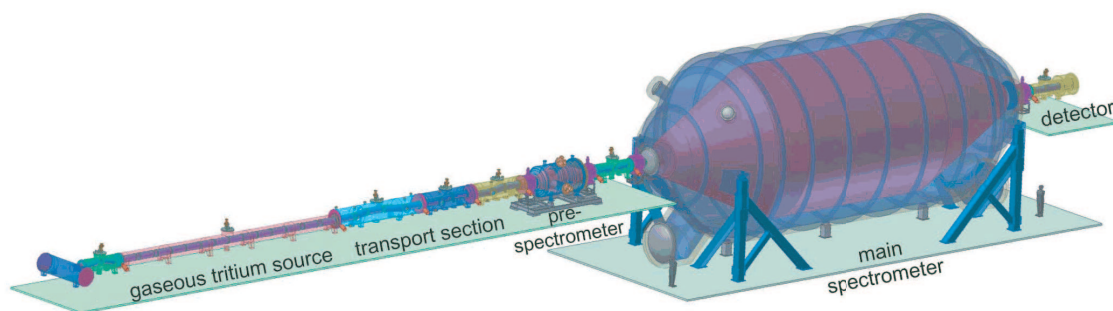


Abbildung 3.1: Überblick über den Gesamtaufbau des KATRIN-Experiments; links die gasförmige Tritiumquelle, daran anschließend die Transportsektion mit differentieller Pumpstrecke, Vor- und Hauptspektrometer und am Ende der Detektor. Der gesamte Aufbau ist etwa 70 m lang.

Quelle und differenzielle Pumpstrecke

Das KATRIN-Experiment verwendet eine fensterlose gasförmige Tritiumquelle (Windowless Gaseous Tritium Source, WGTS). Eine Quelle dieser Art wurde bereits im Troitsk-Experiment eingesetzt. Diese Form der Quelle bietet zudem eine besonders hohe Intensität und Isotopenreinheit. Im Gegensatz zu einer aufgefrorenen Filmquelle treten keine störenden Festkörpereffekte auf, und es wird eine sehr gute Homogenität über die gesamte aktive Fläche erreicht. Sie besteht aus einem 10 m langen zylindrischen Rohr mit einem Durchmesser von 90 mm, das bis auf 27 K gekühlt wird. Das Rohr befindet sich in einem homogenen Magnetfeld von 3,6 T. In der Mitte wird gasförmiges Tritium eingeleitet, das zu beiden Seiten diffundiert, an die jeweils eine differentielle Pumpstrecke angeschlossen ist. Das abgepumpte Tritium wird gereinigt und in einem geschlossenen Kreislauf gehalten, um mit einer handhabbaren Gesamtmenge von Tritium eine hohe Quellintensität von 10^{11} emittierten Elektronen in der Sekunde gewährleisten zu können. Die beiden Spektrometer dürfen nicht mit radioaktivem Tritium kontaminiert werden, da sonst die Untergrundrate im Experiment stark erhöht würde. Zusätzlich zu den Turbomolekularpumpen sorgen Kryofallen und die spezielle Strahlführung in der differentiellen Pumpstrecke dafür, dass die Moleküle am weiteren Vordringen in Richtung der Spektrometer gehindert werden.

Das Vorspektrometer

Zusammen mit dem Hauptspektrometer bildet das Vorspektrometer ein Tandem-System. Es erfüllt dabei zwei wichtige Aufgaben. Zum einen filtert es den Elektronenstrahl nach Energien grob vor, so dass nur Elektronen aus der relevanten Energieregion in der Nähe des Endpunkts in das Hauptspektrometer gelangen. Dieses führt dann die präzise Energieanalyse durch. Das Vorspektrometer verringert den Elektronenfluss um etwa einen Faktor 10^7 . Dies dient vor allem der Untergrundreduktion im Hauptspektrometer, denn beim Durchqueren des Spektrometers können die Elektronen mit Restgasatomen kollidieren und

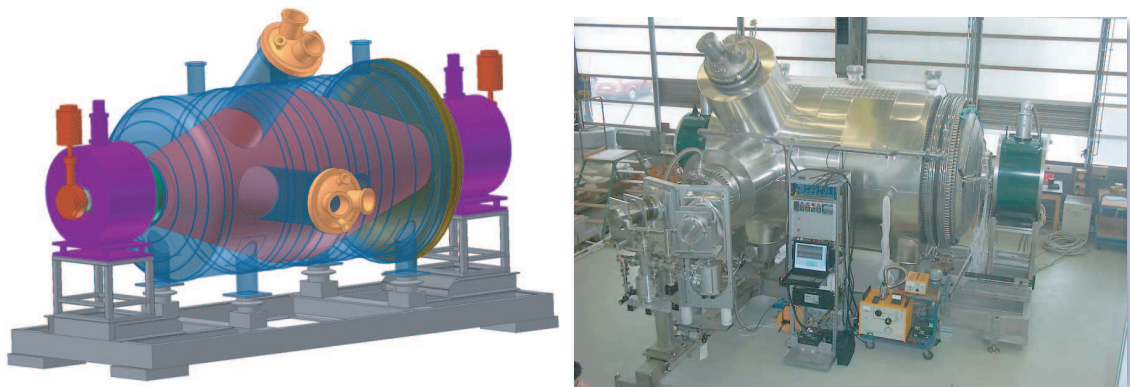


Abbildung 3.2: Bilder des Vorspektrometers; links eine schematische Zeichnung, rechts ein Foto im Zustand vor der Installation des Heizsystems und der Ummantelung mit Isolation.

diese ionisieren. Die herausgeschlagenen Elektronen tragen dann zu einem unerwünschten Untergrund bei.

Auch dient das Vorspektrometer als weitere Transport- bzw. Pumpstrecke, die das Hauptspektrometer zusätzlich vor dem Eindringen von Tritium schützt. Eine schematische Zeichnung des Vorspektrometers sowie ein Foto der derzeitigen Installation finden sich in Abbildung 3.2.

Das Vorspektrometer ist ebenso wie das Hauptspektrometer nach dem MAC-E-Filter Prinzip aufgebaut, besitzt jedoch eine sehr viel geringere Größe. Mit 3,5 m Länge und 1,7 m Durchmesser erreicht es eine Energieauflösung von nur etwa 75 eV. Diese ist jedoch ausreichend, um die Energie-Vorfilterung durchzuführen.

Als kleinere Version des Hauptspektrometers kommt dem Vorspektrometer auch die Aufgabe eines Prototypen bzw. Testaufbaus zu.

Hochspannungsüberwachung und Detektor

Die Energieauflösung des Hauptspektrometers ist abhängig von der Genauigkeit des Retardierungspotentials und damit von der Qualität des Hochspannungssystems. Daher wurde eigens ein Hochspannungsteiler aufgebaut, der in der Stabilität des Teilverhältnisses zu den besten der Welt in seinem Spannungsbereich gehört. Der auftretende Drift liegt unter 2 ppm in 60 Tagen. Dies ist erforderlich, um das Retardierungspotential über die gesamte Messzeit von 1000 Tagen zu überwachen.

Zusätzlich werden auftretende Spannungsschwankungen mittels eines Monitorspektrometers überwacht und über die gesamte Messzeit aufgezeichnet. Dazu wird das Mainzer Spektrometer umgerüstet, in Karlsruhe aufgebaut und mit derselben Retardierungsspannung versorgt wie das Hauptspektrometer. Es vermisst eine ^{83}Kr -Quelle oder eine $^{241}\text{Am}/\text{Co}$ -Quelle als natürlichen Energiestandard und zeichnet Spannungsschwankungen gegenüber dem Referenzspektrum auf. Diese können später bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden.

Dem Detektor kommt die Aufgabe zu, die Elektronen nachzuweisen, die eine genügend hohe Energie besitzen, um die Retardierungsbarriere zu überwinden. Der Detektor sollte eine hohe Nachweiseffizienz für Elektronen im Energiebereich um 18,6 keV besitzen. Von Vorteil ist auch eine Ortsauflösung, die die Vermessung des Strahlprofils und damit eine Untersuchung der Homogenität des Potentials in der Analysierebene ermöglicht. Diese kann somit in der späteren Datenauswertung einbezogen werden.

3.2 Das Hauptspektrometer mit Drahtelektrode

Das Hauptspektrometer ist von der Firma MAN/DWE in Deggendorf gefertigt worden. Die Auslieferung erfolgte bereits September/Oktober 2006 auf dem Seeweg. Die letzten Kilometer von der Anlegestelle bis zum FZK legte das Spektrometer in einem Schwertransport zurück. Anschließend hob einer der größten Mobilkräne Europas das 23 Meter lange und 10 Meter durchmessende Stahlbehältnis in die Halle, siehe auch Abbildung 3.3. Das Hauptspektrometer besteht vollständig aus besonders unmagnetischem Edelstahl der Qualität 1.4429 und hat ein Gewicht von annähernd 200 Tonnen. Die Hülle des Haupt-

spektrometers ist massiv und etwa 32 mm stark. Dies ist erforderlich, um Verformungen durch das hohe Eigengewicht der Spektrometerwandung zu vermeiden.

Die Aufgabe des Hauptspektrometers im KATRIN-Experiment ist die exakte Energieanalyse der Zerfallselektronen nahe der Endpunktenergie des Tritium- β -Zerfalls nach dem Prinzip eines MAC-E-Filters. Seine enorme Größe resultiert aus der angestrebten Energieauflösung. Eine genaue Erläuterung zur Funktionsweise des MAC-E-Filters findet sich in Kapitel 2.3.3.

Die Hauptspektrometer-Drahtelektrode

An der Innenseite der Spektrometerwand wird eine aus 240 einzelnen Modulen bestehende zweilagige Drahtelektrode montiert. Eine Schemazeichnung des Hauptspektromertanks mit der Aufteilung der Drahtelektrode ist in Abbildung 3.4 gezeigt. Die wesentliche Aufgabe der Drahtelektrode ist die Untergrundunterdrückung. Ein Großteil der durch einfallende kosmische Teilchen oder radioaktive Zerfälle aus der Tankwand austretenden Elektronen ist niederenergetisch. Sie werden von der Lorentzkraft, die durch das im Innern des Tanks herrschende Magnetfeld erzeugt wird, auf eine im Spektrometervolumen außen gelegene Magnetfeldlinie gezwungen. Auf dieser werden sie am Detektor vorbeigeführt und tragen somit nicht zum Untergrund bei. Nur 10^{-5} bis 10^{-7} aller potentiellen Untergrundelektronen können dadurch bis in den sensitiven Teil des Führungsmagnetfelds vordringen. Diese nützliche Eigenschaft des MAC-E-Filters ist jedoch nur bei kleineren Spektrometern mit einer geringen Oberfläche zur Abschirmung ausreichend. Der kosmische Myonenfluss für die relativ große Oberfläche des Hauptspektromertanks beträgt etwa 10^5 Teilchen pro Sekunde. Daraus ergibt sich eine Untergrundrate durch Sekundärelektronen von etwa 0,1 Hz, die durch den Einsatz einer elektrostatischen Drahtelektrode weiter reduziert werden kann [Fla04]. Dazu werden die beiden Drahtlagen der Module auf ein relativ zur Tankwand um 100 V bzw. 200 V negativeres Potential gelegt. Diese Potentialdifferenz ist ausreichend, um



Abbildung 3.3: Bilder der Lieferung des Hauptspektrometers; links: Die enge Passage durch Eggenstein-Leopoldshafen; rechts: Einhub des Spektrometers durch das Dach der KATRIN-Haupthalle. Quelle der Bilder: Forschungszentrum Karlsruhe.

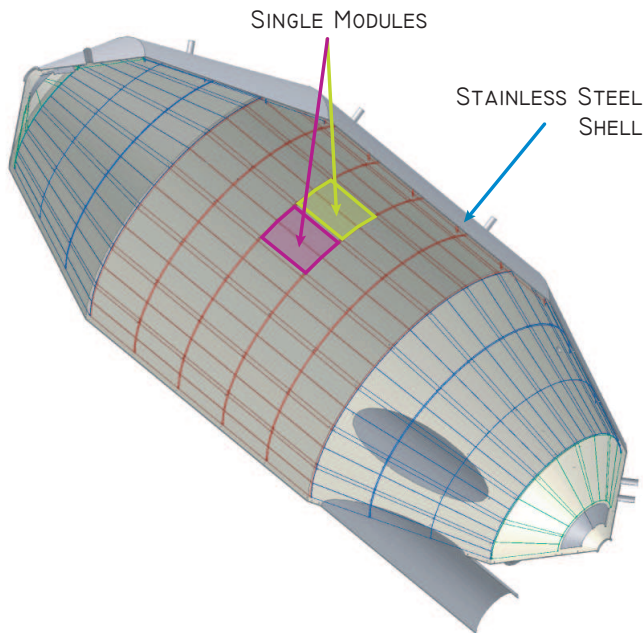


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Hauptspektrometers mit Drahtelektrode.

den Großteil der Elektronen zurück zu reflektieren, die sonst den Detektor ungehindert erreichen und damit den Untergrund deutlich erhöhen könnten.

Zusätzlich wird die Drahtelektrode die Feinregelung des Retardierungspotentials übernehmen. Durch die ringförmige Anordnung können einzelne Bereiche der Elektrode mit verschiedenen Spannungen versorgt werden und so die Homogenität des Retardierungspotentials in der Analysierebene beeinflussen. Die Drähte der Elektrode sind in zwei Lagen angeordnet, wobei die zweite Lage gegenüber der ersten auf einem negativeren Potential liegt, um die Abschirmwirkung zu erhöhen. Da die Drähte selbst eine Ausdehnung besitzen, können kosmische Teilchen auch im Draht selbst Elektronen auslösen, die bei einem einlagigen Aufbau ungehindert in das Tankinnere gelangen würden. Dieser Effekt wird durch den zweilagigen Aufbau reduziert, da die zweite Drahtlage eine deutlich kleinere Oberfläche als die erste besitzt. Abbildung 3.5 (rechts) stellt schematisch die Entstehung von Untergrundelektronen dar und auf welche Weise die Drahtelektrode diesen Effekt beeinflussen kann.

Die Drahtelektrode erfüllt mit der Untergrundabschirmung eine wichtige Aufgabe für das Experiment. Die erreichbare Sensitivität auf die Neutrinomasse ist stark abhängig von der genauen Analyse des Endbereichs im Energiespektrum der Elektronen. Da nur ein äußerst geringer Bruchteil aller Zerfallselektronen auf diesen Bereich entfallen, ist das Untergrundsignal dort besonders störend und kann auch durch spezielle Analyseverfahren nur teilweise entfernt werden. Besondere Bedeutung hat in diesem Zusammenhang auch die Homogenität des Analysierpotentials, dessen Form maßgeblich durch das elektromagnetische Design der Drahtelektrode beeinflusst wird [Val04].

Eine weitere Aufgabe der Drahtelektrode ist das Entfernen von im Spektrometer gespeicherten Elektronen. Dieses wirkt durch das angelegte Magnetfeld wie eine magnetische Flasche. Elektronen mit hohem Transversalimpuls können im Bereich der Solenoiden durch das hohe Magnetfeld reflektiert werden und so im Spektrometer für längere Zeit gefangen werden. Diese Elektronen stoßen auf ihrem Weg durch das Spektrometer mit den Restgasatomen und können diese ionisieren, was wiederum den Untergrund erhöht. Im Dipolmodus wird die Drahtelektrode in Richtung der Längsachse des Spektrometers geteilt und eine Hälfte gegenüber der anderen auf ein hohes elektrisches Potential gelegt. Dies bricht die in sich geschlossenen Bahnen der gespeicherten Elektronen auf, welche Richtung Tankhülle driften, wo sie absorbiert werden.

Aufbau der Module

Die Drahtelektrode ist aus 240 einzelnen Modulen aufgebaut, um die Montage im Hauptspektrometertank zu erleichtern und die strengen Toleranzen bezüglich der Drahtpositionen untereinander einhalten zu können. Ein Modul besitzt ein Gewicht von etwa 25 kg, damit ist es leicht genug, um von zwei Personen manuell im Tank installiert zu werden. Eine Kammstruktur ist als Drahthalterung vorgesehen, die Drähte können damit in zwei Lagen mit hoher Genauigkeit angeordnet werden. Eine Darstellung der Form findet sich in Abbildung 3.6. Im zylindrischen Teil besteht ein Modul aus zwei identischen Kämmen, vier Streben mit C-Profil, sowie 120 Drähten. Diese werden zwischen den Kämmen in zwei Lagen gespannt, die einen Abstand von 70 mm haben. Eine Darstellung eines Zylindertank-Moduls findet sich in Abbildung 3.5 (links), sowie eine grobe, schematische Zeichnung ohne Drähte in Abbildung 5.1. Die Module im Konus-Teil des Hauptspektrometers sind im Prinzip gleich aufgebaut. Es werden jedoch Kämmen mit an die Tankwand angepassten Radien verwendet, wodurch die Module eine asymmetrische Form erhalten.

Für die Form und den Aufbau der Module sind verschiedene Kriterien ausschlaggebend. Um den durch kosmische Teilchen in der Drahtelektrode selbst induzierten Untergrund ge-

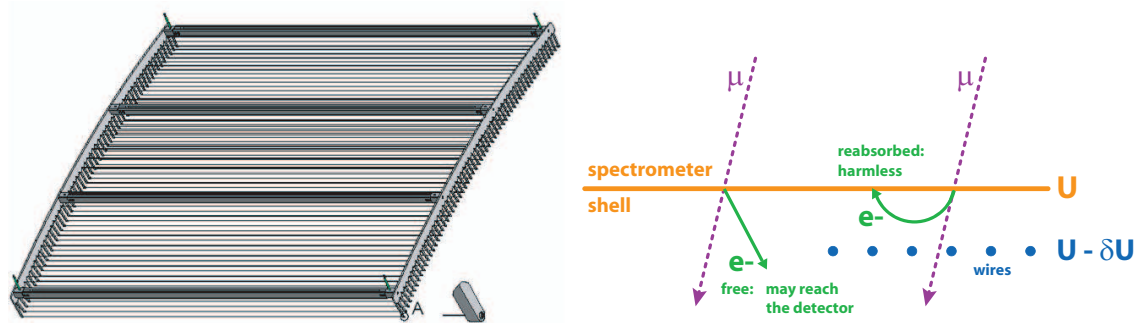


Abbildung 3.5: Details der Drahtelektrodenmodule. Links: technische Zeichnung eines Moduls aus dem zylindrischen Teil des Hauptspektrometers; rechts: Schemazeichnung zur Wirkungsweise der Drahtelektrode: Die durch kosmische Myonen aus der Tankwand herausgeschlagenen Elektronen werden durch das negative Potential der Drähte reflektiert und in der Tankhülle reabsorbiert.

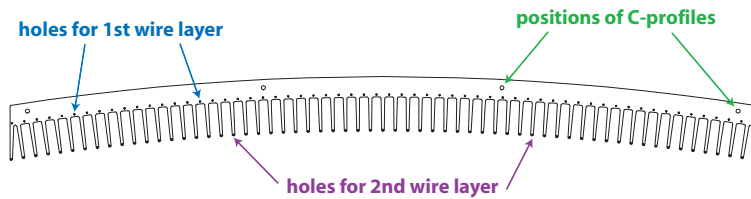


Abbildung 3.6: Technische Zeichnung eines Modul-Kamms aus dem Zylinderteil des Hauptspektrometers.

ring zu halten, sollte sie eine möglichst kleine Masse besitzen. Dem steht jedoch entgegen, dass die Gesamtzugkraft der 120 Drähte von der Modulstruktur kompensiert werden muss, ohne dass starke Deformationen auftreten. Jeder einzelne Draht benötigt eine Mindestspannung von 10 N (1. Drahtlage) bzw. 5 N (2. Drahtlage), damit ihre Durchbiegung die für die Potentialverteilung erforderlichen Toleranzen nicht überschreitet. Die unterschiedlichen Werte ergeben sich aus den verschiedenen Dicken der Drähte beider Drahtlagen. Deren Stärken wurden mit 0,2 mm für die innere sowie 0,3 mm für die äußere Drahtlage gewählt. Die auf den Draht angewandte Spannung muss im Bereich der elastischen Verformung liegen. Die Drahtelektrode besteht damit insgesamt aus 960 C-Profil-Streben, 480 Kämmen, sowie etwa 42,8 km Edeldraht. Die Oberfläche aller Bauteile entspricht etwa der Hälfte der Innenoberfläche der Spektrometerhülle und trägt bei gleicher Reinheit etwa ein Drittel zur Gesamtausgasrate des Spektrometertanks bei.

Spezifikationen des Hauptspektrometer Vakuumsystems

Das Hauptspektrometer wird während der Messungen auf einen Druck von 10^{-11} mbar evakuiert, um den durch Stöße von Elektronen mit den Restgasatomen induzierten Untergrund zu reduzieren. Dieser Wert für den Enddruck liegt im Bereich des Ultrahochvakuums (UHV) und wurde bislang noch nie in einer Vakuumapparatur von der Größe des KATRIN-Hauptspektrometers erreicht. Das Spektrometer besitzt ein Volumen von etwa 1250 m^3 und eine Oberfläche von ca. 650 m^2 . Schon bei der Fertigung des Spektrometertanks bei MAN/DWE mussten aufgrund der strengen Vakuumanforderungen besondere Sorgfalts- und Reinheitskriterien eingehalten werden.

An der Außenseite des Hauptspektrometertanks ist ein Heiz- und Kühlsystem angebracht, welches aus öldurchflossenen Leitungen besteht. Das Hauptspektrometer kann damit bei einer Temperatur von $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgeheizt werden. Das Ausheizen ist erforderlich, um die Ausgasrate der Oberflächen im Spektrometer zu senken und damit den erreichbaren Enddruck des Vakuumsystems zu reduzieren. Dazu kann ebenfalls die Kühlung des Spektrometers während der Messphasen beitragen.

Das Vakuumsystem des Hauptspektrometers ist so konzipiert, dass es in der Lage ist, im Spektrometertank einen Druck von 10^{-11} mbar zu erzeugen. Wenn man Lecks vernachlässigt, hängt der Enddruck eines statischen Vakuumsystems nur von der Ausgasrate der Innenoberflächen und dem Saugvermögen des Pumpsystems ab. Dieses besteht aus Vorpumpen, Turbomolekularpumpen und etwa 1000 m Gettermaterial mit einem Gesamtsaugvermögen von etwa $3 \cdot 10^5 \text{ l/s}$. Das bedeutet, dass die Ausgasrate des Systems bei einer Oberfläche von etwa 1000 m^2 kleiner als $3 \cdot 10^{-13} \text{ mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ sein muss. Der UHV-tauglichen Reinigung der Drahtelektrodenbauteile muss daher besondere Beachtung

gewidmet werden, denn aufgrund ihres großen Oberflächenanteils können sie die Gesamtausgasrate im Hauptspektrometer merklich beeinflussen. Durch Verunreinigungen auf deren Oberflächen kann der erreichbare Enddruck erhöht werden, was einen unerwünschten Untergrund im Experiment bedingt.

4 Reinigungsprozedur der Drahtelektrode für das KATRIN-Hauptspektrometer

Die erlaubte Ausgasrate der Drahtelektrode im Hauptspektrometer stellt hohe Anforderungen an die Modulsauberkeit und damit auch an die anzuwendenden Reinigungsverfahren. Dabei ist besonders wichtig, dass fett- und ölhaltige Verunreinigungen gründlich entfernt werden. Der Verdampfungspunkt dieser Kohlenstoffverbindungen senkt sich bei Druckerniedrigung stark ab, so dass selbst langkettige Öle zu einer Verschlechterung des Enddrucks des Vakuumsystems führen.

Auch die Wahl der Reinigungsmethoden muss auf den zu erreichenden Enddruck im Vakuumsystem abgestimmt werden. Zum Beispiel können manuelle Reinigungsverfahren, wie das Abreiben mit einem Tuch und Alkohol, Teile der Verunreinigungen tiefer in die Oberfläche des Metalls hineindrücken. Solche Reinigungsverfahren sind gebräuchlich in der Hochvakuumphysik, bei der Enddrücke von 10^{-7} mbar erreicht werden müssen. Die um den Faktor 10000 höheren Anforderungen bei KATRIN erlauben dies jedoch nicht. Hier muss auf schonende und zugleich effektivere Methoden zurückgegriffen werden, wie die Reinigung mittels Ultraschalltechnik. Eine große Bedeutung kommt dabei den verwendeten Lösungsmitteln zu, die weder die Werkstoffe angreifen, noch messbare Rückstände auf dem Reinigungsgut hinterlassen dürfen. Die Reinigung mittels Ultraschall hat gegenüber manuellen Verfahren zudem den Vorteil, auch an schwer erreichbaren Stellen gute Ergebnisse zu erzielen.

4.1 Die Wirkungsweise von Ultraschallreinigung

Für die Ultraschallreinigung bringt man hochfrequente Schallwellen in ein Trägermedium ein, von dem das Reinigungsgut vollständig umgeben ist. Oft werden als Reinigungsmedium alkalische Lösungen auf Wasserbasis oder reines Wasser verwendet. Es können aber auch andere Lösungsmittel eingesetzt werden, je nach Art der erwarteten Verschmutzung. Die Erzeugung des Ultraschalls geschieht mittels Schallgeber, die durch Hochfrequenz-Generatoren angesteuert werden. Eine Positionierung der Schallgeber direkt unterhalb des Reinigungsguts ermöglicht eine in der Leistung nahezu verlustfreie Übertragung der Druckwellen in das Reinigungsmedium. Schallgeber bei der industriellen Ultraschallreinigung arbeiten in der Regel in einem Frequenzbereich von 20 kHz bis etwa 1 GHz.

Eine Grafik, welche die Funktionsweise der Ultraschallreinigung verdeutlichen soll, findet sich in Abbildung 4.1. Schallwellen im Wasser breiten sich als Longitudinalwellen aus, das Wasser erfährt also lokal abwechselnd Zug- und Druckspannung. An Stellen wie z.B. Grenzübergängen zu Fremdmaterialien oder gelösten Stoffen, kann während der Zugphase

die sonst kohärente Wassersäule lokal aufreißen. Dort entstehen mikroskopisch kleine, mit Dampf gefüllte Gasbläschen. Bei Rücknahme der Zugkraft und Übergang in die Kompression implodieren die Gasbläschen. Dabei sprengen sie Schmutzpartikel mechanisch durch einen sich bildenden Microjet vom Reinigungsgut ab, die dann in die Reinigungsflüssigkeit übergehen [Lue05].

Diesen Vorgang nennt man Kavitation. Er kann nur dort stattfinden, wo Verunreinigungen oder Grenzflächen Keimzentren zur Entstehung von Kavitationsbläschen liefern. Abbildung 4.2 zeigt eine Nahaufnahme einer implodierenden Kavitationsblase.

Bei der Ultraschallreinigung ist die Kavitation ein erwünschter Effekt, der neben den eingesetzten Reinigungsmitteln maßgeblich zur Reinigungswirkung beiträgt. Man begegnet dem Phänomen der Kavitation jedoch auch in anderen Bereichen, wie z.B. der Schifffahrt. In verwirbelten Flüssigkeiten existieren Bereiche von schneller und langsamer Strömung dicht nebeneinander. Für strömende Flüssigkeiten verringert sich der statische Druck, während sich der Staudruck erhöht, wenn die Strömungsgeschwindigkeit steigt. Der Siedepunkt einer strömenden Flüssigkeit ist dadurch schon bei niedrigeren Temperaturen erreicht. An Stellen mit besonders schneller Strömung entspricht der statische Druck dem Dampfdruck der Flüssigkeit bei der vorliegenden Temperatur. Die Flüssigkeit verdampft lokal und bildet Gasblasen. Gelangen diese Blasen in eine nahegelegene langsamere Strömung, so kondensieren sie wieder. Ihr Volumen verkleinert sich dabei schlagartig auf ein Hundertstel, wodurch die Blasen implodieren. Diese Form der Kavitation findet bevorzugt im Bereich der Antriebsschrauben von Schiffen oder U-Booten statt und trägt dort solange

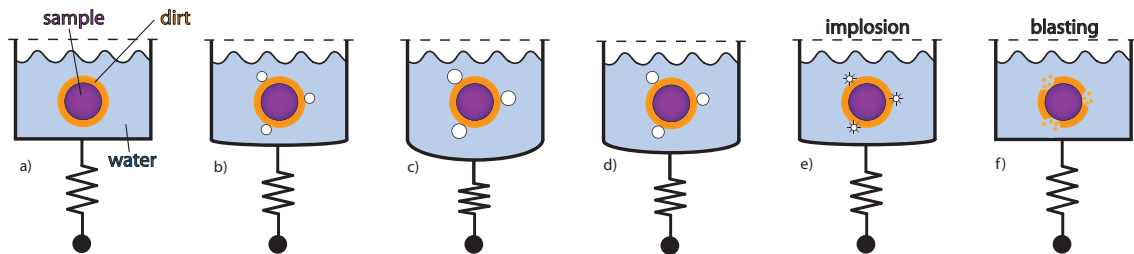


Abbildung 4.1: Das Prinzip der Ultraschallreinigung:

- Das Reinigungsgut befindet sich in einem mit Wasser gefüllten Gefäß, in welches über den Boden Ultraschallwellen eingebracht werden können.
- Winzige mit Dampf gefüllte Kavitationsblasen bilden sich an Grenzflächen durch die im Medium an der Wassersäule herrschende Zugspannung.
- Die Blasen erreichen die Maximalausdehnung im Umkehrpunkt der Schwingbewegung des Bodens.
- Beginnende Kollabierung der Kavitationsblasen durch Kompression der Wassersäule.
- Eigentliche Kavitation: Schnelle Implosion der Bläschen.
- Absprengen von Verunreinigungen am Reinigungsgut.



Abbildung 4.2: Momentaufnahme einer Kavitationsblase während der Implosion an einer Oberfläche. Man erkennt deutlich in der Mitte den Microjet, der die Schmutzpartikel an der Oberfläche effizient absprengt [Sus89].

Material ab, bis die Schrauben durch Entstehung von Löchern ihre Funktion verlieren und ersetzt werden müssen.

4.2 Die ASTeC-Reinigungsprozedur als Richtlinie für KATRIN

Das Accelerator Science and Technology Centre, kurz ASTeC, wurde 1991 als Zentrum für Expertise im Bereich Wissenschaft und Technik von Beschleunigern gegründet. Es befindet sich im Daresbury Laboratory in Warrington Cheshire in Großbritannien und unterstützt mit seinem Fachwissen britische und auch europäische Kollaborationen bei der Forschung in der Beschleuniger- und Vakuumphysik. Die langjährigen Erfahrungen bei der Reinigung von Materialien für den Einsatz im Hoch- und Ultrahochvakuum wurden von der Forschungsgruppe um Reid und Middleman zusammengetragen und in den Dokumenten „ASTeC Vacuum Quality Control Documentation“ anderen Kollaborationen zur Verfügung gestellt [Rei03].

Das vorgeschlagene Verfahren zur Reinigung von UHV-Komponenten wurde im KATRIN Design Report als Richtlinie für die Reinigung von allen bei KATRIN verwendeten Vakuumbauteilen festgesetzt.

Beim Bau der Drahtelektrode wird vornehmlich Edelstahl der Qualität EN 1.4429¹ verwendet.

¹Edelstahl der europäischen Norm EN 1.4429 ist besonders geeignet für Ultrahochvakuumkomponenten. Er hat eine geringe magnetische Permeabilität, lässt sich vergleichsweise gut verarbeiten und ist extrem korrosionsbeständig. Im Vergleich zu anderen Edelstahlqualitäten ist er sehr teuer und schwer erhältlich.

Für den Werkstoff Edelstahl empfiehlt das ASTeC folgende Reinigungsprozedur:

1. Vorreinigung

Alle Fremdkörper durch Behandlung mit Pressluft entfernen, danach grobe Verunreinigungen mit einem alkalischen Allzweckreinigungsmittel durch Abwischen oder Abspülen entfernen. Es ist darauf zu achten, dass dabei nicht gescheuert, geschliffen oder gefeilt wird. Auch andere grobe, das Material abtragende Methoden wie z.B die Behandlung mit Drahtbürsten, dürfen nicht zum Einsatz kommen.

2. Waschen

- a) Abspritzen mit einem heißen (80 °C) Hochdruck-Wasserstrahl, der mit einem milden alkalischen Reiniger versetzt ist. Gründlich mit Wasser nachspülen, bis alle Spuren vom Reinigungsmittel entfernt wurden.
- b) Falls nötig, oberflächliche Ablagerungen mit Glas- oder Aluminiumperlen durch Strahlen entfernen.
- c) Abspritzen mit einem heißen (80 °C) Hochdruck-Wasserstrahl ohne Lösungsmittel. Dabei muss drauf geachtet werden, dass jegliche übrigen Perlen entfernt werden, besonders an schwer zugänglichen Stellen und in Vertiefungen.
- d) Mit einem (wenn möglich) heißen, sauberen Luftstrom trocknen.

3. Chemische Reinigung

- a) Das Reinigungsgut vollständig in ein Gefäß mit heißem, stabilisierten Trichlorethylen einbringen. Eine Ultraschallbehandlung muss für mindestens 15 Minuten durchgeführt werden, oder bis das Reinigungsgut die Badtemperatur erlangt hat, falls dies länger als 15 Minuten dauert.
- b) Dampfreinigen mit Trichlorethyldampf für mindestens 15 Minuten, oder bis das Reinigungsgut die Badtemperatur erlangt hat, falls dies länger als 15 Minuten dauert.
- c) Sicherstellen, dass alle Reinigungsmittelrückstände entfernt wurden, mit besonderer Beachtung von Löchern oder Vertiefungen im Material, wo sich leicht Ablagerungen bilden können.
- d) Abspritzen mit einem heißen (80 °C) Hochdruck-Wasserstrahl mit hochreinem, demineralisiertem Wasser. An dieser Stelle darf kein Zusatzmittel verwendet werden.
- e) Das Reinigungsgut vollständig in ein Gefäß mit heißem (60 °C), alkalischen Lösungsmittel (P3-almeco™ 36 oder T5161) einbringen. Eine Ultraschallbehandlung für 5 Minuten durchführen. Es ist wichtig, dass nach dem Herausnehmen des Reinigungsgutes der nächste Schritt unverzüglich ausgeführt wird.
- f) Abspritzen mit einem heißen (80 °C) Hochdruck-Wasserstrahl mit hochreinem, demineralisiertem Wasser. An dieser Stelle darf kein Zusatzmittel verwendet werden. Sicherstellen, dass alle Rückstände vom alkalischen Bad entfernt wurden.

- g) In einem Ofen bei etwa 100 °C oder mit einem heißen, sauberen Luftstrom trocknen.

4. Nachbehandlung

- a) In trockener, staubfreier Umgebung abkühlen lassen und das Reinigungsgut auf Rückstände und Fehler bei der Reinigung untersuchen, besonders an schwer zugänglichen Stellen und Vertiefungen im Material.
- b) Reinigungsgut sorgfältig verpacken, um es vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen.

4.3 Für die Drahtelektrode angepasste Reinigungsprozedur

Die ASTeC-Prozedur ist sehr universell und einsetzbar für Edelstahlteile bei jeglicher Art der Verunreinigung und jedem Verschmutzungsgrad. Einige Reinigungsschritte und Methoden müssen jedoch auf die speziellen Anforderungen und Möglichkeiten angepasst werden, die bei der Reinigung der Drahtmodule eine Rolle spielen. Zum Beispiel sind einige Reinigungsmittel in Deutschland nicht erhältlich oder zulässig, bzw. nicht ohne erheblichen Aufwand in der Absicherung der Reinigungsanlage einsetzbar, da sie giftig oder explosiv sind. Zudem können manche aufwändige Reinigungsschritte ausgelassen oder vereinfacht werden. Die Modulbauteile werden elektropoliert angeliefert, daher sind keine groben Verunreinigungen oder Ablagerungen auf dem Reinigungsgut zu erwarten.

4.3.1 Auswahl der Reinigungsmittel und Reinigungsschritte

Besonders bei der Auswahl der Reinigungsmittel muss darauf geachtet werden, dass Sicherheits- und Umweltbestimmungen eingehalten werden. Speziell die Reinigung von Werkstoffen mit Trichlorethylen oder gar Trichlorethylendampf ist in Deutschland seit Beginn der 90er Jahre vom Gesetzgeber stark eingeschränkt worden. Seit dem 30.07.2002 ist Trichlorethylen nach der EG-Richtlinie 67/548/EG als krebserzeugender Stoff klassifiziert. Daher sollte von der Verwendung von Trichlorethylen als Reinigungsmittel abgesehen werden. Das ASTeC sieht folgende Chemikalien als Ersatzstoffe vor:

1. Trichlorethan (falls die lokale Gesetzgebung den Gebrauch erlaubt)
2. Perchlorethylen (falls die lokale Gesetzgebung den Gebrauch erlaubt)
3. Isopropanol
4. Ethanol
5. Aceton
6. Axarel 9100™ (nicht für Schritt 3b) anwendbar)

Tabelle 4.1 zeigt eine Gegenüberstellung der Eigenschaften der vorgeschlagenen Ersatzstoffe, sowie der Lösungsmittel Trichlorethylen und P3-almeco™ 36. Die farbig hinterlegten Eigenschaften sind unter den lokalen Gegebenheiten und Bestimmungen problematisch. Durch die Verwendung von explosionsgefährlichen Lösungsmitteln würde die gesamte Ultraschallanlage in eine andere Sicherheitsklasse eingestuft werden. Der Einsatz von speziell gesicherten Pumpen und Ventilen sowie eine besondere Überwachung der Anlage wäre dann Vorschrift. Damit verbunden wäre auch eine erhebliche Kosten- und Aufwandssteigerung, die in keinem Verhältnis zum Nutzen steht.

Nur eines der durch das ASTeC vorgeschlagenen Ersatzmittel für Trichlorethylen besitzt keine schwerwiegenden Nachteile, wie z.B. die Notwendigkeit der Sonderentsorgung nach speziellen Vorschriften oder die Bildung von explosiven Dampfgemischen. Dieses Ersatzlösungsmittel ist Axarel 9100™, ein Produkt des Chemikalienherstellers Petroferm. Es ist ein Gemisch, bestehend hauptsächlich aus aliphatischen Kohlenwasserstoffen (ca. 90%) mit geringer Beimischung von Diisobutyl-Verbindungen (ca. 10%). Axarel 9100™ besitzt sehr gute fettlösende Eigenschaften und wird vor allem als industrielles Allzweckreinigungs- und Lösemittel eingesetzt. Der Hersteller Petroferm vertreibt es als direktes Ersatzmittel für Trichlorethylen. Das Lösemittel ist geeignet im Einsatz als Reinigungsmittel auch bei höheren Temperaturen (Siedepunkt etwa 225 °C), sowie in Kombination mit Ultraschall. Axarel 9100™ ist stabil und bildet keine explosionsgefährlichen Dampfgemische. Kontakt mit starken Säuren und Laugen, sowie starken Oxidationsmitteln ist jedoch zu vermeiden. Es ist nach R36 reizend und bei Einnahme sowie Inhalation der Dämpfe giftig für Lebewesen und Umwelt. Eine Entsorgung sollte mit der lokalen Umweltbehörde abgestimmt werden, ist aber vergleichsweise unproblematisch, da Axarel 9100™ nicht explizit als Gift- oder Gefahrenstoff klassifiziert ist. Durch den hohen Anteil von Kohlenwasserstoffen eignet es sich gut für die Entsorgung durch „fuel blending“. Bei dieser Entsorgungsmethode wird das Abfallgut in Kraftstoff untergemischt und wie herkömmlicher Kraftstoff zur Energiegewinnung verwendet.

Axarel 9100™ wurde nach der gesetzlichen Einschränkung der Verwendung von Trichlorethylen Mitte der 90er Jahre durch mehrere Forschungsgruppen als Reinigungsmittel für UHV-Komponenten getestet. Die Reinigungswirkung bei Edelstahl wurde unter anderem im Vergleich mit der von Freon, Trichlorethylen und anderen Lösemitteln wie Hydrofluorether durch Ausgastests sowie Restgasanalysen analysiert. Es bestätigte sich, dass Axarel 9100™ ähnliche, zum Teil sogar bessere Resultate lieferte als die bislang üblicherweise eingesetzten Reinigungsmittel.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Eigenschaften von P3-almeco™ 36 und den Ersatzstoffen für Trichlorethylen. Farbig hinterlegt sind Eigenschaften, die den Gebrauch des betreffenden Lösungsmittels ausschließen oder komplexe und kostenintensive Schutzmaßnahmen erforderlich machen.

Stoff	Trichlorethylen	P3-almeco™ 36	Axarel 9100™
Gefahren	giftig bei Verschlucken oder Inhalation; reizt Augen und Haut; Dämpfe verursachen Benommenheit oder Schläfrigkeit	reizend; reizt die Augen/Hautkontakt vermeiden	reizt die Haut, Augen und Atemwege
Expositionsbegrenzung und Schutzausrüstung	Arbeitsplatzgrenzwerte einhalten; Atemschutz bei Überschreitung der MAK; Schutzhandschuhe	Staub nicht einatmen, Berührung vermeiden; Staubmaske bei Staubbildung; Handschuhe aus PE	Atemschutz, falls keine ausreichende Belüftung; dichtschießende Schutzbrille, chem. resist. Handschuhe
Entsorgung	gemäß den behördlichen Vorschriften, Sonderentsorgung	unter Beachtung der örtlichen Vorschriften auf geeigneter Deponie	Verbrennung in geeigneter Anlage gemäß den behördlichen Vorschriften
Reaktivität	offene Flammen und Wärmequellen vermeiden; Kontakt mit Basen, Oxidationsmitteln, Alu, Zink, Mg, Na und Ka verhindern	Kontakt mit Säuren vermeiden	Temperaturen über 221 °C vermeiden; von Flammen, Funken und Hitze fernhalten;
Vorschriften	gefahrstoffgekennzeichnet, VOC-Richtlinie: geringer, eingeschränkter Gebrauch erlaubt, stark wassergefährdend	gefahrstoffgekennzeichnet, schwach wassergefährdend	Lösemittelverordnung Workplace Hazardous Material Information System: Class D Subdivision B - Toxic Material, sonst nicht gelistet.
Explosivität	Produkt nicht explosionsgefährlich, aber Bildung von explosiven Dampf-/Luftgemischen	nicht explosiv	nicht explosiv
Handhabung/Lagerung	Handhabung in geschl. Systemen; Dämpfe nicht einatmen; Aufenthalt in Ber. mit Dämpfen nur mit geeig. Atemschutz und in Begleitung weiterer Person	Staubbildung vermeiden; für gute Belüftung am Arbeitsplatz sorgen; trocken lagern	kühl, trocken und in gut belüfteten Räumen lagern; Überhitzung und Frost vermeiden

4 Reinigungsprozedur der Drahtelektrode für das KATRIN-Hauptspektrometer

Stoff	Aceton	Isopropylalkohol	Ethanol 9100™
Gefahren	reizend; leicht entzündlich; kann zu spröder und rissiger Haut führen; Dämpfe können Benommenheit und Schläfrigkeit verursachen	reizend; leicht entzündlich; reizt die Augen; Dämpfe können Benommenheit und Schläfrigkeit verursachen	leichtentzündlich; reizt Augen und Haut
Expositionsbeschränkung und Schutzausrüstung	Arbeitsplatzgrenzwerte einhalten; bei unzureichender Belüftung Atemschutz mit Filter für org. Gase; Schutzhandschuhe aus Butylkautschuk	Wirksame Absaugung da leicht flüchtig; MAK einhalten ohne Atemschutz; dichtschießende Schutzbrille, Handschuhe aus Gummi	MAK einhalten ohne Atemschutz; dichtschießende Schutzbrille, Handschuhe aus Butylkautschuk, lösemittel beständige Schutzkleidung
Entsorgung	Sonderbehandlung unter Beachtung der behördlichen Vorschriften	gemäß den behördlichen Vorschriften, Sonderentsorgung	gemäß behördlicher Vorschriften
Reaktivität	Hitzeinwirkung, Sonnenbestrahlung vermeiden; Kontakt mit Oxidationsmitteln verhindern	Kontakt mit Säuren vermeiden; Hitzeinwirkung, Sonnenbestrahlung vermeiden	Hitzeinwirkung, Sonnenbestrahlung vermeiden; Kontakt mit Oxidationsmitteln, Schwefelsäure und Salpetersäure verhindern
Vorschriften	gefahrstoffgekennzeichnet, schwach wassergefährdend, in einigen Ländern unter Lösemittelverordnung	gefahrstoffgekennzeichnet; schwach wassergefährdend, nicht unverdünnt oder in größeren Mengen in die Kanalisation geben	gefahrstoffgekennzeichnet; schwach wassergefährdend, nicht unverdünnt oder in größeren Mengen in die Kanalisation geben
Explosivität	bei Gebrauch Bildung explosionsgefährlicher/leichtentzündlicher Dampf-/Luftgemische möglich	explosionsgefährliche/leichtentzündliche Dampf-/Luftgemische; Explosionsgefahr beim Eindringen der Flüssigkeit in die Kanalisation	bei Gebrauch Bildung explosionsgefährlicher/leichtentzündlicher Dampf-/Luftgemische möglich
Handhabung/Lagerung	für gute Belüftung am Arbeitsplatz sorgen; Aerosolbildung vermeiden, Verwendung nur im explosionsgeschützten Bereich; Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladung	für gute Belüftung am Arbeitsplatz sorgen; Aerosolbildung vermeiden, Verwendung nur im explosionsgeschützten Bereich Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladung	für gute Belüftung am Arbeitsplatz sorgen; Aerosolbildung vermeiden, Verwendung nur im explosionsgeschützten Bereich; Maßnahmen gegen elektrostatische Aufladung

4.3.2 Die in der Ultraschallanlage eingesetzte Reinigungsprozedur

Die auf die speziellen Anforderungen und Möglichkeiten angepasste Reinigungsabfolge für die Ultraschallreinigungsanlage, sieht dann folgendermaßen aus:

1. Vorreinigung

- a) Inspektion des Reinigungsgutes auf grobe Verunreinigungen und Defekte im Material, evtl. manuelle Vorbehandlung mit milder Seife
- b) Abpusten der Staubpartikel mittels Pressluft
- c) Vorreinigung: Abspülen mit heißem, demineralisiertem Wasser (80 °C)
- d) Trocknen der Bauteile mit heißer Luft

2. Chemische Reinigung

- a) Vollständiges Einlegen der Bauteile in Axarel 9100™ (60 °C) unter Ultraschallbehandlung für 15 Minuten
- b) Abspülen für etwa eine Minute mit heißem, demineralisiertem Wasser (80 °C)
- c) Vollständiges Einlegen der Bauteile in P3-almeco™ 36 unter Ultraschallbehandlung für 5 Minuten bei etwa 60 °C
- d) Abspülen für etwa eine Minute mit heißem, demineralisiertem Wasser (80 °C) unter Hochdruck
- e) Vollständiges Einlegen der Bauteile in Wasser unter Ultraschallbehandlung für 5 Minuten bei etwa 80 °C
- f) Abspülen für etwa eine Minute mit Reinstwasser (80 °C)

3. Endbehandlung

- a) Trocknen der Bauteile mit heißer Luft
- b) Auskühlen und Verpacken des Reinigungsguts

Durch die Verwendung von Axarel 9100™ als Ersatzstoff für Trichlorethylen ist die Ausführung des Unterpunktes 3b) in der ASTeC-Prozedur nicht mehr möglich. Axarel 9100™ bildet keine für die Dampfreinigung verwendbare Dampfphase aus, da es ein ölbasiertes Lösungsmittel mit benzolähnlichen Eigenschaften ist. Das ASTeC sieht bei triftigen Gründen für den Anwender die Möglichkeit vor, nur zwei der drei Schritte 3a), 3b) und 3e) auszuführen, ohne dass starke Beeinträchtigungen der Reinigungswirkung zu erwarten sind. Daher wird in dem vorliegenden Fall auf die Dampfreinigung nach Schritt 3b) der ASTeC-Prozedur verzichtet.

Hauptaugenmerk bei der Reinigung sollte auf die Entfernung von Staubpartikeln und eventuellen Fettrückständen wie Fingerabdrücken oder Ölresten gelegt werden. Diese eher leichten Verunreinigungen können zum Beispiel beim nachträglichen Bohren der Löcher in die Kämme und beim Transport der Bauteile auftreten. Daher erübrigen sich bei der geplanten Anwendung der Prozedur die Punkte 1, 2b) und 2c). Der Arbeitsschritt 2a) wird vereinfacht, indem lediglich eine längere Phase des Abspritzens mit reinem Wasser vorgesehen und das milde alkalische Lösungsmittel weggelassen wird. Nach 3c) wird ein

weiterer Arbeitsschritt eingeführt, um die restlose Entfernung eventueller P3-almeco™ 36-Rückstände zu gewährleisten. Nach dem Abspritzen mit hochreinem Wasser wird das Reinigungsgut nochmals in demineralisiertes Wasser gelegt und erfährt darin für weitere 5 Minuten eine Ultraschallbehandlung. Dies ist sinnvoll, da bei der technischen Realisierung der Ultraschallanlage ein manuelles Abspritzen, das alkalische Reste und Ablagerungen bis in kleinste Zwischenräume entfernen könnte, nicht möglich ist.

5 Technischer Aufbau der Reinigungsanlage

5.1 Konzeption der Ultraschallanlage

Der mechanische Aufbau der Ultraschallanlage sowie der Entwurf und die Realisierung der Reinstwasserbereitung wurden von Helmut Baumeister am Institut für Kernphysik durchgeführt. Dennoch sollen diese hier im Folgenden beschrieben werden, da sie die Basis für die elektrische Ansteuerung der verwendeten Hardware und der Programmierung der automatischen Steuerung der Ultraschallreinigungsanlage sind, welche den Schwerpunkt dieser Diplomarbeit bilden. Ebenso wurde das technische Konzept der Ultraschallanlage in enger Zusammenarbeit mit Helmut Baumeister erarbeitet.

Um in einer vollautomatischen Anlage die in Abschnitt 4.3.2 aufgeführte Waschprozedur zu realisieren, kommen prinzipiell mehrere technische Grundkonzepte in Frage. Diese haben Vor- und Nachteile, die gegeneinander aufgewogen werden müssen.

Zum einen ist es möglich, den Aufbau mit drei Ultraschallbädern zu realisieren, welche die drei verschiedenen Reinigungsflüssigkeiten enthalten. Das Reinigungsgut würde dann in einer Halterung von einem zum nächsten Bad gehoben und zwischendurch an einem weiteren Ort unter Hochdruck mit demineralisiertem Wasser abgespritzt oder mit Heißluft getrocknet. Ein alternatives Konzept dazu sieht vor, nur eine einzige Wanne mit dem Reinigungsgut zu befüllen und dort Ultraschall, Hochdruck-Reinigung mit Wasser und Heißluft zu installieren. Der Hauptaufwand bei dieser Methode ist klar im aufwändigen Austausch der Reinigungsmittel zwischen den Ultraschallphasen zu sehen.

Vorteile dieses Konzepts gegenüber der ersten Methode sind:

- Es tritt ein geringerer Aufwand im Bereich der Ultraschallbehandlung durch nur eine statt drei einzelner Wannen mit jeweils eigenen Ultraschallgebern auf. Damit verbunden sind deutlich geringere Kosten für die erforderliche Hardware.
- Durch das während der gesamten Reinigungsprozedur geschlossene Bad treten keine Probleme durch Dampfentwicklung beim Öffnen und Schließen der einzelnen Bäder mit den erhitzten Lösungsmitteln auf. Deren Dämpfe dürfen aus Gesundheits- und Sicherheitsaspekten nicht in konzentrierter Form entweichen.
- Ein kompliziertes Hebe- und Verfahrensystem und dessen eventuell fehleranfällige Steuerung entfällt.

Dennoch treten dabei auch einige Nachteile auf:

- Es wird ein höherer Aufwand beim Flüssigkeitsmanagement nötig: Die Lösungsmittel müssen bei jedem Reinigungsdurchgang durch eine ventilgesteuerte Pumpanlage in das mit den Ultraschallgebern ausgerüstete Bad geleitet und wieder daraus entfernt werden. Damit verbunden treten Kosten für Pumpen, Ventile und Vorratstanks auf. Auch ist mit geringen Verlusten sowie der Verschleppung von Reinigungsmitteln untereinander durch Haftung an der Badwand zu rechnen.
- Ein weiterer Nachteil ist darin zu sehen, dass es keine guten Möglichkeiten der Anbringung von Hochdruckdüsen für das allseitige Abspritzen mit Wasser gibt. Der dazu vorgesehene Behälter dient nicht mehr nur diesem einen Zweck, sondern muss auch die Zu- und Abflüsse, sowie die empfindlichen Ultraschallgeber enthalten. Bewegliche Hochdruckdüsen sind bei diesem Konzept nicht möglich.

Aufgrund der genannten Vor- und Nachteile wurde das zweite Konzept zur Realisation ausgewählt. Durch den weiteren Reinigungsschritt mit Wasser und Ultraschallbehandlung nach der alkalischen Reinigung wird eine gründliche Entfernung von Seifenresten von dem Reinigungsgut gewährleistet.

Die Bauteile der Drahtelektrode müssen vor dem Zusammenbau gereinigt werden. Nach der Montage ist eine Säuberung der entstandenen, schwer zugänglichen Zwischenräume und Stoßflächen nicht mehr mit zufriedenstellendem Ergebnis durchführbar. Auch sollten

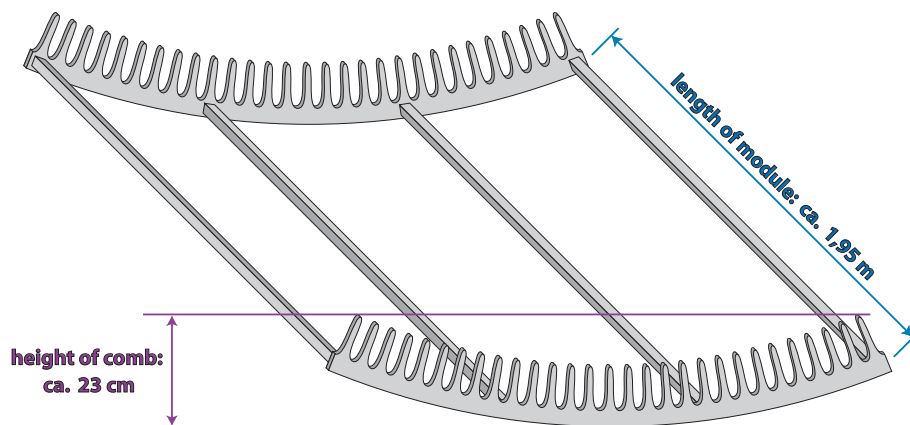


Abbildung 5.1: Schemazeichnung der Module mit den größten Abmessungen. Die C-Profile besitzen die größte auftretende Längsabmessung und definieren die Länge des Ultraschallbads. Durch Krümmung der Kämmen wird die minimale Füllhöhe der Ultraschallwanne festgelegt.

die zum Einspannen der Drähte verwendeten Keramiken nur ausgeheizt werden und nicht mit Wasser oder Lösemitteln in Kontakt kommen. Reinigungsmittelrückstände könnten sich aufgrund der porösen Materialstruktur leicht daran ablagern und später das Vakuum beeinträchtigen. Außerdem lassen sich Wasserrückstände aus den nur 0,4 mm durchmessenden Bohrungen nur schwer entfernen. Zur Reinigung der Keramiken empfiehlt das ASTeC, diese in einem Ofen unter sauberer Atmosphäre auf 1000 °C zu erhitzen, wobei eventuelle Verunreinigungen verglühen. Da das ASTeC die technischen Voraussetzungen dazu besitzt, werden die Keramiken in das Daresbury Laboratory verschickt und dort gereinigt.

Die Maße der Ultraschallwanne ergeben sich also aus den Maximalabmessungen der Bauteile der Drahtmodule. Im konischen Teil des Hauptspektrometers befinden sich größten Module. Die zugehörigen C-Profile sind mit etwa 1,95 m die längsten Bauteile, die in der Ultraschallwanne gereinigt werden müssen. Gleichzeitig besitzen die Käbme dieser Module die größte Krümmung, da in diesem Teil des Spektrometers nur 10 Module bei einem mittelgroßen Radius über den Umfang verteilt sind.

Die Höhe der Käbme von etwa 23 cm definiert die minimale Füllhöhe der Reinigungsflüssigkeiten im Ultraschallbad. Während der Ultraschallreinigung dürfen keine Teile des Reinigungsguts aus der Flüssigkeit herausstehen, da an diesen Stellen die Reinigungs-

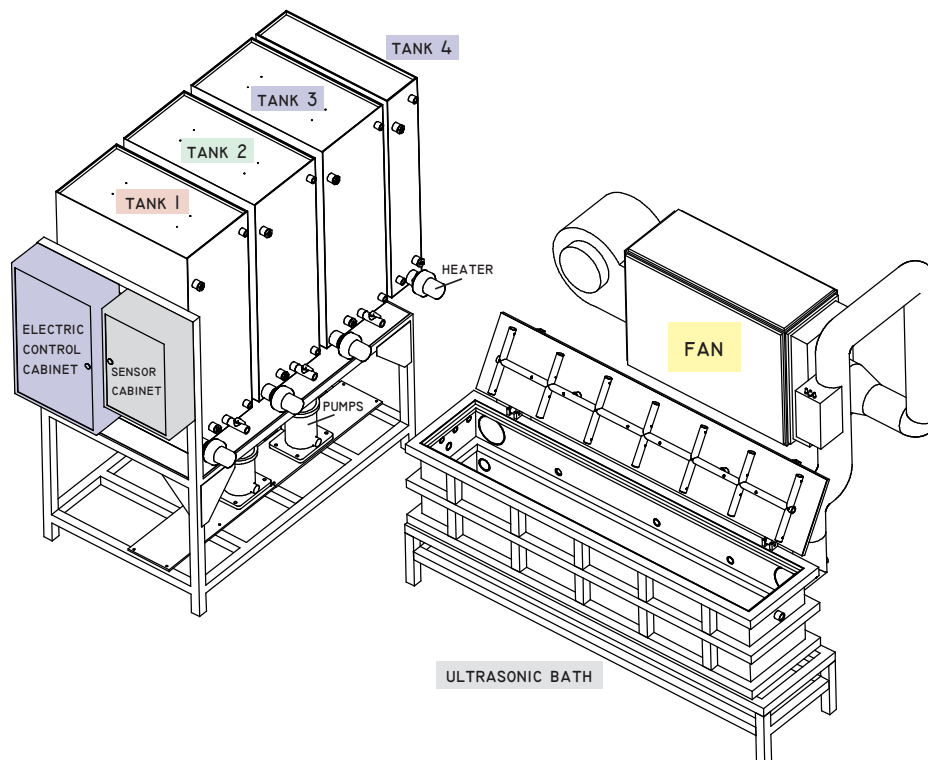


Abbildung 5.2: Zeichnung des Gesamtaufbaus der Ultraschallanlage. Erstellt von H. Baumeister.

wirkung nicht gegeben ist. Abbildung 5.1 zeigt eine schematische Darstellung der Konus-Drahtmodule mit deren Abmessungen. Bei der Festlegung der Breite der Ultraschallwanne musste zwischen zwei Aspekten abgewogen werden. Je breiter diese ist, desto mehr Kämme können gleichzeitig nebeneinander in der Ultraschallwanne gereinigt werden. Dadurch bedingt wird die Gesamtzahl der erforderlichen Reinigungsdurchgänge und die für die Reinigung der gesamten Bauteile benötigte Zeit. Auf der anderen Seite wird bei steigender Breite der Wanne auch das Volumen und damit die Menge der Flüssigkeiten größer. Damit verbunden ist auch die Größe der Vorratstanks sowie der Aufwand der Pumpanlage, um die Füll- und Abpumpzeiten gering zu halten.

Es wurde eine Breite der Ultraschallwanne von etwa 40 cm gewählt, die Länge beträgt 2,00 m. Damit beläuft sich das Volumen der Reinigungsflüssigkeiten auf etwa 250 Liter, bei einer Füllhöhe von etwa 31 cm. Es können gleichzeitig 12 Kämme gereinigt werden.

5.2 Überblick über den Gesamtaufbau

Der Gesamtaufbau ist schematisch in Abbildung 5.2 und 5.4 dargestellt. Er besteht aus mehreren Komponenten, die im Folgenden einzeln vorgestellt werden. Dies sind die Vorratstanks, sowie die Ultraschallwanne mit der Sprühanlage und dem Filter- und Pumpsystem. Anschließend wird auf den Aufbau der Reinstwasserbereitung näher eingegangen.

Die Vorratstanks

Über dem Ultraschallbad, welches die Ultraschallgeber enthält, befinden sich vier Vorratstanks für die Reinigungsmittel. Diese stehen erhöht auf einem Stahlgestell über dem Ultraschallbad und sind aus 1 mm dickem Edelstahl gefertigt. Man kann die Vorratstanks gut erkennen in der Abbildung 5.3, rechts. Drei der vier Tanks haben ein Fassungsvermögen von jeweils etwa 400 Litern und enthalten die verschiedenen für den Ultraschallreinigungsvorgang benötigten Lösungsmittel Axarel 9100™, P3-almeco™ 36 und Reinstwasser. Die Reinigungsflüssigkeiten werden nach der Verwendung im Ultraschallbad wieder zurück in die Vorratstanks gepumpt und somit wiederverwendet. Der vierte, kleinere Tank hat ein Volumen von 200 l und enthält Wasser, welches direkt aus der Reinstwasserbereitung stammt und nicht wiederverwendet wird. In alle vier Tanks ist im unteren Bereich eine Heizung eingebaut, damit die enthaltene Flüssigkeit auf die benötigte Temperatur gebracht werden kann, bevor sie ins Bad geleitet wird. Dies ermöglicht einen schnelleren Ablauf der Spül- und Ultraschallgänge, als wenn die Flüssigkeiten erst im Ultraschallbad geheizt würden. Alle vier Tanks sind mit einer 19 mm dicken selbstklebenden Schaumstoff-Isolationsschicht (K-Flex) vor dem Auskühlen geschützt.

Die Füllhöhe der Vorratstanks und des Ultraschallbads wird mittels kapazitiver Füllstandssensoren überwacht, von denen je einer im oberen Bereich und einer im Bereich des unteren Ausflussventils angebracht ist. Die Füllstandssensoren bestehen aus zwei Edelstahlplatten, deren Kapazitätsänderung bei einer Änderung des Mediums zwischen den Platten über eine dafür entwickelte elektronische Schaltung in ein digitales Signal gewandelt wird, das an einen Steuerungsrechner gesendet wird. Eine Beschreibung der Füllstandssensoren und der Ausleseschaltung findet sich in Kapitel 6.3.2.

Das Ultraschallbad

Aus den Vorratstanks können durch den vorhandenen Höhenunterschied über die Einlassventile 7, 6 und 12 an der oberen Stirnseite der Ultraschallwanne die verschiedenen Reinigungsflüssigkeiten in das Bad geleitet werden, siehe Abbildung 5.4. Dieses hat ein Volumen von etwa 250l. Eine Zeichnung sowie ein Foto des Ultraschallbads sind in Abbildung 5.2 und 5.5 gezeigt. Innerhalb des Ultraschallbads sind die Schwinggeber für den Ultraschall mit etwas Abstand zur Bodenplatte montiert. Über ein Hebesystem, das bis zu 250 kg tragen kann, wird ein Tragegestell in das Bad gelassen. Dieses Edelstahlgestell ist auf die Form der zu reinigenden Bauteile angepasst, die es im Ultraschallbad halten soll. Es gibt je eine Version für die C-Profile und eine für die Käbme der Drahtmodule. Der Aufbau ist so gewählt, dass die Kontaktflächen zwischen Korbmaterial und dem Reinigungsgut möglichst gering bleiben und zwischen den einzelnen Teilen des Reinigungsguts ausreichend Platz besteht.

Flüssigkeitstransport

Nach der Ultraschallbehandlung können die Flüssigkeiten zur Wiederverwendung in die Vorratstanks mittels der Pumpen A, B und C zurückgepumpt werden.



Abbildung 5.3: Fotos des Gesamtaufbaus der Ultraschallanlage. Links: Reinstwasseranlage mit Förderpumpen; rechts: Vorratstanks und Ultraschallwanne.

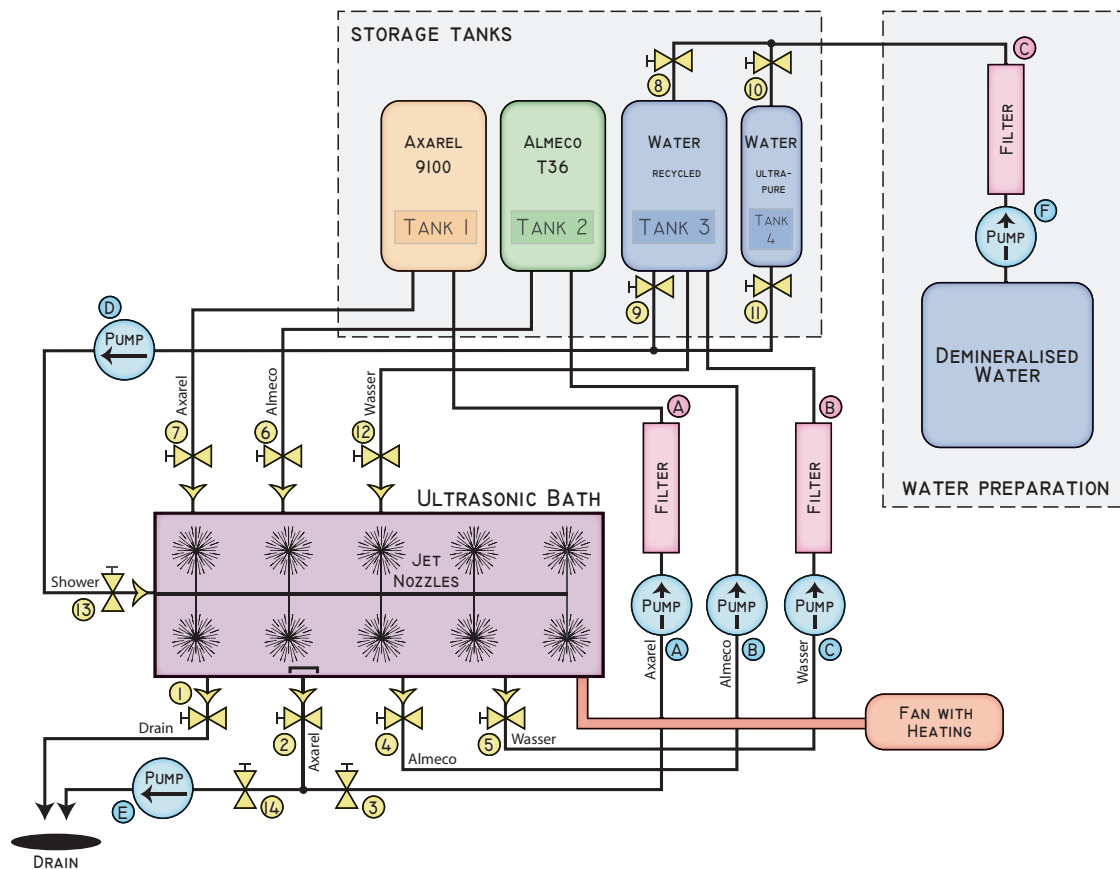


Abbildung 5.4: Schemazeichnung des Gesamtaufbaus der Ultraschallanlage. Der Aufbau ist modular und besteht aus drei Teilen: Ultraschallwanne, die Reinstwasserbereitung, sowie die Vorratstanks mit den Pumpen.

Die verschiedenen Lösungsmittel haben dafür jeweils eine eigene Rohrleitung und ein eigenes Auslassventil an der Ultraschallwanne (Ventile 2 & 3, 4 und 5), um eine Durchmischung der Flüssigkeiten weitestgehend zu vermeiden. Die Auslassventile befinden sich hinter den Ausflusstutzen, die dicht über dem Boden an der Stirnseite der Ultraschallwanne angebracht sind. Eine Besonderheit tritt dabei bei der Handhabung des Ersatzreinigungsmittels Axarel 9100TM auf. Es mischt sich nicht mit Wasser, besitzt einen öligen Charakter und darf nicht in größeren Mengen in das Abwasser gelangen. Auch wegen des hohen Preises von fast 6 Euro pro Liter ist es bei Axarel 9100TM besonders wichtig, dass es vollständig wiederverwendet wird. Es sollten möglichst wenig Verluste beim Einlassen und Abpumpen der Flüssigkeit aus dem Ultraschallbad auftreten. Diese ergeben sich einerseits durch Flüssigkeitsreste, die an den Wandungen haften und andererseits dadurch, dass Reste des Lösungsmittels nach dem Abpumpen im Bad verbleiben. Damit die Flüssigkeiten leichter

aus dem Bad gepumpt werden können, ist der Boden des Bades zu den Abflüssen hin um etwa 2,5 Grad geneigt. Allerdings war es aus Stabilitätsgründen nicht möglich, die Abflussstutzen zu den Ventilen so anzuschweißen, dass sich die Innenkanten auf gleicher Höhe mit dem Badboden befinden. Es besteht daher eine Schwelle für die Flüssigkeiten beim Ablauf, siehe Abbildung 5.5 rechts.

Um ein nahezu restloses Entleeren des Bades zumindest für Axarel 9100™ sowie für zu verwerfende Reinigungsmittelreste zu ermöglichen und eine Vermischung der Lösungsmittel zu verhindern, wurde daher ein alternativer Abfluss im Form eines Bodenventils (Ventil 2) eingebaut. Hinter diesem befinden sich ein T-Stück und zwei weitere Ventile (Ventile 14 und 3) mit denen Restflüssigkeiten, die nicht durch die vorgesehenen Ventile ablaufen können, entweder in den Abfluss oder, im Fall von Axarel-Resten, über Pumpe A in den Vorratstank 1 gepumpt werden können. So ist es möglich, das gesamte Axarel 9100™ wiederzuverwenden, bis auf minimale Flüssigkeitsreste, die am Reinigungsgut oder an den Wänden und dem Tragekorb haften und beim Absprühen in das Abwasser gelangen.

Tests für das Ablaufverhalten der Reste von Flüssigkeiten in der Ultraschallwanne haben gezeigt, dass das ölige Lösungsmittel Axarel 9100™ durch einfaches Abspülen mit Wasser zwar gut von den Wänden entfernt werden kann. Wegen seiner geringeren Dichte gegenüber Wasser verbleiben jedoch Axarel-Reste als öliges Film auf der Wasseroberfläche der kleinen Pfütze, die aufgrund des geringen Gefälles des Wannenbodens zum Ausfluss stehen bleibt. Ein Foto dieser Wasserreste mit Axarel-Film ist in Abbildung 5.6 gezeigt. Dieser Film kann durch wiederholtes Spülen mit Wasser reduziert werden, jedoch verbleiben auch nach vielen Spülungen geringe Reste davon im Ultraschallbad. Eine Möglichkeit zur Behebung dieses Problems könnte die Modifikation des Wannenbodens durch ein vergrößertes Gefälle sowie ein versetztes Bodenventil sein, was aber nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit realisiert werden konnte.

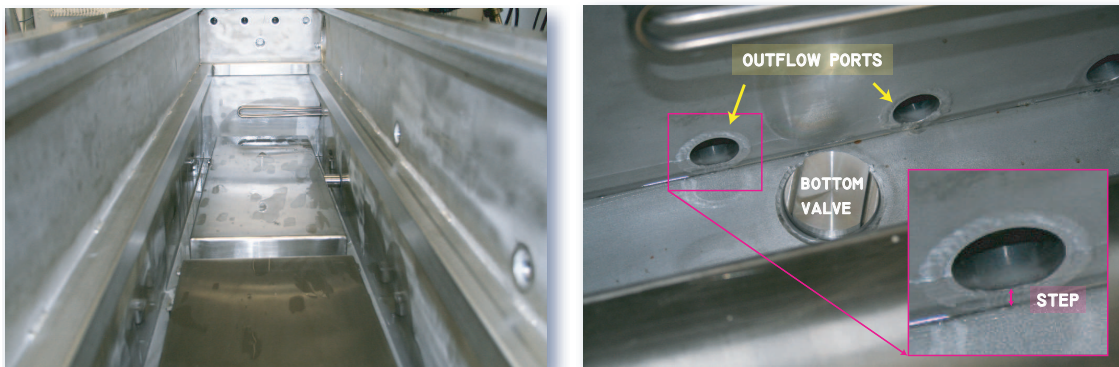


Abbildung 5.5: Details zur Ultraschallwanne; links: Innenansicht der Ultraschallwanne. Am Boden sind die rechteckigen Abdeckungen der Ultraschallgeber zu erkennen; rechts: Foto der Ausflussstutzen und des Bodenventils (Ventil 2).

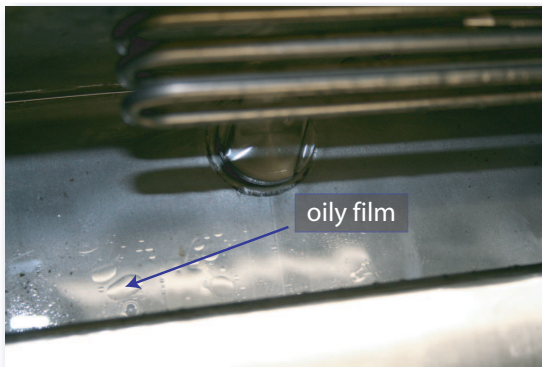


Abbildung 5.6: Detailansicht des Ausflussventils der Ultraschallwanne. Zu erkennen sind Restmengen von Wasser und Axarel, die nach dem Abpumpen durch das Bodenventil verbleiben.

Die Hochdruck-Sprühanlage

Die Spülgänge zwischen den Ultraschall-Reinigungsphasen werden über die im Deckel der Ultraschallwanne installierte Sprühanlage durchgeführt, siehe Abbildung 5.7. Die 38 feinen Düsen sind über die Ventile 13, 9 und 11 mit den beiden Reinstwassertanks verbunden. Die Pumpe D baut den für die Reinigung nötigen Druck auf und kann die Sprühdüsen entweder mit wiederverwendetem Wasser aus Tank 3 oder mit ultrareinem Wasser aus Tank 4 versorgen.

Das zum Absprühen des Reinigungsgutes verwendete Wasser wird verworfen und durch Ventil 1 in den Abfluss geleitet. Die beiden Reinstwassertanks werden über die Ventile 8 und 10 aus dem Zwischenspeicher (500l) der Reinstwasserbereitung nachgefüllt. Dabei wird das Wasser aus der Reinstwasserbereitung zuvor von der Pumpe F durch einen weiteren Filter gedrückt, um organische Schwebstoffe wie z.B. Algen zurückzuhalten, die sich eventuell im Laufe der Zeit im Zwischenspeicher der Reinstwasserbereitung angelagert haben könnten.

Filterung und Wiederverwendung der Flüssigkeiten

Aufgrund der Wiederverwendung von Axarel 9100™ ist in der Pumpstrecke vom Bad zurück zum Vorratstank 1 ein Filter eingebaut, der die Flüssigkeit von Schwebstoffen befreien soll. Auch das Reinstwasser in Tank 3 sollte einige Male wiederverwertet werden. Der Grund hierfür ist, dass die Reinstwasseranlage mit einer Produktion von etwa 30l/h nicht in der Lage ist, genügend Reinstwasser für mehrere Gesamt-Reinigungsgänge pro Tag zur Verfügung zu stellen, wenn der komplette Badinhalt (250l) Reinstwasser nach dem Ultraschall verworfen wird. Daher ist auch in dieser Pumpstrecke zurück zum Vorratstank 3 ein Filter positioniert. Das Reinstwasser in Tank 3 wird trotz dieser Filterung nach einigen Verwendungen regelmässig ausgetauscht, um eine zu starke Vermischung mit der alkalischen Lösung zu vermeiden und eine dauerhaft gleichbleibend gute Reinigungswirkung zu gewährleisten. Dieses wiederverwendete und somit nicht ultrareine Wasser ist jedoch dasselbe, welches zum Absprühen des Reinigungsgutes nach den Ultraschallbehandlungen mit Axarel 9100™ und P3-almeco™ 36 verwendet wird. Ein Problem ergibt sich beim Abspülen nach der Reinstwasser-Ultraschallbehandlung, da dies der letzte Reinigungsschritt vor dem Trocknen ist. Daher wird für diesen Spülgang frisches Wasser aus Tank 4 verwendet. Die-

ser Tank wurde installiert, da ein Durchlauferhitzer mit dem benötigten Durchfluss (ca. 30 l/min) bei einer Soll-Temperaturdifferenz von 60 °C eine Leistung von 120 kW benötigen würde. Daher wurde ein weiterer kleinerer Tank (200 l) mit eigener Heizung realisiert, der allein für dieses letzte Spülen mit Reinstwasser zur Verfügung steht.

Die P3-almeco™ 36-Lösung wird nicht gefiltert, obwohl auch diese mehrmals wiederverwendet wird. Gründe hierfür liegen vor allem im hohen Preis der Filtereinsätze und dem Umstand, dass die preisgünstige P3-almeco™ 36-Lösung in regelmäßigen Abständen erneuert werden soll.

Transportabilität der Anlage

Die Ultraschallanlage wurde modular konstruiert, um einen einfachen Transport der Anlage zu ermöglichen. Dieser könnte eventuell im Rahmen des Einbaus der Drahtelektrode in Karlsruhe in das Hauptspektrometer sinnvoll sein. Es kann beim Transport oder beim Einbau der einzelnen Module zu Verunreinigungen oder Beschädigungen kommen, deren Behebung mit der Ultraschallreinigungsanlage vor Ort wesentlich schneller und einfacher von statten gehen würde. Die einzelnen Komponenten der Ultraschallanlage sind so dimensioniert, dass sie mit einem Hubwagen verfahrbar sind und den Normen für LKW-Laderäume entsprechen. Die Höhe wurde so gewählt, dass die Module nach Demontage der FüÙe durch die meisten Labortüren passen. Zur Trennung der einzelnen Module müssen lediglich die Verrohrungen zwischen der Reinstwasserbereitung und den Reinstwasser-Vorrattanks, sowie zwischen dem Ultraschallbad und den Vorrattanks, gelöst werden und am Bestimmungsort nach dem Transport wieder verschraubt werden. Details zu den verwendeten Geräten finden sich in Abschnitt 5.2.3.

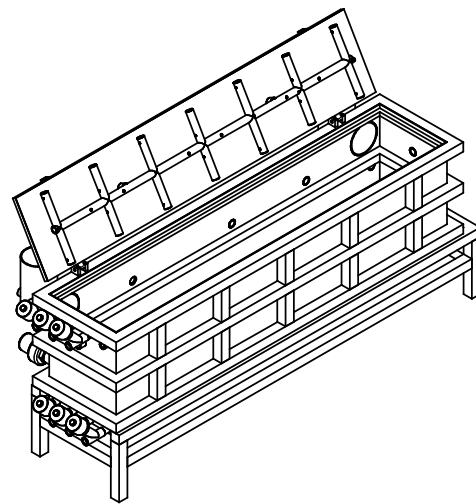
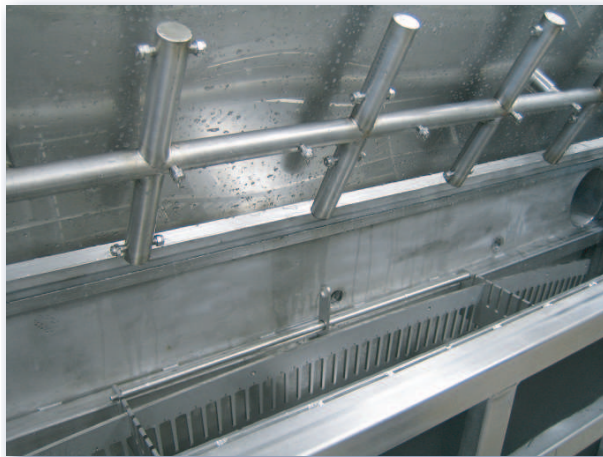


Abbildung 5.7: Detailansicht Düsenanlage: Durch die Rohrstruktur wird das Wasser mit einem Gesamtdurchfluss von etwa 0,5 l/s an die feinen Düsen verteilt. Schematische Zeichnung von H. Baumeister.

5.2.1 Reinstwasserbereitung

Ein großer Teil des für den Betrieb der Reinigungsanlage benötigten Reinstwassers kann wiederverwendet werden. Dennoch werden pro Reinigungsvorgang etwa 150 Liter Reinstwasser verworfen. Diese Menge ist zu groß, um sie in Kanistern anliefern zu lassen und die Gebäude der Kernphysik verfügen nicht wie die der Chemie über eine eigene Reinstwasseranlage, über welche die Wasserversorgung des Komplexes gespeist wird. Für die Ultraschallanlage musste deswegen ein eigener Aufbau zur Wasseraufbereitung realisiert werden. Dazu wurden Teile eines älteren, bereits vorhandenen Aufbaus ausgebaut und wiederverwendet. Zwei 500 Liter fassende Kunststoffbehälter dienen als Speichergefäße für die zweistufige Reinstwasseranlage. Eine Schemazeichnung zu ihrem Funktionsprinzip findet sich in Abbildung 5.8.

Die Anlage wird mit normalem Leitungswasser versorgt, welches zunächst durch einen Partikelfilter gepumpt wird. Zusätzlich wird dahinter ein feinerer Molekularfilter eingesetzt. Dieser ist zugleich der Teil der Anlage, der durch den geringsten Durchsatz die Reinstwasser-Produktionsrate bestimmt. Durch den Molekularfilter können mit der vorhandenen Pumpleistung etwa 30 Liter pro Stunde gedrückt werden. Dies begrenzt die Zahl der möglichen Reinigungsvorgänge auf etwa 4 pro Tag, berücksichtigt man die Kapazität des Speichergefäßes. Das Permeat wird im ersten der zwei 500-Liter-Tanks aufgefangen. Ein Ionentauscher entfernt in einem weiteren Filtervorgang alle geladenen Teilchen. Der Ionentauscher besteht aus einem Metallvolumen, das vollständig mit einem Harzgranulat gefüllt ist. Dieses besitzt eine sehr große Oberfläche, an der sich die im Permeat befindlichen Ionen bevorzugt anlagern. Nach einer gewissen Zeit ist das Harz gesättigt und muss ausgetauscht werden. Das gereinigte Wasser wird von dort in das zweite Speichergefäß geleitet und steht zur Verwendung in der Ultraschallreinigungsanlage bereit. Ein

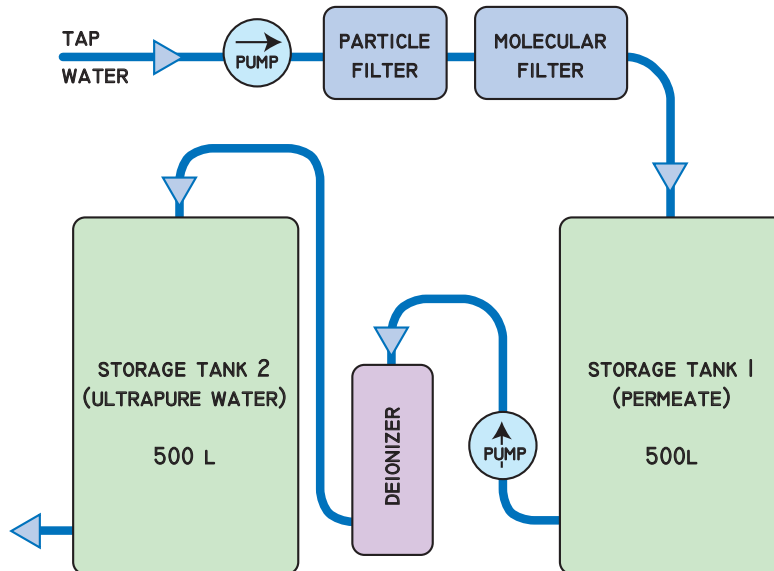


Abbildung 5.8: Schema der Reinstwasseranlage. Das Leitungswasser wird durch verschiedene Filter und einen Ionentauscher gepumpt und so auf einen Widerstandswert von 5 bis 6 M Ω /cm gebracht.

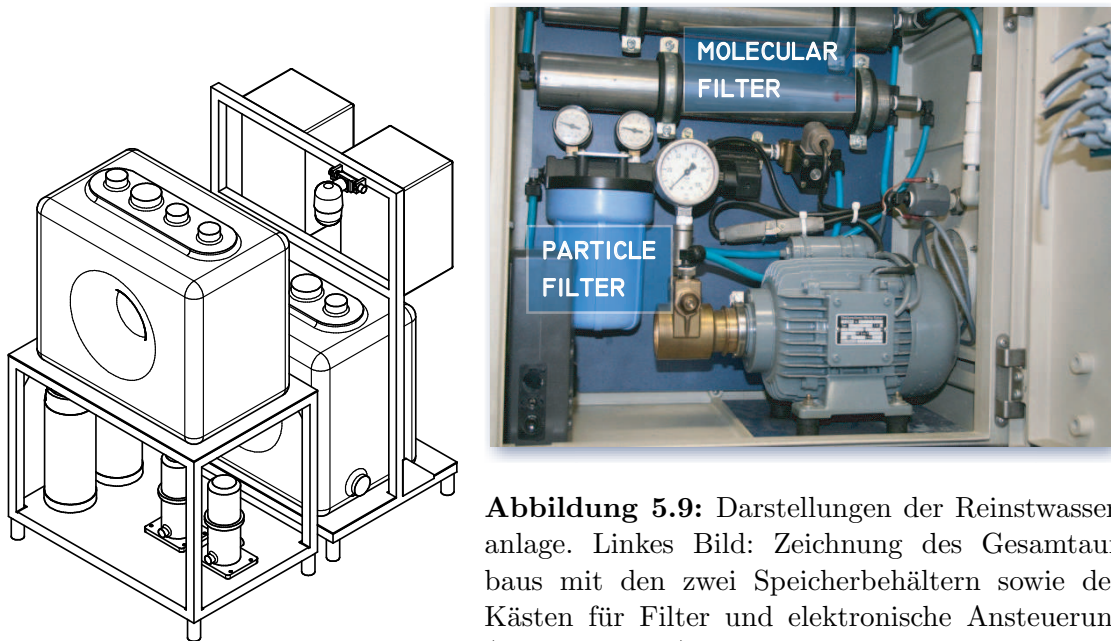


Abbildung 5.9: Darstellungen der Reinstwasseranlage. Linkes Bild: Zeichnung des Gesamtaufbaus mit den zwei Speicherbehältern sowie den Kästen für Filter und elektronische Ansteuerung (H. Baumeister). Rechtes Bild: Das Innere des Filterschranks mit Partikel- und Molekularfilter

Foto der Filteranlage, sowie eine Zeichnung des Aufbaus der Reinstwasseranlage sind in Abbildung 5.9 zu sehen.

5.2.2 Konzepte zur Drahtreinigung

Die bisher beschriebene und bereits installierte Anlage ist für die UHV-Reinigung von größeren Edelstahlbauteilen geeignet. Die Säuberung der etwa 42 km Edelstahldrähte, die in die Modulrahmen gespannt werden, erfordert Modifikationen an der vorhandenen Ultraschallanlage. Durch die große Anzahl der Drähte mit einer Gesamtoberfläche von etwa 33 m² liefern sie einen durchaus messbaren Beitrag zur Gesamtausgasrate der Module. Außerdem kam der Draht während des Herstellungsprozesses intensiv mit Schmierstoffen wie Öl und Fett in Kontakt, so dass Rückstände auf der Drahtoberfläche möglich sind. Daher benötigen sie eine ebenso gründliche Reinigung wie die anderen Bauteile für die Hauptspektrometerelektrode.

Die Edelstahldrähte werden auf Rollen zu je ca. 11 km (0,2 mm Durchmesser) und 7,5 km (0,3 mm Durchmesser) gewickelt geliefert. Die einzelnen Windungen liegen auf der Rolle dicht nebeneinander, so dass zur Reinigung in jedem Fall der Draht vollständig abgewickelt werden muss. Für das prinzipielle Vorgehen bei der Drahtreinigung bieten sich verschiedene Konzepte an. Um das vorhandene Ultraschallbad zu nutzen, wäre eine Möglichkeit, den Draht als Ganzes in Windungen auf ein Haltegestell zu spannen. Das bespannte Gestell könnte dann, genau wie die großen Modulteile, die normale Reinigungsprozedur in der Ultraschallreinigungsanlage durchlaufen. Mit dieser Methode wäre somit ein enormer Auf-

wand an manueller Bedienung, Vorbereitung und Logistik verbunden. Über 42 km Draht müssten per Hand auf ein Gestell gespannt und nach der Reinigung ohne Beschädigungen, Knicke und Verunreinigungen wieder aufgerollt werden. Da ein kompletter Reinigungsvorgang mehrere Stunden dauert, kommt hier auch der Zeitfaktor zum Tragen. Vermutlich werden nur etwa zehn Reinigungsdurchgänge pro Woche durchführbar sein. Um für die Drahtreinigung nicht mehr als 4 Wochen Zeit zu investieren, müsste das Drahtgestell eine Länge von über 1 Kilometer Draht gleichzeitig spannen können.

Wird die Möglichkeit in Betracht gezogen, das vorhandene Ultraschallbad bei der Drahtreinigung zwar zu nutzen, aber grundlegend zu modifizieren, ergibt sich ein weiteres Konzept. Dabei werden drei kleinere Edelstahlwannen in die mit Wasser befüllte Ultraschallwanne eingehängt. Diese kleineren Wannen sind permanent mit den drei Lösungsmitteln Axarel 9100™, P3-almeco™ 36 und Reinstwasser gefüllt, siehe Abbildung 5.10. Durch die kleinen Gefäße wird nun der zu reinigende Edelstahldraht über große Umlenkrollen geführt. Um Verschleppungen der Flüssigkeiten untereinander zu vermeiden, wird der Draht abgespült, bevor er in das nächste Medium eintritt. Während er die drei Bäder durchläuft, sind die Ultraschallgeneratoren aktiviert, und das Wasser im großen Bad überträgt den Ultraschall auf die kleineren Wannen. Bei diesen ist auf eine möglichst geringe Wandstärke zu achten, damit die Abschirmwirkung der Wannen für den Schall minimiert wird. Nachdem der Draht das Wasserbecken durchlaufen hat und abgespült wurde, kann er mittels eines Heißluftgebläses getrocknet werden und auf eine große Rolle aufgerollt werden.

Ein Vorteil dieser Reinigungsmethode ist, dass der Draht durch die Ultraschallbäder bewegt wird und keine Stellen existieren, an denen er keine Reinigung erfährt. Zudem kann der Draht nach der Reinigung kontrolliert auf eine Rolle gewickelt werden, die einen großen Durchmesser hat, und verliert dabei schon einen Teil der beim Ablängen eher störenden Eigenbiegung. Diese Methode der automatischen Drahtreinigung ist relativ schnell, auch wenn immer nur ein Bruchteil der Gesamtdrahtlänge das Bad passiert. Durch weitere Rol-

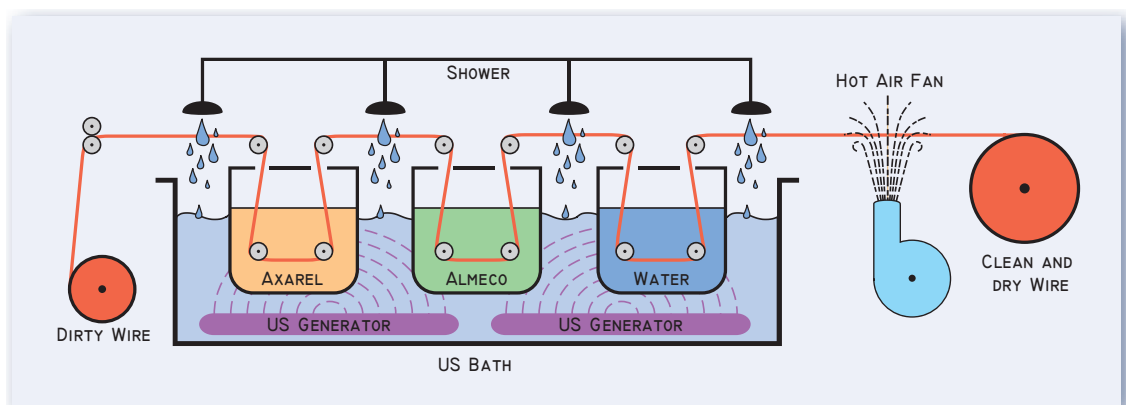


Abbildung 5.10: Schemazeichnung für das Konzept der Drahtreinigung. Der Draht wird sequenziell durch die kleinen Behälter mit den verschiedenen Reinigungsmitteln geführt und anschließend getrocknet.

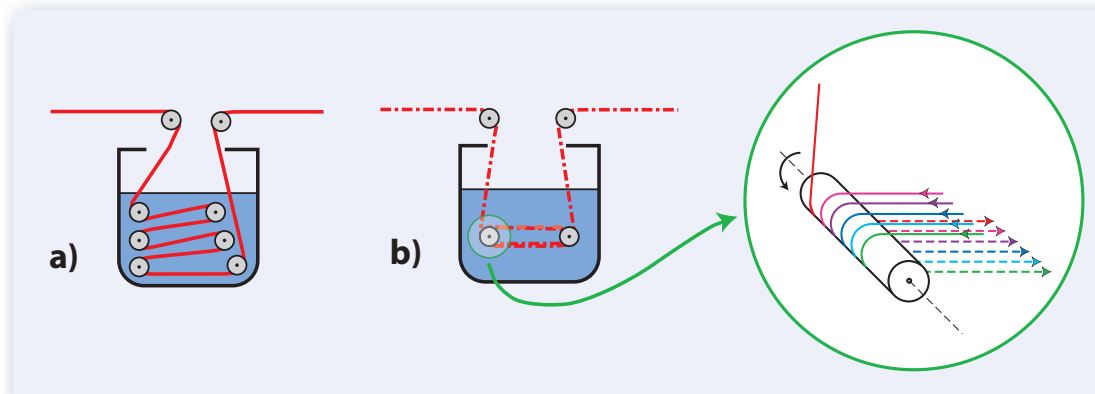


Abbildung 5.11: Detailzeichnung zur Drahtreinigung. a) Durch Erhöhung der Anzahl der Umlenkrollen wird die Drahtlänge in der Reinigungsflüssigkeit um etwa einen Faktor 5 vergrößert; ebenso kann dieser Effekt durch Verwenden von Walzen statt Rollen wie in b) erzielt werden.

len oder Walzen innerhalb der einzelnen Bäder könnte die Länge des Drahtes, die sich zur selben Zeit im Bad befindet, vergrößert werden, siehe auch Abbildung 5.11. Bei gleicher Beschallungszeit würde sich somit die Durchlaufgeschwindigkeit des Drahtes um ein Vielfaches erhöhen und könnte z.B. bei 10 bis 20 m in der Minute liegen. Damit wäre es möglich, eine Rolle Draht von etwa 7,5 km Länge vollautomatisch innerhalb eines Tages zu reinigen (1,7 bis 0,85 h/km), wohingegen das manuelle Aufspannen derselben Länge auf ein Haltegestell wesentlich länger dauern würde.

Der Nachteil der Methode ist der aufwändige Umbau des Ultraschallbads und der Kosten- und Zeitfaktor für die Konstruktion des Rollensystems und der drei zusätzlichen kleinen Wannen. Jedoch sind auch bei der zuvor beschriebenen Methode Kosten zu erwarten, z.B. für den Bau der speziellen Haltestruktur. Hinzu käme die Arbeitszeit der Personen, die diese Gestelle bespannen müssten.

Daher ist die letztere, automatische Methode der Drahtreinigung zu favorisieren. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden nur das Konzept zur Drahtreinigung entwickelt und die entsprechenden mechanischen Vorkehrungen wie Durchführungen für den Draht in der Ultraschallwanne getroffen. Die technische Umsetzung wird stattfinden, wenn das Konzept zur halbautomatischen Bespannung der Drahtmodule vorliegt.

5.2.3 Beschreibung und Funktionsweise der verwendeten Hardware

Bei der Wahl der verwendeten Hardware wurde speziell darauf geachtet, dass sie in Kombination mit den Reinigungsflüssigkeiten verwendet werden kann und über Relais elektrisch fernsteuerbar ist. Da Kunststoffe und viele Leichtmetalle wie Kupfer von Axarel 9100™ angegriffen werden, bestehen alle Rohre aus Edelstahl mit einem Durchmesser von einem

Zoll. Auch das Innere der Pumpen, Ventile und Filter musste daher aus Edelstahl gefertigt sein, ebenso wie die Abdeckungen der Ultraschallgeber in der Wanne.

Ultraschallgeneratoren

Zur Erzeugung des Ultraschalls in der Wanne werden zwei Ultraschallgeber verwendet, die jeweils von einem Frequenzgenerator der Firma Sonic Digital (LC 1500 TD 40 B) angesteuert werden. Jeder der Schallgeber besitzt eine Leistung von 1,5 kW bei einer Schallfrequenz von 40 kHz. Dies ist zusammen ausreichend, um die etwa 250 l Badinhalt zu beschallen. Ein Ultraschallgeber ist aufgebaut aus 30 einzelnen Schwinggebern, die zum Schutz vor mechanischer Beschädigung unter einer Edelstahlabdeckung positioniert sind. Die Abmessungen eines Ultraschallgebers sind etwa 85 cm Länge und 30 cm Breite. Damit decken sie beinahe die gesamte Grundfläche der Wanne ab. Die Schallgeber bzw. die Edelstahlabdeckungen sind zu sehen in Abbildung 5.5.

Die Aktivierung der Ultraschallgeber kann über ein internes Relais durch Kurzschließen zweier Ports über den Rechner ferngesteuert werden. Optional steht zusätzlich eine Handfernsteuerung zur Verfügung, mit deren Hilfe Leistung und Frequenz eingestellt werden können. Beim Betrieb der Ultraschallgeber ist auf ausreichende Bedeckung mit Wasser zu achten, damit sie die im Inneren erzeugte Leistung an das Medium abgeben können. Besteht diese Möglichkeit nicht, wandelt sich die erzeugte Ultraschalleistung in Wärme um und schädigt die Ultraschallgeber.

Verschiedene Pumpentypen

Beim Aufbau des Flüssigkeitsmanagements wurden insgesamt vier verschiedene Pumpentypen eingesetzt. Die Pumpen B, C und F in Abbildung 5.4 sind Kreiselpumpen aus Edelstahl von Grundfos (CRNE 5). Sie können über ein Relais ferngesteuert werden und besitzen einen Meldeausgang, der z.B. Informationen über den Status der Pumpe oder Fehlermeldungen ausgibt. Diese Druckerhöhungspumpen werden eingesetzt, um Reinst-

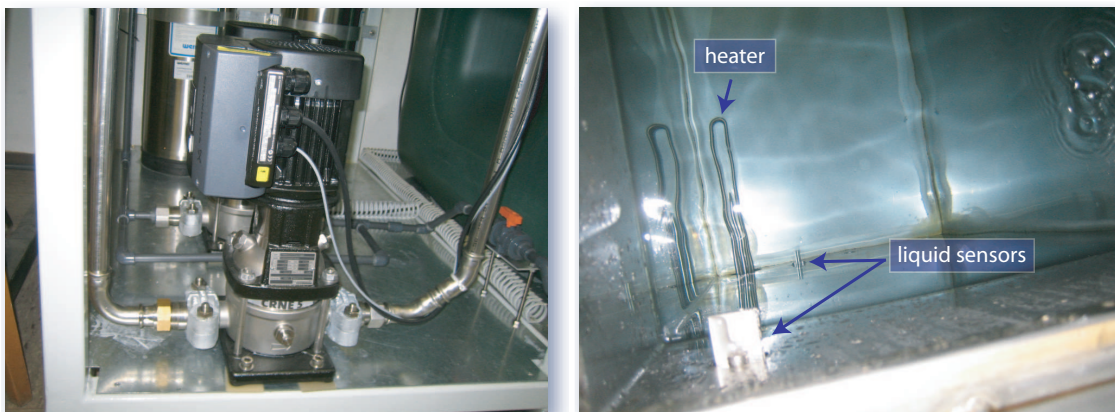


Abbildung 5.12: Detailansichten der Hardware. Links: Pumpe F, die die Reinstwasser-Vorrattanks nachfüllt, rechts: Blick von oben in einen Vorrattank.

wasser von der Reinstwasserbereitung in die Tanks 3 und 4 nachzufüllen, sowie um Wasser und P3-almeco™ 36 vom Ultraschallbad in die Vorratstanks zurückzupumpen. Diese Pumpenart saugt nicht, es muss ständig eine blasenfreie Flüssigkeitssäule am Ansaugstutzen anstehen, damit sie einwandfrei funktioniert. Zudem ist sie nicht geeignet, hohe Drücke zu erzeugen. Für Pumpe D, die die Dusche im Tankdeckel mit Hochdruck-Reinstwasser versorgt, musste daher eine andere Pumpenart verwendet werden. Es kam hier eine Kolbenpumpe der Firma Grundfos (CRN 1) zum Einsatz. Diese ist eigens dafür konstruiert, hohe Drücke bei hohem Flüssigkeitsdurchsatz zu liefern. Für die Pumpe A wurde eine andere Pumpe der Firma Speck eingesetzt. Entscheidend war dafür die Fähigkeit, auch lufthaltige Flüssigkeiten fördern zu können, da diese Pumpe das Axarel 9100™ möglichst vollständig durch das Bodenventil in den Vorratstank zurückpumpen soll. Gerade gegen Ende des Pumpvorgangs zieht die Pumpe dabei mehr Luft als Flüssigkeit, da das Bad nur eine geringe Neigung zum Bodenventil aufweist und dementsprechend eine sehr geringe Ablaufgeschwindigkeit besitzt. Bei der Wahl der Pumpen musste zusätzlich darauf geachtet werden, dass das Innere der Pumpe korrosionsbeständig ist und die Flüssigkeiten nicht verschmutzt werden können z.B. durch Schmierstoffe. Die Pumpe E hat als einzige Aufgabe, die Reste aus dem Bad in den Abfluss zu befördern. Dazu wurde eine einfache und preisgünstige Kolbenpumpe verwendet.

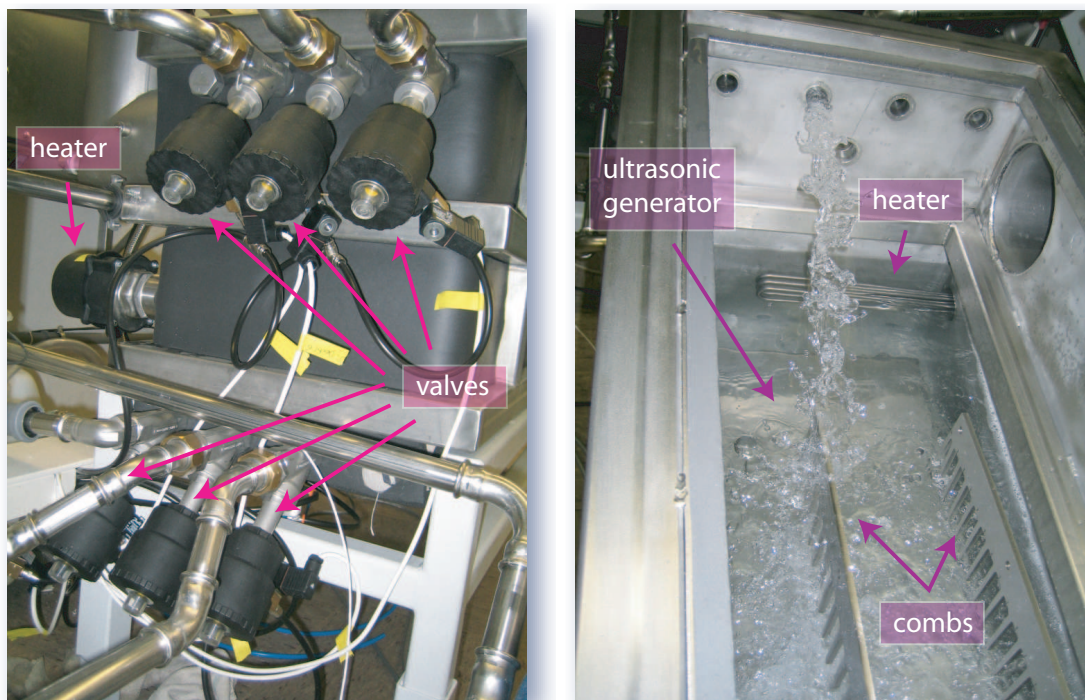


Abbildung 5.13: Details des Ultraschallbads. Links: Blick auf die Zu- und Abflüsse der Ultraschallwanne mit Ventilen, rechts: Aufnahme beim Einlauf von P3-almeco™ 36.

Ventile, Heizungen und Filter

Als Ventile am Ultraschallbad und den Vorratstanks wurden insgesamt 14 pressluftgesteuerte 2/2-Wege Ventile der Firma Danfoss (Typ AV210) verwendet. Die Pressluftsteuerung wird über Danfoss 3/2-Wege Ventile durchgeführt, die ihrerseits mittels einer Magnetspule über 230 V schaltbar sind. Eine Abbildung der Rückseite der Ultraschallwanne mit den Zu- und Abflüssen sowie den entsprechenden Ventilen ist in Abbildung 5.13 zu finden. Die Ventile sind stromlos geschlossen, damit bei einem eventuellen Stromausfall die gesamte Anlage kontrolliert stillgelegt wird.

In der Reinigungsanlage wurden insgesamt fünf elektrische Einschraubheizkörper der Firma EGO (Typ 29.501.45.000) eingesetzt. Diese sind nach dem Tauchsiederprinzip aufgebaut und besitzen jeweils 4,5 kW Leistung. Man erkennt sie deutlich auf dem Foto in Abbildung 5.13, welches das Innere der Ultraschallwanne zeigt, sowie in Abbildung 5.12 rechts. Sie werden mit Drehstrom versorgt und besitzen eine einfache interne Temperaturregelung über einen Bimetallkontakt, der bei einer einstellbaren Temperatur automatisch schaltet. Zwischen den Heizstäben ist dazu ein Fühler eingebaut, über den die Wassertemperatur gemessen und geregelt wird. Damit die Heizkörper immer von Wasser bedeckt sind, wurden sie in den Vorratstanks unterhalb des Auslassventils eingebaut. Ein zusätzlicher Heizkörper befindet sich in der Ultraschallwanne, er wird aber nur bei der Drahtreinigung eingesetzt werden.

Die Reinigungsflüssigkeiten werden zum Teil gefiltert (siehe Kapitel 5.2), dies geschieht mittels dreier Edelstahl-Mikropartikelfilter der Firma Hydac (1350791 SZ-3-10-MS-V). Eine Verschmutzungsanzeige schaltet ein Melderelais, falls der Durchfluss unter einen bestimmten Wert fällt. Die Filterelemente können durch Rückspülen gereinigt werden.

6 Elektrische Ansteuerung der Ultraschallanlage

Ein Reinigungsvorgang in der Ultraschallanlage sollte nach dem Beladen mit dem Reinigungsgut vollständig automatisch ablaufen. Die gesäuberten Drahtelektrodenbauteile werden direkt danach aus dem Ultraschallbad entnommen und in den Reinraum transportiert, um sie vor weiteren Verunreinigungen und Staub zu schützen. Dazu übernimmt ein Computer die Steuerung und Überwachung der einzelnen Komponenten der Anlage während des Reinigungsprozesses. Eine Übersicht zur elektrischen Ansteuerung der Ultraschallanlage findet sich in Abbildung 6.1.

Mit der Software LabVIEW von National Instruments (<http://www.ni.com/labview/>) wurde ein Programm entwickelt, welches über digitale I/O Ports Schaltelemente und damit die Komponenten der Ultraschallanlage wie Pumpen, Ventile und Ultraschallgeber, ansteuert. Über eine im PC installierte Messkarte werden zudem Temperatur- und Füllstandssensoren, die zur Statusüberwachung der Anlage dienen, ausgelesen.

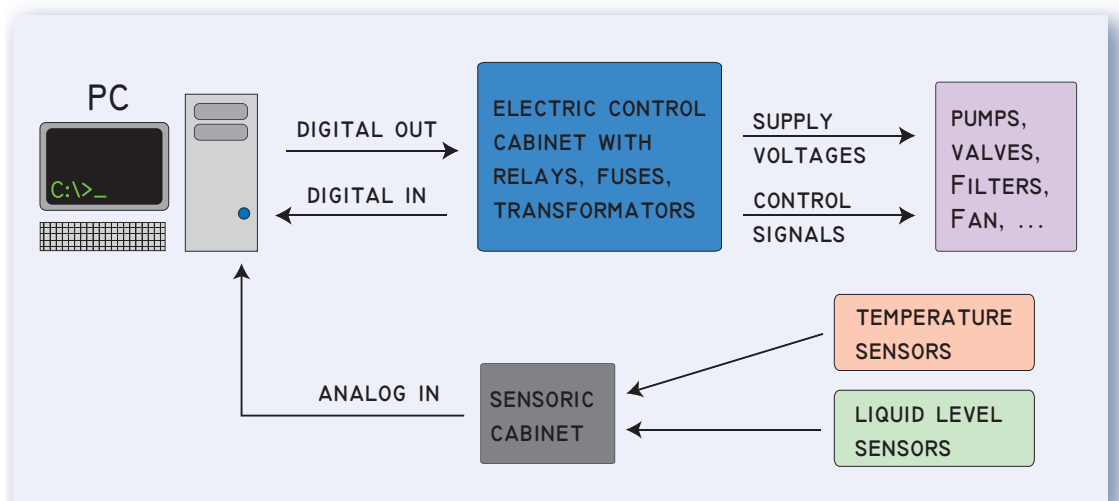


Abbildung 6.1: Übersicht zur elektrischen Ansteuerung der Ultraschallanlage. Der PC liest über zwei verschiedene eingebaute Karten 32 digitale und 16 analoge Eingänge aus, außerdem besitzt er 32 digitale Ausgänge, welche die Schaltelemente im Schaltschrank steuern.

6.1 Schnittstelle zwischen PC und Hardware

Die Kommunikation des PC mit der Schaltelektronik, also in erster Linie den Halbleiterrelais, findet über die PCI-Karte „PCI-7432“ der Firma Adlink statt. Sie verfügt über je 32 digitale, optisch isolierte Ein- und Ausgänge. Die Eingänge können mit 0 bis 24 Volt gegen den zugehörigen COM-Port der Karte beschaltet werden und erkennen eine anliegende Spannungsdifferenz von über 5 Volt als digitales „high“, eine Spannungsdifferenz von weniger als 1,5 Volt wird als „low“ ausgelesen. Dabei können zwei verschiedene Signalarten ausgelesen werden, wie in Abbildung 6.2 dargestellt ist. Im ersten Fall liegt am COM-Port dauerhaft „GND“, also Masse, an. Wird auf einen der jeweils 8 zugehörigen Eingangskanäle eine positive Signal-Spannung gelegt (Source-Schaltung), fließt zwischen COM und dem Eingangskanal ein Strom über eine Leuchtdiode. Eine Photodiode registriert das ausgesandte Licht. Diese optische Kopplung schützt die Karte vor Überspannungsschäden und ermöglicht die Auslese einer weiteren Signalart. Denn oft liegen Signale in einer Form vor, bei der bei einem digitalen „high“ eine konstante Spannung auf GND geschaltet wird (Sink-Schaltung). In diesem Fall muss am COM-Port eine Referenzspannung in Höhe der konstanten Spannung anliegen, damit zwischen dem COM-Port und dem Eingangskanal (GND), wie im ersten Fall, ein Strom über die Leuchtdiode fließt.

Die digitalen Ausgänge der Karte können nur Signale der zweiten Art erzeugen, sie schalten bei dem logischen Befehl „high“ des PC's den angesprochenen Port auf GND, siehe dazu Abbildung 6.3. Die Schaltspannung liegt dann gegen den zugehörigen „VDD“-Port der Karte an, der über eine externe Spannungsquelle mit einer Spannung von 5 bis 35 V versorgt werden kann. Wie bei den Eingängen sind je 8 Ausgänge einem VDD-Port zugeordnet. Für die Ansteuerung der Halbleiterrelais, welche die Stromversorgung der Ventile und Pumpen, sowie die Leistungsschütze schalten, genügen jedoch 5 V, die von einem separaten Netzgerät im Hauptschaltschrank zur Verfügung gestellt werden. Die Karte hat

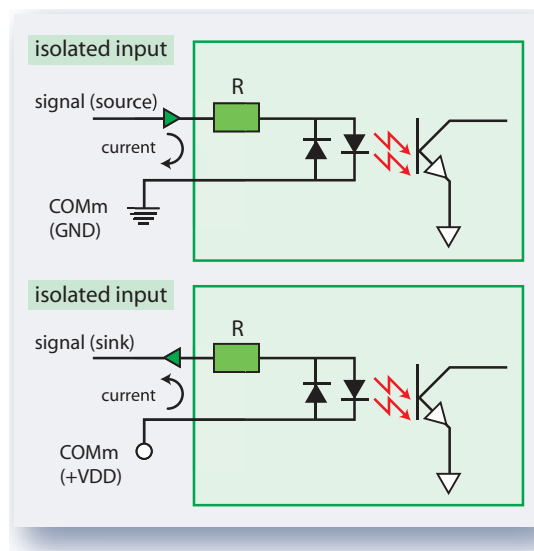


Abbildung 6.2: Mögliche Beschaltungen der digitalen Eingänge der PCI-7432. Oben: Source-Schaltung, das Signal besteht aus einer gegenüber GND positiven Spannung; unten: Sink-Schaltung, der Eingangsport wird auf GND gezogen. Zeichnung nach [ADL03].

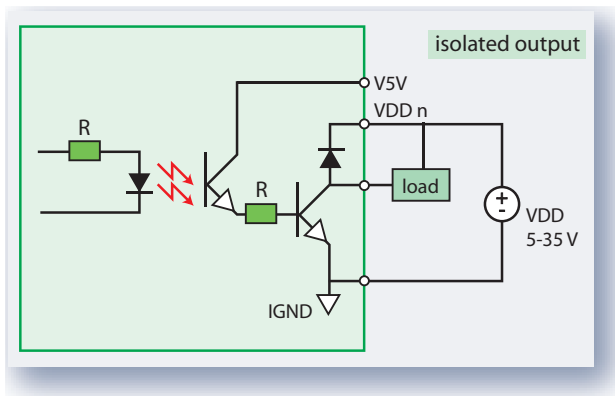


Abbildung 6.3: Schaltung der digitalen Ausgänge der PCI-7432 (Common Ground Connection). Zeichnung nach [ADL03].

einen 100-poligen zweireihigen Anschlussstecker an der Rückseite des Rechners, der über ein Spezialkabel mit einem Anschluss-Klemmboard, ebenfalls von der Firma Adlink, verbunden werden kann. Dieses verteilt die verschiedenen Anschlüsse (siehe Tabelle A.3 im Anhang) auf nummerierte Schraubklemmen, die in vier Reihen auf dem Board angebracht sind und das Anschließen der Signalkabel an die Ein- und Ausgänge der PCI-Karte erleichtern. Tabellen A.2 und A.1 im Anhang geben einen Überblick über die Belegung der Ein- und Ausgänge der PCI-Karte mit den entsprechenden durch Relais angesteuerten Geräten.

Für die Auslese der Temperatur- und Füllstandssensoren ist im Steuercomputer die Multifunktions-DAQ-Karte PCI-20098C von Intelligent Instrumentation installiert. Für den Einsatz mit der Ultraschallanlage werden die 16 analogen Eingänge verwendet. Die Karte ist über ein Spezialkabel mit einem Connection-Board verbunden und hat drei verschiedene wählbare Messbereiche, 0 bis 10 Volt, 0 bis 5 Volt oder -10 bis +10 Volt. Für den Einsatz mit der vorgeschalteten TTL-Ausleseelektronik der Sensoren ist der Messbereich 0 bis 5 Volt besonders geeignet. Eine Belegung der analogen Kanäle der Multifunktions-Karte findet sich in Tabelle A.4. Die Füllstandssensoren werden über die analogen Eingänge der PCI-20098C ausgelesen, obwohl die Sensoren nur eine digitale Information ausgeben. Der Grund hierfür liegt in der geringen Signalspannung der in den Sensoren verwendeten TTL-Elemente von etwas unter 5 V, die nicht sicher von der digitalen PCI-7432-Karte als „high“ erkannt wird. Beide verwendeten Karten können mittels der mitgelieferten LabVIEW-Treiber vom Rechner angesteuert und ausgelesen werden.

6.2 Die Elektroinstallation der Schaltelemente

Wird durch den PC ein Gerät angesprochen, setzt die digitale PCI-7432-Karte ein 5 V-Signal am entsprechenden Ausgangsport des Connection Boards. Die Weiterverarbeitung dieses Signals hängt von der Leistung und der Betriebsspannung des Endgeräts ab. Einen Überblick über die Ansteuerung der Geräte gibt die Abbildung 6.4. Der einfachste Fall der Ansteuerung liegt vor, wenn das Gerät mit 230 V betrieben werden kann und seine Verbrauchsleistung unter 1,25 kW liegt. Es ist dann möglich, die Versorgungsspannung des

Geräts direkt durch ein Halbleiterrelais zu schalten, dem die 5 V der PCI-7432-Karte als Schaltsignal genügen. Dieses Prinzip wurde bei den Ventilen, sowie den Pumpen A und E realisiert, siehe dazu Abbildung 6.4.

Andere Geräte, vor allem diejenigen, deren Funktion über einen internen Microprozessor geregelt wird, besitzen ein internes Relais als Fernsteuerungseingang. Man sollte diese Geräte durch Kurzschließen des Fernsteuerungsports mit GND aktivieren, und das Einschalten über die Stromversorgung vermeiden, da z.B. die Kreiselpumpen nur 3 bis 4 mal in der Stunde über die Netzspannung geschaltet werden dürfen. Für das Schalten der Signalleitung werden die gleichen Halbleiterrelais wie im vorigen Fall verwendet. Zu den auf diese Weise fernsteuerbaren Geräten gehören die zwei Ultraschallgeneratoren, die Pumpen B, C, und F sowie der Ventilator.

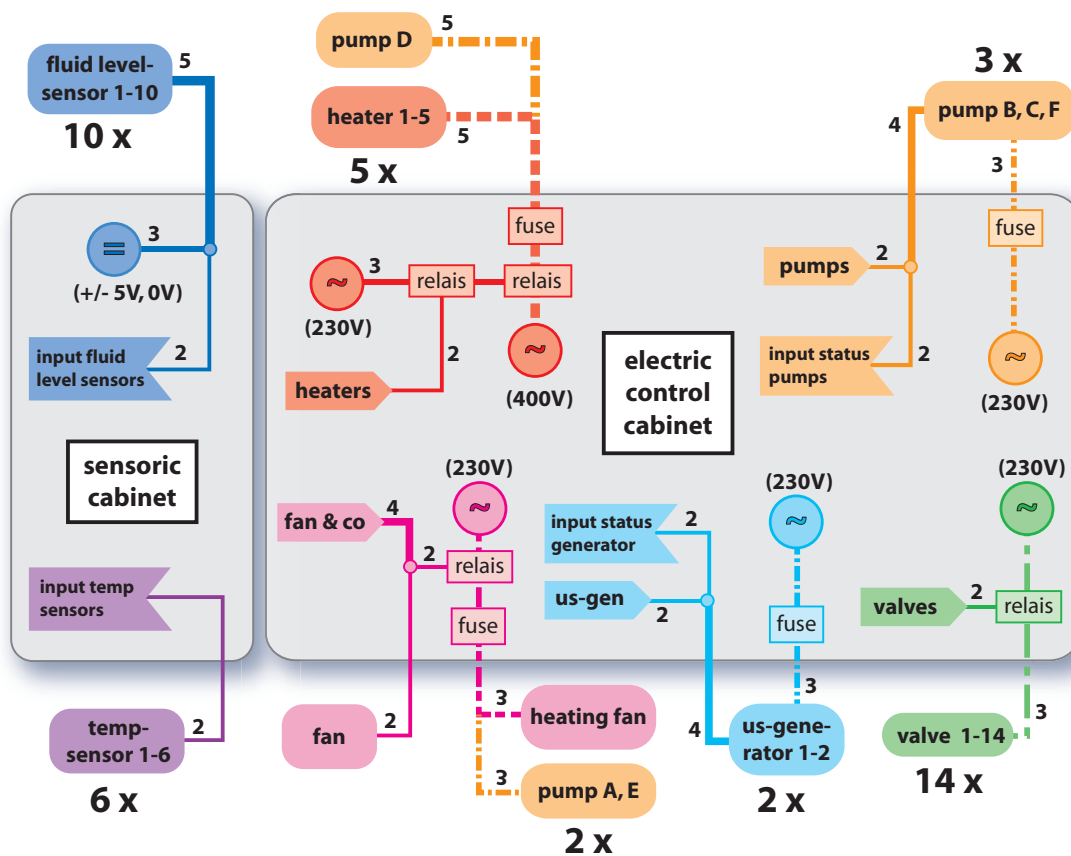


Abbildung 6.4: Schemazeichnung der Ansteuerung der Schaltelemente im Hauptschaltschrank. Die Strichstärke der Verbindungen und die kleinen Zahlen daneben geben die Anzahl der Leitungen im Kabel an. Eingänge und Ausgänge der Karten sind durch breite Pfeile gekennzeichnet.

Es kommen bei der Ultraschallreinigungsanlage auch Geräte zum Einsatz, die eine Drehstromversorgung benötigen, dazu gehören die fünf Einschraubheizkörper und Pumpe A. Die Heizkörper besitzen eine einfache interne Temperaturregelung und deaktivieren sich bei Erreichen einer einstellbaren Solltemperatur selbstständig. Die Versorgungsspannung kann über ein dreiphasiges Schütz geschaltet werden, welches wiederum über ein Halbleiterrelais angesteuert wird. Pumpe A wird geschaltet durch Anlegen bzw. Unterbrechen der Versorgungsspannung, sie benötigt kein weiteres Steuersignal. Dies geschieht ebenso wie bei den Heizkörpern über ein dreiphasiges Schütz.

Die Stromversorgung jedes Geräts ist über einen der Leistung des Verbrauchers entsprechenden Sicherungsautomaten geführt, der auch eine selektive manuelle Abschaltung ermöglicht.

Die Installation der Sicherungen, Schütze und Relais wurde auf Hutschienen in einem spritzwassergeschützten Schaltschrank vorgenommen. Ein Foto dieses Schanks ist in Abbildung 6.5 gezeigt. Bei der Aufteilung der Verbraucher auf die Anschlüsse der Spannungs-

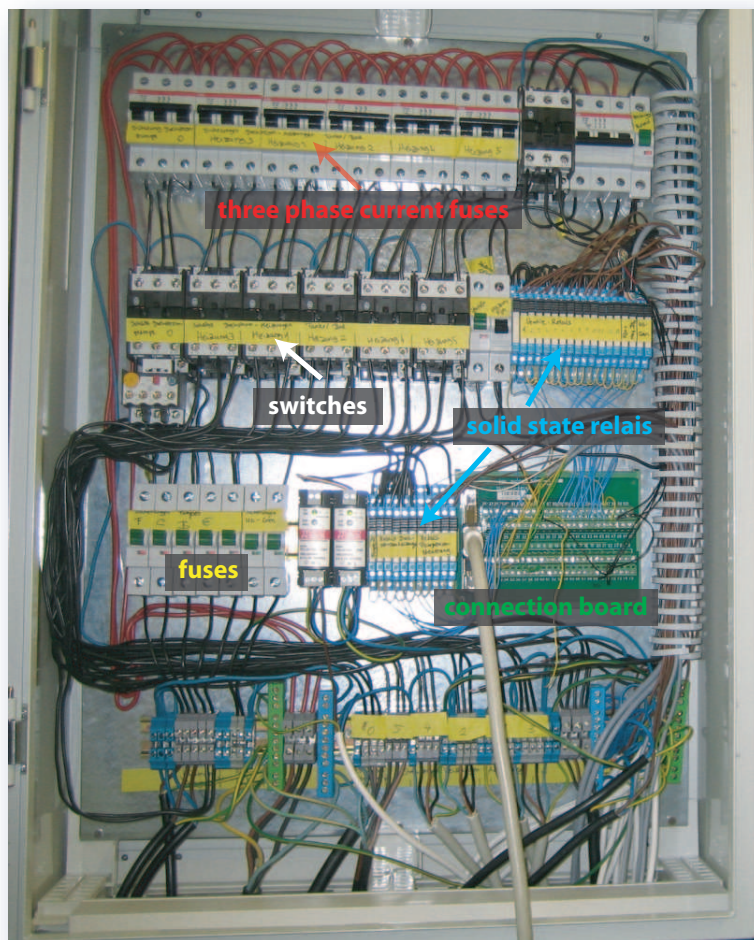


Abbildung 6.5: Foto des Hauptschalt-schranks. In diesem sind alle elektrischen Schaltelemente, die zur Steuerung der Reinigungsanlage benötigt werden, installiert. Dies sind unter anderem Schütze, Halbleiterrelais, Sicherungen sowie Netzteile. Auch das Connection-Board der PCI-7432-Karte ist auf einer Hutschiene angebracht.

versorgung musste darauf geachtet werden, dass die einzelnen Phasen der Drehstromanschlüsse nicht überbelastet werden. Da gewisse Komponenten, wie z.B. die Badheizung und die Tankheizungen, nicht parallel betrieben werden, ist es möglich, die Phasen rechnerisch überzubelegen, ohne dass die Belastung im Betrieb zu hoch ist. Tabelle 6.1 gibt die Leistungen der Verbraucher wieder und zeigt die Belegung der zwei zur Verfügung stehenden Drehstromanschlüsse (16 A, 32 A). Eine vollständige Dokumentation der elektrischen Installation findet sich in Anhang B.

6.3 Statusüberwachung mittels Sensorik

Um die Abläufe zeitlich steuern zu können und Informationen zum Status des Gesamtsystems zu erlangen, werden insgesamt 16 Sensoren an der Anlage montiert, die über die analogen Kanäle der PCI-20098C ausgelesen werden. Außerdem geben einige Geräte Statusmeldungen über interne Melderelais, wie zum Beispiel die Ultraschallgeneratoren und einige der Pumpen. Diese Signale werden dann von der digitalen PCI-Karte (PCI-7432) gelesen und im Programm des Steuerrechners ausgewertet. Für die analoge Sensorik wurde ein separater Metall-Schaltschrank an der Anlage montiert, der nur über die 230 V-Versorgungsspannung des Netzteils (-5 V, +5 V) mit dem Hauptschaltschrank verbunden ist. Die Trennung der beiden Bereiche ist aus Platzgründen erforderlich und dient zudem der Abschirmung, denn die im Hauptschaltschrank montierten Schütze könnten die empfindliche analoge TTL-Ausleseelektronik durch Spannungspulse und ausgesandte EM-Wellen während des Schaltvorgangs stören. Ein Foto des Sensorik-Schaltschranks ist in Abbildung 6.6 zu sehen.



Abbildung 6.6: Foto des Sensorik-Schaltschranks. Links im Bild das Netzteil (pink), das die Temperatursensoren (gelb) mit Spannung versorgt. Das Anschlussboard (grün) ermöglicht eine einfache Verbindung der Signale mit dem Rechner.

Tabelle 6.1: Leistungsverteilung der Elektroinstallation. Die verschiedenen Phasen der 16 A Drehstromversorgung werden möglichst gleichmäßig ausgelastet. Überlastungen werden dadurch vermieden, dass Verbraucher, die nicht gleichzeitig aktiviert sein können, auf dieselbe Phase gelegt werden. Die Drehstromverbraucher wurden alle auf den 32 A Anschluss gelegt.

Verbraucher	Anzahl	Leistung	Spannung	Ges.-Stromaufnahme (230V)
Heizkörper	5	4,5 kW	400 V	32,6 A
Ventilator	1	1,2 kW	230 V	5,2 A
Heizung Ventilator	1	2,4 kW	230 V	10,4 A
Ventile	14	0,02 kW	230 V	1,2 A
Schütze	6	0,02 kW	230 V	0,5 A
Pumpen (B,C,D,E,F)	5	0,8 kW	230 V	17,4 A
Netzteile	2	0,03 kW	230 V	0,3 A
US-Generatoren	2	1,5 kW	230 V	13 A
Pumpe A	1	0,9 kW	400 V	1,3 A

Drehstromanschluss 400 V, 16 A je Phase					
Phase 1		Phase 2		Phase 3	
Verbraucher	Strom	Verbraucher	Strom	Verbraucher	Strom
US-Generator 1	6,5 A	US-Generator 2	6,5 A	Ventile	1,2 A
Heizung Ventilator	10,4 A	1 Pumpe	3,5 A	4 Pumpen	14 A
Schütze, Netzteile	0,8 A	Ventilator	5,2 A		
Summe	17,7 A	Summe	15,2 A	Summe	15,2 A

Drehstromanschluss 400 V, 32 A je Phase	
Verbraucher	Aufnahme
5 Drehstromheizkörper	32,6 A
1 Drehstrompumpe	1,3 A
Summe	33,9 A

6.3.1 Temperaturüberwachung

Insgesamt sechs Temperatursensoren sind an verschiedenen Stellen der Ultraschallanlage montiert. Je ein Sensor befindet sich an den vier Vorratsbehältern, in denen die Reinigungsflüssigkeiten auf die gewünschte Temperatur gebracht werden. Ein weiterer Sensor ist am Ultraschallbad selbst montiert, um die Temperatur während der Ultraschallbehandlung zu überwachen. Außerdem ist dieser Sensor wichtig für die Drahtreinigung, da dort die Flüssigkeiten im Bad verbleiben und sonst kein Aufschluss über deren Temperatur möglich wäre. Die Temperatur des Luftstroms zum Trocknen des Reinigungsgutes am Ende des Reinigungsvorgangs wird ebenfalls durch einen Sensor gemessen und über die PCI-20098C Karte an das Steuerprogramm weitergegeben.

Als Sensoren werden PT100-Widerstände verwendet, dies sind Platin-Temperaturfühler, deren Messprinzip auf der Änderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von der Temperatur beruht. Ihr Temperatur-Einsatzbereich erstreckt sich von $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Diese Widerstandsthermometer gehören zu den Kaltleitern, das heißt, der Widerstand steigt mit wachsender Temperatur, somit besitzen sie einen positiven Temperaturkoeffizienten (PTC: positive temperature coefficient). Platin-Temperatursensoren werden durch ihren Nennwiderstand bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ charakterisiert, demnach hat ein PT100 bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ einen Widerstand von genau $100\text{ }\Omega$. Die Widerstandsänderung bei Temperaturerhöhung oder -erniedrigung ist in DIN IEC 60751 festgelegt und folgt relativ genau den folgenden Näherungen:

Temperaturbereich zwischen 0 und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: Für diesen Bereich findet sich näherungsweise eine lineare Funktion der Temperatur T :

$$R = R_0 \cdot (1 + aT) \quad (6.1)$$

$$a = 3,85 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$$

Bereich über $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: Ab $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, oder auch im Bereich zwischen 0 und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei höheren Anforderungen an die Genauigkeit, beschreibt die folgende quadratische Funktion den Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand:

$$R = R_0 \cdot (1 + aT + bT^2) \quad (6.2)$$

$$a = 3,9083 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$$

$$b = -5,775 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$$

Bereich unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$: Hier verwendet man ein Polynom vierten Grades in T , um den Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur zu beschreiben:

$$R = R_0 \cdot (1 + aT + bT^2 + c \cdot (1 - 100^{\circ}\text{C}) \cdot T^3) \quad (6.3)$$

$$a = 3,9083 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$$

$$b = -5,775 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$$

$$c = -4,183 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^4$$

Beim Einsatz an der Ultraschallanlage sind Temperaturen der Flüssigkeiten von Raumtemperatur bis zu 80 °C zu messen. Die Temperatur des heißen Luftstroms zum Trocknen des Reinigungsguts bewegt sich im Bereich bis zu 100 °C. Da keine hohen Auslesefrequenzen benötigt werden und ein PC die Berechnung der angezeigten Temperatur aus dem Widerstand des PT100 durchführt, kann die etwas genauere, quadratische Formel verwendet werden. Dabei hängt die Temperatur wie folgt vom Widerstand des PT100 ab:

$$T = -\frac{a}{2b} - \sqrt{\frac{\frac{R}{R_0} - 1}{b} + \left(\frac{a}{2b}\right)^2} \quad (6.4)$$

$$a = 3,9083 \cdot 10^{-3} / ^\circ C$$

$$b = -5,775 \cdot 10^{-7} / ^\circ C^2$$

Um mit dem PT100-Sensor eine Temperatur zu bestimmen, ist also dessen aktueller Widerstand zu messen. Der ADC der analogen Karte kann jedoch nur Spannungen zwischen 0 V und 5 V auslesen. Es wird daher eine Elektronik benötigt, die eine Spannung liefert, welche immer proportional zum Widerstand des Sensors ist. Über den Steuerrechner kann dann bei Kenntnis der Proportionalität der Widerstand und damit die Temperatur errechnet werden. Die Elektronik kann so geeicht werden, dass die ausgelesene Spannung den erwarteten Messbereich von 20 °C bis 100 °C abdeckt. Um dies zu realisieren, wurde auf einer Euro-Platine (10 cm × 16 cm) für jeden der 6 Sensoren eine kleine Ausleseschaltung aufgebaut. Der Schaltplan ist in Abbildung 6.7 gezeigt, erstellt wurde dieser mittels des Layout-Editors EAGLE (Easy Applicable Graphical Layout Editor). Dafür wurde eine bereits aus einem Schülerpraktikum hervorgegangene Schaltung verwendet und modifiziert. Die Schaltung ist in zwei Bereiche geteilt, im Schaltbild links ist eine Stromstabilisierung aufgebaut, die dafür sorgt, dass der Sensor immer von einem konstanten Strom durchflossen wird und damit die Proportionalität von Spannung und Widerstand nach dem Ohmschen Gesetz erhalten bleibt:

$$U = R \cdot I \quad \text{mit} \quad I = \text{const.} \quad \implies \quad U \propto R$$

Die Stromstabilisierung wird mittels einer Zenerdiode in Kombination mit geeigneten Widerständen realisiert.

Um die ausgelesene Spannung an den Messbereich der PCI-20098C-Karte anzupassen, wird die über den Sensor abfallende Spannung an den nichtinvertierenden Eingang einer Operationsverstärkerschaltung gelegt. Mit Hilfe der Verstärkerschaltung kann der Nullpunkt sowie die Steigung der Skalierung im Rahmen der verwendeten Potentiometer beliebig angepasst werden.

Damit die Auflösung des AD-Wandlers der Karte voll ausgeschöpft wird, würde man idealerweise die Verstärkerschaltung so kalibrieren, dass die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers (OPV) im möglichen Temperatur-Messbereich auch den gesamten Auslesebereich der PCI-Karte (0 V bis 5 V) annimmt. Dies ist jedoch zusätzlich beschränkt durch die Maximalspannung, welche die Operationsverstärker ausgeben können. Bei dem hier

6 Elektrische Ansteuerung der Ultraschallanlage

verwendeten Bauteiltyp (TL081) sind das etwa 3,72 V. Dies ist dadurch bedingt, dass die maximale Versorgungsspannung für den Operationsverstärker bei -5 V und +5 V liegt und an der internen Elektronik bereits ein Teil der Spannung abfällt. Es ist zwar möglich, die ausgegebene Maximalspannung durch eine zusätzliche Spannung von 12 V am Verstärker auf +5 V zu erhöhen, jedoch wirkt sich das stark negativ auf die Linearität der Verstärkung aus.

Offset und Verstärkungsfaktor der Verstärkerschaltung beeinflussen sich gegenseitig. Zum Kalibrieren der Schaltung muss man sich durch Iteration an die richtigen Werte heran-tasten. Als Kalibrationspunkte sind Widerstandswerte sinnvoll, die Temperaturen in der

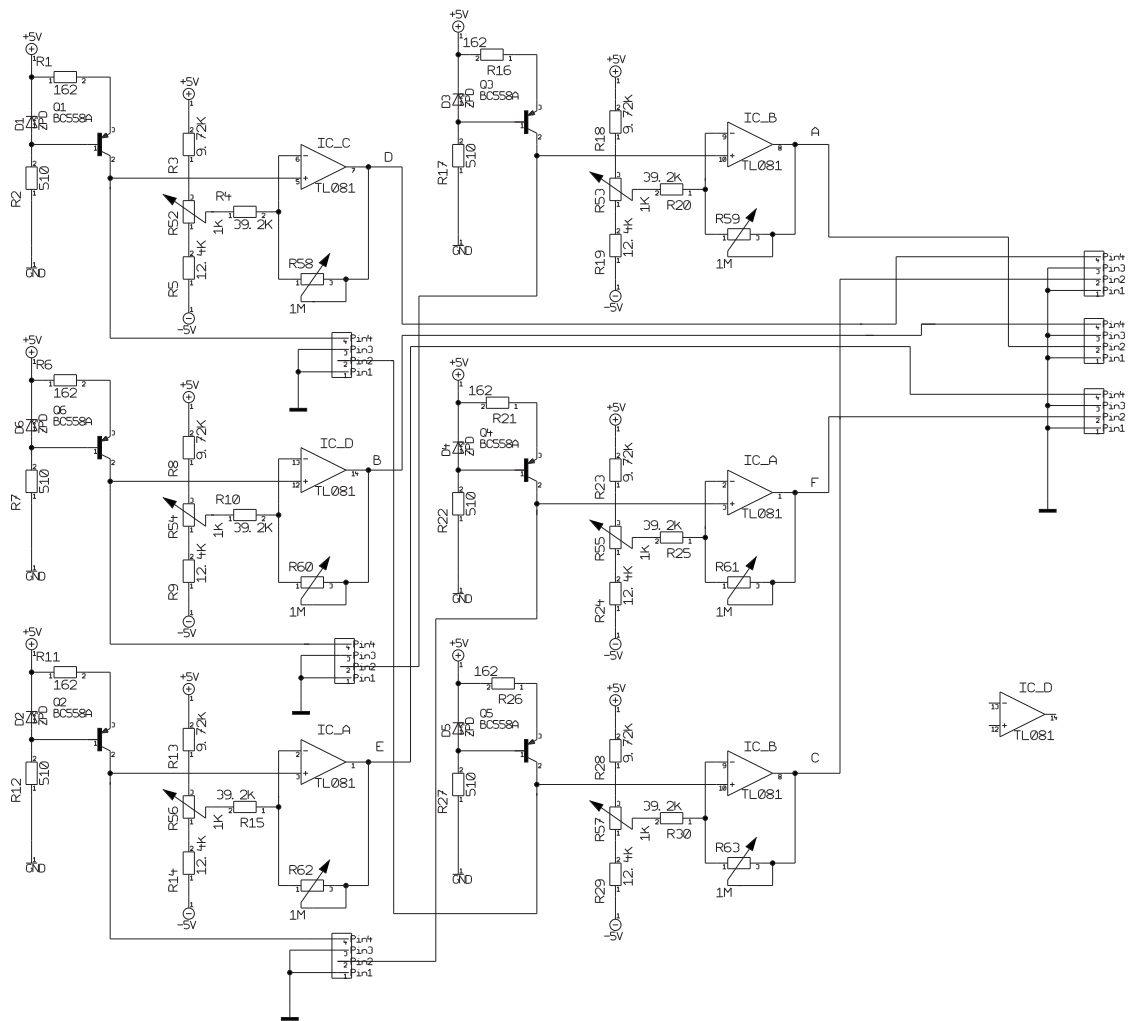


Abbildung 6.7: Schaltplan der Temperatureauslese, erstellt mit EAGLE. Es können sechs PT100-Sensoren angeschlossen werden.

Nähe der oberen und unteren Grenztemperatur entsprechen. In diesem Fall wurden $108\ \Omega$ ($\hat{=}18\ ^\circ\text{C}$) und $141\ \Omega$ ($\hat{=}105\ ^\circ\text{C}$) als Kalibrations-Widerstandswerte verwendet. Diese Widerstände wurden auf einer kleinen Eich-Platine mit Umschalter angebracht, die statt des Sensors mit dem Ausleseboard verbunden wird. Dies sorgt dafür, dass die beiden Werte einfach und genau einstellbar sind und dass alle Kanäle gleich kalibriert wurden.

Die Vorgehensweise zur genauen Kalibration ist dabei folgende:

Im unteren Einstellpunkt ($108\ \Omega$) nur das Offset-Potentiometer verändern, bis $18\ ^\circ\text{C}$ angezeigt wird. Auf den oberen Einstellpunkt ($141\ \Omega$) wechseln, und die Verstärkung über das Verstärkungspotentiometer so einstellen, dass $105\ ^\circ\text{C}$ angezeigt wird. Da sich Verstärkung und Offset beeinflussen, stimmt der Temperaturwert im unteren Einstellpunkt nun nicht mehr und muss erneut angepasst werden. Nach etwa 5- bis 10-maligem Wiederholen erreicht man dabei stabile Werte, je nachdem, wie nahe die Potentiometer bereits den richtigen Einstellungen waren.

6.3.2 Einsatz und Entwicklung von Füllstandssensoren

Die Kenntnis des aktuellen Füllstands der Vorrattanks sowie des Ultraschallbads ist für den automatisch gesteuerten Reinigungsablauf unerlässlich. Es muss z.B. gewährleistet sein, dass die Schallgeber im Betrieb immer vollständig mit dem Reinigungsmedium bedeckt sind. Andererseits muss ein Überlaufen des Ultraschallbads verhindert werden. Auch dürfen die Heizkörper in den Vorrattanks nur bei einem ausreichend hohen Flüssigkeitspegel betrieben werden.

Für den Ablauf des Reinigungsprogramms ist die Kenntnis der exakten Füllhöhe nicht von Bedeutung, vielmehr werden digitale Informationen wie „voll“ oder „leer“ benötigt, damit zum nächsten Schritt übergegangen werden kann. Daher sind auf je zwei verschiedenen Höhen in den vier Vorrattanks sowie der Ultraschallwanne Füllstandssensoren angebracht, die digitale Informationen an den Steuerrechner übermitteln.

Für den Einsatz mit den verschiedenen, zum Teil aggressiven Lösungsmitteln und den Belastungen während des Ultraschallbetriebs eignen sich kapazitive Füllstandssensoren. Ihr



Abbildung 6.8: Foto eines Füllstandssensors. Der Werkstoff für diesen Sensor ist Edelstahl und Plastik, damit er in Kombination mit Ultraschall und den verschiedenen Lösungsmitteln eingesetzt werden kann.

Messprinzip beruht auf der Änderung der Dielektrizitätskonstante zwischen zwei Kondensatorplatten und damit der Änderung der Kapazität des Sensors. Die Sensoren bestehen aus Edelstahlplatten der Größe $7,0\text{ cm} \times 2,6\text{ cm}$ mit einem Abstand von 4 mm zueinander und befinden sich im Inneren des Tanks. Wird dieser befüllt, dringt die Flüssigkeit zwischen die Kondensatorplatten. Ein Foto eines der Sensoren ist in Abbildung 6.8 gezeigt. Die eingesetzten Flüssigkeiten weisen Dielektrizitätskonstanten im Bereich zwischen etwa 2 (Axarel 9100™) und 81 (Wasser) auf. Die Dielektrizitätskonstante von Luft liegt knapp über 1 und damit nur einen Faktor 2 unter der von Axarel 9100™. Der verwendete Plattenkondensator besitzt eine Kapazität von etwa 4,0 pF, welche jedoch durch die Halterung der Kondensatorplatten und die Länge und Position der Zuleitungen zueinander auf etwa 11-13 pF erhöht wird. Die Kapazitätsänderung des Sensors beim Eintauchen in Flüssigkeit wird elektronisch mittels einer Wheatstone-Messbrücke ausgelesen, wie im folgenden Teil dieses Kapitels näher beschrieben wird.

Bei Wasser, sowie der alkalischen Lauge sorgt allerdings eher die Änderung der Leitfähigkeit zwischen den Kondensatorplatten für eine Änderung der Impedanz des Sensors und damit für eine messbare Verstimmung der Messbrücke. Dieser Effekt ist viel größer als der durch die Änderung der Dielektrizität und damit der Kapazität des Sensors hervorgerufene. Sobald zwischen den beiden Sensorplatten über die leitende Flüssigkeit Kontakt besteht, wird ein positives Signal ausgegeben. Da für diese Anwendung der Sensoren nicht die absolute Füllhöhe der Flüssigkeit zwischen den Kondensatorplatten benötigt wird, sondern nur entschieden werden muss, ob sich im Bereich des Sensors Flüssigkeit befindet, bereitet dieser Effekt nur dann Probleme, wenn z.B. aufgrund von Kapillarkräften ein Wassertropfen zwischen den Kondensatorplatten verbleibt. Es musste daher ein größerer Abstand der Kondensatorplatten gewählt werden, der ein Hängenbleiben von Tropfen sicher ausschließt (4 mm). Dem entgegen stand die Tatsache, dass ein großer Abstand der Platten nach der Formel

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (6.5)$$

auch zu einer deutlich geringeren Kapazität des Sensors führt. Dies hat die Anforderungen an die Sensibilität der Ausleselektronik deutlich erhöht und letztendlich bedingt, dass die Kabellänge zwischen Sensor und Elektronik auf ein Minimum reduziert werden musste.

Elektrische Auslese der Sensoren und Prototyp der Schaltung

Während eines Wahlfachpraktikums wurde in Zusammenarbeit mit zwei Praktikanten eine Ausleseschaltung für die Füllstandssensoren auf einer Lochplatine entwickelt und getestet. Nach dem Vorbild dieses ersten, funktionstüchtigen Prototypen wurde dazu ein Schaltplan entworfen. Mit Unterstützung aus der Elektronikwerkstatt wurde dieser bis zu dem Status ergänzt, der in Abbildung 6.10 gezeigt ist und im Folgenden beschrieben wird.

Um die Kapazitätsänderung durch das Reinigungsmedium elektronisch festzustellen, wird eine Wheatstone-Brücke eingesetzt, siehe dazu Abbildung 6.9.

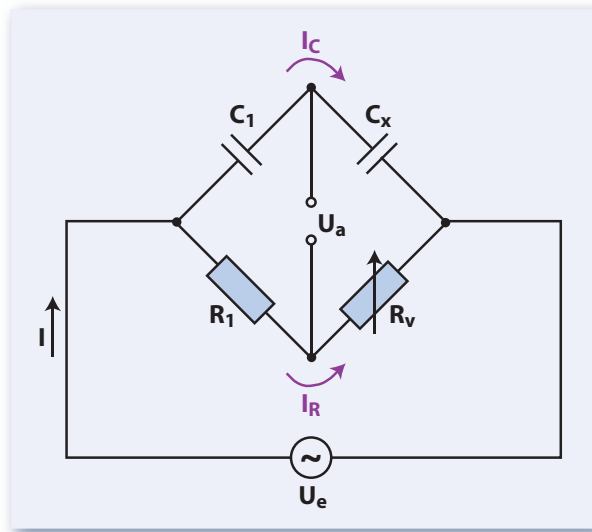


Abbildung 6.9: Schaltung einer kapazitiven Wheatstonebrücke. C_x ist die Kapazität des Sensors, R_1 und C_1 besitzen feste Impedanzen und R_v ist ein variabler Widerstand, über den die Brücke abgeglichen werden kann.

In dieser Schaltung stellen R_1 und C_1 einen Widerstand und einen Kondensator mit bekannten, festen Werten dar. C_x ist der Kondensator, der als Füllstandssensor eingesetzt wird, und R_v ist ein variabler, bekannter Widerstand. Die Eingangsspannung U_e ist eine Wechselspannung der Frequenz 10 kHz. Eingangsspannung und Ausgangsspannung U_a werden an den jeweils gegenüberliegenden Verbindungspunkten angelegt bzw. abgegriffen. Eine Wheatstone-Brücke wird in der Regel zur Bestimmung von unbekanntem Widerständen bzw. Impedanzen verwendet. Bei den hier verwendeten Füllstandssensoren wird die Wheatstone-Messbrücke zur Detektion der Änderung einer Kapazität benutzt, auf die Bestimmung des exakten Werts der Kapazität kann verzichtet werden. Um ein Maß für die Änderung der Impedanz des Kondensators C_x zu erhalten, wird ausgenutzt, dass die Wheatstonebrücke im Nullabgleich eine Ausgangsspannung von $U_a = 0$ ausgibt. Ändert sich eine der Impedanzen auch nur geringfügig, ist der Abgleich der Brücke nicht mehr gegeben und die Ausgangsspannung U_a ist nicht mehr Null. Sie errechnet sich dann wie folgt:

$$U_a = U_e \cdot \left(\frac{C_1}{C_x + C_1} - \frac{R_v}{R_1 + R_v} \right) \quad (6.6)$$

Um bei einer Änderung von C_x eine maximale Änderung von U_a zu erreichen, wählt man R_1 , C_1 und R_v wie folgt: Wenn C_x geringfügig steigt, hat dies den größten Effekt auf U_a , wenn sich der erste Bruch in der Klammer stark ändert. Dies ist genau dann der Fall, wenn $C_x \approx C_1$ ist. Denn falls $C_x \ll C_1$ gilt, ist der Bruch bei jedem Wert von C_1 etwa 1, andernfalls für $C_x \gg C_1$ ist er bei jedem Wert von C_x etwa 0. Die Vergleichskapazität C_1 sollte also genauso groß sein wie die Kapazität des Sensors, um bei einer geringen Änderung eine möglichst große Ausgangsspannung U_a zu liefern. Dementsprechend müssen die Widerstände R_1 und R_v auch ähnliche Werte besitzen, damit die Messbrücke abgeglichen werden kann. Ihre absoluten Werte spielen nur unter dem Aspekt der Leistungsverluste

eine Rolle. Um den fließenden Strom zu begrenzen, wurden daher Widerstände von 1 k Ω gewählt.

Die Wheatstone-Brücke wird mittels des Sinusgenerators ICL8038 mit einer Wechselspannung von 5 Volt und einer Frequenz von 10 kHz versorgt. Dieser Generator ist erhältlich als 14-beiniges IC, das mit seiner geringen Größe einen kompakten Aufbau der Platine ermöglicht. Dies ist von Vorteil, da die Elektronik direkt am Sensor angebracht werden muss und die Platzverhältnisse außen an den Tanks zwischen den Filtern und Rohrleitungen an manchen Stellen sehr eng sind. Lange Zuleitungen zwischen dem Sensor und der Elektronik, z.B. wenn die Elektronik im Sensorenschrank positioniert würde, sind nicht sinnvoll, da in diesem Fall die Kapazität der Zuleitungen die des eigentlichen Sensors überschreiten würde. Die relative Kapazitätsänderung würde somit deutlich abnehmen, was die Messung erschweren würde. Das am Ausgang der Wheatstone-Brücke ankommende Signal ist eine Wechselspannung der Frequenz 10 kHz, überlagert von einem 50 Hz-Brummen, das vor der Weiterverwendung der Signale durch einen Hochpass entfernt wird. Befindet sich Luft zwischen den Kondensatorplatten, und ist die Brücke optimal abgeglichen, sollte die Amplitude des Signals idealerweise Null betragen. Die technische Realisierung der Brücke, bedingt durch Nichtlinearitäten der Bauteile im Hochfrequenzbereich, lässt sich jedoch nur

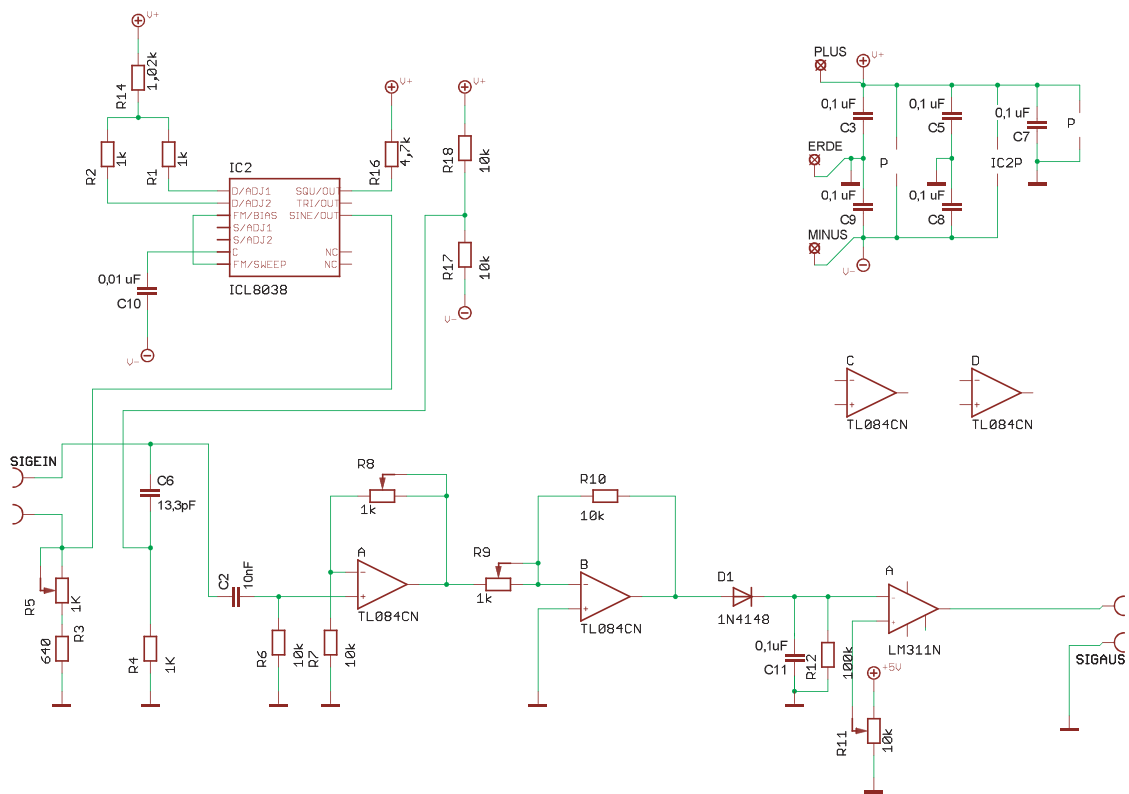


Abbildung 6.10: Schaltplan der Füllstandssensoren, gezeichnet mit EAGLE.

bis auf einen geringen Restbruchteil der Eingangsspannung abgleichen, der etwa 50 mV beträgt. Dieses Restsignal ist nun elektronisch zu unterscheiden von den möglichen Ausgangssignalen der Wheatstone-Brücke, die der Sensor bei den verschiedenen Flüssigkeiten liefern kann. Das kleinste Signal tritt bei Axarel 9100™ auf, hier beträgt die Ausgangsspannung der Brücke nur etwa 120 mV. Um die Spannungen durch einen Komparator sicher unterscheiden zu können, müssen diese zunächst verstärkt werden. Dies geschieht über eine Schaltung mit zwei Operationsverstärkern, die platzsparend in einem IC untergebracht sind. Mit Hilfe von Potentiometern kann die Verstärkung variabel eingestellt werden. Die verstärkten Signale für Luft und Axarel 9100™ betragen nun etwa 0,5 Volt sowie 2,5 Volt. Der Komparator LM311 kann die Signale mit einer Referenzspannung vergleichen, die über das Potentiometer R11 auf etwa 1,5 Volt gelegt wird. Ist die Signalspannung größer als die Referenzspannung, gibt der Komparator eine Spannung von 5 V aus, andernfalls liegen am Eingang der Messkarte 0 V an. Die Ausleseelektronik sorgt somit dafür, dass die PCI-20098C-Karte ein digitales Signal erhält, sobald der jeweilige Füllstandssensor mit einer der drei Reinigungsflüssigkeiten umgeben ist.

Layout der Platine

Insgesamt werden für den Einsatz an der Ultraschallreinigungsanlage zehn Sensoren benötigt. Ein Platinenlayout wurde in EAGLE entworfen und eine Testplatine in der Elektronikwerkstatt hergestellt.

Eine Darstellung des Platinenlayouts findet sich in Abbildung 6.11.

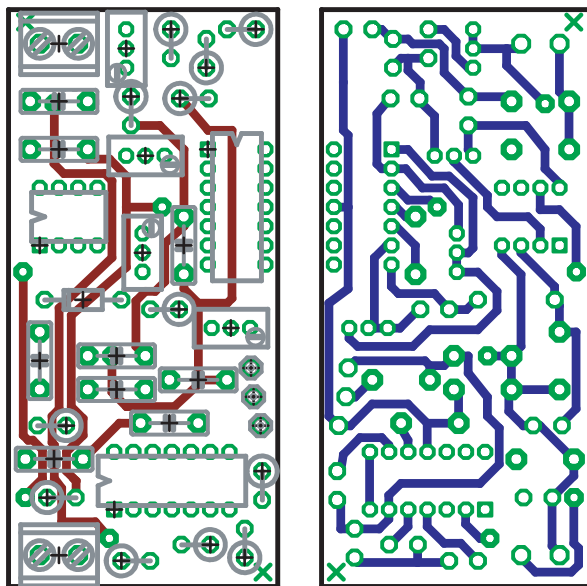


Abbildung 6.11: Platinenlayout der Füllstandssensoren. Links die Oberseite der Platine, rechts dazu gespiegelt die Unterseite. Die Bezeichnungen der Elektronikkomponenten wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Anschließend wurde die entworfene Platine bestückt und auf ihre Funktion überprüft. Da der Sinusgenerator, der die 10 kHz Wechselspannung für die Wheatstone-Brücke liefert, zum Zeitpunkt der Tests aufgrund von Lieferschwierigkeiten nicht verfügbar war, wurde

er vorübergehend durch ein Tischgerät ersetzt. Ein Foto der bestückten Platine ist in Abbildung 6.12 gezeigt.

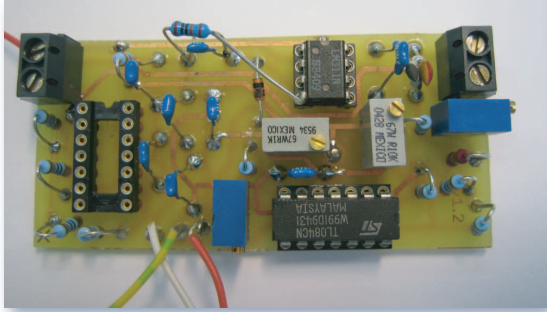


Abbildung 6.12: Foto des zweiten Prototyps der Füllstandssensoren.

7 Realisierung der Softwaresteuerung mittels LabVIEW-Programmierung

Für die Steuerung der Anlage wird ein Programm benötigt, das die verschiedenen Reinigungsabläufe vollautomatisch durchführt und dabei auch Status- und Signalmeldungen der Geräte und Sensoren berücksichtigt. Die Ultraschallanlage wird zumeist von Personen bedient werden, die kein Detailwissen über den Aufbau und die speziellen Eigenheiten besitzen. Diese Situation ist sicherlich teilweise bei der Massenproduktion gegeben, oder wenn die Reinigungsanlage nach Karlsruhe verbracht wird, um beim Einbau der Module in den Spektrometertank bei eventuellen Ausbesserungsarbeiten Bauteile nachzureinigen. Daher muss das Programm einfach zu bedienen sein und sicherstellen, dass der Bediener keine schwerwiegenden Fehler verursachen kann, die zum Austreten oder Vermischen von Lösungsmitteln führen und zeitaufwendig und kostspielig behoben werden müssen.

Neben der vollautomatischen Steuerung ist ein weiteres Programm nötig, über welches die Komponenten einzeln interaktiv ansteuerbar sind. Dieses wird zum einen in der Testphase der Anlage benötigt. Im Produktionsbetrieb kommt das interaktive Interface zum Einsatz, falls die automatische Steuerung den Ablauf mit einer Fehlermeldung abbricht, weil z.B. ein Ventil eine Fehlfunktion hatte und eine Flüssigkeit nicht vollständig abgepumpt wurde. Der Fehler muss dann zunächst gefunden und behoben werden und die Anlage dann manuell wieder in den gewünschten Zustand gebracht werden.

Für die Realisierung der interaktiven und vollautomatischen Steuerung wurde LabVIEW gewählt. LabVIEW ist eine grafische Programmierumgebung von National Instruments, die Abkürzung steht für Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Programmiert wird nach dem Datenflussmodell, daher eignet sich LabVIEW besonders zur Datenerfassung und -verarbeitung. Hauptanwendungsgebiete finden sich deshalb insbesondere in der Mess- und Automatisierungstechnik.

LabVIEW-Programme werden als VIs (Virtual Instruments) bezeichnet und können beliebig viele Sub-VIs, also eigenständige Unterprogramme enthalten. Ein Programm besteht aus zwei Komponenten, zum einen dem Frontpanel, das als Schnittstelle für die Interaktion mit dem Benutzer dient, und zum anderen dem Blockdiagramm, das den grafischen Programmcode enthält, welcher dem Benutzer in der Regel während des Programmablaufs verborgen bleibt.

Generelle Vorteile von LabVIEW gegenüber einer textbasierten Programmierung sind:

- Die grafische Programmieroberfläche ermöglicht es auch dem unerfahrenen Benutzer, schnell funktionsfähige Programmabläufe zu erstellen, ohne zunächst eine aufwändi-

ge Programmiersprache zu erlernen. Viele der Funktionen sind intuitiv nutzbar und weitestgehend selbsterklärend.

- Das Frontpanel, über das der Bediener später mit dem erstellten Programm interagiert, ist völlig frei gestaltbar und kann durch übersichtlichen Aufbau zum Verständnis des Programmaufbaus und der Programmfunktion beitragen. Das Erstellen dieser Benutzeroberfläche ist in LabVIEW besonders einfach, viele nützliche Eingabehilfen, wie Buttons oder Textfelder, sind bereits vorgestaltet und über ein Menü abrufbar.
- Viele der im Handel erhältlichen Datenerfassungsinstrumente werden bereits mit erprobten und sofort einsetzbaren Treibern ausgeliefert. Diese Treiber sind meist vielseitig modifizierbar und aufgrund der modularen Programmstruktur von LabVIEW einfach an das konkret vorliegende System anzupassen.

LabVIEW besitzt dennoch auch einige Nachteile. Zum Beispiel verleitet die einfache Bedienung dazu, besonders bei umfangreichen Projekten unstrukturierte und unübersichtliche Programmabläufe zu erstellen. Durch die Verdrahtung der einzelnen Komponenten im grafischen Blockdiagramm sind nachträgliche Modifikationen unter Umständen mit großem Aufwand verknüpft, da die Aufteilung der Diagramme manuell verändert werden muss, wenn man Programmteile einfügen möchte. Komplizierte Programme mit vielen parallelen Abläufen enthalten eine große Zahl Drahtverbindungen und werden dementsprechend schnell unübersichtlich.

Diesen Problemen kann durch eine gut strukturierte, modulare Programmierung und die Verwendung von Sub-VIs entgegengewirkt werden.

Bei der Programmierung der Steuerung für die Ultraschallreinigungsanlage sprachen insbesondere folgende Gründe für die Verwendung von LabVIEW:

Treiber und einfache Beispielprogramme für die Mess- und Steuerkarten waren in LabVIEW bereits vorhanden. Dadurch konnten schon während des Aufbaus und der Montage der Anlage erste Tests der einzelnen Komponenten durchgeführt werden.

Großer Wert wurde auch auf die Erstellung einer übersichtlichen, intuitiven Bedienoberfläche für den Benutzer der Reinigungsanlage gelegt, damit diese auch ohne Detailkenntnis des Aufbaus verwendbar ist.

Das Steuerprogramm sollte einfach nachzuvollziehen sein, damit nachträgliche Modifikationen daran auch durch Personen, die nicht an der Entwicklung beteiligt waren, in kurzer Zeit möglich sind. Dies wird stark begünstigt durch die grafische Programmierung in LabVIEW.

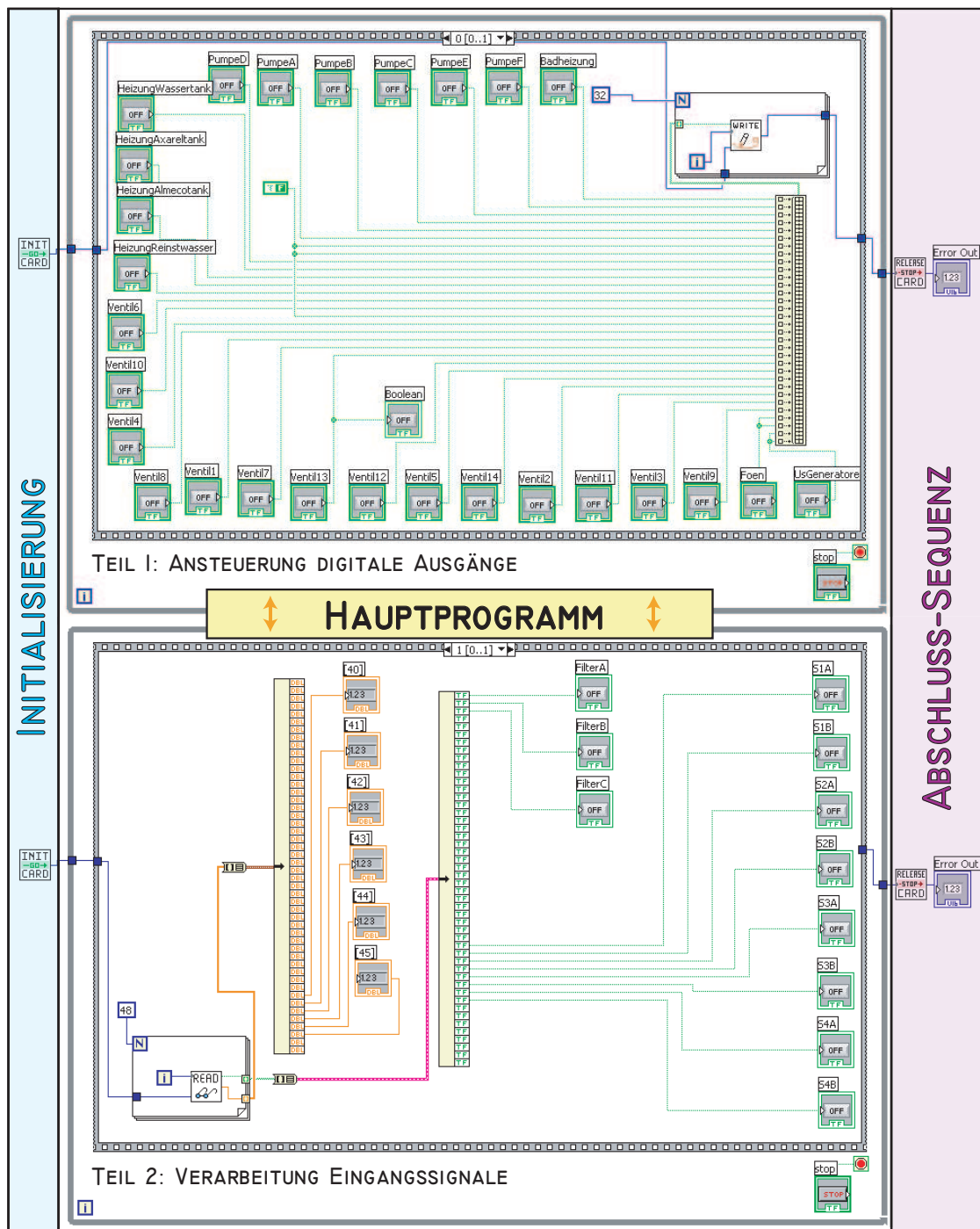


Abbildung 7.1: Blockdiagramm zur interaktiven Steuerung. Oben: Schreibsequenz, welche den Zustand der Schaltelemente auf dem Frontpanel auf die PCI-7432-Karte überträgt. Unten: Sequenz, die die Werte und Zustände der Sensoren und Geräte ausliest.

7.1 Interaktive Steuerung der Ultraschallreinigungsanlage

Beim Aufbau, sowie für Tests oder bei der Wartung der Anlage ist ein Programm, bei dem Ventile, Pumpen, Heizungen etc. manuell und unabhängig voneinander steuerbar sind, unerlässlich. Ein solches Programm sollte jedoch nur von Personen verwendet werden, die mit der Reinigungsanlage vertraut sind. Das Potential für Bedienungsfehler ist groß, da aufgrund der Möglichkeit zur unabhängigen Steuerung aller Elemente nur im begrenzten Maße Sicherheitsabfragen implementiert werden können. Der Bediener muss selbst entscheiden, ob er z.B. ein bestimmtes Ventil öffnen darf und welche Folgen dies haben kann.

Um dem Nutzer eine gute Übersicht über den Aufbau der Anlage und der Funktion der einzelnen Komponenten zu ermöglichen, wurde die Schemazeichnung des Aufbaus der Anlage, die in Abbildung 5.4 auf Seite 48 gezeigt ist, als Basis für die interaktive Steuerung verwendet. Dort sind bereits alle steuerbaren Komponenten wie Pumpen, Ventile, Ultraschallgeneratoren und Heizungen in ihrer Funktion eingezeichnet. Die Anzeige der automatischen Steuerung verwendet die gleiche Oberfläche wie die manuelle Steuerung, siehe Abbildung 7.6. Zur Ansteuerung der Komponenten über die Kanäle der digitalen PCI-7432-Karte wird lediglich ein digitales Signal benötigt, das über einen einfachen Ein/Aus-Schalter auf der Bedienoberfläche kontrolliert werden kann. LabVIEW bietet die Möglichkeit, die Bedienungselemente auf dem Frontpanel individuell zu gestalten und zu platzieren. Dadurch konnten die Darstellungen der Instrumente auf der Schemazeichnung zu interaktiven Schaltflächen funktionalisiert werden, die bei Aktivierung ihr Erscheinungsbild ändern. Die Farben der Schemazeichnung wurden so angepasst, dass die Ventile, Pumpen und anderen Bedienelemente im deaktivierten Zustand eine leicht gräuliche Färbung besitzen, im aktivierten Zustand aber farbig hervortreten. Dabei gibt sowohl die Farbe als auch die Form und Position der Elemente in der Schemazeichnung Aufschluss über deren Funktion. Informationen, wie Temperaturen der Flüssigkeiten oder Zustände der Füllstandssensoren, die über die PCI-20098C Karte eingelesen werden, sind in der schematischen Übersicht als Zusatzinformationen dargestellt. Die Tanks besitzen ein Zahlenfeld, das die aktuelle

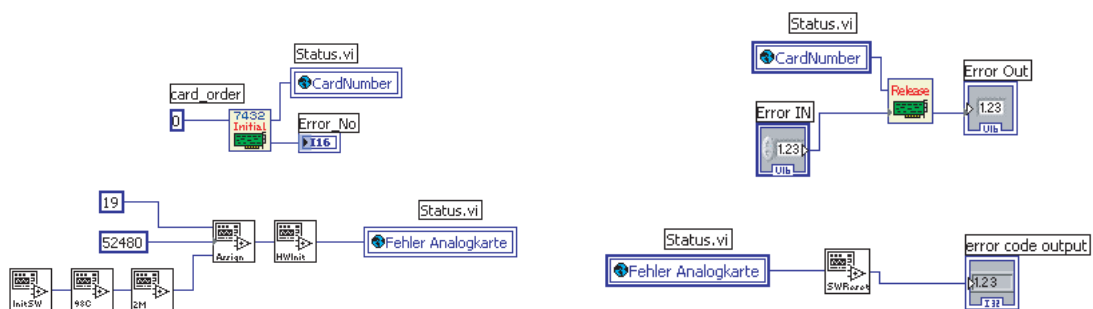


Abbildung 7.2: Initialisierungs- und Releasefunktion der Mess- und Steuerkarten. Links: initialize.vi, rechts: release.vi.

Temperatur der enthaltenen Flüssigkeit angibt. Die in den Tanks eingezeichneten Füllstandssensoren leuchten auf, wenn diese ein Signal senden.

Eine Darstellung des Blockdiagramms der interaktiven Steuerung ist in Abbildung 7.1 zu sehen. Der Aufbau des Blockdiagramms ist in drei sequentielle Abschnitte geteilt. Zunächst werden die Mess- und Steuerkarten mittels des Unterprogramms „initialize.vi“ initialisiert. In diesem Programm werden dem PC Art und der Steckplatz der Karten mitgeteilt, sowie deren LabVIEW-Treiber geladen. In Abbildung 7.2 (links) ist das Blockdiagramm des initialize-Unterprogramms gezeigt. Das Sub-VI „initialize.vi“ gibt am Ende seines Ablaufs einen Errorcode aus. Funktionierte alles ordnungsgemäß, ist der Wert des globalen Errorcodes 0.

Die zweite Sequenz des Blockdiagramms bildet den Hauptteil des Programms und enthält eine Schleife, die solange abgearbeitet wird, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist, hier also bis der STOP-Button gedrückt wird. In der Schleife befinden sich zwei Programmteile, die zeitlich nacheinander ausgeführt werden. Der erste Programmteil liest die Zustände aller Eingangskanäle beider Mess- und Steuerkarten und überträgt diese auf das Frontpanel.

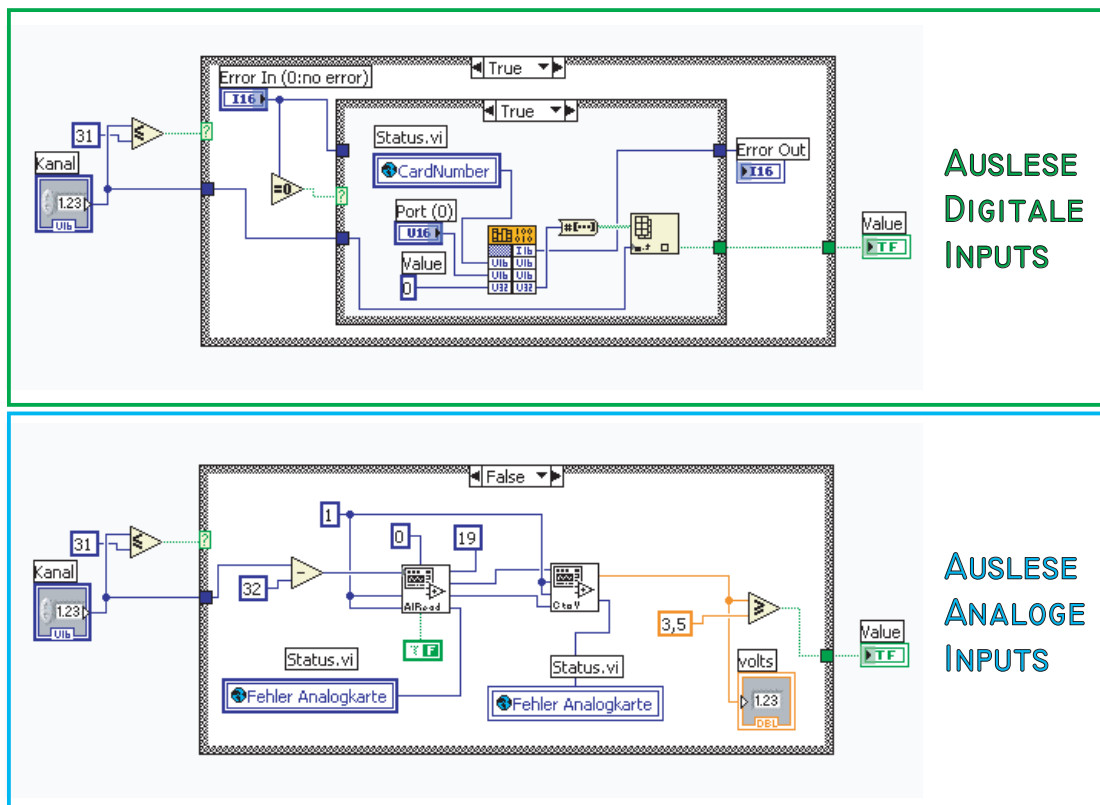


Abbildung 7.3: Auslese-Unterprogramm „lesekanal.vi“. Oben ist die Auslese der digitalen PCI-7432-Karte dargestellt, unten die der analogen PCI-20098C.

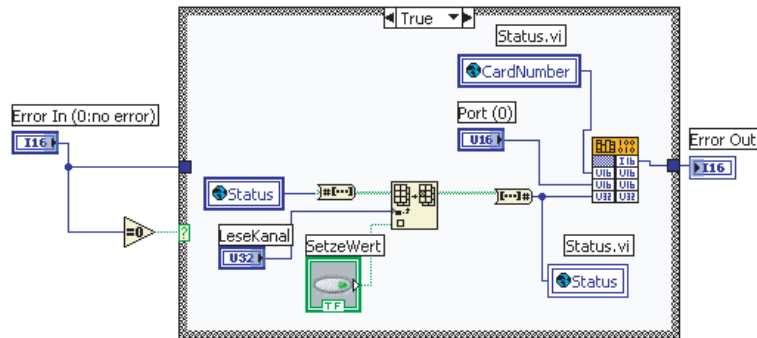


Abbildung 7.4: Schreibfunktion für die digitale PCI-7432-Karte. Sie gibt den in einer globalen Variable gespeichertem Status an die Mess- und Steuerkarte weiter.

Die Auslese der Kanäle der Mess- und Steuerkarten geschieht mittels des Sub-VIs „lesekanal.vi“. Dieses benötigt als Eingabe die Nummer des betreffenden Kanals sowie den globalen Errorcode aus der Initialisierungsfunktion, der durch sämtliche Programme durchgereicht und überprüft wird. Nur wenn der eingehende Errorcode den Wert 0 hat, wird das Programm ausgeführt, andernfalls wird der Errorcode ohne Veränderung an das nächste Programm weitergereicht. Das Programm „lesekanal.vi“ ist in Abbildung 7.3 gezeigt. Es ist durch eine von der Kanalzahl abhängigen CASE-Struktur zweigeteilt. Für die Kanäle 0 bis 31 wird mittels der mitgelieferten Sub-VIs auf die digitale PCI-7432-Karte zugegriffen und der aktuelle Wert an das übergeordnete Programm weitergegeben. Beträgt die Kanalnummer 32 bis 47, wird einer der 16 analogen Kanäle der PCI-20098C angesprochen. Die anliegende Spannung wird vom Unterprogramm als analoges Signal ausgegeben. Für die Füllstandssensoren ist jedoch nur ein digitales Signal von Bedeutung, daher wird der ausgelesene Wert zusätzlich mit einem Schwellwert von 3,5 V verglichen.

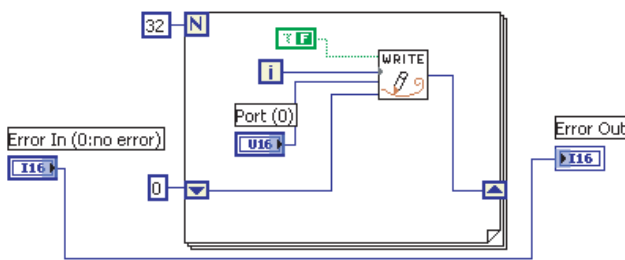


Abbildung 7.5: Sicherheitsfunktion. Sie deaktiviert alle Kanäle der PCI-7432-Karte und damit alle Ventile, Pumpen, Heizungen und Ultraschallgeneratoren.

Die für die Temperatursensoren von der Karte ausgegebenen Spannungswerte werden mittels eines kleinen Unterprogramms „tempconv.vi“ in die entsprechende Temperatur umgerechnet. Die Funktion bedient sich dabei der quadratischen Umrechnungsformel für

PT100-Tempersensoren, die bereits in Kapitel 6.3.1 vorgestellt wurde. Dieses Programm findet sich im Anhang unter Abbildung C.4.

Der zweite Programmteil überträgt den Zustand der mit den Buttons auf der Benutzeroberfläche verbundenen Schalter auf die Ausgänge der digitalen PCI-7432-Karte. Abbildung 7.4 zeigt das entsprechende Blockdiagramm. Das Programm bildet aus einem in einer globalen Variable gespeicherten Statusarray und dem neuen Wert für den ausgewählten Kanal einen neuen Status, der an die PCI-7432-Karte weitergegeben wird. Eine Schleife führt dies für alle 32 Kanäle und die jeweils zugeordneten Werte durch.

Die dritte und letzte Sequenz wird ausgeführt, wenn im Hauptprogramm die FOR-Schleife durch Betätigen des STOP-Buttons manuell abgebrochen wird. Die Sequenz enthält den „safetyreset.vi“-Befehl, der bewirkt, dass alle Ventile vor Beenden des Programms geschlossen, sowie alle anderen Geräte deaktiviert werden, siehe Abbildung 7.5.

Danach wird das Unterprogramm „release.vi“ aufgerufen, das die inverse Funktion zu „initialize.vi“ darstellt und die Verbindung des LabVIEW-Programms zu den PCI-Karten kontrolliert beendet, siehe Abbildung 7.2 (rechts).

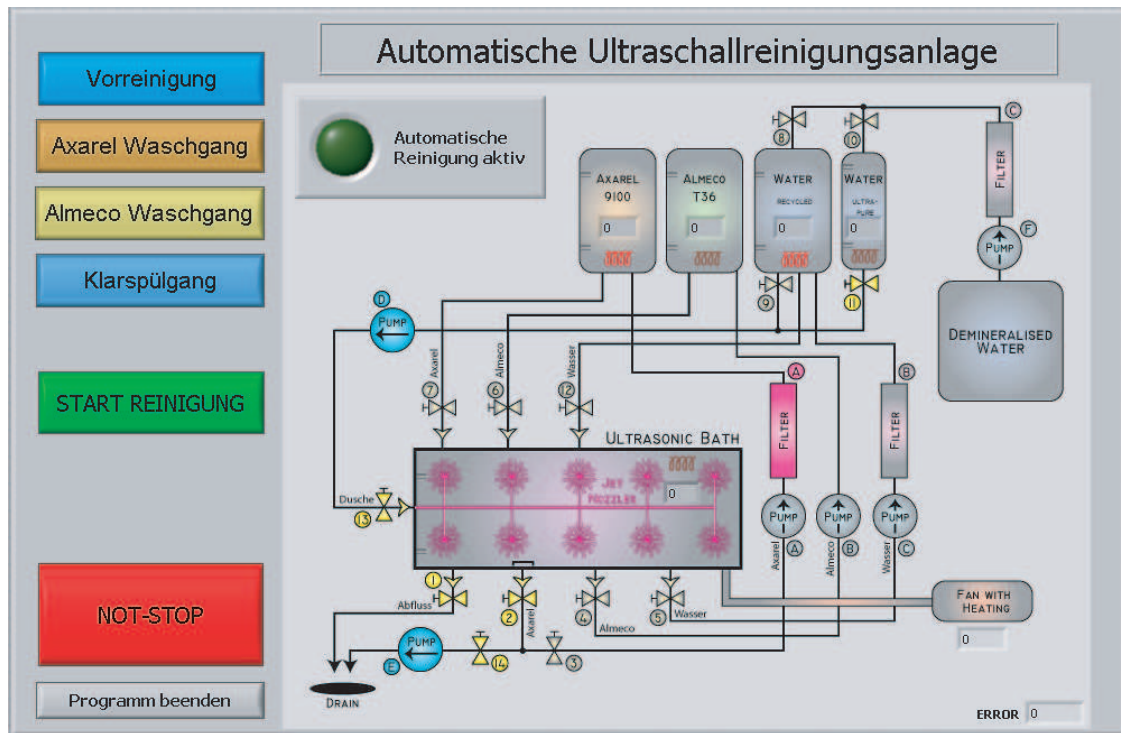


Abbildung 7.6: Frontpanel des automatisches Programms zur Ultraschallreinigung. Als Beispiel sind in diesem Bild sind die Ventile 11, 13, 1, 14 und 2 geöffnet, sowie die Pumpen D und E und die Heizungen 1 und 3 aktiviert. Zusätzlich wurde ein Signal von Filter A simuliert.

7.2 Vollautomatisches Reinigungsprogramm

Für die Säuberung der über 1500 Drahtelektrodenbauteile soll die Reinigungsanlage vollautomatisch steuerbar sein, dazu wurde ein weiteres LabVIEW-Programm realisiert. Eine Abbildung des Frontpanels, das dem Benutzer zur Bedienung des Programms zur Verfügung steht, ist in Abbildung 7.6 gezeigt. Die Oberfläche der interaktiven Steuerung wurde darin integriert und durch weitere Bedienelemente am linken Rand ergänzt. Die aktiven Schaltflächen, die in der manuellen Steuerung durch den Benutzer bedient werden können, sind hierbei reine Indikatoren. Sie zeigen den Zustand der entsprechenden Geräte während des vollautomatischen Ablaufs an. Dazu wird über eine Referenzstruktur im Hauptprogramm der Zustand der globalen Statusvariable in einer leicht modifizierten Version des „schreibkanal.vi“-Unterprogramms an die Schaltflächen auf den Frontpanel weitergereicht. Auch der Status der Elemente, die durch die analoge PCI-20098C ausgelesen werden, wie Temperatur- und Füllstandssensoren, wird in der Grafik im Frontpanel dem Benutzer angezeigt. Diese beiden Programmteile finden sich im Blockdiagramm in Abbildung 7.7 im unteren Bereich.

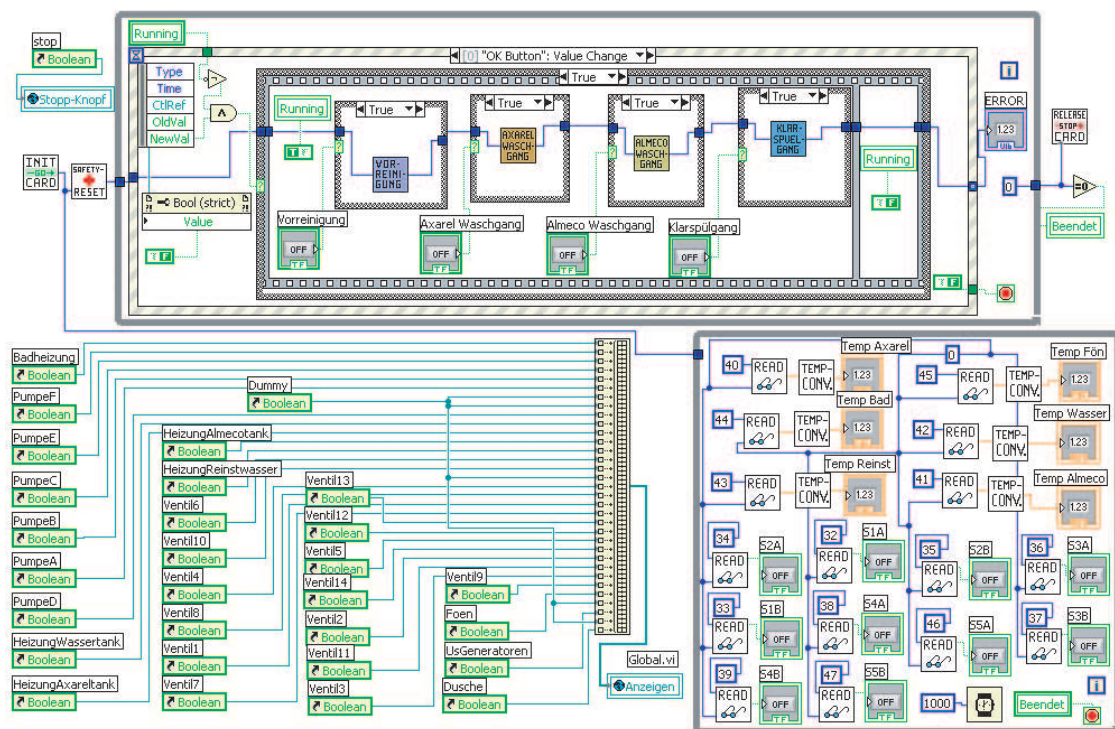


Abbildung 7.7: Blockdiagramm des automatischen Programms zur Ultraschallreinigung. Es ist in zwei Bereiche geteilt: Oben die Hauptsequenz, die den Programmablauf steuert und unten die Referenzstruktur, die den aktuellen Status der Anlage auf das Frontpanel überträgt.

Im oberen Bereich von Abbildung 7.7 befindet sich die Hauptsequenz, die wie bei der interaktiven Steuerung aus der Initialisierung der Karten zu Beginn, dem eigentlichen Reinigungsablauf und zum Schluss der „release.vi“-Funktion besteht. Der Reinigungsablauf ist aufgeteilt in vier Unterprogramme, die der Reihe nach abgearbeitet werden, falls die entsprechende Schaltfläche auf dem Frontpanel bei Programmstart aktiviert war, siehe dazu Abbildung 7.6. Es besteht somit die Möglichkeit, einzelne Reinigungsabschnitte vor dem Start der Reinigung zu aktivieren oder zu deaktivieren. Dies kann hilfreich sein, wenn Materialien gereinigt werden sollen, welche sich nicht mit einem der eingesetzten Reinigungsmittel vertragen.

Die einzelnen Reinigungsabschnitte sind wiederum modular aufgebaut, als Beispiel ist in Abbildung 7.8 das Unterprogramm zum P3-almeco™ 36-Reinigungsablauf gezeigt. Die drei weiteren Programme für den Vorwaschgang, den Axarel 9100™-Reinigungsablauf und den Klarspülgang mit Wasser finden sich in Abbildung C.1 im Anhang.

Die fünf durch Icons repräsentierten Programmbausteine führen nacheinander folgende Reinigungsschritte durch:

1. P3-almeco™ 36 läuft aus Vorratstank 2 in die Ultraschallwanne ein.
2. Eine Ultraschallbehandlung wird für 5 Minuten durchgeführt.
3. Das P3-almeco™ 36 wird zurück in den Vorratstank 2 gepumpt.
4. Das Reinigungsgut wird über die Düsen im Deckel der Ultraschallwanne für 1 Minute mit heißem Wasser aus Tank 3 abgespritzt, um Reinigungsmittelreste zu entfernen.
5. Das dabei verwendete Wasser wird über das Bodenventil aus dem Bad in den Abfluss befördert.

Der modulare Aufbau vereinfacht die Programmierung, da Schritte wie 4) oder 5) in den verschiedenen Reinigungsabschnitten wiederverwendet werden.

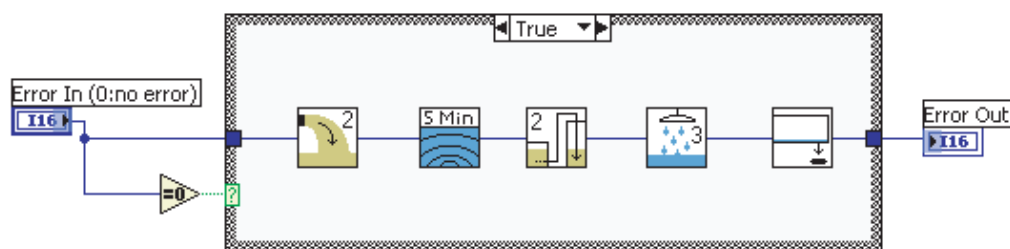


Abbildung 7.8: Unterprogramm für den P3-almeco™ 36-Reinigungsablauf

Die oben erwähnten Bausteine für die verschiedenen Reinigungsschritte finden sich im Programmablaufplan in Tabelle C.2 mit Bezug zum jeweiligen Schritt der Reinigungsprozedur aus Kapitel 4.3.2 auf Seite 41 wieder. Diese Reinigungsprozedur wird von der automatischen Steuerung durch sequenzielles Ausführen der in der Tabelle aufgeführten Bausteine realisiert. Die benötigten Durchlaufzeiten für die Module wurden in einem manuellen Testlauf der vollständigen Reinigungsprozedur ermittelt.

Beispielhaft soll an dieser Stelle der Aufbau des Bausteins „DuscheausTank3.vi“ erläutert werden, der unter anderem in Schritt 1 c) verwendet wird. In Abbildung 7.9 findet sich das zugehörige Blockdiagramm. Darstellungen der übrigen Unterprogramme sind im Anhang in Kapitel C abgebildet.

Das Unterprogramm wird nur ausgeführt, wenn der eingelesene Errorcode den Wert Null besitzt. Danach werden verschiedene Bedingungen geprüft, das Programm liest die Werte der analogen Kanäle 37, 38, 39 sowie 42 aus. Diese entsprechen dem unteren Füllstandssensor im Wassertank, aus dem das Wasser für das Abspritzen zur Verfügung gestellt wird, dem entsprechenden Temperatursensor im Wassertank und den beiden Sensoren in der Ultraschallwanne. Zu entnehmen sind die zugeordneten Geräte der Tabelle A.4. Die ausgelesenen Werte sind nun logisch so verknüpft, dass die folgende Schleife nur ausgeführt wird, wenn die Ultraschallwanne leer, Tank 3 zumindest bis zum unteren Füllstandssensor gefüllt ist und die Temperatur des Reinstwassers darin über 75 °C beträgt. Andernfalls wird der Errorcode, der zuvor Null war, durch einen anderen Wert überschrieben und ausgegeben, das Programm wird sofort beendet. Dieser neue Errorcode richtet sich nach der aufgetretenen Fehlerart und kann in Tabelle C.1 im Anhang nachgesehen werden. Wurde

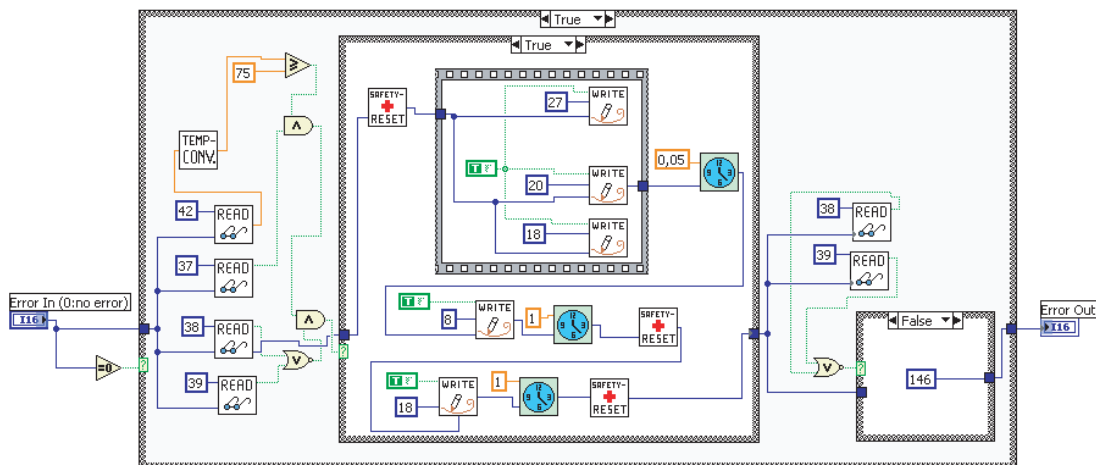


Abbildung 7.9: „DuscheausTank3.vi“ als Beispiel für einen Programmbaustein des automatischen Reinigungsprogramms

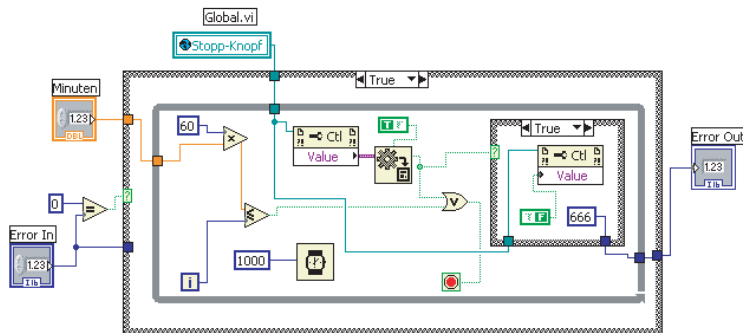


Abbildung 7.10: Wartefunktion „warten.vi“. Diese Funktion ermöglicht das Abbrechen des automatischen Programms zu jeden Zeitpunkt.

mehr als eine Bedingung überprüft, und trat dabei ein Fehler auf, wird stellvertretend der Code für „Ultraschallwanne nicht leer“, also 146, angegeben.

Sind alle Bedingungen für die Durchführung des Unterprogramms „DuscheausTank3.vi“ erfüllt, wird die angeschlossene Sequenz ausgeführt, die nacheinander zeitgesteuert die verschiedenen Ventile und Pumpen aktiviert und deaktiviert. Die den Kanalnummern zugeordneten Geräte sind in der Tabelle A.2 aufgeführt. In diesem Fall werden zunächst die Ventile V1 (Kanal 18), V13 (Kanal 20) und V9 (Kanal 27) geöffnet, dann wird eine bestimmte Zeit gewartet und Pumpe D (Kanal 8) aktiviert. Ein „SafetyReset“-Befehl schließt bzw. deaktiviert zwischenzeitlich alle Ventile und Geräte. Danach wird das Abflussventil V1 noch einmal für eine bestimmte Zeit geöffnet, damit das übrige Duschwasser ablaufen kann.

Beide Füllstandssensoren in der Ultraschallwanne sollten nach dem Abspritzen mit Wasser „leer“ melden, falls das Abfließen des Schmutzwassers ordnungsgemäss funktioniert hat. Dies wird im folgenden Schritt nochmals überprüft. Wurde keine Fehlfunktion festgestellt, wird der Wert Null als Errorcode ausgegeben und an das nächste Unterprogramm weitergereicht, womit dieses Unterprogramm beendet ist.

Das interaktive Programm ist einfach strukturiert und lässt sich jederzeit durch Betätigen des „Stop“-Buttons kontrolliert beenden. Für den Fall einer nicht durch das Programm festgestellten Fehlfunktion der Anlage muss auch beim automatischen Betrieb ein manueller Abbruch möglich sein. Das automatische Programm ist jedoch wesentlich komplexer und die datenflussgesteuerte Programmierungsart von LabVIEW erschwert einen Zugriff auf manuelle Eingaben während des Ablaufs. Im automatischen Programm konnte nicht die durch LabVIEW zur Verfügung gestellte Wartefunktion verwendet werden, da diese während ihrer eingestellten Ablaufzeit auf keinerlei Eingabe reagiert. Daher wurde eine eigene Funktion „warten.vi“ geschrieben, welche in Abbildung 7.10 gezeigt ist.

Diese Wartefunktion benötigt als Eingabe eine Zeitangabe in Minuten, sowie den Errorcode. In einer Schleife wird jeweils eine Sekunde lang gewartet und dann die Abbruchbedingung überprüft. Diese ist zum einen gegeben, wenn der Zähler der Schleife den vorge-

gebenen Zeitwert in Sekunden erreicht hat oder falls der Stop-Button betätigt wurde. Auf diesen wird über eine Referenz im Hauptprogramm zugegriffen.

Ausblick

Aufgrund des in Abschnitt 6.3.2 erwähnten Lieferengpasses bei den Sinusgeneratoren der Füllstandssensoren, sowie einer Undichtigkeit in einem der Versteifungsrohre der Ultraschallwanne, welche durch die Herstellerfirma behoben werden muss, konnten im Rahmen dieser Diplomarbeit noch keine vollständig automatisch gesteuerten Testläufe durchgeführt werden. Bei der Inbetriebnahme der Anlage sollten folgende Punkte daher besondere Beachtung finden:

- Eine Vermessung der Pump- und Einlaufzeiten der Flüssigkeiten in das Ultraschallbad in Abhängigkeit von der Ausgangsfüllhöhe der Vorratstanks kann die Reinigungsprozedur optimieren. Insbesondere aus der Viskosität von Axarel, die sich stark von der von Wasser unterscheidet, können sich noch Anpassungen der Zeiten ergeben.
- Tests für das Ablaufverhalten von Flüssigkeiten in der Ultraschallwanne haben gezeigt, dass Axarel-Rückstände als öliger Film auf der Wasseroberfläche von Restwasser-Pfützen im Bad verbleiben können. Eine Verringerung dieses Films kann durch ein intervallartiges Spülen nach dem Abpumpen des Axarel 9100™ aus dem Bad herbeigeführt werden.

8 Der Ultrahochvakuumofen für Ausgastests

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens der Drahtelektrode, sowie zur Bestimmung der Ausgasrate der gereinigten Elektrodenbauteile wurde eine bis 400 °C beheizbare Ultrahochvakuumkammer aufgebaut. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde dazu ein Test-Vakuumstand realisiert, sowie eine automatische Temperatursteuerung der Anlage entwickelt. Der Aufbau des Ofens, der zugehörigen Heizung und Isolation, sowie die Installation des Massenspektrometers wurde von A. Gebel ebenfalls in einer Diplomarbeit an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster durchgeführt [Geb07].

Mittels der Vakuumapparatur ist eine Kontrolle der UHV-Tauglichkeit der in der Ultraschallreinigungsanlage gesäuberten Drahtelektroden-Bauteile möglich. Außerdem können eventuelle Verschmutzungen oder Reinigungsmittel-Rückstände durch Massenspektrometrie nachgewiesen und analysiert werden.

Aufgrund der in Abschnitt 7.2 genannten mechanischen Problemen beim Ultraschallbad konnte noch kein vollständiger Testlauf mit dem Reinigungsmittel Axarel 9100™ durchgeführt werden. Es musste daher im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit auf Untersuchungen der Qualität der Reinigungsprozedur verzichtet werden. Im Folgenden soll dennoch kurz beschrieben werden, welche Messungen bei der vollständigen Inbetriebnahme der Reinigungsanlage durchgeführt werden können, um die Reinigungswirkung auch quantitativ zu belegen.

Damit mit der eingesetzten Pumpleistung ein Enddruck von 10^{-11} mbar im Hauptspektrometer erzeugt werden kann, darf die Ausgasrate der Drahtelektrode nach den KATRIN-Spezifikationen einen Wert von $3 \cdot 10^{-13}$ mbar·l·s⁻¹·cm⁻² nicht überschreiten. Um dies zu überprüfen, kann mit Hilfe des UHV-Ofens über Druckanstiegsmessungen die Ausgasrate von Proben-Bauteilen ermittelt werden. In diesem Zusammenhang ist es möglich, die Eigenschaften von ungereinigten, nach herkömmlicher Weise gesäuberten Testobjekten, sowie von denen, welche die automatische Reinigungsprozedur in der Ultraschallanlage durchlaufen haben, zu vergleichen. Durch eine Referenzmessung des leeren Ofens kann der Beitrag der Ausheizapparatur selbst errechnet werden, die mit ihrer nicht unerheblichen Innenfläche die gemessene Ausgasrate beeinflusst. Daher ist es auch wichtig, dass die Oberfläche der zu untersuchenden Proben-Bauteile eine ähnliche Größe wie diese besitzt, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Die Abmessungen des Ofens lassen es z.B. zu, mehrere Edelstahlkämme der Drahtelektrode gleichzeitig zu untersuchen, wenn diese in einem Haltegestell nebeneinander angeordnet werden.

Mittels des an den UHV-Ofen angeschlossenen Quadrupol-Massenspektrometers lässt sich die Zusammensetzung des Restgases in der Vakuumkammer analysieren. Damit können

während der Druckanstiegsmessungen auch Ausgasraten für einzelne Elemente oder Verbindungen abgeschätzt werden, um Rückschlüsse auf eventuelle Lösungsmittelrückstände oder nicht gründlich entfernte Verunreinigungen ziehen zu können. Aus einer genauen Bestimmung der Quellen des austretenden Gases können sich Hinweise auf Schwachstellen oder Fehler bei der Reinigung ergeben. Damit ist eine Verbesserung der Reinigungsanlage oder -prozedur nach ausführlichen Ausgasmessungen möglich, falls dabei erhöhte Ausgasraten der gereinigten Bauteile auftreten.

8.1 Überblick über den Aufbau des UHV-Ofens

Der UHV-Ofen besteht aus einer Probenkammer (2,00 m Länge, 30 cm Durchmesser) für die zu untersuchenden Bauteile und einer damit verbundenen, kugelförmigen Messkammer. An diese sind Pumpen, Druckmessgeräte sowie ein hochempfindliches Quadrupol-Massenspektrometer angeschlossen. Ein Foto des UHV-Ofens findet sich in Abbildung 8.1. Hier ist er im Zustand vor der Ummantelung mit zwei Schichten Steinwolle und wärmeisolierendem Gewebe gezeigt.

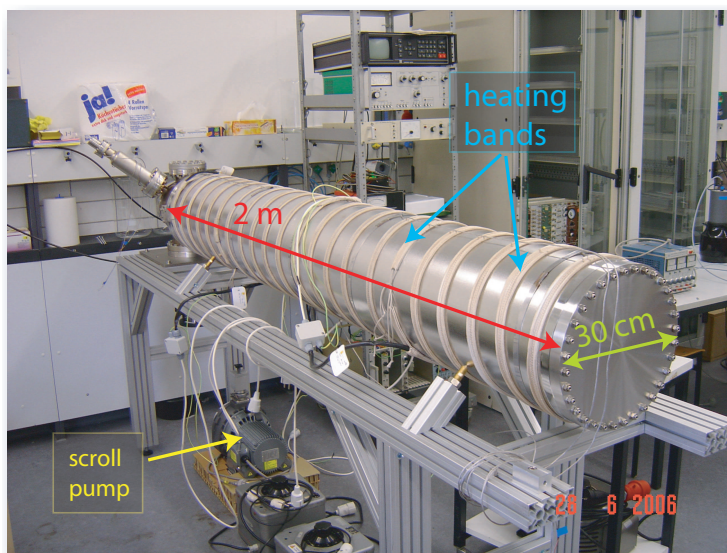


Abbildung 8.1: Aufbau des Vakuumofens. Vorne im Bild ist die 2 m lange Probenkammer erkennbar. Die kugelförmige Kammer mit den angeschlossenen Messinstrumenten befindet sich verdeckt dahinter.

Zwei kaskadierte Turbopumpen (Leybold Turbovac 340M, 3401/s sowie eine Pfeiffer TMP, 251/s) sorgen dafür, dass die beiden verbundenen Kammern auf einige 10^{-10} mbar evakuiert werden können. Eine ölfreie Scrollpumpe (Leybold SC 15 D, $15 \text{ m}^3/\text{h}$) wird als Vorpumpe für die Turbopumpen eingesetzt. Der Druck wird überwacht mittels eines Ionisationsmessgeräts (Leybold IONIVAC ITR 90), sowie bei Temperaturen über 150°C durch ein Bayard-Alpert Druckmessgerät vom Typ VIG 17 (Vacuum Generators).

Insgesamt 8 Heizbänder mit jeweils bis zu 1,25 kW Leistung wurden an der Außenhülle der Vakuumapparatur installiert. Zur Temperatúrauslese werden 8 PT100-Messwiderstände eingesetzt. Diese sind jeweils nahe den Heizbändern, sowie an besonders temperatur-

kritischen Stellen, wie den großen Flanschen oder den Messinstrumenten, angebracht. In Abbildung 8.2 ist eine schematische Darstellung des Ofens mit den Positionen der Heizbänder gezeigt. Die maximal erlaubten Temperaturen der Messinstrumente liegen im Bereich zwischen 150 °C (IONIVAC) und 350 °C (Quadrupolmassenspektrometer), jeweils bei demontierter Elektronik. Daher sind diese empfindlichen Geräte an dem angeflanschten kugelförmigen Messvolumen angebracht. Dieses wird durch einen abfallenden Temperaturgradienten über die Länge der Apparatur nicht den beim Ausheizen im Probenvolumen herrschenden Temperaturen ausgesetzt. Ebenfalls wurde darauf geachtet, durch geeignete Wahl der geometrischen Anordnung die einfallende Strahlungswärme zu minimieren.

Besondere Aufmerksamkeit beim Erwärmen und Abkühlen der Vakuuapparatur muss auch den Kupferring-gedichteten Flanschen und dem NW 150 Zugschieber zukommen. Beide vertragen keine schnellen Temperaturänderungen, da sie sonst ungleichmäßig erwärmt und durch die lokal unterschiedliche Materialausdehnung undicht werden können. Die maximale Temperatursteigerung pro Zeit beträgt daher für kupfergedichtete Flansche etwa 1 Grad pro Minute, was sowohl während des Erwärmens als auch während des Abkühlens genau überwacht werden muss.

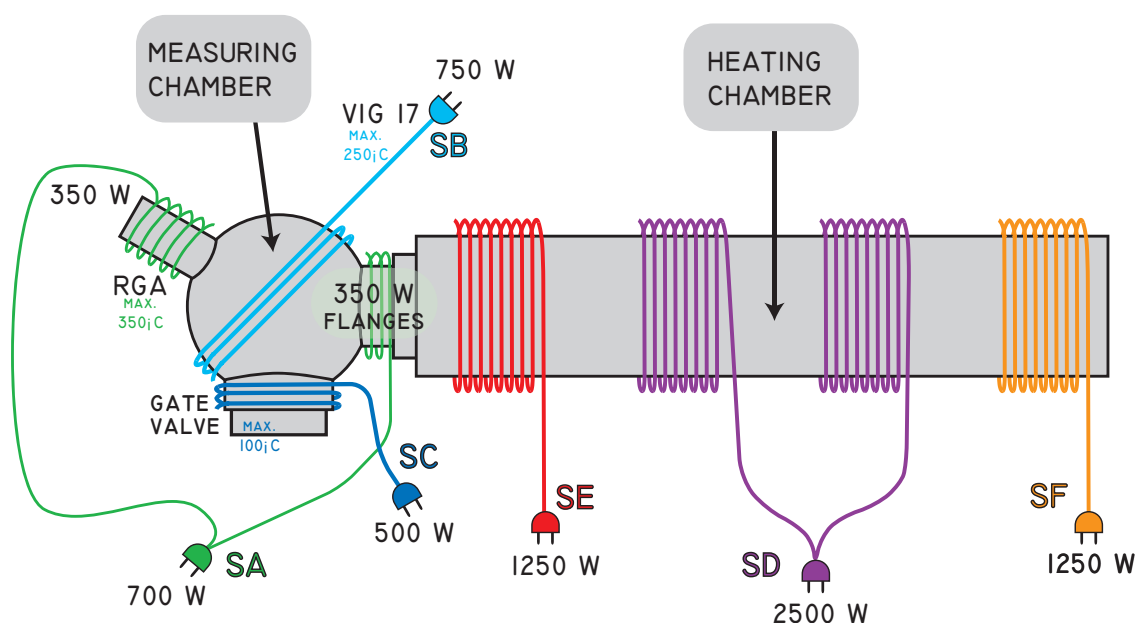


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung des Ofens mit Heizbändern. Im Gegensatz zu dieser Zeichnung wurde in Realität auf eine gleichmäßige Wicklung der Heizbänder geachtet, siehe auch Abbildung 8.1. Die zugeordneten Stromversorgungsanschlüsse für die Heizbänder an der Heizsteuerung sind ebenfalls eingetragen (SA bis SF). Siehe dazu auch Abbildung 8.3.

8.2 Entwicklung einer automatischen Heizsteuerung für den Ausgasofen

Aufgrund der geringen erlaubten Temperatursteigerung der Anlage dauert ein Ausheizvorgang bis 350 °C mindestens 13 Stunden, eingeschlossen 5,5 Stunden aufheizen, 2 Stunden halten der Maximaltemperatur und 5,5 Stunden abkühlen. Während der gesamten Zeit müssen die Temperaturen und Temperatursteigungen aller Sensoren überwacht und die Leistung der einzelnen Heizbänder dementsprechend angepasst werden. Manuell ist dies eine mühsame und zeitraubende Arbeit. Im Hinblick auf die weitere Verwendung des UHV-Ofens im KATRIN-Projekt, z.B. zur thermischen Vorbehandlung der Elektroden-drähte (siehe Diplomarbeit A. Gebel) wurde daher eine automatische Heizsteuerung für den UHV-Ofen entwickelt, die genau diese Temperaturvorgänge überwacht und regelt.

8.2.1 Aufbau und Funktionsweise der Heizsteuerung

Die Heizsteuerung ist ein eigenständiges Gerät, das keinen Anschluss an einen Computer oder dergleichen benötigt. Sie wird durch einen Microcontroller (C-Control M-Unit 2.0) der Firma Conrad Elektronik gesteuert, der über ein Schnittstellenmodul programmiert wird. Die C-Control Unit verfügt über 8 analoge Eingänge. Ein 8-bit AD-Wandler verarbeitet die anliegenden Spannungen zu digitalen Signalen, die an den Microcontroller weitergereicht werden. Als Ausgänge stehen 16 digitale Ports zur Verfügung, wovon zwei als I²C-Bus geschaltet werden können, was weitere Möglichkeiten zur Ansteuerung externer Geräte bietet. Der prinzipielle Aufbau der Heizsteuerung ist in Abbildung 8.3 gezeigt. Die schon in Kapitel 6.3.1 beschriebene Temperatur-Ausleseschaltung dient auch hier dazu, den aktuellen Widerstandswert der sechs eingesetzten PT100-Sensoren in eine Spannung zwischen 0 V und 5 V umzusetzen. Diese wird auf jeweils einen der analogen Eingänge der C-Control Unit gelegt. Ebenfalls sechs Ausgangsbuchsen mit je 1,5 kW Leistung sind über Relais an die digitalen Ausgänge des Microcontrollers angeschlossen und können zur Versorgung der Heizbänder genutzt werden. Dabei ist jeweils ein PT100-Sensor fest einem der Ausgänge zugeordnet. Er wird an der UHV-Anlage in der Nähe der zu steuernden Heizbänder positioniert und kann damit die zu deren Leistungsregelung erforderlichen Temperaturwerte zur Verfügung stellen.

Für das Gehäuse der Heizsteuerung wurde ein 19-Zoll Einschubrahmen gewählt, damit sie transportabel und gut in den bestehenden Aufbau der Messtechnik des Ausheizofens integrierbar ist. In ihm finden Relais, Netzteile für die verschiedenen Stromversorgungen, sowie die Elektronik Platz. Einen Blick in das Innere der Heizsteuerung bietet Abbildung 8.4. Im hinteren Bereich des Gehäuses sind die leistungsführenden Elemente untergebracht. Diese sind unter anderem das Schütz zur Unterbrechung der Stromversorgung, sowie die Relais, welche die Heizbänder schalten. An der Rückseite der Heizsteuerung sind sechs Steckdosen montiert, an denen die Heizbänder angeschlossen werden können. Damit die Steuerung die erforderliche Leistung zur Verfügung stellen kann, wird sie über einen 16 A Drehstromanschluss versorgt. Alle weiteren benötigten Spannungen wie z.B. die 5 V Ver-

sorgungsspannung der C-Control und der TTL-Elektronik werden über Netzteile heruntertransformiert. Diese sind im linken Teil der Steuerung platziert.

Dicht hinter der Frontplatte mit den Bedienelementen und LED-Anzeigen befindet sich die Steuerelektronik. Diese ist auf zwei Euro-Platinen im Format $10\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ platziert, welche übereinander angeordnet sind. Der entsprechende Schaltplan ist in Abbildung B.1 im Anhang gezeigt. Die elektronische Schaltung wurde zunächst zu Testzwecken auf einer Lochplatte erstellt. Nach erfolgreicher Funktionsüberprüfung und Programmierung des Microcontrollers wurde der entwickelte Schaltplan mittels des Layoutprogramms EAGLE digitalisiert und als kompaktes Platinenlayout umgesetzt. Der endgültige Aufbau der Heizsteuerung wurde danach in Zusammenarbeit mit der Elektronikwerkstatt realisiert.

Die Frontplatte der Steuerung enthält die zur Bedienung nötigen Elemente. Ein Foto findet sich in Abbildung 8.5. Im linken Teil sind Anschlussbuchsen für die sechs PT100-Sensoren positioniert. Außerdem befinden sich mittig angeordnet die LED-Displays der Kanäle A bis F. Diese zeigen im Konfigurationsmodus die eingestellten Temperatursollwerte an und während des Betriebs die ausgelesenen Temperaturen der zugeordneten PT100 Sensoren. Es wurden wegen der besseren Lesbarkeit große selbstleuchtende LED-7-Segment-Anzeigen verwendet. Im rechten Teil befindet sich ein mit 8 Tastern versehenes Bedienfeld, über das der Benutzer die Einstellung der Solltemperaturen der einzelnen Kanäle vornehmen kann.

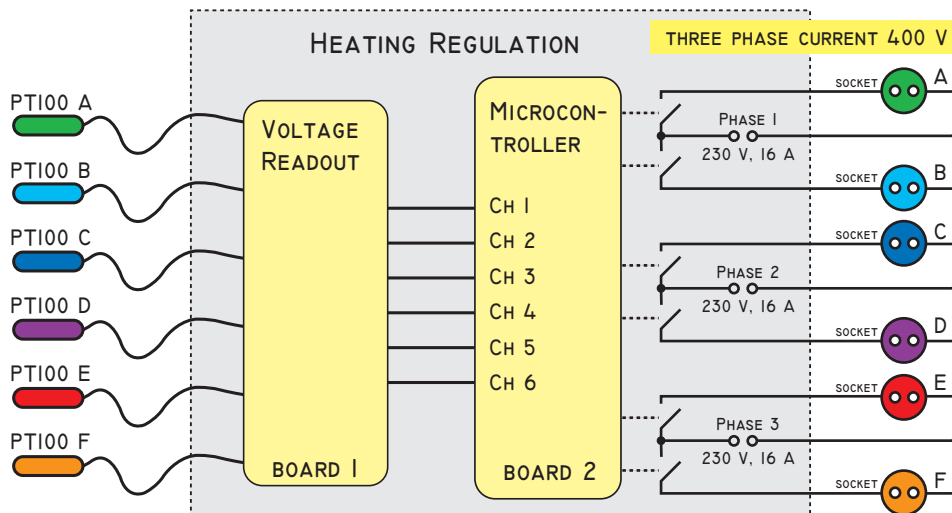


Abbildung 8.3: Schematischer Aufbau der Heizsteuerung. Die PT100-Sensoren sind an die Temperaturauslese-Platine angeschlossen, die Spannungswerte an die AD-Ports des Microcontrollers weiterleitet. Über digitale Ausgangsports steuert der Microcontroller Relais, die die Stromversorgung der Heizbänder schalten.

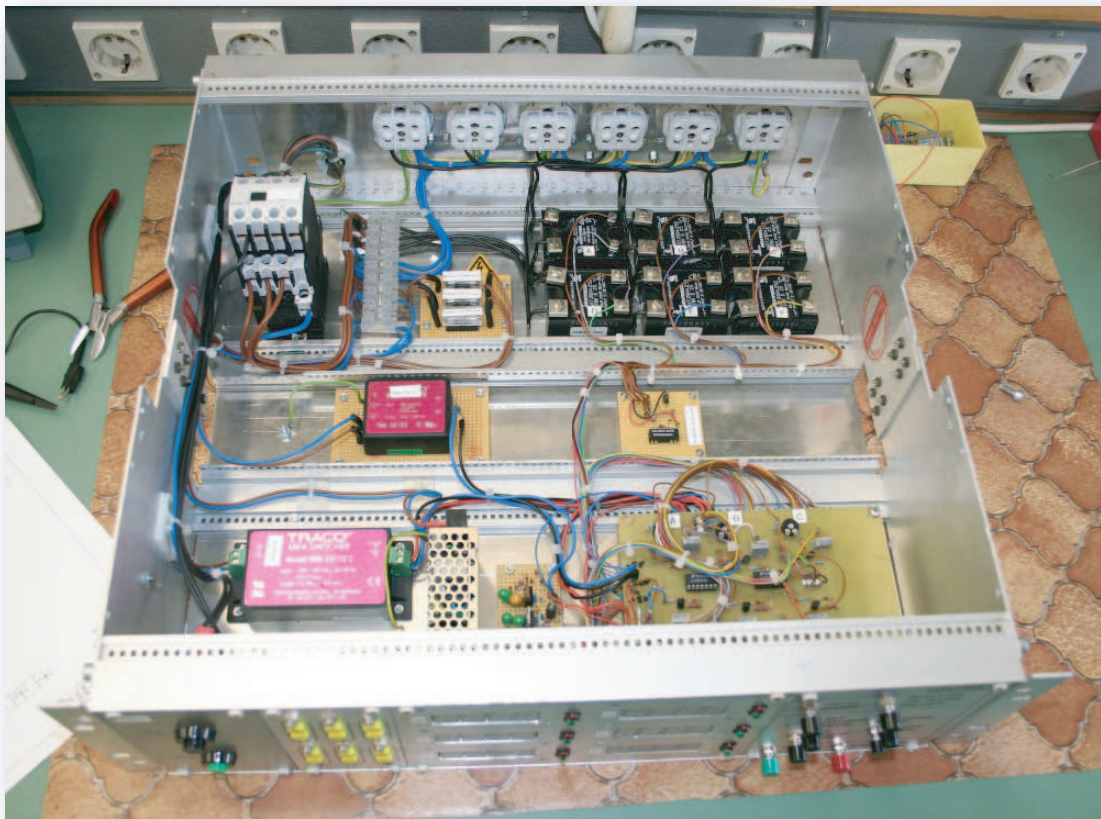


Abbildung 8.4: Innenansicht der Heizsteuerung: Vorne rechts befindet sich die Steuerungselektronik. Da diese auf zwei übereinanderliegenden Platinen untergebracht ist, ist die C-Control mit dem Microprozessor verdeckt.

Die sechs LED-Displays sind über einen Multiplexer am I²C-Bus der C-Control Unit angeschlossen. Der Multiplexer wird benötigt, da den Displays nur vier verschiedene Adressen über eine Jumper-Konfiguration zuzuordnen sind. Daher werden Displays mit der gleichen Adresse auf verschiedene Kanäle des Multiplexers gelegt. Die Ansteuerung der einzelnen Anzeigen kann dann über die Programmierung geschehen.

Konfiguration und Bedienung der Ausheizsteuerung

Die Temperaturregelung der Ausheizsteuerung beruht auf dem folgenden einfachen Prinzip: Der Benutzer definiert für jeden Kanal A bis F einen Soll-Temperaturwert als obere Schranke, mit dem der aktuell ausgelesene Wert des zugeordneten PT100-Sensors verglichen wird. Der Microcontroller schaltet das Heizband ein, wenn die Temperatur unter dem Sollwert liegt. Die grüne Kontrolldiode neben der entsprechenden LED-Anzeige leuchtet auf. Wird die Solltemperatur überschritten, deaktiviert der Controller Heizband und

Leuchtdiode. Die auf den UHV-Ofen übertragene Leistung wird so durch intervallartiges Aktivieren der Heizungen angepasst.

Der Sollwert für die Temperaturregelung lässt sich im Konfigurationsmodus der Steuerung einfach über das Tastenfeld einstellen. Ist die Stromversorgung der Steuerung durch Drücken des „On“-Knopfes aktiviert, startet man das interne Programm über den „Program Start“-Knopf. Um in den Konfigurationsmodus eines Kanals zu gelangen, drückt man den Knopf „Switch Channel“, solange, bis im Display des gewünschten Kanals das Wort „conf“ zu lesen ist. Zum Einstellen des maximalen Temperatursollwertes hält man nun den Knopf „Set Max Range“ gedrückt. Es wird die derzeit eingestellte Solltemperatur angezeigt, welche nach Einschalten auf 20 °C definiert ist. Über die Tasten „Range Up“ und „Range Down“ lässt sich diese Zahl auf den gewünschten Wert verstellen.

Sind alle Schwellwerte eingestellt, startet man den Heizvorgang durch Betätigen der Taste „Regulation and Heating On/Off“. Die Möglichkeit zum Einstellen der Schwellwerte ist nun deaktiviert und die Displays zeigen die aktuellen Temperaturwerte an. Durch erneutes Drücken dieser Taste lässt sich der Heizvorgang unterbrechen und man gelangt in das Konfigurationsmenü zurück.

Damit sich die Flansche der UHV-Apparatur nicht zu schnell und ungleichmäßig erwärmen, wurde in der Programmierung der Heizsteuerung eine automatische Drosselung der Heizleistung auf 1 Grad pro Minute integriert. Ebenso existiert für das Abkühlen eine Funktion, welche die Temperatur kontrolliert mit maximal derselben Steigung sinken lässt. Sie wird durch Drücken der Taste „Range Down“ während des Heizvorgangs aktiviert und solange ausgeführt, bis der Benutzer wieder in den Konfigurationsmodus wechselt.



Abbildung 8.5: Frontansicht der Heizsteuerung. An Kanal A ist ein PT100-Sensor angeschlossen, dessen Temperatur in Grad Celsius angezeigt wird.

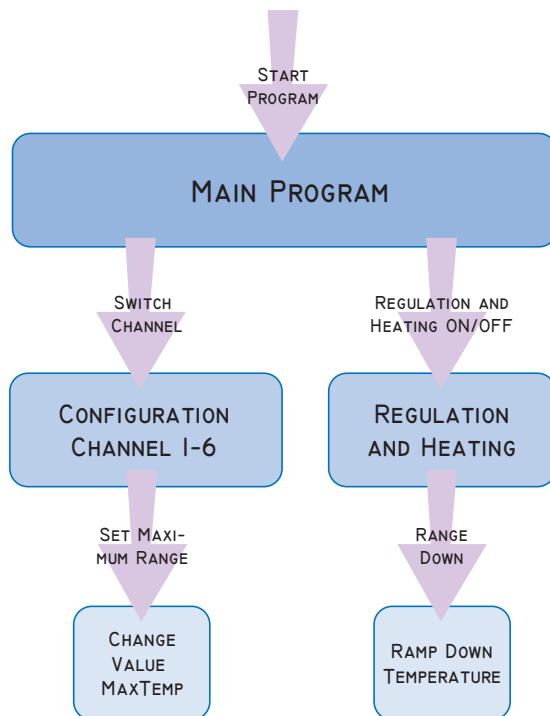


Abbildung 8.6: Schematischer Aufbau des Heizsteuerungsprogramms. Durch Betätigen der jeweiligen Tasten (lila Pfeile) gelangt man in die nächst niedrigere Subroutine.

Falls im Betrieb des Microcontrollers eine Fehlfunktion auftreten sollte, kommt eine vom Microcontroller unabhängige Notabschaltung zum Einsatz, welche jeden der sechs Eingangskanäle überwacht. Die ausgelesenen Spannungen sind daher nicht nur an die AD-Ports des Microcontrollers angeschlossen, sondern zusätzlich auch an die nichtinvertierenden Eingänge von Operationsverstärkern, die als Komparatoren geschaltet sind. Sie vergleichen die anliegenden Spannungen mit jeweils einem über ein Potentiometer separat einstellbaren Spannungswert, der damit eine Maximaltemperatur für diesen Kanal festlegt. Die Einstellschrauben für diese Trimm-Potentiometer befinden sich direkt über den Anschlussbuchsen der Sensoren. Überschreitet die ausgelesene Spannung die Referenzspannung in einem Kanal, ändert der zugehörige Komparator seine Ausgangsspannung von 0 V nach +5 V. Die nachgeschalteten Oder-Gatter vereinigen die Not-Aus-Signale der sechs PT100-Sensoren. Das resultierende Signal wird auf der Platine abgegriffen und als Steuersignal für die Notabschaltung aller Heizbänder durch ein Schütz verwendet. Über eine rote LED neben dem Display wird angezeigt, welches Heizband überhitzt und damit die Notabschaltung ausgelöst hat. Der Temperaturwert, bei dem die Notabschaltung auslöst, ist einmalig vom Benutzer zu wählen und den speziellen Gegebenheiten an der auszuheizenden Anlage anzupassen. Während im mittleren Teil der Ausheizkammer die Temperatur bis über 350 °C ansteigen kann, ist es sinnvoll, in der Nähe von empfindlichen Messinstrumenten, Ventilen oder Pumpen die Notabschaltung auf deren maximal erlaubte Temperaturwerte einzustellen.

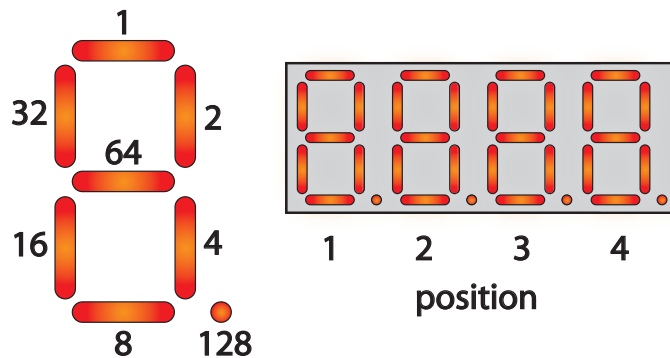


Abbildung 8.7: Ansteuercodes der Siebensegmentanzeigen. Um eine bestimmte Ziffer zu erhalten, werden die Werte der benötigten Segmente addiert. Für eine vierstellige Zahl sendet man die Codes in der Reihenfolge: Position 4, 3, 2, 1.

8.2.2 Programmierung des Microcontrollers

Der Microcontroller wurde in der Programmiersprache Basic⁺⁺ unter Verwendung der speziell auf den Einsatz mit der C-Control abgestimmten Entwicklungsumgebung „Workbench⁺⁺“ programmiert. Über ein Schnittstellenmodul von Conrad Elektronik kann der kompilierte Programmcode auf die C-Control Unit übertragen werden. Dieses verfügt über eine RS-232-Schnittstelle und lässt sich so an nahezu jeden Computer anschließen. Der vollständige Programmcode findet sich im Anhang in Kapitel D. Eine schematische Darstellung des Programmaufbaus ist in Abbildung 8.6 gezeigt.

Temperaturregelung

Die Regelung der Temperatur ist im Programm sehr einfach aufgebaut. In der Regulationschleife werden in regelmäßigen Abständen die an den analogen Eingängen der C-Control anliegenden Spannungswerte eingelesen und durch den internen AD-Wandler in eine 8-bit Zahl umgewandelt. Der Microcontroller und die Programmiersprache Basic⁺⁺ können nur ganze Zahlen im Bereich -32768 bis 32767 verarbeiten. Somit war es nicht möglich, zur Umrechnung der Spannungswerte in Temperaturen die quadratische Funktion aus Kapitel 6.3.1 zu verwenden. Diese Umsetzung leistet daher eine Tabelle, in der jedem der 256 Spannungswerte die entsprechende exakt errechnete Temperatur zugeordnet ist. Für alle Kanäle wird dann in einer Schleife jeweils zuerst die aktuelle Temperatur an das Display gesendet und dann mit den zugehörigen aktuellen Schwellwerten verglichen. Mit den Ergebnissen daraus werden die Digitalports angesteuert, an die die Relais für die Heizbänder über einen Treiber angeschlossen sind.

Ansprechen der Displays

Die Funktion „Set“ hat die Aufgabe, die Displays anzusprechen und die anzuzeigenden Informationen in einem für das Display lesbaren Format zu übermitteln. Es können vierstellige Zahlen auf den vier Siebensegmentanzeigen dargestellt werden, sowie einige einfache Buchstaben. Für die Temperaturanzeige werden jedoch nur Werte zwischen 0 und 470 °C benötigt, weswegen das Programm sich an dieser Stelle auf die Anzeige von dreistelligen Zahlen beschränkt. Die letzte Stelle wird zur Anzeige von Zusatzinformationen

verwendet, wie z.B. „C“ für Grad Celsius oder ein oberer Strich für die Kennzeichnung der Maximaltemperatur.

Für die Anzeige der aktuellen Temperatur wird der durch das Programm zuvor ausgelesene Wert in seine 3 Ziffern aufgespalten. In einer Tabelle übersetzt das Programm automatisch diese Ziffer in eine Zahl, die dem Display Informationen darüber gibt, welche Segmente aktiviert werden sollen. Dies ist eine 8-bit Binärzahl, wobei jedem der sieben Segmente und dem Punkt ein Bit dieser Zahl zugeordnet ist, siehe dazu Abbildung 8.7.

Um die Displays zu erreichen, wird zunächst der I²C-Bus initialisiert. Die sechs Display besitzen 3 verschiedene Adressen, wobei Displays mit gleicher Adresse auf die zwei Kanäle des zwischengeschalteten Multiplexers aufgeteilt sind. Daher wird zunächst der Multiplexer angesprochen, der die Informationen an die Displays weiterleitet. Zunächst wird eine Folge von Konfigurationsbytes gesendet, die immer gleich ist. Sie bestimmt z.B. die Helligkeit der Anzeigen und welche der Segmente überhaupt aktiviert werden. Danach sendet man für die vier Stellen die Informationsbytes und schließt die I²C-Bus-Verbindung. Die Anzeigen halten den letzten Wert, bis sie eine neue Instruktion erhalten.

Automatisches Aufheizen und Abkühlen

Um die UHV-Apparatur zu schonen, existiert eine Drosselung der Heizleistung der Bänder auf 0,75 °C pro Minute, sowohl für das Aufheizen als auch für das Abkühlen. Nach Eingabe des maximalen Temperaturwerts, auf den die Anlage erhitzt werden soll, startet der Benutzer den Heizvorgang. Um die Leistung der Heizbänder anzupassen und eine gleichmäßige Erwärmung zu gewährleisten, wird ein interner, temporärer Sollwert verwendet. Dieser beträgt bei Start des Heizvorgangs Raumtemperatur und wird alle 80 Sekunden um 1 °C erhöht, bis er den eingegebenen Maximalwert erreicht hat. Die Steuerung vergleicht die aktuelle Temperatur mit dem temporären Sollwert und schaltet die Stromversorgung der angeschlossenen Heizbänder entsprechend. Ebenso wird beim Abkühlen der Anlage verfahren, der temporäre Sollwert wird dementsprechend alle 80 Sekunden 1 °C erniedrigt.

8.2.3 Erster Test der Ausheizsteuerung

Um die korrekte Funktionsweise der Ausheizsteuerung zu überprüfen, wurde ein erster Testlauf zum geregelten Aufwärm- und Abkühlverhalten durchgeführt. Dazu wurde der evakuierte Ofen von Raumtemperatur bis etwa 150 °C erwärmt und anschließend wieder abgekühlt. Die angezeigten Temperaturen der sechs PT100-Sensoren wurden alle 5 Minuten aufgenommen und in Abbildung 8.8 gegen die verstrichene Zeit aufgetragen. Gut zu erkennen ist, dass der Zugschieber dabei nur bis 90 °C erwärmt wurde, da seine maximal zulässige Temperatur bei 100 °C liegt (rote Kurve).

Die mittlere Steigung der Aufwärmkurven der PT100-Sensoren ergab sich dabei zu 0,77 °C pro Minute (pinkfarbene Linie). Diese liegt sehr nahe bei dem errechneten Wert von 0,75 °C/min. Durch Variation der Auslesefrequenz in der Programmierung lässt sich der Verlauf der Aufwärmkurve noch weiter glätten.

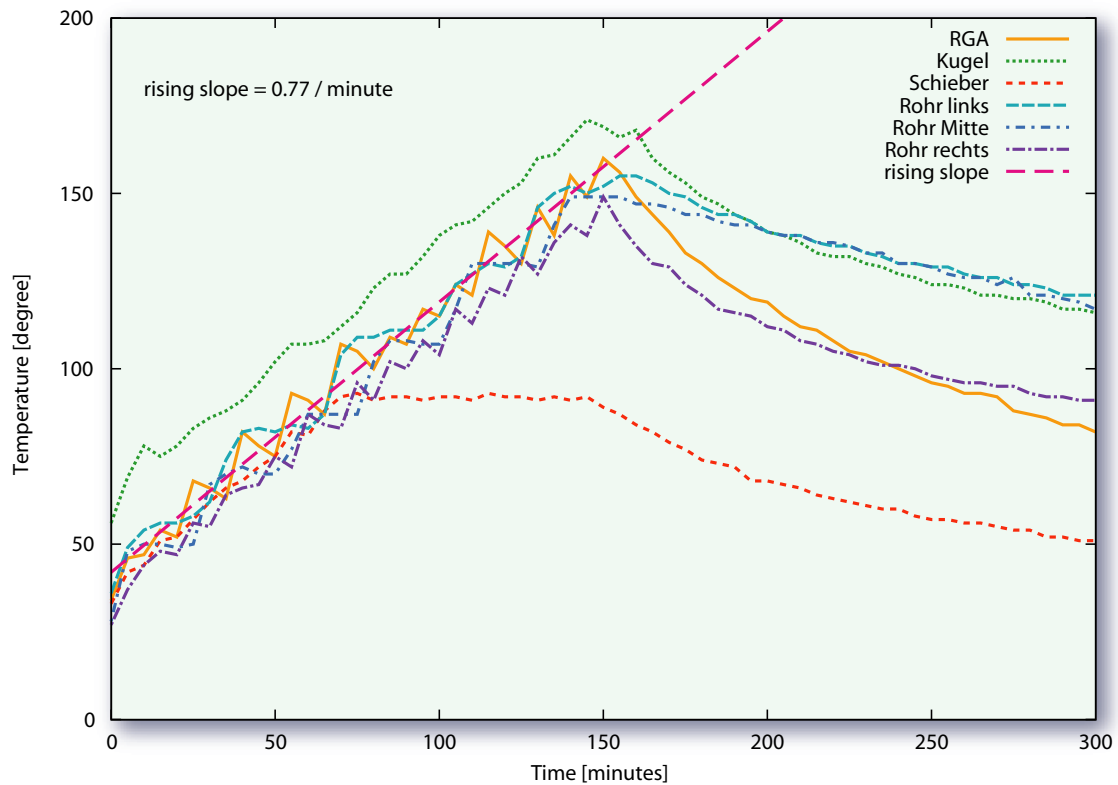


Abbildung 8.8: Testlauf zum Aufwärm- und Abkühlverhalten der Heizsteuerung

Für die Abkühlkurven liegt die Steigung bei dieser Messung weit unter dem zulässigen Wert. Die Ursache dafür, dass die Apparatur so langsam abkühlt, ist in der geringen Temperaturdifferenz zur Umgebung und der guten Isolation des Ofens zu sehen.

In diesem ersten Testlauf der Ausheizsteuerung wurde gezeigt, dass das Regelprinzip der Steuerung funktioniert und Ausheizvorgänge durchführbar sind. Im Regelbetrieb werden einige Feineinstellungen noch optimiert werden.

9 Zusammenfassung

Das zurzeit im Aufbau befindliche KATRIN-Experiment wird die Masse des Elektron-Antineutrinos mit einer Sensitivität im Sub-eV-Bereich untersuchen. Mittels eines MAC-E-Filters wird dazu das Tritium- β -Spektrum im Bereich der Endpunktenergie mit hoher Präzision vermessen, um die Neutrinomasse kinematisch und modellunabhängig zu ermitteln. Dabei kommt zur Untergrundreduktion eine Drahtelektrode zum Einsatz, welche der Unterdrückung von Sekundärelektronen aus der kosmischen Höhenstrahlung sowie aus radioaktiven Verunreinigungen des Spektrometerstahls dient.

Das Hauptspektrometer wird während der Messungen auf 10^{-11} mbar evakuiert, um die Wahrscheinlichkeit von Elektronstößen mit Restgasatomen zu minimieren, die ebenfalls zu einem erhöhten Untergrund beitragen können. Diese strengen Vakuumspezifikationen stellen hohe Anforderungen an die Ausgasrate des gesamten Hauptspektrometersystems und damit auch an die Sauberkeit der Drahtelektrode.

Zur Reinigung der Edelstahlbauteile der aus 240 Einzelmodulen bestehenden Drahtelektrode wurde an der Universität Münster eine Ultraschallreinigungsanlage konzipiert und aufgebaut. Dazu wurde ein Reinigungsverfahren nach Vorbild der ASTeC Reinigungsprozedur für UHV-Komponenten gewählt und an die speziellen Erfordernisse der Drahtelektrode des KATRIN-Hauptspektrometers angepasst.

Einer der Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit lag auf der Entwicklung der vollautomatischen Ansteuerung der Ultraschallanlage. Dies beinhaltet sowohl den Aufbau der elektrischen Steuerelemente der verschiedenen Komponenten der Anlage (Pumpen, Ventile, Ultraschallgeneratoren, etc.), als auch die Softwarekontrolle der Reinigungsprozedur. Zur Zustandskontrolle der Anlage wurden, im Zusammenarbeit mit den Studenten eines Wahlfachpraktikums, spezielle kapazitive Füllstandssensoren entwickelt, welche für die besonderen mechanischen und chemischen Belastungen beim Einsatz mit aggressiven Lösungsmitteln in der Ultraschallreinigung geeignet sind. Diese Sensoren werden zur vollautomatischen Prozesssteuerung benötigt. Für die Temperaturüberwachung der Anlage wurde eine Auslese mit PT100-Temperatursensoren aufgebaut.

Mit Hilfe der grafischen Programmiersprache LabVIEW wurden Steuerungsprogramme für die Anlage entwickelt. Es wurde ein Programm zur manuellen Ansteuerung sowie ein vollständig automatisches Reinigungsprogramm realisiert. Da die Herstellung der Füllstandssensoren aufgrund von Lieferschwierigkeiten von Bauteilen verzögert wurde, konnte die vollautomatische Version der Ansteuerung noch nicht abschließend getestet werden. Mit Hilfe von simulierten Signalen der Füllstandssensoren wurden jedoch die einzelnen Programmmodule einem erfolgreichen Test unterzogen.

Zur Überprüfung der UHV-Tauglichkeit der gereinigten Bauteile sowie zur Bestimmung des thermischen Verhaltens der Drahtelektrodenmodule wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowie der Diplomarbeit von A. Gebel [Geb07] eine ausheizbare Ultrahochvakuumkammer entwickelt. In dieser Arbeit wurde dazu ein Test-Vakuumstand für Pumpen und Messgeräte aufgebaut, sowie für die sehr zeitaufwändigen Ausheizvorgänge des UHV-Ofens eine Microcontroller-Steuerung entwickelt, welche die Temperaturüberwachung und Leistungsregelung der Heizbänder des Ofens übernimmt. Testläufe mit der automatischen Steuerung sind erfolgreich verlaufen, so dass die manuelle Temperaturregelung mittels Transformatoren für jedes Heizband ersetzt werden konnte.

Die mit dem UHV-Ofen geplanten Messungen von Ausgasraten vor und nach dem Ausheizen der in der Ultraschallanlage gereinigten Bauteile konnten im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit noch nicht erfolgen. Aufgrund von Undichtigkeiten in einer extern gefertigten Komponente der Ultraschallanlage waren noch keine Testläufe mit dem Reinigungsmittel Axarel 9100™ möglich. Die geplanten Druckanstiegmessungen und die Untersuchung von Massenspektren werden im Rahmen der Inbetriebnahme der Ultraschallreinigungsanlage in Kürze durchgeführt werden.

A Belegungspläne der PCI-Karten

Tabelle A.1: Belegung der digitalen Eingänge der PCI-7432-Karte. Zusätzlich ist die jeweilige Klemmennummer auf dem Connection-Board angegeben.

Eingang	Klemme	Belegung
IDI_31	70	Ultraschallgeber 1
IDI_30	69	Ultraschallgeber 2
IDI_29	68	Filter A
IDI_28	67	Filter B
IDI_27	66	Filter C
IDI_26	65	Pumpe B
IDI_25	64	Pumpe C
IDI_24	63	Pumpe F

Tabelle A.2: Belegung der digitalen Ausgänge der PCI-7432-Karte. Angegeben ist auch die Klemmverteilung des Connection-Boards.

Position Schaltschrank	Belegung Beschreibung	Name Schema	Karte Port	Board Klemme
US I	Linker Ultraschallgeber	US	IDO_31	95
US II	Rechter Ultraschallgeber	US	IDO_30	94
Ventil I	Tank 2 Einlauf	V6	IDO_13	81
Ventil II	Tank 2 zur Pumpe	V4	IDO_16	38
Ventil III	Wassertank nachfüllen	V8	IDO_17	39
Ventil IV	Abfluss	V1	IDO_18	40
Ventil V	Tank 1 Einlauf	V7	IDO_19	41
Ventil VI	Dusche	V13	IDO_20	42
Ventil VII	Tank 3 Einlauf	V12	IDO_21	43
Ventil VIII	Tank 3 zur Pumpe	V5	IDO_22	44
Ventil IX	Wassertank zur Dusche	V9	IDO_27	91
Ventil X	Abfluss hinter Bodenventil	V14	IDO_23	45
Ventil XI	Reinstwassertank zur Dusche	V11	IDO_25	89
Ventil XII	Axarel hinter Bodenventil	V3	IDO_26	90
Ventil XIII	Bodenventil	V2	IDO_24	88
Ventil XIV	Reinstwassertank nachfüllen	V10	IDO_14	82
Schütz I	Pumpe Dusche	Pumpe D	IDO_8	76
Schütz II	Heizung Axarel	H1	IDO_10	78
Schütz III	Heizung Almeco	H2	IDO_11	79
Schütz IV	Heizung Wasser	H3	IDO_9	77
Schütz V	Heizung Reinstwasser	H4	IDO_12	80
Schütz VI	Heizung Bad	H5	IDO_0	26
Pumpe I	Auffüllpumpe	Pumpe F	IDO_1	27
Pumpe II	Abflusspumpe	Pumpe E	IDO_2	28
Pumpe III	Wasserpumpe	Pumpe C	IDO_3	29
Pumpe VI	Almecopumpe	Pumpe B	IDO_4	30
Pumpe V	Axarelpumpe	Pumpe A	IDO_5	31
Fön	Fön	Fön	IDO_28	92
Heizung Fön	Heizung Fön	Heizung Fön	IDO_29	93

Tabelle A.3: Connectorbelegung der PCI-7432-Karte mit den Portnummern für die digitalen Kanäle.

Pin	Belegung	Pin	Belegung	Pin	Belegung	Pin	Belegung
(1)	IDI_0	(26)	IDO_0	(51)	IDI_8	(76)	IDO_8
(2)	IDI_1	(27)	IDO_1	(52)	IDI_9	(77)	IDO_9
(3)	IDI_2	(28)	IDO_2	(53)	IDI_10	(78)	IDO_10
(4)	IDI_3	(29)	IDO_3	(54)	IDI_11	(79)	IDO_11
(5)	IDI_4	(30)	IDO_4	(55)	IDI_12	(80)	IDO_12
(6)	IDI_5	(31)	IDO_5	(56)	IDI_13	(81)	IDO_13
(7)	IDI_6	(32)	IDO_6	(57)	IDI_14	(82)	IDO_14
(8)	IDI_7	(33)	IDO_7	(58)	IDI_15	(83)	IDO_15
(9)	COM1	(34)	VDD1	(59)	COM2	(84)	VDD2
(10)	COM1	(35)	IGND	(60)	COM2	(85)	IGND
(11)	COM1	(36)	IGND	(61)	COM2	(86)	IGND
(12)	COM1	(37)	IGND	(62)	COM2	(87)	IGND
(13)	IDI_16	(38)	IDO_16	(63)	IDI_24	(88)	IDO_24
(14)	IDI_17	(39)	IDO_17	(64)	IDI_25	(89)	IDO_25
(15)	IDI_18	(40)	IDO_18	(65)	IDI_26	(90)	IDO_26
(16)	IDI_19	(41)	IDO_19	(66)	IDI_27	(91)	IDO_27
(17)	IDI_20	(42)	IDO_20	(67)	IDI_28	(92)	IDO_28
(18)	IDI_21	(43)	IDO_21	(68)	IDI_29	(93)	IDO_29
(19)	IDI_22	(44)	IDO_22	(69)	IDI_30	(94)	IDO_30
(20)	IDI_23	(45)	IDO_23	(70)	IDI_31	(95)	IDO_31
(21)	COM3	(46)	VDD3	(71)	COM4	(96)	VDD4
(22)	COM3	(47)	IGND	(72)	COM4	(97)	IGND
(23)	COM3	(48)	IGND	(73)	COM4	(98)	IGND
(24)	COM3	(49)	IGND	(74)	COM4	(99)	IGND
(25)	NC	(50)	V5V	(51)	NC	(100)	V5V

IDI_n: Isolierter Eingangskanal n

IDO_n: Isolierter Ausgangskanal n

VDDm: Gemeinsamer Pin für Ausgänge der Kanalgruppe m

IGND: Ground für isolierte Ausgangskanäle

COMm: Gemeinsamer Pin für Eingänge der Kanalgruppe m

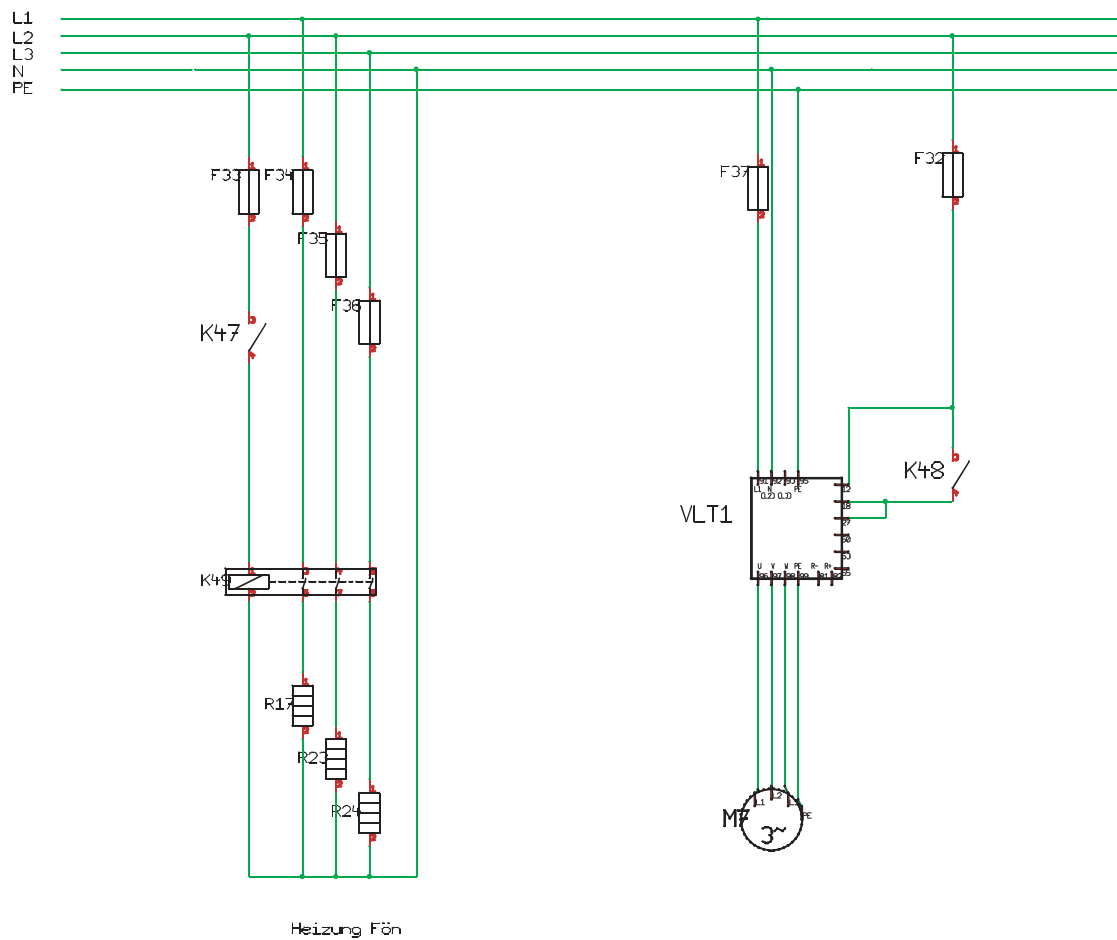
V5V: 5V Versorgung, unregelt

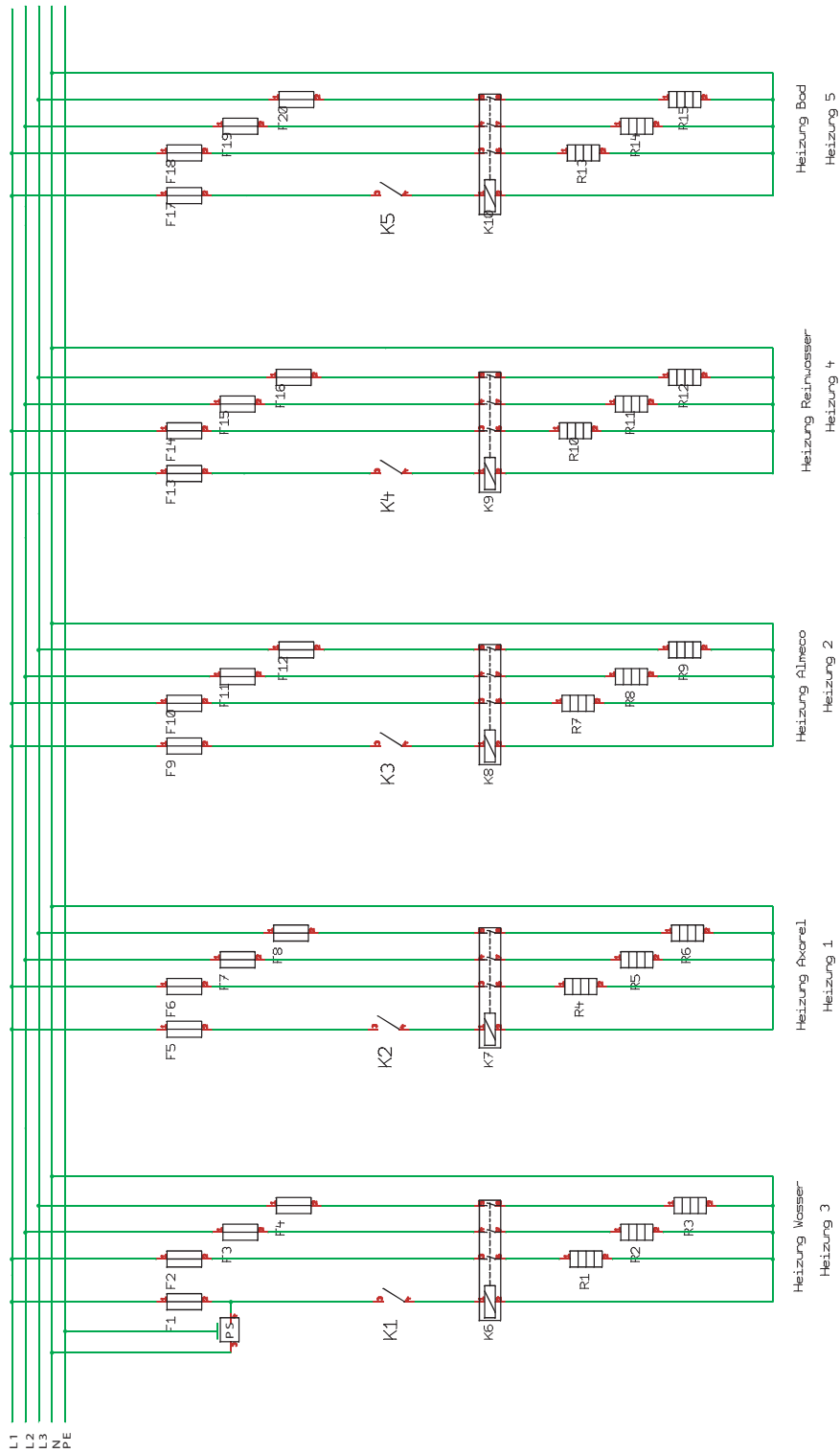
Tabelle A.4: Belegung der analogen Eingänge der PCI-20041C Multifunktionskarte. Zusätzlich ist die Zuordnung der Kanäle im Steuerprogramm gegeben.

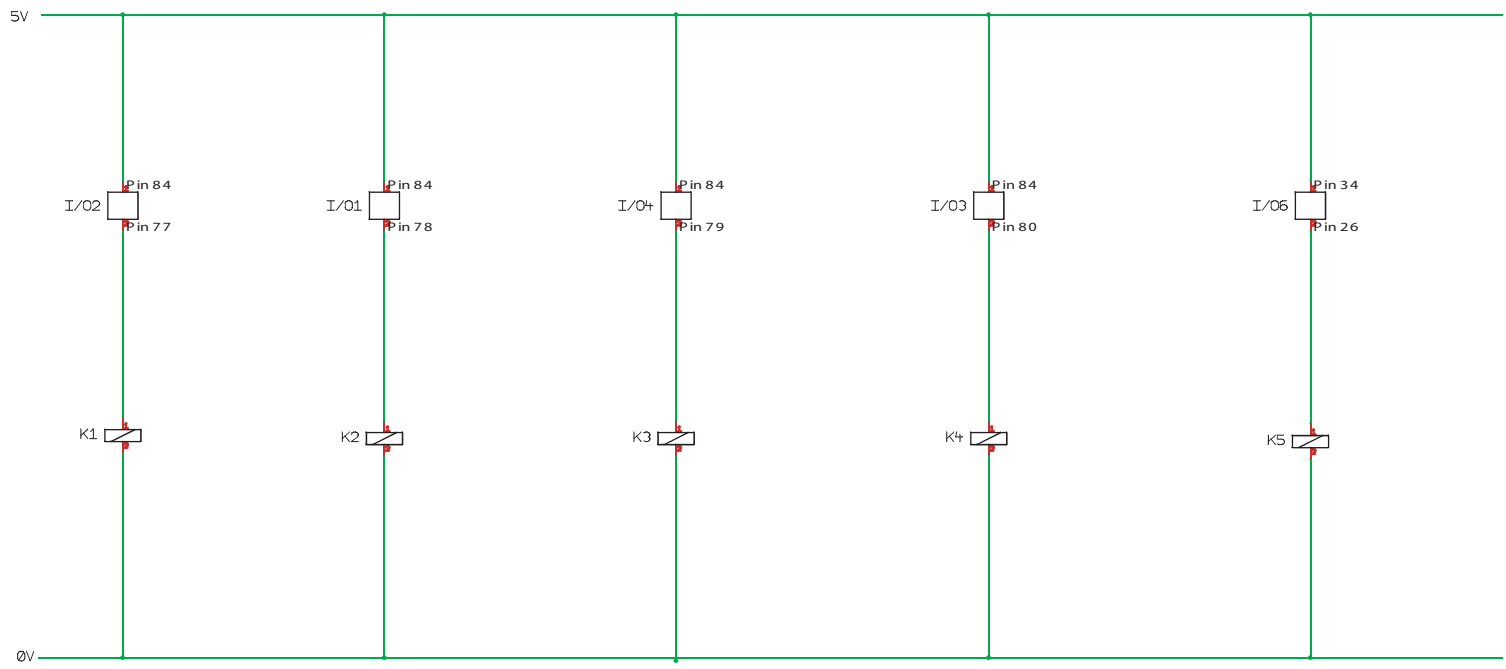
Eingang Klemme	Belegung Sensor	Position Anlage	Programm Port
0	Füllstandssensor S1A	Axareltank Oben	32
1	Füllstandssensor S1B	Axareltank Unten	33
2	Füllstandssensor S2A	Almecotank Oben	34
3	Füllstandssensor S2B	Almecotank Unten	35
4	Füllstandssensor S3A	Wassertank Oben	36
5	Füllstandssensor S3B	Wassertank Unten	37
6	Füllstandssensor S4A	Ultraschallbad Oben	38
7	Füllstandssensor S4B	Ultraschallbad Unten	39
8	Temperatursensor T1	Axareltank	40
9	Temperatursensor T2	Almecotank	41
10	Temperatursensor T3	Wassertank	42
11	Temperatursensor T4	Reinstwassertank	43
12	Temperatursensor T5	Ultraschallbad	44
13	Temperatursensor T6	Gebläse	45
14	Füllstandssensor S5A	Reinstwassertank Oben	46
15	Füllstandssensor S5B	Reinstwassertank Unten	47

B Schaltpläne

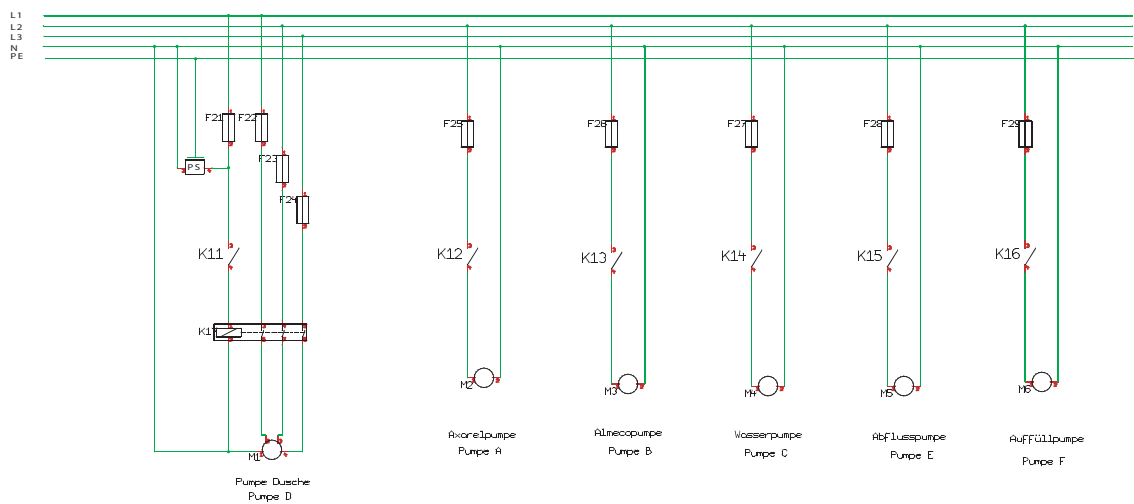
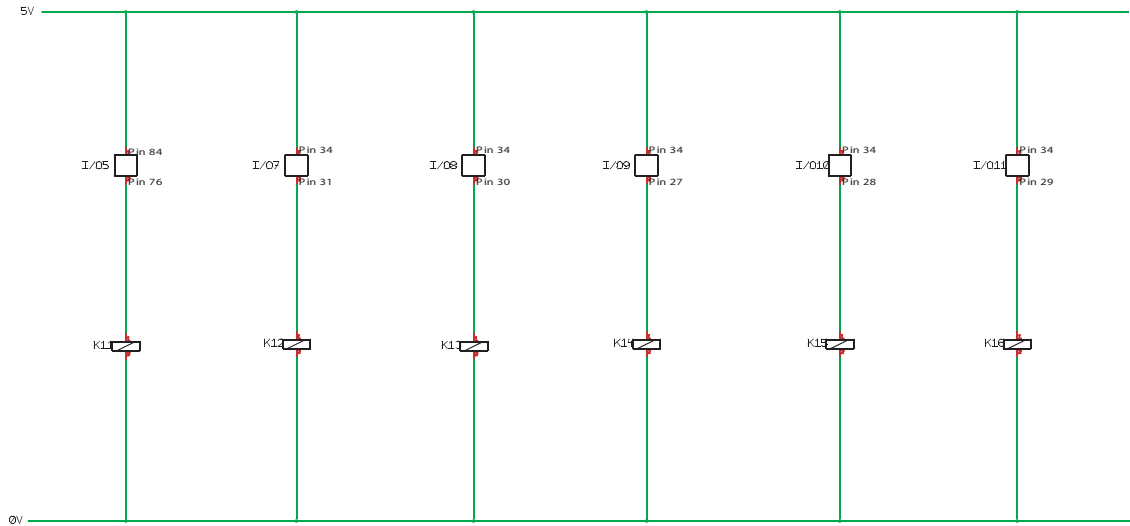
Im folgenden sind die vollständigen Schaltpläne der Elektroinstallation der Schaltelemente für die Ultraschallanlage abgebildet.

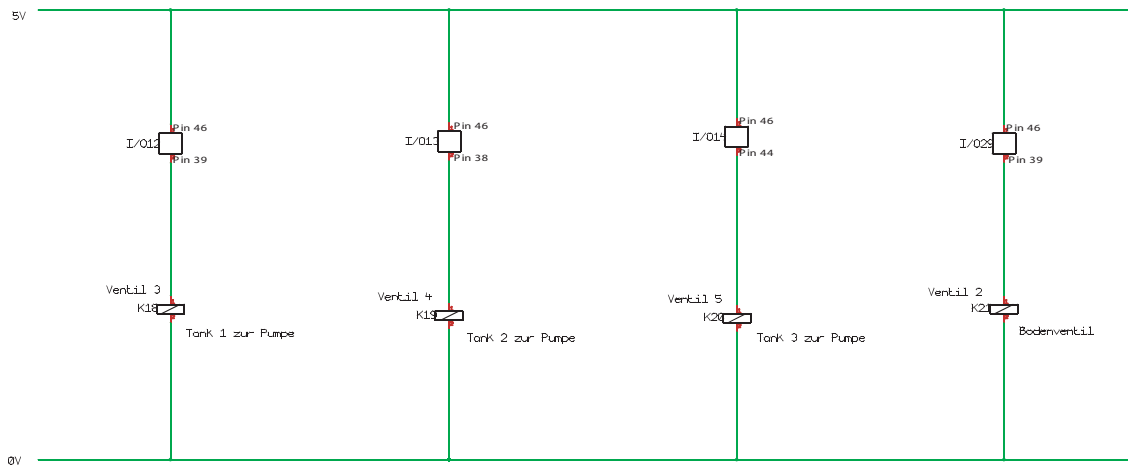
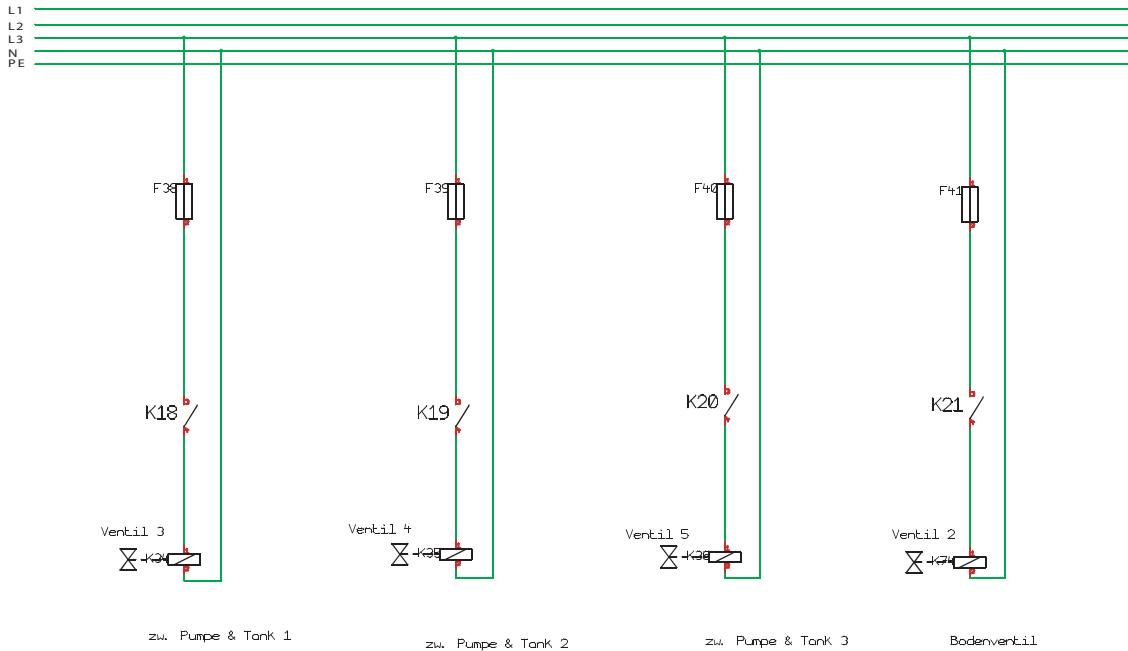




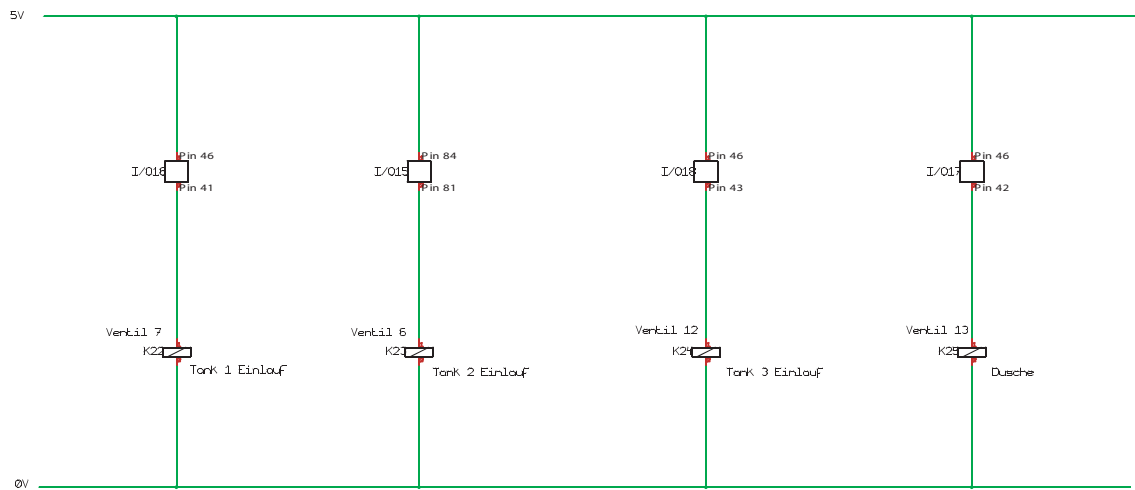
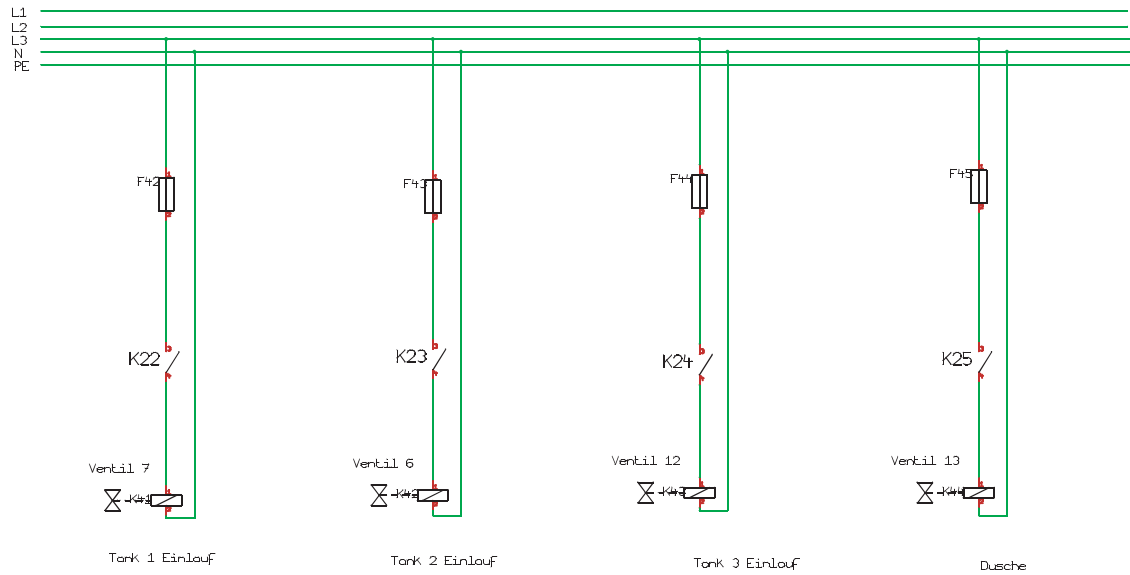


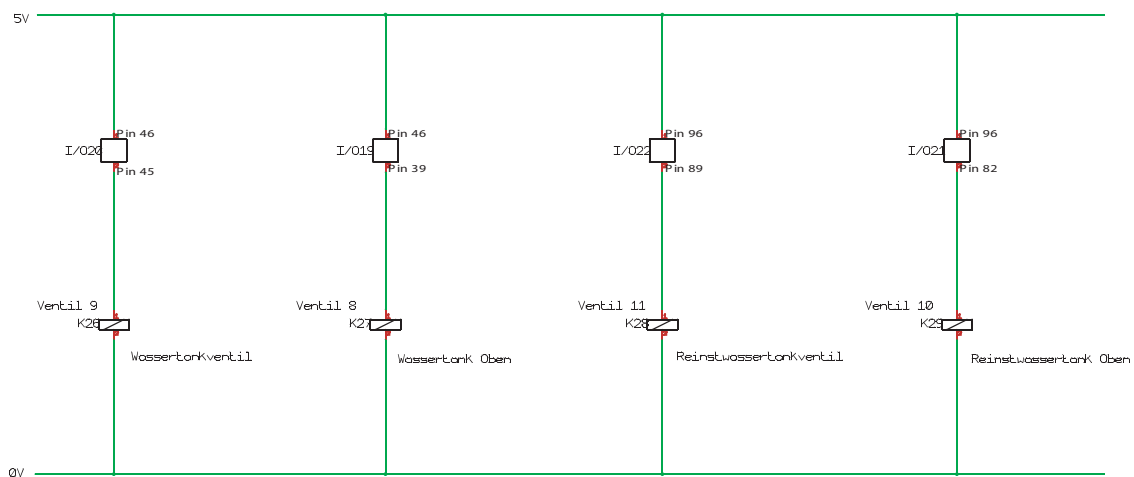
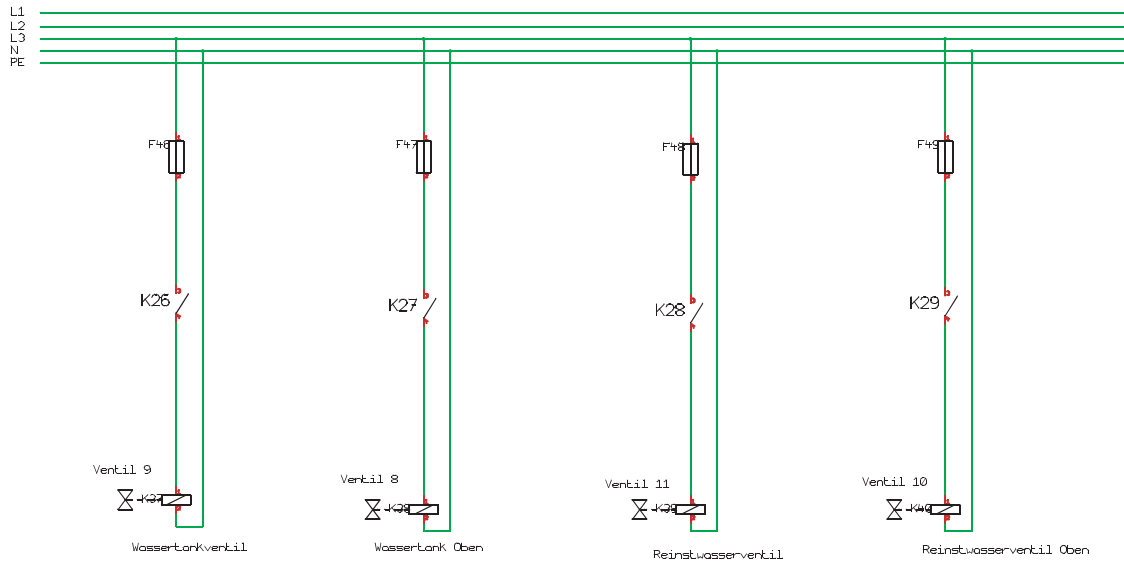
B Schaltpläne



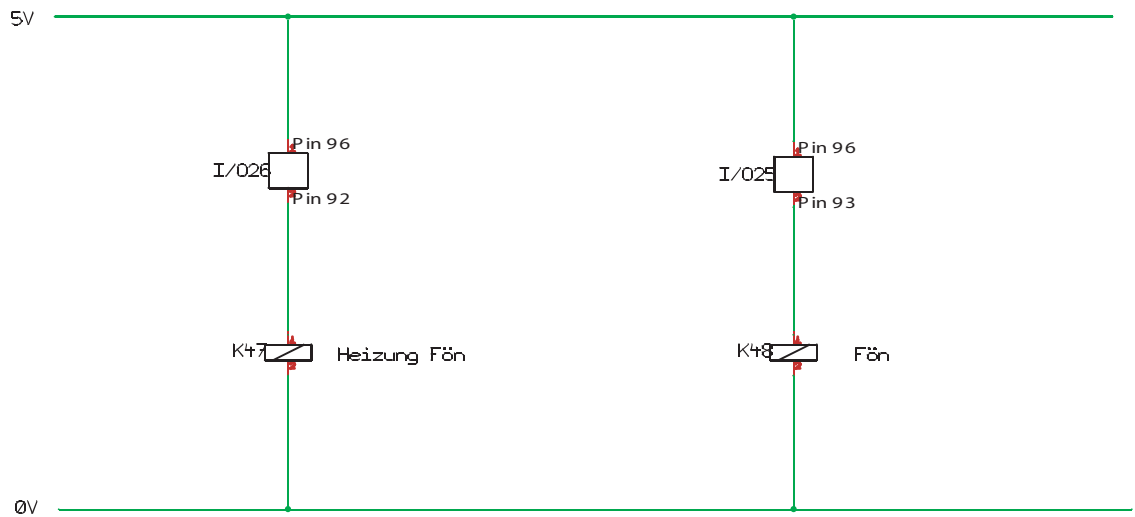
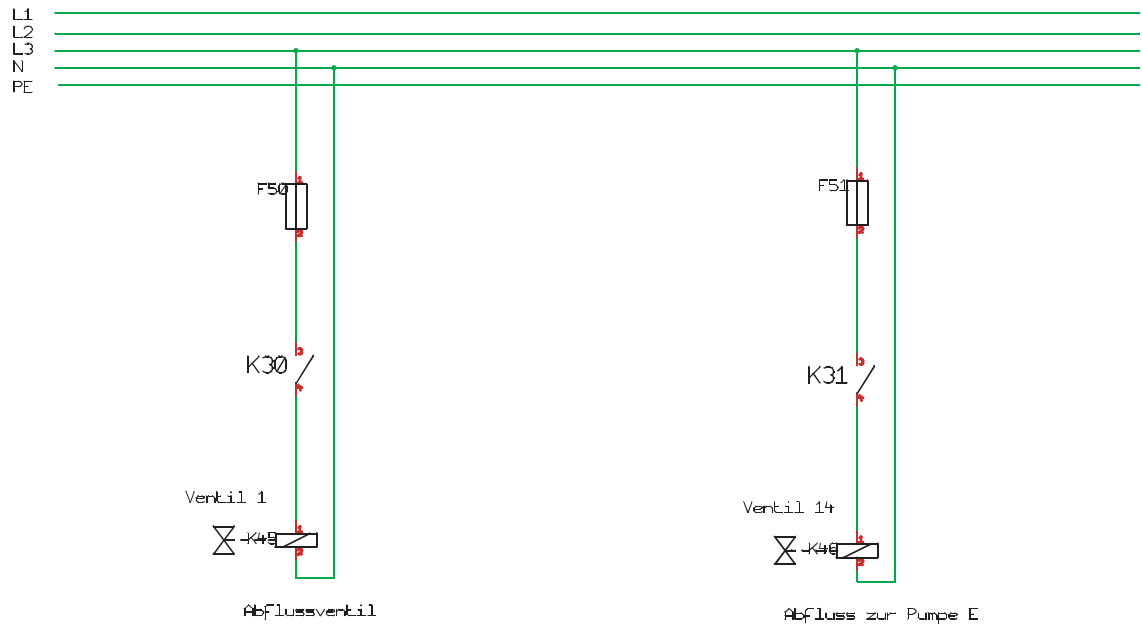


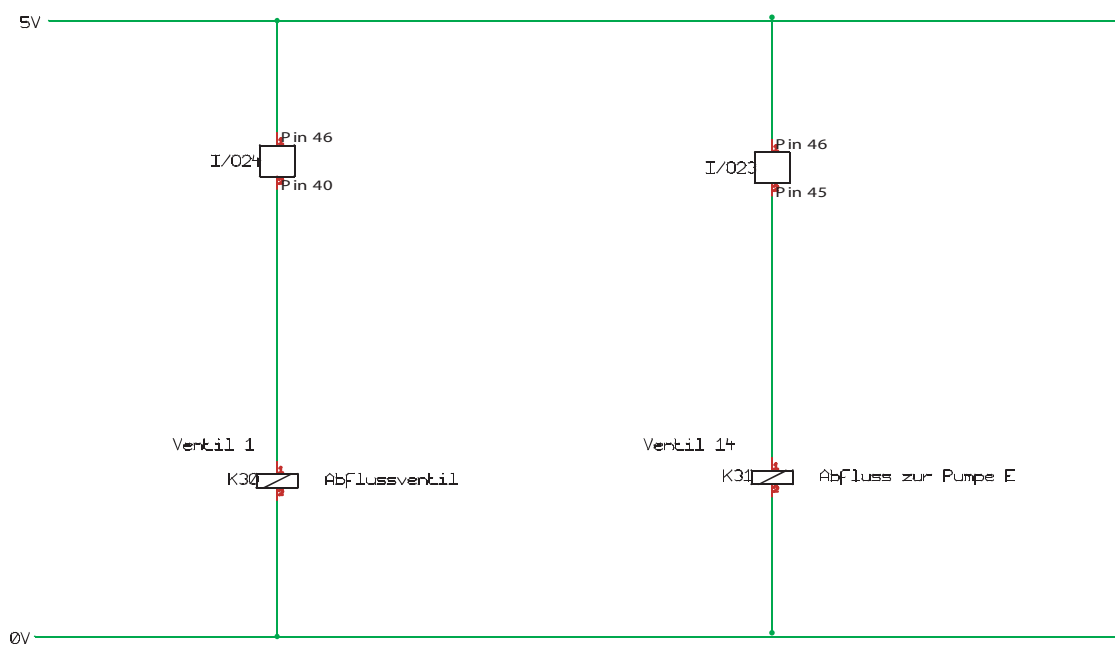
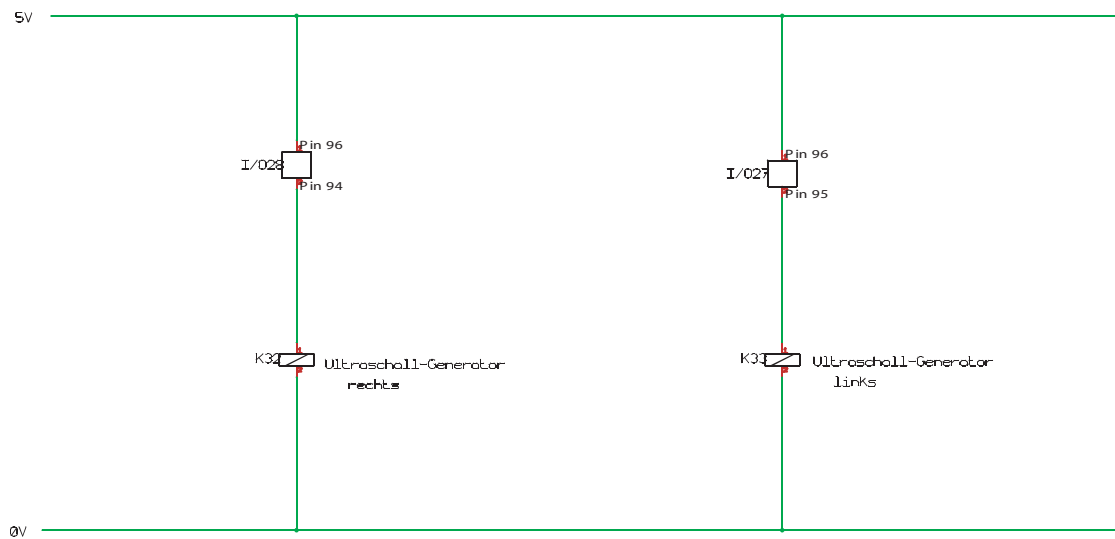
B Schaltpläne



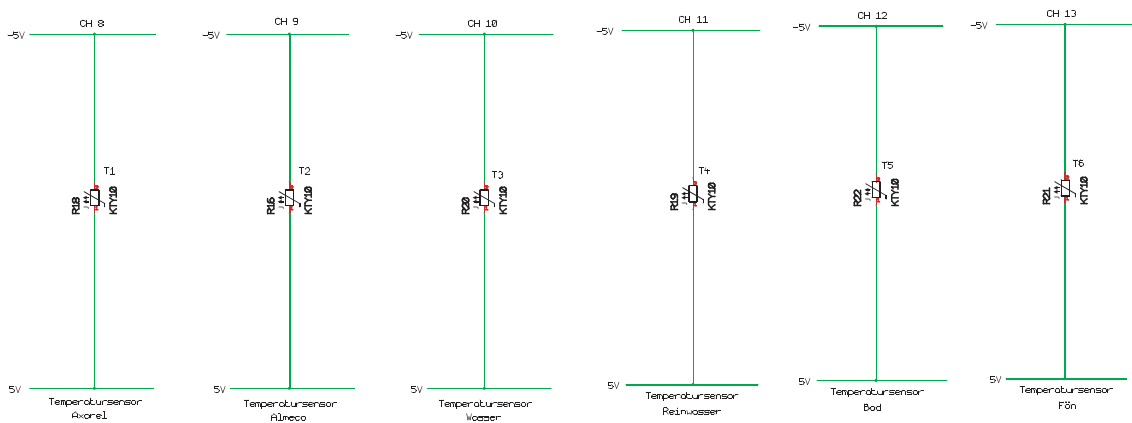
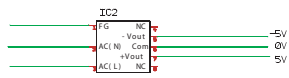
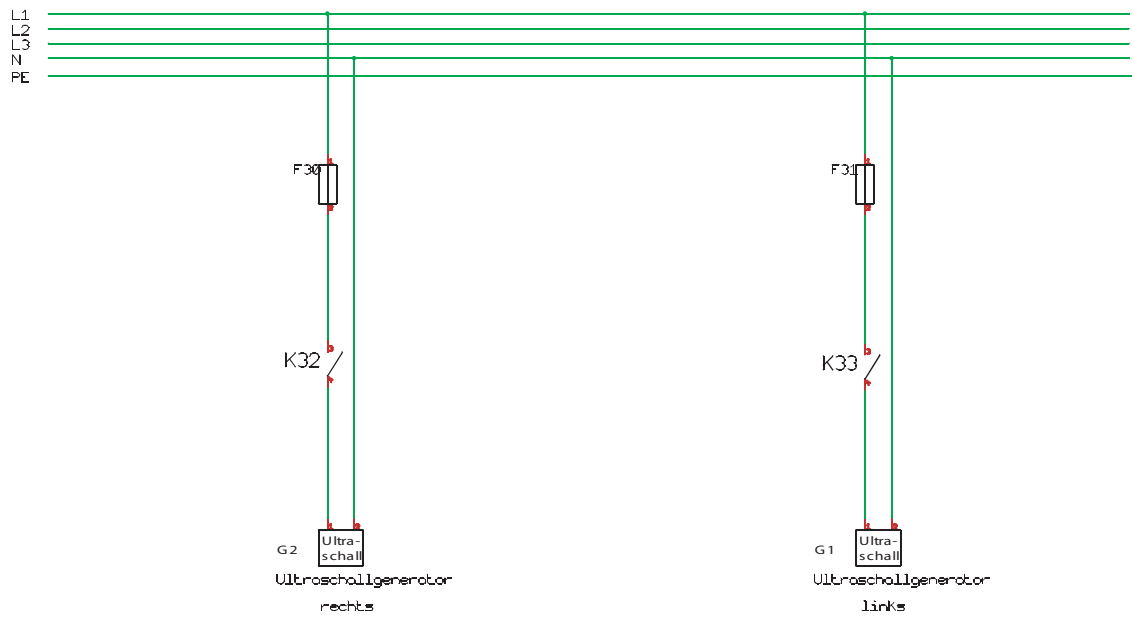


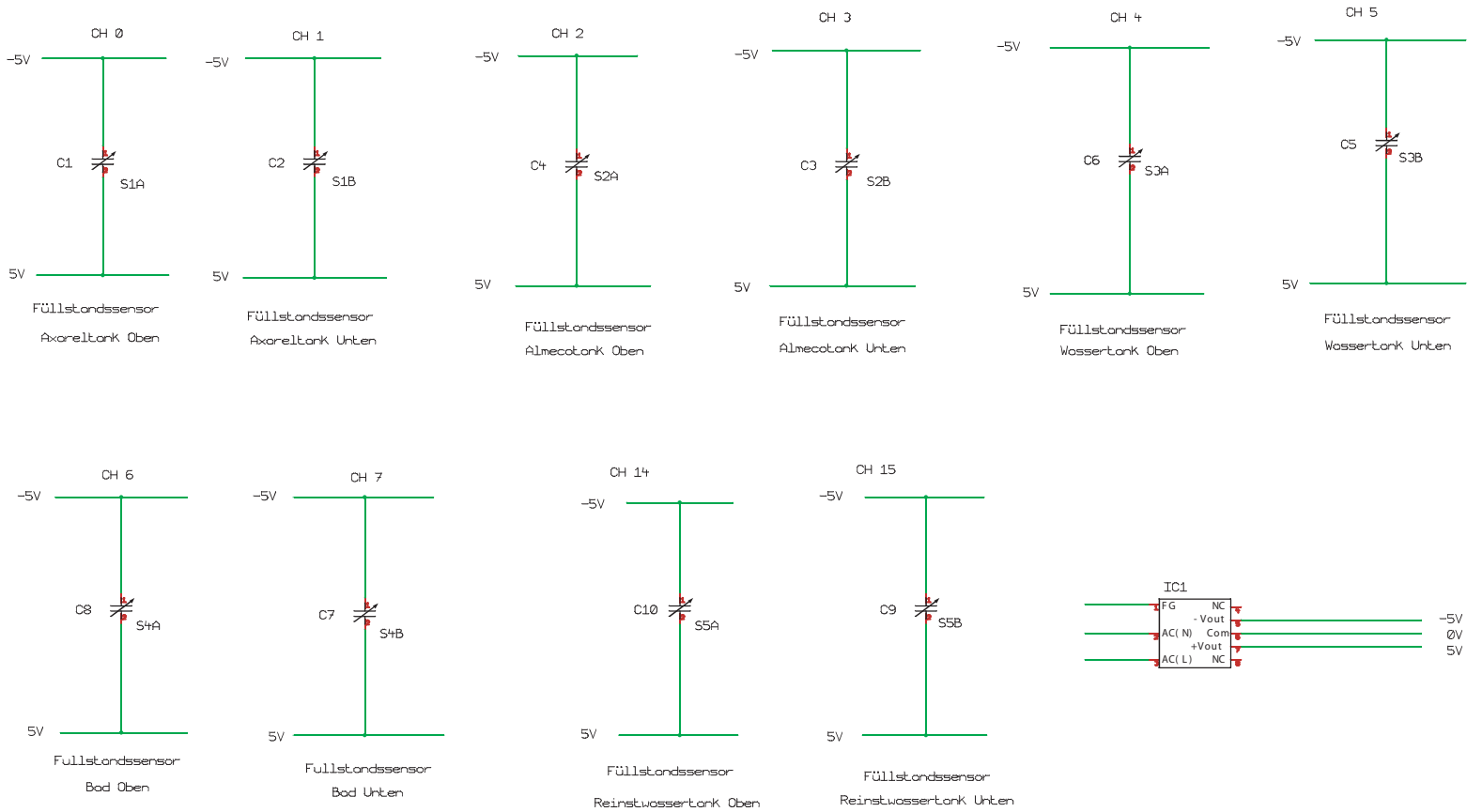
B Schaltpläne





B Schaltpläne





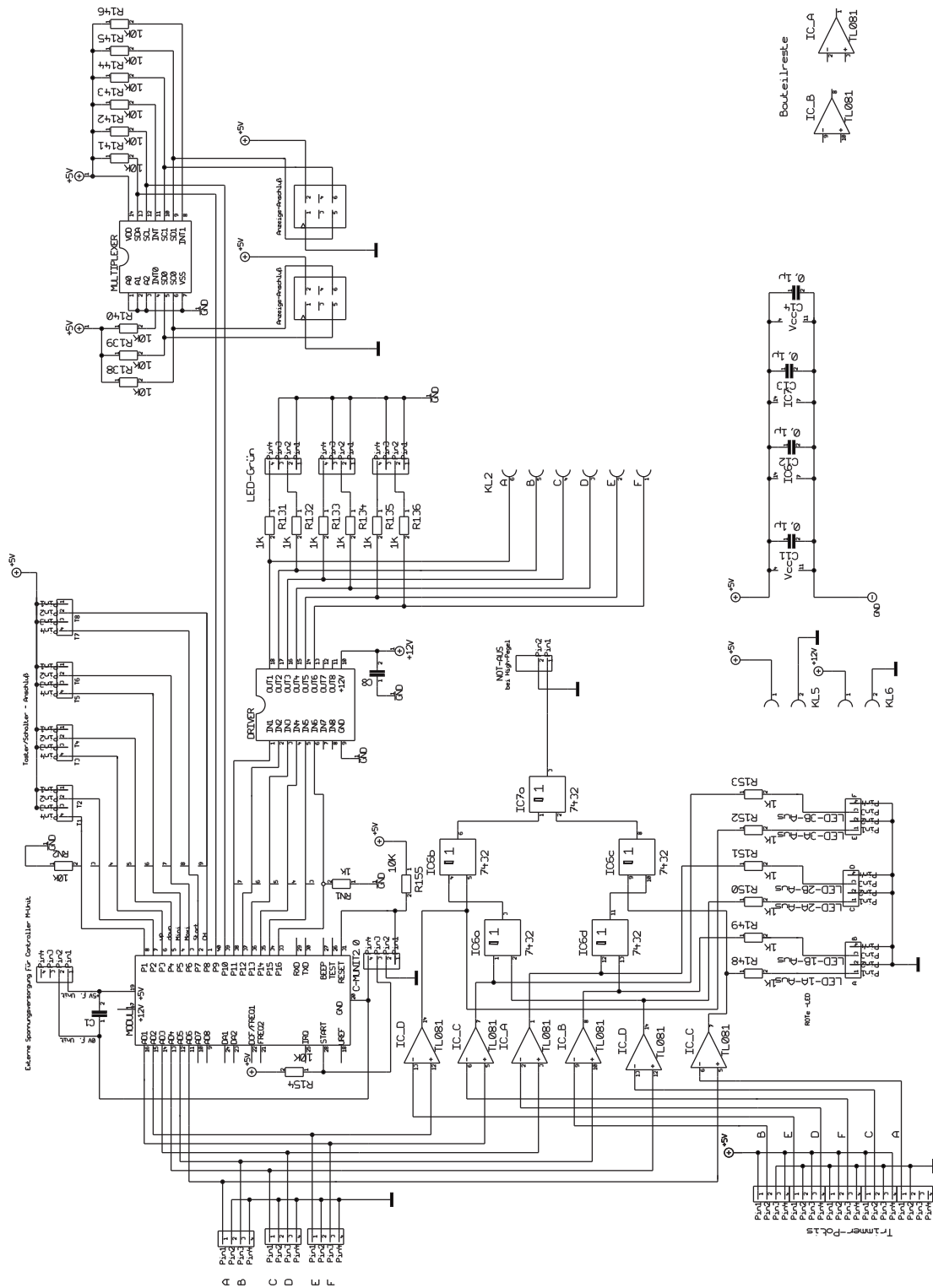


Abbildung B.1: Schaltplan der Heizsteuerung

C Programmtabellen und LabVIEW - Programme

Tabelle C.1: Fehlernummern des automatischen Reinigungsprogramms.

Sensorsignal	aufgetretener Fehler	Fehlernummer
S1A	nicht an	131
	nicht aus	132
S1B	nicht an	133
	nicht aus	134
S2A	nicht an	135
	nicht aus	136
S2B	nicht an	137
	nicht aus	138
S3A	nicht an	139
	nicht aus	140
S3B	nicht an	141
	nicht aus	142
S4A	nicht an	143
	nicht aus	144
S4B	nicht an	145
	nicht aus	146
S5A	nicht an	147
	nicht aus	148
S5B	nicht an	149
	nicht aus	150

Tabelle C.2: Ablaufplan des automatischen Reinigungsprogramms.

Reinigungs- prozedur	Schritt Beschreibung	Kontrolle vorher		Aktivieren		Kontrolle nachher	
		Sensor	Zustand	Gerät	Dauer	Sensor	Zustand
1 c)	Dusche aus Tank 3	S4A	aus	V9	1 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V13	1 Min	S4B	aus
		S3B	an	Pumpe D	1 Min		
	Reste verwerfen	S4A	aus	V1	2 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V2	2 Min	S4B	aus
				V14	2 Min		
				Pumpe E	2 Min		
1 d)	Trocknen 5 Minuten	S4A	aus	Gebläse	5 Min	S4A	aus
		S4B	aus	Heiz.Gebl.	5 Min	S4B	aus
2 a)	Einlauf von Axarel	S4A	aus	V7	5 Min	S4A	an
		S4B	aus			S4B	an
		S1B	an				
	Ultraschall 15 Min	S4A	an	US	15 Min	S4A	an
		S4B	an			S4B	an
	Axarel zurück in Tank 1 pumpen	S4A	an	V2	10 Min	S4A	aus
		S4B	an	V3	10 Min	S4B	aus
		S1A	aus	Pumpe A	10 Min		
2 b)	Dusche aus Tank 3	S4A	aus	V9	1 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V13	1 Min	S4B	aus
		S3B	an	Pumpe D	1 Min		

Reinigungs- prozedur	Schritt Beschreibung	Kontrolle vorher		Aktivieren		Kontrolle nachher	
		Sensor	Zustand	Gerät	Dauer	Sensor	Zustand
	Reste verwerfen	S4A	aus	V1	2 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V2	2 Min	S4B	aus
				V14	2 Min		
				Pumpe E	2 Min		
2 c)	Einlauf von Almeco	S4A	aus	V5	6 Min	S4A	an
		S4B	aus			S4B	an
		S2B	an				
	Ultraschall 5 Min	S4A	an	US	5 Min	S4A	an
		S4B	an			S4B	an
	Almeco zurück in Tank 2 pumpen	S4A	an	V4	10 Min	S4A	aus
		S4B	an	Pumpe B	10 Min	S4B	aus
		S2A	aus				
2 d)	Dusche aus Tank 3	S4A	aus	V9	1 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V13	1 Min	S4B	aus
		S3B	an	Pumpe D	1 Min		
	Reste verwerfen	S4A	aus	V1	2 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V2	2 Min	S4B	aus
				V14	2 Min		
				Pumpe E	2 Min		

Reinigungs- prozedur	Schritt Beschreibung	Kontrolle vorher		Aktivieren		Kontrolle nachher	
		Sensor	Zustand	Gerät	Dauer	Sensor	Zustand
2 e)	Einlauf von Wasser	S4A	aus	V5	5 Min	S4A	an
		S4B	aus			S4B	an
		S3B	an				
	Ultraschall 5 Min	S4A	an	US	5 Min	S4A	an
		S4B	an			S4B	an
	Wasser zurück in Tank 3 pumpen	S4A	an	V5	10 Min	S4A	aus
		S4B	an	Pumpe C	10 Min	S4B	aus
		S3A	aus				
2 f)	Dusche aus Tank 4	S4A	aus	V11	1 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V13	1 Min	S4B	aus
		S5B	an	Pumpe D	1 Min		
	Reste verwerfen	S4A	aus	V1	2 Min	S4A	aus
		S4B	aus	V2	2 Min	S4B	aus
				V14	2 Min		
				Pumpe E	2 Min		
3 a)	Trocknen 15 Minuten	S4A	aus	Gebläse	10 Min	S4A	aus
		S4B	aus	Heiz.Gebl.	10 Min	S4B	aus

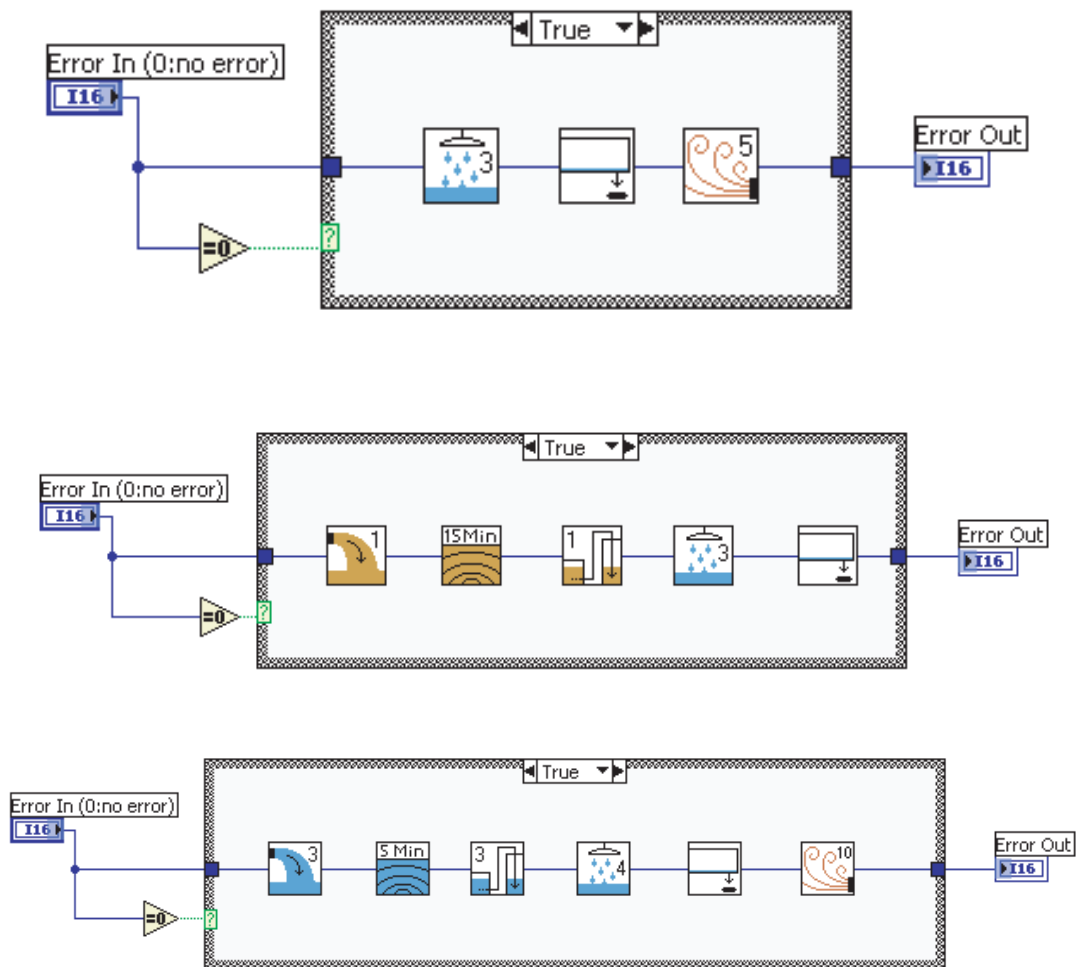


Abbildung C.1: Vorreinigung.vi, Axarelgang.vi und Klarspuelen.vi

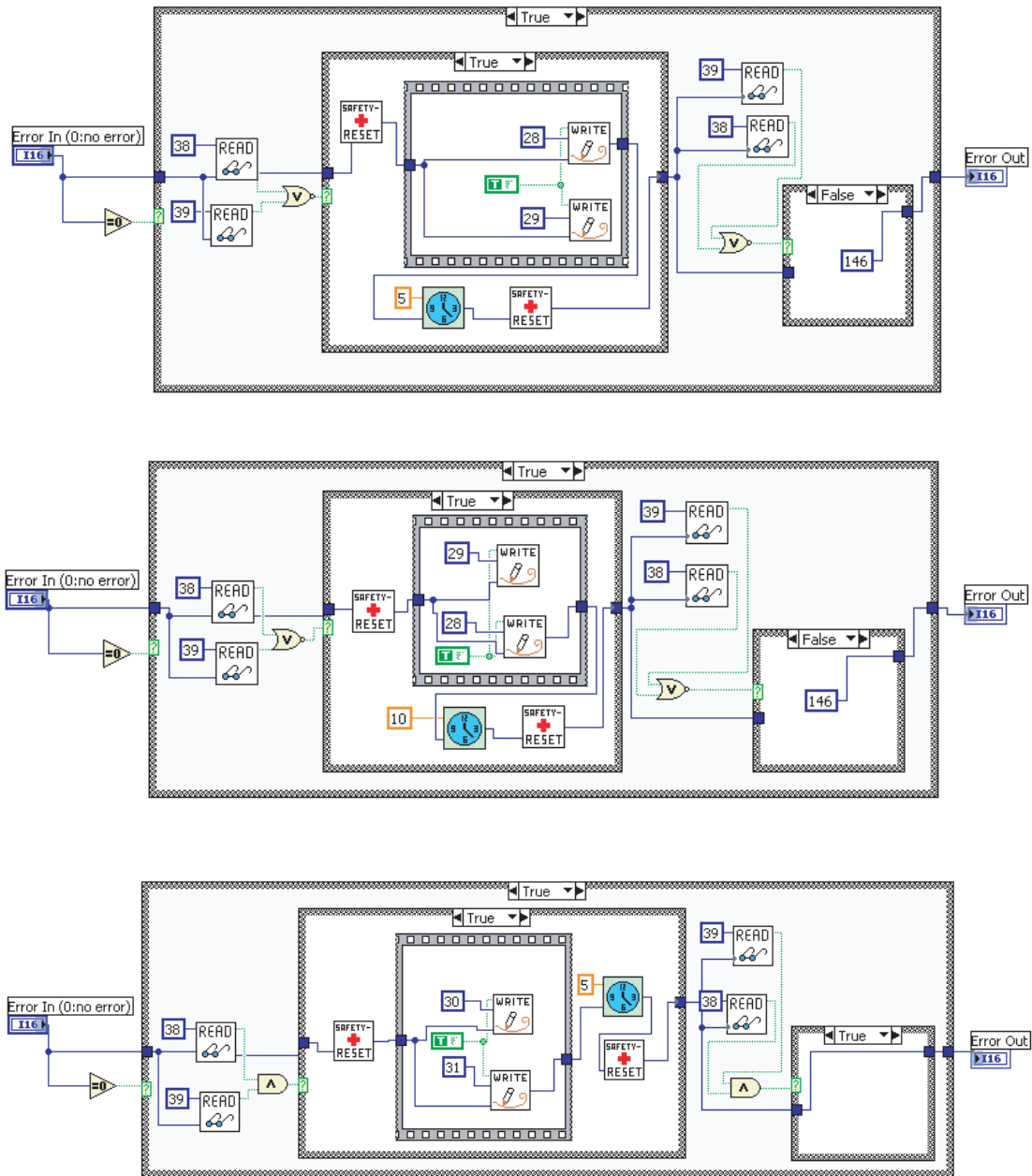


Abbildung C.2: Blockdiagramme der Bausteine für das automatische Reinigungsprogramm. Von oben nach unten: Trocken5Min.vi, Trocken10Min.vi und US5Min.vi

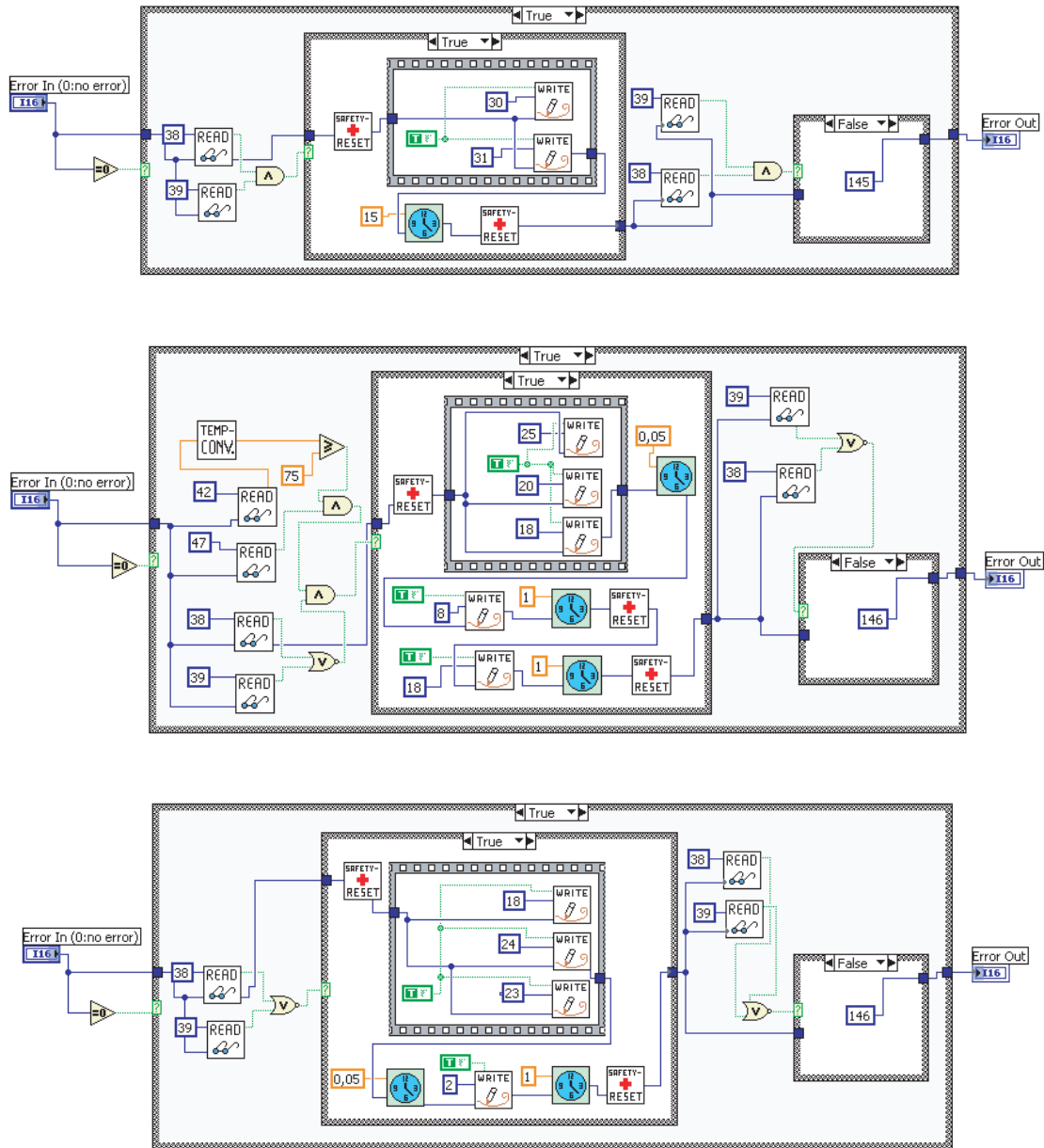


Abbildung C.3: Blockdiagramme der Bausteine für das automatische Reinigungsprogramm. Von oben nach unten: US15Min.vi, DuscheAusTank4.vi und ResteVerwerfen.vi

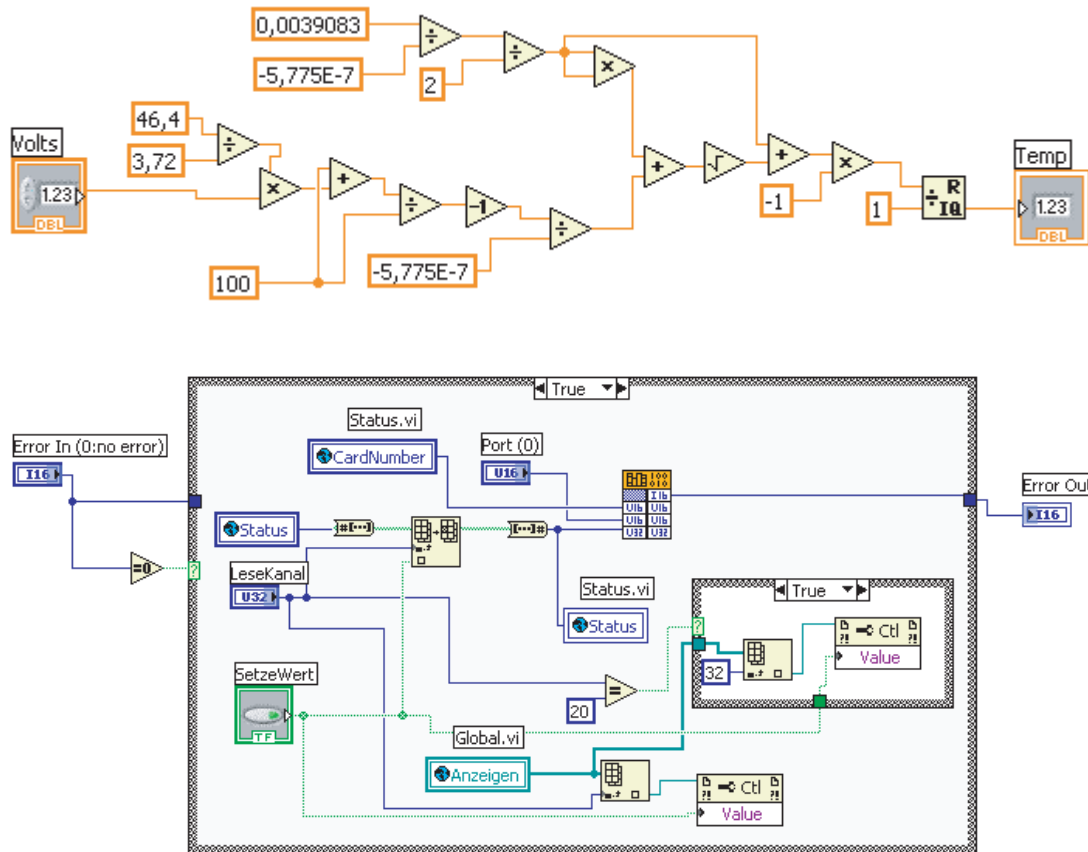


Abbildung C.4: Blockdiagramme der Bausteine für das automatische Reinigungsprogramm. Von oben nach unten: Tempconv.vi und SchreibeAuto.vi

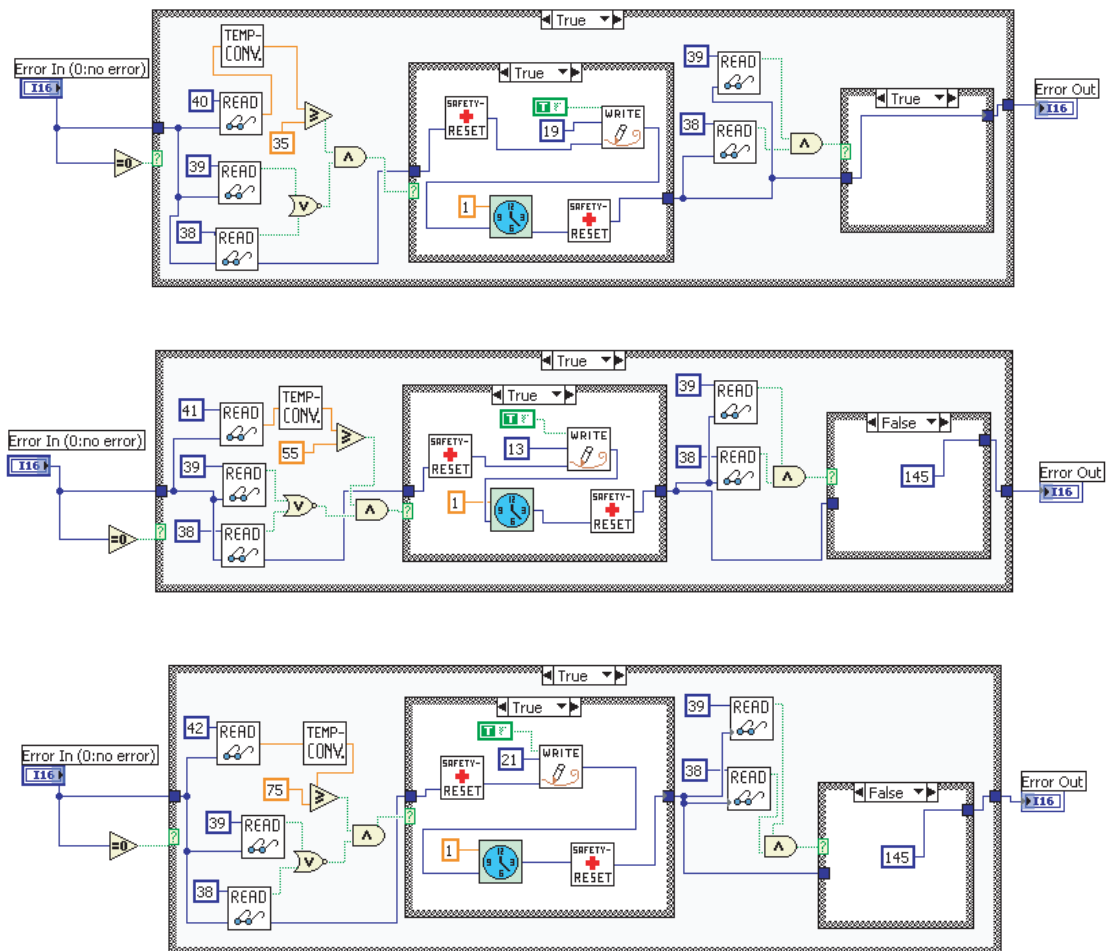


Abbildung C.5: Blockdiagramme der Bausteine für das automatische Reinigungsprogramm. Von oben nach unten: EinlaufAusTank1.vi, EinlaufAusTank2.vi und EinlaufAusTank3.vi

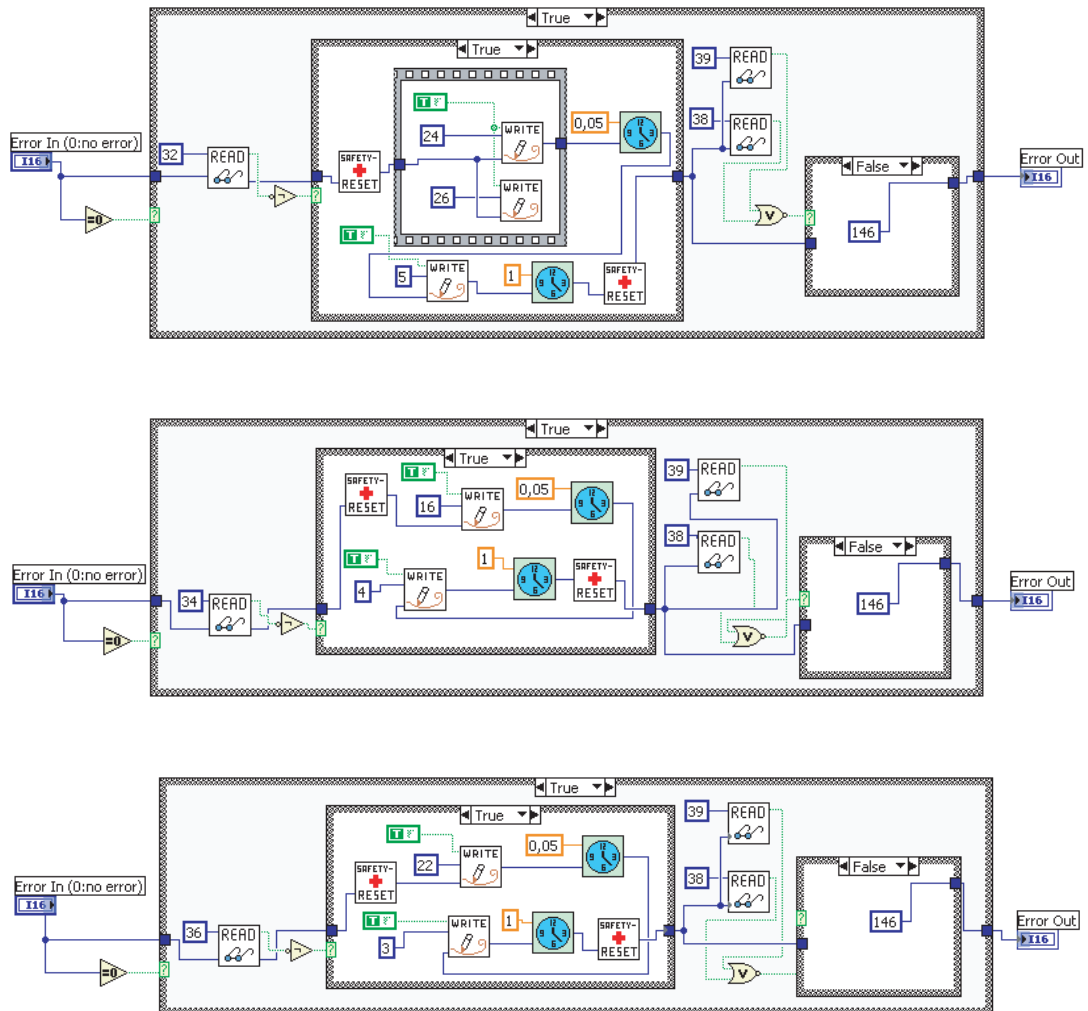


Abbildung C.6: Blockdiagramme der Bausteine für das automatische Reinigungsprogramm. Von oben nach unten: AbpumpenNachTank1.vi, AbpumpenNachTank2.vi und AbpumpenNachTank3.vi

D Heizsteuerungsprogramm

```
'*****  
' Definitionen Analog und Digitalports  
'*****  
Define PT1 AD[1]          'definiert AD-Ports.  
Define PT2 AD[2]  
Define PT3 AD[3]  
Define PT4 AD[4]  
Define PT5 AD[5]  
Define PT6 AD[6]  
  
Define UP PORT[3]        'definiert Taster.  
Define DOWN PORT[4]  
Define Mini PORT[5]  
Define Maxi PORT[6]  
Define StartStop PORT[7]  
Define SwitchChannel PORT[8]  
  
Define Heat1 PORT[11]    'definiert Ausgänge für Heizbänder.  
Define Heat2 PORT[12]  
Define Heat3 PORT[13]  
Define Heat4 PORT[14]  
Define Heat5 PORT[15]  
Define Heat6 PORT[16]  
  
'*****  
' Variablen Definitionen  
'*****  
Define Setpoint1 WORD    'Solltemperatur fuer Kanal i  
Define Setpoint2 WORD  
Define Setpoint3 WORD  
Define Setpoint4 WORD  
Define Setpoint5 WORD  
Define Setpoint6 WORD  
  
Define Tref1 WORD        'Referenz Temperatur fuer Kanal i  
Define Tref2 WORD  
Define Tref3 WORD  
Define Tref4 WORD  
Define Tref5 WORD  
Define Tref6 WORD
```

```
Define T      WORD          'gemessene Temperatur
Define i      WORD          'Laufvariable
Define info   BYTE         'Info Ziffer Define Channel BYTE

'*****
' Funktionsdeklarationen
'*****
declare function ziffer(digit AS BYTE)
declare function set(led as byte, num as word, info as byte)
declare function SetCh(chan as byte)
declare function SetMax(chan as byte)
declare function regulation()
declare function heaters_off()
declare function showmax()
declare function leer()

'*****
' Konstanten
'*****
Const HLIMIT = 80          'in HLIMIT seconds one degree temperature
                          'rise / fall is allowed
Const INTV    = 5          'time between readouts [seconds]

'*****
'Hauptprogramm
'*****
heaters_off()

Setpoint1 = 0
Setpoint2 = 0
Setpoint3 = 0
Setpoint4 = 0
Setpoint5 = 0
Setpoint6 = 0
Channel = 0

iic.init                'initiiert Kommunikation über den iic-bus.

do
  leer()                'displays in standby-Zustand
  pause 25              '0.5 Sekunden warten

  if Channel = 7 then Channel = 0
```

```

if StartStop = ON then regulation()
    'Schaltet die Regelung ein. Schwellwerte können dann nicht mehr
    'geändert werden, aber die Temperaturen werden angezeigt und
    'die Heizungen sind aktiv.

if Channel = 1 then SetCh(1)    'setCh1-6 sind Unterprogramme, in denen
if Channel = 2 then SetCh(2)    'die Schwellwerte für Kanal 1-6
if Channel = 3 then SetCh(3)    'eingestellt werden können.
if Channel = 4 then SetCh(4)
if Channel = 5 then SetCh(5)
if Channel = 6 then SetCh(6)

if SwitchChannel = ON then      'schaltet die Kanäle durch
    Channel = Channel + 1
end if

loop 'do-loop: Hauptprogammschleife.

'*****
' Funktion, die bei der Auswahl der Solltemperaturen benötigt wird.
'*****
function SetCh(chan as byte)

showmax()

set(chan, 0, 4)

do
    pause 25    '0.5 Sekunden warten

    if Maxi = ON then
        SetMax(chan)
    end if

    if SwitchChannel = ON then
        Channel = Channel + 1
    end if

    set(chan, 0, 4)

loop until Channel <> chan

leer()

end function

```

```
'*****  
' Funktion zum Setzen der Solltemperaturen  
'*****  
function SetMax(chan as byte)  
  
do  
  select case chan  
  case 1  
    if UP = ON then Setpoint1 = Setpoint1 + 1  
    if DOWN = ON then Setpoint1 = Setpoint1 - 1  
    set(1, Setpoint1, 1)  
    pause 3  
  case 2  
    if UP = ON then Setpoint2 = Setpoint2 + 1  
    if DOWN = ON then Setpoint2 = Setpoint2 - 1  
    set(2, Setpoint2, 1)  
    pause 3  
  case 3  
    if UP = ON then Setpoint3 = Setpoint3 + 1  
    if DOWN = ON then Setpoint3 = Setpoint3 - 1  
    set(3, Setpoint3, 1)  
    pause 3  
  case 4  
    if UP = ON then Setpoint4 = Setpoint4 + 1  
    if DOWN = ON then Setpoint4 = Setpoint4 - 1  
    set(4, Setpoint4, 1)  
    pause 3  
  case 5  
    if UP = ON then Setpoint5 = Setpoint5 + 1  
    if DOWN = ON then Setpoint5 = Setpoint5 - 1  
    set(5, Setpoint5, 1)  
    pause 3  
  case 6  
    if UP = ON then Setpoint6 = Setpoint6 + 1  
    if DOWN = ON then Setpoint6 = Setpoint6 - 1  
    set(6, Setpoint6, 1)  
    pause 3  
  end select  
loop until Maxi = OFF  
  
end function  
  
'*****  
'Eigentliche Regelung. Schaut in der Tabelle "temperatur" der aktuellen  
' Wert für die AD 1 bis 6 nach und schreibt sie nach Temp1 bis Temp6.  
'*****  
function regulation()
```

```

Define SP1 WORD, SP2 WORD, SP3 WORD, SP4 WORD, SP5 WORD, SP6 WORD
Define upd BYTE          'Zeit bis zum naechsten update der Tref Werte [seconds]

heaters_off()

info = 3                  'digit 4 auf 'C' stellen
pause 20

SP1  = Setpoint1         'speichere Setpoints in temporaeren Variablen
SP2  = Setpoint2
SP3  = Setpoint3
SP4  = Setpoint4
SP5  = Setpoint5
SP6  = Setpoint6

Tref1 = looktab(temperatur,PT1)
Tref2 = looktab(temperatur,PT2)
Tref3 = looktab(temperatur,PT3)
Tref4 = looktab(temperatur,PT4)
Tref5 = looktab(temperatur,PT5)
Tref6 = looktab(temperatur,PT6)

upd   = 0

do

  '***** Kanal 1
  T = looktab(temperatur,PT1)
  if T < Tref1 then
    Heat1 = 1
  else
    Heat1 = 0
  end if

  '***** Kanal 2
  T = looktab(temperatur,PT2)
  if T < Tref2 then
    Heat2 = 1
  else
    Heat2 = 0
  end if

  '***** Kanal 3
  T = looktab(temperatur,PT3)
  if T < Tref3 then
    Heat3 = 1
  else
    Heat3 = 0

```

```
end if

'***** Kanal 4
T = looktab(temperatur,PT4)
if T < Tref4 then
  Heat4 = 1
else
  Heat4 = 0
end if

'***** Kanal 5
T = looktab(temperatur,PT5)
if T < Tref5 then
  Heat5 = 1
else
  Heat5 = 0
end if

'***** Kanal 6
T = looktab(temperatur,PT6)
if T < Tref6 then
  Heat6 = 1
else
  Heat6 = 0
end if

'***** update reference temperatures
upd = upd + INTV

if upd >= HLIMIT then
  if Tref1 < SP1 then Tref1 = Tref1 + 1
  if Tref1 > SP1 then Tref1 = Tref1 - 1
  if Tref2 < SP2 then Tref2 = Tref2 + 1
  if Tref2 > SP2 then Tref2 = Tref2 - 1
  if Tref3 < SP3 then Tref3 = Tref3 + 1
  if Tref3 > SP3 then Tref3 = Tref3 - 1
  if Tref4 < SP4 then Tref4 = Tref4 + 1
  if Tref4 > SP4 then Tref4 = Tref4 - 1
  if Tref5 < SP5 then Tref5 = Tref5 + 1
  if Tref5 > SP5 then Tref5 = Tref5 - 1
  if Tref6 < SP6 then Tref6 = Tref6 + 1
  if Tref6 > SP6 then Tref6 = Tref6 - 1

  upd = 0
end if

'***** pause INTV seconds, display temperatures and check for user input
for i=1 to 2*INTV step 1
```

```

    set(1, looktab(temperatur,PT1), info)           'Temperatur ausgeben
    set(2, looktab(temperatur,PT2), info)
    set(3, looktab(temperatur,PT3), info)
    set(4, looktab(temperatur,PT4), info)
    set(5, looktab(temperatur,PT5), info)
    set(6, looktab(temperatur,PT6), info)
    pause 25 '0.5 Sekunden warten

    if StartStop = ON then goto ENDREG
    if DOWN      = ON then
info = 6           'digit 4 auf 'c' stellen
SP1  = 0           'Setpoints auf 0 zurückstellen
SP2  = 0
SP3  = 0
SP4  = 0
SP5  = 0
SP6  = 0
    end if
next

loop until StartStop = ON

#ENDREG

heaters_off()

leer()
pause 40

end function

'*****
'heaters_off()
'*****
function heaters_off()
Heat1 = 0           'switch of all heaters
Heat2 = 0
Heat3 = 0
Heat4 = 0
Heat5 = 0
Heat6 = 0
end function

'*****
'Deklarationen von Konstanten zum Ansprechen der Displays
'*****

```

```
const Addr1 = 11100000b      'Adressen für die Displays
const Addr2 = 01110000b
const Addr3 = 01110010b
const Addr4 = 01110100b
const chan0 = 00000100b     'Adressen für den Multiplexer
const chan1 = 00000101b
const ctrl  = 00010111b     'Control-Byte, setzt Helligkeit der Displays,
                             'Selbsttest möglich etc.

'*****
'Schreibfunktion fuer die LEDs
'*****
function set(led as byte, num as word, info as byte)

define d1 as byte, d2 as byte      'die vier stellen der LED.
define d3 as byte, d4 as byte

define channel as byte             'Adressvariablen
define address as byte

select case led
  case 1
    channel = chan1                'spricht Multiplexerchannel 1 an
    address = Addr2                'und dann die LED "2" für LED 1 usw.
  case 2
    channel = chan1
    address = Addr3
  case 3
    channel = chan1
    address = Addr4
  case 4
    channel = chan0
    address = Addr2
  case 5
    channel = chan0
    address = Addr3
  case 6
    channel = chan0
    address = Addr4

end select

d1 = looktab(Digits, num mod 10)    'umwandeln der 3-stelligen
d2 = looktab(Digits, num/10 mod 10) 'Dezimalzahl in LED codes
d3 = looktab(Digits, num/100 mod 10)

if info > 0 then                    'Auswahl des Inhalts für die
```

```

d4 = looktab(Digits,9+info)          'Info-Stelle im LED-Display.
if info = 5 then                    '(Oberer Strich, unterer Strich,
    d4 = 64                          'C, leer, c)
end if
if info = 4 then
    d4 = looktab(Digits,14)
    d1 = looktab(Digits,13)
    d2 = looktab(Digits,0)
    d3 = looktab(Digits,12)
end if
else
    d4 = 0
end if

with iic                            'eigentliche Schreib- und Senderoutine für die LEDs.
    .start                          'Begin Kommunikation mit Multiplexer
    .send Addr1                      'Multiplexer-Adresse
    .send channel                    'Auswahl Channel Multiplexer (1 oder 0)
    .stop                            'Ende Kommunikation mit Multiplexer. Alles weitere
                                    'leitet er direkt weiter an die Displays.

    .start                          'Beginn Kommunikation mit Displays.
    .send address                    'Auswahl Display 2, 3 oder 4.
    .send 0
    .send ctrl                      'Control-Byte zur Einstellung von Helligkeit etc.
    .send d4                         'vierte Stelle der Anzeige von links
    .send d1                        'dritte Stelle der Anzeige von links
    .send d2                        'zweite Stelle der Anzeige von links
    .send d3                        'erste Stelle der Anzeige von links
    .stop                            'Ende Kommunikation mit Displays.
end with

end function

'*****
' Display zeigt Temperatur Sollwerte
'*****
function showmax()

info = 1
set(1, Setpoint1, info)
set(2, Setpoint2, info)
set(3, Setpoint3, info)
set(4, Setpoint4, info)
set(5, Setpoint5, info)
set(6, Setpoint6, info)

```

```
end function

'*****
' Display im Standby Zustand, Temperaturen und -
'*****
function leer()

    info = 5
    set(1, looktab(temperatur,PT1), info)
    set(2, looktab(temperatur,PT2), info)
    set(3, looktab(temperatur,PT3), info)
    set(4, looktab(temperatur,PT4), info)
    set(5, looktab(temperatur,PT5), info)
    set(6, looktab(temperatur,PT6), info)

end function

'*****
'Tabelle, in der die Zuordnung für die LED Segmente abgespeichert ist
'*****
' 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10      11      12 13 14 15 16
' 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Oberstrich Unterstrich C n F c -

table Digits
    63 6 91 79 102 109 125 7 127 111 1 8 57 55 113 88 64
end table

'*****
'Tabelle für die Temperaturanzeige, 256 Werte.
'*****
table temperatur
7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30
32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 46 47 48 49 50 51 52 54 55 56 57 58 60
61 62 63 64 66 67 68 69 70 72 73 74 75 77 78 79 81 82 83 84 86 87 88 89 91 92
93 95 96 97 98 100 101 102 104 105 107 108 109 111 112 113 115 116 117 119 120
121 123 124 126 127 129 130 132 133 135 136 138 139 141 142 144 146 147 149 150
152 153 155 156 158 160 161 163 165 166 168 169 171 173 174 176 178 179 181 182
184 186 187 189 191 193 195 197 198 200 202 204 206 208 209 211 213 215 217 219
220 222 224 226 228 230 232 234 236 238 240 242 244 246 248 250 252 254 256 258
260 262 264 266 268 270 272 275 277 279 281 284 286 288 290 293 295 297 299 302
304 306 308 311 313 316 318 321 323 326 328 331 333 336 338 341 343 346 348 351
353 356 359 361 364 367 370 372 375 378 381 383 386 389 392 395 397 400 403 406
409 411 414 417 421 424 427 430 433 437 440 443 446 449 453 456 459 462 465
end table
```

Abbildungsverzeichnis

2.1	Skizze eines Betaspektrums	5
2.2	Experimentaufbau zum Nachweis des Neutrinos	8
2.3	Hierarchie der Neutrinomassen	13
2.4	Degenerierte Massen	14
2.5	Materieanteile im Universum	15
2.6	Darstellung des neutrinolosen Doppelbetazerfalls	17
2.7	Endpunktregion des Tritiumzerfall-Spektrums	19
2.8	Schematische Darstellung des Tritiumzerfalls	21
2.9	Schematische Darstellung eines Spektrometers vom Typ MAC-E-Filter	22
3.1	Überblick über den Gesamtaufbau des KATRIN-Experiments	25
3.2	Bilder des Vorspektrometers	26
3.3	Bilder der Lieferung des Hauptspektrometers	28
3.4	Schematische Darstellung des Hauptspektrometers mit Drahtelektrode	29
3.5	Details der Drahtelektrodenmodule	30
3.6	Technische Zeichnung eines Modul-Kamms	31
4.1	Das Prinzip der Ultraschallreinigung	34
4.2	Momentaufnahme einer Kavitationsblase	35
5.1	Schemazeichnung der Module mit den größten Abmessungen	44
5.2	Zeichnung des Gesamtaufbaus der Ultraschallanlage	45
5.3	Fotos des Gesamtaufbaus	47
5.4	Schemazeichnung Gesamtaufbau Ultraschallanlage	48
5.5	Details zur Ultraschallwanne	49
5.6	Detailansicht des Ausflussventils der Ultraschallwanne	50
5.7	Detailansicht Düsenanlage	51
5.8	Schema der Reinstwasseranlage	52
5.9	Darstellungen der Reinstwasseranlage	53
5.10	Schemazeichnung Drahtreinigung	54
5.11	Detailzeichnung zur Drahtreinigung	55
5.12	Detailansichten der Hardware	56
5.13	Details des Ultraschallbads	57
6.1	Ansteuerung der Ultraschallanlage	59
6.2	Beschaltungen der digitalen Eingänge der PCI-7432	60

6.3	Schaltung der digitalen Ausgänge der PCI-7432	61
6.4	Schemazeichnung des Schaltschranks	62
6.5	Foto des Hauptschaltschranks	63
6.6	Foto des Sensorik-Schaltschranks	64
6.7	Schaltplan der Temperatursauslese	68
6.8	Foto eines Füllstandssensors	69
6.9	Schaltung einer kapazitiven Wheatstonebrücke	71
6.10	Schaltplan der Füllstandssensoren	72
6.11	Platinenlayout der Füllstandssensoren	73
6.12	Foto des zweiten Prototyps der Füllstandssensoren	74
7.1	Blockdiagramm zur interaktiven Steuerung	77
7.2	Initialisierungs- und Releasefunktion der Mess- und Steuerkarten	78
7.3	Auslese-Unterprogramm „lesekanal.vi“	79
7.4	Schreibfunktion für die digitale PCI-7432-Karte	80
7.5	Sicherheitsfunktion	80
7.6	Frontpanel des automatisches Programms zur Ultraschallreinigung	81
7.7	Blockdiagramm des automatischen Programms zur Ultraschallreinigung	82
7.8	Unterprogramm für den P3-almeco™ 36-Reinigungsgang	83
7.9	DuscheAusTank3.vi	84
7.10	Wartefunktion warten.vi	85
8.1	Aufbau des Vakuumofens	88
8.2	Schematische Darstellung des Ofens mit Heizbändern	89
8.3	Schematischer Aufbau der Heizsteuerung	91
8.4	Innenansicht der Heizsteuerung	92
8.5	Frontansicht der Heizsteuerung	93
8.6	Schematischer Aufbau des Heizsteuerungsprogramms	94
8.7	Ansteuercodes der Siebensegmentanzeigen	95
8.8	Testlauf zum Aufwärm- und Abkühlverhalten der Heizsteuerung	97
B.1	Schaltplan der Heizsteuerung	116
C.1	Vorreinigung.vi, Axarelgang.vi, Klarspuelen.vi	121
C.2	Trocknen5Min.vi, Trocknen10Min.vi, US5Min.vi	122
C.3	US15Min.vi, DuscheAusTank4.vi, ResteVerwerfen.vi	123
C.4	Tempconv.vi, SchreibeAuto.vi	124
C.5	EinlaufAusTank1.vi, EinlaufAusTank2.vi, EinlaufAusTank3.vi	125
C.6	AbpumpenNachTank(1-3).vi	126

Literaturverzeichnis

- [ADL03] ADLINK Technology Inc., NuIPC / NuDAQ 743x Series User's Guide
- [Ahm02] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 011301
- [Ahm03] S. N. Ahmed et al. (SNO Collaboration), `nucl-ex/0309004 v1`
- [All03] S. W. Allen, R. W. Schmidt, S. L. Bridle, `astro-ph/0306386 v3`
- [Alt03] C. Weinheimer, Laboratory Limits on Neutrino Masses, in: G. Altarelli and K. Winter (Eds.), Neutrino Mass, Springer, 2003
- [Ash04] Y. Ashie et al. (Super-Kamiokande Collaboration), `hep-ex/0404034`
- [Bah01] J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, and S. Basu, Astrophys. J. **555** (2001) 990
- [Cha14] J. Chadwick, Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. **16** (1914) 383
- [Cle95] B. T. Cleveland et al. (Homestake), Nucl. Phys. **B** (Proc. Suppl.) **38** (1995) 47
- [Dav94] R. Davis, Prog. Part. Nucl. Phys. **32** (1994) 13; Proc. 13th Intern. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics, Boston, USA, 1988, p. 518, Eds. J. Schneps et al., World Scientific, 1989
- [Dav96] R. Davis, Nucl. Phys. **B** (Proc. Suppl.) **48** (1996) 284
- [Fer34] E. Fermi, Z. Phys. **88** (1934) 161 - 177
- [Fla04] B. Flatt, Dissertation, Inst. f. Physik, Universität Mainz, 2004
- [Fuk98] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett **81** (1998) 1562, `hep-ex/9807003`
- [Fuk00] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett **85** (2000) 3999
- [Geb07] A. Gebel, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Münster, 2007
- [Han03] S. Hannestad, `astro-ph/0303076 v1`
- [Hir88] Hirata, K. S. et al, Phys. Rev. **38** (1988) 448
- [KDR04] J. Angrik et al. (KATRIN-Kollaboration), KATRIN Design Report 2004, FZKA Scientific Report 7090, Januar 2005

- [Kau02] W. Kaufmann, Phys. Zeitschr. **4** (1902) 54
- [Kla04] H. V. Klapdor-Kleingrothaus et al., Phys. Lett. **B586** (2004) 198 - 212
- [Kra05] C. Kraus et al., Eur. Phys. J. C. **40** (2005) 447
- [Lob03] V. M. Lobashev et al., Nucl. Phys. A **719** (2003) 153c
- [Lor02] T. J. Loredo and D. Q. Lamb et al., Phys. Rev. D **53** (2002) 063002
- [Lue05] A. Lühken, Doktorarbeit, Chemische und Pharmazeutische Wissenschaften, Universität Mainz (2005)
- [Mut88] K. Muto and H. V. Klapdor in „Neutrinos“, Springer Verlag Heidelberg (1988) 183
- [Osi01] A. Osipowicz et al., KATRIN Letter of Intent
- [Pau30] Wolfgang Pauli, „Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen“ (datiert 4. Dez. 1930), wiedergegeben in: R. Kronig and V. Weisskopf (Eds.), Wolfgang Pauli, Collected Scientific Papers, Vol. 2, Interscience, New York (1964) 1316 - 1317
- [PDG04] S. Eidelman et al. (Particle Data Group), Phys. Lett. **B592** (2004) Issues 1 - 4
- [Rei59] R. Reines and C. L. Cowan, Phys. Rev. **113** (1959) 273
- [Rei03] R. Reid et al., ASTeC Vacuum Quality Control Documentation, available from ASTeC, CCLRC Daresbury Laboratory, Warrington WA4 4AD, UK
- [Rut14] E. Rutherford and E. N. da C. Andrade, Phil. Mag. **27** (1914) 854
- [SVa00] J. Schechter and J. W. F. Valle, Phys. Rev. D **25** (1982) 2951
- [Sch97] N. Schmitz, Neutrino-Physik, Teubner Verlag, 1997
- [Spe03] D. N. Spergel et al. (WMAP), astro-ph/0302209 v2
- [Sus89] K. S. SUSLICK: The Chemical Effects of Ultrasound. Scientific American (Feb. 1989), S. 62-68
- [Teg01] M. Tegmark et al., Phys. Rev. **D63** (2001) 043007
- [Vel04] Van Der Velde, J. C. et al, Nucl. Instrum. Meth. **A264** (1988) 28-31
- [Val04] K. Valerius, Diplomarbeit, Helmholtz-Institut, Universität Bonn, 2004
- [Wei05] C. Weinheimer, Comptes Rendus **6** (2005) 768-777
- [Yao00] W.-M. Yao et al. (Particle Data Group), Journal of Physics, G **33**, 1 (2006)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

An erster Stelle bedanke ich mich bei Prof. Dr. Christian Weinheimer für die Vergabe dieses interessanten Themas und für die gewährte Unterstützung und Betreuung. Ich danke ihm auch für die Möglichkeit, an der DPG-Frühjahrstagung, der Astroteilchenschule in Obertrubach und den KATRIN-Kollaborationstreffen teilnehmen und in einer internationalen Kollaboration mitarbeiten zu können.

Dr. Volker Hannen möchte ich danken für die umfassende Unterstützung und Betreuung, die vielen Tipps und Hilfestellungen, sowie die Durchsicht dieser Arbeit.

Prof. Dr. Johannes Wessels danke ich dafür, dass er das Korreferat für diese Diplomarbeit übernommen hat.

Bei Helmut Baumeister möchte ich mich ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit und den unermüdlichen Einsatz bei der Planung, dem Aufbau und der Dokumentation der gesamten Ultraschallanlage bedanken. In diesem Zusammenhang sind auch die Leistungen des Teams der mechanischen Werkstatt zu erwähnen. Ihm gilt mein Dank für die hervorragende Ausarbeitung der mechanischen Bauteile und ebenso für die ständige Hilfsbereitschaft.

Für die gute Zusammenarbeit, die vielen guten Ideen zur Lösung technischer Probleme und die ständige Hilfsbereitschaft möchte ich besonders Hans-Werner Ortjohann und Roland Berendes danken.

Beim gesamten Team der Elektronikwerkstatt möchte ich mich ebenso herzlich bedanken für die Unterstützung in Fragen der Elektronik. Außerdem danke ich insbesondere Christoph Ising für die grenzenlose Geduld sowie seinen unermüdlichen Einsatz bei der Umsetzung der Heizsteuerung.

Für die kritische Durchsicht dieser Arbeit danke ich außerdem Claudio, Kathrin und Sebastian, sowie meinen Eltern. Allen anderen Kollegen möchte ich für die schöne gemeinsame Zeit in der Arbeitsgruppe und anregende Diskussionen danken.

Für zahlreiche Ablenkungen außerhalb der Physik auch während der anstrengenden Prüfungs- und Diplomarbeitszeit danke ich Kathrin, Bastian, Claudio, Baldo, Klaus, Joseph und nicht zuletzt Patchy, meiner Zwerghamsterin.

Besonderer Dank gilt ebenso meinen Eltern, die mich bei meinem Studium und auch bei meinem Aufenthalt am CERN stets unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich Sebastian danken, der mir sehr viel Rückhalt gegeben und mich in vielen schweren Situationen aufgefangen und wieder aufgebaut hat.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig verfasst
und keine anderen als die angegebenen Quellen und
Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

.....
Münster, 26. Februar 2007

Kim Temming