FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Hard- und Softwareintegration eines He-Kryostaten in einen Aufbau für magneto-optische Messungen

Bachelorarbeit

in Physical Engineering
des Fachbereichs Energietechnik
der FH Aachen
Abt. Jülich

vorgelegt von

Guangcheng Huang

Jülich, Februar 2013

angefertigt am

Jülich Centre for Neutron Science JCNS und Peter Grünberg Institut PGI -
JCNS-2, PGI-4: Streumethoden
Forschungszentrum Jülich

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

JCNS
Jülich Centre
for Neutron Science

Diese Arbeit wurde von mir selbständig angefertigt und verfasst. Es sind keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfmittel benutzt worden.

Guangcheng Huang
Jülich, Februar 2013

Diese Arbeit wurde betreut von:

1. Prüfer Prof. Dr. rer. nat. Arnold Förster
2. Prüfer Dr. rer. nat. Alexander Weber

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei meinem Praxisprojekt und der Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein herzlicher Dank gilt beiden Betreuern Herrn Prof. Dr. rer. nat. Arnold Förster, sowie Herrn Dr. rer. nat. Alexander Weber, der mich während des Praxisprojekts durch seine hilfreichen Anregungen und bei der Anfertigung dieser Arbeit durch wissenschaftliche Betreuung und Korrektur unterstützt hat.

Den Dank für die Hilfsbereitschaft der Mitarbeiter im JCNS/PGI Institut und Werkstatt möchte ich auch aussprechen.

Ein weiterer Dank gilt Freunden, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen, besonders bedanke ich mich bei meiner „Freshman-Patin“ Frau Henny Selter, die mich sprachlich unterstützt hat.

Schließlich möchte ich bei meiner ganzen Familie bedanken, die mich in vielerlei Hinsicht während des Studiums unterstützt hat. Insbesondere gilt mein herzlicher Dank meiner Mutter, die mich die ganze Zeit moralisch unterstützt hat und das Studium überhaupt ermöglicht hat.

Inhaltsverzeichnis

1 Überblick **7**

2 Das MOKE-Experiment **9**

2.1 Einleitung 9

2.2 Der magneto-optische Kerr-Effekt 10

2.3 Der experimentelle Aufbau 12

2.4 Der experimentelle Messablauf 18

2.5 Einbindung dieser Bachelorarbeit 19

3 Konstruktion **21**

3.1 Anforderungen 21

3.2 Mechanische Umsetzung 22

4 Das Steuerprogramm mit LabView **27**

4.1 LabView, GPIB und die LakeShore 27

4.2 Testprogramme 31

4.2.1 Bedienen 31

4.2.2 Zone 35

4.3 Schnittstelle zu Hauptprogramm 40

4.4 Zusammenfassung 44

A Konstruktionszeichnungen **47**

B Blockdiagramme des Programms **65**

C Glossar **69**

Abbildungsverzeichnis 72

Literaturverzeichnis 73

Kapitel 1

Überblick

Ziel dieser Arbeit ist die Integration eines He-Kryostaten in eine MOKE-Versuchs-Apparatur. In dem Experiment wird die Probe im Magnetfeld mit linear polarisiertem Licht bestrahlt. Mit Hilfe dieses MOKE Setups können magnetische Hysteresekurven unter Ausnutzung des Kerr-Effekts aufgezeichnet werden.

Das Experiment erfordert eine präzise Positionierung der Probe innerhalb des optischen Weges. Zu diesem Zweck wurde eine Justage für den Kryostaten konstruiert. Außerdem wurde für die Steuerung des Kryostaten ein LabView-Programm geschrieben. Damit wurde der Kryostat getestet und ist jetzt zur Temperatureinstellung bereit.

Kapitel 2

Das MOKE-Experiment

2.1 Einleitung

Der MOKE steht für den **m**agneto-**o**ptischen **K**err-**E**ffekt. Die Entdeckung des Effekts wurde 1877 von John Kerr gemacht. Der Effekt beschreibt die Rotation der Polarisation des Lichts beim Reflektieren auf magnetische Materialien. Analog, aber schon 1845 von Michael Faraday entdeckt, gibt es den nach ihm benannten Faraday-Effekt, der die Rotation der Polarisation des Lichts nicht beim Reflektieren, sondern bei der Transmission beschreibt. Im Vergleich dazu ist die Drehung der Polarisationsebene des Lichts im Kerr Effekt viel kleiner als die im Faraday Effekt. Deswegen war es damals schwierig, diesen Effekt wahrzunehmen.[1] Nach mehr als hundert Jahren wurde im magneto-optischen Bereich viel erforscht und entwickelt. Heutzutage hat man den Wunsch nach immer dünneren Magnetschichten. Der MOKE ist hervorragend zur Untersuchung von dünnen Magnetschichten geeignet, weil schon wenige Monolagen Material ausreichen, um eine Drehung zu messen. Deswegen ist der magneto-optische Kerr-Effekt eines der meist genutzten physikalischen Phänomene, mit dem man die magnetischen Eigenschaften von Materialien untersucht. Eine Anwendung dieses Effekts ist zum Beispiel die magneto-optische Datenspeicherung.
Im MOKE-Effekt sind der Winkel des eingestrahlten Lichts, die Geometrie

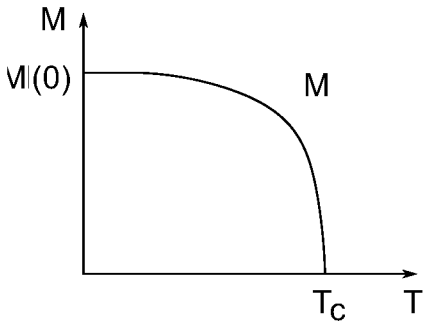

Abbildung 2.1: *Schematische Darstellung der temperaturabhängigen Magnetisierung. M: Magnetisierung, T: Temperatur.[3]*

der Kombination der Polarisationsebene und der Magnetisierung der Probe die auf das Ergebnis wirkenden Variablen. Die Geometrie hat insgesamt drei Möglichkeiten: polar, longitudinal und transversal(siehe Abb. 2.2). Bei der polaren Geometrie ist der Effekt am stärksten und es wird die größte Drehung gemessen.
Die Temperatur der Probe spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Wie in der Abb. 2.1 schematisch dargestellt, nimmt die Magnetisierung mit steigender Temperatur in Ferromagneten ab, bis sie bei einer kritischen Temperatur, der Curie-Temperatur, ohne äußeres Feld vollständig verschwindet(siehe Abb. 2.1).[2] Da die Polarisationsdrehung proportional zur Magnetisierung ist, verbessern tiefe Temperaturen das Messsignal. Dazu wird der Kryostat mit Temperaturregelung und Probehalterung genutzt.

2.2 Der magneto-optische Kerr-Effekt

In einer der ersten Entdeckungen von John Kerr stellte ein Hufeisenmagnet das Magnetfeld zur Verfügung. Ein auf entweder den Nordpol oder den Südpol gelegtes Eisenblech wurde wegen seiner ferromagnetischen Eigenschaft in der Richtung des Magnetpols magnetisiert. Dann wurde das Eisenblech von einem, mittels einem Nicolschen Prismas, linear polarisierten Sonnenlicht unter einem bestimmtem Winkel bestrahlt. Dabei wurde festge-

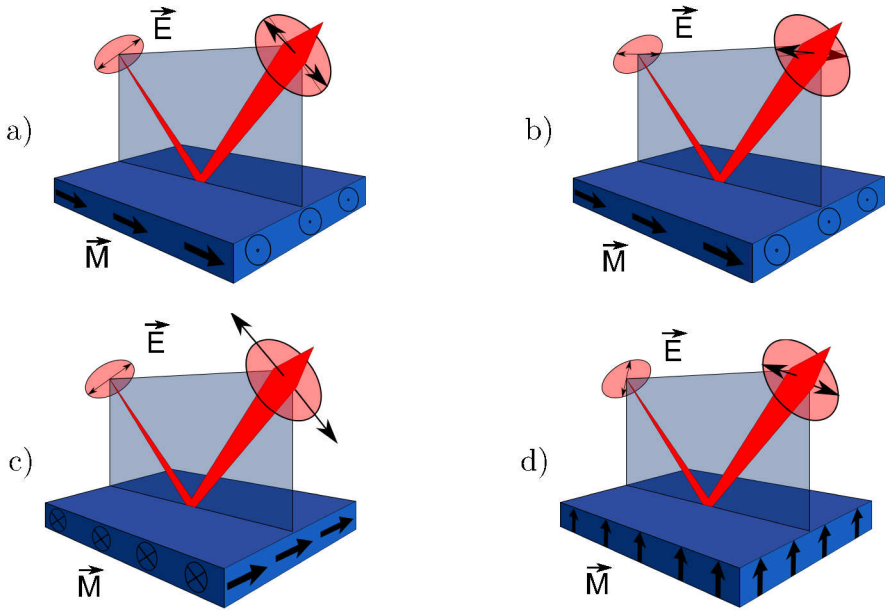

Abbildung 2.2: *a) parallel-longitudinal, b) senkrecht-longitudinal, c) transversal, d) polar*

stellt, dass der an dem Eisenblech reflektierte Strahl in seiner Polarisation gedreht war. Die Polarisation drehte sich um einen gewissen Winkel und wurde von John Kerr gemessen. Danach änderte er seine Experimentanordnungen: Er drehte den Polarisator um verschiedene Polarisationsebenen zu erhalten. Daraus folgen dann zwei Varianten der Polarisationsebene: parallel und senkrecht zur Einfallsebene des Lichts. Bei allen anderen Möglichkeiten können die Polarisationsebenen in die beiden Komponenten zerlegt werden. Indem er die Stellung des Hufeisenmagnets variierte, hatte John Kerr auch die Magnetisierung der Eisenprobe geändert. Wie in Abb. 2.2 gezeigt, spricht man von einer longitudinalen Geometrie, wenn die Magnetisierung in der Probenebene und auch in der Einfallsebene liegt. Liegt die Magnetisierung in der Probenebene, aber senkrecht zur Einfallsebene, nennt man dies die transversale Geometrie. Wenn die Magnetisierung senkrecht zur Probe steht, spricht man von polarem Kerr Effekt. Hierbei dreht sich die Polarisationsebene am meisten. Je nachdem, wie man die Polarisationsebene und die Magnetisierung kombiniert, unterscheiden sich die Fälle: Parallel-Longitudinal,

Senkrecht-Longitudinal, Parallel/Senkrecht-Transversal und Polar.

Eine anschauliche Erklärung für den magneto-optischen Kerr-Effekt ist die Wechselwirkung zwischen dem Magnetfeld in der Probe und dem elektromagnetischen Feld des Lichts. Das linear polarisierte Licht hat ein elektrisches Feld. Das breitet sich in der Probe aus und die Ladungen in der Probe werden dadurch angeregt. Diese Anregung hat am Anfang die Form einer linearen Oszillation. Aber in dem existierenden Magnetfeld werden die Ladungen durch die Lorentzkraft gezwungen, sich auf einer elliptischen Bahn zu bewegen. Dadurch entsteht eine Komponente im elektrischen Feld senkrecht zur ursprünglichen Polarisationsebene. Das Resultat ist eine leichte elliptische Polarisation mit einer rotierten langen Achse der Ellipse. Diese Drehung liefert das Messsignal für den Kerr-Effekt.[4]

2.3 Der experimentelle Aufbau

Der Aufbau besteht aus einem großen Elektromagneten, einem Kryostaten mit Probehalterung und verschiedenen optischen Elementen: ein Laser, ein Polarisator, ein Analysator und eine Photodiode. Der gesamte Aufbau ist auf einem passiven optischen Tisch montiert. Eine Übersicht ist in Abb. 2.3 gezeigt. Daneben gibt es noch verschiedene Messgeräte für die Messung des Magnetfeldes und der Spannung der Photodiode. Unter dem optischen Tisch stehen zwei Vakuumpumpen. Eine der Pumpen erzeugt das Vakuum für den Kryostaten, die andere ist für die Probehalterung, wenn man den Kryostaten nicht benutzt. Da eine stabile Umgebung für die Optik benötigt wird und die Pumpen immer vibrieren, liegen die Geräte unter dem Tisch. Das gilt auch für den Laser, weil das Magnetfeld ihn sonst beeinträchtigen würde. Das Laserlicht wird dann mit einem Lichtleiter nach oben geleitet. Außerdem gibt es noch ein Netzteil, das den Elektromagneten mit Strom versorgt, und einen Computer für die Steuerung der Geräte. Die Elemente dieses Experiments werden in den folgenden Abschnitten noch ausführlicher beschrieben.

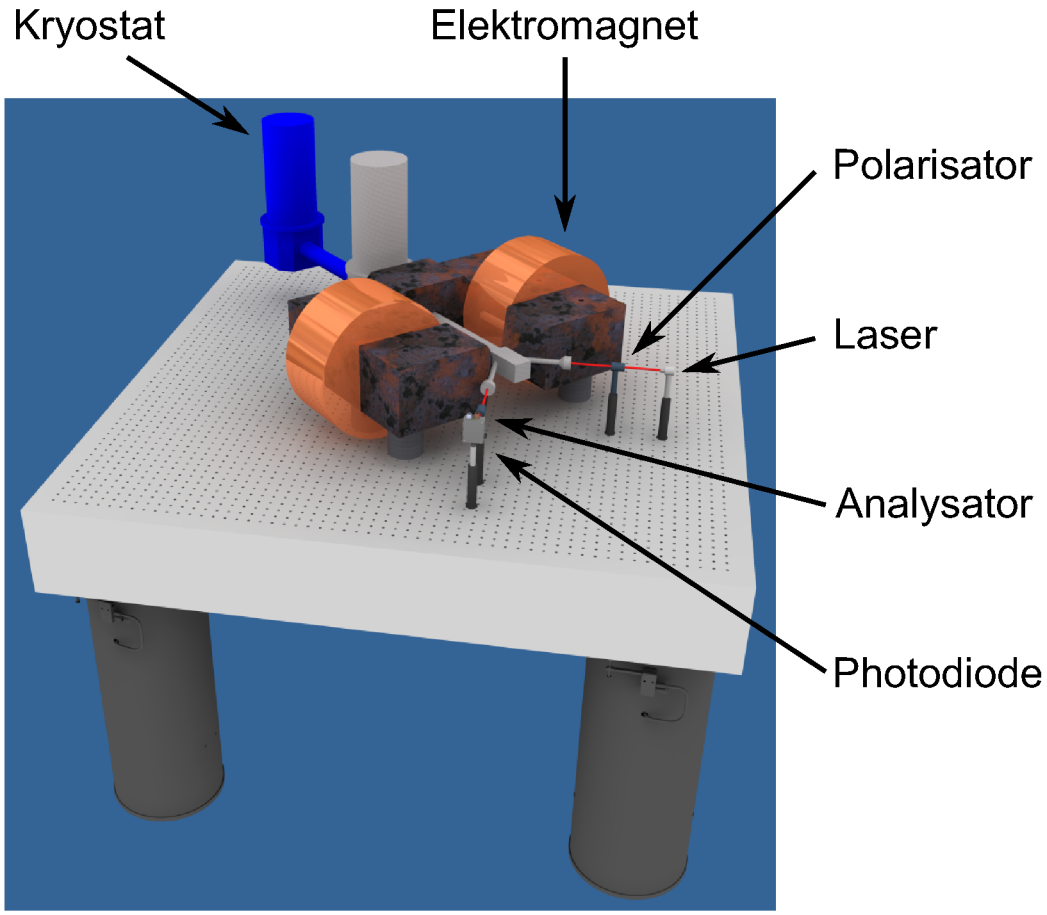

Abbildung 2.3: *Schematische Zeichnung des MOKE-Aufbaus*

Magnetfeld: Um ein äußeres Magnetfeld zu erhalten, sind zwei Kupferspulen mit Wasserkühlung zuständig. Da Kupfer einen relativ kleinen elektrischen Widerstand besitzt, entsteht beim Durchfluss des Stroms relativ wenig Wärme. Dennoch müssen die Spulen wegen der großen Strommenge von 400 A ständig gekühlt werden, um sie vor Beschädigung durch Wärme zu schützen. Durch die Mitte der Spulen führt ein Eisenkern, sodass deren Magnetfeld verstärkt wird. Die beiden Enden verjüngen sich um 45° gegeneinander, bis nur ein Luftspalt von 5 cm bleibt. Dort befindet sich die Probe. Die Idee der Verjüngung ist einerseits, die Feldlinien auf die Probe zu bündeln, andererseits den Weg für das Laserlicht frei zu halten, weil die größte Dre-

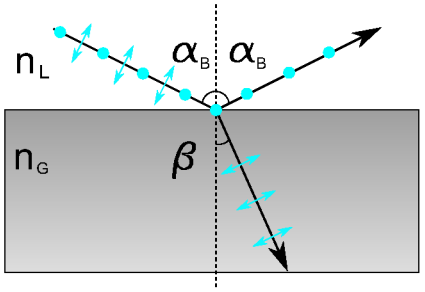

Abbildung 2.4: *Schema des Brewster Winkels. Punkte: s-polarisiertes Licht; Pfeile: p-polarisiertes Licht*

hung der Polarisationsebene bei 45° Einfallswinkel auftritt.
Die beiden Spulen sind an ein Netzteil angeschlossen, das man mit Hilfe eines Computers steuern kann. Die Spulen werden mit bis zu 400 A Gleichstrom von dem Netzteil versorgt. Theoretisch wird ein Feld von 1 Tesla induziert. Praktisch werden 0,8 Tesla erreicht. Eine Hallsonde zwischen den Polschuhen misst die Induktion während der Messung.

Optik: Ein Helium-Neon-Laser, ein Polarisator, ein Analysator und eine Photodiode bilden die komplette Optik.
Der mit Glasfaser gekoppelte HeNe-Laser ist die Lichtquelle, daraus bekommt man Laserlicht mit einer Wellenlänge von 635 nm und eine maximale Ausgangsleistung von 2 mW.[5] Mit Hilfe einer Konstruktion „Brewster-Fenster“ ist das Laserlicht bereits polarisiert. Das Prinzip des Brewster-Fensters wird in der Abb. 2.4 schematisch gezeigt. Im Laser steht das Fenster zum Licht schräg unter dem Brewster Winkel, so wird s-polarisiertes Licht reflektiert, aber p-polarisiertes durchgelassen. Die optische Faser ist vom Panda-Typ, d.h. sie hat einen Querschnitt in Form einer „8“, was die Polarisation erhält.
Da der Laser selbst nicht perfekt polarisiert ist, wird zwischen die Probe und den Laser zusätzlich ein Polarisator eingesetzt. Der Polarisator hat ein Auslöschungsverhältnis von s- zu p-polarisiertem Licht von 10^{-8}.
Auf der anderer Seite der Probe stehen ein Analysator und eine Photodiode in Reihe. Was der Analysator durchlässt, ist die Projektion der gedrehten

Polarisation. Eine Änderung der Magnetisierung bewirkt eine Änderung der Polarisationsrichtung. Bei festem Winkel des Analysators beobachtet man dies als Änderung der Intensität. Diese wird mit der Photodiode gemessen und über ein digitales Multimeter auf den Computer übertragen.

Tiefe Temperaturen: Mit Hilfe der Tieftemperaturtechnik kann man sehr tiefe Temperaturen erreichen und konstant halten. In diesem Aufbau des Experiments handelt sich um ein *closed cycle refrigerator* (CCR) System, in dem Heliumgas als Kühlmittel dient. Damit ist eine Temperatur von ca. 4 K an der Probe erreichbar und es kann bis auf ca. 400 K geheizt werden.[7] Für die Heliumversorgung wird hier aber keine äußere Quelle benötigt, weil das Heliumgas schon in einem geschlossenen Kreislauf steht und im Betrieb zyklisch gepumpt wird. Dabei wird die Wärme von der zu kühlenden Stelle weg durch Komprimieren und Expandieren transportiert. Dieser Prozess basiert auf dem *Pulse Tube (PT) thermodynamic cycle.* In der Expansions-Phase

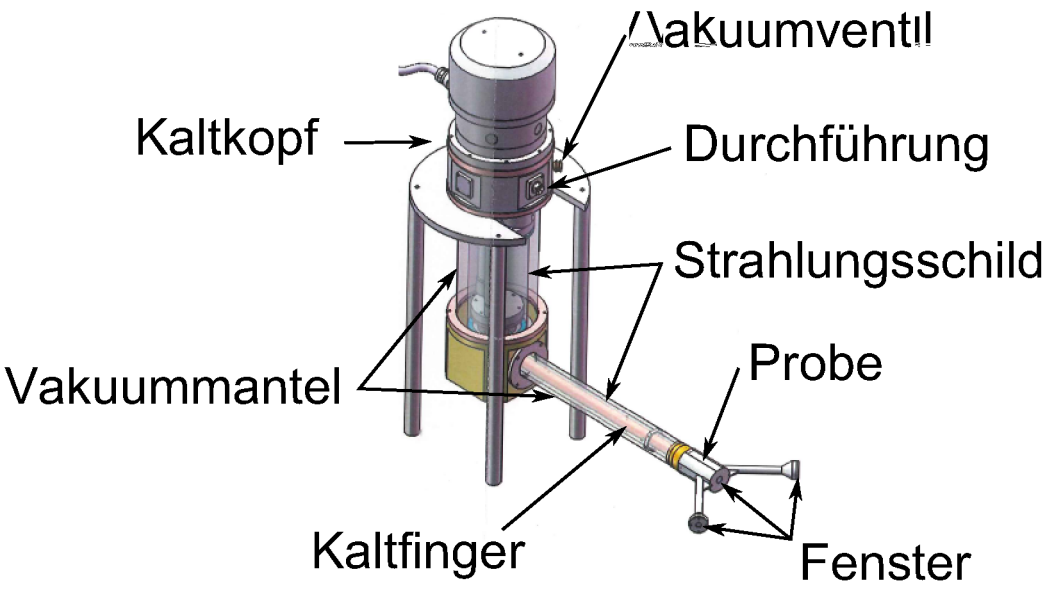

Abbildung 2.5: *Kryostat - The Janis research PTSHI-4-5 refrigerator system. Abbildung frei nach [6]*

des Kreislaufs nimmt das Heliumgas die Wärme von dem Kaltfinger auf, auf dem die Probe sitzt. Auf dem Kaltfinger gibt es noch einen Heizdraht und ein Thermoelement, mit denen man die Temperatur der Probe sehr genau regulieren kann.

Der hier verwendete Kryostat von Janis besteht aus folgenden Komponenten: [6]

i. Kompressor: Dieser stellt kaltes Heliumgas mit hohem Druck zur Verfügung. Der Kompressor wird während des Betriebs mit Wasser gekühlt.

ii. Kaltkopf: Das komprimierte Heliumgas wird hier expandiert. Der Wärmeaustausch passiert erstmals in einer Kammer mit Schutzschild, womit man die Wärmestrahlung von außen abschirmt, dann an der Probe noch einmal.

iii. Gasleitung: Verbindung zwischen dem Kompressor und dem Kaltkopf.

iv. Vakuummantel: Er isoliert den Kaltkopf, um den Wärmeaustausch zwischen dem Kaltkopf und der Umgebung zu minimieren. Der Vakuummantel ist mit einem Sicherheitsventil, einem Vakuumventil und einer elektrischen Durchführung für Heizer und Thermoelement ausgestattet.

v. Strahlungsschutzschild: Der Schild sitzt um den Kaltkopf und den Kaltfinger innerhalb des Vakuummantels. Seine Außenfläche ist fein poliert und als Folge wird die Strahlung aus der Umgebung mit Raumtemperatur teilweise reflektiert. Mit seiner Hilfe erreicht man eine möglichst niedrige Temperatur für den Kaltfinger.

vi. LakeShore Temperatur Regler: Er ermöglicht, die Probentemperatur zu kontrollieren und einzustellen. Wenn er mit dem GPIB Netzwerk verbunden ist, kann man am Computer mit dem Kryostaten kommunizieren.

Um das Arbeitsprinzip des Kryostaten besser zu verstehen, braucht man einige Kenntnisse über das *Pulsed Tube* Verfahren. Das komprimierte Heliumgas

kommt aus dem Kompressor und strömt in den Kaltkopf. Wenn es dort ankommt, wird es in Form einer Welle expandiert. Das Gas expandiert in einer Kammer und bewegt sich vor und zurück an einem Wärmetauscher vorbei. Dieser Vorgang ist sehr effizient und enthält keine mechanisch beweglichen Teile. Um den Wirkungsgrad zusätzlich zu erhöhen strömt das Helium durch einen Filter. Aufgrund der Konstruktion eines langen Kaltfingers kann man diesen Kryostaten von anderen unterscheiden. Der Kaltfinger ist ein unten an den Kryostaten angebautes Rohr, das sich etwa einen halben Meter nach vorne erstreckt. Da das gebündelte Magnetfeld nur zwischen den Polschuhen existiert, ist der Platz für die Messeinrichtung sehr begrenzt. Durch den Kaltfinger kann der Kryostat hinter dem Magneten stehen, wobei die Probe auf Distanz im Magnetfeld gekühlt wird. Der Vakuumschild am Ende des Kaltfingers ist mit zwei Rohren versehen, an denen die optischen Fenster sitzen. Dadurch wird erreicht, dass sich die Fenster selbst nicht in einem Magnetfeld befinden. Sonst könnte der Faraday-Effekt, die Drehung der Polarisationsebene des Lichts bei Transmission durch die Fenster, eine zusätzliche Polarisationsdrehung bewirken und die Messung stören. Durch ein Rohr geht der Laser ein und strahlt auf die Probe. An der anderen Seite geht der reflektierte Laser heraus in die Photodiode. In dem Finger hinter der Probe wird ein umwickelter Heizdraht mit einem besonderen Typ von Epoxidharz fixiert, welches unter tiefer Temperatur nicht spröde wird. Um die Temperatur zu kontrollieren, gibt es zwei sogenannte Cernox-Sensoren, welche bis zu 0,001 Kelvin genau kalibrierte Thermoelemente sind. Eines ist neben der Probe montiert. Das andere ist hinter dem Kaltfinger unter dem Kaltkopf montiert und ist für eine eventuelle Fehlersuche vorgesehen. Die aufgenommene Temperatur und die Heizleistung kann man mit dem LakeShore Temperatur Regler auslesen. Andere Befehle, wie z.B. *Ramprate*, PID-Parameter, Heizleistung, Arbeitsmodul, usw. kann man auch am LakeShore eingeben. Eine sehr praktische Funktion des LakeShores heißt Zone-Funktion. Die PID-Parameter sind in jedem Temperaturbereich anders und nur mit den richtigen PID-Parametern wird die Temperatur stabil gehalten. Mit falschen PID-Parametern schwankt sie und wird so die Messung verschlechtern. Zu diesem Zweck wird die Zone-Funktion der Temperaturkontrolle verwendet. Vorab werden in allen Temperaturbereichen verschiedene PID-Parameter ausprobiert und die richtigen

Parameter für jede Zone gespeichert. Für die Messung muss nur eine Temperatur vorgegeben werden, und die gespeicherten Parameter werden automatisch geladen.

2.4 Der experimentelle Messablauf

In diesem Experiment wird die Probe von der äußeren Umgebung isoliert und liegt bei der Messung im Hochvakuum. Deswegen muss die Montage der Probe vor dem Einschalten der Vakuumpumpe und des Kryostaten erledigt sein. Um zu einer effektiven Kühlung zu gelangen, muss man im Vakuummantel ein Vakuum erzeugen. Es dauert ca. eine Viertelstunde, bis ein Druck von kleiner 10^{-3} mbar erreicht wird. Wegen des großen Stromverbrauchs wird viel Wärme erzeugt. Folglich muss man zuerst die Wasserkühlung für den Kompressor und die Spule einschalten. Die Temperatur des Zuflusses liegt ungefähr bei 10 °C. Nur die Strömungsgröße des Wassers ist verstellbar. Und die Strömungsgröße soll nachher überprüft und eventuell noch verstellt werden, bis die Ausflusstemperatur ca. Raumtemperatur zeigt.[8] Es dauert 2 - 3 Stunden, bis sich der Kryostat von Raumtemperatur auf die tiefste Temperatur (ca. 4 K) abgekühlt hat. Inzwischen gibt man eine gewünschte Temperatur als *Setpoint* ein und wartet bis die Temperatur stabil bleibt. Dann schaltet man das Netzteil für die Elektromagneten ein. Jetzt kann man den Laser einschalten und den Strahlengang justieren.
Die Messungen werden mit Hilfe eines Programms am Monitor gezeigt. Zu diesem Zweck wird ein Magnetfeldintervall von max. 0,8 T bis -0,8 T in beliebigen Schritten hin- und zurückgefahren, während die Temperatur konstant gehalten wird. Wie vorher erwähnt, kann man mit der Photodiode die Intensität des reflektierten Laserlichts messen und die Drehung der Polarisationsebene zurückrechnen. Daraus lässt sich die Magnetisierung der Probe qualitativ ausrechnen. Unter anderen Temperaturen wiederholt man denselben Prozess. So werden magnetische Hysteresekurven bei unterschiedlichen Temperatur gemessen.

2.5 Einbindung dieser Bachelorarbeit

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Konstruktion einer Verstellung des Kryostaten. Um die Probe optimal im Strahlengang zu justieren, ist es nötig, die Position und Neigung der Probe einstellen zu können. Der entstandene Aufbau ist in der Lage den gesamten Kryostaten und damit die Probe zu fahren und zu neigen.
Der zweite Teil behandelt die Programmierung der Steuerung des Kryostaten sowie die Einbindung der Temperaturkontrolle in das Hauptprogramm.
Beide Teile werden in den folgenden Kapiteln genau beschrieben.

Kapitel 3

Konstruktion eines Manipulators für den Kryostaten

3.1 Anforderungen

Wie im letzten Kapitel erwähnt, ist für den Lasergang eine Probenjustage notwendig. Die Probenjustage soll die Freiheitsgrade, wie in der Abb. 3.1 gezeigt, in x-/y-Richtung und auf $\alpha-/\beta-$Kreisbahn haben.
Nach einem Probenwechsel kann es vorkommen, dass die Probenoberfläche nicht identisch zur vorherigen Probe liegt. Daher muss die Probe erneut justiert werden, damit das von der Probe reflektierte Laserlicht genau durch die Fenster und den Polarisator den Detektor trifft. Die Höhe der Probe muss nicht justiert werden. Mit Hilfe der Justage in x-/y-Richtung positioniert man das Laserlicht in die Mitte der Probe. Um das reflektierte Laserlicht in Richtung der Fenster zu orientieren, muss der Kryostat geneigt werden. Da die Probe auf dem Kaltfinger fest montiert ist, bewegt sich der Kryostat auf der $\alpha-$ und $\beta-$Kreisbahn während die Probe sich neigt. Deswegen ist es wichtig, dass die Drehzentren der $\alpha-$ und $\beta-$Kreisbahnen immer auf der Probenoberfläche sind. Der Kryostat wiegt etwa 30 kg. Und der Massenschwerpunkt liegt hinten am Kaltkopf. Daher ist es mechanisch günstig, die

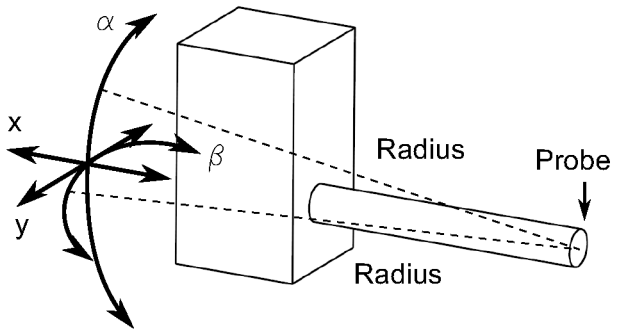

Abbildung 3.1: *Geforderte Freiheitsgrade zur Probenjustage: in x-/y-Richtung und auf $\alpha-/\beta-$Kreisbahn*

Verstellung auch hinten unter dem Massenschwerpunkt des Kryostaten zu positionieren. Da es z.B. aus der Optik keine Standardteile für diese Gewicht gibt, ist eine Eigenkonstruktion notwendig.

3.2 Mechanische Umsetzung

Entsprechend der genannten Vorgabe wurde ein Manipulator entworfen. Das Schema des Aufbaus ist in der Abb. 3.2 gezeigt. Schrauben mit Feingewinde sorgen für das Verstellen. Sie sind in dieser Zeichnung ausgelassen, aber mit Pfeilen markiert. Ein besseres Verständnis über den Zusammenbau der Bauteile kann durch eine in der Abb. 3.3 gezeigte Explosionsansicht erhalten werden. Zwei gerade Schienen mit vier Gleitwagen unterstützen den Manipulator und den darauf fixierten Kryostaten. Auf den Schienen kann man den Kryostaten vor- und zurückschieben. Bei zurückgezogenem Kryostaten wechselt man die Probe. Auf den Gleitwagen werden drei runde Platten aufeinander montiert. Zwischen allen Platten befinden sich zwei Gleitstücke, die für reibungsarmes Gleiten sorgen. Auf Grund eines sehr guten Gleitverhältnisses gegen Metalle wurde Teflon ausgesucht. Die Teflon Gleitstücke liegen in geformten Rillen der Platten und rutschen innerhalb des Spielraums.

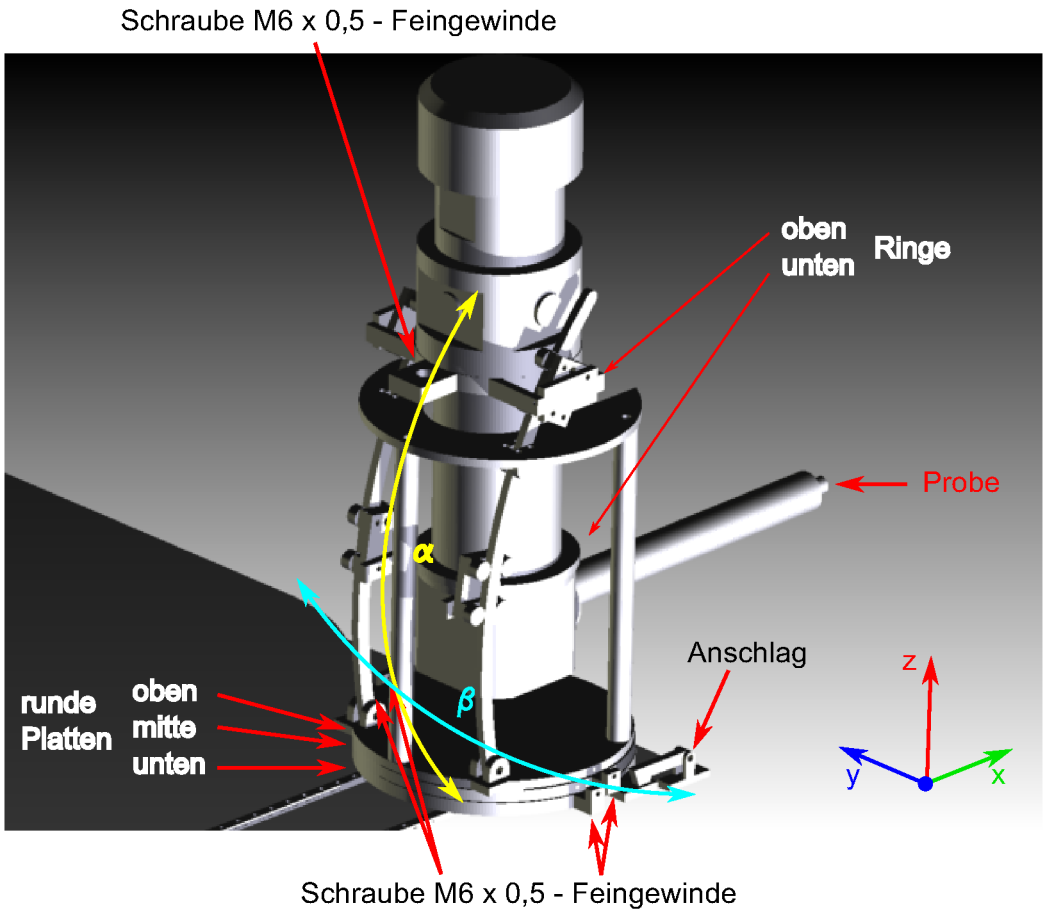

Abbildung 3.2: *Schematische Zeichnung von Manipulator und Kryostat*

Je nachdem, ob die Rillen die Form einer Geraden oder eines Bogens haben, orientiert sich die Bewegung daran. Die untere Platte bewegt sich auf den Schienen vor und zurück (x-Richtung). Die mittlere Platte bewegt sich links und rechts in Querrichtung (y-Richtung) zu der unteren Platte. So kann die Probe links-rechts verschoben werden. Die obere Platte bewegt sich entlang einem Bogen (β-Kreisbahn), dessen Mittelpunkt auf der Probe ist. Dadurch erzielt man, dass sich die Probe nicht lateral von ihrer Lage wegbewegt, sondern nur gedreht wird. Durch diese Verstellung kann man die Richtung des reflektierten Laserlichts in einer horizontalen Ebene justieren. Auf der oberen Platte werden drei Stangen vertikal montiert. Sie sorgen für den Halt der obersten Platte. Zwei gebogene Schienen mit Gleitwagen bilden eine ge-

krümmte Ebene, deren Achse durch die Probe geht. Der Kryostat wird von den zwei ringförmigen Bauteilen getragen, die auf die Gleitwagen montiert werden. Dann kann man durch Drehen der Schraube die Höhe des oberen Rings ändern. So wird der Kryostat mit dem Drehpunkt auf der Probe in einer vertikalen Ebene gedreht. Dadurch wird die Richtung des reflektierten Laserlichts vertikal justierbar. Alle fünf Schrauben für das Verstellen sind mit Feingewinden ausgestattet, da eine hohe Genauigkeit der Verstellungen für den Laser erforderlich ist. Außerdem wird ein Anschlag auf dem Tisch montiert. Man schiebt den Manipulator und den Kryostaten gemeinsam in den Magneten, bis der Manipulator im Anschlag einrastet. Jetzt lässt sich die Position auf dem Anschlag in x-Richtung fein justieren.

Da die Bewegung des Kryostaten von der Größe der Bohrungim Eisenkern abhängt, bleiben nur wenige Zentimeter Spielraum. Aber das reicht für das Experiment. In der horizontalen Ebene kann man den Kryostaten nach links und rechts jeweils 15 mm schieben und 2,6° drehen. Nach vorne und hinten ist es nicht beschränkt. In der vertikalen Ebene kann man ihn ebenfalls 2,6° drehen. Das Justieren der Höhe wird nicht benötigt, da sie sich nicht ändert.

Der Mechanismus der Konstruktion sollte so einfach wie möglich sein, damit diese lange hält und stabil ist. Zu diesem Zweck befinden sich in der Konstruktion z.B. keine Gelenke. Das minimiert die Fehler. Die Kontaktstellen, auf denen Platten gleiten, haben große flache Flächen, um den Druck zu minimieren, da der Kryostat ein Gewicht von etwa 30 kg hat. Außerdem wurden die Kontaktstellen möglichst nach außen geschoben, da der obere Teil des Manipulators und der Kryostat nicht umkippen sollen. Alle nicht beweglichen Bauteile werden mit M3 Schrauben festgeschraubt. Die Auswahl einer dickeren M6 Schraube für das Verfahren auf der α-Kreisbahn begründet sich in der Tragfähigkeit: Auf dieser Schraube liegt das ganze Gewicht des Kryostaten. Der obere auf dem Kryostaten klemmende Ring hat aus diesem Grund eine größere Dicke, damit möglichst viele Gänge des Feingewindes das Gewicht tragen. Die obere M6 Schraube hat ein rundes Ende, damit sie leichter auf der Platte geleitet. Der untere Ring ist nur für die Orientierung

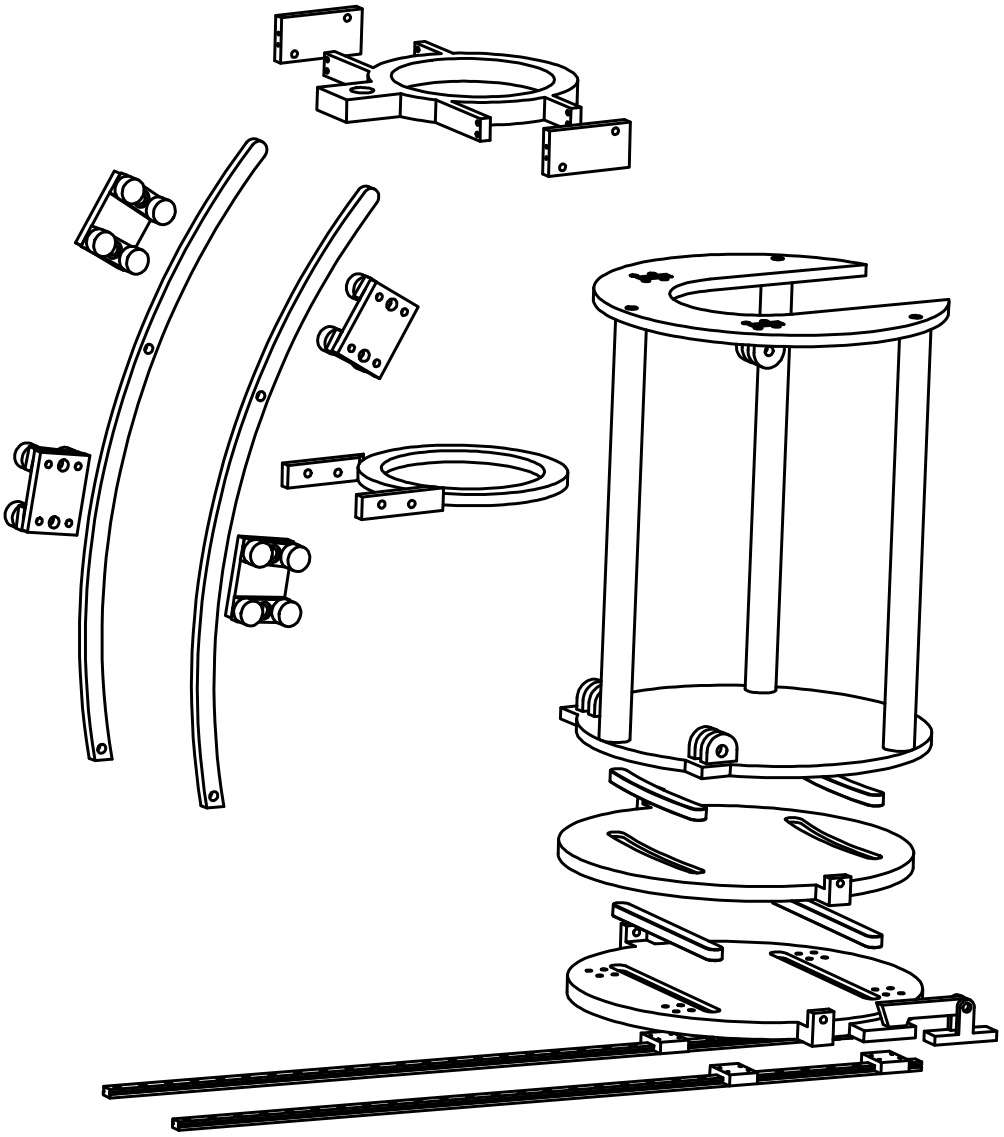

Abbildung 3.3: *Explosionsansicht des Manipulators*

der Neigung da und trägt kein Gewicht.

Außer den Schienen und den Gleitwagen sind alle Bauteile in der Werkstatt des Institutes aus Aluminium mit einer Genauigkeit von 0,1 mm angefertigt worden. Die Schienen für die horizontale Verstellung, also für das Verfahren aus dem Magneten heraus, wurden von der Firma Schneeberger geliefert. Die Schienen für die vertikale Neigung stammen von der Firma Rollon.

Kapitel 4

Das Steuerprogramm mit LabView

4.1 LabView, GPIB und die LakeShore - Temperatursteuerung

Da der Aufbau des Experiments aus mehreren Elementen besteht, wird das Experimentieren durch Fernsteuern aller Geräte an einem Computer effizienter und übersichtlich. Die Programmierung erfolgt in *LabView*. *LabView* ist eine sehr anschauliche Software, welche zur Steuerung von Experimenten häufig eingesetzt wird. Um zu programmieren muss man nicht viel Code lernen, sondern arbeitet mit Symbolen und Drähten, sodass die Darstellung sehr anschaulich ist. Der Aufbau eines Programms in *LabView* ist unterteilt in das Frontpanel und das Blockdiagramm. Im Blockdiagramm werden die Symbole platziert und verknüpft. Verschiedene Symbole stehen für verschiedene Logiken. Durch logisches Kombinieren der Symbole und Verknüpfen mit Drähten entsteht ein Programm. Im Frontpanel entstehen automatisch die entsprechenden Elemente, wie z.B. Tasten „ok“ und „Stop“, Anzeigeelemente für Temperatur und Strom usw., womit man das Programm bedient. Es folgt eine ganz einfache Fernbedienung eines Gerätes mit einem solchen *LabView* Programm, z.B. kann man per Maus-Klick einen Befehl oder eine

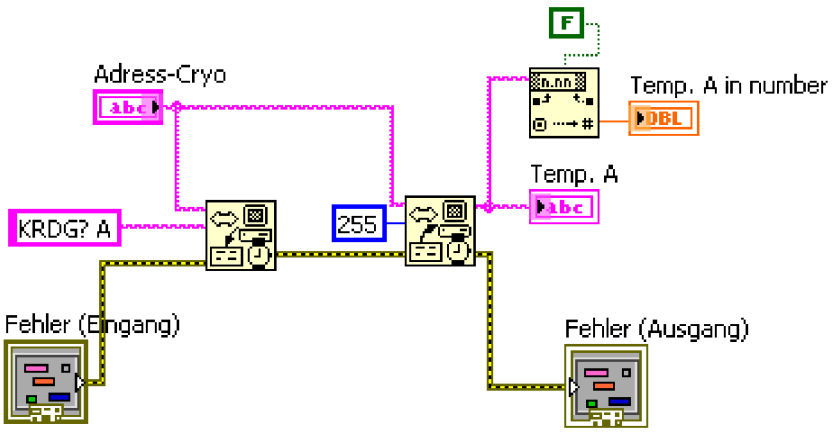

Abbildung 4.1: *Blockdiagramm vom Programm „Temp_A_read“*

Abfrage schicken.

Das Blockdiagramm eines Miniprogramms „Temp_A_read“ wird als Beispiel in der Abb. 4.1 gezeigt. Mit diesem Miniprogramm kann man den *LakeShore*-Regler die Temperatur abfragen. Von dem „Lesen“-Symbol wird zuerst der Befehl „KRDG? A“ zu der Adresse des Kryostaten geschickt. Die Adresse gibt man im Frontpanel ein. Der Befehl „KRDG? A“ steht für „*Kelvin Reading from Sensor A*“. Das heißt Temperatur von dem Sensor A in Kelvin abzulesen. Das „?“ weist auf eine Anfrage hin. Folglich gibt der Regler eine Antwort. Von derselben Adresse wird sie durch das „Lesen“-Symbol empfangen. Die Zahl „255“ weist auf die maximale Zahl von Stellen des empfangenen Strings hin. An dem „Lesen“-Symbol hängen zwei Anzeigeelemente. Sie zeigen die Antwort in Nummer und String. Die „Fehler“-Symbole („Eingang“ und „Ausgang“) sind einerseits für die Fehlersuche da, andererseits zwingen sie die Logik zeitlich erst „Eingang“ dann „Ausgang“ auszuführen. In der Abb. 4.2 wird das Frontpanel des Miniprogramms „Temp_A_read“ gezeigt. Dieses Frontpanel enthält nur Bedienelemente und Anzeigeelemente. Die in dem Blockdiagramm geschriebenen Befehle, Zahlen, „Lesen“-/„Schreiben“-Symbole und Drähte werden in dem Frontpanel weggelassen. Auf dem Frontpanel wird das Programm bedient: Man gibt erst die richtige Adresse vom Kryostaten in das links stehende Feld ein, dann drückt man auf die Taste „run“. Das Programm wird ausgeführt. Die Folge ist eine Anzeige der

Abbildung 4.2: *Frontpanel vom Miniprogramm „Temp_A_read“*

Temperatur. Diese ist ein String und erscheint im Feld „Temp.A“ an der rechten Seite. Der String wird in die Zahl umgewandelt und im Feld „Temp. A in number“ gezeigt. Falls ein Fehler auftritt, erhält man eine Meldung in den unteren Feldern „Fehler(Eingang)“ und „Fehler(Ausgang)“.

Für das Kommunizieren zwischen Geräten ist ein GPIB (*General Purpose Interface Bus*) Netzwerk eingerichtet worden. Verbindet man einen Computer im Netz, kann man jedes Gerät bedienen. Das Arbeitsprinzip des GPIB Netzwerks basiert auf Lesen und Schreiben. D.h., dass man einen String wie eine Abfrage zum Gerät schickt(„Schreiben“) und vom Gerät einen anderen String wie eine Antwort erhält(„Lesen“). Die beiden Arbeitsweisen sind in *LabView* symbolisiert. Die zu schickende Logik muss mit einem „Schreiben“-Symbol verbunden sein, damit der String im Netz richtig bearbeitet werden kann. Eine richtige Adresse ist auch mit dem Symbol „Schreiben“ und „Lesen“ zu verknüpfen. Um die Rückmeldung zu empfangen, schließt man das „Lesen“-Symbol an das „Schreiben“-Symbol. Mit einem Symbol vom Anzeigeelement wird die Rückmeldung im Monitor gezeigt.

Das Steuerprogramm ist spezifisch für den Kryostaten. Aber die Kommunikation ist nicht direkt mit ihm, sondern mit einem *LakeShore* Regler, in den die Bedienung integriert ist. Auf dem Gerät kann man mehrere Parameter einstellen. Zum Beispiel kann man einen *Setpoint* setzen. Dadurch wird eine gewünschte Temperatur eingestellt. Im Kryostaten gibt es zwei Temperatursensoren und für beide kann man einen *Setpoint* oder Sollwert einstellen. Praktisch misst einer die Probentemperatur, der andere sitzt hinten am Kalt-

finger und ist für eine eventuelle Fehlersuche zuständig. Die Geschwindigkeit der Temperaturänderung ist mit einer Ramp Rate einzustellen. Sie hat die Einheit Kelvin pro Minute. Es gibt für die Maschine mehrere ArbeitsModi. Die *Closed Loop PID* und *Zone* sind sehr nützlich. Unter dem *Closed Loop PID* Modus wird die Temperatur mit einem PID-Algorithmus reguliert, wobei PID für proportional, integral und differenzial steht. Die PID-Gleichungen in dem *LakeShore* Regler sind:[9]

$$\text{PID}: \qquad \text{W}(P) = P[e + I\int(e)dt + D\frac{de}{dt}] \tag{4.1}$$

$$\text{PI}: \qquad \text{W}(I) = PI\int(e)dt \tag{4.2}$$

$$\text{PD}: \qquad \text{W}(D) = PD\frac{de}{dt} \tag{4.3}$$

Wobei W die Heizerleistung und e der Fehler ist. Der Fehler wird gegeben: e = Setpoint - Feedback Reading. Eine stabile Temperatur erhält man nur durch Eingabe der richtigen Kombination von PID-Parametern. Aber eine Kombination der PID-Parameter gilt nur für einen bestimmten Temperaturbereich. Für einen anderen Temperaturbereich wird eine andere Kombination gebraucht. Um gute PID-Parameter zu haben, kann man entweder viel probieren, oder mit Hilfe des Autotune-Modus rechnerisch lösen. Unter Autotune-Modus werden PID-Parameter automatisch gesucht und die Temperatur mit gesuchten guten PID-Parametern reguliert. Aber bevor man den Autotune-Modus aktiviert, soll man warten, bis die aktuelle Temperatur von dem *Setpoint* weniger als 5 K abweicht. Sonst würde das Autotune viel länger dauern als die üblichen 5 Minuten und eventuell zu Fehlern führen.
Um den gesamten Temperaturbereich mit guten PID-Parametern zu versorgen gibt es eine Zone-Funktion. Nach der Aktivierung des Autotunes wird das Tune in zehn Stufen ausgeführt und die ausgesuchten PID-Parameter werden gezeigt. Wenn man dieses Autotune für jeden Temperaturbereich wiederholt, erhält man die richtigen PID Parameter für jeden Temperaturbereich. So wird die Suche nach den Parametern erleichtert. Wenn man jetzt

zum Zone-Modus wechselt, wird es noch viel leichter. Man gibt einmal alle Parameter für maximal zehn verschiedene Temperaturbereiche ein. Sie werden ins Gerät gespeichert und bei nächsten Regulieren automatisch geladen. Bei der Programmierung mit *LabView* sind die oben beschriebenen Bedienungen in einem Steuerprogramm zu realisieren.

4.2 Testprogramme

Vorhanden ist ein Hauptprogramm zur Steuerung des gesamten Experiments, in dem einerseits Befehle und Abfragen zu jedem Gerät geschickt werden, andererseits die Signale aufgenommen und grafisch dargestellt werden. Das Hauptprogramm ist mit unzähligen Symbolen und Drähten gefüllt. Hinter vielen Symbolen verstecken sich noch daran verknüpfte Unterprogramme. Obwohl das Ergebnis dieser Arbeit nur ein einziges Symbol im Hauptprogramm ist, müssen ein paar Programme für Tests geschrieben werden, bevor ein geeignetes Programm in das Hauptprogramm integriert werden konnte.

4.2.1 Bedienen

Für die Vorbereitung sind zwei Programme geschrieben worden. Eins wurde „Bedienen“ genannt. Dies wurde genutzt, um den Kryostaten zu testen. Die Logik wird in der Abb. 4.3 gezeigt. Sie bestehen aus vier Teilen: 1. Initialisierung des Kryostaten, 2. Zusendung der Befehle, 3. Darstellung der empfangenen Signale und 4. Speicherung.

Bevor man dieses Programm startet, müssen alle Einstellungen in der Initialisierung zuerst überprüft werden, da die Einstellungen während des Testens selten geändert werden müssen. Sie sind z.B. maximaler Strom für den Heizer, Anzeigeformat des Gerätes, Arbeitsmodus des Kryostaten usw.. Der erste

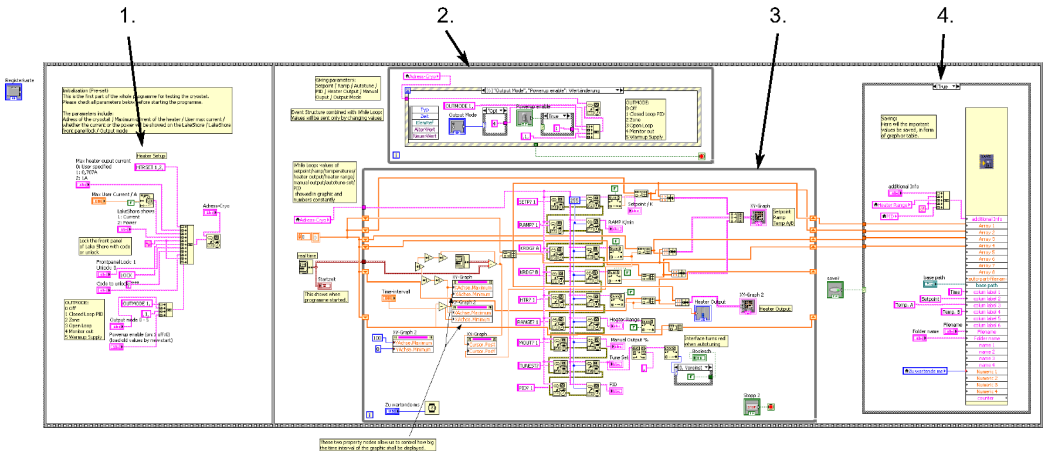

Abbildung 4.3: *Blockdiagramm des Programms „Bedienen“. 1.-Initialisierung des Kryostaten, 2.-Zusendung der Befehle, 3.-Darstellung der empfangenen Signale und 4.-Speicherung*

Teil der Logiken wird von dem Rest mit einer Sequenz geteilt. Eine konsekutive Struktur ermöglicht dies: In der Abb. 4.3 sieht man einen Spalt. Die Logiken werden immer von links nach rechts ausgeführt. Eine solche Sequenz beschränkt die Reihenfolge. Dadurch wird die Logik, die rechts von einem Spalt steht, erst ausgeführt, wenn die linke Seite ohne Fehler durchgeführt worden ist.

Im zweiten Teil, der für die Zusendung der Befehle zuständig ist, wurde eine *Event*-Schleife in eine *While*-Schleife gesetzt. Die *While*-Schleife wiederholt sich mit einer gegebenen Wartezeit von z.B. 200 ms zwischen den Wiederholungen, bis die Stop-Taste betätigt ist. Die *Event*-Schleife führt ihre Logik nur aus, wenn eine bestimmte Bedingung gefüllt ist. In dieser *Event*-Schleife kann man mehrere Logiken mit verschiedenen Bedingungen einfügen. Hier wurde meist eine Werteänderung als die Bedingung ausgesucht, z.B. das Wechseln der Arbeitsmodi, die Eingabe eines neuen *Setpoints* oder einer neuen Ramp Rate. Mit Hilfe der Kombination der beiden Schleifen schafft man die Möglichkeit, im Lauf des Programms zu beliebigen Zeitpunkten den Kryostaten erneut einzustellen.

Der dritte Teil ist für eine Darstellung der empfangenen Signale mit Zahlen

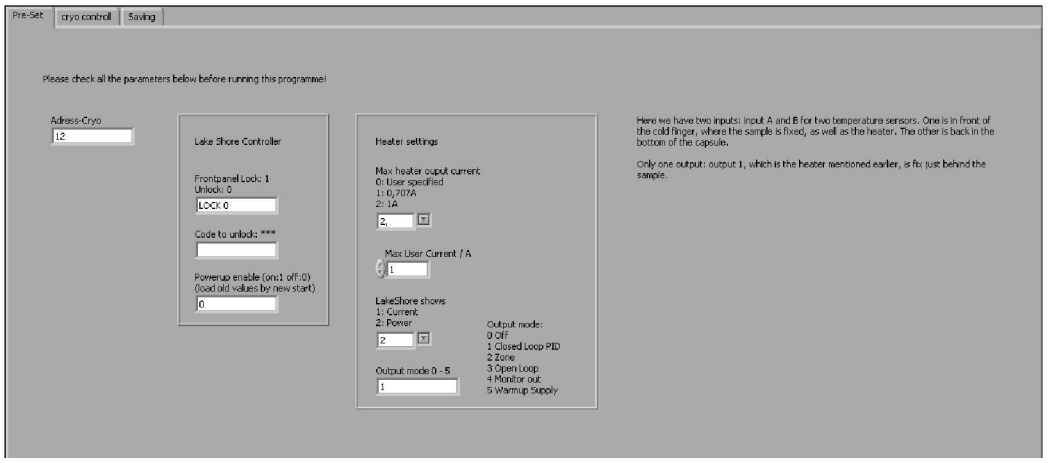

Abbildung 4.4: *Eine Registerkarte des Frontpanels vom Programm „Bedienen“: „Pre-Set“*

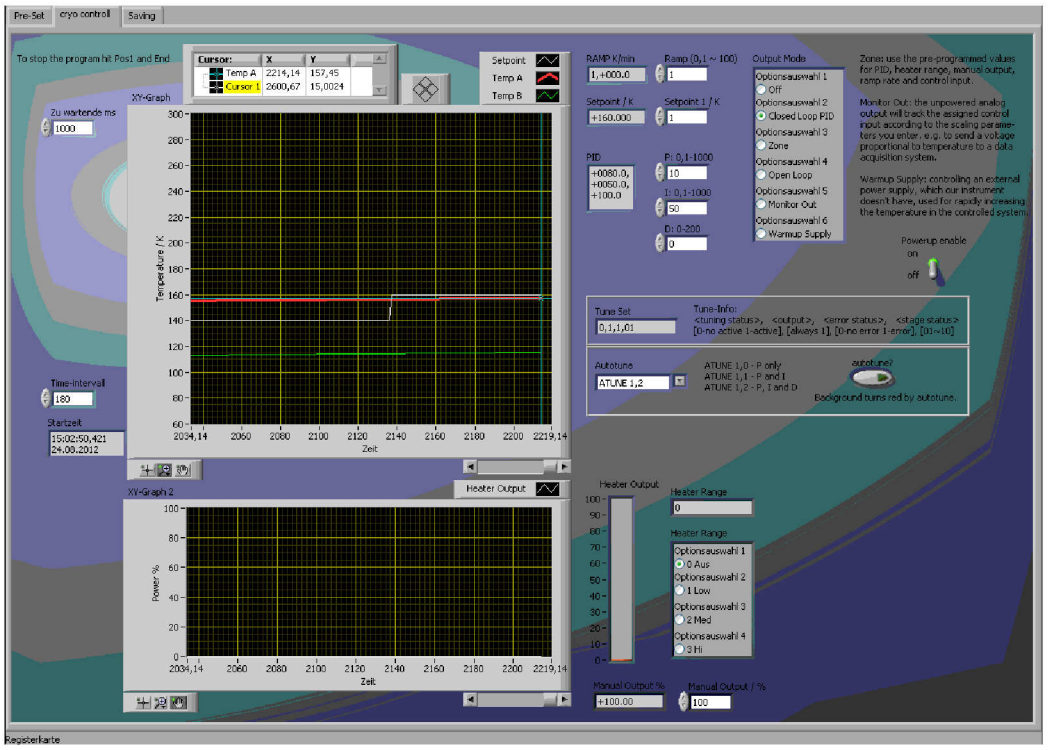

Abbildung 4.5: *Eine Registerkarte des Frontpanels vom Programm „Bedienen“: „cryo control“*

Abbildung 4.6: *Eine Registerkarte des Frontpanels vom Programm „Bedienen“: „Saving“*

und Diagramm zuständig. In der *While*-Schleife sind viele „Schreiben“- und „Lesen“-Symbole zu sehen. Hier werden ständig *Setpoint*, Ramp Rate, aktuell gemessene Temperaturen, Heizleistung usw. abgefragt. Die Antworten werden entweder als Zahlen dargestellt oder in einem Array verarbeitet und als Diagramm dargestellt.
Der vierte Teil dient der Speicherung der Messwerte. In dieser Schleife werden Daten der verbundenen Arrays gespeichert. Die Logik jedes Einzelteils ist im Anhang B zu sehen.

Wegen der Größe des Monitors und um eine ordentliche Ansicht zu haben, wurden die Bedienungselemente in Frontpanel auf drei Registerkarten verteilt: Pre-Set, cryo controll und Saving. In der Abb. 4.4 wird die *Pre-Set* genannte Registerkarte gezeigt. Diese Registerkarte enthält die Initialisierung. Die Abb. 4.5 zeigt die Registerkarte „cryo controll“. Diese Registerkarte enthält den zweiten und dritten Teil der Logik. D.h., dass man während des Bedienens auf dieser Registerkarte die Einstellungen ändert und eine Überwachung des Kryostaten hat. Die Bedienung erfolgt durch Maus-Klick und Eingabe von Zahlen. Beim Autotune-Modus leuchtet der Hintergrund rot. In der Abb. 4.6 wird die als *Saving* genannte Registerkarte gezeigt. Auf dieser Registerkarte kann man die Speicherung aktivieren und deaktivieren. Durch Eingabe eines Pfads und Bestätigung der Speicherung wird eine Datei gespeichert. In dieser Datei befinden sich Messzeit, gemessenen Temperaturen von beiden Sensoren und *Setpoint*. Außerdem kann eine zusätzliche Beschreibung in das Feld „Info“ geschrieben werden und mit in die Datei gespeichert

werden.
Mit diesem Programm wurde der Kryostaten getestet. Nach dem Testen zeigte sich, dass die Temperatur mit den richtigen PID-Parametern innerhalb von 0,005 K stabil gehalten werden kann.

4.2.2 Zone

Ein anderes Programm wurde „Zone“ genannt. Das realisiert die Zone-Funktion. Damit kann man die PID Parameter für jede Zone eingeben, die gegebenen Parameter speichern und die gespeicherten Parameter in den *LakeShore Controller* laden. Im Blockdiagramm dieses Programms wird, wie in den Abb. 4.7, Abb. 4.9 und Abb. 4.10 gezeigt, eben die Kombination der *While*-Schleife und der *Event*-Schleife ausgenutzt. Die drei *Events* realisieren die drei Betätigungen: Parameter Eingabe, Speichern und Laden. Ein Maus-Klick auf eine ok-Taste aktiviert ein *Event*. Und jedes *Event* kann mehrfach aktiviert werden, ohne das ganze „Zone“ Programm erneut zu starten. Je nachdem welche ok-Taste betätigt wird, wird Eingabe, Speichern oder Laden der Parameter ausgeführt.

Die Abb. 4.7 zeigt die Logik des *Events* „send values“. In diesem *Event* werden Parameter für die Zone-Funktion zum *LakeShore* geschickt und die gespeicherten Parameter gezeigt. Wenn die Parameter eingegeben werden, muss die Zone-Nummer auch dazu gegeben werden. Nach dem Drücken auf die ok-Taste werden alle eingegebenen Parameter in einen String gebündelt und als Befehl weggeschickt. Da ein String nur die Parameter von einer Zone enthält, werden zehn Wiederholungen für zehn Zonen gebraucht, um eine komplette Einstellung durchzuführen. Nach jedem Zuschicken der Parameter werden anschließend die komplette Zonen-Tabelle abgefragt und gezeigt, indem zehn Abfragen für zehn Zonen nacheinander zugeschickt werden und die Antworten gezeigt werden. Da ein String von einer Antwort mehrere Parameter enthält, muss der String geteilt werden, um die Parameter in verschiedenen Feldern unter entsprechenden Überschriften zeigen zu können. Nur so weiß

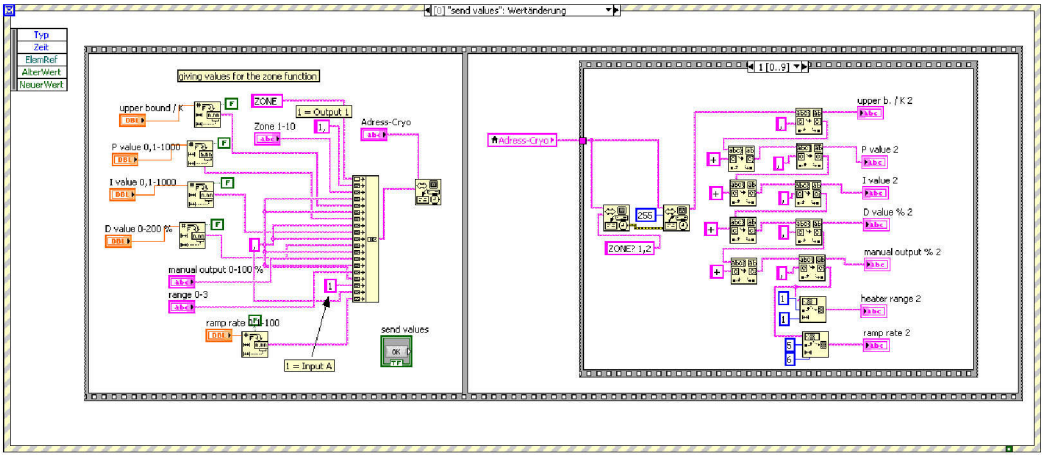

Abbildung 4.7: *Ein Teil des Blockdiagramms vom Programm „Zone“ : Parametereingabe*

man, wofür die Werte in einem String stehen.
Die Anordnung der Felder und Taste auf der Registerkarte „Setting zone“ im Frontpanel sieht man in der Abb. 4.8. Beim Bedienen im Frontpanel werden die Zone-Nummer und Zone-Parameter einschließlich der PID-Parameter in den links stehenden weißen Feldern eingegeben. Per Maus-Klick auf die ok-Taste werden die Parameter zugeschickt. Anschließend werden Parameter aller Zonen abgefragt und in den rechts stehenden grauen Feldern unter Überschriften gezeigt. Durch die Abfrage kann man überprüfen, ob die Parameter in dem *LakeShore* gespeichert wurden.

Es besteht die Gefahr, dass die in den *LakeShore* gespeicherten guten Parameter eines Tages verloren gehen. Um sicher zu gehen, kann man ein Backup gebrauchen. Das heißt, die in den *LakeShore* gespeicherten Parameter sollen auch auf die Festplatte gespeichert werden. So können die Parameter, die nicht mehr im *LakeShore* stehen, erneut von der Festplatte geladen werden. In den Abb. 4.9 und Abb. 4.10 werden Logiken gezeigt. Unter den *Events* „SAVE ZONE VALUES“ und „LOAD ZONE VALUES“ werden *For*-Schleifen ausgenutzt. Sie wiederholen sich nur so oft, wie man vorher anzahlmäßig festgelegt hat. Bei dem Speichern werden zehn Abfragen für zehn Zonen zuge-

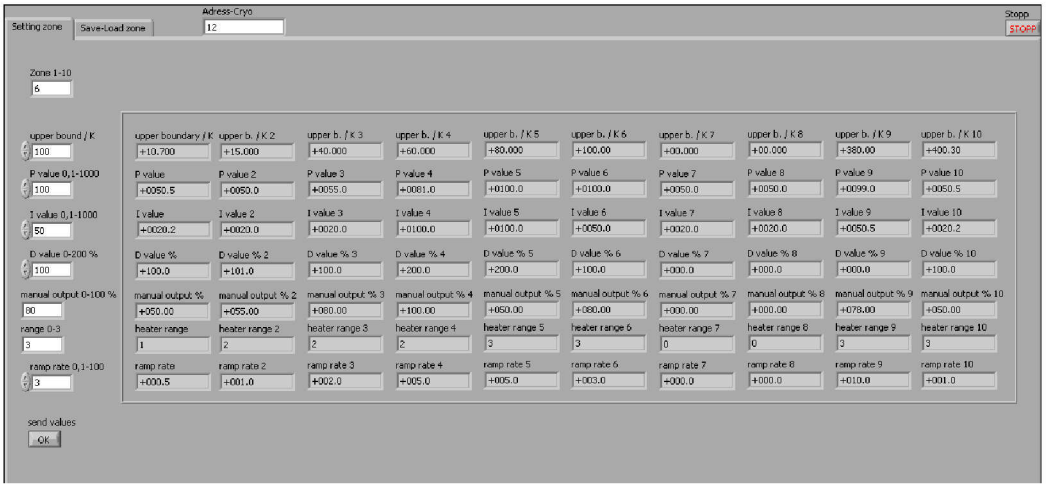

Abbildung 4.8: *Eine Registerkarte im Frontpanel des Programms „Zone“: Parametereingabe*

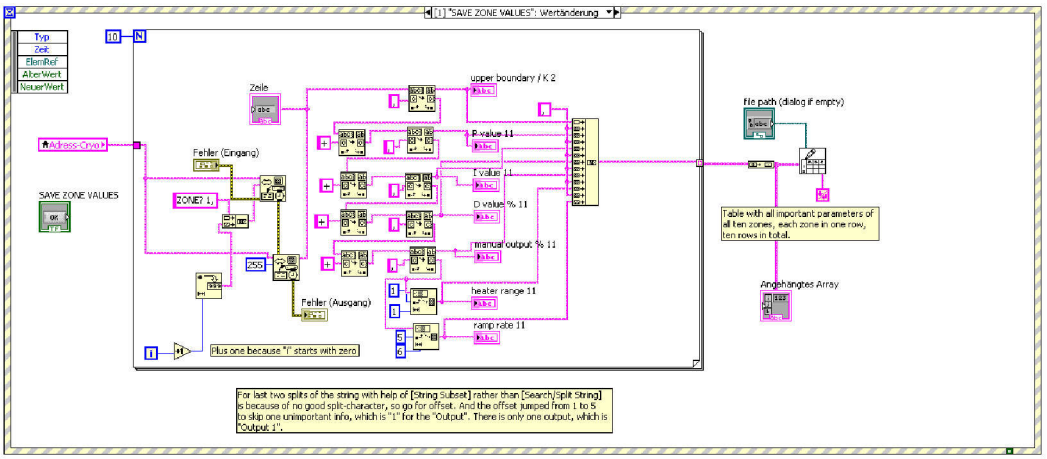

Abbildung 4.9: *Ein Teil des Blockdiagramms vom Programm „Zone“: Parameter Speichern*

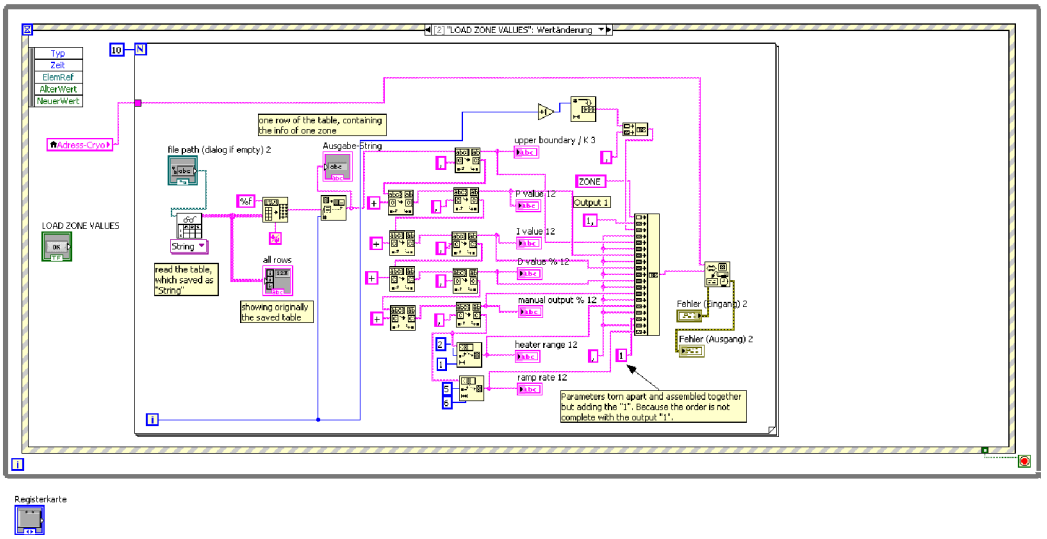

Abbildung 4.10: *Ein Teil des Blockdiagramms vom Programm „Zone“: Parameter Laden*

schickt und zehn Antworten gegeben. Die erhaltenen zehn Strings(Antworten) werden gebündelt und in eine Tabelle mit zehn Zeilen gespeichert. Wie beim Speichern gibt es beim Laden eben zehn Wiederholungen. Aber in jeder Wiederholung wird eine Zeile von einer Tabelle gelesen und nach Bearbeitung zum *LakeShore* geschickt. So wird das *LakeShore* mit guten PID-Parametern ausgestattet. Auch hier aktiviert man per Maus-Klick auf eine ok-Taste das Speichern oder das Laden. Falls es beim Laden mehrere Tabellen gibt, gibt man den Pfad der gewünschten Tabelle ein. In der Abb. 4.11 wird die Registerkarte „Save-Load zone“ des Frontpanels gezeigt. Die Bedienungselemente für das Speichern und Laden der Parameter sind von oben nach unten verteilt. Durch Betätigen einer ok-Taste werden die Parameter entweder gespeichert oder geladen. In den rechts stehenden grauen Feldern kann man überprüfen, was gespeichert oder geladen wurde.

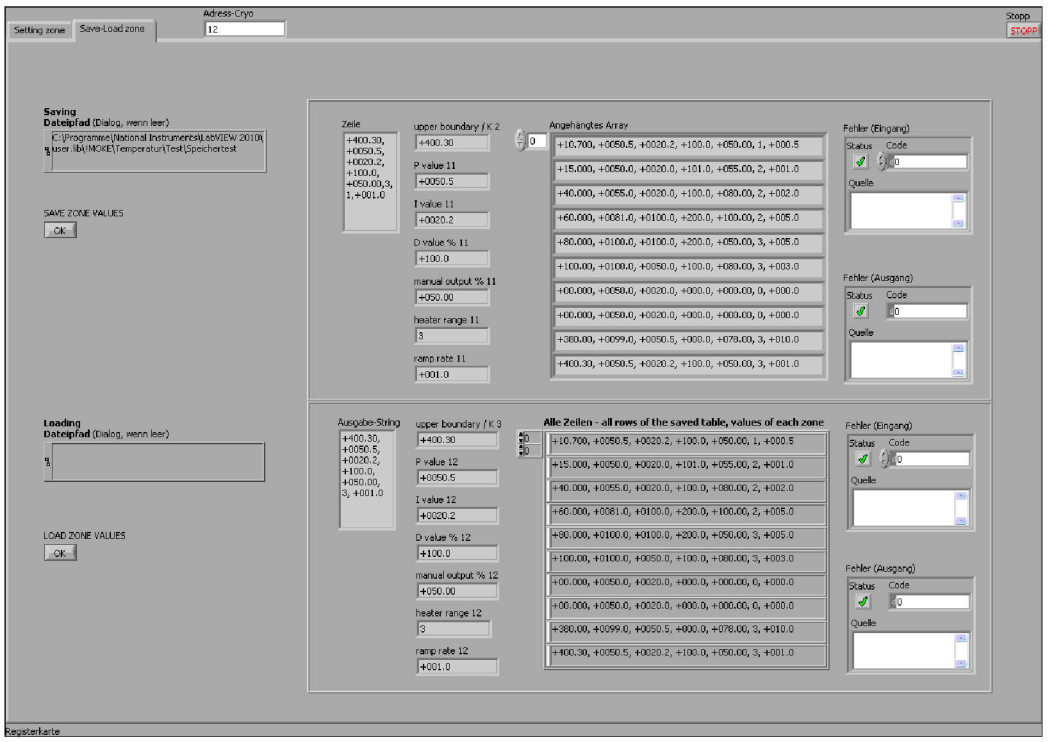

Abbildung 4.11: *Eine Registerkarte im Frontpanel des Programms „Zone“: Parameter Speichern und Laden*

4.3 Schnittstelle zu Hauptprogramm

Wie erwähnt, wurde diese Arbeit ins Hauptprogramm integriert. Das Hauptprogramm besteht, wie in der Abb. 4.12 gezeigt, aus hauptsächlich vier Teilen: A-Initialisieren, B-Temperatureingabe/-stabilisieren, C-Messen und D-Speichern. Außerdem gibt es zwei kleine Blöcke für das Warten und Zurücksetzen der Geräte. Zuerst werden im Teil A die messungsrelevanten Parameter abgefragt, wie z.B. Feldbereich, Temperaturbereich usw.. Gleichzeitig werden die Geräte initialisiert, wie z.B. das *LakeShore* in den Zone-Modus zu setzen und die Zonen-Tabelle zu laden. Dann wartet das Programm kurz und führt im Teil B die Temperatureingabe/-stabilisierung aus. Anschließend werden im Teil C die eigentlichen Messungen der Hysteresekurven ausgeführt. Zum Schluss werden im Teil C die Daten der Messungen gespeichert und die Geräte zurückgesetzt.

Da diese Arbeit sich mit dem Kryostaten beschäftigt, wird sie in den Teil B-Temperatureingabe/-stabilisierung eingebunden. Nach dem Vorarbeiten mit dem Programm „Bedienen“, mit dem die guten PID-Parameter für das Programm „Zone“ gefunden werden und der Abspeicherung der Zonentabelle im *LakeShore*, ist man nun für die eigentliche Temperatursteuerung bereit. An der Schnittstelle müssen nur noch der *Setpoint* eingestellt und die Temperatur zurückgelesen werden. Die Schnittstelle wird in der Abb. 4.13 genau beschrieben.

Auf der linken Seite der Schnittstelle wird ein Programm „temp-control“ für die Eingabe des Temperatursollwertes als Unterprogramm gezeigt. Sein Blockdiagramm und Frontpanel werden jeweils in der Abb. 4.14 und Abb. 4.15 gezeigt. Wie im Blockdiagramm gezeigt wird der gegebene Wert von einer Zahl in einen String umgewandelt und zusammen mit dem Befehl weggeschickt.

Um das Zurücklesen der aktuellen Temperatur zu ermöglichen, wurde das Programm „Temp_A_read“ geschrieben. In dem vorherigen Abschnitt 4.1 wurde dieses Programm als Beispiel geklärt. Die Logik befindet man in der Abb. 4.1. Um die Temperatur zu stabilisieren, muss kein neues Programm

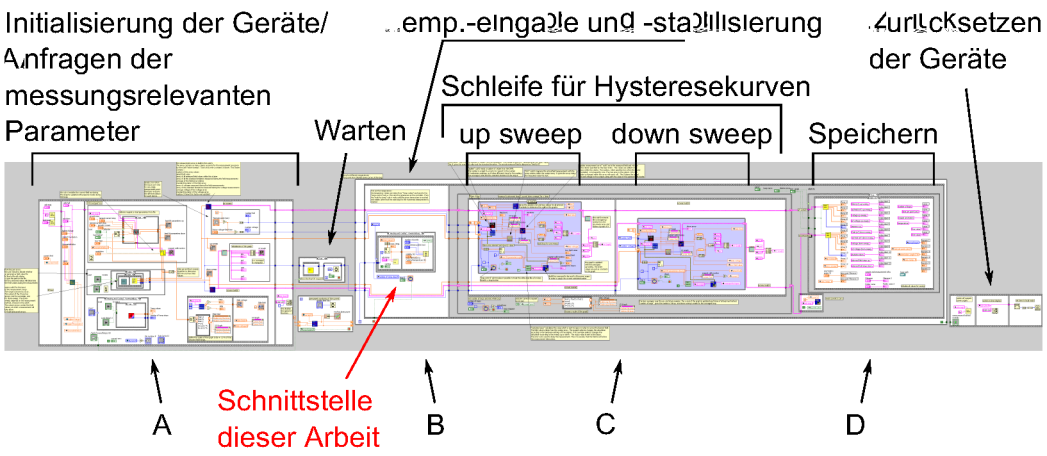

Abbildung 4.12: *Blockdiagramm des Hauptprogramms. Die Logik enthält vier Hauptteilen: A-Initialisieren, B-Temperatureingabe/-stabilisieren, C-Messen und D-Speichern und zwei Blöckchen: Warten und Zurücksetzen der Geräte*

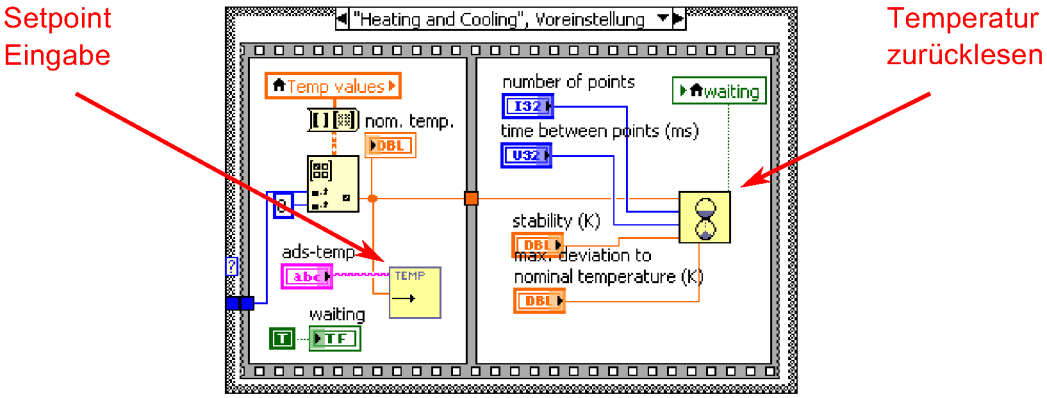

Abbildung 4.13: *ausgeschnitten aus dem Blockdiagramm vom Hauptprogramm: Temperatureingabe/-stabilisierung. Mit roten Pfeilen werden Symbole markiert, mit denen die Unterprogramme verknüpft sind*

geschrieben werden, weil das *LakeShore* die Temperatur selbst reguliert. Das Hauptprogramm gibt eine Ansage, wenn die Temperaturschwankungen innerhalb der Toleranz sind. Der Algorithmus für die Auswertung der Temperaturschwankungen ist schon vorhanden.

Sobald die Temperatur stabil ist, kann man mit den eigentlichen Messungen anfangen. Die Messwerte werden direkt auf dem Frontpanel des Hauptprogramms in einem Diagramm gezeigt. die Bedienungsoberfläche des Hauptprogramms wird in der Abb. 4.16 gezeigt.

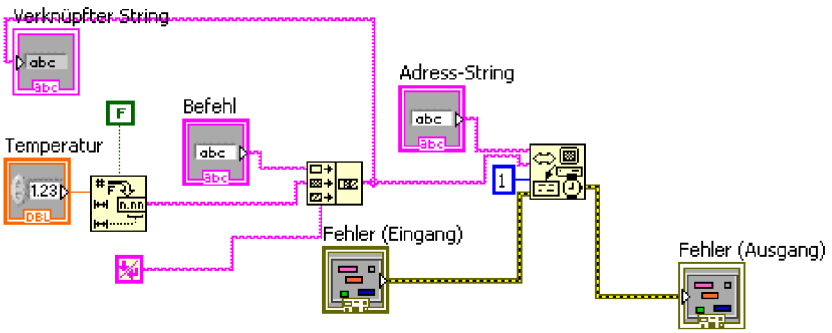

Abbildung 4.14: *Blockdiagramm des Programms „temp-control“*

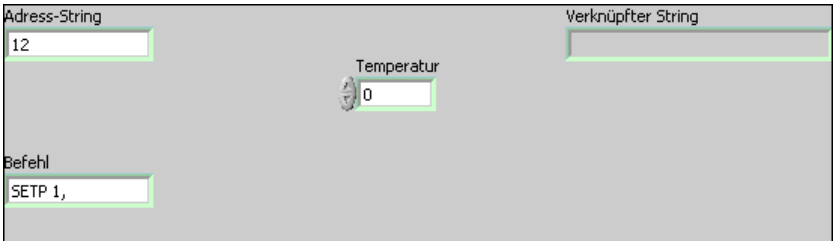

Abbildung 4.15: *Frontpanel des Programms „temp-control“*

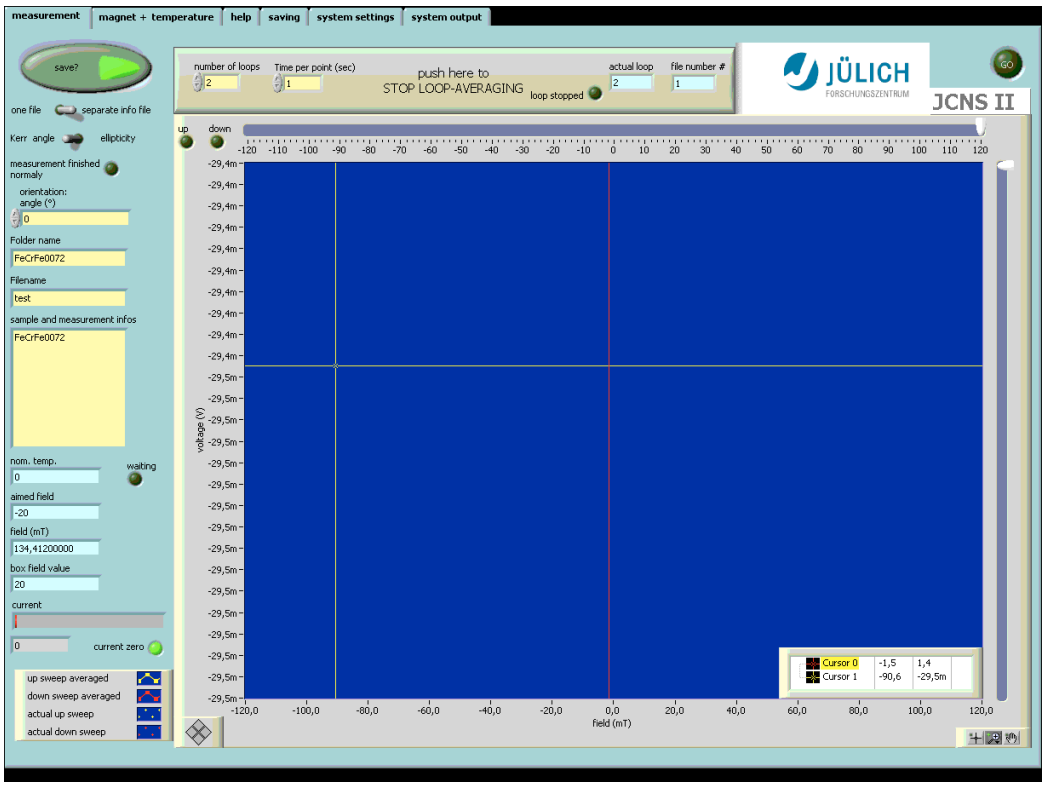

Abbildung 4.16: *Eine Registerkarte im Frontpanel des Hauptprogramms: „measurement“*

4.4 Zusammenfassung

Die konstruierten Bauteile des Manipulators wurden herstellt und aufgebaut. Zum Test wurde der Kryostat auf den Manipulator montiert. Es wurde gezeigt, dass der Manipulator die erwarteten Freiheitsgrade hat. Trotzdem war der Manipulator so nicht sofort einsatzbereit. Einerseits lag der Kaltfinger zu tief zu der Bohrung des Magneten, andererseits kam die Probe nicht in die Mitte des Magnetfeldes. Um den Kaltfinger bis auf die Mitte der Bohrung zu erhöhen, wurden drei Aluminiumblöcke unter den Manipulator gesetzt. Außerdem waren die zwei vorderen Stangen(*Support Legs*) etwas zu weit vorn montiert und somit war der Fahrweg des Manipulators durch den Anschlag der Stangen an dem Magneten eingeschränkt. Ein Versatz der beiden Stangen um wenige cm nach hinten hat dieses Problem gelöst. Damit kann nun die Probe weiter nach vorn geschoben werden und kommt so in der Mitte des Magnetfeldes Zum Liegen. So ist nun ein einfacher Probenwechsel gewährt und der Kryostat kann leicht an den Strahlengang justiert werden.

Zur Vorbereitung des Kryostaten wurden zuerst Programme „Bedienen“ und „Zone“ geschrieben. Mit Hilfe des Programms „Bedienen“ wurde erfolgreich erzielt, den Kryostaten in Betrieb zu nehmen und zu testen. Dadurch kann man gute PID-Parameter sammeln und damit die Temperatur sehr genau regulieren. Das andere Programm „Zone“ erleichtert die Eingabe, das Speichern und das Laden der PID-Parameter, indem man die PID-Parameter in Tabellen direkt bearbeiten kann. Nach diesen Vorbereitungen wurden zwei sehr kleine Programme „temp-control“ und „Temp_A_read“ als Schnittstelle zu dem Hauptprogramm geschrieben. Somit ist die Bedienung des Kryostaten innerhalb des Hauptprogramms realisiert. Der Benutzer des Hauptprogramms muss lediglich den gewünschten Temperaturbereich vorgeben.

Zusammenfassend wurde in dieser Arbeit der Kryostat einerseits mechanisch in das Experiment integriert, was nun eine einfache Justage und einen einfachen Probenwechsel ermöglicht. Zudem wurde auch die Steuerung des Kryostaten in das Messprogramm integriert und ist nun ohne genaues Wissen um

die Programmierung einfach zu bedienen. Damit ist der Kryostat nun voll einsatzbereit.

Anhang A

Konstruktionszeichnungen

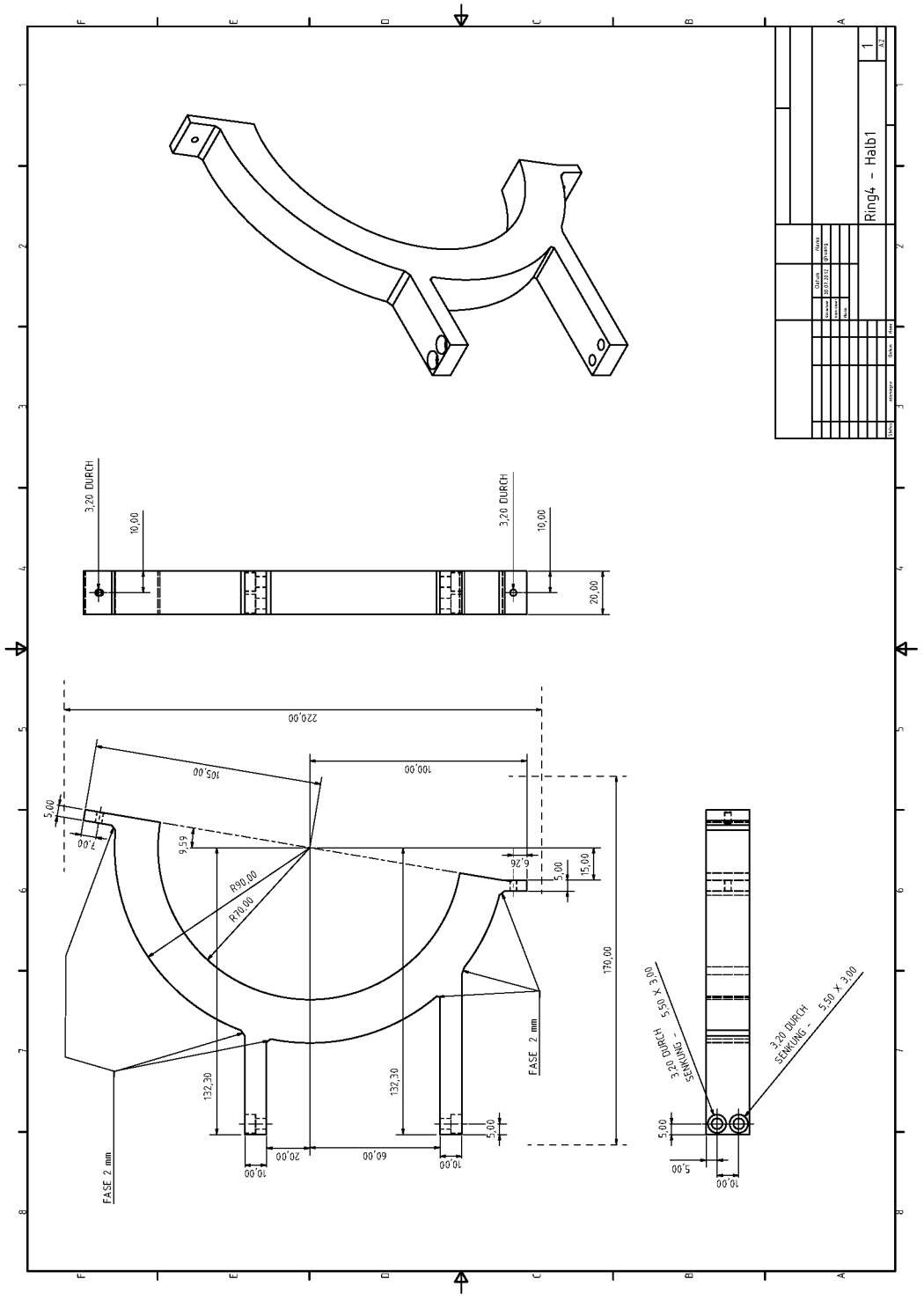

Abbildung A.1: *Technische Zeichnung eines Bauteils - Hälfte des oberen Rings-1*

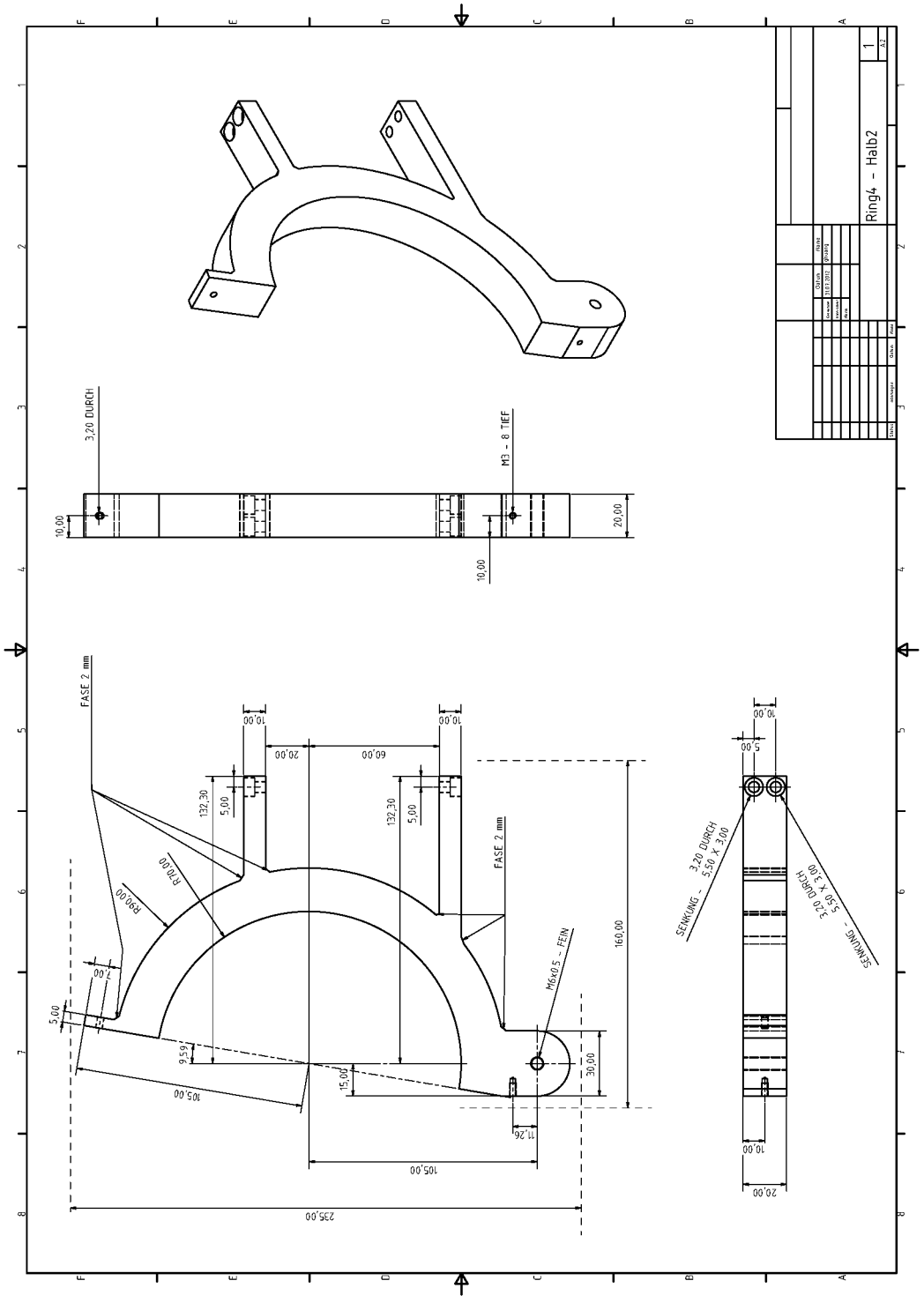

Abbildung A.2: *Technische Zeichnung eines Bauteils - Hälfte des oberen Rings-2*

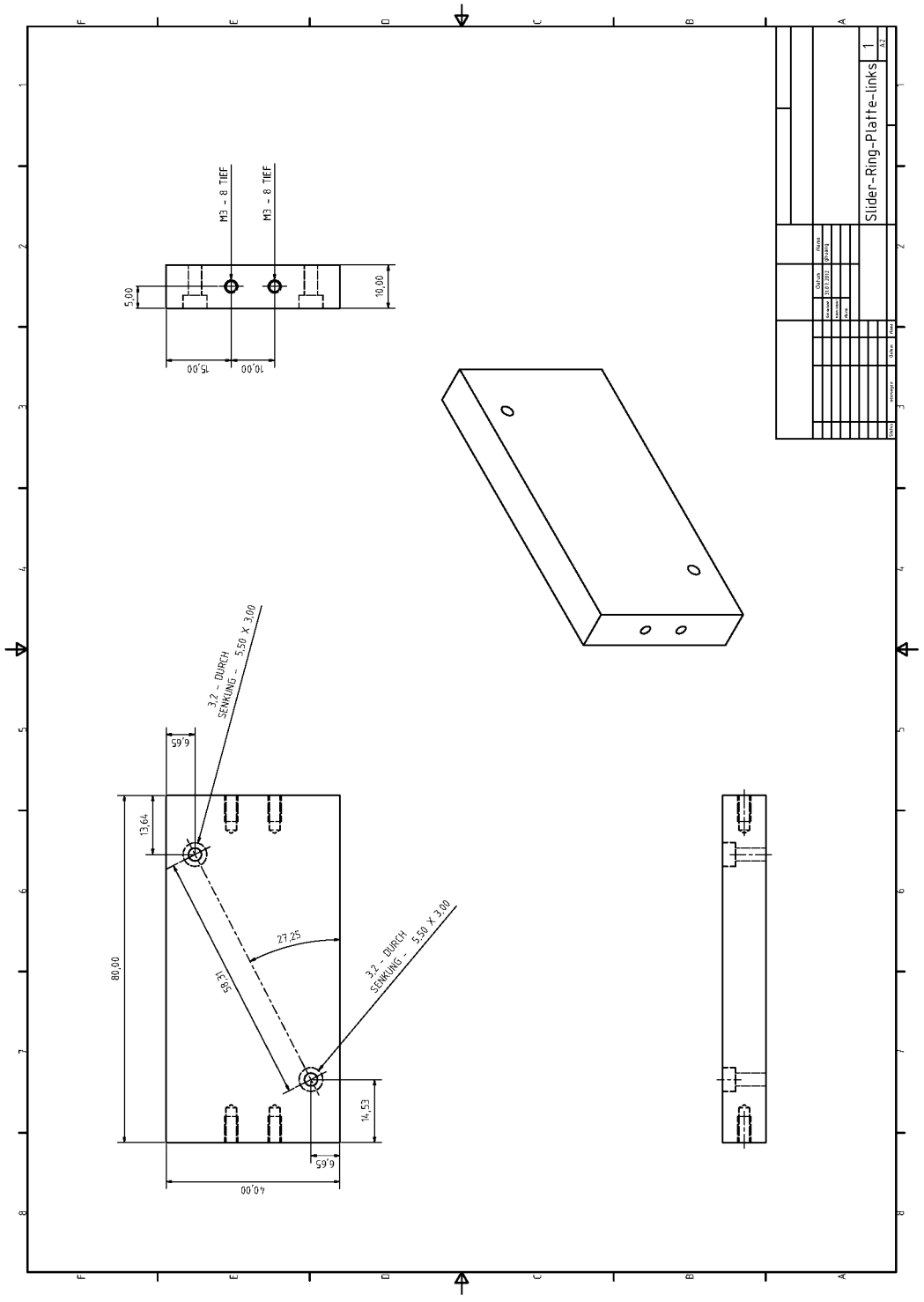

Abbildung A.3: *Technische Zeichnung der Verbindungsplatte: Sie verbindet den oberen Ring und die Gleitwagen auf der Bogenschienen, sodass sich der Kryostat entlang der Bogenschienen bewegen kann. Die zweite Platte auf der gegenüberliegenden Seite ist spiegelverkehrt zu der gezeigten Platte*

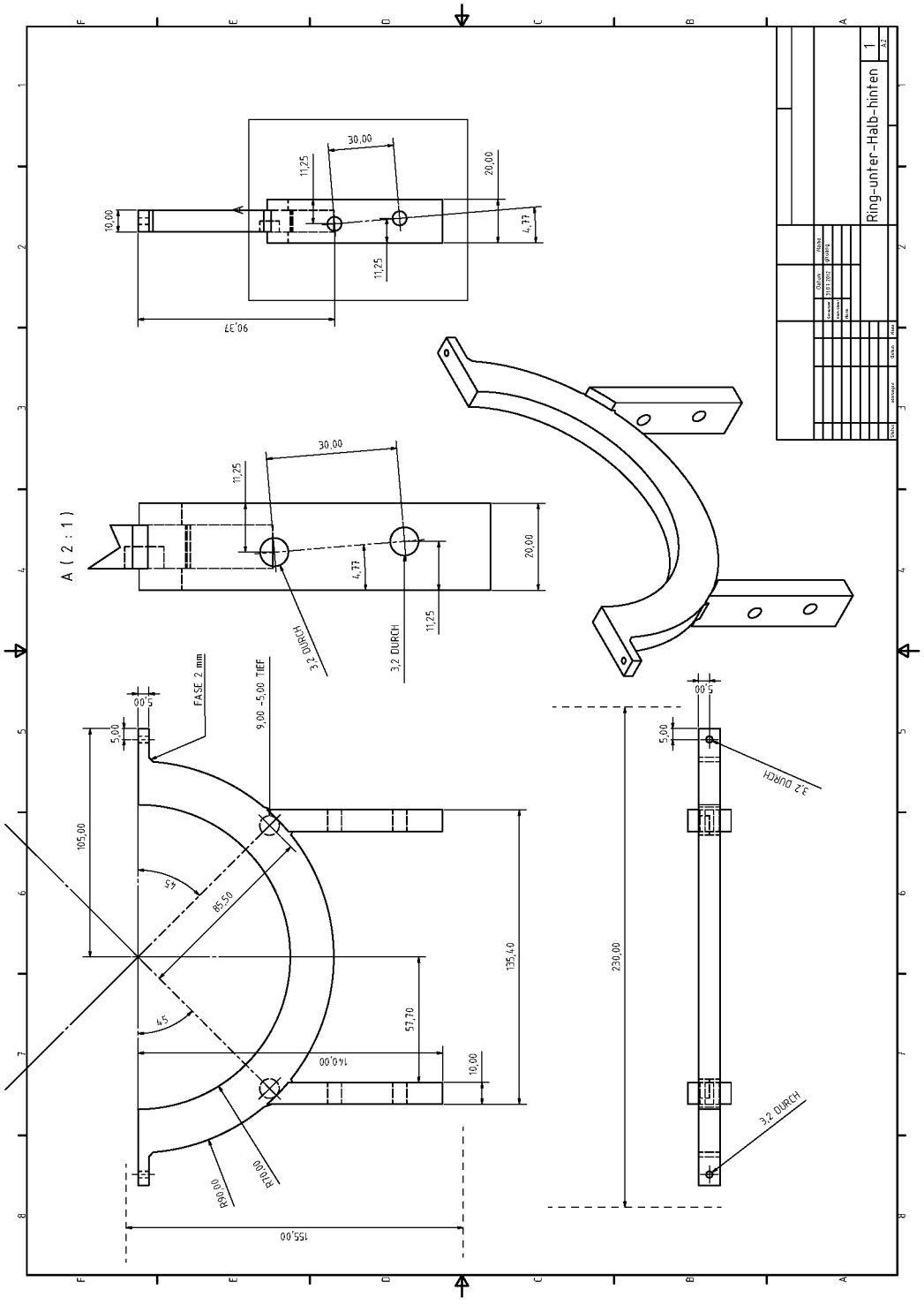

Abbildung A.4: *Technische Zeichnung der hinteren Hälfte des unteren Rings*

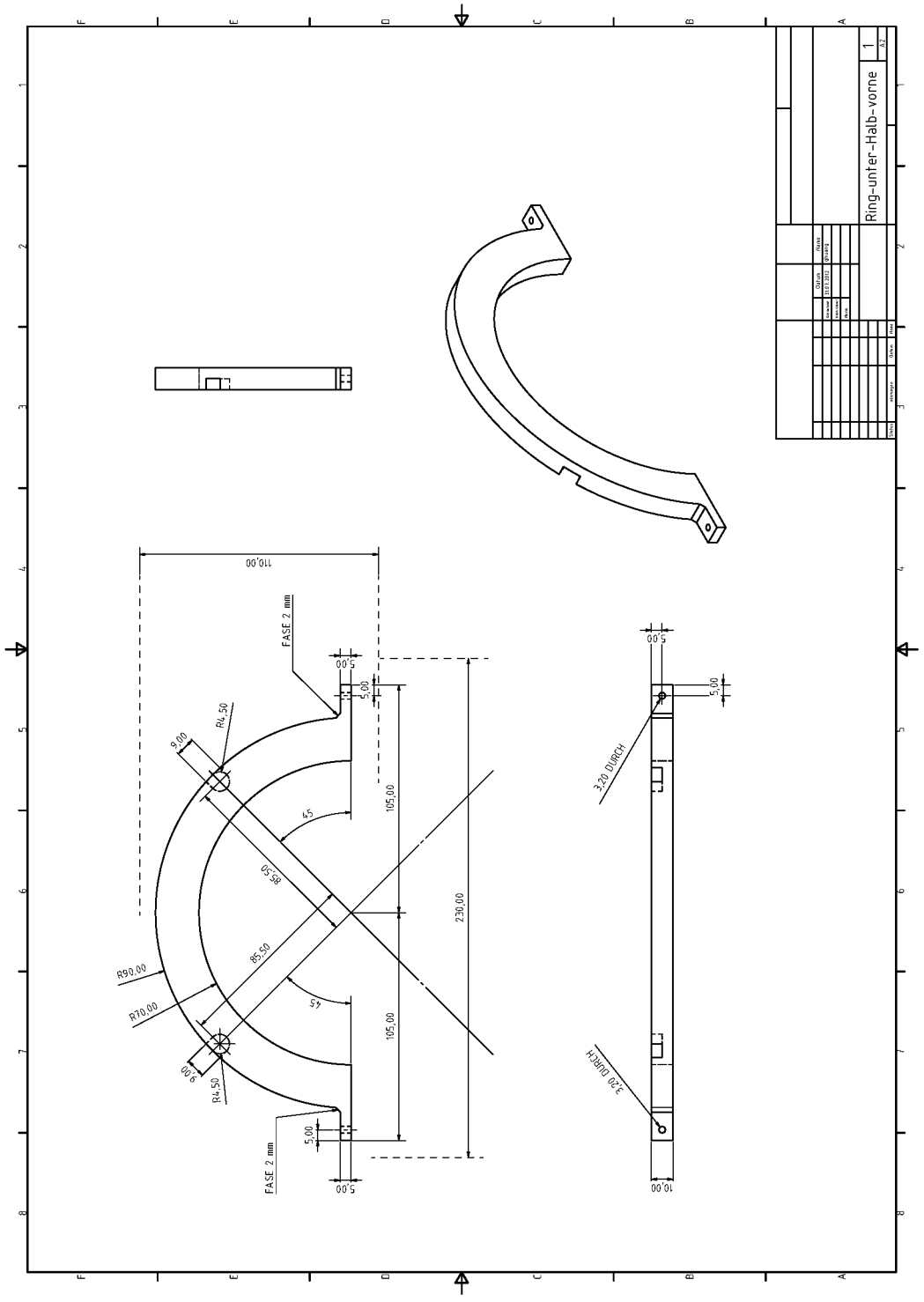

Abbildung A.5: *Technische Zeichnung der vorderen Hälfte des unteren Rings*

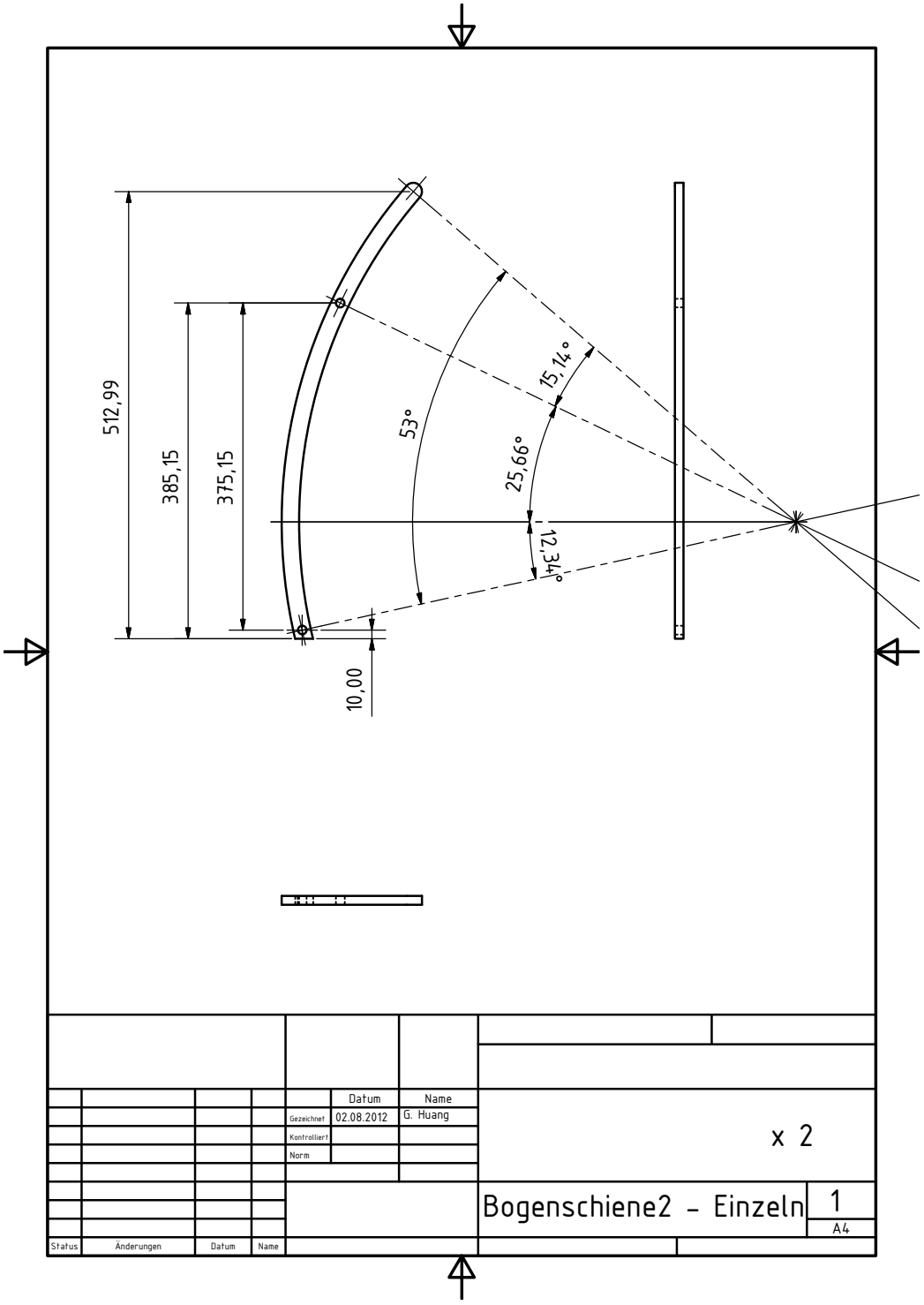

Abbildung A.6: *Technische Zeichnung der Bogenschiene*

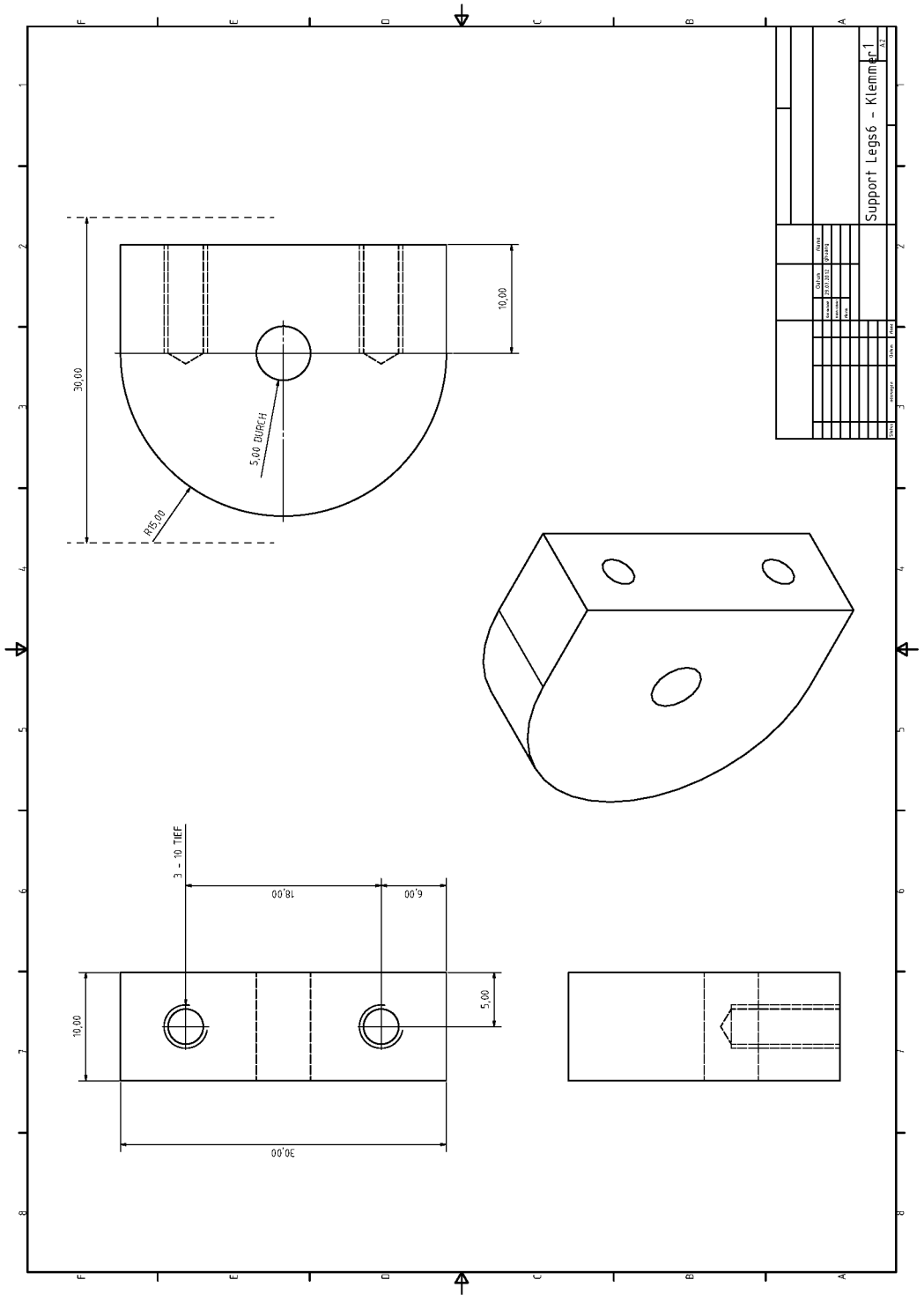

Abbildung A.7: *Technische Zeichnung der Bogenschienenhalter: Acht Stück halten die zwei Bogenschienen durch Schrauben und Muttern fest*

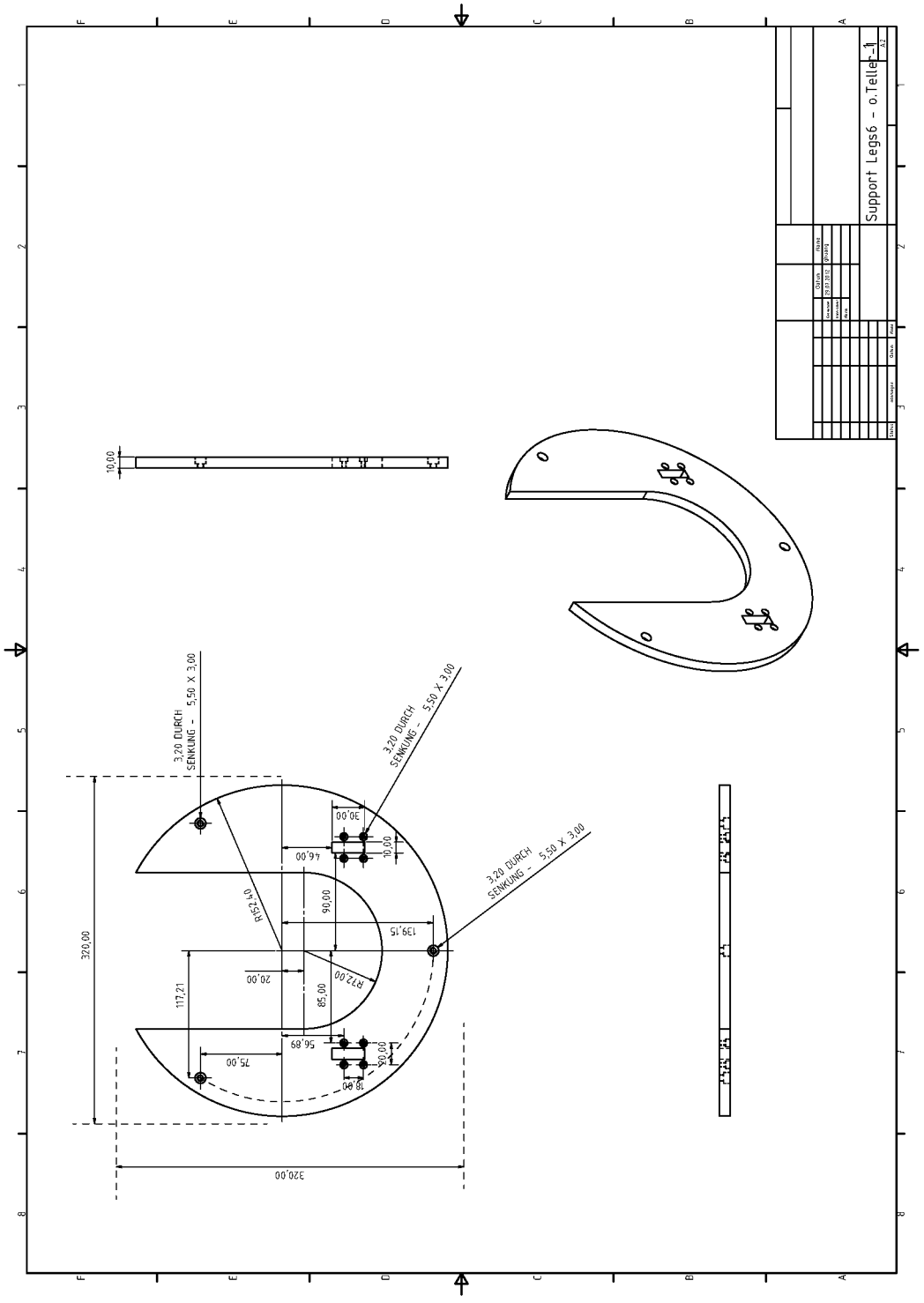

Abbildung A.8: *Technische Zeichnung der oberen Platte der Support Legs: Die Bogenschienen gehen durch die Löcher in der Platte. Die Bogenschienenhalter werden auf der Platte montiert. Eine Schraube geht durch die Bohrungen in den Bogenschienen und in zwei der Bogenschienenhalter. Dadurch wird die Bogenschiene von oben fixiert*

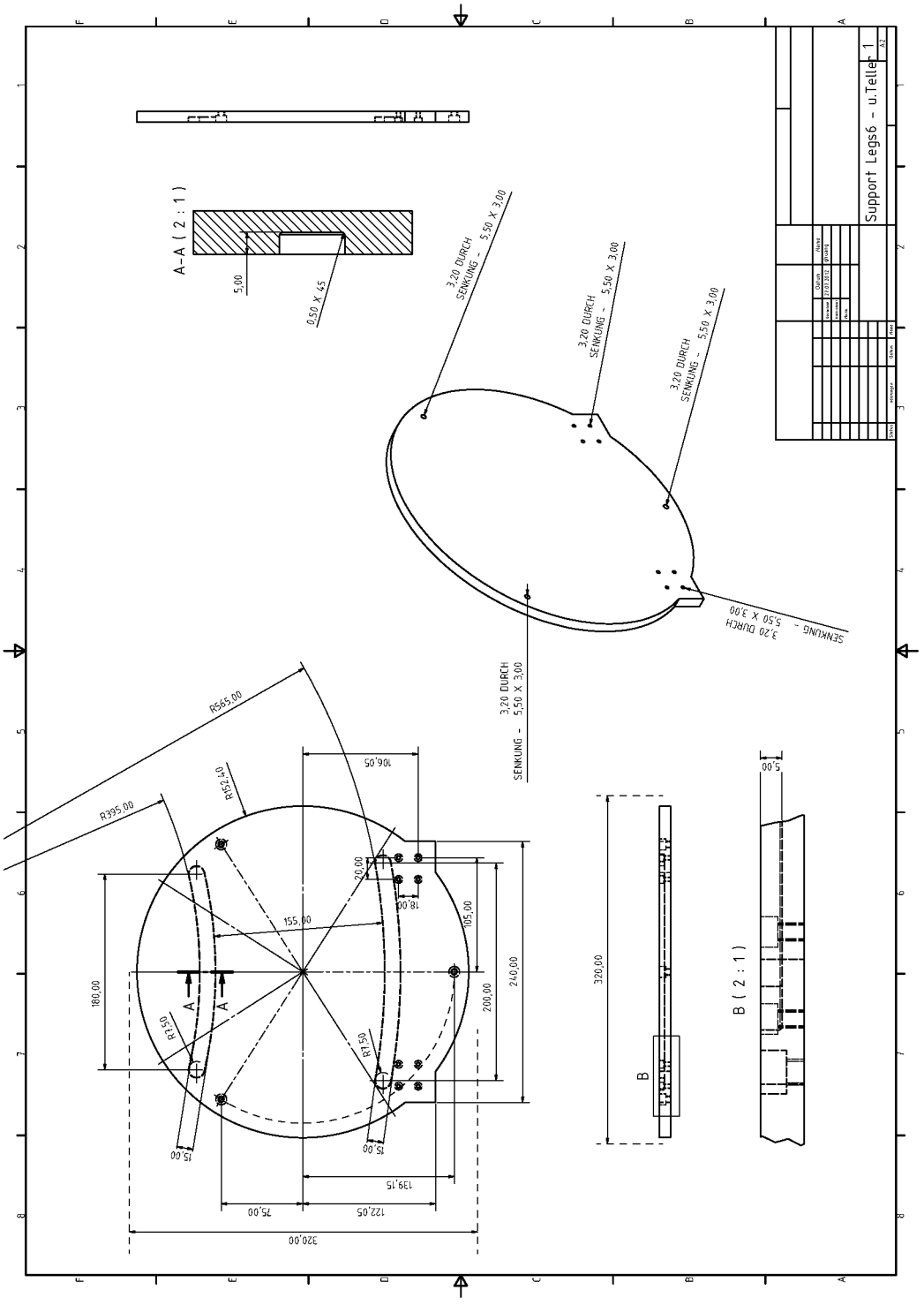

Abbildung A.9: *Technische Zeichnung der unteren Platte der Support Legs: Vier Bogenschienenhalter werden darauf montiert und halten die Bogenschienen von unten fest. Diese Platte dreht sich. Der Drehungsmittelpunkt liegt auf der Probe.*

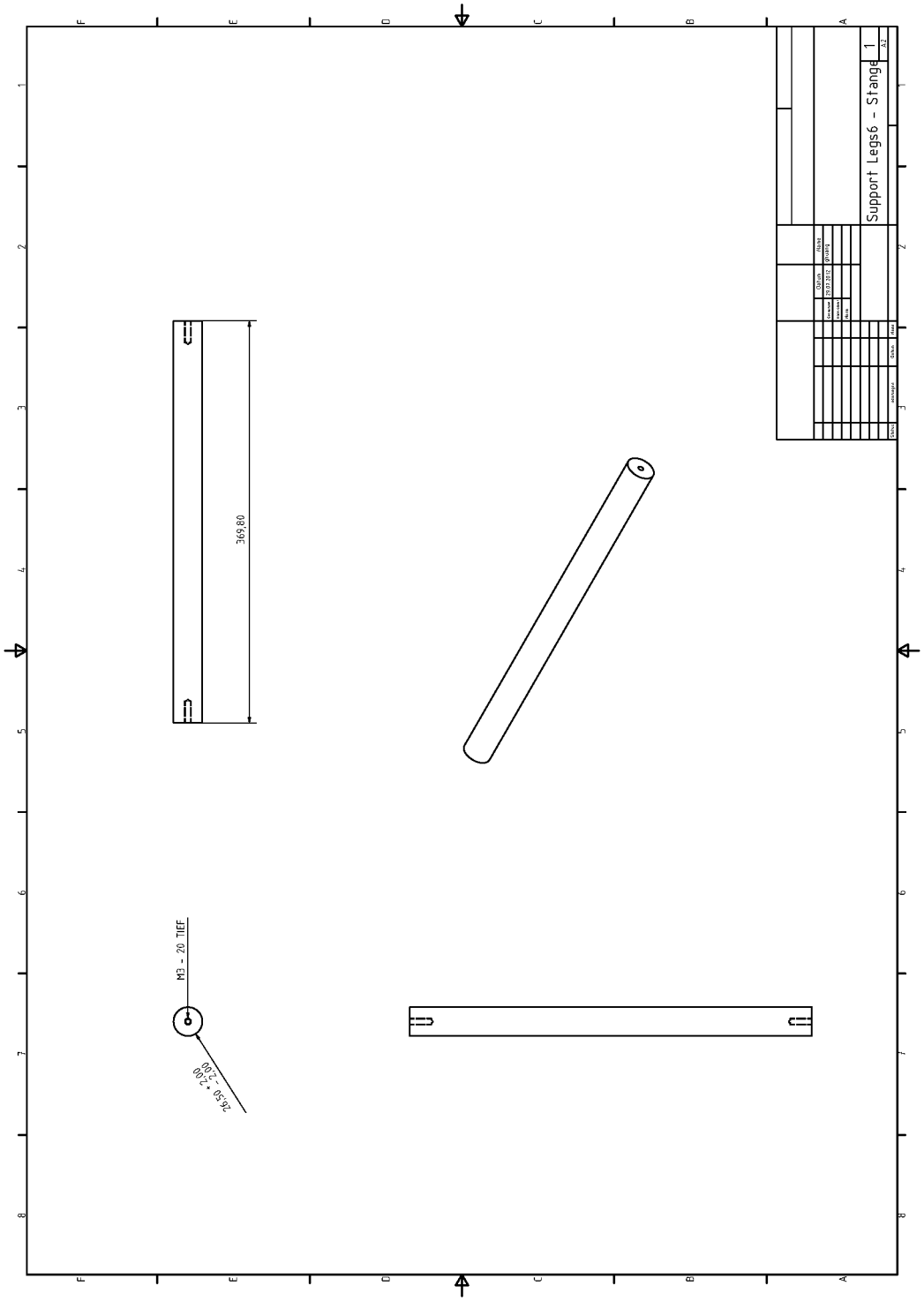

Abbildung A.10: *Technische Zeichnung der Stangen oder Support Legs: Drei von diesen halten die obere Platte*

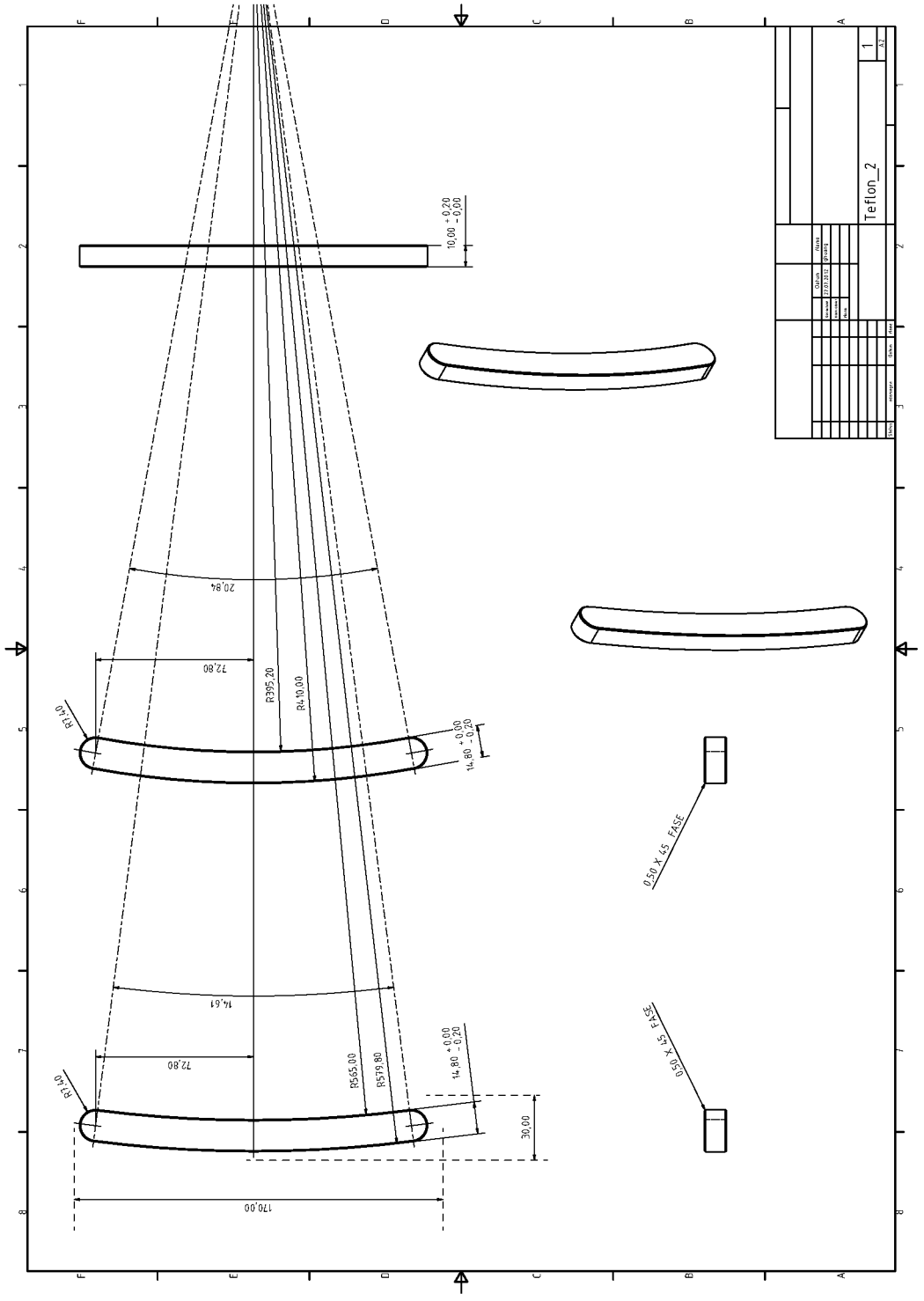

Abbildung A.11: *Technische Zeichnung der gebogenen Gleitstücke aus Teflon*

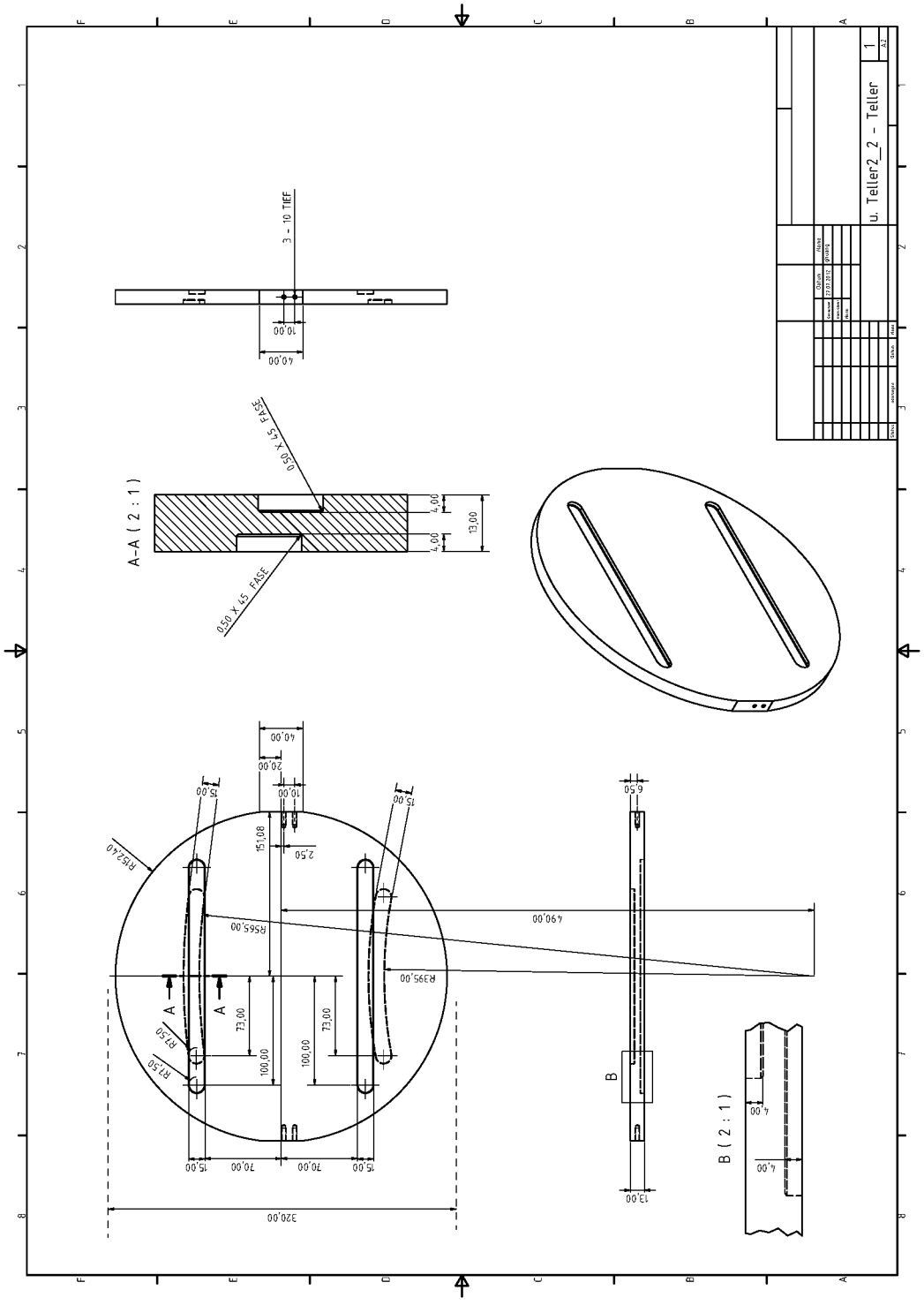

Abbildung A.12: *Technische Zeichnung der mittleren Platte: Diese wird auf die untere Platte gelegt, sodass sie sich nach links und rechts bewegen kann.*

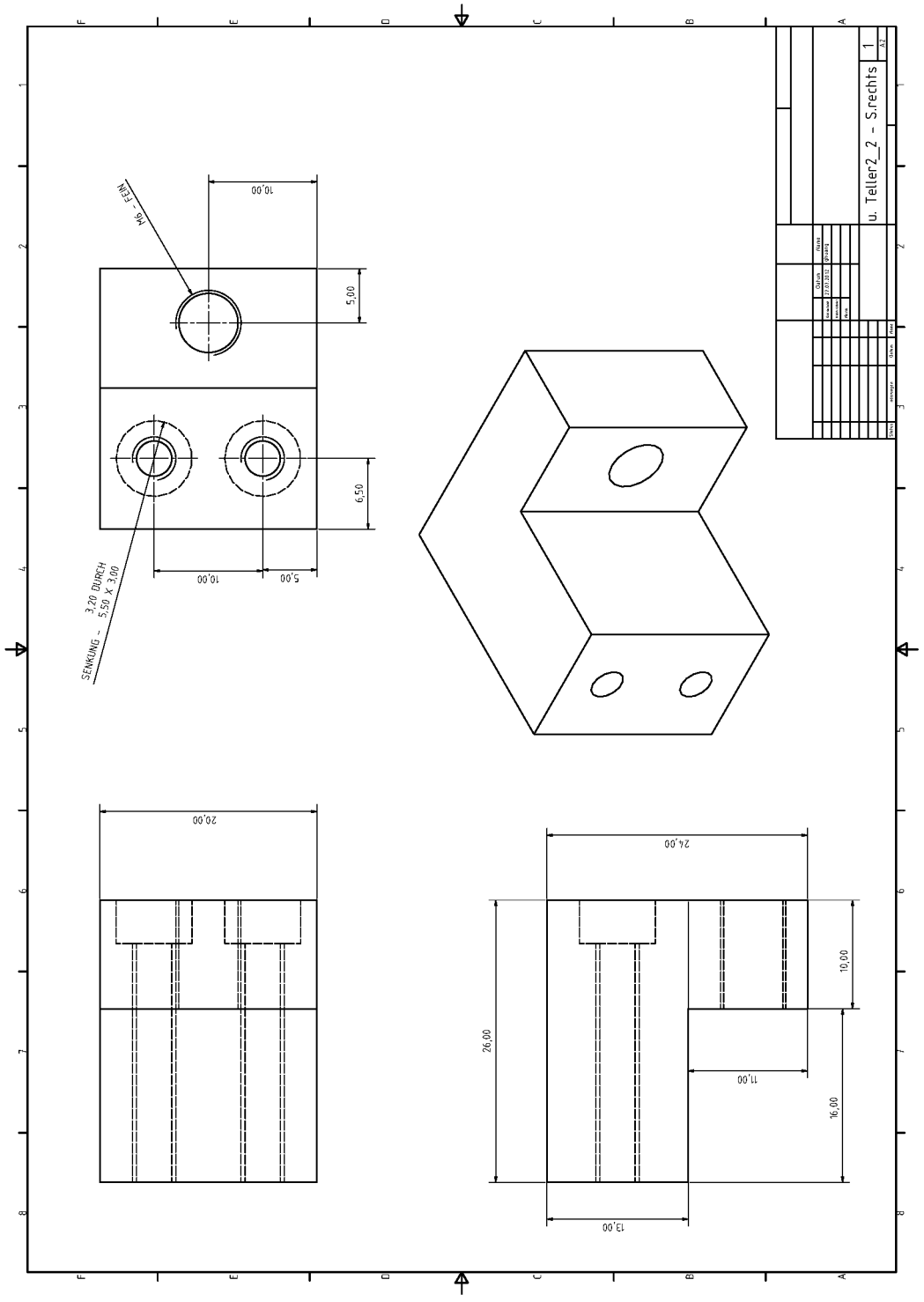

Abbildung A.13: *Technische Zeichnung des oberen Verstellers: Zwei Stück von dem werden auf Seite der mittleren Platte montiert. Eine Schraube mit Feingewinde bewegt sich in der größeren Bohrung des Verstellers, sodass die Platte darauf verstellt werden kann.*

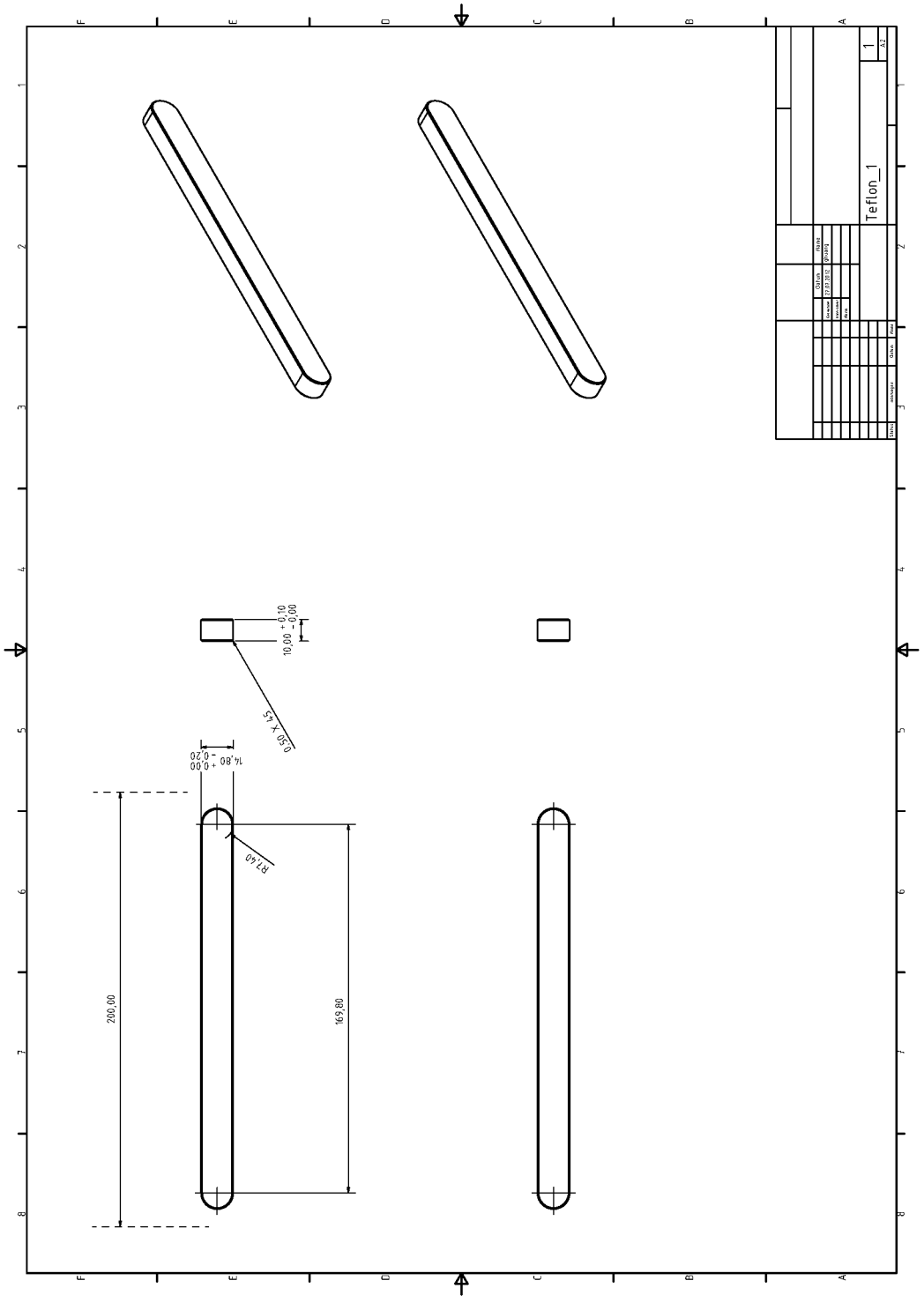

Abbildung A.14: *Technische Zeichnung der geraden Gleitstücke aus Teflon*

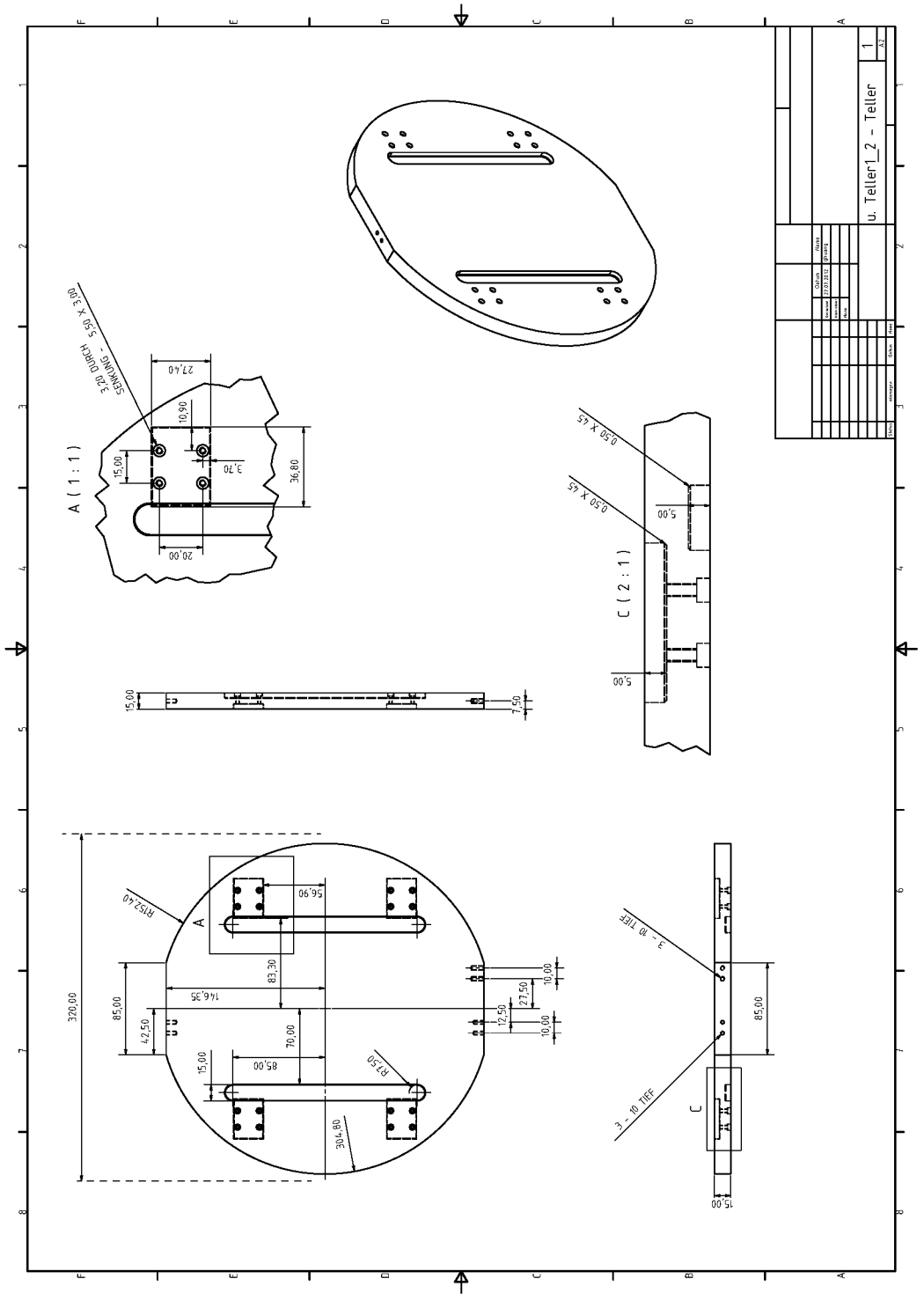

Abbildung A.15: *Technische Zeichnung der unteren Platte: Diese wird auf die Gleitwagen der geraden Schienen montiert, sodass sie sich vor und zurück bewegen kann*

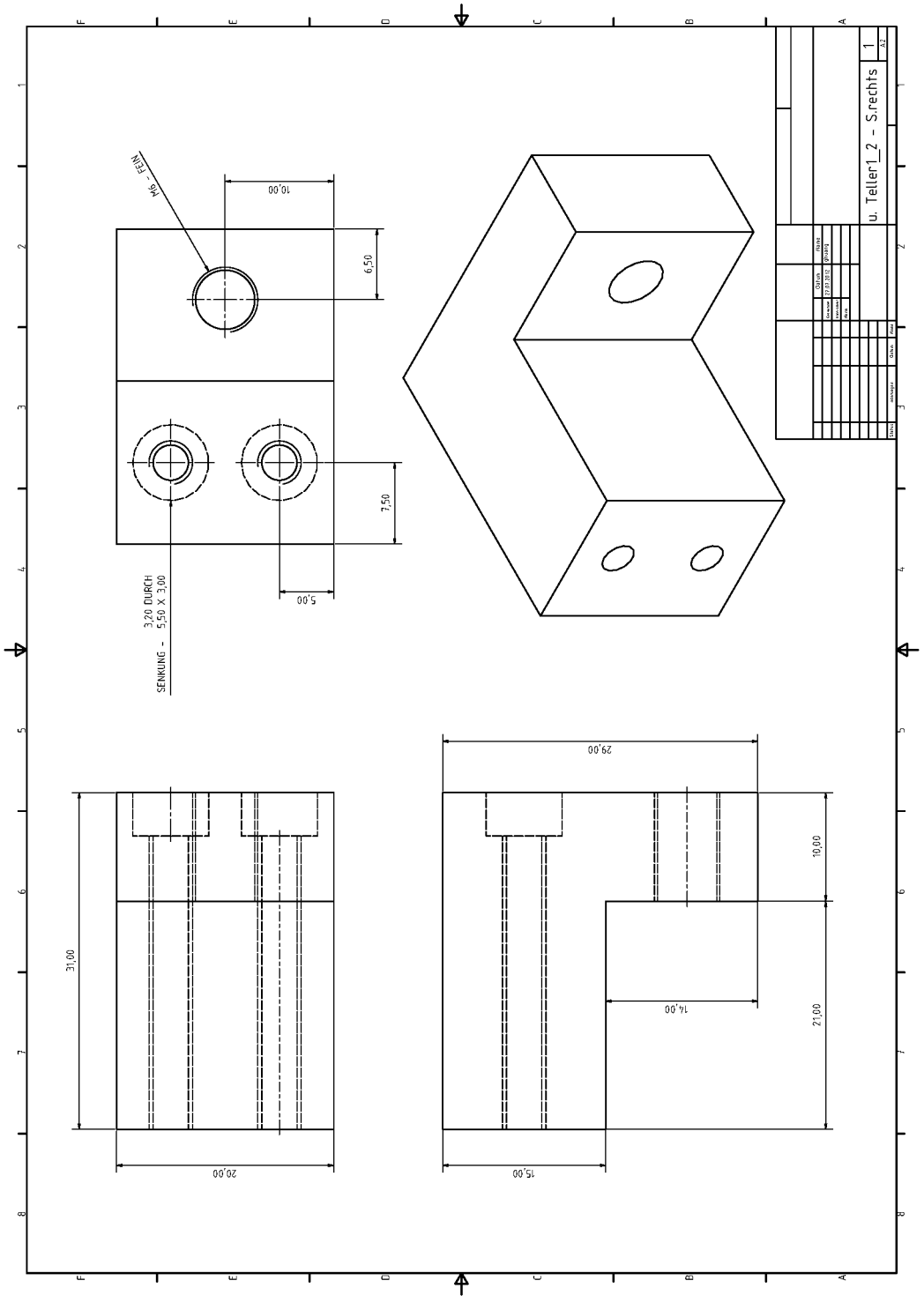

Abbildung A.16: *Technische Zeichnung des unterern Verstellers: Zwei Stück werden auf den Seiten der unteren Platte montiert. Schrauben mit Feingewinden bewegen in der größeren Bohrung den Versteller, sodass die Platte darauf verstellt werden kann*

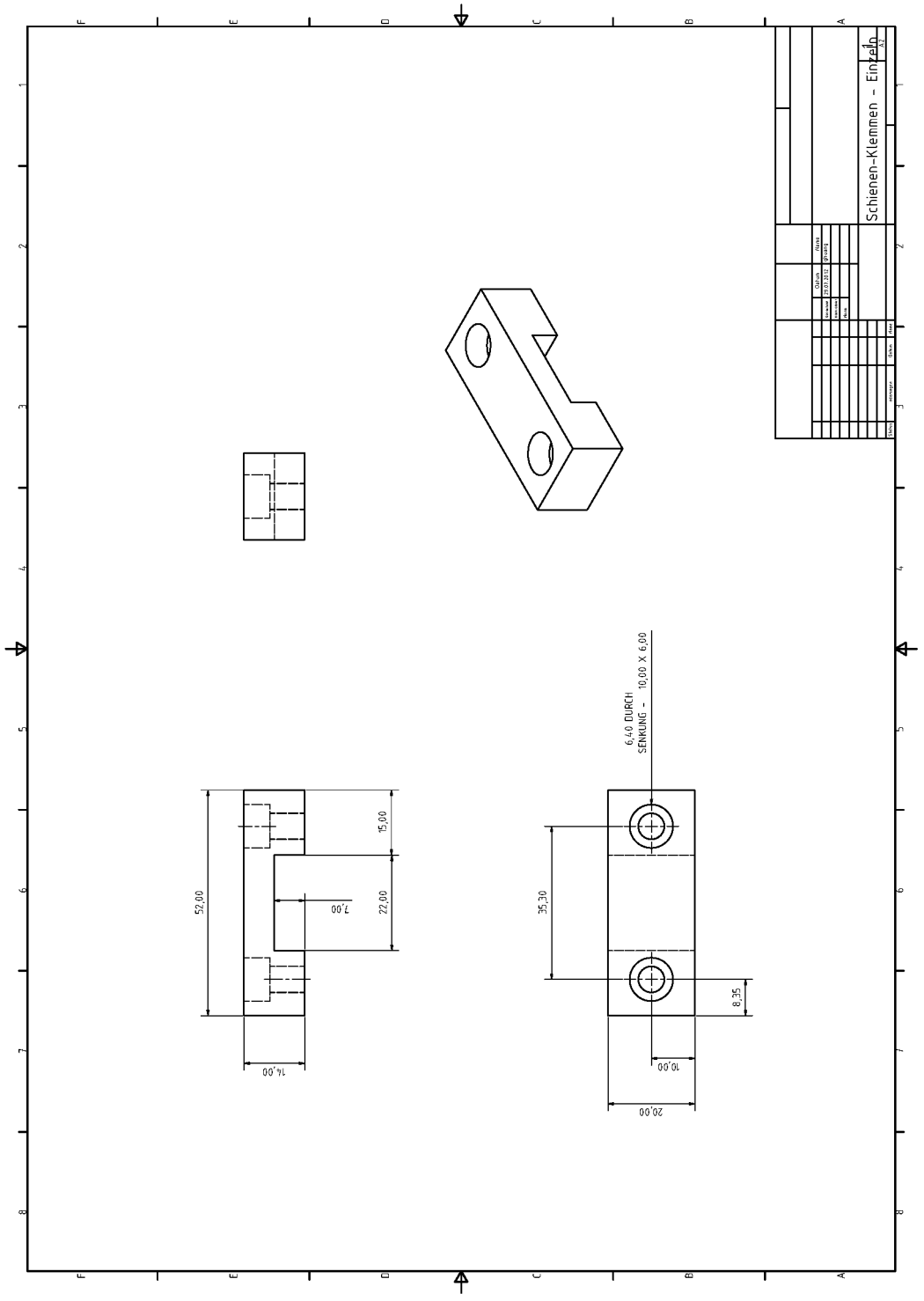

Abbildung A.17: *Technische Zeichnung der Klemmen: Vier von dem Klemmen halten die geraden Schienen auf dem optischen Tisch fest*

Anhang B

Blockdiagramme des Programms

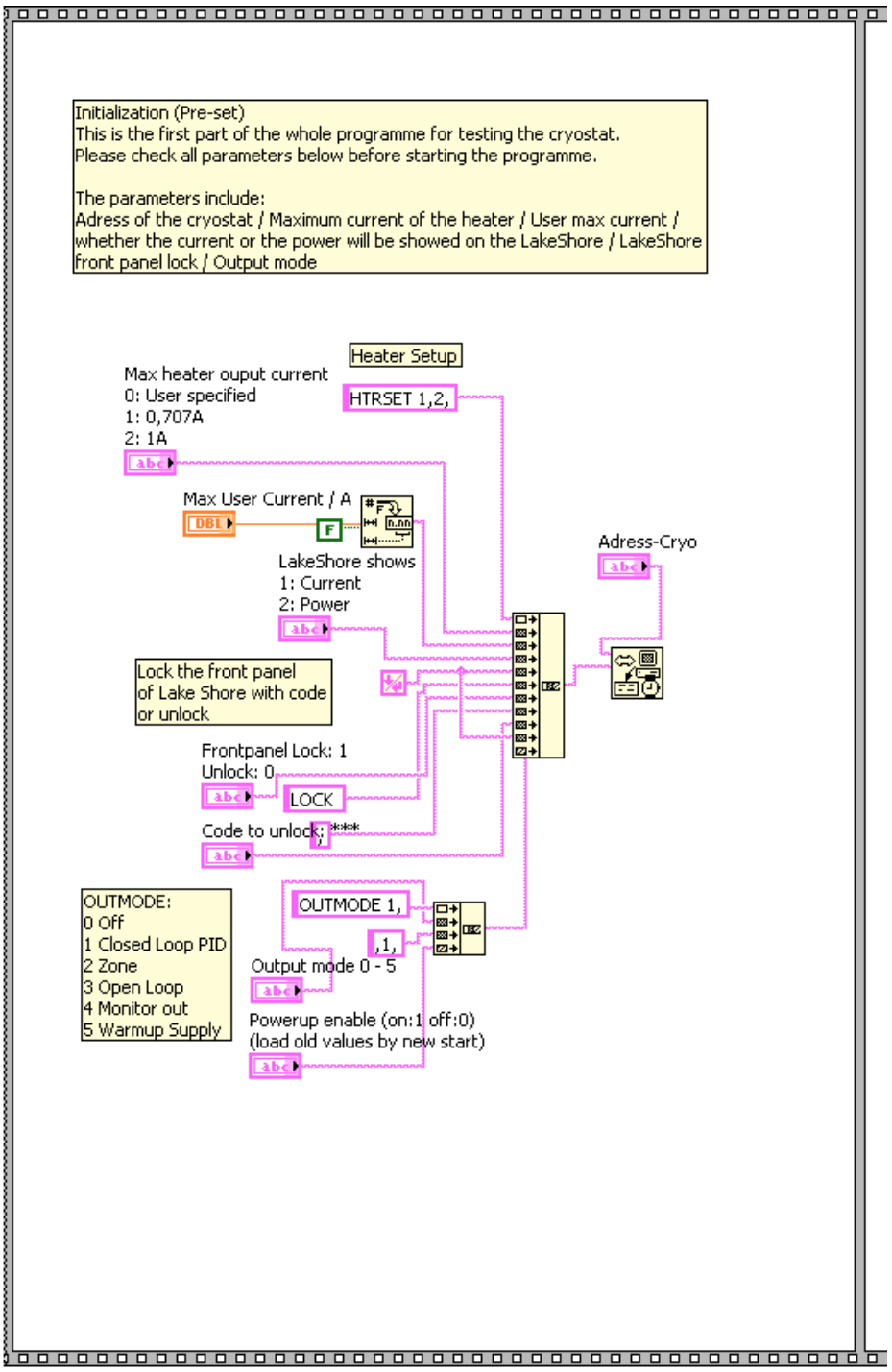

Abbildung B.1: *Erster Teil des Programms „Bedienen“: Initialisierung des Kryostaten*

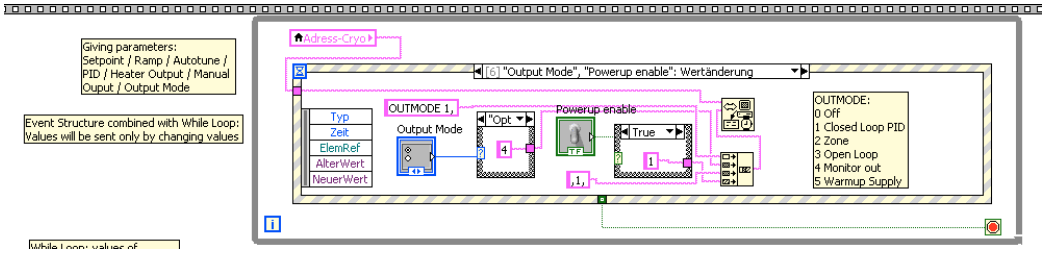

Abbildung B.2: *Zweiter Teil des Programms „Bedienen“: Zusendung der Befehle*

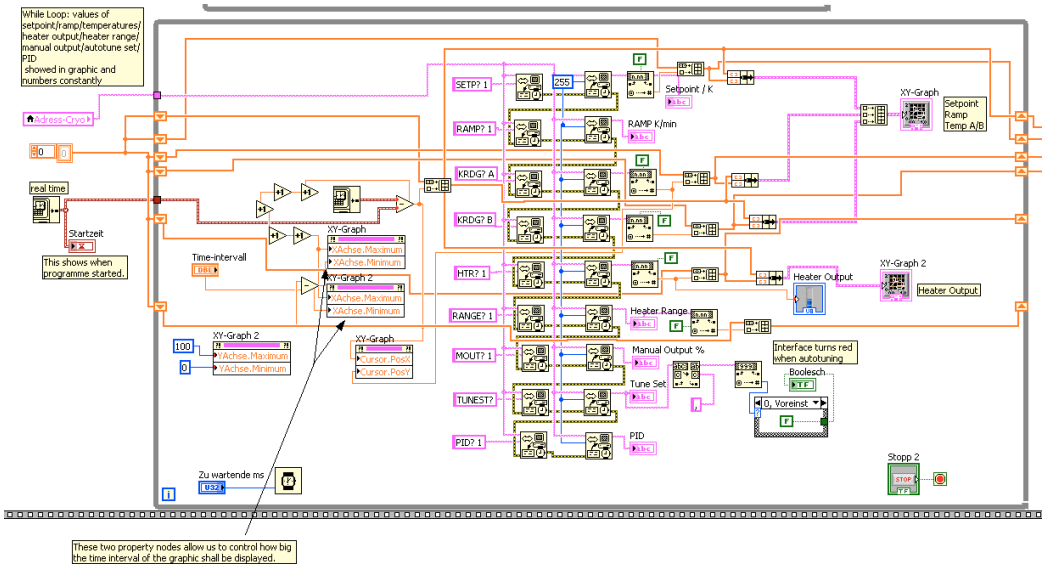

Abbildung B.3: *Dritter Teil des Programms „Bedienen“: Darstellung der empfangenen Signale*

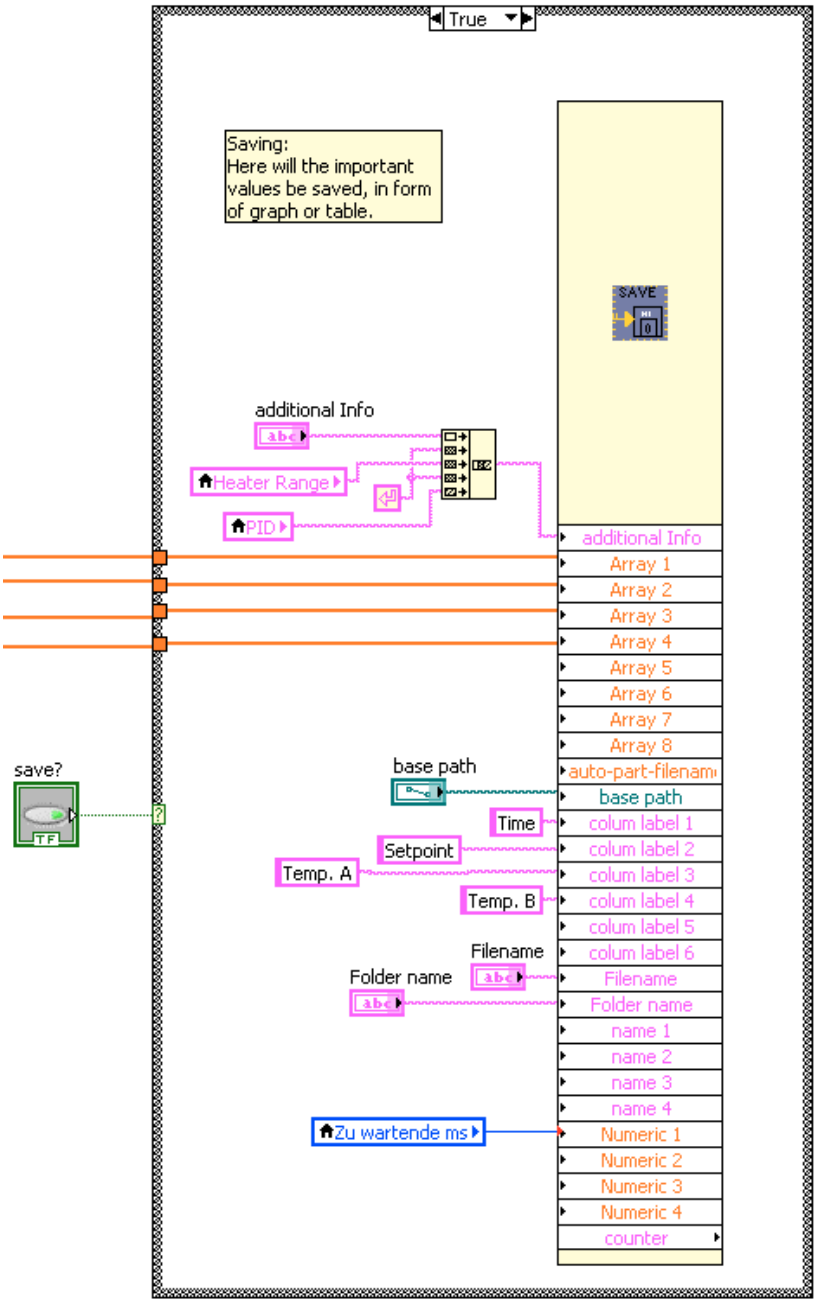

Abbildung B.4: *Vierter Teil des Programms „Bedienen“: Speicherung*

Anhang C

Glossar

Abbildungsverzeichnis

2.1 Magnetisierung - Temperatur 10

2.2 MOKE-Geometrien 11

2.3 MOKE-Aufbau 13

2.4 Brewster-Winkel 14

2.5 Schema des Kryostaten 15

3.1 Geforderte Freiheitsgrade zur Probenjustage 22

3.2 Manipulator-Kryostat Zusammenbau 23

3.3 Explosionsansicht des Manipulators 25

4.1 *LabView* Beispiel - Blockdiagramm 28

4.2 *LabView* Beispiel - Frontpanel 29

4.3 Blockdiagramm des Programms „Bedienen“ 32

4.4 Frontpanel des Programms „Bedienen“ - „Pre-Set“ 33

4.5 Frontpanel des Programms „Bedienen“ - „cryo control“ 33

4.6 Frontpanel des Programms „Bedienen“ - „Saving“ 34

4.7 Blockdiagramm des Programms „Zone“ - Parametereingabe . 36

4.8 Frontpanel des Programms „Zone“ - Parametereingabe 37

4.9 Blockdiagramm des Programms „Zone“ - Parameter Speichern 37

4.10 Blockdiagramm des Programms „Zone“ - Parameter Laden . 38

4.11 Frontpanel des Programms „Zone“ - Parameter Speichern und Laden 39

4.12 Blockdiagramm des Hauptprogramms 41

4.13 Ausgeschnitten aus dem Blockdiagramms des Hauptprogramms - Temperatureingabe/-stabilisierung 41

4.14 Blockdiagramm des Programms „temp-control“ 42

4.15 Frontpanel des Programms „temp-control“ 43

4.16 Eine Registerkarte im Frontpanel des Hauptprogramms - „measurement“ 43

A.1 Zeichnung-Hälfte des oberen Rings-1 48

A.2 Zeichnung-Hälfte des oberen Rings-2 49

A.3 Zeichnung-Verbindungsplatte-rechts 50

A.4 Zeichnung-hintere Halbe des unteren Rings 51

A.5 Zeichnung-vordere Halbe des unteren Rings 52

A.6 Zeichnung-Bogenschiene 53

A.7 Zeichnung-Bogenschienenhalter 54

A.8 Zeichnung-obere Platte der Support Legs 55

A.9 Zeichnung-untere Platte der Support Legs 56

A.10 Zeichnung-Stange von Support Legs 57

A.11 Zeichnung-Gleitstück in Form einer Bogen 58

A.12 Zeichnung-mittlere Platte 59

A.13 Zeichnung-oberer Versteller 60

A.14 Zeichnung-Gleitstück in Form einer Gerade 61

A.15 Zeichnung-untere Platte 62

A.16 Zeichnung-unterer Versteller 63

A.17 Zeichnung-Klemme 64

B.1 Erster Teil des Programms „Bedienen“ 66

B.2 Zweiter Teil des Programms „Bedienen“ 67

B.3 Dritter Teil des Programms „Bedienen“ 67

B.4 Vierter Teil des Programms „Bedienen“ 68

Literaturverzeichnis

[1] R. Vollmer. *Magnetische Schichtsysteme in Forschung und Anwendung.* Forschungszentrum Jülich, 1999.

[2] Charles Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik.* Oldenbourg Verlag München Wien, 13., korrigierte auflage edition, 2002.

[3] J.M. Ziman. *Prinzipien der Festkörpertheorie.* Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt am Main, second edition 1972 edition, 1975.

[4] Korbinian Perzlmaier. *Propagation and Interference of Spin Waves in Ferromagnetic Thin Films.* Dissertation, Universität Regensburg, 2008.

[5] Thorlabs. *S1FC635, S1FC675, S1FC780, S1FC1310, S1FC1550 Fiber Coupled Laser Source.* Thorlabs Inc.

[6] Janis. *Janis Research PTSHI-4-5 Refrigerator System, Operation Instruction.* Janis Research Company.

[7] Sumitomo Heavy Industries. *4K Pulse Tube Cryocooler, Technical Instruction.* Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

[8] Sumitomo Heavy Industries. *F-50H Compressor Unit, Technical Instruction.* Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

[9] LakeShore. *Model 336 Temperature Controller, User's Manual.* LakeShore.