

Holger Gottschlag

Entwicklung einer Apparatur zur  
automatisierten Positions- und  
Spannungsbestimmung von Drähten in  
Vieldrahtproportionalkammern







Vorgelegt an der Westfälischen Wilhelms Universität Münster  
Institut für Kernphysik

Entwicklung einer Apparatur zur automatisierten  
Positions- und Spannungsbestimmung von Drähten in  
Vielfadraproporcionalkammern

Diplomarbeit  
von  
Holger Gottschlag  
Münster  
7. Februar 2005



*„Meine Zeichnung stellte aber keinen Hut dar. Sie stellte eine Riesenschlange dar, die einen Elefanten verdaut.“*

Antoine de Saint-Exupéry in „Der kleine Prinz“





# Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Einleitung   | 3  |
| 2     | Grundlagen   | 5  |
| 2.1   | Grundbausteine der Materie . . . . .   | 5  |
| 2.2   | Das Quark-Gluon-Plasma . . . . .   | 7  |
| 2.3   | Signaturen des QGP . . . . .   | 10 |
| 2.3.1 | Hinweise auf Deconfinement . . . . .   | 10 |
| 2.3.2 | Durch Wiederherstellung der chiralen Symmetrie beeinflusste Messgrößen . . . . . | 11 |
| 2.3.3 | Durch Thermo- und Hydrodynamik des Systems motivierte Observablen . . . . .      | 12 |
| 3     | Experimentelles Umfeld   | 13 |
| 3.1   | Der Large Hadron Collider . . . . .  | 13 |
| 3.2   | A Large Ion Collider Experiment . . . . .  | 14 |
| 3.3   | Der ALICE Transition Radiation Detektor . . . . .                                | 19 |
| 3.3.1 | Aufbau des Transition Radiation Detektors . . . . .                              | 19 |
| 3.3.2 | Das TRD-Prinzip . . . . .  | 22 |
| 4     | Das Wire-Test-Device   | 25 |
| 4.1   | Aufgaben und Zielsetzung . . . . .   | 25 |
| 4.2   | Das Testprinzip . . . . .  | 28 |
| 4.2.1 | Messung der Drahtpositionen . . . . .  | 28 |
| 4.2.2 | Messung der Drahtspannungen . . . . .  | 30 |
| 4.3   | Realisierung der Messapparatur . . . . .   | 33 |
| 4.3.1 | Mechanischer Aufbau . . . . .  | 33 |
| 4.3.2 | Der Schrittmotor . . . . .   | 39 |
| 4.3.3 | Elektronik . . . . .   | 43 |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.3.4 | Verknüpfung der Komponenten . . . . .                                       | 49  |
| 5     | Software . . . . .  | 53  |
| 5.1   | Die Programmiersprache LabVIEW . . . . .                                    | 53  |
| 5.2   | Konzeptionelle Anforderungen und Lösungen . . . . .                         | 56  |
| 5.2.1 | Datenformat der Ausgabedateien . . . . .                                    | 59  |
| 5.3   | Der Algorithmus . . . . .   | 60  |
| 5.3.1 | Messvorbereitungen . . . . .  | 60  |
| 5.3.2 | Spannungs- und Positionsmessung . . . . .                                   | 63  |
| 6     | Messungen und Ergebnisse . . . . .  | 69  |
| 6.1   | Spannungsmessungen . . . . .  | 69  |
| 6.1.1 | Manuelle Messungen . . . . .  | 69  |
| 6.1.2 | Spannungsmessungen mit dem Wire-Test-Device . . . . .                       | 71  |
| 6.1.3 | Verschiebung der Messkopfposition rechtwinkelig zur Drahtrichtung . . . . . | 74  |
| 6.1.4 | Transversale Verschiebung der Messkopfposition . . . . .                    | 76  |
| 6.1.5 | Reproduzierbarkeit der Spannungsmessungen . . . . .                         | 77  |
| 6.1.6 | Abtastrate und Buffergröße . . . . .  | 81  |
| 6.2   | Positionsmessungen . . . . .  | 81  |
| 6.2.1 | Gaußbreite der Positionsmessungen . . . . .                                 | 83  |
| 6.2.2 | Reproduzierbarkeit der Drahtabstandsmessungen . . . . .                     | 85  |
| 6.2.3 | Profil der Abstandsmessungen . . . . .                                      | 86  |
| 6.3   | Diskussion der Gesamtfehler . . . . .                                       | 88  |
| 7     | Zusammenfassung . . . . .   | 93  |
| 8     | Anhang . . . . .  | 95  |
| 8.1   | Anhang I - Technische Zeichnungen . . . . .                                 | 95  |
| 8.2   | Anhang II - Schaltpläne . . . . .   | 99  |
|       | Literatur . . . . .   | 114 |
| 9     | Danksagung . . . . .  | 115 |

# 1. Einleitung

Die ultrarelativistische Schwerionenphysik beschäftigt sich mit der Untersuchung dichter, heißer Materie. Mit „dicht“ ist ein vielfaches der Dichte von normaler Kernmaterie gemeint und mit „heiß“ meint man Temperaturen von  $\sim 14 \cdot 10^{11}$  °C, was dem hunderttausendfachen der Temperatur im Zentrum unserer Sonne entspricht. Bei diesen extremen Bedingungen wird ein Phasenübergang (ähnlich dem zum Beispiel von flüssig nach gasförmig) der Materie zum sogenannten Quark-Gluon-Plasma erwartet. Um einen solchen Zustand im Labor herzustellen sollen Beschleunigeranlagen Atomkerne mit hohen Energien zur Kollision bringen. Bei diesen Kollisionen werden sehr viele, meist instabile, Teilchen erzeugt. Viele von ihnen werden aufgrund von Wechselwirkungen untereinander rekombinieren und hadronisieren, also neue, stabilere Kerngrundbausteine formen. Erzeugte Elektronen jedoch bewegen sich durch diesen Kollisionsfeuerball ungehindert hindurch, da sie nicht von der starken Kernwechselwirkung beeinflusst werden. Elektronen sind daher also gute Sonden, mit denen man Aussagen über den Zustand der Materie in der frühen Phase der Reaktion treffen kann, in der sie entstanden sind. Außer den Elektronen werden noch sehr viele andere Teilchen (hauptsächlich geladene Pionen) produziert, die ganz ähnliche Signale in den Messinstrumenten hinterlassen.

Um diese beiden Teilchensorten besser voneinander unterscheiden zu können, ist ein spezieller Detektor entwickelt worden: der Transition Radiation Detektor (TRD). Hier nutzt man aus, dass sehr schnelle (ultrarelativistische) Elektronen beim Durchgang von Materieschichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes Strahlung (sogenannte *Übergangsstrahlung*) im Röntgenbereich emittieren. Zum Nachweis dieser Strahlung benutzt man eine Auslesekommer hinter einem solchen Radiator. In der gasgefüllten Kammer können durch das einfallende Teilchen im Gas entstehende Elektronencluster in einem elektrischen Feld in Richtung einer Ausleseelektrode driften, an der sie nachgewiesen werden. Um ein möglichst gleichmäßiges elektromagnetisches Feld, und somit auch gleichmäßige Driftgeschwindigkeiten über die ganze Kammer zu erzeugen, verwendet man zwei Ebenen von dünnen Drähten.

In der Produktion dieser Auslesekammern muss sichergestellt werden, dass Spannung und Position aller Drähte in den Kammern keine zu großen Abweichungen

vom Sollwert haben. Andernfalls würde sich ein inhomogenes elektrisches Feld in den Kammern ausbilden und die Driftzeiten und somit die Messdaten verschlechtern. Da insgesamt 540 solcher Kammern gebaut werden und diese jeweils mit bis zu 650 solcher Drähte versehen sind, ist eine manuelle Überprüfung von Spannung und Position eines jeden Drahtes kaum zu leisten. Es sollte eine Maschine entwickelt werden, welche Spannungs- und Positionsmessungen automatisiert durchführen kann. Die Entwicklung dieser Maschine ist Inhalt der vorliegenden Diplomarbeit.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Grundbausteine der Materie

Den Aufbau der Natur aus Grundbausteinen, nahmen schon im 6. Jahrhundert vor Christus die griechischen Philosophen Heraklit, Anaximenes und Thales an. Nicht viel später postulierten Demokrit und Leukipp diese Grundbausteine und nannten sie Atome (*gr. atomos = unteilbar*). Die gesamte Materie sollte aus diesen Grundbausteinen zusammengesetzt sein. Unterschiedliche Materieformen führte man zurück auf die bekannten Elemente Feuer, Wasser, Erde, Luft.

Erst im 19. Jahrhundert postulierten Dimitri Mendelejew und Lothar Meyer ein Periodensystem der Elemente, aus der auch ein tieferes Verständnis über Strukturen von verbundenen Atomen, genannt Moleküle, hervorging. Die Materie schien sich erstaunlicherweise systematisch und nach exakten Regeln zu verhalten und sich in Gruppen mit bestimmten Eigenschaften ordnen zu lassen.

Am Ende des vorletzten Jahrhunderts entwickelten Rutherford (1898) und Villard (1900) aufgrund erstmals nachgewiesener  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung eine Ahnung davon, dass die Atome nicht das untere Ende der Skala darstellen, sondern selbst aus noch kleineren Teilchen bestehen. Dies sind zum einen die Atomkerne und zum anderen die Elektronen (Thomson, 1897), welche den Kern in der Atomhülle umkreisen. Der Kern selbst ist aus zwei verschiedenen Teilchensorten aufgebaut: Protonen (nachgewiesen erstmals durch Anwendung des Rutherford-Experimentes von Geiger und Marsden, 1911) und Neutronen (Chadwick, 1931). Da diese Teilchen den Gesamtspin  $\frac{1}{2}$  besitzen und der Fermi-Dirac-Statistik gehorchen nennt man sie heute Fermionen. Die verschiedenen Strahlungsarten interpretierte man als Zerfallsprozesse im Atom bzw. im Kern. Zur Erklärung der natürlichen radioaktiven Strahlung benötigte man zwei weitere Teilchen, das Photon und das Neutrino. Zusammen nannte man diese Gruppe von Teilchen nun *Elementarteilchen*.

Isolierte Elementarteilchen müssen nicht zwangsläufig stabil sein. Das Neutron etwa zerfällt mit einer mittleren Lebensdauer von etwa  $(885,7 \pm 0,8)$  s [PAR04] in ein Proton, ein Elektron und ein Elektronantineutrino.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Ob auch das Proton zerfällt, ist bis heute ungeklärt, jedoch kann man eine untere Schranke für die Halbwertszeit angeben:  $10^{29 \pm 2}$  Jahre [Sha99]

Die Wechselwirkung der geladenen Teilchen erklärte man durch die Quantenelektrodynamik (QED), welche ein Austauschteilchen, das Photon, postuliert, das die Coulombwechselwirkung vermittelt. Diese Austauschteilchen nennt man allgemein Eichbosonen. Eichbosonen besitzen ganzzahligen Spin und gehorchen der Bose-Einstein-Statistik.

Nach heutigem Kenntnisstand sind Elektronen nicht weiter in kleinere Teilchen teilbar. Man ordnet sie der Gruppe der Leptonen zu (*gr. leptos = leicht*). Insgesamt kennt man sechs verschiedene Leptonensorten die sich in drei Generationen aufteilen:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

1964 konstruierten M. Gell-Mann und G. Zweig unabhängig voneinander ein Modell von Elektronen und Protonen, beruhend auf Ergebnissen der Hadronenspektroskopie, in dem die Protonen und Neutronen selbst aus noch kleineren Teilchen bestehen, die nicht weiter teilbar sind. Diese Teilchen bezeichnet man als Quarks<sup>2</sup>. Ähnlich den Leptonen unterscheidet man bei den Quark sechs *Flavours* mit unterschiedlichen Massen:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Die Materie besteht nach dem Standardmodell also aus Leptonen und Quarks. Für den notwendigen Zusammenhalt der Quarks macht man die starke Wechselwirkung verantwortlich und sortiert Protonen und Neutronen in die Gruppe der Hadronen (*gr. hadros = stark (wechselwirkend)*) ein. Beschrieben wird die starke Wechselwirkung durch die Quantenchromodynamik (QCD). Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind die Gluonen.

Die QCD führt auch eine neue Quantenzahl ein: die Farbladung. Man unterscheidet drei verschiedene Farben: Rot, Grün und Blau. Quarks und Gluonen sind eingeschlossen in farbneutralen Hadronen ( $\rightarrow$  *confinement*). Die Gluonen vermitteln die Wechselwirkung aller farbgeladenen Teilchen durch Austausch. Sie tragen jeweils Farbe und Antifarbe. Farbneutrale Hadronen wechselwirken durch den Austausch von ebenfalls farbneutralen Teilchen (den Pionen).

---

<sup>2</sup>Quarks: nach dem Namen schemenhafter Wesen in dem Roman *Finnegan's Wake* von J. Joyce [Dig87].

Die acht möglichen Farbkombinationen bilden ein Oktettzustandsmultiplett<sup>3</sup>.

Baryonen (*gr. baros = schwer*) bestehen aus drei *Valenzquarks*, welche die Ladung des Baryons und einen großen Teil seines Impulses ausmachen. Hinzu kommt eine mit zunehmender Energie größer werdende Menge an beobachtbaren  $q\bar{q}$ -Paaren, den *Seequarks*, die zusammen keine Farbladung haben und somit im einfachen statischen Quarkmodell des Hadrons nicht relevant sind.

Mesonen (*gr. mesotês = mittel(schwer)*) bestehen aus einem Quark-Antiquark-Paar.

Nötig sind die beschriebenen Farbladungen, weil einige durch Baryonenspektroskopie entdeckte Teilchen das Pauli-Prinzip verletzen würden, da Spin und Flavour der Komponenten dieser Baryonen übereinstimmen<sup>4</sup>. Außerdem benötigt man sie für einen Erklärungsansatz des Confinements.

Die Bezeichnung *Elementarteilchen* entzieht sich immer mehr seiner ursprünglichen Wortbedeutung, ein einfaches System von wenigen Teilchen zu bilden, welches die gesamte Materie beschreiben kann. Mit immer größeren realisierbaren Energien in Teilchenbeschleunigern hat man bisher schon einige hundert verschiedene Elementarteilchen gefunden, die teilweise extrem kurze Lebensdauern besitzen.

## 2.2 Das Quark-Gluon-Plasma

Das Universum ist nach gängigen Theorien durch den sogenannten Urknall entstanden. Bis 20  $\mu\text{s}$  [Mül04] nach dem Urknall entstand aus der Energie des Urknalls heiße Materie von extrem hoher Energiedichte, welche das gesamte Universum ausfüllte. Quarks und Gluonen, die Grundbausteine der Materie, waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht in Hadronen gebunden<sup>5</sup>, sondern frei. Die ultrarelativistische Schwerionenphysik versucht, einen solchen Zustand, also einen „kleinen“ Urknall, im Labor zu erzeugen und dessen Eigenschaften zu untersuchen.

Theoretische Modelle sagen bei hohen Dichten und Temperaturen voraus, dass sich Quarks und Gluonen über einen größeren Raumbereich als den eines Hadrons

<sup>3</sup>Je nach Konvention findet man für die 8 Gluonen des Oktetts etwa:  $r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{r}, b\bar{g}, \sqrt{1/2}(r\bar{r} - g\bar{g}), \sqrt{1/6}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$  [Pov99].

<sup>4</sup>Baryonenspektroskopie liefert u.a.:  $\Delta^{++} = u^\uparrow u^\uparrow u^\uparrow$  oder  $\Omega^- = s^\uparrow s^\uparrow s^\uparrow$ .

<sup>5</sup>der Zusammenschluss von Quarks mit verschiedener Farbladung zu abgeschlossenen, nach außen farbneutralen Hadronen nennt man *confinement*

quasifrei bewegen können. Man spricht hierbei von *deconfinement*. Eine Vorstellung dazu liefert das Bagmodell (vgl. [Pei97]).

Mit QCD-Methoden ist dieses Verhalten jedoch nicht nachvollziehbar. Probleme sind hier nur dann lösbar, wenn die effektive Kopplungskonstante, also das  $g$  klein ist<sup>6</sup>, was bei hohen Impulsüberträgen ( $Q^2 \rightarrow \infty$ ), also sogenannte harten Kollisionen, der Fall ist [Mül95]:

$$g^2(Q^2) = \frac{16\pi^2}{(11 - \frac{2}{3}N_F) \ln(\frac{Q^2}{\Lambda^2})} \rightarrow 0. \quad (2.1)$$

$N_F$  ist die Zahl der Quarksorten und  $\Lambda \approx 200$  MeV der QCD Skalenfaktor. Für Confinementprobleme bei denen  $\alpha_s \gg 1$  ist, sind numerische lattice-QCD-Rechnungen, beruhend auf der *Gittereichtheorie*, notwendig. Die Güte dieser Gitterrechnungen ist vor allem von der zur Verfügung stehenden Rechenleistung abhängig. Massen von Hadronen können so berechnet und thermodynamische Eigenschaften von Quark-Gluon-Systemen bestimmt werden. Beim baryochemischen Potential  $\mu_B = 0$  und Temperaturen von etwa  $T_C \approx 160$  MeV [Kar04] wird ein Phasenübergang vom Hadronengas zum Quark-Gluon-Plasma erwartet. Hier gibt es zwei Prozesse die bei der selben Temperatur auftreten können: das Deconfinement und die Wiederherstellung der chiralen Symmetrie (siehe auch Abschnitt 2.3).

In Abbildung 2.1 ist der Verlauf der Phasengrenze zwischen Hadronengas und Quark-Gluon-Plasma (QGP) im Phasendiagramm schematisch dargestellt. Man erkennt, dass die Temperatur der Phasengrenze bei zunehmendem baryochemischen Potential<sup>7</sup> sinkt. Bei etwa  $\rho_C \approx 5\rho_0$  [Won94], also fünffacher normaler Kerndichte, wird ein Übergang bei  $T = 0$  erwartet. Solche Dichten können in Neutronensternen erreicht werden. Ein QGP mit  $\mu_B = 0$ , in dem also Quark- und Antiquarkzahl im Gleichgewicht stehen, kann man oberhalb der kritischen Temperatur in erster Näherung als ideales Gas mit endlicher Ausdehnung beschreiben. Für seinen Druck gilt [Pei97]:

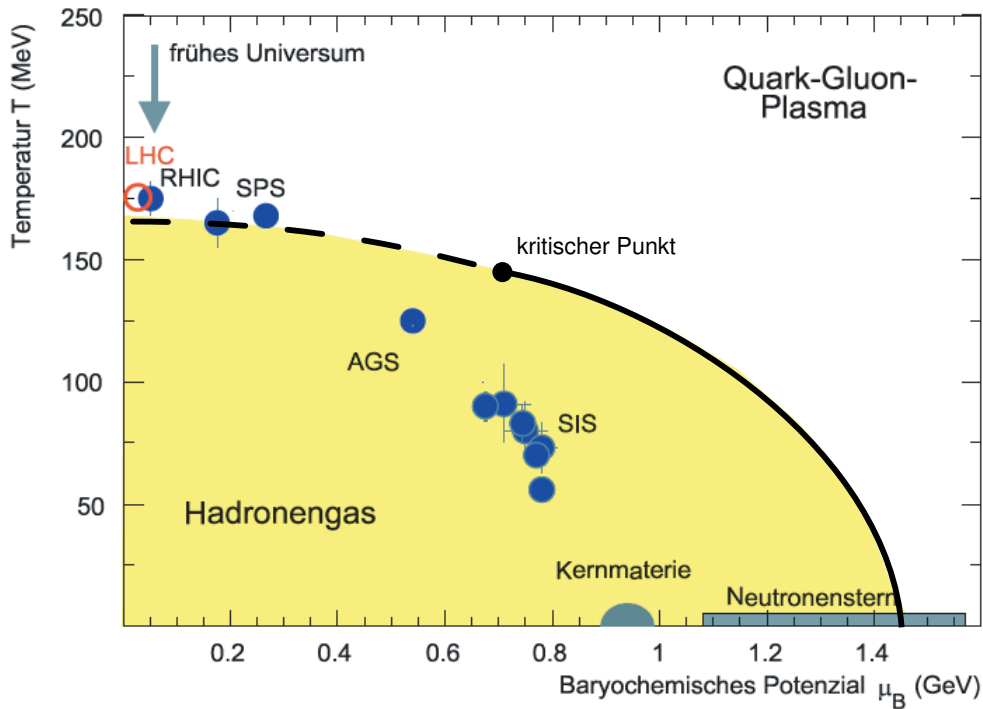
$$P_{\text{QGP}} = \nu \frac{\pi^2}{90} T^4 - B \quad (2.2)$$

---

<sup>6</sup>für die Kopplungskonstante der QCD  $\alpha_s$  gilt:  $\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi}$

<sup>7</sup>Im wesentlichen ein Maß für die Dichte der Kernmaterie bzw. die Baryonendichte.





**Abbildung 2.1:** Abgebildet ist ein Schema des Phasendiagramms hadronischer Materie. Bei hohem baryochemischen Potential  $\mu_B$  und hohen Temperaturen  $T$ , findet ein Übergang zum Quark-Gluon-Plasma (QGP) statt. Jenseits des kritischen Punktes (im Bereich der gestrichelt eingezeichneten Linie) ist kein Phasenübergang erster Ordnung mehr möglich. Da der Bereich hoher Dichten auf der Erde experimentell nicht zu erreichen ist, versucht man mit dem LHC einen Übergang vom QGP zum Hadronengas bei hohen Temperaturen zu messen [BM01].

mit der Zahl der Freiheitsgrade  $\nu$  und der Bagkonstante  $B$ , welche die räumliche Begrenzung des QGP bewirkt. Die Zahl der Freiheitsgrade setzt sich zusammen aus der der Quarks und der der Gluonen

$$\nu = \nu_{\text{gluonen}} + \frac{7}{8}(\nu_q + \nu_{\bar{q}}) = 37 \quad (2.3)$$

mit  $\nu_{\text{gluonen}} = \text{Zahl der Farben} (= 8) \times \text{Zahl der Polarisationen} (= 2)$  und  $\nu_q + \nu_{\bar{q}} = \text{Zahl der Farben} (= 3) \times \text{Spinrichtung} (= 2) \times \text{Flavours} (= 2, \text{ wenn nur u und d berücksichtigt werden}) \times 2$  (für  $q\bar{q}$ ). Für die Energiedichte im Bag gilt

$$\epsilon_{\text{QGP}} = 37 \frac{\pi^2}{30} T^4 + B. \quad (2.4)$$

Vergleicht man dies mit einem Zustand unter der QGP-Phasengrenze, so wird durch die stark unterschiedliche Zahl der Freiheitsgrade ein weiterer Effekt deutlich.

Das Hadronengas sei hier durch ein ideales Pionengas mit drei Isospinfreiheitsgraden genähert. Für den Druck gilt

$$P_{\text{Pionengas}} = 3 \frac{\pi^2}{90} T^4 \quad (2.5)$$

und für die Energiedichte

$$\epsilon_{\text{Pionengas}} = 3 \frac{\pi^2}{30} T^4. \quad (2.6)$$

Bei einem scharfen Phasenübergang muss gelten:

$$P_{\text{Pionengas}} = P_{\text{QGP}}.$$

Wegen der abrupten Zunahme der Freiheitsgrade entsteht *latente Wärme*:

$$\epsilon_{\text{QGP}} - \epsilon_{\text{Pionengas}} = 4B. \quad (2.7)$$

Gitterrechnungen haben jedoch gezeigt, dass ein ideales Gas den Phasenübergang nur bedingt beschreiben kann. Am Phasenübergang steigt die Energiedichte sprunghaft an, der Druck jedoch nur sehr langsam [Kar01].

## 2.3 Signaturen des QGP

Das QGP soll durch ultrarelativistische Schwerionenstöße im Labor erzeugt werden. Da der mögliche Plasmazustand nur sehr kurzlebig sein wird, ist zu überlegen, welche Messgrößen geeignet sind, um einen QGP-Zustand nachzuweisen. Man unterscheidet Observablen für verschiedene physikalische Effekte [Pei97, Mü104]:

### 2.3.1 Hinweise auf Deconfinement

In hadronischen Systemen gibt es aufgrund der assoziierten Produktion von seltsamen Hadronen eine hohe Schwelle für die Entstehung *seltsamer Teilchen* (Kaonen, Hyperonen). Im QGP gilt diese jedoch nicht, weil aufgrund der hohen Energien durch Gluonfusion  $s\bar{s}$ -Paare gebildet werden können. Der Nachweis solcher seltsamer Teilchen gibt Hinweise auf thermische Eigenschaften und die Entwicklung des Systems.

Eine sehr wichtige Signatur des QGP ist die *Unterdrückung von  $J/\Psi$  und  $\Upsilon$  Mesonen*.  $J/\Psi$  bestehen aus einer  $c\bar{c}$ -Kombination und haben eine sehr hohe Masse (3,09 GeV [PAR04]).  $\Upsilon$ -Mesonen sind zusammengesetzt aus  $b\bar{b}$  und haben eine Masse von 9,46 GeV [PAR04]. Um solche Teilchen produzieren zu können, sind sehr harte Stöße notwendig, wie sie vor allem zu Beginn einer Kern-Kern Kollision stattfinden. Durch die hohe Farbladungsdichte im gebildeten QGP ist allerdings die Reichweite der Farbkraft stark verkürzt (*Debye-Screening*). Infolge dessen lösen sich die  $c\bar{c}$ - und  $b\bar{b}$ -Zustände auf bzw. können gar nicht erst gebildet werden. Eine erneute Kombination eines  $J/\Psi$  oder  $\Upsilon$  ist unwahrscheinlich, da aufgrund der großen Anzahl anderer Quarks und der hohen Dichten die freie Weglänge herabgesetzt ist. Die Produktion des  $J/\Psi$ -Mesons und des  $\Upsilon$ -Mesons wird daher unterdrückt<sup>8</sup>.

Eine weitere Signatur ist das *Jet-Quenching*. Paarweise nach der Kollision entstehende, stark gebündelte Teilchenströme (Jets), welche auf Quarks und Gluonen zurückzuführen sind, haben unterschiedlich viel Energie, je nachdem ob die erzeugenden Quarks den Feuerball durchqueren und so Energie durch Gluonbremsstrahlung abgeben mussten oder nicht. Die Folge des Quenchings ist eine Reduktion von Hadronen mit großem Transversalimpuls  $p_T$  und somit die Unterdrückung von Jets.

### 2.3.2 Durch Wiederherstellung der chiralen Symmetrie beeinflusste Messgrößen

Chirale Symmetrie hängt im Grunde mit den Hadronenmassen zusammen. Bei theoretisch masselosen Quarks gibt es keine Kopplung zwischen links- und rechts-händigen Zuständen. Wenn man eine Verschiebung der Hadronenmassen hin zu kleineren Werten messen würde [Won94], wäre dies ein Anzeichen für eine Wiederherstellung der chiralen Symmetrie, welche bei einem System hoher Dichte und Temperatur postuliert wurde.

---

<sup>8</sup>Gegensätzliche Theorien sprechen von einer Erhöhung der  $J/\Psi$ -Mesonen, da im dichten Medium sehr viele  $c$  und  $\bar{c}$  für eine mögliche Kombination vorhanden sind

### 2.3.3 Durch Thermo- und Hydrodynamik des Systems motivierte Observablen

Durch Messung der Abhängigkeit von Temperatur und Entropie (über die produzierten Teilchenzahlen) läßt sich die sogenannte *latente Wärme*, der sprunghafte Anstieg der Freiheitsgrade beim Phasenübergang zum QGP, nachweisen. Dies ist jedoch nur zu beobachten, wenn es sich um einen Übergang erster Ordnung handelt, was, wenn man Abbildung 2.1 zugrunde legt, beim LHC unwahrscheinlich erscheint.

Der kollektive elliptische Fluß ist eine Folge der Vorzugsrichtung des Druckgradienten im Kollisionspunkt, dem Feuerball. Durch Teilchenemissionsrichtungen kann der Druckverlauf im Feuerball nachvollzogen werden.

Direkte Photonen und Di-Leptonen sind elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen. Sie werden daher nicht vom stark wechselwirkenden System im Feuerball beeinflusst und können als Sonde für die frühe Phase des QGP dienen da sie direkte Informationen über die thermische Verteilung von Quarks und Gluonen tragen können.

# 3. Experimentelles Umfeld

## 3.1 Der Large Hadron Collider

Um das Quark-Gluon-Plasma nachzuweisen werden seit mittlerweile 30 Jahren Beschleunigerexperimente mit immer höherer Strahlenergie durchgeführt. Begonnen wurde im Herbst 1974 mit dem Bevalac in Berkley<sup>1</sup>. Es folgten der SIS Beschleuniger an der GSI<sup>2</sup> in Darmstadt, welcher Beschleunigungsenergien von 1 GeV pro Nukleon erreichte, der AGS in Brookhaven<sup>3</sup>, der SPS in Genf<sup>4</sup> und schließlich der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC), ebenfalls in Brookhaven, welcher im Moment mit Schwerpunktsenergien von 200 GeV pro Nukleonenpaar der leistungsfähigste Schwerionenbeschleuniger ist.

Der Large Hadron Collider (LHC) am Europäischen Zentrum für Hochenergiephysik CERN in Genf, welcher voraussichtlich 2007 in Betrieb gehen wird, kann die Forschungsarbeiten mit Schwerpunktsenergien bis 5,5 TeV/A ( $Pb + Pb$ ) auf viel größere Energiedichten ausweiten. Der *deconfinement*-Zustand wird somit auch länger aufrecht erhalten als dies bei RHIC-Energien möglich ist. Das Phasendiagramm in Abbildung 2.1 zeigt die mit den verschiedenen Beschleunigern erreichten Punkte, jeweils zur Zeit des chemischen Ausfrierens. Es sollte mit dem LHC nach den theoretischen Vorhersagen möglich sein, neue Aussagen über den Zustand oberhalb der Phasengrenze zu treffen.

Am LHC wird es Experimente sowohl zu Proton-Proton Stößen geben als auch solche zu ionisierten Bleiatomen, welche in einer Ionenquelle erzeugt werden, die in der Lage sein wird, 200  $\mu$ A  $Pb^{27+}$  [LHC04] zu erzeugen, deren Restelektronen durch stripping entfernt werden. Der LHC wird im 27 km langen LEP<sup>5</sup> installiert. Neue supraleitende Magneten sollen die Teilchen bei den hohen Energien auf der Bahn halten. Es sind fünf Experimente am LHC in Vorbereitung: ATLAS, LHCb, ALICE, CMS und TOTEM. Abbildung 3.1 zeigt die Standorte der Experimente am Beschleunigerring. Das TOTEM Experiment wird, als kleinstes Experiment,

---

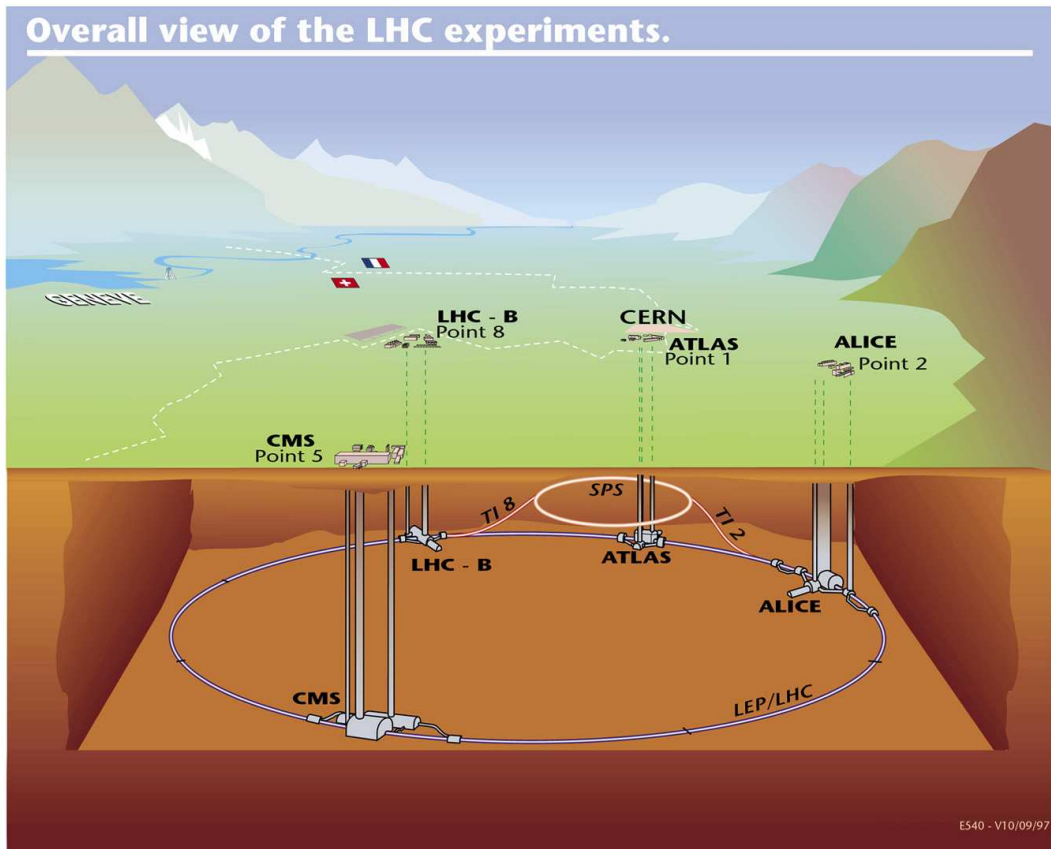
<sup>1</sup>Lawrence Berkley National Laboratory, LBNL

<sup>2</sup>Gesellschaft für Schwerionenforschung, GSI

<sup>3</sup>Brookhaven National Laboratory, BNL

<sup>4</sup>European Organization for Nuclear Research, CERN

<sup>5</sup>Large Electron Positron Collider



**Abbildung 3.1:** Die geplanten LHC Experimente und ihre Standorte am Beschleunigerring [AT99].

in CMS integriert. Das ALICE Experiment ist das einzige, welches speziell auf das Studium des Quark-Gluon-Plasmas ausgelegt ist. Die Ziele der anderen Experimente sind die Suche nach dem Higgs-Teilchen (ATLAS, CMS) [Col94b, Col94a], die Untersuchung der CP-Verletzung an B-Mesonen (LHCb) [Col98] und die Bestimmung von totalen Wirkungsquerschnitten von LHC Kollisionen (TOTEM) [Col99]. Der geplante Start des LHC ist 2007.

### 3.2 A Large Ion Collider Experiment

ALICE ist eines der vier großen Experimente am Large Hadron Collider (LHC) und wird am *Point 2* des Beschleunigerrings aufgebaut. Mehr als 900 Physiker und 83 Institute aus 27 Ländern sind hieran beteiligt.

Es sollen Schwerionenstöße bei Schwerpunktsenergien von 5,5 TeV pro Nukleonpaar untersucht werden. Hier wird ein Übergang zu einer neuen Zustandsform von Materie erwartet: Das Quark-Gluon-Plasma (QGP). Existenz und Eigenschaften einer solchen Phase sind von entscheidender Bedeutung für ein tieferes Verständnis der Quanten-Chromo-Dynamik (QCD), um insbesondere das Confinement und die chirale Symmetrienerhaltung zu verstehen.

Das ALICE Experiment soll alle QGP-relevanten Observablen (siehe Abschnitt 2.3) messen können und die stark wechselwirkende Materie auch bei extrem hohen Energiedichten ( $\epsilon \approx 1000 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ , also 6000-facher normaler Kerngrundzustandsdichte) untersuchen. Rapiditätsdichten<sup>6</sup> von  $\frac{dN_{ch}}{dy} = 8000$  [Col95] sind bei den Blei-Blei Kollisionen zu erwarten. Im Licht der RHIC-Ergebnisse muss diese Zahl allerdings nach unten korrigiert werden und stellt nur mehr eine obere Schranke dar.

Der ALICE Detektor untersucht die bei einer ultrarelativistischen Schwerionenkollision entstehenden Teilchen (Myonen, Elektronen, Photonen und Hadronen). Ebenso sollen zum Vergleich der Ergebnisse mit anderen LHC Experimenten, Proton-Proton und Proton-Nukleon Stöße untersucht werden. Die Datenmenge, die bei diesem Experiment ausgegeben wird, übersteigt 1 GB/s und 1 PB/Jahr. Dies entspricht einer Datenmenge, die größer ist als die in Europas Telefonnetzwerk entstehende. Da diese Größenordnungen bisher ungekannte Anforderungen an Datenfluß und -speicherung stellen, wird speziell zur Speicherung und Verarbeitung der Daten ein eigenes Grid-Computernetz<sup>7</sup> (LCG) aufgebaut.

Der gesamte ALICE Detektor ist 25 m lang und mißt 16 m in der Höhe. Er besteht aus acht Subdetektoren welche in dem Magnetfeld ( $B \approx 0,4 \text{ T}$ ) des schon im L3 Experiment verwendeten Solenoid-Magneten installiert werden. Eine schematische Abbildung des ALICE Detektors ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Subdetektoren sind im einzelnen:

1. **Das Inner Tracking System (ITS).** Zu den Aufgaben des Inner Tracking Systems zählen die Rekonstruktion des primären Vertex und der Nachweis von Hyperon- und Charmzerfällen sowie Teilchenidentifikation, Tracking von Teilchen mit kleinem Impuls und die Verbesserung der Impulsauflösung von ALICE. Es besteht aus sechs Schichten von Detektoren welche sich in

---

<sup>6</sup>Die Rapidität  $y$  ist ein Maß für den (nicht lorentzinvarianten) Longitudinalimpuls des Teilchens.

<sup>7</sup>engl. *grid computing*  $\approx$  *verteiltes Rechnen*

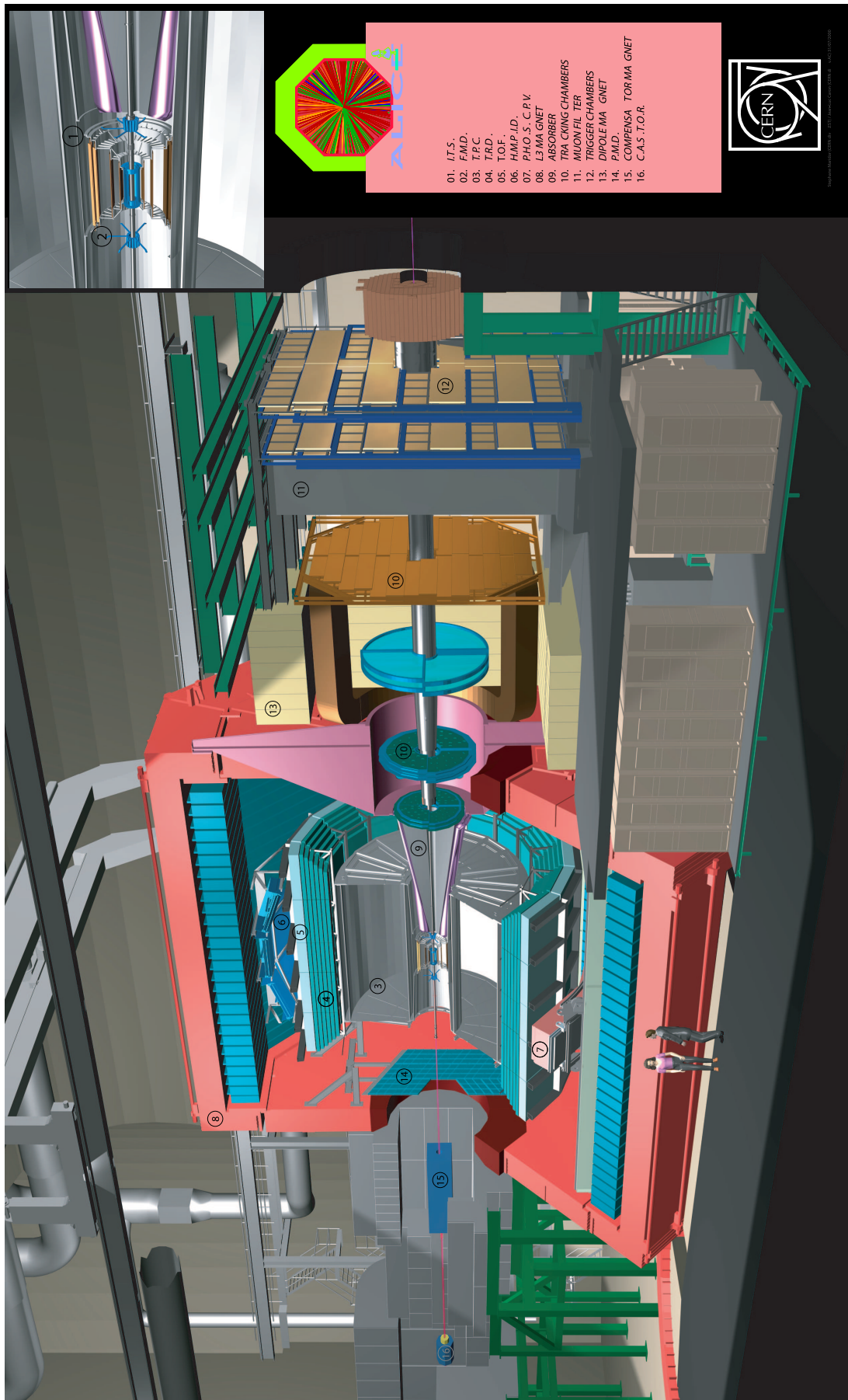


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des ALICE Detektors [TRD01].



einen inneren (Schichten 1 bis 4) und einen äußeren Bereich (Schichten 5 und 6) aufteilen lassen. Im inneren Bereich (bis etwa 50 cm von der Strahlachse entfernt) befinden sich Siliziumpixel- und Siliziumdriftdetektoren. Im äußeren Bereich sind doppelseitige Silizium-Mikrostrip-Detektoren eingebaut. Vier der sechs Schichten verfügen über eine analoge Datenauslese mit welcher unabhängig von allen anderen Subdetektoren Teilchenidentifikation über den Energieverlust ( $\frac{dE}{dx}$ ), in Energiebereichen  $\leq 100$  MeV/c betrieben werden kann.

**2. Die Time Projection Chamber (TPC).** Im Abstand von 90 cm bis 250 cm zum Vertex befindet sich die Time-Projection-Chamber [TPC00]. Sie ist damit sowohl der größte Subdetektor in ALICE als auch einer der wichtigsten, da sie es ermöglichen soll, die Spur von bis zu 12000 geladenen Teilchen pro Kollision zu verfolgen. Die enorme Größe dieses Detektors (er misst 5 m in der Länge) ist sowohl aufgrund dieser hohen Spurdichte erforderlich, als auch um eine  $\frac{dE}{dx}$  Auflösung von  $\leq 7\%$  zu erreichen. Die TPC soll so die Identifikation von Teilchen bis zu 3 GeV/c ermöglichen.

**3. Die Forward Multiplicity und Trigger Detektoren (FMD).**

Die Aufgabe des Forward Multiplicity Detektors ist es, Informationen über Teilchenmultiplizitäten in Pseudorapiditätsbereichen<sup>8</sup> von  $-3,4 < \eta < -1,7$  und  $1,7 < \eta < 5,0$  zu sammeln [FMD04]. Zusammen mit dem Inner-Tracking-System kann der FMD Multiplizitätsverteilungen im Bereich  $-3,4 < \eta < 5,0$  für geladene Teilchen untersuchen. Der FMD besteht aus fünf Ringen von Siliziumstreifenzählern. Die Triggerdetektoren teilen sich in einen T0 und einen V0 genannten Bereich auf. Der T0 Detektor ist ein Stapel von Cherenkovradiatoren. Der V0 Detektor besteht aus zwei Ringen von Plastikszintillatoren. Der T0 Detektor trägt Signale zum ALICE Level 0 Trigger und gibt dem TRD ein „wake-up“-Signal welches noch vor dem Level 0 Trigger kommt. Außerdem liefert er ein Startsignal für den TOF-Detektor. Der V0 Detektor liefert unter anderem einen minimum-bias (MB) Trigger für die zentralen Detektoren. Die Detektoren befinden sich etwa 3,5 m vom Kollisionspunkt entfernt auf der Strahlachse.

---

<sup>8</sup>Die Pseudorapidität ist ein besser zugängliches Maß für den Longitudinalimpuls des Teilchens als die Rapidität. Sie hängt nur vom Emissionswinkel des Teilchens ab stimmt für ultrarelativistische Geschwindigkeiten mit der Rapidität überein.

4. **Der Time-of-Flight Detektor (TOF).** Der Flugzeitdetektor ist auf die Teilchenidentifikation für Impulse von  $0,5 \text{ GeV}/c$  bis  $2,5 \text{ GeV}/c$  spezialisiert. Er soll eine Zeitauflösung von  $150 \text{ ps}$  erreichen [TOF00]. Der Detektor ist der direkte äußere Nachbar des TRDs und umschließt diesen komplett. Er befindet sich etwa  $3,5 \text{ m}$  von der Strahlachse entfernt.
5. **Der Transition Radiation Detector (TRD).** Der TRD erweitert die Elektron-Pion-Separationsmöglichkeiten der TPC für Teilchen mit Energien über  $1 \text{ GeV}/c^2$ . Außerdem dient er als Trigger für geladene Teilchen mit hohem Transversalimpuls [TRD01]. Da der TRD die Basis dieser Arbeit ist, folgt in Kapitel 3.3 eine genauere Beschreibung dieses Detektors.
6. **Der High Momentum Particle Identification Detektor (HMPID).** Teilchen aus harten Kollisionen mit Impulsen oberhalb des Bereiches, der durch die anderen Subdetektoren abgedeckt wird, sollen mit dem HMPI-Detektor untersucht werden. Die Identifikation erfolgt durch Messung des Energieverlustes der Teilchen im Detektormaterial ( $dE/dx$ -Methode). Der Detektor besteht aus neun Modulen, welche in einem Abstand von etwa fünf Metern oberhalb des Kollisionspunktes installiert werden. [HMP98]
7. **Das Photon Spectrometer (PHOS).** Das Photon Spektrometer ist ein elektromagnetisches Kalorimeter und befindet sich in einem Abstand von  $5 \text{ m}$  unterhalb der Strahlachse. Es besteht aus  $36000 \text{ PbWO}_4$  Bleiwolframat-Szintillatorkanälen welche mit Siliziumfotodioden ausgelesen werden. Gemessen werden Photonen im Impulsbereich von  $\approx 0,5 - 10 \text{ GeV}/c$ ,  $\pi^0$ 's ( $\approx 1 - 10 \text{ GeV}/c$ ) und  $\eta$ -Mesonen im Bereich von  $\approx 2 - 10 \text{ GeV}/c$  [PHO99]. Das Szintillatormaterial ist sehr dicht gewählt um möglichst kleine Strahlungslängen  $X_0$  zu erreichen und so mit großen Multiplizitäten umgehen zu können und genügend Licht zu erzeugen.
8. **Das Myon Spectrometer.** Der Myondetektor soll sämtliche Mesonen, die aus schweren Quarks bestehen, also z. B.  $J/\Psi$ ,  $\Psi'$ ,  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$  und  $\Upsilon''$ , durch deren myonischen Zerfall nachweisen [spe96]. Das Verhalten solcher Resonanzen in heißer, dichter Materie kann wertvolle Hinweise auf den Materiezustand im Kollisionspunkt, insbesondere auf die Existenz eines Quark-Gluon-Plasmas geben (siehe Abschnitt 2.3.1). Der Myondetektor befindet sich außerhalb des L3 Magneten und deckt einen Rapiditätsbereich von

$\eta = 2,5 - 4$  (Winkel von  $2^\circ$  bis  $9^\circ$ ) ab. Die Massenaufösung bei 10 GeV soll besser als 100 MeV sein, was ausreicht um alle bekannten Resonanzen zu separieren.

### 3.3 Der ALICE Transition Radiation Detektor

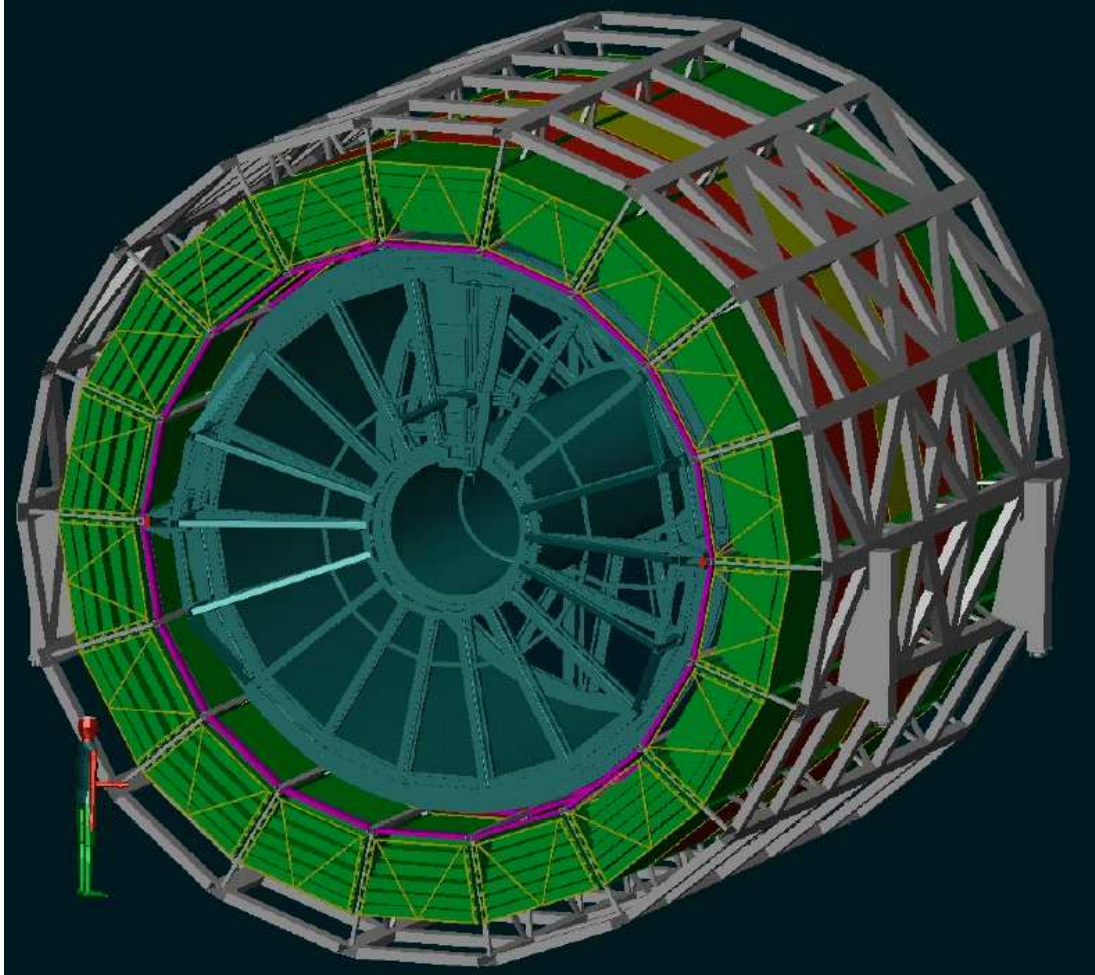
Für  $Pb + Pb$ -Kollisionen bei 5,5 ATeV wird ein QGP-Zustand mit einer Lebensdauer von  $\tau \approx 70 \text{ fm}/c$  und einem Volumen von  $V \approx 10^5 \text{ fm}^3$  [Wes01] bis zum chemischen Ausfrieren erwartet. Es werden Teilchendichten von bis zu 8000  $dN/dy$  erwartet. Bei den produzierten Teilchen handelt es sich hauptsächlich um Pionen, welche der starken Wechselwirkung unterliegen und somit keine gute Sonde für die Anfangsphase des QGP sind. Leptonen hingegen unterliegen nicht der starken Wechselwirkung im Feuerball und sind daher eine gute Sonde. Elektronen stammen unter anderem aus Zerfallsprozessen von Quarkoniumzuständen ( $J/\Psi$ ,  $\Psi'$ ,  $\Upsilon$ ,  $\Upsilon'$ ,  $\Upsilon''$ ) und leichten Vektormesonen ( $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ) in Elektron-Positron Paare, sowie aus Zerfällen von B- und D-Mesonen.

Der Transition Radiation Detektor (TRD) soll die Elektronen in dem großen Pionenuntergrund identifizieren und untersuchen. Außerdem dient er als schneller Trigger für Elektronen mit Transversalimpulsen von  $p_T > 3 \text{ GeV}/c$ , womit die Akzeptanz für  $J/\Psi$  und  $\Upsilon$  verbessert und somit deren Untersuchung erleichtert wird. Bei einer Laufzeit von  $10^6 \text{ s}$  pro Jahr und einer Luminosität von  $L = 5 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  kann so eine Ereignisrate von 10000 pro Jahr für  $J/\Psi$  mit  $p_T > 3 \text{ GeV}/c$  und 2300/Jahr für  $\Upsilon$  erreicht werden. Zum Vergleich würde man ohne den TRD Trigger bei einer minimum bias Rate von 20 Hz nur ca. 2500/Jahr  $J/\Psi$  und etwa 160/Jahr  $\Upsilon$  finden [Mah01].

#### 3.3.1 Aufbau des Transition Radiation Detektors

Der TRD ist im Abstand von 2,9 m bis 3,7 m von der Strahlachse in den *Space-frame*, einem geschweißten Aluminiumgitterrahmen, integriert. Er ist etwa 7 m lang und besteht aus 540 eigenständigen Subdetektoren, welche sich auf 18 um die Strahlachse liegende Supermodule mit jeweils 5 Stacks von 6 übereinander liegenden Modulen aufteilen. Der gesamte Detektor wird etwa 21 Tonnen schwer sein. Die größte Einzelkammer ist 145 cm lang, 115 cm breit und 13 cm hoch. Mit einer Detektorfläche von etwa  $715 \text{ m}^2$  und einem Gasvolumen von  $\approx 27 \text{ m}^3$  ist er einer der größten TRDs die je gebaut wurden. Er deckt einen aufeinander-

derfolgenden Rapiditätsbereich von  $\eta < |0,9|$  ab. Die Strahlungslänge der sechs Detektorschichten beträgt  $X/X_0 = 14,3\%$ . Abbildung 3.3 zeigt eine Computer-

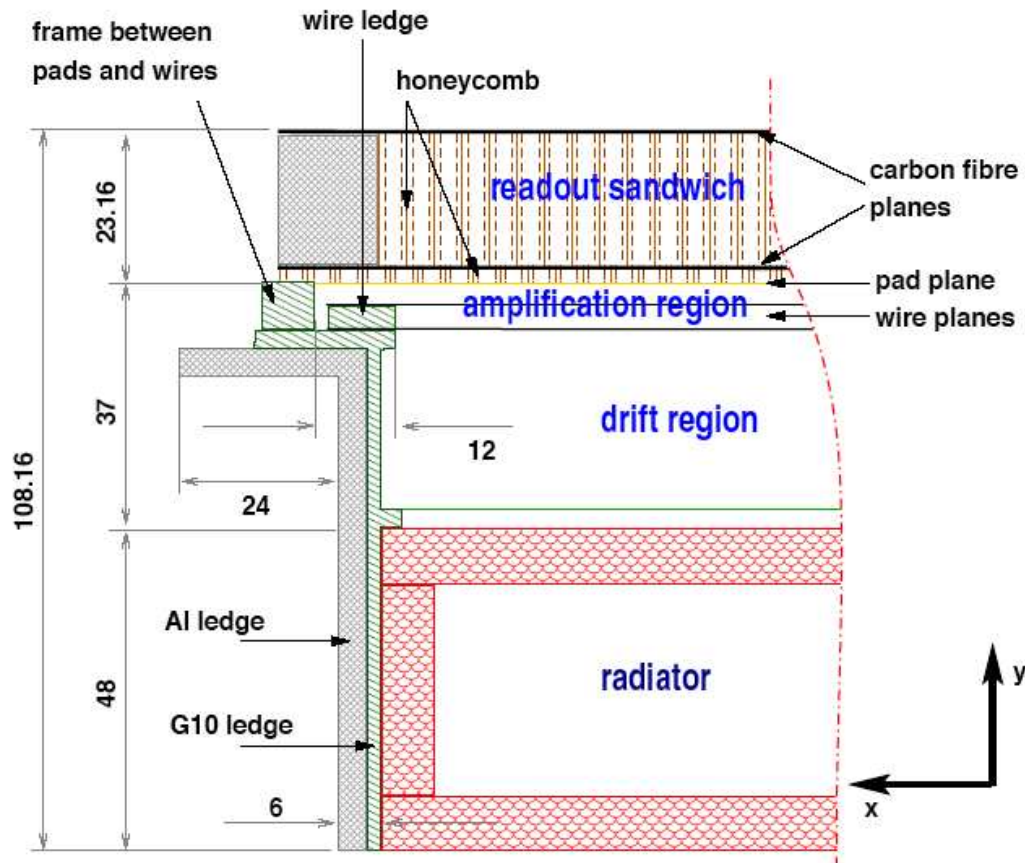


**Abbildung 3.3:** TRD Detektor im Spaceframe [Wes01]

grafik des Spaceframes mit dem TRD Detektor.

Die einzelnen Detektorkammern bestehen aus einem Radiator und einer anschließenden Driftkammer mit Padaslese (siehe Abbildung 3.4). Als Radiatormaterial verwendet man Polypropylenfasermatten, welche in ein Rohacell HF71 Chassis eingebettet sind. Da der Radiator auch wesentlich zur mechanischen Stabilität des Detektors beitragen soll, ist er zusätzlich durch Kohlefaserlaminat verstärkt. Kohlefaser eignet sich hierzu besonders aufgrund ihrer geringen Dicke und somit kleiner Strahlungsabsorbtion. Auf der Kohlefaserlaminatschicht befindet sich eine dünne, mit Aluminium bedampfte, Mylarfolie. Die Aluminiumschicht dient als

Kathode der Driftkammer und liegt auf einem Potential von  $-2100$  V (Abbildung 3.5, rechts). Hinter dem Radiator befindet sich die Drahtkammer, die mit einem



**Abbildung 3.4:** Aufbau einer TRD Kammer im Querschnitt [Mah04].

Xe/CO<sub>2</sub> Gasgemisch (85 % Xe, 15 % CO<sub>2</sub>) befüllt ist.

Die Kammer unterteilt sich in einen 3 cm großen Driftbereich und einen 0,7 cm großen Verstärkungsbereich. Der Driftbereich schließt mit der Kathodendrahtebene ab, die auf einem Potential von 0 V liegt. Im Driftbereich liegt also ein 700 V/cm starkes Feld an, das zu einer Elektronendriftgeschwindigkeit von 1,5 cm/μs führt. In einem Abstand von 3,5 mm über der Kathodendrahtebene befinden sich die Anodendrähte, an welchen 1400 V anliegen. Die im Abstand von weiteren 3,5 mm darüberliegende Padplane ist wieder auf 0 V Potential. Im Verstärkungsbereich erreicht man Gasverstärkungen von etwa 5000.

Die Padplanes aller Kammern zusammen besteht aus 1,2 Millionen Pads, welche einzeln ausgelesen werden. Direkt auf den Kammern befindet sich eine vorfiltern-

de Elektronik, die Tracklets<sup>9</sup> berechnet und somit Tracking und Triggersignalerzeugung ermöglicht. Über die Driftzeit werden die Pads in 15 Zeitbins unterteilt ausgelesen, woraus sich 17 Millionen Auslesepixel ergeben. Es resultiert eine Datenrate von 15 TB/s für die Triggerverarbeitung auf den Ausleseboards. 216 GB/s werden an die *Global Tracking Unit* weitergegeben, die die Triggerinformationen und Tracklets der einzelnen Kammern zusammenfügt und eine Trackinginformation generiert. 1,8 GB/s werden an den ALICE DDL<sup>10</sup> weitergegeben. Der Detektor nimmt etwa 60 kW elektrischer Leistung auf.

### 3.3.2 Das TRD-Prinzip

Ein geladenes Teilchen, welches sich durch Materialschichten mit unterschiedlichem Brechungsindex bewegt, erzeugt dabei Übergangsstrahlung. Ist dieses Teilchen ein Elektron mit ultrarelativistischen Energien ( $p \leq 100 \text{ GeV}/c$ ), also Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit, so entsteht Übergangsstrahlung mit Röntgenenergien ( $\approx 10 \text{ keV}$ ). Für die Energie der Übergangsstrahlung beim Durchgang eines Teilchens gilt [Dol93]:

$$W_{TR} = \frac{1}{3} \alpha \omega_f \gamma = 2,43 \cdot 10^{-3} \omega_f \gamma, \quad (3.1)$$

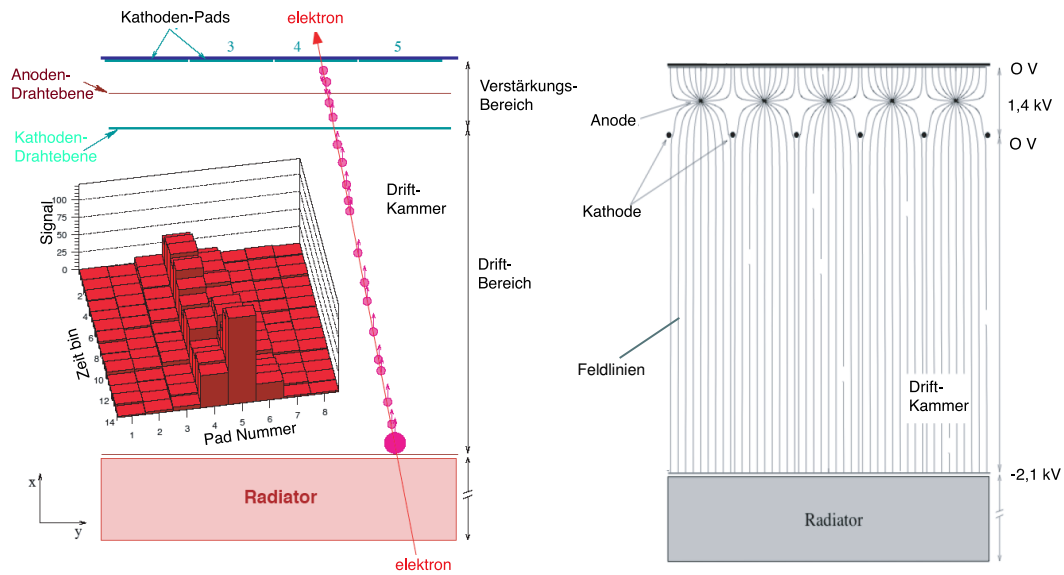
mit der Plasmafrequenz des dichteren Materials  $\omega_f$ , der *Feinstrukturkonstante*  $\alpha = \frac{1}{137}$  und  $\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$ .

Die Energie der Übergangsstrahlung nimmt mit zunehmenden Teilchenmassen, also sinkendem  $\gamma$  ab. Dieser Effekt hilft dabei, geladene Pionen ( $m_{\pi^\pm} = 139,6 \text{ MeV}$  [PAR04]) von Elektronen ( $m_e = 511 \text{ keV}$  [PAR04]) zu unterscheiden.

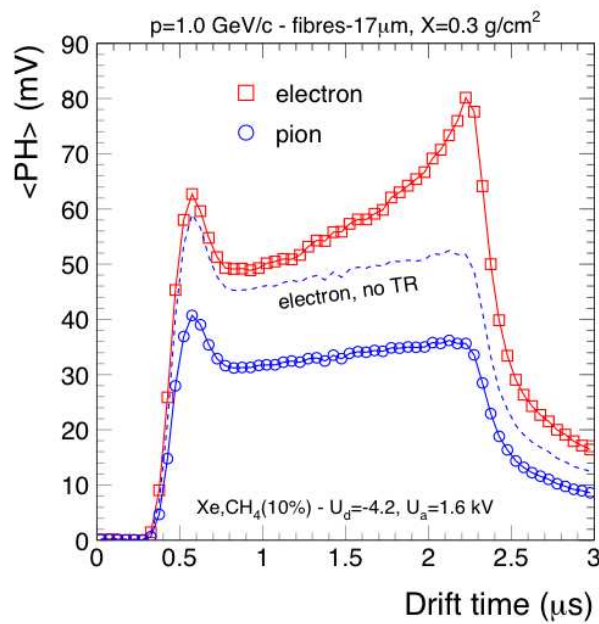
Aufgrund von einem Schwellenverhalten der Übergangsstrahlung werden TR-Photonen erst bei  $\gamma \approx 1000$  erzeugt. Hierzu werden Elektronen mit einem Mindestimpuls von  $0,5 \text{ GeV}/c$  benötigt. Pionen würden aufgrund ihrer höheren Masse einen Impuls von  $\approx 140 \text{ GeV}/c$  benötigen um Übergangsstrahlung zu erzeugen. Im TRD wird die Übergangsstrahlung daher nur von den Elektronen erzeugt. Der große Pionenhintergrund kann durch die fehlende Übergangsstrahlung beim Flug durch den Radiator bei der Datenauswertung von den Elektronen separiert werden. Das geladene Teilchen und auch die fast parallel emittierte Übergangs-

<sup>9</sup>Man bezeichnet die rekonstruierte Spur eines Teilchens durch eine Auslesekammer als *Tracklet*. Kombiniert man die Tracklets von möglichst vielen hintereinanderliegenden Kammern, so kann man eine Teilchenspur rekonstruieren und ein Triggersignal erzeugen.

<sup>10</sup>Detector Data Link



**Abbildung 3.5:** Links: Schematische Darstellung des TRD Prinzips. Gezeigt ist ein Querschnitt eines TRD-Moduls. Ein Elektron passiert die Kammer und hinterläßt eine Ionisationsspur. Eingebettet ist ein Plot der ausgelesenen Signale auf den Pads. Die Signalhöhe ist als Funktion der Driftzeit und der Padnummer aufgetragen und gibt so Informationen für das Tracking. Rechts: Feldlinienverlauf im Modul [TRD01]



**Abbildung 3.6:** Gemitteltetes Driftspektrum von Elektronen und Pionen im TRD [TRD01]. Beim Elektron ist bei großen Driftzeiten ein Peak im Pulshöhenspektrum zu erkennen, welcher durch von der Übergangstrahlung im Gas erzeugten Elektronenclustern hervorgerufen wird.

strahlung aus dem Radiator ionisieren das Gasgemisch in der Auslesekammer. Die in Abbildung 3.5 (links) gezeigten, negativ geladenen Cluster beginnen auf Grund des elektrischen Feldes (siehe Abbildung 3.5, rechts), mit einer Geschwindigkeit von  $1,5 \text{ cm}/\mu\text{s}$  in Richtung Padplane zu driften. In der Verstärkungszone gelangen die Cluster parallel zu den Feldlinien auf die Anodendrähte und induzieren aufgrund von Spiegelladungen ein Signal auf die Pads der Padplane.

Abbildung 3.6 zeigt ein von der Padplane gemittelt ausgelesenes Driftspektrum für Pionen und Elektronen. Nach einer Driftzeit von etwa  $0,6 \mu\text{s}$  ist ein Peak zu erkennen, da hier in der Verstärkungszone erzeugte Elektronencluster von beiden Seiten der Anodendrähte von diesen angezogen werden und gleichzeitig nachgewiesen werden.

Die Überhöhung bei etwa  $2,3 \mu\text{s}$  ist nur bei den Elektronen zu erkennen. Er entsteht durch den von der Übergangsstrahlung erzeugten Cluster, welcher nahe am Radiator entsteht, und daher eine lange Driftzeit bis zum Auslesepads benötigt. Aufgrund der fehlenden Übergangsstrahlung ist er bei den Pionen nicht zu erkennen.

In der Abbildung ist zusätzlich eine Berechnung eines Elektronenspektrums ohne Übergangsstrahlung gestrichelt eingezeichnet. Man erkennt, dass auch hier eine Trennung von Elektronen und Pionen durch Energieverlustmessungen prinzipiell möglich ist (in der TPC (Abschnitt 3.2) wird dies auch so getan). Die Separationsmöglichkeiten werden durch einen Radiator jedoch um nahezu einen Faktor 2 verbessert. Das Driftspektrum ist also eine Folge der Überlagerung der Ionisationseffekte von Elektron bzw. Pion und der Übergangsstrahlung im Gasvolumen.



# 4. Das Wire-Test-Device

## 4.1 Aufgaben und Zielsetzung

Das elektrische Feld in einer TRD-Auslekammer (siehe Abbildung 3.5, rechts) hängt von der Beschaffenheit und Position der Anoden- und Kathodendrähte ab. Je dünner ein Draht ist, desto stärker ist das elektrische Feld in seiner Umgebung [Tip98]:

$$E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}. \quad (4.1)$$

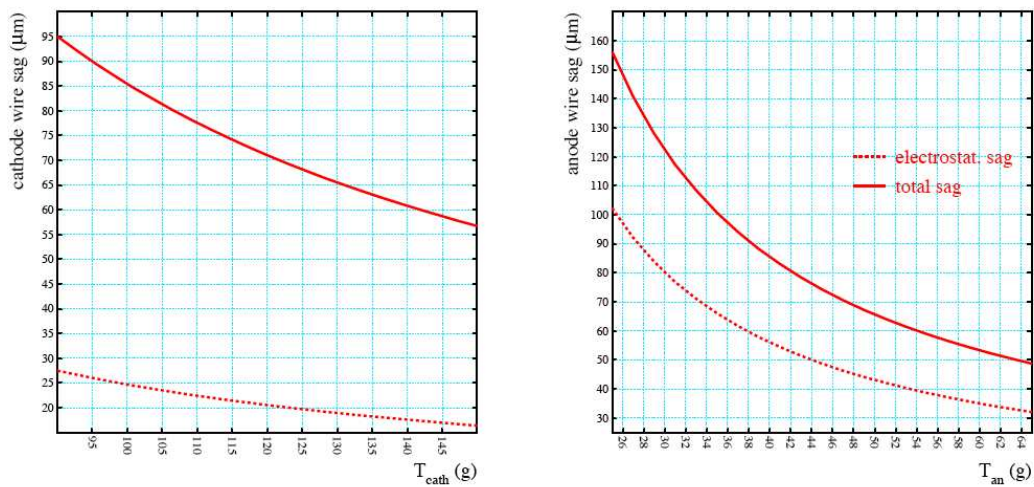
Hier ist  $\lambda = \frac{Q}{L}$  die Linienladungsdichte,  $L$  die Drahtlänge,  $r$  der Abstand vom Drahtmittelpunkt und  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ A}^2\text{s}^2/\text{Nm}^2$  ist die elektrische Feldkonstante. Die Anodendrähte bestehen aus goldplattiertem Wolfram mit einer Dichte von  $19289,579 \text{ kg/m}^3$  [Gmb05] und haben einen Durchmesser von  $20 \mu\text{m}$  [TRD01]. Die Kathodendrähte bestehen aus einer Kupfer-Beryllium Legierung mit einer Dichte von  $8230,22 \text{ kg/m}^3$  [Gmb05] und einem Durchmesser von  $75 \mu\text{m}$  [TRD01].

Da die Multiplikationseigenschaften der Gaskammer und auch das Driftverhalten der Elektronencluster in der Kammer entscheidend von der Beschaffenheit des elektrischen Feldes abhängt, müssen die felderzeugenden Drähte hohen Anforderungen entsprechen. Um ein möglichst homogenes Feld und somit gleichmäßige Driftzeiten und Teilchenverstärkungen über eine ganze Kammerbreite zu erzeugen, sollen die Drahtabstände sehr regelmäßig sein (siehe Abbildung 4.2). Ein fehlender oder verschobener Draht muss daher frühzeitig erkannt werden. Damit das Feld auch zur Mitte der Kammer hin gleichmäßig bleibt, ist es auch wichtig, die Spannung der Drähte auf Abweichungen vom Normwert zu überprüfen.

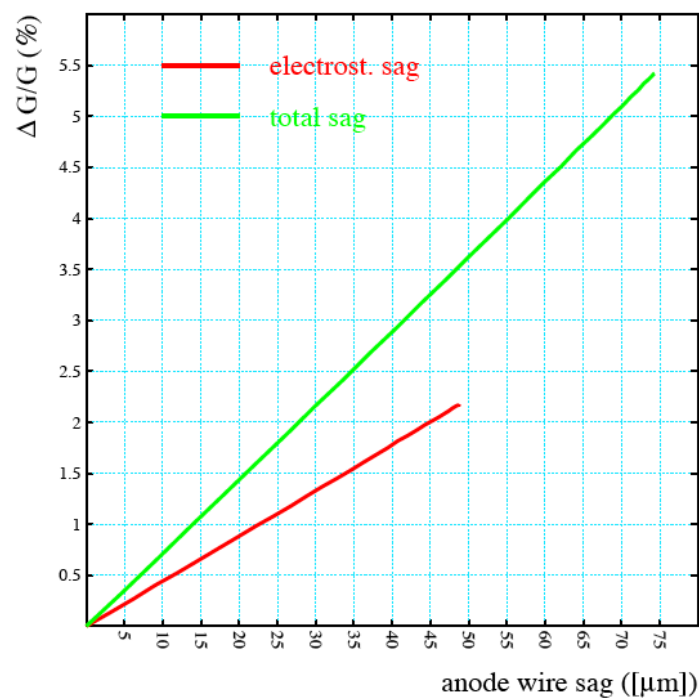
Ein defekter oder fehlender Draht wäre auch schadhaft für die Trackingfähigkeiten der Kammer. Ein gerissener Anodendraht könnte hingegen einen Kurzschluss mit den Kathoden erzeugen.

Um die Anodendrähte in Position zu halten, werden sie mit einer Sollspannung von  $0,45 \text{ N}$  auf die Kammer geklebt. Die dickeren Kathodendrähte werden mit  $1,2 \text{ N}$  gespannt (siehe Abbildung 4.1).

Zur Qualitätskontrolle sollen die im TRD verwendeten Drähte auf Spannung



**Abbildung 4.1:** Dargestellt ist die Abhängigkeit des Drahtdurchhangs zur Drahtspannung für Anoden- und Kathodendrähte. Als Kompromiss zwischen mechanischer Stabilität und minimalem Durchhang sind die Anodendrähte mit 0,45 N und die dickeren Kathodendrähte mit 1,2 N gespannt [Mah04].



**Abbildung 4.2:** Gezeigt ist der im wesentlichen lineare Zusammenhang zwischen Drahtdurchhang und Gasverstärkungsänderung [Mah04].

und Position auf der Kammer getestet werden. Bei früheren Experimenten wurden die Drahtspannung mittels eines manuell zu bedienenden Apparats geprüft. Das *Wire-Stretch-Meter Model WSM-660* [Loh95] als Nachfolger des *NE-660A* [Con96] wurde für das HADES<sup>1</sup> Experiment an der GSI in Darmstadt entwickelt [Adl05]. Mit einem Stiftinstrument muss manuell ein elektrischer Kontakt zum Draht aufgebaut werden. Ein verbundener Apparat misst die Induktion des wechselstromdurchflossenen schwingenden Drahtes im Magnetfeld. Aus Resonanzschwingungen wird die mechanische Spannung des Drahtes errechnet [Con96]. Bei diesem Verfahren muss jedoch, um einen elektrischen Kontakt herzustellen, jeder Draht berührt werden. Dabei ist eine Beschädigung des Drahtes oder eine Veränderung der Drahtspannung nicht auszuschließen. Da die Drähte nicht elastisch sind, führt jede zu starke einwirkende Kraft zu einer Veränderung der Drahtlänge und damit der Spannung. Die Drahtpositionen wurden bislang nicht vermessen.

Bei dieser Methode konnten sich auch sehr schnell Konzentrationsfehler einschleichen, da es schon schwierig ist, die sehr dünnen Drähte überhaupt zu sehen. Außerdem ist diese Art der Messung sehr zeit- und personalintensiv:

Die Vermessung eines einzelnen Drahtes dauert etwa 30 Sekunden, wenn die Person geübt ist [Pet04]. Auf den 540 TRD-Kammern sind insgesamt 140000 Anoden- und 280000 Kathodendrähte installiert. Es würde sich eine Gesamtmesszeit von rund 422 Arbeitstagen á 8 Stunden ergeben.

Das entwickelte Wire-Test-Device misst Spannung und Position aller Anoden und Kathodendrähte einer TRD-Driftkammer berührungsfrei und automatisch. Pro Kammer ergibt sich ein Arbeitsaufwand von etwa 5 Minuten. Für alle 540 Kammern würde man etwa 6 Tage á 8 Stunden benötigen.

Abgesehen von den zeitlichen Vorteilen sind die Messergebnisse um ein vielfaches genauer und zuverlässiger als bei der manuellen Messung (siehe Messergebnisse Abschnitt 6.1). Die kostenbedachte Bauweise macht die Maschine schnell rentabel. Aufgrund der vielen Vorteile des Wire-Test-Device ist es bereits in den Detektorlaboratorien der Universität Heidelberg und des NIPNE<sup>2</sup> Bukarest im Einsatz. Maschinen für die anderen TRD-Produktionsorte (Darmstadt (GSI), Dubna (JINR) und Frankfurt (IKF)) sind in Vorbereitung.

---

<sup>1</sup>High Acceptance Di-Elektron Spectrometer

<sup>2</sup>National Institute of Physics and Nuclear Engineering

## 4.2 Das Testprinzip

Zur Produktionsqualitätskontrolle der TRD-Kammern sollte eine Methode entwickelt werden, um Spannung und Position der dünnen Drähten möglichst schonend für das Drahtmaterial zu messen. Daher wurde eine kontaktlose, optische Messung vorgeschlagen. Die Idee einer solchen Messung wurde schon beim PHENIX Experiment am RHIC (Brookhaven, USA) umgesetzt und lieferte die Vorlage für unsere Entwicklungsarbeit.

Ein optischer Sensor misst Reflexionen von Oberflächen. Er ist in der Lage, sowohl Licht zu senden als auch zu empfangen und in ein elektrisches Signal umzusetzen. Die Stärke des elektrischen Signals gibt Aufschluss über die Reflexion in der Fokalebene des Sensors (vgl. Abbildung 4.3). Das Prinzip des Messverfahrens ist es nun, die Drahtebenen der Detektorkammer in den Fokus des Sensors zu bringen und quer zur Drahtrichtung über die Kammer zu bewegen (siehe Abbildung 4.4).

Die Steuerung der am BNL entwickelten Maschine erfolgte mit einem Joypad im wesentlichen manuell. Das bedeutet das Anfahren und Vermessen eines Drahtes war die Aufgabe eines Menschen. Im Gegensatz dazu wird die neu entwickelte Maschine vollautomatisch durch ein LabVIEW Programm mit Data Acquisition (DAQ) Hardware gesteuert.

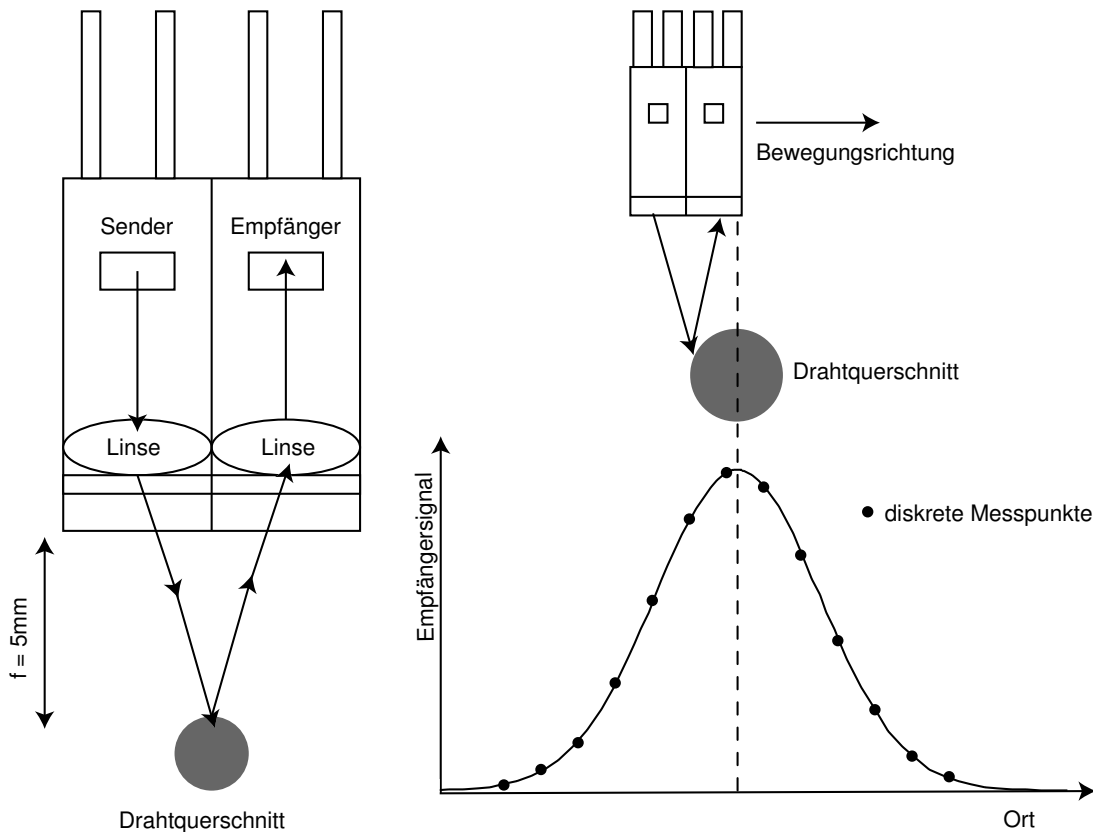
### 4.2.1 Messung der Drahtpositionen

Die Positionsbestimmung erfolgt über ein magnetisches Messsystem. Ein am Messkopf angebrachter Magnetsensor wird über ein mit einer sinusförmigen Magnetisierung versehenes Magnetband bewegt und liest diese aus. Im Sensor gibt es zwei Auslesekanäle, welche bezüglich der Magnetisierung auf dem Band um  $90^\circ$  phasenverschoben sind. Eine Elektronik im Sensor erzeugt aus der ausgelesenen Sinuskurve ein TTL<sup>3</sup>-Rechtecksignal. Ist die Schaltschwelle erreicht, ändert sich der Zustand zwischen TTL-high und TTL-low. Abbildung 4.5 zeigt das phasenverschobene Ausgangssignal der beiden Kanäle des Sensorkopfes. Die beiden Signale werden in einem externen Quadratur-Dekoder so zusammengefügt, dass der in Abbildung 4.5 zu sehende, untere Signalzug entsteht. Man erreicht so eine Vervierfachung der Ortsauflösung.

Jeder Puls (Änderung von TTL-low nach TTL-high) entspricht einem bestimm-

---

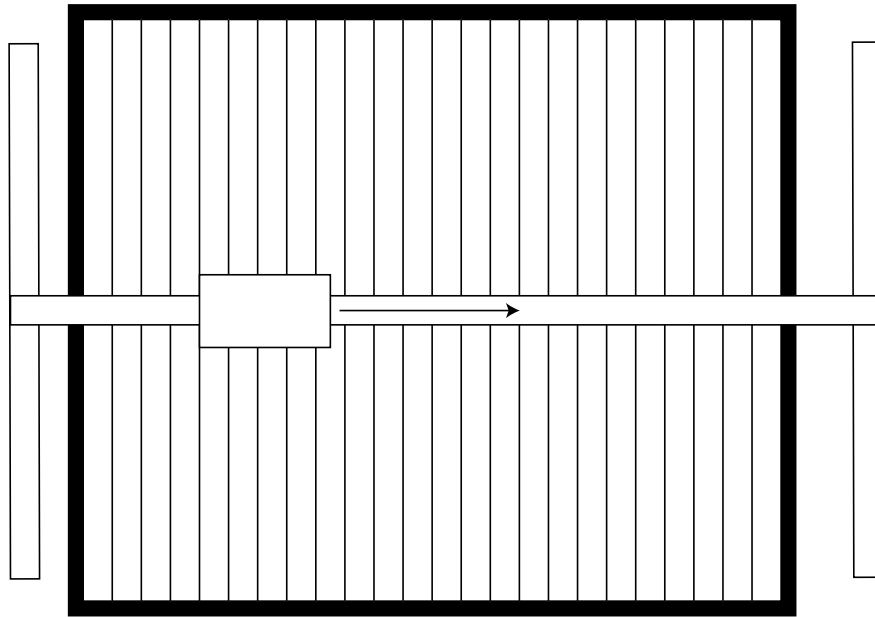
<sup>3</sup>Transistor-Transistor Logik, Ausgabe ist eine Rechteckspannung mit zwei möglichen Zuständen: eine logische 1 entspricht hier einem 5 V Signal, eine logische 0 einem 0 V Signal



**Abbildung 4.3:** Funktionsweise des optischen Sensors. Im Sensor befindet sich Sender und Empfänger sowie eine Linse. Wird ein reflektierender Draht in den Fokus der Optik gebracht, läßt sich ein wachsendes Spannungssignal am Ausgang des Sensors messen.

ten verfahrenen Weg (hier: je nach Maschine  $2,5 \mu\text{m}$  oder  $10 \mu\text{m}$ ). Außerdem kann durch einfache Analyse der Kanäle A und B eine Richtungsinformation generiert werden. Diese ist vor allem bei kleinen Vibrationen sinnvoll, da mit dieser der dem Quadratur-Dekoder nachfolgende Zähler so gesteuert werden kann, dass er nur Pulse bei Bewegung in positiver x-Richtung zählt. Ohne diese Einstellung erhält man unweigerlich eine zu große gemessene Pulszahl und somit eine nicht brauchbare, ungenaue Messung.

Zeichnet man die Spannungsamplituden am Sensor zusammen mit einer Positionsinformation aus dem Quadratur-Dekoder auf, kann man die Position der Drähte bestimmen, indem man die Maxima im Sensoramplitudenspektrum sucht (siehe Abbildung 4.3).



**Abbildung 4.4:** Bewegungsrichtung des Messkopfes in der Aufsicht. Der Messkopf bewegt sich rechtwinklig zur Drahtrichtung.

### 4.2.2 Messung der Drahtspannungen

Zur Spannungsmessung wird der Sensor über einen Draht positioniert. Wird nun der Draht durch einen kurzen Luftstoß angeregt, so kann man die Schwingung des Drahtes am Ausgang des Sensors als einen oszillierenden Spannungsverlauf auslesen. Mithilfe einer Fouriertransformation kann man aus dem Amplitudenverlauf die Frequenzen der Schwingung berechnen. Unter Hinzunahme von Drahtdurchmesser, Dichte und Länge kann die mechanische Spannung des Drahtes bestimmt werden: Für die Schwingungsmoden einer Saite gilt:

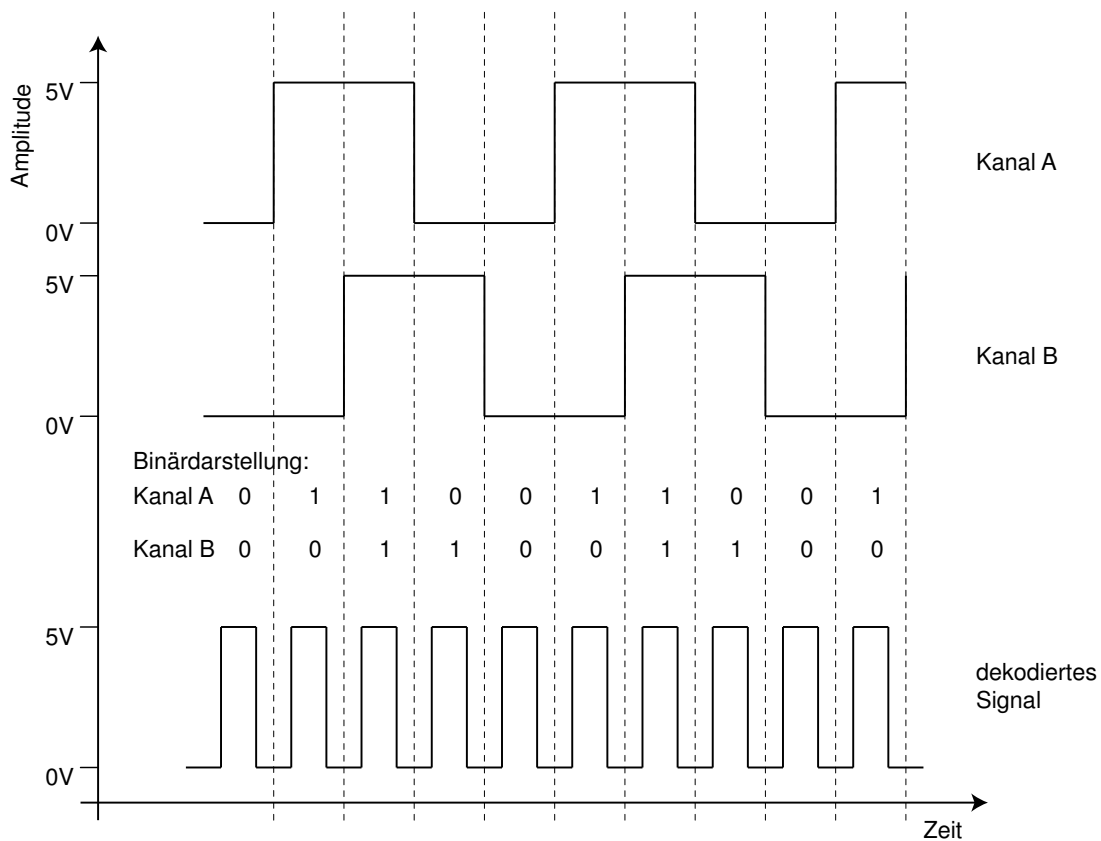
$$l = n \cdot \frac{\lambda}{2},$$

mit der Länge der Saite  $l$ , der  $n$ -ten Oberschwingung und der Wellenlänge  $\lambda$ . Schreibt man für die Frequenz  $f$  und die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  einer Transversalwelle entlang einer Saite

$$f = \frac{v}{\lambda},$$

so folgt leicht

$$f = \frac{n \cdot v}{2l}. \tag{4.2}$$



**Abbildung 4.5:** Funktionsweise der Positionsbestimmung mit dem magnetischen Messsystem POSIMAG der Firma ASM Sensors.

Für  $v$  gilt [ZV98]

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}},$$

mit der Spannungskraft  $F$  und dem Saitenquerschnitt  $A$ . Setzt man dies in Formel (4.2) ein, so erhält man

$$f = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}}$$

oder für die Grundschiwingung der Saite ( $n = 1$ )

$$f_0 = \frac{1}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot A}}$$

und somit sofort

$$F = 4f_0^2 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \quad (4.3)$$

für die Spannungskraft der Saite mit dem Radius  $r$ .

Um die Spannung zu bestimmen, benötigt man also die Schwingungsfrequenz des Drahtes und die bekannten Materialparameter Länge, Dichte und Durchmesser.

### Leistungsspektrum

Um aus einer beobachteten Oszillation deren Frequenz zu bestimmen verwendet man eine Fourieranalyse. Eine Fouriertransformation kann eine Funktion aus dem Zeitraum  $f(t)$  in den Frequenzraum  $g(\omega)$  überführen [Puc98]:

$$FT(f) = g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dt f(t) e^{i\omega t}. \quad (4.4)$$

Hier ist  $t$  die Zeitvariable und  $\omega$  die Frequenzvariable.

Für die Rücktransformation gilt

$$FT(g) = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega g(\omega) e^{-i\omega t}. \quad (4.5)$$

Da die Messungen keine kontinuierliche Funktion, sondern eine diskrete, äquidistante Folge von Messpunkten liefern, gilt

$$g(\omega) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{f_i}{N} \cos \left( 2\pi \cdot i \cdot \frac{\omega}{N} \right) \right) - i \sum_{i=1}^N \left( \frac{f_i}{N} \sin \left( 2\pi \cdot i \cdot \frac{\omega}{N} \right) \right). \quad (4.6)$$

Um dies mit dem Computer zur Laufzeit zu berechnen, existiert ein Verfahren, welches auf einem *divide-and-conquer*<sup>4</sup>-Algorithmus basiert. Die Idee eines jeden divide-and conquer Algorithmus ist es, die Zahl der notwendigen Rechenschritte zu reduzieren, in dem man die Datenmenge iterativ in zwei etwa gleich große Teile aufteilt, auf denen man das Problem separat voneinander löst. Aus den Lösungen der Teilprobleme kann eine Lösung des Gesamtproblems gefunden werden.

Die Messungen liefern  $N$  Datenpunkte, für die  $N$  Beiträge zu berechnen sind ( $N$  Sinus- und Cosinusberechnungen). Der Rechenaufwand ist daher  $\mathcal{O}(N^2)$ . Mit dem

---

<sup>4</sup>engl. divide and conquer = teile und herrsche



divide-and-conquer Verfahren kann man den Aufwand auf  $\mathcal{O}(N \log_2 N)$  Berechnungsschritte senken. Wendet man das Verfahren auf die Fouriertransformation eines Datensatzes diskreter Messpunkte an, so kann man schreiben:

$$\begin{aligned}
 g(\omega) &= \sum_{j=0}^{N-1} e^{2i\pi j\omega/N} f_j \\
 &= \sum_{j=0}^{(N/2)-1} e^{2i\pi j\omega/(N/2)} f_{2j} + W^\omega \sum_{j=0}^{(N/2)-1} e^{2i\pi j\omega/(N/2)} f_{2j+1} \\
 &= g(\omega)^g + W^\omega \cdot g(\omega)^u,
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

wobei  $g$  für die geraden und  $u$  für die ungeraden  $t$  steht und  $W = e^{2i\pi/N}$  ist. Da nur positive, nichtimaginäre Teile berücksichtigt werden sollen, verwendet man das Leistungsspektrum:

$$LS = \frac{FFT^*(\text{Signal}) \cdot FFT(\text{Signal})}{N^2}. \tag{4.8}$$

Hier ist  $FFT$  die Fast-Fourier-Transformation,  $FFT^*$  das konjugiert komplexe der Fast-Fourier-Transformation und  $N$  die Zahl der Messpunkte in den untersuchten Daten.

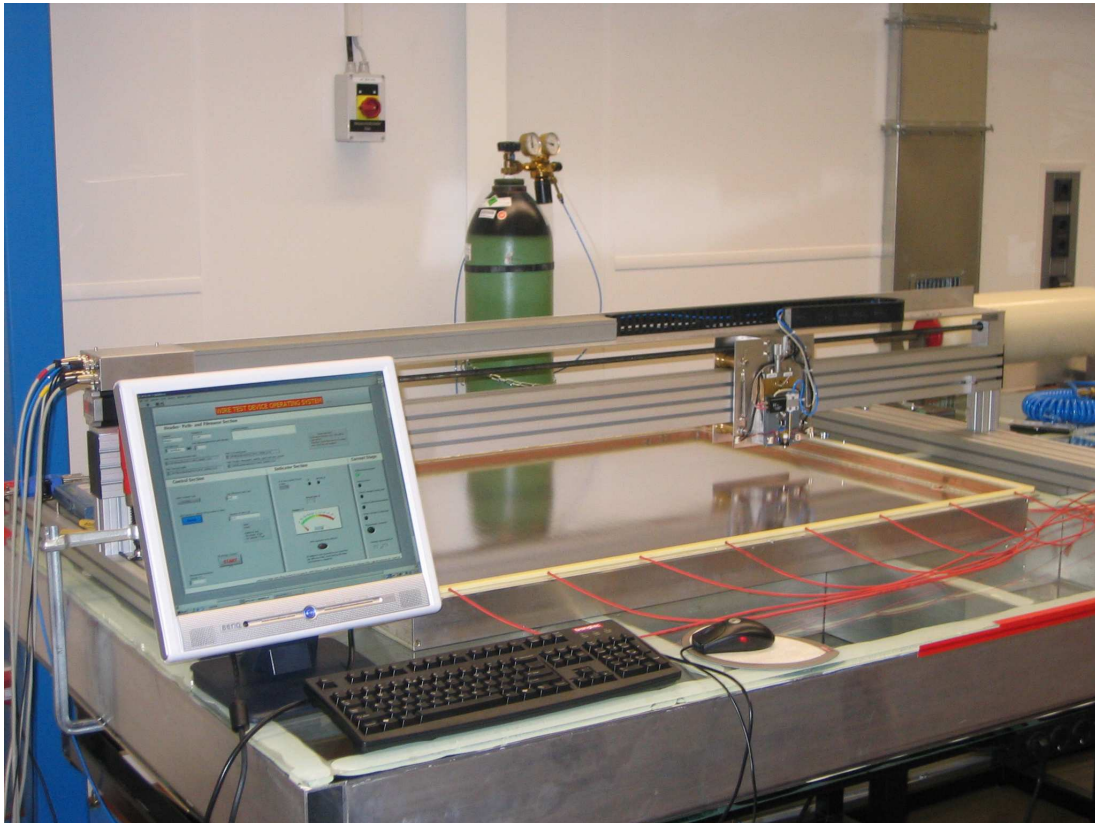
Die x-Achsenwerte der Peaks im Leistungsspektrum entsprechen so den in der Drahtschwingung enthaltenen Frequenzen.

## 4.3 Realisierung der Messapparatur

Aus den vorhergehenden Überlegungen zur Messmethodik wurde eine Messapparatur entwickelt. In den folgenden Abschnitten wird die mechanische und elektrotechnische Umsetzung sowie das Zusammenspiel der Komponenten genauer beschrieben. Abbildung 4.6 zeigt das Wire-Test-Device im Heidelberger Detektorlabor im Überblick.

### 4.3.1 Mechanischer Aufbau

Die Maschine besteht aus einem Trägergerüst aus einem 2000 mm langen, gezogenen KANYA Aluminiumprofil und einem darauf verfahrbaren Schlitten, auf dem die Messgeräte angebracht sind.



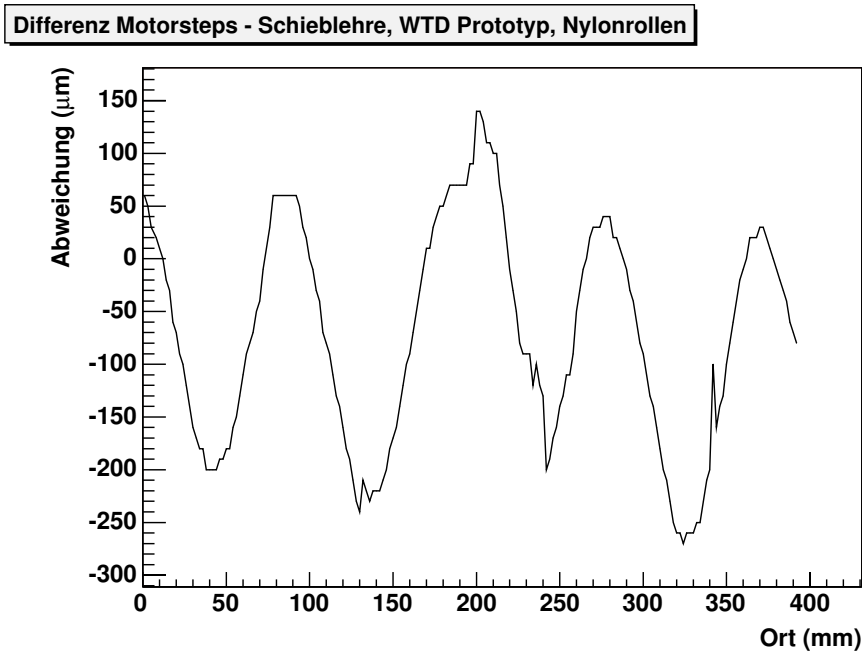
**Abbildung 4.6:** Foto des Wire-Test-Device bei der Messung einer TRD-Kammer. Auf dem Display ist der aktuelle Betriebszustand zu erkennen. Im Hintergrund ist die Stickstoffflasche zu sehen, die den Gasdruck für die Drahtanregung liefert.

Aus Kostengründen wurde auf eine spezielle Linearführung für den Messgeräteträger, wie sie für Geräte mit solchen Präzisionsanforderungen eigentlich üblich wäre, verzichtet. Das Aluminiumprofil in Zusammenspiel mit sehr genau gefertigten Messinglaufrollen<sup>5</sup> (radiale Abweichung  $< 10 \mu\text{m}$ ) am Messgeräteträger kann, wie die Messergebnisse gezeigt haben, diese Aufgabe sehr gut erfüllen.

Die zunächst für den Prototypen verwendeten Nylonrollen waren zu ungenau. In Abbildung 4.7 ist die Differenz der durch die an den Schrittmotor übergebenen Pulse erwarteten Fahrstrecke zur tatsächlichen Fahrstrecke, gemessen mit einer Digitalschieblehre (Genauigkeit:  $\pm 10 \mu\text{m}$ ) bei Verwendung der Nylonrol-

---

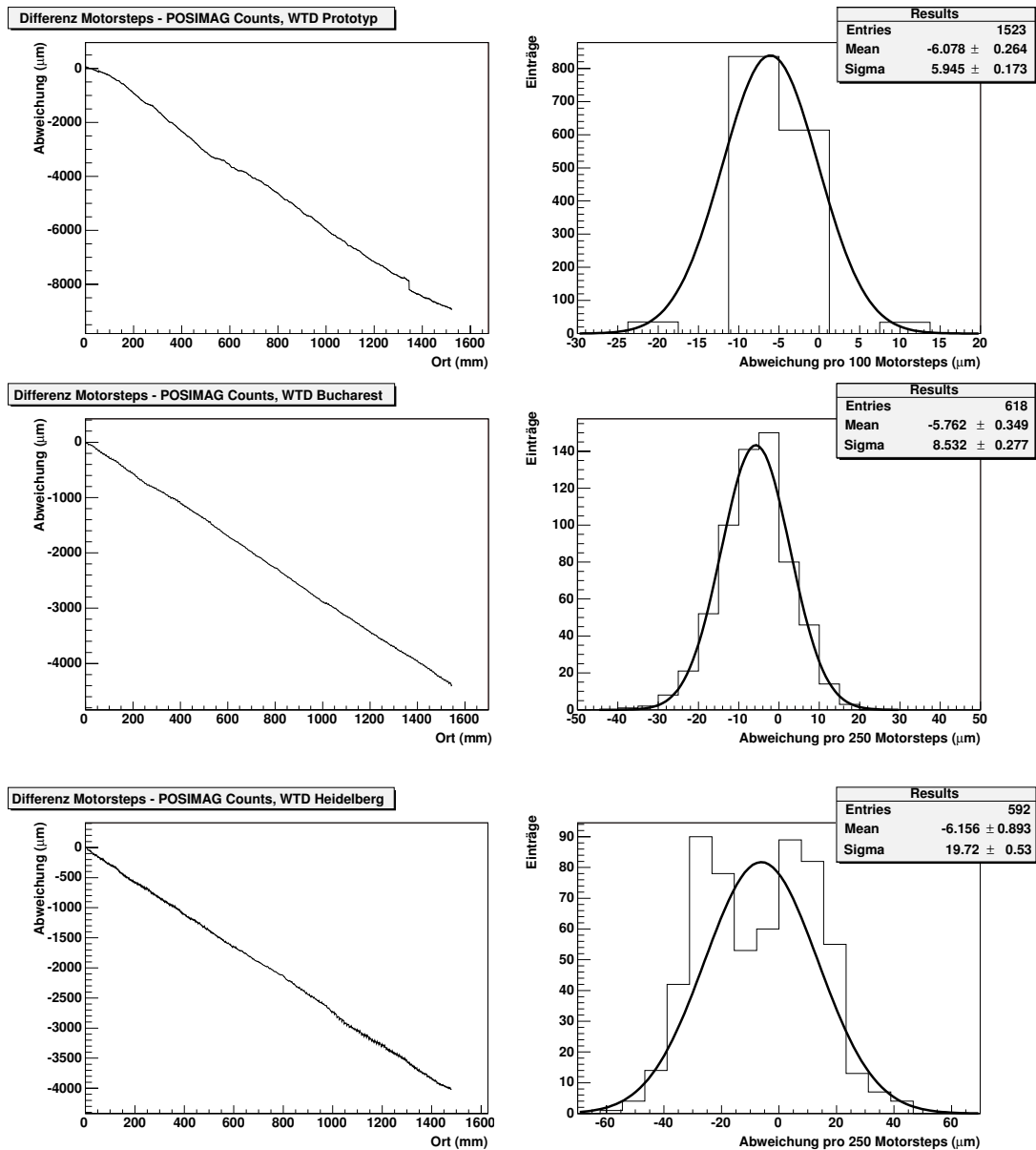
<sup>5</sup>Das Hauptproblem bei der Fertigung der Laufrollen ist, dass diese in der Drehmaschine einmal umgespannt werden müssen und so die Referenz der Achse verloren geht und wiedergefunden werden muss.



**Abbildung 4.7:** Differenz der Schritte des Motors zur mit einer Schieblehre gemessenen Fahrtstrecke. Ein von ungenau gefertigten Nylonrollen hervorgerufenen periodisches Verhalten ist erkennbar und motivierte zur Anfertigung besser zu verarbeitender Messingrollen.

len aufgetragen. Es ist ein periodisches Verhalten zu beobachten. Die Länge der Periodizität entspricht gerade dem Umfang der Laufrollen. Man erkennt also in diesem Plot die Genauigkeit der gefertigten Rollen. Die Messergebnisse hier zeigen deutlich, dass die Herstellung neuer Rollen, aus leichter und genauer zu bearbeitendem Messing, sinnvoll ist. Die aus Messing gefertigten Rollen lassen kein solches periodisches Verhalten erkennen (vgl. Abbildungen 4.8).

Zum Verfahren des Messkopfes wird eine Edelstahlgewindestange mit einer Steigung von 2 mm verwendet. Üblicherweise beträgt die Steigung fertigungsbedingt etwas mehr als den Nennwert [Sto04]. In Abbildung 4.8 ist die Differenz der mit dem Posimag-System (siehe Abschnitt 4.2.1) gemessenen Wegstrecke zur Zahl der an den Motor übergebenen Pulse aufgetragen. Da der Schrittmotor mit den geringen Belastungen durch das Gewicht des Messschlittens und die Reibungskraft der Muttern nahezu unbelastet ist, sind Schrittfehler auszuschließen. Der Graph zeigt also im wesentlichen den Einfluss der Spindelsteigung und der Laufrollen auf die Messgenauigkeit. Bei Tests des Prototypen fiel auf, dass die Steigung der Spindel



**Abbildung 4.8:** Differenz der Schritte des Motors zur mit dem Posimag gemessenen Fahrtstrecke. Zu erkennen ist, dass die verwendeten Gewindestangen eine etwas größere Steigung als die nominellen  $2 \mu\text{m}$  aufweisen.

größer als der nominelle Wert war. Eine Abweichung von 9 mm auf einem Messweg von 1,5 m ist zu beobachten (siehe Abbildung 4.8a). Dies entspricht  $+13 \mu\text{m}$  pro Spindelumdrehung (eine Umdrehung =  $2000 \mu\text{m}$ ) also etwa 6‰. Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurden für die Serienproduktion genauer gearbeitete Gewindestangen gefertigt. Diese haben Abweichungen von etwa +4 mm auf einer Länge von 1500 mm (siehe Abbildung 4.8, mitte und unten). Dies entspricht also etwa  $+5 \mu\text{m}$  Abweichung pro Spindelumdrehung (oder einem Fehler von 2,5‰). Die Spindel wird von einem Schrittmotor (siehe Abschnitt 4.3.2) gedreht um den Messgeräteschlitten zu bewegen. Eine volle Umdrehung des Rotors entspricht 200 Vollschritten (siehe Abschnitt 4.3.2). Im Halbschrittbetrieb (ebenfalls im Abschnitt 4.3.2 behandelt) ist somit rechnerisch eine Ortsauflösung von  $5 \mu\text{m}$  pro Schritt für den Messkopf zu erreichen. Um eine spielfreie Verbindung zwischen Messschlitten und Gewindestange zu erhalten, sind im Schlitten zwei Rotgussmutter mit Trapezgewinde verbaut (siehe Anhang I, Abbildung 8.1B). Zwischen den beiden Muttern befindet sich ein O-Ring aus Gummi. Die Muttern sind gegeneinander leicht verdreht und drücken so gegen die Windungen der Spindel. Der O-Ring nimmt dabei die Kraft auf, die während der Fahrt auf den Schlitten wirkt.

Die Gewindestange selbst ist kupplungslos direkt auf die Achse des Schrittmotors geflanscht. Die andere Seite der Stange liegt in zwei Kugellagern. Die Spindel ist am Ende hinter den Kugellagern durch eine selbstsichernde Mutter gegen axiale Bewegungen gesichert. Dies ist nötig, da der Rotor des Motors in axialer Richtung leicht beweglich ist. Eine Übertragung dieser Bewegung auf den Messschlitten würde unmittelbar Messfehler zur Folge haben.

Der Standfuß der Maschine ist 1000 mm breit und 140 mm hoch. Er dient als Anschlag für eine zu messende Kammer. Für den Benutzer ist es so sehr leicht, die Kammer korrekt unter der Maschine zu positionieren. Diese Funktion impliziert jedoch auch, dass der Fuß sehr genau rechtwinklig zum Fahrbalken justiert sein muss. Würde der Messschlitten leicht schräg über die Drähte fahren, würden Abweichungen der gemessenen Positionen zu höheren Werten hin auftreten<sup>6</sup>

Sämtliche verwendeten Schrauben und Muttern sind aus nichtmagnetischem Edelstahl, um Irritationen des Posimag-Lesekopfes (siehe Abschnitt 4.2.1) zu vermei-

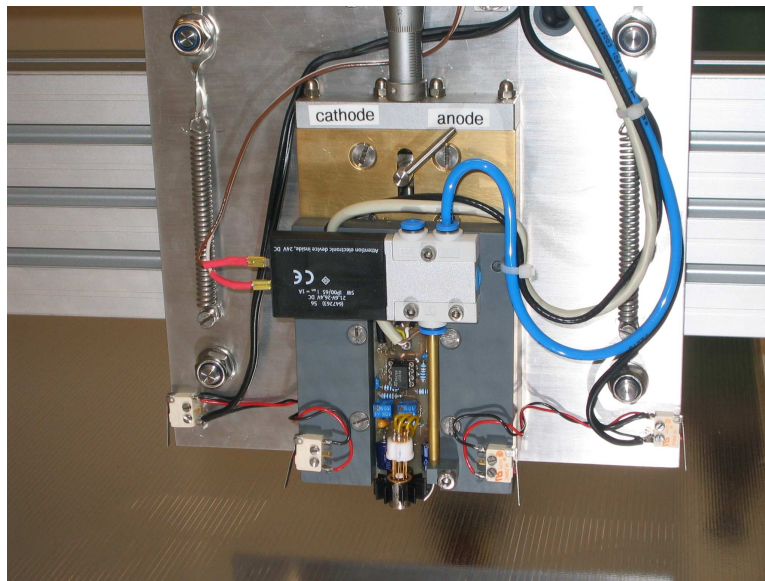
---

<sup>6</sup>Nach dem Satz des Pythagoras wird der Weg zwischen zwei Drähten bei diagonaler Fahrt größer.

den. Technische Zeichnungen des Aufbaus finden sich im Anhang I, Abbildungen 8.1 und 8.2.

### Der Laufwagen und Messgeräteträger

Das Grundgerüst des Laufwagens besteht aus zwei Aluminiumplatten. Vier Messingrollen, zwei oberhalb und zwei unterhalb des Laufprofils, sollen die Fahrt des Schlittens stabilisieren. Die beiden Rollen unterhalb des Laufprofils sind festste-



**Abbildung 4.9:** Nahaufnahme des Messgeräteträgers. Man erkennt den optischen Sensor mit Vorverstärker, das Magnetventil mit Düse und die Verstellmechanik zur Wahl der zu messenden Drahtebene.

hend, die beiden oberhalb gefedert, um eventuelle Unebenheiten auf dem Profil ausgleichen zu können. Die Federung der oberen Rollen wurde gewählt, um Kippbewegungen am Messkopf durch einen kleineren Hebelarm zu minimieren. Da die unteren Rollen feststehen, müssen die Unterseite des Laufprofils und die unteren beiden Rollen besonders eben beschaffen sein, da sie die Grundlage für eine genaue Messkopfpositionierung sind.

Auf dem Laufwagen sind der optische Sensor mit Vorverstärker, das Magnetventil und, auf der Rückseite, der Posimag-Auslesekopf sowie optional eine CCD-Kamera angebracht. Zusätzlich gibt es vier Endschalter (zwei an der Aluminiumgrundplatte und zwei am optischen Sensor), je zwei für die beiden Fahrtrich-

tungen. Da der Fokus des optischen Sensors auf die zu messende Drahtebene eingestellt werden muss, sind Vorverstärker und Sensor auf einen feinjustierbaren Probenträger geschraubt. Mit einer Mikrometerschraube kann der Fokus genau eingestellt werden. Zur schnellen Auswahl von Anoden- oder Kathodendrahtebene kann der Messkopf mit einem kleinen Hebel über eine Polsteinmechanik um 3,5 mm gesenkt und gehoben werden. Abbildung 4.9 zeigt eine Nahaufnahme des Laufwagens mit den beschriebenen Instrumenten. Im Anhang I, Abbildung 8.2, Ausschnitt B ist eine technische Zeichnung des Laufwagens zu finden.

### Hilfsmechanik und Schnittstelle zur Elektronik

Die Kabelführung für die Messinstrumente auf dem Transportschlitten erfolgt über eine Schleppkette auf einem L-Profil oberhalb des Fahrbalkens. An der Motorseite des Systems sind Steckbuchsen für alle elektrischen Verbindungen angebracht. Dadurch ist das System gut transportabel und leicht zu handhaben. Um Verwechslungen beim Anschluss zu verhindern, passt jedes verwendete Kabel nur in eine Buchse oder ist in Übereinstimmung mit der entsprechenden Buchse farblich markiert.

Der Gasdruck wird aus einer Stickstoffflasche ((Stickstoff 5.0<sup>7</sup>) über ein 4 mm dicken Schlauch zur Maschine geführt. Die Verbindung ist auch hier durch eine Schlauchkupplung leicht lösbar.

#### 4.3.2 Der Schrittmotor

Schrittmotoren sind, insbesondere für Positionieraufgaben, eine elegante Möglichkeit bestimmte Wege genau zu verfahren. Verwendet werden Schrittmotoren beispielsweise in Plottern, CD-Playern und Diskettenlaufwerken, also überall dort, wo es auf sehr genaue Positionierung ankommt. Sie sind daher auch für die in dieser Arbeit vorgestellte Anwendung eine gute Wahl.

Ähnlich den Synchronmotoren besteht ein Schrittmotor aus einem beweglichen Teil, dem Rotor, und einem festen, dem Stator. Der Stator besteht aus mehreren Spulen, welche einzeln angesteuert werden können. Das Drehmoment des Rotors

---

<sup>7</sup>Stickstoff mit einer Reinheit von 99,999 Vol. %. Wichtig ist hier aber nur, dass keine Ver-  
schmutzungen wie etwa bei festinstallierten Druckluftleitungen nachweisbare Ölsuren enthalten  
sind, die die TRD-Kammer verunreinigen könnten.

resultiert aus entgegengesetzt gerichteten Magnetfeldern in Stator und Rotor. Der Rotor dreht sich in der Weise, dass der größtmögliche magnetische Fluss

$$\phi_m = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} da$$

entsteht. Durch gezieltes Ein- und Ausschalten von Spulen kann der Rotor um einen bestimmten Winkel gedreht werden. Einzelne, an eine Ansteuerungselektronik übergebene TTL-Pulse sollen die Drehung des Rotors um kleine Winkel kontrollierbar machen. Typische Drehwinkel pro Puls sind, je nach Motortyp,  $1,8^\circ$ ,  $7,5^\circ$  oder  $15^\circ$ . Will man einen kleineren oder größeren Winkel pro Puls drehen, so gibt es zwei Möglichkeiten: Den Einsatz eines Getriebes oder die Verwendung einer Mikroschrittansteuerung.

Man unterscheidet drei Typen von Schrittmotorbauweisen: Reluktanz-Schrittmotoren, Permanentmagnet-Schrittmotoren und Hybrid-Schrittmotoren. Außerdem unterscheidet man zwei verschiedene Ansteuermethoden: unipolar und bipolar.

### Schrittmotorbauweisen

**Der Reluktanz-Schrittmotor.** Beim Reluktanz-Schrittmotor<sup>8</sup> bestehen Stator und Rotor jeweils aus Weicheisen. Die 3 Polpaare des Stators sind um  $120^\circ$  versetzt angeordnet und mit je einer Spulenwicklung versehen. Sie sind nicht permanentmagnetisch, leiten aber einen magnetischen Fluss besonders gut. Liegt an den Windungen des Stators kein Strom an, lässt sich der Motor frei drehen. Er besitzt kein Haltemoment.

**Der Permanentmagnet-Schrittmotor.** Beim Permanentmagnet-Schrittmotor wird der Rotor aus permanentmagnetischem Material gefertigt. Da man bauartbedingt nicht beliebig viele magnetische Pole nebeneinander anordnen kann, ist der minimale Schrittwinkel bei dieser Motorart relativ groß ( $7,5^\circ$  oder sogar  $15^\circ$ ).

**Der Hybrid-Schrittmotor.** Man unterscheidet bei Schrittmotoren im Allgemeinen zwischen zwei Ansteuerungsmethoden: Der unipolaren- und der bipolaren Ansteuerung. Ein Hybrid-Schrittmotor kann auf beide genannten Arten angesteuert werden. Er hat acht Anschlußkabel, welche es je nach Verschaltung erlauben, sowohl den unipolaren als auch den bipolaren Motor zu ersetzen.

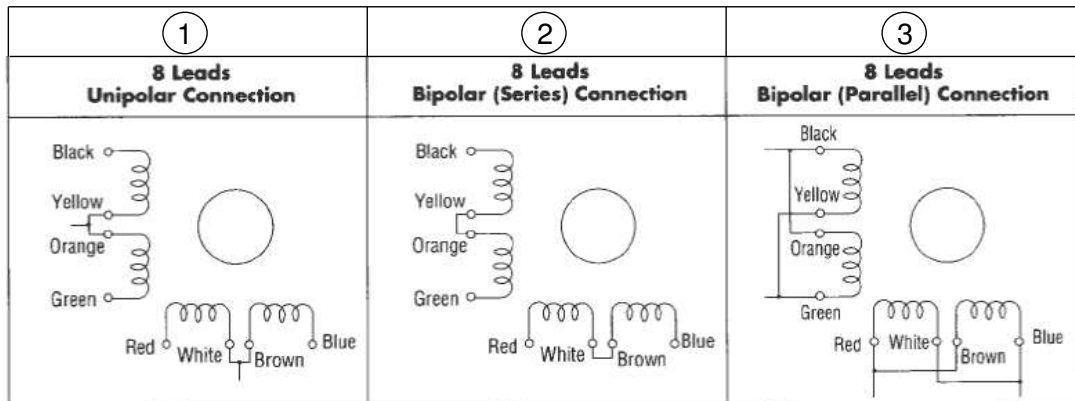
---

<sup>8</sup>Der Begriff *Reluktanz* stammt von der Kraft, die einen drehbar gelagerten Eisenstab in einem Magnetfeld in Richtung des geringsten magnetischen Widerstands (Reluktanz) bewegt.



Im Wire-Test-Device wurde ein Hybrid-Schrittmotor des Typs Vexta PK268-E2.0B der Firma Oriental Motors [Mot01] mit einer maximalen Stromaufnahme von 2,8 A pro Phase eingesetzt.

### Ansteuerungsmethoden



**Abbildung 4.10:** Darstellung der verschiedenen Verschaltungsmöglichkeiten bei Schrittmotor-typen mit acht Anschlussleitungen [Mot01].

**Unipolare Ansteuerung.** Die unipolare Ansteuerung zeichnet sich dadurch aus, dass der Strom immer in der gleichen Richtung durch die Statorspulen fließt. Der Motor besitzt zwei Spulen und einen Mittelabgriff mit fester Versorgungsspannung. Abwechselnd wird eine Spulenseite nach Masse gezogen. Es wird also jeweils nur eine Spulenhälfte ausgenutzt (siehe Abbildung 4.10, Bild 1). Motoren, die unipolar angesteuert werden, haben fünf oder sechs Anschlußkabel, je nachdem ob die Masseleitungen verbunden sind oder nicht.

**Bipolare Ansteuerung.** Motoren mit bipolarer Ansteuerung haben vier Spulen und in der Regel acht Anschlußleitungen. Die Spannungen werden im Betrieb ständig umgepolt. In der Abbildung 4.10, Bild 2 und 3 sind zwei mögliche Verschaltungsarten dargestellt. Aufgrund der höheren Spulenströme erreicht man bei gleicher Baugröße gegenüber der unipolaren Ansteuerung eine höhere Drehfrequenz und ein höheres Drehmoment. Der im Wire-Test-Device verbaute Vexta PK268-E2.0B Schrittmotor erreicht mit dieser Ansteuerung bei paralleler

Verschaltung ein Haltemoment von 1,75 Nm [Mot01]. Ein Nachteil dieser Ansteuerung ist der höhere Schaltungsaufwand, welcher gerade in der Frühzeit der Schrittmotoren ein Problem darstellte. Heute ist dieser aufgrund von integrierten Schaltungen moderner Elektronik zu vernachlässigen. Aufgrund der Vorteile wird der im Wire-Test-Device verwendete Schrittmotor bipolar angesteuert.

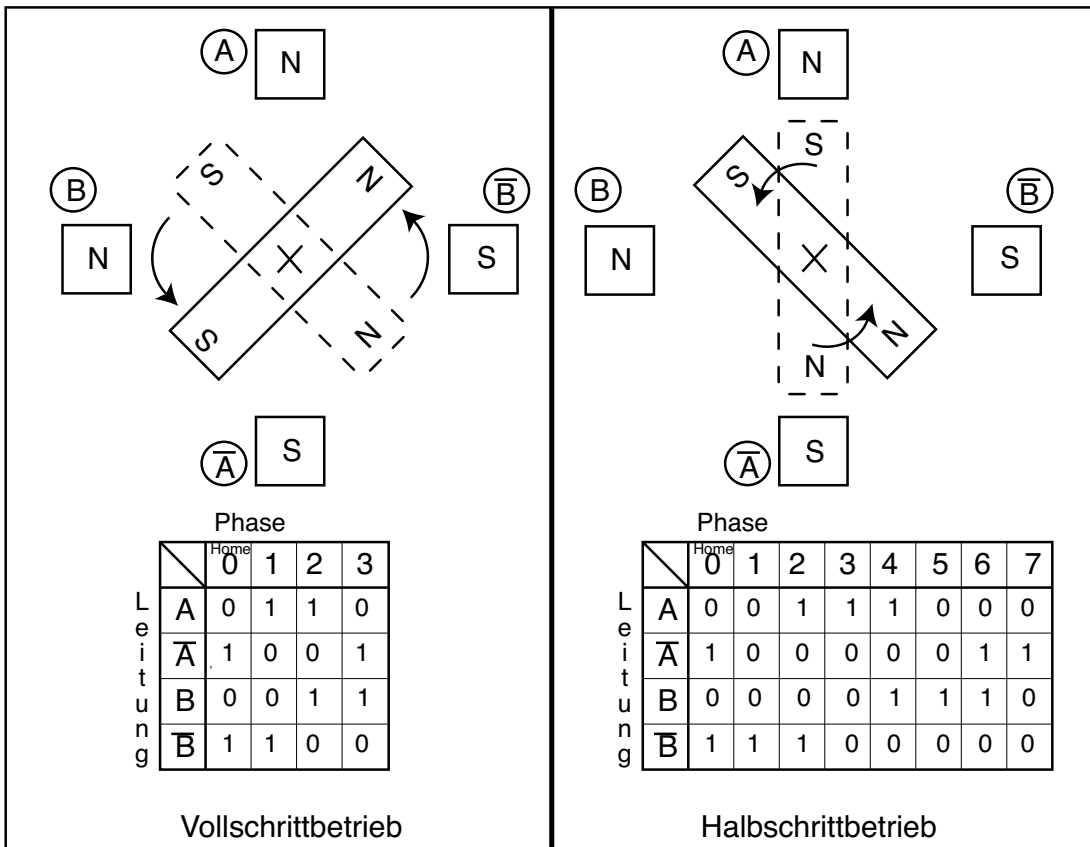
### Der Mikroschrittbetrieb

Die minimale Schrittweite eines Schrittmotors ist im Allgemeinen durch die Zahl der magnetischen Pole des Rotors begrenzt. Um die Auflösung zu erhöhen und Vibrationen des Motors zu verringern gibt es die Möglichkeit, den sogenannten Mikroschrittbetrieb zu nutzen. Mikroschritt bedeutet hier, dass ein Einzelschritt nur einen Bruchteil des spezifizierten Vollschrittdrehwinkels bewirkt. In Abbildung 4.11 sind die Unterschiede zwischen den Betriebsarten Vollschritt und Halbschritt, als Representant eines Mikroschrittmodus<sup>9</sup>, skizziert. Die Anschlüsse der Statorspulen sind mit  $A\bar{A}$  und  $B\bar{B}$  bezeichnet. Je nach Stromrichtung ändert sich hier die Polarität des magnetischen Feldes in den Spulen. Der Rotor richtet sich im Feld der stromdurchflossenen Spulen des Stators aus. Abbildung 4.11 (links) veranschaulicht, was eine Ansteuerung leisten muss, um den Rotor des Motors zu drehen. In der gestrichelt gezeichneten Ausgangssituation ist der magnetische Nordpol des Rotors zwischen den beiden Südpolen der Spulen festgehalten. Es fließt ein Strom von  $\bar{A}$  nach  $A$  und von  $\bar{B}$  nach  $B$ . Um den Rotor um einen Vollschritt gegen den Uhrzeigersinn zu drehen, wird die Stromrichtung einer Spule, in diesem Fall der Spule  $A\bar{A}$  umgepolt. Die Vektoren der magnetischen Kräfte addieren sich nun so, dass der Rotor in der eingezeichneten Position (durchgehende Linie) gehalten wird. Ändert man die Stromrichtung vier mal wie in der angegebenen Tabelle, so gelangt man zur Ausgangsposition (*home*) zurück. Die Tabelle zeigt außerdem, dass in jedem Zustand beide Spulen stromdurchflossen sind. Es ändert sich nur die Polarität der Spannungen.

Im Halbschrittbetrieb werden nun Zwischenschritte in die zuvor betrachteten Tabelle eingefügt. Erlaubt man einer Spule stromlos zu bleiben, so kann sich der Rotor auch im Feld nur einer Spule ausrichten. Die Rotorposition ergibt sich in dieser Phase somit nicht aus der Addition zweier Felder, sondern als Resultat nur eines Feldes. In der Tabelle sieht man, dass jeweils die Spule, welche als nächstes umgepolt werden soll, zunächst stromlos verbleibt und erst in der übernächsten

---

<sup>9</sup>Aktuelle Schrittmotoransteuerungen beherrschen auch Viertel- und Achtelschrittmodi



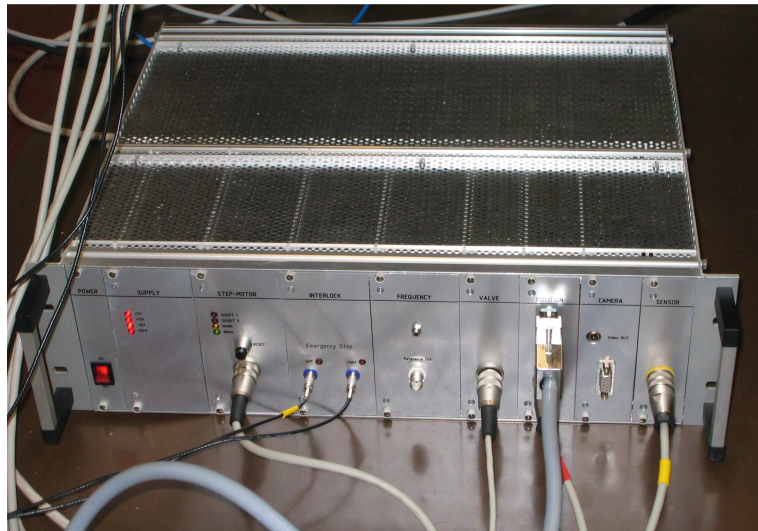
**Abbildung 4.11:** Funktionsweise des Mikroschrittbetriebs: Im Vollschriftbetrieb ist jeweils nur ein Spulenpaar aktiv, im Halbschrittbetrieb eines oder beide.

Phase einen Strom in entgegengesetzter Richtung erfährt. Die Skizze zeigt bei zur Vollschriftskizze analoger Betrachtungsweise den Übergang von Phase 7 nach *home*. Auf einem Treiberchip müssen die in der Tabelle angegebenen 8 Phasen implementiert sein. Das Resultat ist eine doppelte Schrittauflösung. Angenehmer Nebeneffekt ist hier das im Vergleich zum Vollschriftbetrieb vibrationsärmere Laufverhalten, welches als Resultat weicherer Winkeländerungen zu sehen ist. Durch die gleichmäßigere Drehung des Rotors sind auch höhere Drehfrequenzen möglich.

### 4.3.3 Elektronik

Die gesamte Elektronik findet in einem 19 Zoll Gehäuse Platz. Um auch spätere Reparatur- und Wartungsarbeiten schnell und komfortabel durchführen zu

können, ist die Elektronik modular aufgebaut. Jedes Modul kann einzeln ausgebaut und schnell ersetzt werden. Alle Komponenten sind über ein gemeinsames Bussystem untereinander verbunden, auf dem alle notwendigen Steuer- und Datensignale von allen Komponenten erreicht werden können. Abbildung 4.12 zeigt



**Abbildung 4.12:** Zu sehen ist eine fotografische Aufnahme der Elektronik. An der Vorderseite finden sich die Anschlüsse für das Messinstrument. Auf der Rückseite die Schnittstelle zum PC und die Stromversorgung.

das Gehäuse mit der benötigten Elektronik.

### Spannungsversorgung und Kontrolle

Die Spannungsversorgung liefert vier verschiedene Spannungen: +24 V, +12 V, +5 V und -12 V. Sie sind über Feinsicherungen mit dem Bus verbunden. Die nötigen Transformatoren befinden sich fest installiert im hinteren Teil des 19 Zoll Gehäuses. Ein Spannungsausfall wird durch Kontroll-LEDs angezeigt (siehe Anhang II, Abbildung 8.11).

### Motorsteuerung

Der Schrittmotor benötigt eine Kombination von Spannungszuständen auf seinen Anschlussleitungen (siehe Abschnitt 4.3.2, Tabellen Abbildung 4.11). Diese

zu generieren und auszugeben ist die Aufgabe der Motorsteuerung. Im Wire-Test-Device ist eine Schrittmotorkarte *HP-Step* der Firma NC-Step verbaut. Sie kann Motoren mit bis zu 4 A Stromaufnahme im Voll-, Halb-, Viertel- und Achterschrittmodus betreiben (siehe Abschnitt 4.3.2). Herzstück der Steuerkarte ist der Controllerbaustein *L6506*, welcher aus einem TTL-Frequenzsignal, einer Richtungsinformation und dem Mikroschrittmodus die an den Motor zu übergebenden Codes (siehe Abbildung 4.11) generiert. Die Richtungsinformation stammt hier von der Software und wird mit der Datenerfassungskarte auf den Bus der Elektronik gelegt. das Frequenzsignal wird vom im folgenden Abschnitt beschriebenen Frequenzgenerator erzeugt. Der Mikroschrittbetrieb ist über einen Jumper hardwaremäßig auf den Halbschrittbetrieb eingestellt. Empirisch ist dies der vibrationsärmste und materialschonendste Betriebsmodus. Die generierten Signale werden mit einem Leistungstreiber *L6203* verstärkt und auf die Anschlussleitungen des Motors gegeben.

Damit der Motor bei stehendem Rotor (und somit höchster Stromaufnahme) nicht zu heiß wird, wird der Haltestrom bei unbewegtem Motor nach etwa zwei Sekunden auf 25% abgesenkt. Beim nächsten eingehenden Takt wird wieder auf den Nennstrom geschaltet. Der Motor wurde bei 12 V auf eine Stromaufnahme von etwa 1 A bei einer Frequenz von 1 kHz eingestellt.

### Frequenzgenerator

Der Frequenzgenerator (Anhang II, Abbildung 8.7) soll die Betriebsfrequenz des Schrittmotors vorgeben. Benötigt wird ein alternierendes invertiertes TTL-Signal. Um dies zu erhalten, nutzt man zwei verschaltete *NAND*-Bauteile, die als Inverter (*NOT*-Bauteil) betrieben werden (siehe Anhang, Abbildung 8.7). Liegen am Eingang von IC1a in der Ausgangssituation beide Kanäle auf einem Low-Pegel, so führt dies zu einem High-Pegel am Ausgang von IC1a und einem Low-Pegel am Ausgang von IC1b. Über den Ausgang des IC1a wird der Kondensator C2 geladen. Sobald die Schaltschwelle des Eingangs von IC1a erreicht ist, liegt hier ein high Signal an. Nun schaltet IC1a den Ausgang auf low, woraufhin der Ausgang von IC2b auf high liegt. Der Kondensator C2 entlädt sich nun über die Widerstandskombination R1 und R3 bis die untere Schaltschwelle vom TTL-Gatter erreicht ist, sodass am Eingang von IC1c wieder ein Low-Pegel anliegt und der Kreisprozess von vorne beginnt. Da der Schrittmotortreiber einen invertierten TTL-Pulszug benötigt (Grundzustand high, Schaltzustand low), wird IC1c als

Inverter benutzt. Durch Steuerung des Zustandes  $F-EN$  kann der Pulszug ein- und ausgeschaltet werden.  $F-OUT$  gibt den Pulszug aus. Über das Potentiometer R3 kann die Frequenz im Bereich  $1,8 \text{ kHz} < F < 600 \text{ Hz}$  geregelt werden. Vorteil dieser Schaltung ist der günstige Preis und der recht geringe Schaltungsaufwand. Ein Nachteil ist die mäßige Frequenzkonstanz. Will man diese erhöhen, kann man zum Beispiel eine Schaltung mit Schwingquarz, wie in Abbildung 8.6 gezeigt, verwenden.

### Quadratur-Dekoder

Der Quadratur-Dekoder soll die vom Posimag-Längenmesssystem kommenden Signale verarbeiten und in eine Ortsinformation umwandeln. Die zwei Ausgangskanäle des Posimag-Systems (Abbildung 4.5) werden mit den beiden mit  $CHA$  und  $CHB$  bezeichneten Eingängen des HCTL2020 Quadratur-Dekoder (siehe Anhang II, Abbildung 8.5) verbunden. Aus den vier errechenbaren Zuständen der beiden Kanäle des Posimag (Abbildung 4.5) formt der Dekoder jeweils ein Pulssignal, welches an einen Zähler weitergereicht werden kann. Außerdem wird eine Richtungsinformation generiert. Richtungsänderungen werden erkannt, wenn sich zwei gleiche Zustände nach einem Zwischenzustand wiederholen. Das generierte Signal kann an  $P-OUT$  abgegriffen werden, das Richtungssignal an  $U/D$ . Zusätzlich zum Dekoder sind im HCTL2020 Baustein zwei kaskadierte 8 Bit Zähler integriert, wobei die Auslese durch die Selectleitung ( $SEL$ ) zwischen *least significant bit* (LSB) und *most significant bit* (MSB) umgeschaltet werden kann. Ist der interne Zähler vollgelaufen, gibt es einen Übertrag zum nächsten Counter (V5), indem das mit einem Schmitt-Trigger (V1a) aufbereitete Ausgangssignal von V2 über einen Datenbus an den Zählereingang des 74191 Zählerbausteins weitergegeben wird. Der 74191 ist ein 4 Bit Zähler. Ist auch dieser Zähler vollgelaufen, wird am  $RC\setminus$  Pin ein Gatesignal ausgegeben, so dass der Zähler V6, ebenfalls ein Typ-74191 Baustein, über den  $CE\setminus$ -Port aktiviert wird und einen Puls vom Bus zählt, wenn V5 neu gestartet wird. Die Zählinformationen der Zähler V5 und V6 werden über einen Mergertreiberbaustein auf den Bus geleitet. Die Ausgänge des Zählers im Quadratur-Dekoder werden direkt auf den Bus gegeben. Um Interferenzen bei den Ausgaben der verschiedenen Zähler auf dem Bus zu vermeiden, wählt man auf dem  $/OE$  Eingang an V2 bzw. dem  $E\setminus EN2\setminus$  an V3 aus, welcher Ausgang senden darf. Wenn 0 V an diesem Eingang anliegen, darf das Bauteil Daten auf dem Bus ablegen. Durch den Inverter V1b ist sichergestellt,

dass jeweils nur eines der beiden Bauteile aktiv ist. Die Gesamtzählerinformation kann über eine Centronics-Schnittstelle mit dem PC ausgelesen werden. Falls die parallele Schnittstelle, und somit der Zähler, nicht genutzt wird, sondern die Pulse extern verarbeitet werden sollen, werden die Eingänge der Bauteile durch Pull-Up-Widerstände auf definierte Werte gesetzt.

Für den Betrieb des Quadratur-Dekoders ist ein Arbeitstaktsignal am Eingang notwendig. Dies wird durch eine 4,1943 MHz Schwingquarzoszillatorschaltung [Püt88, Has72], dargestellt im Anhang II, Abbildung 8.6 erzeugt.

### Magnetventilansteuerung

Das Magnetventil wird durch einen 13 ms kurzen 24 V Spannungspuls für diese Zeit geöffnet. Der Puls wird durch eine monostabile Kippstufe, welche mit einem NE555 Bauteil aufgebaut ist, erzeugt (siehe Anhang, Abbildung 8.9). Die Schaltung bekommt einen Startimpuls, bleibt eine gewisse Zeit auf einem High-Pegel und fällt dann wieder in den Grundzustand zurück. Das kurze Startsignal am Triggereingang des Chips wird durch eine Koppel-C Kombination und einen Transistor erzeugt. Aus einem statischen Eingangssignal wird so ein dynamisches erzeugt. Durch das RC-Glied an den Eingängen *SSCH* und *ENTL* wird die Pulsdauer festgelegt.

### Optischer Sensor und Vorverstärker

Das Herzstück des Messsystems ist ein optischer Sensor, Typ HBCS1100 von Hewlett Packard. Er besteht aus einem Sender und einem Empfänger für rotes Licht mit einer Wellenlänge von 700 nm. Eine integrierte Optik fokussiert das Licht in einem Abstand von 5 mm. Das eingefangene reflektierte Licht erzeugt über die Empfängerfotозelle am Ausgang des Sensors eine elektrische Spannung zwischen 0 V und 5 V. Diese wird an den Operationsverstärker *LF351N* gegeben, welcher als nichtinvertierender Verstärker beschaltet ist (siehe Anhang II, Abbildung 8.4). Die Verstärkung läßt sich über das Verhältnis der Widerstände *R3* und *R10* zu *R4*, also durch das Potentiometer *R10*, regeln. Der Widerstand

$R5$  läßt die Verstärkung nicht zu groß werden, falls  $R10$  ausfallen sollte<sup>10</sup>. Für die Verstärkung gilt idealisiert:

$$V = \frac{R4 + R3 + R10}{R4}. \quad (4.9)$$

Über das Potentiometer  $R9$  kann der Offset des Signals eingestellt werden. Der Kondensator  $C3$  dient als Ladekondensator, um die Eingangsspannung zu glätten.

Das vorverstärkte Signal wird an einen analogen Eingang der Datenerfassungskarte im PC gegeben und durch die Software analysiert.

### Interlocksystem

Das Endschalersystem schaltet die Frequenz, welche die Motorsteuerung speist ab und verhindert so eine weitere Bewegung des Motors und eine Beschädigung des Messgerätes und des Messobjektes. Es gibt zwei Endschalter an der linken Seite des Laufwagens und zwei weitere auf der rechten Seite, welche jeweils in Reihe geschaltet sind. So löst der Schalter bei Kontakt des Laufwagens mit einem beliebigen Hindernis aus. Ein einzelner Draht auf der Drahtkammer reicht jedoch nicht aus, um den Schalter bei Kontakt auszulösen. Ein umsichtiger Umgang mit den zu messenden Drahtkammern ist somit weiterhin erforderlich. Wird ein Schalter ausgelöst, wird ein Kontakt zur Masse hergestellt und es fließt ein Strom über eine Leuchtdiode, welche das Auslösen anzeigt. Das Richtungssignal der Motorsteuerung wird vom Bus abgegriffen und mit dem des Endschalters über NAND-Bausteine korreliert (siehe Anhang II, Abbildung 8.12). Dadurch kann der Motor bei einer Richtungsänderung selbständig aus dem Endschalter herausfahren, ohne dass er mechanisch gelöst werden muss.

### Kamerasystem

Die CCD Kamera wird mit einer Spannung von 12 V versorgt und liefert ein Videobild im PAL Format zurück, welches auf die Cinchbuchse auf der Frontplatte des Moduls durchgeschleift wird (Anhang, Abbildung (8.13)).

---

<sup>10</sup>Dies ist ein wenig historisch bedingt. Früher gab es Drahtpotentiometer, welche, aufgrund der Schleifkontakte, nicht bei jeder Einstellung optimal funktioniert haben und somit unter Umständen beim Umstellen zwischen zwei Windungen keinen Kontakt und somit keinen Widerstand mehr hatten.



## Messkarte

Als Schnittstelle zwischen externer Hardware und PC dient eine NI PCI MIO 16 E-4 Multifunktionskarte von National Instruments zusammen mit einer ungeschirmten Anschlussplatine des Typs CB-68LPR, ebenfalls von National Instruments. Die Anschlussplatine ist im hinteren Teil des Elektronikgehäuses eingebunden. Mit einem geschirmten SCSI-Kabel ist sie an der Rückseite des Elektronikgehäuses mit der DAQ-Karte im PC verbunden. Die Messkarte verfügt über acht digitale Eingänge und Ausgänge, acht differentielle analoge Eingänge mit einer Auflösung von 12 Bit und einer maximalen Samplingrate von 500 kS/s sowie zwei Ausgänge mit maximal 1 MS/s,  $\pm 10$  V Spannungsbereich bei maximal  $\pm 5$  mA Strom [Ins97]. Außerdem besitzt die Karte zwei 24 Bit Up/Down-Digitalzähler und einen 4 Bit Frequenzskalierer. Die Zähler sind mit maximal 20 MHz getaktet, der Skalierer mit 10 MHz. Es gibt zusätzlich analoge und digitale Triggereingänge und Gates.

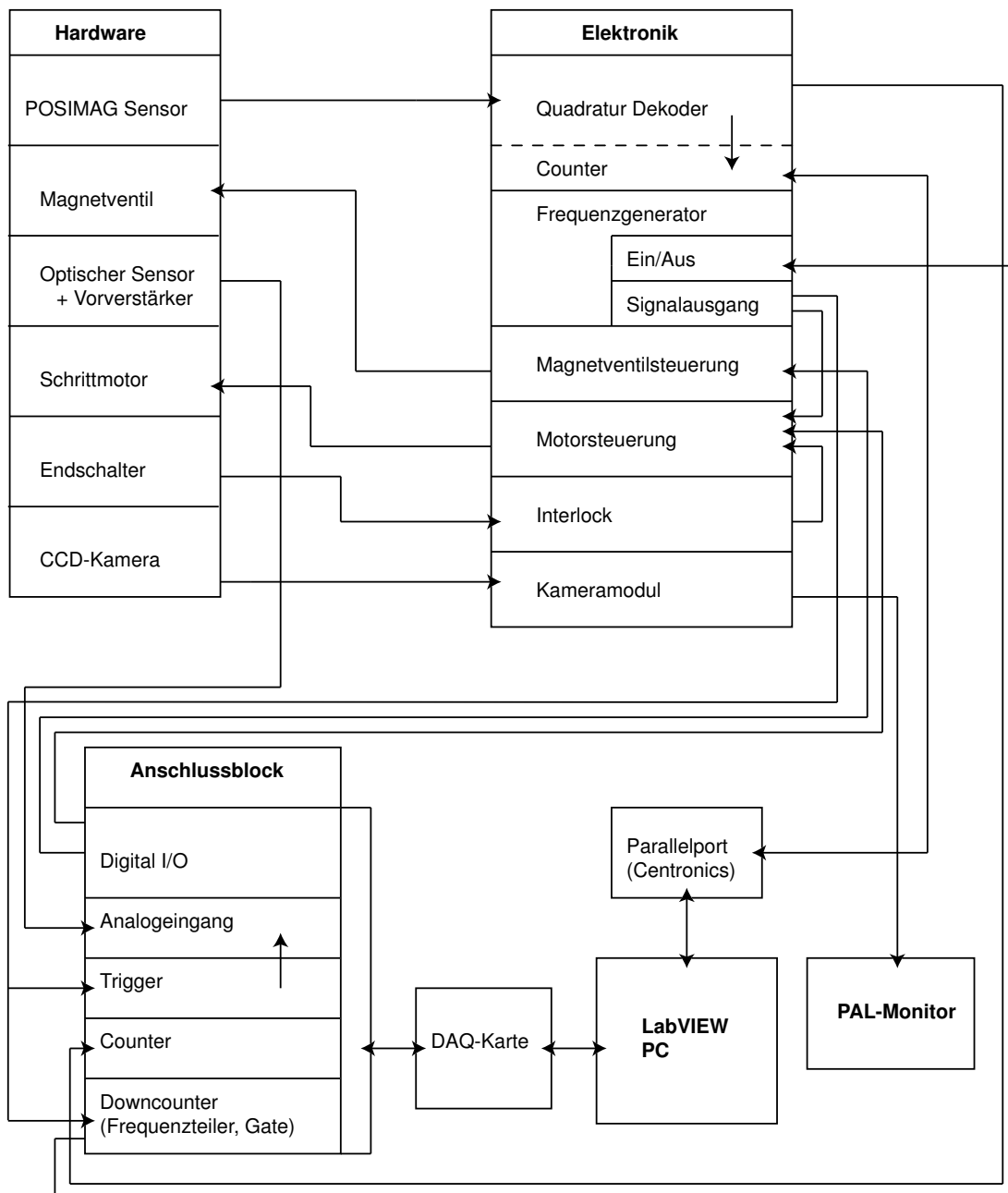
### 4.3.4 Verknüpfung der Komponenten

Da das Wire-Test-Device aus mehreren Komponenten besteht, müssen Signale durch mehrere Stufen laufen, bis sie am Endpunkt zur Verfügung stehen.

Am Beispiel des Taktsignals für den Schrittmotor soll dies deutlich werden:

Der LabVIEW PC stellt eine Anfrage nach  $N$  Steps. Das Frequenzsignal (1 kHz TTL) gelangt ständig auf den Frequenzteiler der DAQ-Karte. Die DAQ-Karte wird daraufhin vom LabVIEW-Programm aufgefordert, die Frequenz des hineinkommenden Signals durch  $N$  zu teilen. Es wird auf der DAQ-Karte ein TTL-Pulszug der Frequenz  $\frac{1000}{N}$  Hz erzeugt. Diesem wird allerdings nur einmal erlaubt, seinen Zustand von TTL-high auf TTL-low zu ändern. Es ergibt sich ein Gate-Fenster in der Länge von  $N$  Perioden des einfallenden 1 kHz Frequenzsignals. Dieses wird dazu benutzt, den Frequenzzug ein und auszuschalten. An die Motorsteuerung übergeben werden so nur die gewünschten  $N$  Pulse. Die Pulse werden außerdem als Trigger für die analoge Auslese des Optischen Sensors auf der DAQ-Karte verwendet.

Der Posimag-Sensor wird vom Quadratur-Dekoder ausgelesen. Die hier generierten Pulse werden sowohl an den externen Zähler auf der DAQ Karte gegeben, als auch mit passender Richtungsinformation im Onboard-Zähler in eine Positionsinformation umgewandelt. Der Onboard-Zähler kann durch Anfrage des PCs



**Abbildung 4.13:** Schematische Darstellung der Komponentenabhängigkeiten des Wire-Test-Device.

---

über die parallele Schnittstelle sowohl ausgelesen, als auch zurückgesetzt werden. Abbildung 4.13 zeigt die Abhängigkeiten und Signalwege der einzelnen Komponenten in der Übersicht.



## 5. Software

Im Rahmen dieser Diplomarbeit war es notwendig, ein Softwarepaket zur automatisierten Steuerung der Messapparatur zu entwickeln. Hierzu wurde die grafische Programmiersprache LabVIEW<sup>1</sup> 7.0 (siehe auch Abschnitt 5.1) verwendet. Das Betriebssystem MS-Windows musste verwendet werden, da National Instruments bisher nur hier die nötigen DAQ<sup>2</sup> Treiber zur Steuerung der externen Hardware in vollem Umfang bereitstellt.

Das Programm ist auf einem AMD Athlon XP 1700+ Rechner mit 256 MB Arbeitsspeicher erstellt und betrieben worden. Daher kann dies als eine untere Schranke der Hardwareanforderungen gesehen werden. Das Programm benötigt 20 MB Festplattenspeicherplatz. Für jede Messung kommen 6 MB Speicherplatz für die Messdaten hinzu. Die reinen Messergebnisdateien belegen hiervon etwa 140 kB, der Rest kann bei Bedarf gelöscht werden da er nur für Debuggingzwecke benötigt wird.

Neben der LabVIEW Software wird eine NI-PCI-MIO-16E-4 Datenerfassungskarte von National Instruments verwendet. Sie stellt, zusammen mit dem Treiberpaket MAX<sup>3</sup>, die Schnittstelle zwischen Software- und Hardwareebene dar.

### 5.1 Die Programmiersprache LabVIEW

Die Steuerungssoftware für das Wire-Test-Device wurde in der Programmiersprache LabVIEW von National Instruments geschrieben. In der ersten Version erschien LabVIEW 1986 für den Apple Macintosh, welcher schon damals die benötigten grafischen Voraussetzungen bot. Die erste Microsoft Windows Version kam 1993 auf den Markt [Jam01]. Die bislang letzte Version 7.1 erschien im Sommer 2004. LabVIEW ist die Entwicklungsumgebung einer *G* genannten Programmiersprache. Anders als bei textuell orientierten höheren Programmiersprachen wie etwa C, Java, Cobol oder ähnlichen, wird in *G* rein grafischer Code erzeugt. Es ist auch nicht möglich, irgendeinen in LabVIEW geschriebenen Quellcode zu editieren und dann an einen textbasierten Basiscode zu gelangen, weil es diesen schlicht

---

<sup>1</sup>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

<sup>2</sup>engl. *Data Acquisition* = Datenerfassung

<sup>3</sup>Measurement and Automation Explorer

nicht gibt. LabVIEW verfügt über einen grafischen Compiler, welcher aus dem grafisch erstellten Programm einen optimierten Maschinencode erzeugt. Somit können mit compilierten C Programmen vergleichbare Ablaufgeschwindigkeiten erreicht werden.

Bei der Entwicklung von LabVIEW stand im Vordergrund, sich nicht auf technische Fähigkeiten von Computern, sondern auf menschliche Fähigkeiten zu stützen. Die Sprache soll, auch für Anwender ohne Programmiererfahrung, leicht erlernbar sein. Da der Mensch einen bildlichen Zusammenhang besser und schneller erfassen kann als einen kryptischen Programmcode, ist dies der Ansatz für LabVIEW. Ein LabVIEW Programm besteht aus einer Benutzerschnittstelle (GUI<sup>4</sup>), genannt *Frontplatte*, und dem eigentlichen Programmcode, dem *Diagramm*. Auf der Frontplatte befinden sich alle für den Endbenutzer nötigen Kontrollen und Anzeigen in virtueller Form, ähnlich einem echten Messinstrument. Das Innenleben des „Messinstruments“ findet sich im Diagramm wieder. Aufgrund der Analogien nennt man ein solches Programm auch *Virtuelles Instrument* (VI).

VIs können ineinander verschachtelt werden und sich gegenseitig aufrufen. Solche Unterprogramme bezeichnet man als SubVIs. Wie schon angedeutet, wird ein VI anstelle von textuellem Code rein grafisch geschrieben<sup>5</sup>. LabVIEW liefert dazu eine umfangreiche Palette an Grundfunktionen, Komparatoren, Datenfeldoperatoren, Datenfiltern, Datenanalysetools und vielem mehr. Ein Programm wird durch auswählen der gewünschten Funktionen und Platzierung auf der Arbeitsfläche erstellt. Um einen Programmablauf festzulegen, werden die Funktionen durch virtuelle Kabel verbunden.

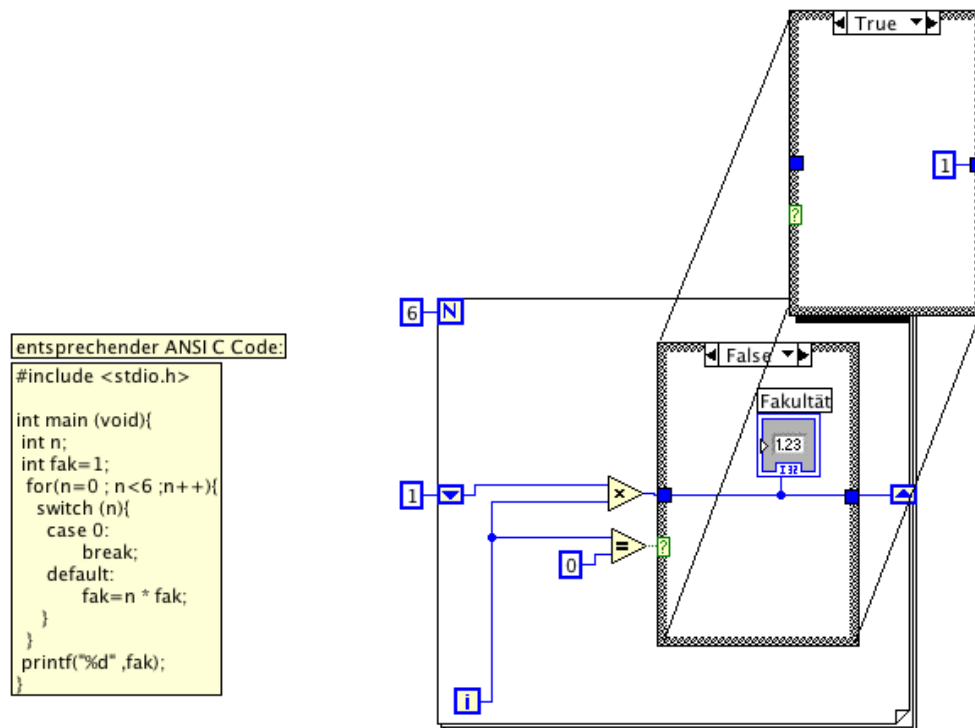
In Abbildung 5.1 ist ein Diagramm eines VIs dargestellt, welches die Fakultät von 5, auf ungeschickte, aber lehrreiche Weise, berechnet. Man erkennt eine for-Schleife, welche von  $i = 0$  bis  $i = 6 - 1$  wiederholt wird. Die Schleifenvariable wird also vor jeder Wiederholung überprüft. Dabei läuft  $i$  von Null bis fünf und gibt jeweils die aktuelle Iteration an. Ein Gleichheitskomparator prüft, ob es sich um den ersten Schleifendurchlauf handelt oder nicht und gibt das Ergebnis (*true* oder *false*) als booleschen Wert an eine case-Struktur.

Eine Besonderheit von LabVIEW und der grafischen Programmierung sind die *shiftregister* zur Übergabe eines Wertes in einer Schleife in den folgenden Schleifendurchlauf. Der Zahl des vorhergehenden Schleifendurchlaufs wird mit dem

---

<sup>4</sup>engl. **Graphical User Interface** = Grafische Benutzerschnittstelle

<sup>5</sup>geschrieben ist hier eigentlich das falsche Wort ist, da man das VI mit der Maus „zusammenklicken“ muss



**Abbildung 5.1:** Beispiel einer Berechnung der Fakultät von 5 mit einer for-Schleife und einer case-Struktur in LabVIEW. Zum Vergleich ist der äquivalente ANSI C Code angegeben.

aktuellen  $i$  multipliziert und in die 32-bit Integervariable „Fakultät“ geschrieben, welche mit einem Anzeigeelement auf der Frontplatte verknüpft ist.

Eine Eigenart der Sprache ist die Parallelität der Prozesse. Es gibt keine klare Ablaufstruktur. Im Beispiel (Abbildung 5.1) ist nicht zu entscheiden, ob zunächst der Multiplikationsoperator oder der Gleichheitskomparator ausgeführt wird. Im Prinzip laufen die Prozesse gleichzeitig ab<sup>6</sup>. Um eine bestimmte Ablaufstruktur zu erzwingen, muss eine Sequenzstruktur in die Software eingearbeitet werden. Man erkennt an diesem Beispiel, dass der Quellcode stark an Flussdiagramme aus der Elektrotechnik oder den Systemwissenschaften erinnert. Ingenieure und Wissenschaftler, die Zielgruppe von LabVIEW, sind also schnell vertraut mit der Darstellungweise und der Datenflussprogrammierung, auch wenn sie keinerlei Programmiererfahrung besitzen. Ein großer Vorteil ist dabei auch, dass sich

<sup>6</sup>Dies ist natürlich nur dann wirklich möglich, wenn der Prozessortyp und die Hardware dies unterstützen.

der Benutzer nicht mit Semantik und Syntax einer textorientierten Programmiersprache auseinandersetzen muss.

In der vorliegenden Arbeit wurde LabVIEW aufgrund der leichten Ansteuerbarkeit externer Hardware verwendet. Die nötigen Grundfunktionen hierfür werden bereits mitgeliefert. Daher ist es bis auf eine Ausnahme<sup>7</sup> nicht notwendig, Treibersoftware zu schreiben. Ein Konfigurationsprogramm für die Datenerfassungskartentreiber erleichtert die Einbindung der Hardware zusätzlich. Auch für die Analyse und Darstellung der aufgenommenen Daten bieten sich bereits vorhandene Programmpakete an.

## 5.2 Konzeptionelle Anforderungen und Lösungen

Der Anwenderkreis der Software hat mitunter sehr verschieden ausgeprägte Vorkenntnisse sowohl in der EDV als auch im Bereich der rechnergestützten Datenerfassung. Daher können beim Anwender nur grundlegende PC Kenntnisse vorausgesetzt werden. Es ergeben sich daher spezielle Anforderungen an Design und Bedienbarkeit der Software.

Das Programm soll intuitiv und selbsterklärend sein. Eine Messung soll mit wenigen Mausklicks und möglichst wenigen Einstellungen durchzuführen sein. Da der Anwenderkreis international ist, wurden die Bedienelemente des Programms in englischer Sprache beschriftet.

Die grafische Benutzeroberfläche, in Abbildung 5.2 dargestellt, zeigt alle Einstellmöglichkeiten und Statusinformation auf einen Blick. Sie gliedert sich in vier Bereiche.

In der „Header-, Path- and Filename Section“ im oberen Bereich des Bildschirms kann der Benutzer kammerspezifische Daten, wie den Kammertyp, die Seriennummer und weitere Kommentare zur Messung angeben. Außerdem ist er aufgefordert, seinen Namen sowie ein Verzeichnis in dem die Messdaten abgelegt werden sollen, anzugeben. Damit lässt sich die Messung später besser zuordnen und archivieren. In den grau unterlegten Bereichen werden die generierten Dateinamen der aktuellen Messung angezeigt, sobald die Messung gestartet wurde. Die generierten Dateinamen setzen sich zusammen aus einem Identifikationsteil<sup>8</sup>, der

---

<sup>7</sup>Einzig die Positionsinformationsauslese über die Centronics-Schnittstelle erfordert einen selbstgeschriebenen Treiber.

<sup>8</sup>Der Identifikationsteil ist wie folgt aufgeschlüsselt: „Pos“: Position und Sensorspannung; „Peak“: aus „Pos“-Datei ermittelte Peaks; „BadGap“: Information über falsche Drahtabstände;



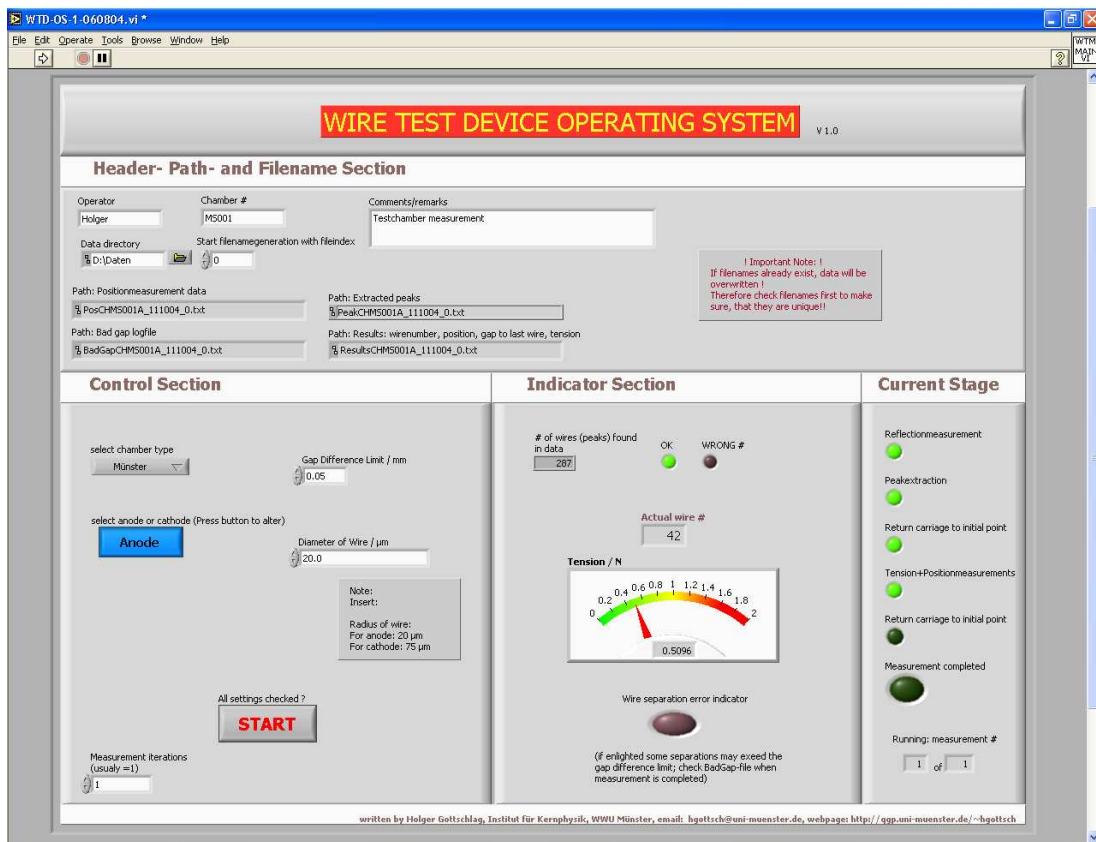


Abbildung 5.2: Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche.

Kammernummer, der zu messenden Drahtebene, dem aktuellen Datum und einem laufenden Index. Soll eine Messung am selben Tag für dieselbe Kammer und die gleiche Drahtebene mehrmals wiederholt werden, ohne die alten Daten zu überschreiben, so muss der laufende Index manuell erhöht werden, um einen anderen Dateinamen zu generieren. Um unnötige Dateien zu vermeiden und direkt zu überschreiben, falls eine Messung defekt war und wiederholt werden soll, wird der Index nicht automatisch erhöht, wenn die Datei schon existiert. Alle messrelevanten Angaben werden in die Kopfzeile der Messdatendatei geschrieben.

Im Kontrollbereich der Oberfläche ist der Benutzer aufgefordert, Angaben zur beabsichtigten Messung zu machen. Für die Spannungsberechnung sind die Drahtparameter Dichte, Länge und Durchmesser von Bedeutung. Für die Positionsbestimmung werden die Kammergröße und die Anzahl der maximal vorhandenen

„Results“: Messergebnisse (Drahtnummer, Position absolut, Abstand zum letzten Draht, Drahtspannung).

Drähte benötigt, um festzustellen, ob ein Draht fehlt. Die Dichte des Drahtmaterials, bzw. der Drahttypus kann durch den Schaltknopf „Anode → Kathode“ ausgewählt werden. Im ALICE TRD gibt es nur zwei unterschiedliche Drahttypen: Die Anodendrähte bestehen aus goldplatinisiertem Wolfram und haben eine Dichte von  $19289,58 \text{ kg/m}^3$  und messen  $20 \mu\text{m}$  im Durchmesser; Die Kathodendrähte bestehen aus einer Kupfer-Beryllium Legierung mit einer Dichte von  $8230,22 \text{ kg/m}^3$  und einem Durchmesser von  $75 \mu\text{m}$ . Da der Durchmesser der Drähte je nach Lieferungscharge des Herstellers um bis zu  $2 \mu\text{m}$  variieren kann, muss dieser manuell in das entsprechende Feld auf der Oberfläche eingetragen werden. Bei „Gap Difference Limit / mm“ kann die gewünschte Toleranz der Drahtabstände angegeben werden. Drahtabstände, die größer als der hier gewählte Wert sind, werden in der BadGap-Datei notiert. Durch Auswertung dieser Datei kann festgestellt werden, ob Drähte fehlen (Drahtabstand größer als normal) oder ob Drähte gerissen sind und nun lose und quer über der Kammer liegen (Drahtabstand kleiner als normal).

Soll die Kammer zum Beispiel aus Statistikgründen öfter als einmal vermessen werden, so kann die gewünschte Anzahl der Messungen bei „Measurement Iterations“ erhöht werden. Zum Schluss muss noch mit der Suchtabelle der Kammertyp angegeben und die Messung mit „Start“ begonnen werden. Durch die Suchtabelle teilt man dem Programm mit, wie groß die zu messende Kammer ist und wieviele Drähte auf ihr sein sollten.

Weicht die später gemessene Anzahl von Drähten vom Soll-Wert ab, so wird dies durch eine leuchtende Diode im Indikatorbereich des GUI angezeigt. In diesem Fall sollte man die Messung abbrechen um zu prüfen, wo das Problem liegt. Die aktuelle Messung wird zusätzlich online dargestellt. Die Spannung des aktuellen Drahtes wird als numerischer Wert und auch grafisch auf der Messuhr angezeigt. Der „Wire separation error indicator“ soll online zeigen, ob Probleme bei den Drahtabständen auftreten. Aus messtechnischen Gründen (siehe Abschnitt 5.3.1) kann jedoch online keine exakte Drahtabstandsbestimmung durchgeführt werden. Falls diese LED<sup>9</sup> leuchtet, sollte nach der Messung die BadGap-Datei überprüft werden, um zu ermitteln, ob tatsächlich ungewöhnliche Drahtabstände gemessen wurden.

Der letzte Bereich des GUI zeigt den aktuellen Betriebszustand an. Wenn alle LEDs grün aufleuchten, ist die Messung abgeschlossen.

---

<sup>9</sup>LED: *engl. light emitting diode* = Leuchtdiode

### 5.2.1 Datenformat der Ausgabedateien

Da die Ausgabedateien nicht sehr groß werden, werden sie im unkomprimierten ASCII<sup>10</sup> Format geschrieben. Der Vorteil hierbei ist die gute Lesbarkeit mit einem beliebigen Editor. Als Steuerzeichen für einen Zeilenumbruch dient ein einfaches newline (`\n`) ohne carriage return (`\cr`). Spalten werden mit einem Tabulator (`\tab`) voneinander getrennt und der Header mit einer Raute (`#`) am Zeilenanfang auskommentiert. Die Daten in den ausgegebenen Dateien sind wie folgt formatiert (Der Dateipräfix ist jeweils in Klammern angegeben):

- Positionsdaten („Pos“): Die erste Spalte gibt eine x-Achse in der Einheit „Counts“ vor. Ausgelesen werden diese am Ausgang des Magnetmesssystems mit dem internen TTL Zähler der NI-DAQ Karte. Ein Count entspricht je nach verwendetem Messsystem einem Weg von  $2,5 \mu\text{m}$  oder  $10 \mu\text{m}$ . Aus Hardwaregründen ist der gezählte Wert hier jedoch stark fehlerbehaftet. Er kann nur als x-Achsen Skala verwendet werden und nicht als absolute Positionsinformation.

Die zweite Spalte gibt die Spannung am Ausgang des optischen Sensors an, gemessen nach dem Vorverstärker (in Einheiten von Volt). Der Messbereich der NI-DAQ Messkarte reicht von  $-5 \text{ V}$  bis  $+5 \text{ V}$ .

Die Datei beinhaltet also ein Reflexionsspektrum der gesamten Kammer.

- Peakdaten („Peak“): Hier sind die aus der Positionsdatei extrahierten Peaks aufgezeichnet. In der ersten Spalte befindet ist wieder eine Ortsinformation in Zählwert-Einheiten angegeben. Die zweite Spalte zeigt die Amplitude des optischen Sensors und damit die Reflexion des Drahtes in Volt an.
- Messergebnisse („Results“): Die wichtigste Datei zeigt eine Zusammenfassung der Messergebnisse. Im Header finden sich, wie schon im vorhergehenden Kapitel angesprochen, Informationen zum Benutzer und zur Messung. Notiert wird die Startzeit der Messung, der vermessene Detektortyp, die Seriennummer des Detektors, die vermessene Drahtebene und weitere Kommentare des Anwenders. Im zweiten Teil des Headers ist das Datenformat kurz beschrieben.

Im Datenbereich selbst befinden sich vier Spalten. Die erste gibt die Drahtnummer an, beginnend mit 1. Die zweite Spalte gibt eine absolute Ortsinformation des Drahtes an, die dritte den Abstand zum vorhergehenden

---

<sup>10</sup>American Standard Code for Information Interchange

Draht. Die Einheit dieser Positionsrohdaten ist Counts. Um metrische Angaben zu erhalten, muss dieser Wert bei der Datenauswertung mit dem im Header angegebenen Faktor multipliziert werden (je nach Maschine 2, 5  $\mu\text{m}$  oder 10  $\mu\text{m}$ ). Die vierte Spalte gibt die Drahtspannung in Einheiten von Newton an.

- Defekte Drahtabstände („BadGap“): Ist der Abstand zweier Drähte größer als das vom Benutzer angegebene Limit, so werden Drahtnummer und gemessener Abstand zum vorhergehenden Draht in dieser Datei gespeichert.

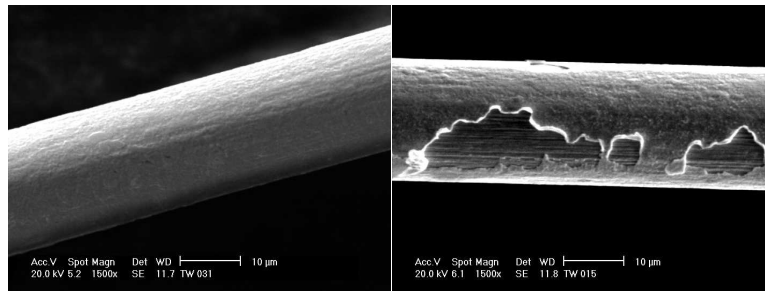
## 5.3 Der Algorithmus

Der Algorithmus gliedert sich im wesentlichen in zwei Teile: Die Messvorbereitungen und die Messung mit einem Messabschlussteil. Die Messvorbereitungen ermitteln Hilfsdaten, um im zweiten Teil eine Messung durchführen zu können. Im Abschluss erfolgt eine schnelle grafische Analyse der gewonnenen Messdaten und das Gerät wird für eine neue Messung vorbereitet.

### 5.3.1 Messvorbereitungen

Nach dem Programmstart wird auf alle Benutzereingaben gewartet die mit dem Drücken des *START*-Knopfs beendet werden. Die Useringaben werden nun benutzt um die notwendigen Variablen zu initialisieren. Aus dem SubVI *Lookup.vi* werden Kammergröße, Drahtlänge und Anzahl der Drähte auf dem Kammertyp ausgelesen. Dateinamen werden erzeugt und leere Dateien für die Messwertaufzeichnung angelegt.

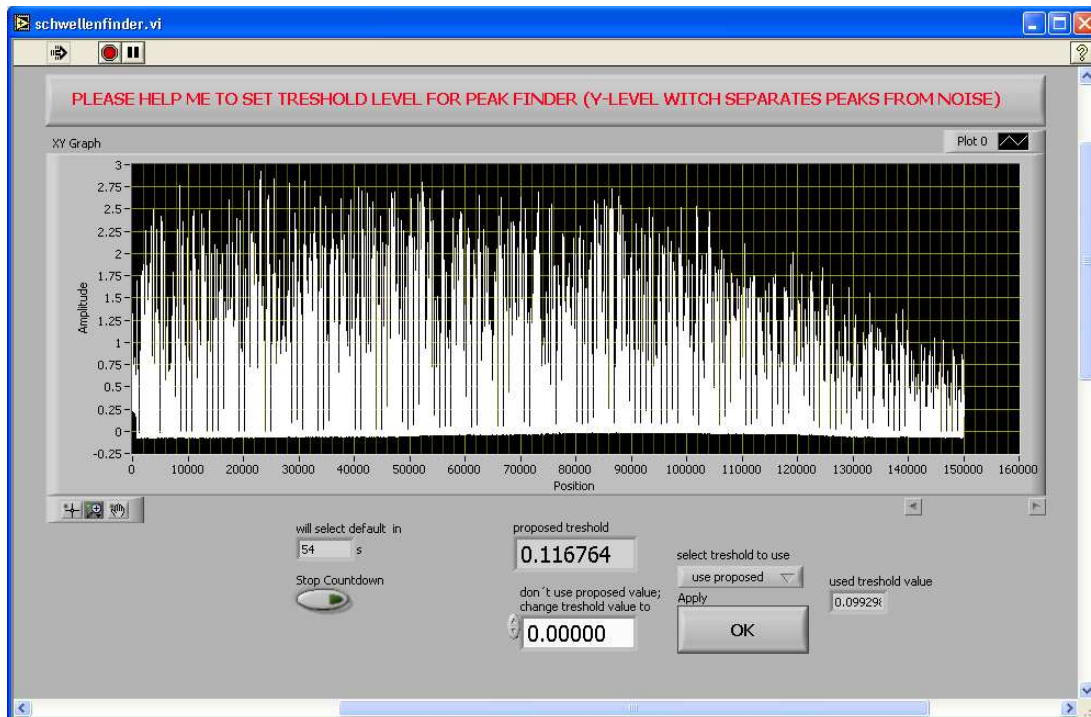
Da das vorgestellte Messverfahren auf Reflexionsmessungen beruht, muss zunächst ermittelt werden, wie stark die Reflexionssignale der Drähte im Vergleich zum Untergrundrauschsignal sind. Aufgrund von eventuellen Oxidationserscheinungen beim Kupfer-Beryllium-Draht und aufgrund ungleichmäßiger Goldbeschichtung (vgl. Abbildung 5.3) vom goldplattierten Wolframdraht zeigt sich, dass die Reflexionssignale von Draht zu Draht sehr unterschiedlich sein können (siehe Abbildung 5.4). Es ist daher notwendig, ein Reflexionsspektrum der gesamten Kammer mit Reflexionssignalamplituden jedes einzelnen Drahtes zu erstellen, um jeden Draht genau anfahren und ausmessen zu können. Dazu wird zunächst der Messschlitten einmal über die gesamte Kammer gefahren. Die An-



**Abbildung 5.3:** Eine mikroskopische Aufnahme zweier Anodendrahtproben in 1500 facher Vergrößerung (GSI, Darmstadt). Im linken Bild erkennt man einen unbeschädigten Draht. Im rechten Bild ist die Goldbeschichtung verletzt.

zahl der Pulse, die hierfür an den Motor übergeben werden muss, wird durch die Kammergröße berechnet. Der Motor wird im Halbschrittverfahren (siehe Abschnitt 4.3.2), was einem Fahrweg des Schlittens von  $5 \mu\text{m}$  pro Puls entspricht 4.3.1, betrieben. Der Motor bewegt sich bei einer Pulszug-Signaländerung von *TTL-high* nach *TTL-low*. Parallel dazu wird der zum Motor übergebene Pulszug als Triggersignal für den optischen Sensor verwendet. Um nicht gleichzeitig zur Motorbewegung Messwerte aufzunehmen, wird der optische Sensor bei jedem Zustandsübergang von *TTL-low* nach *TTL-high* ausgelesen. Man erhält somit für jeden Halbschritt einen Reflexionmesswert. Die aktuelle Position des Messkopfes wird ermittelt, indem das Längenmesssystem kontinuierlich mit dem internen Zähler der NI-DAQ Karte ausgelesen wird. Die Werte des Längenmesssystems werden zusammen mit den Reflexionsamplituden in die *Pos*-Datei geschrieben. Im Anschluss wird der Messkopf zum Ausgangspunkt am Anfang der Kammer, welcher durch einen Endschalter markiert ist, zurückgefahren und der Zähler im Quadrature Decoder auf Null gesetzt. Außerdem wird die *Pos*-Datei mit einem *Peakfinder* auf Maxima untersucht.

Der *Peakfinder* führt einen lokalen Fit der Datenpunkte mit einer quadratischen Funktion durch. Als Eingabewert benötigt der *Peakfinder* die erwartete Peakbreite, welche vom Drahtdurchmesser abhängt und sich somit ein bekannte Konstante ist, und eine Peakschwelle. Wird keine oder eine zu niedrige Schwelle angegeben, so werden Peaks mit kleiner Höhe aus dem Untergrundrauschpegel erkannt. Wird die Schwelle zu hoch eingestellt, so können nicht alle Drähte gefunden werden. Um einen vernünftigen Schwellenwert zu ermitteln, habe musste ein Schwellenfinder-Algorithmus entwickelt werden (Abbildung 5.4 zeigt die Front-



**Abbildung 5.4:** Der Schwellenfinder untersucht die Reflexionsdaten und legt einen Schwellenwert für einen gültigen Draht fest. Zu erkennen die sehr unterschiedlichen Reflexionsamplituden der einzelnen Drähte.

platte des Schwellenfinder-VIs).

Der Schwellenfinder ermittelt den Rauschpegel, indem er einen Mittelwert aller Messpunkte generiert. Da im Verhältnis zum Untergrund nur sehr wenige Peaks in den Daten sind, fallen diese kaum ins Gewicht und ziehen den Mittelwert höchstens etwas nach oben, was hier nicht von Nachteil ist. Nachdem der Mittelwert gefunden ist, wird der Messpunkt mit der minimalen Pulshöhe in den Daten gesucht. Dieser Minimalwert wird nun vom Rauschmittelwert abgezogen und dadurch die halbe Breite des Rauschens ermittelt. Der Rauschmittelwert addiert mit dem vierfachen<sup>11</sup> der halben Rauschbreite soll die Schwelle für den Peakfinder sein. Da die Reflexionsamplituden der einzelnen Drähte sehr verschieden sein können, kann der Algorithmus nicht bei jedem möglichen Drahtspektrum einen gültigen Schwellenwert liefern. Daher kann der Benutzer an dieser Stelle den Schwellenwert manuell überprüfen, falls ein Fehler auftritt<sup>12</sup>.

<sup>11</sup>Dieser Faktor hat sich experimentell als sinnvoll herausgestellt.

<sup>12</sup>Dies war bisher in keiner Messung notwendig.

Im Zusammenhang mit der Schwellenbestimmung für den Peakfinder gibt es ein weiteres Problem, welches Messungen der Kathodendrahtebene betrifft. Die Kathodendrähte liegen genau auf der Oberkante des Rahmens der TRD-Kammer, unter dem *wire ledge* (siehe Abbildung 3.4). Bei einer Messung der Kathodendrähte befinden sich daher nicht nur die Drähte im Fokus des optischen Sensors, sondern auch der Rahmen der Kammer. Reflexionen, die hier gemessen werden, können nicht von Drähten unterschieden werden, da die Amplitude der Reflexionen hier größer ist als die einiger Drähte (Abbildung 5.5). Um den Rand der Kammer für den optischen Sensor unsichtbar zu machen, muss er mit schwarzem Filz abgedeckt werden. Hierzu wurden filzüberzogene Abdeckbleche erstellt, welche leicht am Rahmen der Kammer angebracht werden können. Abbildung 5.5 zeigt das Reflexionsspektrum des Randbereiches einer Kammer mit und ohne Abdeckfilz.

Die mit dem Peakfinder ermittelten Peakhöhen und Positionen werden in der *Peak*-Datei notiert.

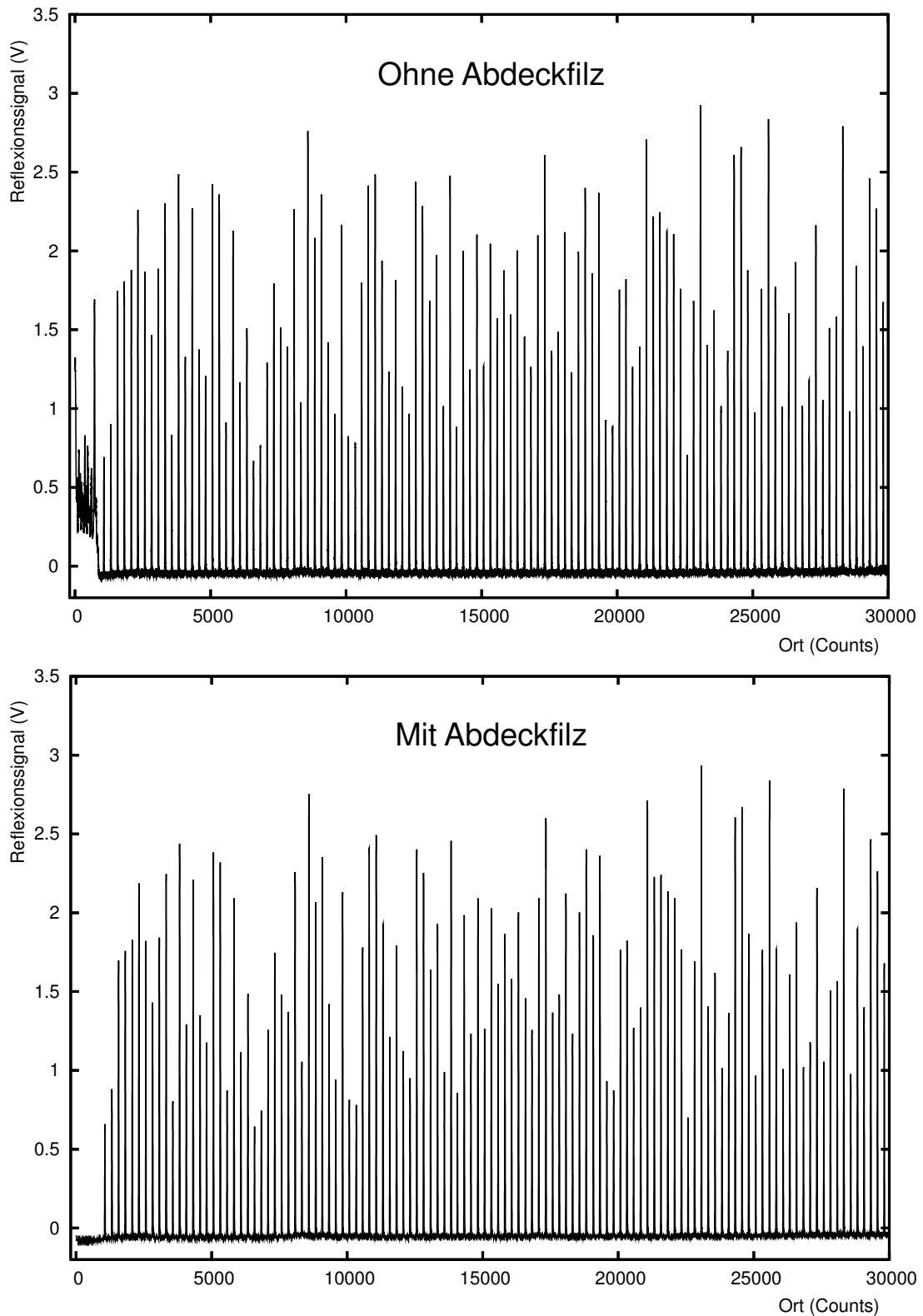
Die Zahl der Peaks wird mit dem Referenzwert aus der *Lookup*-Datei verglichen. Eine grüne LED zeigt Abweichungen an. Durch Differenzbildung der Positionen zweier benachbarter Peaks können die Abstände der Drähte in erster Näherung abgeschätzt werden. In erster Näherung, weil die Positionen nicht mit einem Quadratur-Dekoder verarbeitet, sondern direkt mit dem Zähler auf der Datenerfassungskarte bestimmt wurden. Da hier keine Richtungsinformation berücksichtigt werden kann werden Pulse, die von Vibrationen (Bewegungen entgegen der Fahrtrichtung) hervorgerufen werden, mitgezählt. Der aufgenommene Wert ist also nur eine obere Schranke für den realen Drahtabstand. Um einen schnellen Test zu ermöglichen, werden diese Werte dennoch auf Konformität mit den von Benutzer gewünschten Drahtabstandslimits geprüft. Eine LED zeigt das Ergebnis der Prüfung an (siehe Abschnitt 5.2). Zum Abschluss wird die Funktion des Magnetventils geprüft, indem es einige Male geöffnet wird<sup>13</sup>. Die eigentliche Messung kann daraufhin beginnen.

### 5.3.2 Spannungs- und Positionsmessung

Zur Spannungs- und Positionsmessung muss zunächst der erste Draht wiedergefunden werden. Dazu ist eine *Step-2-Peak*-Methode nötig. Aus der *Peak*-Datei

---

<sup>13</sup>Bei einigen getesteten Magnetventilen gab es Probleme mit klemmenden Öffnungsklappen, welche durch mehrmaliges Betätigen des Ventils wieder ganghaft gemacht werden konnten.



**Abbildung 5.5:** Reflexionsspektrum der Kathodenebene einer TRD-Kammer im Randbereich. Deutlich zu erkennen sind die Reflexionen des Rahmens, welche in der unteren Messung durch einen schwarzen Abdeckfilz sehr gut unterdrückt wurden.

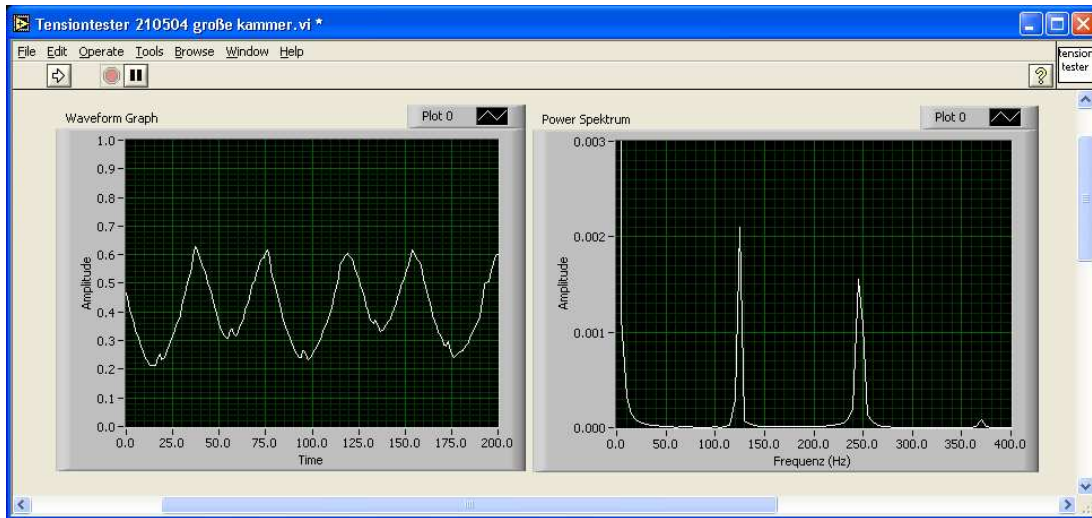


wird die maximale Reflexionsamplitude des ersten Drahtes gesucht. Es wird nun geprüft, ob der aktuell ausgelesene Messwert des Sensors dem für den nächsten erwarteten Draht entspricht. Tut er dies nicht, wird der Messkopf um einen Schritt weiterbewegt und die Reflexionssignalamplitude erneut geprüft. Da bei dieser Vorgehensweise jede Kommunikation mit dem Motor oder dem Sensor vom PC eingeleitet werden muss, ist sie sehr langsam und zeitaufwendig. Um das Verfahren zu beschleunigen, nutzt das Programm den im wesentlichen bekannten Drahtabstand aus. Der Soll-Abstand für die Kathodendrähte beträgt 2,5 mm, der für die Anodendrähte 5 mm. Der Messkopf wird daher nach einem gefundenen und vermessenen Draht um den erwarteten Drahtabstand minus 0,2 mm bewegt, ohne den Sensor auszulesen. Dies entspricht 40 Schritten des Motors im Halbschrittbetrieb und liegt weit außerhalb von möglichen Schrittfehlern. Im Mittel muss der Sensor so nur etwa 20 mal, jeweils nach zwei Halbschritten, ausgelesen werden und der Motor neu gestartet werden.

Da die Messwerte bedingt durch das Fahrverhalten des Schrittmotors und die Auslese immer nur diskret und nicht kontinuierlich aufgenommen werden können, kann es passieren, dass der maximale Amplitudenwert aus der *Peak*-Datei nicht mehr erreicht wird, sondern dass dieser zwischen zwei Messwerten übergangen wird (Abbildung 4.3, rechts). Daher wird bei Kathodendrähten zunächst nach einem Punkt gesucht, an dem 70% (80% bei der Anode) der maximalen Amplitude aus der *Peak*-Datei überschritten werden. Dann wird nach dem Punkt gesucht, an dem 70% der Maximalamplitude wieder unterschritten werden und der Messkopf wird um die Hälfte des Abstandes zwischen diesen beiden Punkten zurückgefahren. Dieser Punkt soll die Position des Drahtes kennzeichnen (siehe auch Abbildung 6.19).

Da der Quadrature Decoder zu jedem Zeitpunkt nach dem Reset zu Beginn der Messung eine Positionsinformation ausgeben kann (wie in Abschnitt 4.3.3 beschrieben), muss im Programm nur der mit dem Decoder verbundene Parallelport mit einem einfachen Treiberprogramm (*Posimag Parallel.vi*) ausgelesen werden. Die Zählerinformation des Decoders ist ein Maß für die Drahtposition und kann leicht in metrische Einheiten umgerechnet werden.

Die Spannungsmessung erfolgt durch Aufruf des *Tensiontester*-SubVIs. In diesem wird zunächst der Analoge Eingang der DAQ-Karte initialisiert. Kurze Zeit (0,2 s) nach dem Stillstand hat sich der Messkopf, welcher durch den Schrittmotorimpuls schwingen könnte, beruhigt und die eigentliche Frequenzmessung kann eingeleitet werden. Ein etwa 10 ms langes TTL-high-Signal wird an die Ventil-



**Abbildung 5.6:** Gezeigt ist die Schwingung eines angeregten Anodendrahtes mit dem Leistungsspektrum. Der erste Peak liegt bei  $f = 124,8$  Hz. Dies entspricht einer Drahtspannung von  $0,460$  N

steuerungselektronik übertragen, so dass das Ventil kurz (Die Öffnungszeit ist hardwareseitig auf  $13$  ms festgelegt) betätigt wird und der Draht durch die ausströmende Druckluft bei  $6$  bar<sup>14</sup>) zur Schwingung angeregt wird.

Über die analogen Eingänge werden nun eine Sekunde lang Signale vom optischen Sensor mit einer Samplerate von  $10000/s$  gelesen. Aus jeweils  $2000$  Samples<sup>15</sup> wird  $2$  Sekunden lang (also  $10$  mal) ein Leistungsspektrum berechnet. Für das Leistungsspektrum gilt Formel (4.8). Fügt man dem Leistungsspektrum eine gültige Zeitachseninformation hinzu, so können die enthaltenen Frequenzen der untersuchten Drahtschwingung in Hz abgelesen werden. Der erste Peak im Leistungsspektrum (Abbildung 5.6) entspricht der Grundfrequenz  $f_0$  der Drahtschwingung, welche für die Spannungsberechnung benötigt wird (siehe Abschnitt 4.2).

In der Software wird dieser Peak durch einen Peakfinder ermittelt, welcher zur Laufzeit lokal quadratische Funktionen an die Daten fittet. Der Peak mit dem kleinsten x-Wert wird an das *Cal\_Wiretension.vi* übergeben, welches Frequenz

<sup>14</sup>Der nötige Druck ist abhängig vom verwendeten Ventil. Das in der Bukarest-Maschine verbaute Festo MHE2-M1H-3/2G-QS-4 benötigt einen Luftdruck von etwa  $6$  bar. Das potentiell schnellere, in Heidelberg verbaute Festo MHE2-MS1H-3/2G-QS-4 benötigt nur etwa  $2$  bar.

<sup>15</sup>dies entspricht bei einer Signalfrequenz von  $125$  Hz  $25$  Schwingungsperioden

und Drahtparameter in Formel 4.3 einsetzt und die Spannung berechnet. Liegt die errechnete Spannung unter 0,4 N oder über 2 N, so wird die Messung bis zu fünf mal wiederholt, um Messfehler möglichst auszuschließen. Liegt der Messwert nach der fünften Messung noch immer außerhalb dieses Bereichs, wird er in die Messdatendatei aufgenommen.

Die gemessenen Werte werden zusammen mit der Ortsinformation des Posimagsystems und der Drahtnummer in die Messdatendatei geschrieben. Zusätzlich wird der Abstand zum vorhergehenden Draht berechnet und ebenfalls notiert. Vom Sollwert abweichende Abstände werden am Ende in der *BadGap*-Datei hinterlegt. Der Messschlitten wird nach Abschluss einer Messung in die Anfangsposition zurückgefahren. Auf dem Bildschirm wird ein *Quickplot*, also eine erste Auswertung der Messergebnisse gezeigt. Es wird die Spannung und der Abstand zum vorhergehenden Draht als Ordinate der Drahtnummer in einem Graphen gezeigt. So sind große Fehler auf einen Blick zu erkennen.



# 6. Messungen und Ergebnisse

## 6.1 Spannungsmessungen

Es wurden in Münster Testmessungen mit den für das NIPNE Bukarest und die Universität Heidelberg gebauten Wire-Test-Devices gemacht. Testobjekt war ein 1600 mm × 1200 mm großer Prototyp einer TRD-Kammer mit 288 Anodendrähten<sup>1</sup> und 596 Kathodendrähten.

### 6.1.1 Manuelle Messungen

Bisher wurden die Drahtspannungen per Hand mit dem Wire-Stretch-Meter WSM-660 (siehe Abschnitt 4.1) bestimmt. Die Messungen fanden jedoch an anderen als dem in Münster getesteten TRD-Prototypen statt.

Die mit dem WSM gemessenen Werte sind in den Abbildungen 6.1 und 6.2 gezeigt. In den Plots auf den linken Seiten der Abbildungen sind die Drahtnummern und auf der Ordinate die Spannungen aufgetragen. In den Histogrammen auf der rechten Seite sind alle gemessenen Spannungen eingefüllt und mit einer Gaußkurve gefittet worden. Die Breite der Gaußverteilung ist ein Maß für die Homogenität der Drahtspannungen aller Drähte der vermessenen Drahtebene und für die Güte des Messinstruments.

Es wurden eine Anodendrahtebene und die Kathodendrahtebenen von zwei verschiedenen Kammern vermessen. Mit dem Wire-Stretch-Meter WSM-660 wurde bei den Anodenmessungen ein Gaußsigma<sup>2</sup>  $\sigma = 0,0101$  N ermittelt.

Die Standardabweichung der Kathodenmessungen beträgt zwischen 0,038 N und 0,046 N, ist aber für einen späteren Vergleich mit dem Wire-Test-Device nicht besonders hilfreich, da die Spannung in der Mitte der Kammer geringer ist als im Randbereich. Die Gaußbreiten sind folglich nicht direkt vergleichbar, da nicht mit beiden Messgeräten dieselbe Kammer vermessen wurde.

Der zu erkennende Durchhang der Drähte in der Mitte einer Kammer ist auf

---

<sup>1</sup>Nominell sollten 298 Drähte aufgebracht sein, hier fehlen aber 10 Drähte.

<sup>2</sup>Die Standardabweichung  $\sigma$  ist ein Maß für den Messfehler und hängt mit der Halbwertsbreite  $FWHM$  der Gaußkurve wie folgt zusammen:  $FWHM = 2\sigma \cdot \sqrt{2\ln(2)} = 2,355\sigma$ . Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Messpunkt außerhalb von  $\sigma$  liegt beträgt 31,74%. Die Wahrscheinlichkeit für einen außerhalb von  $2\sigma$  liegenden Punkt 4,55% [Blo98].

Spannungsmessung Anode, manuell

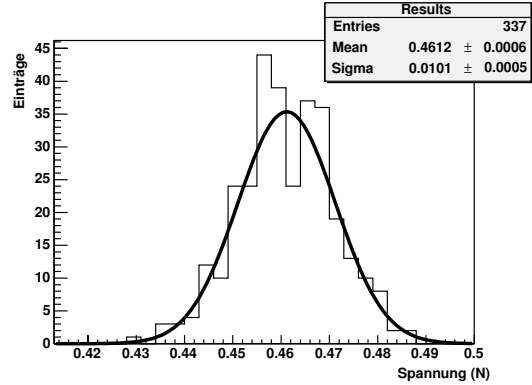
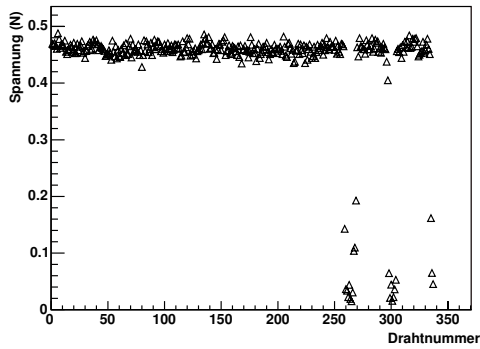
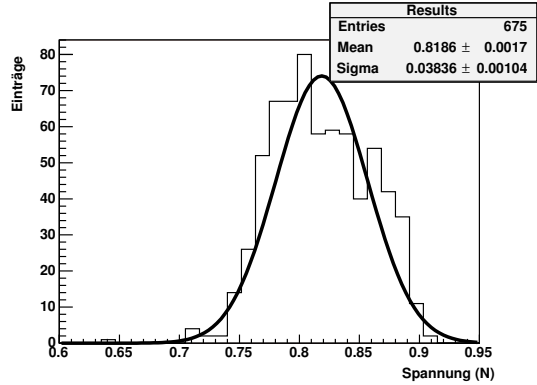
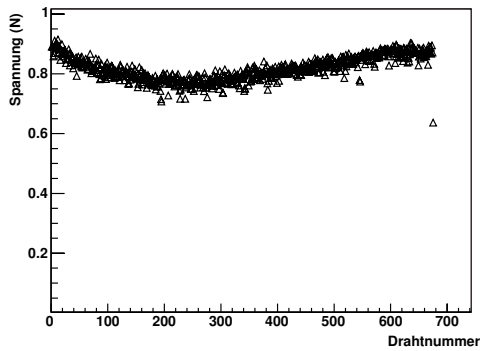
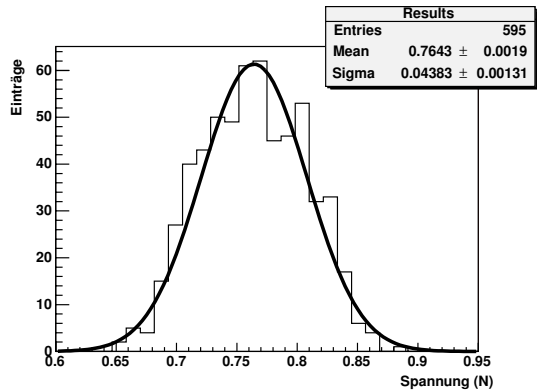
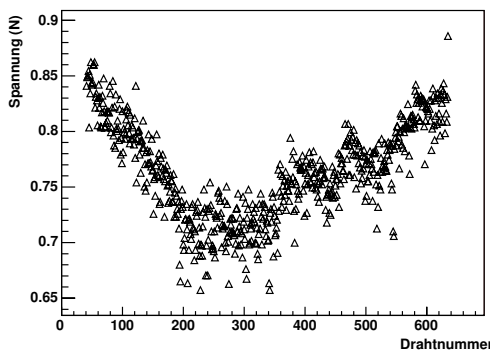


Abbildung 6.1: Spannungsmessungen von Anodendrähten mit dem Wire-Stretch-Meter WSM-660 in Heidelberg.

Spannungsmessung Kathode, manuell



Spannungsmessung Kathode, manuell



Spannungsmessung Kathode, manuell

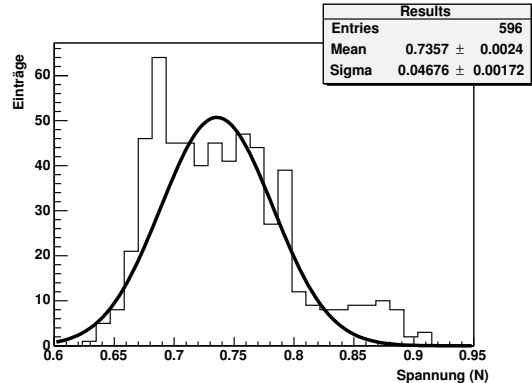
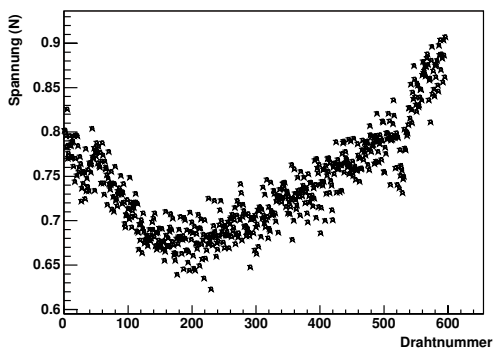
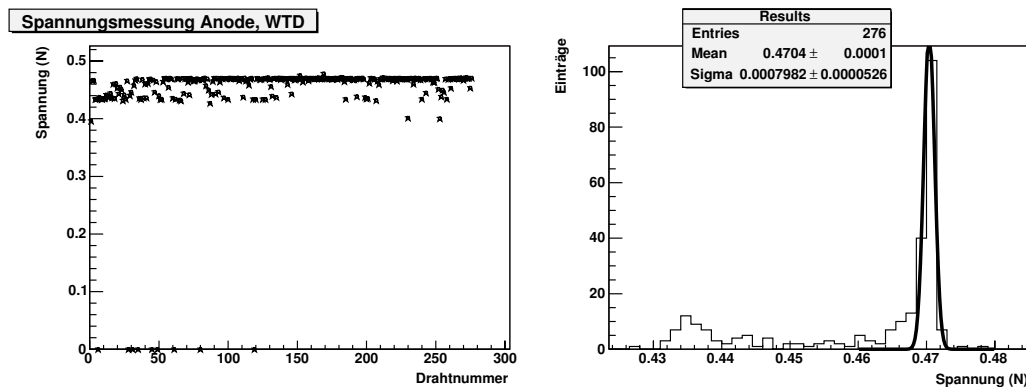


Abbildung 6.2: Spannungsmessungen von Kathodendrähten mit dem Wire-Stretch-Meter WSM-660 in Heidelberg.

die mechanische Konstruktion der Kammer zurückzuführen. Der Rahmen ist in den Randbereichen besser durch das Seitenprofil unterstützt als in der Mitte. Durch die Spannung der aufgeklebten Kathodendrähte verformt sich der Rahmen, so dass ein Abfall der Drahtspannung in der Mitte der Kammer die Folge ist. Bei den Anodendrähten ist kein Spannungsgradient zu beobachten, da sie erst nachdem die Kathodendrähte auf der Kammer platziert sind aufgebracht werden. Durch die geringere Anzahl, den kleineren Durchmesser und die kleinere Spannung wird der Rahmen durch die Anodendrähte weitaus weniger belastet.

### 6.1.2 Spannungsmessungen mit dem Wire-Test-Device

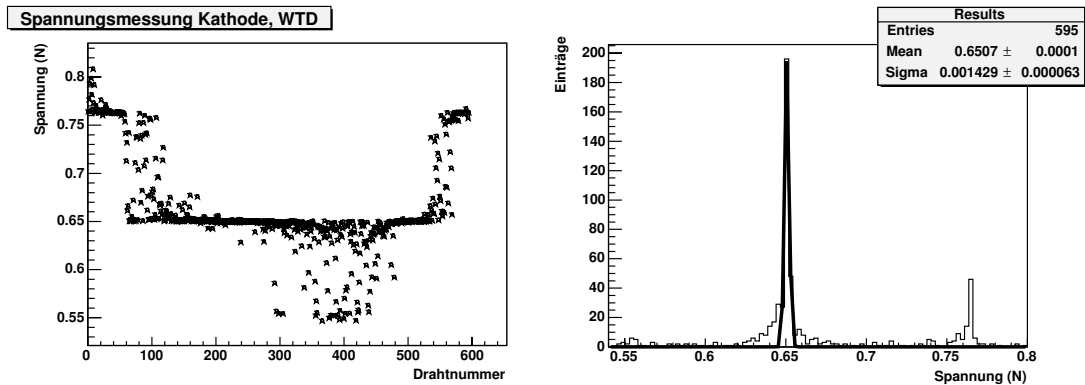
Die Spannungen von Drähten eines  $1600 \times 1200 \text{ mm}^2$  TRD-Prototypen wurden mit den beiden bislang gebauten Wire-Test-Devices für das Detektorlabor der Universität Heidelberg und das National Institute of Physics and Nuclear Engineering (NIPNE) in Bukarest gemessen. Die Abbildungen 6.3 und 6.4 zeigen



**Abbildung 6.3:** Spannungsmessung der Anodendrahtebene einer Testkammer in Münster mit dem für das NIPNE Bukarest gebauten Wire-Test-Device.

Spannungsmessungen aller Drähte auf der Prototypenkammer im X-Y-Plot und die Breite der Verteilung im Histogramm gemessen mit der für das NIPNE gebauten Maschine. Wie schon bei den manuellen Messungen in Heidelberg zeigt sich auch hier bei der Kathodendrahtebene ein deutlicher Einbruch der Drahtspannungen von bis zu 0,2 N (vgl. Abbildung 6.4).

In den Abbildungen ist zu erkennen, dass es bevorzugt gemessene Spannungen zu geben scheint. Drei fast schon diskrete Spannungsniveaus werden anstatt eines gleichmäßigen Spannungsabfalls zur Mitte der Kammer, wie er mit dem WSM



**Abbildung 6.4:** Spannungsmessung der Kathodendrahtebene einer Testkammer in Münster mit dem für das NIPNE Bukarest gebauten Wire-Test-Device.

gesehen wurde, ermittelt. Die Ursache dieses Verhaltens konnte nicht abschließend geklärt werden. Aufgrund der viel schärferen Spannungsverteilung schließen sich die Messungen beider Apparaturen jedoch nicht zwingend aus.

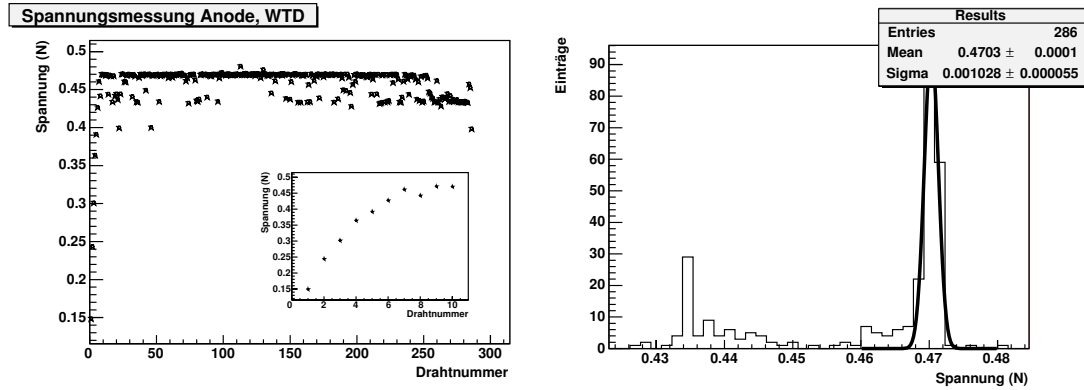
Die Höhe des Spannungseinbruchs ist verträglich mit den in Heidelberg gemessenen Einbrüchen. Vergleicht man die gemessenen Spannungsabweichungen mit den in den Abbildungen 4.1 und 4.2 gezeigten Zusammenhängen der Drahtspannung zum Durchhang und zur Gasverstärkungsänderung, so resultiert bei einer Ausgangsspannung von 1,2 N und einem Spannungsverlust von 0,2 N ein Drahtdurchhang von  $\approx 15 \mu\text{m}$  und eine Veränderung der Gasverstärkung von 1,2%. Für die von uns gemessene Kathodenspannung von etwa 0,8 N ist den Abbildungen leider kein Zusammenhang zu entnehmen.

31,74% der gemessenen Spannungswerte liegen außerhalb eines 0,0014 N Breiten Intervalls.

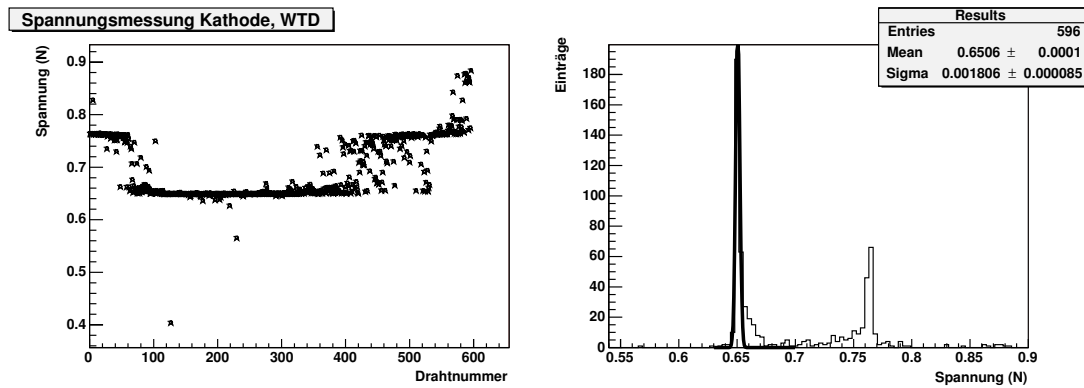
Die Anodenspannungen liegen bis auf einige wenige Drähte innerhalb einer Gaußverteilung mit einer sehr kleinen Breite von  $\sigma = 0,0008 \text{ N}$  bei einem Wert von etwa 0,47 N.

Die mit der für das Heidelberger Institut gebauten Apparatur gemessenen Spannungswerte sind in Abbildung 6.5 für die Anode und Abbildung 6.6 für die Kathode dargestellt. Es ergeben sich Spannungsverteilungsbreiten von ähnlicher Größenordnung wie schon bei der Bukarester Maschine. Für die Anodenmessungen ergibt sich ein Fehler von 0,001 N. Für die Kathodenmessungen beträgt der Fehler 0,0018 N.





**Abbildung 6.5:** Spannungsmessung der Anodendrahte ebene einer Testkammer in Münster mit dem für die Universität Heidelberg gebauten Wire-Test-Device. Im Ausschnitt ist eine vergrößerte Ansicht für die ersten 10 Drähte gezeigt.



**Abbildung 6.6:** Spannungsmessung der Kathodendrahte ebene einer Testkammer in Münster mit dem für die Universität Heidelberg gebauten Wire-Test-Device.

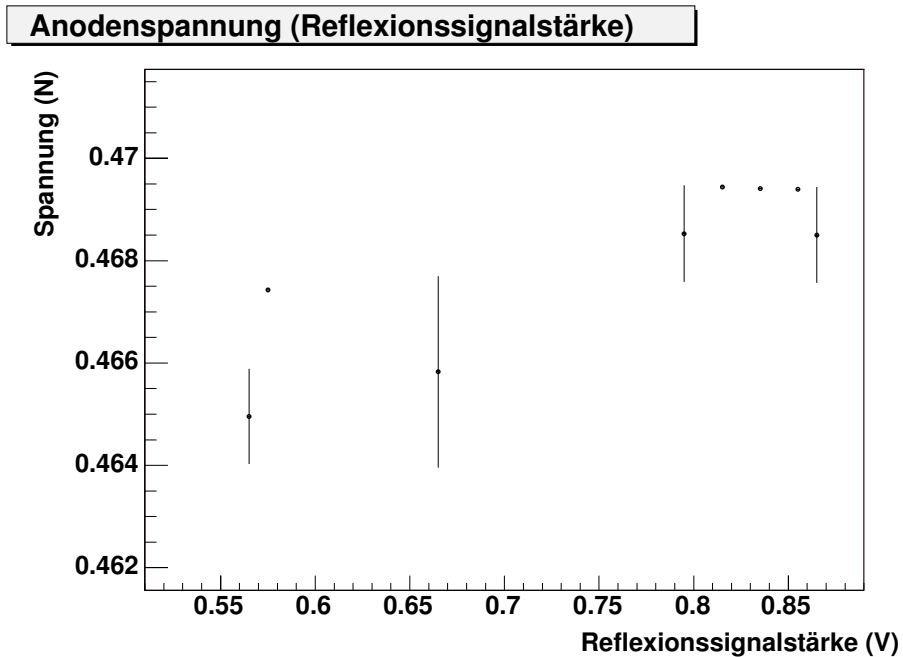
Im Ausschnitt der Abbildung 6.5 ist der Plot für die ersten 10 Drähte vergrößert dargestellt. Es ist eine deutliche, linear ansteigende, vom Normwert abweichende Spannung der ersten Anodendrähte zu erkennen. Zwischen den Messungen mit den beiden Apparaturen wurden diese Drähte durch eine zu tief montierte Druckluftdüse verletzt. Die ersten sechs Drähte wurden einige Zentimeter ausgelenkt, wodurch sie gestreckt wurden und somit linear an Spannung verloren haben. Dieser unglückliche Umstand zeigt die Fähigkeiten und den Nutzen des Wire-Test-Device.

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden gebauten Maschinen, so ist zu erkennen, dass sie in Mittelwert und Gaußsigma der Verteilungen im Rahmen der Fehler übereinstimmen. Zu sehen ist jedoch eine Irritation bei den Kathodenspannungsmessungen mit der Bukarestapparatur im mittleren Bereich der Kammer. Über die Ursache kann nur spekuliert werden. Möglich wäre eine etwas andere Geometrie der eingesetzten Düse, und somit eine leicht unterschiedliche Schwingungsanregung. Versuche haben gezeigt, dass eine Drahtanregung bei drahtstreifendem Luftstoß bessere Ergebnisse lieferte als eine Anregung durch mittig auf den Draht fallenden Luftstoß. Ursache hierfür sind vermutlich bei der streifenden Anregung weniger stark ausgeprägte torsions- und longitudinale Schwingungskomponenten. Die Messwerte erscheinen im Vergleich spiegelverkehrt, weil die Testkammer zwischen den Messungen um  $180^\circ$  gedreht worden ist.

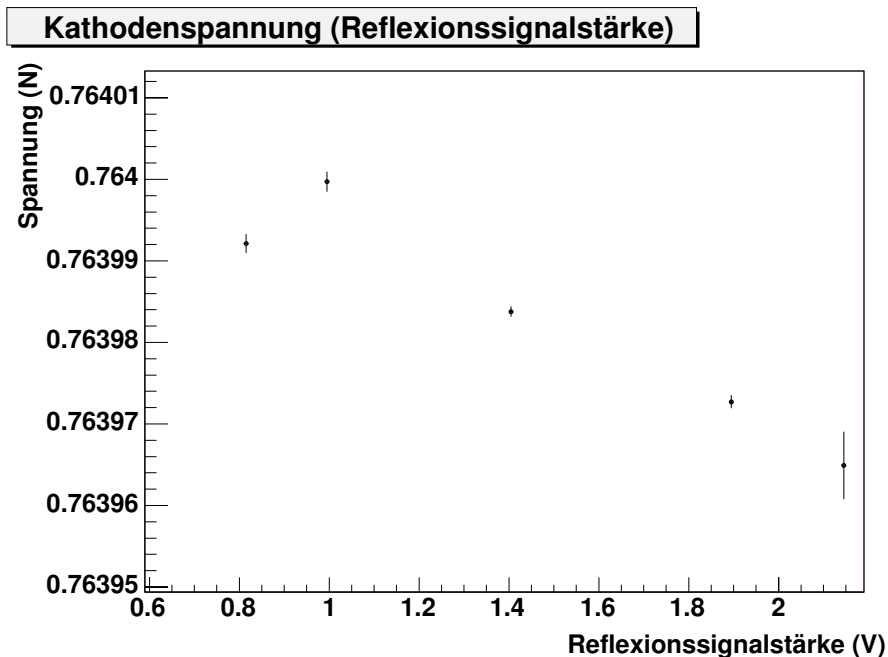
### 6.1.3 Verschiebung der Messkopfposition rechtwinkelig zur Drahtrichtung

Beim Positionieren des Messkopfes über dem Draht kann es passieren, dass nicht genau das Maximum der Drahtreflexion, und somit nicht die Mitte des Drahtes, getroffen wird, sondern ein einige Mikrometer vom Maximum entfernter Punkt (siehe Abschnitt 6.1 und Abbildung 6.19). Daher ist es notwendig zu prüfen, ob und wie stark sich eine ungenaue Messkopfposition auf eine Spannungsmessung auswirkt.

Bei verschiedenen Abständen vom Maximum der Reflexion wurde je 500 mal die Spannung für einen Anodendraht gemessen. Für die Kathodendrähte wurden 300 Messwerte aufgenommen. Trägt man den Mittelwert der gaußverteilten Spannungsmesswerte gegen die Reflexionsamplitude, welche ein Maß für den Abstand zum Drahtmittelpunkt ist, auf, so erhält man den in Abbildung 6.7 gezeigten Graphen für die Anode und den in Abbildung 6.8 gezeigten für die Kathode. Die



**Abbildung 6.7:** Spannungsmessungen bei Messkopfverschiebungen senkrecht zur Drahrichtung, wie sie beim Anfahren eines Drahtes vorkommen könnte. Gemessen ist ein Anodendraht mit der Bukarester Apparatur. Der Eingezeichnete Fehler ergibt sich als  $\Delta T = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$  mit  $N = 500$ .



**Abbildung 6.8:** Spannungsmessungen bei Messkopfverschiebungen senkrecht zur Drahrichtung, wie sie beim Anfahren eines Drahtes vorkommen könnte. Gemessen ist ein Kathodendraht mit der Bukarester Apparatur. Der Eingezeichnete Fehler ergibt sich als  $\Delta T = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$  mit  $N = 300$ .

Fehlerbalken ergeben sich durch das jeweilige Gaußsigma geteilt durch die Wurzel der Zahl der Messpunkte ( $\Delta\text{Spannung} = \sigma/\sqrt{N}$ ). Man erkennt in den Messpunkten eine leichte Abweichung der gemessenen Drahtspannung des Anodendrahtes zu, mit zunehmendem Abstand zum Draht, kleineren Werten. Die Variationen der Fehler scheinen in keinem Zusammenhang zum Drahtabstand zu stehen.

Bei den Kathodendrähten ist die Abweichung entgegengesetzt, nämlich nach oben für zunehmende Drahtabstände. Aufgrund einer höheren Reflexionsamplitude bei den Kathodendrähten und somit einem besseren Signal-zu-Rauschverhältnis war ein kleinerer Fehler zu erwarten.

Aufgrund dieser Messung läßt sich eine obere Schranke des Fehlers von  $4 \cdot 10^{-5}$  N für die Spannungsmessung der Kathodendrähte annehmen. Für die Anodendrähte beträgt der Fehler maximal  $5,5 \cdot 10^{-3}$  N. Hierbei sind jeweils die Abstände zwischen kleinstem und größtem Messwert berücksichtigt.

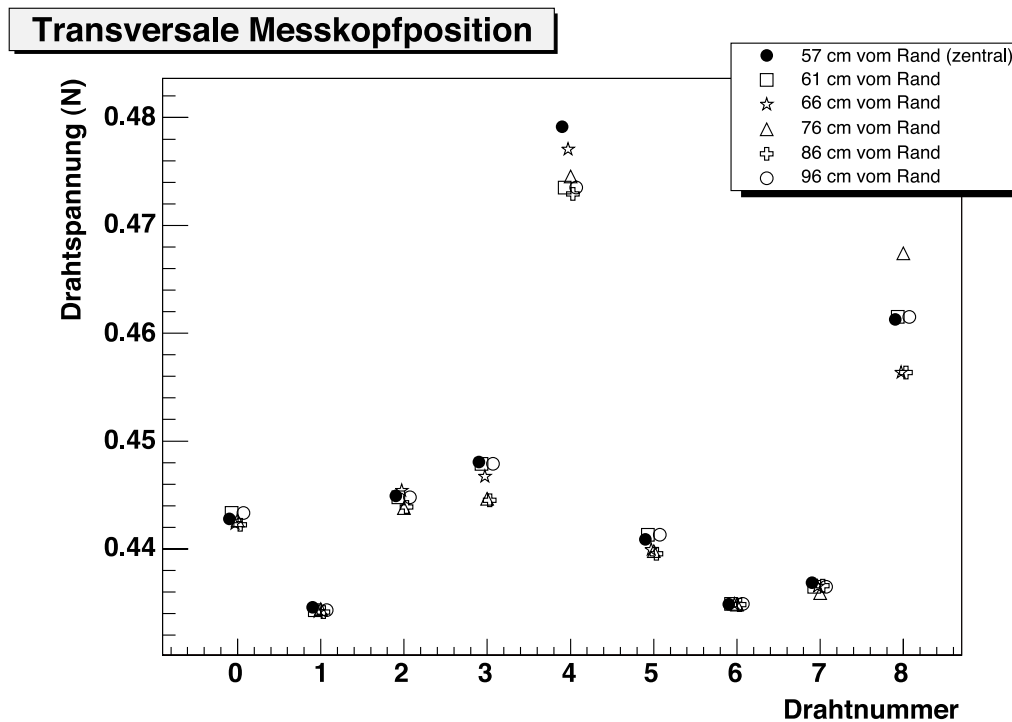
#### 6.1.4 Transversale Verschiebung der Messkopfposition

Die maximale Auslenkung eines Drahtes in der Grundschiwingung ist genau in der Mitte zwischen den beiden Auflagepunkten zu erwarten. Die erste Oberschiwingung sollte hier ihr Amplitudenminimum haben.

Die Spannungsbestimmung erfolgt durch Auswertung der Grundschiwingungsfrequenz. Daher sollte bei einer Messung in der Mitte des Drahtes eine besonders genaue Spannungsbestimmung möglich sein.

Um zu testen, wie wichtig eine genaue Positionierung des Messkopfes ist, wurde eine Messung durchgeführt: Die ersten 10 Drähte einer TRD-Kammer wurden unter Variation der Messposition entlang eines Drahtes auf ihre Spannung geprüft.

Abbildung 6.9 zeigt die Messergebnisse. Die Positionsangaben in cm sind vom Rand der Kammer an gemessen. Bei einer Gesamtdrahtlänge von 115 cm stellen die Ergebnisse der Einstellung bei 57 cm (Drahtmittelpunkt) den Referenzwert dar. Erstaunlicherweise ist bei der Messung kaum ein Zusammenhang zwischen Messkopfposition und Messergebnis zu erkennen. Die Abweichung beträgt im Mittel nicht mehr als 0.003 N wobei die größten Abweichungen nicht bei den von der Mitte entferntesten Messkopfpositionen zu finden sind. Auf eine große Messstatistik wurde in diesem Versuchsteil verzichtet, da der dadurch provozierte Fehler sehr gering ist (siehe Abschnitt 6.1.5).



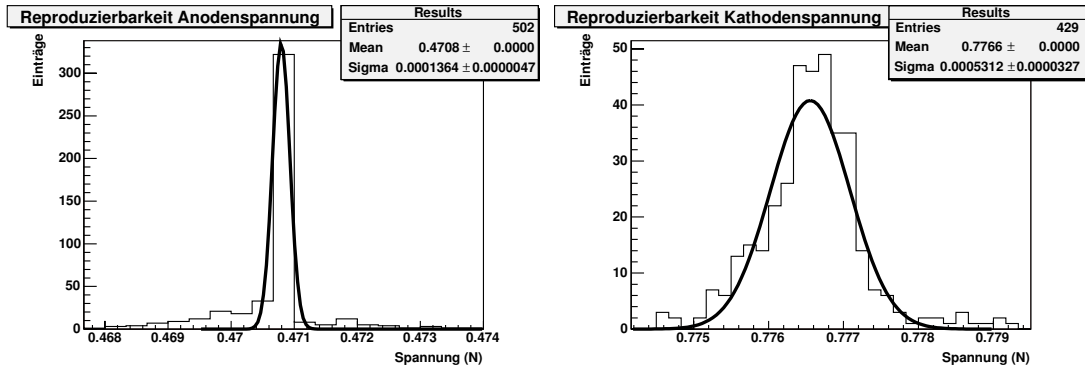
**Abbildung 6.9:** Spannungsmessungen bei transversaler Messkopfverschiebung entlang des Drahtes mit zunehmendem Abstand von der Kammermitte. Die Messwerte hängen kaum von der Kopfposition ab.

### 6.1.5 Reproduzierbarkeit der Spannungsmessungen

Um einen Fehler der Spannungsmessungen abschätzen zu können, soll die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse überprüft werden. Um eine ausreichende Statistik zu bekommen, wurden die Spannungen der Drähte auf den ersten 10 cm der Testkammer mehrere Stunden lang vermessen.

Die gemessenen Drähte wurden vor jeder Messung neu angefahren, so dass ein Spannungsfehler aufgrund unterschiedlicher Messkopf-zu-Draht Position in den Ergebnissen enthalten ist (siehe auch Abschnitt 6.1.3). Die Abbildung 6.10 zeigt die Messergebnisse für einen Anoden und einen Kathodendraht des Messintervalls.

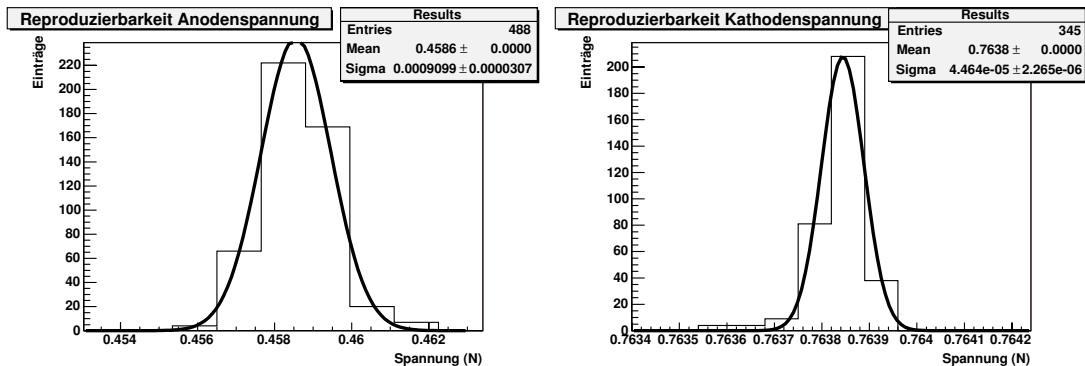
Der Anodendraht wurde 502 mal angefahren und auf Spannung geprüft. Der Kathodendraht 429 mal. Die Anodenspannung wurde mit einer Standardabweichung von  $\sigma = 1,36 \cdot 10^{-4}$  N sehr genau als 0,4708 N bestimmt. Die Kathodendrähte



**Abbildung 6.10:** Reproduzierbarkeit der Spannungsmessung jeweils eines Drahtes der Anoden- und Kathodendrahtebene mit dem Bukarester Wire-Test-Device.

wurden mit einer etwas größeren Abweichung von  $\sigma = 5,31 \cdot 10^{-4}$  N als  $0,7766$  N gemessen.

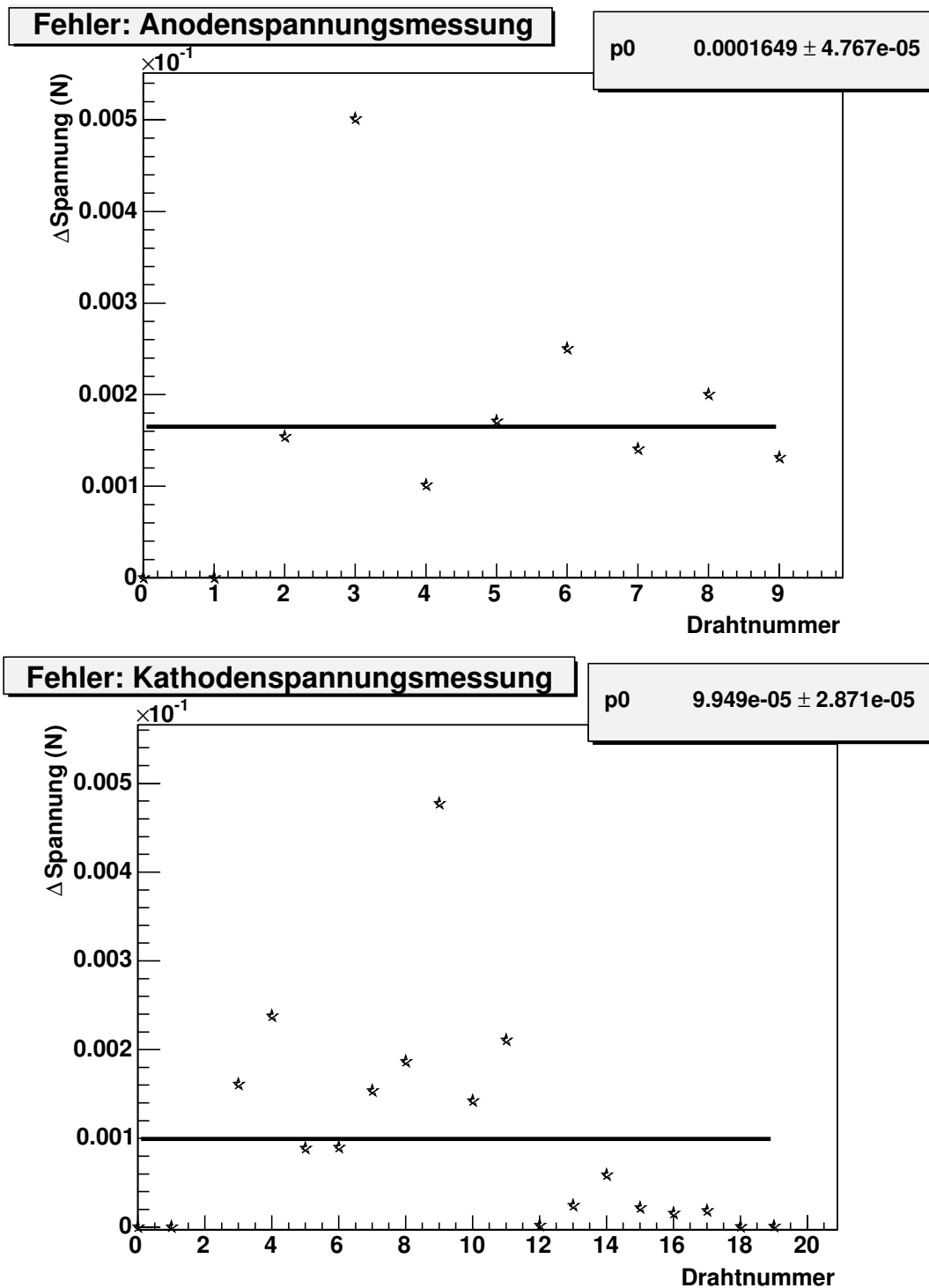
Die Abbildungen 6.11 zeigt dieselbe Messung mit dem in Heidelberg installierten Wire-Test-Device. Hier wurde der Anodendraht 488 mal und der Kathodendraht 345 mal vermessen. Der Fehler der Messungen liegt in der selben Größenordnung



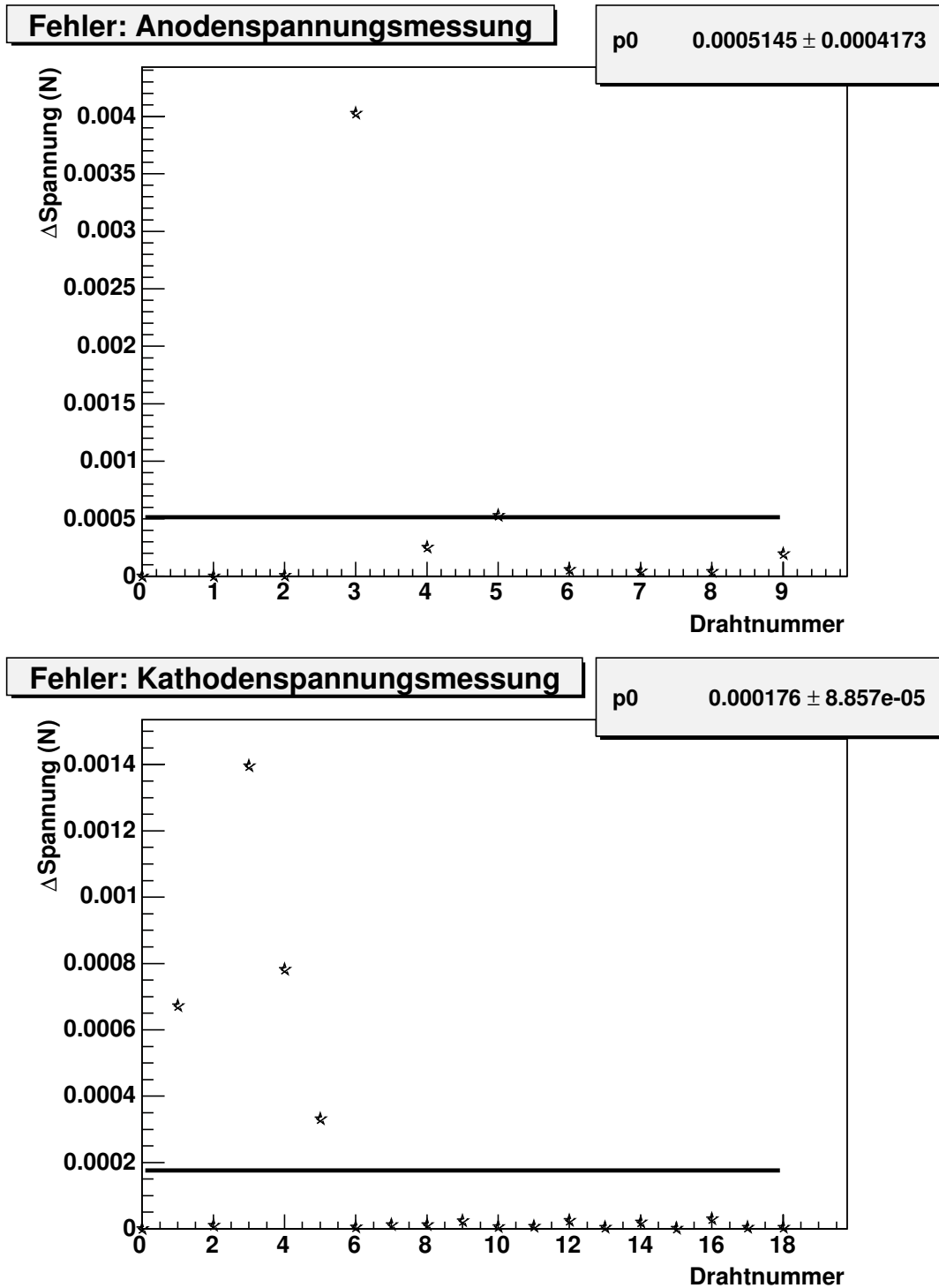
**Abbildung 6.11:** Reproduzierbarkeit der Spannungsmessung jeweils eines Drahtes der Anoden- und Kathodendrahtebene mit dem Heidelberger Wire-Test-Device.

wie schon bei der Bukarester Maschine. Für den beispielhaft gewählten Anodendraht wurde eine Spannung von  $0,4586$  N mit einer Standardabweichung von  $9,1 \cdot 10^{-4}$  N gemessen. Für den Kathodendraht wurde die Spannung als  $0,7638$  N mit einem Gaußsigma von  $\sigma = 4,46 \cdot 10^{-5}$  N ermittelt.

Die Abbildung 6.12 zeigt die Fehler einer Profilaufnahme der gemessenen Span-



**Abbildung 6.12:** Gezeigt sind die Fehler der Spannungsmessungen der ersten 10 Anodendrähte und der ersten 20 Kathodendrähte mit der Bukarester Maschine. Die Fehler ergeben sich aus  $\Delta T = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Es liegen je eingezeichnetem Punkt 502 Messwerte für die Anodendrähte bzw. 429 Messwerte für die Kathodendrähte zugrunde. Die Ausgleichsgerade 0ter Ordnung zeigt den mittleren Fehler.



**Abbildung 6.13:** Gezeigt sind die Fehler der Spannungsmessungen der ersten 10 Anodendrähte und der ersten 20 Kathodendrähte mit der Heidelberger Maschine. Die Fehler ergeben sich aus  $\Delta T = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Es liegen je eingezeichnetem Punkt 488 Messwerte für die Anodendrähte bzw. 325 Messwerte für die Kathodendrähte zugrunde. Die Ausgleichsgerade 0ter Ordnung zeigt den mittleren Fehler.



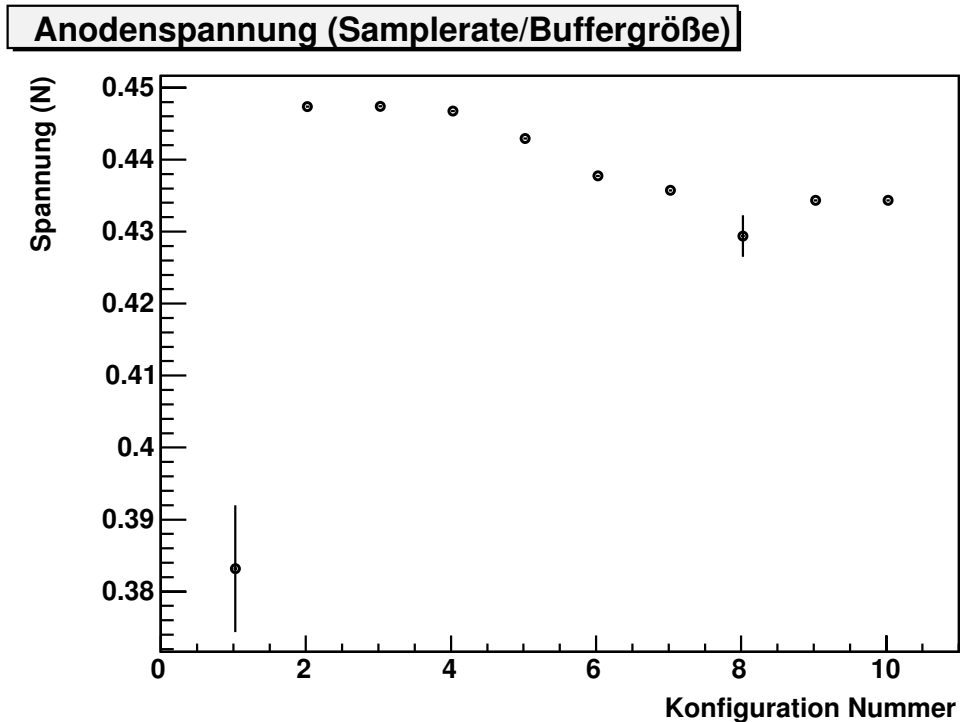
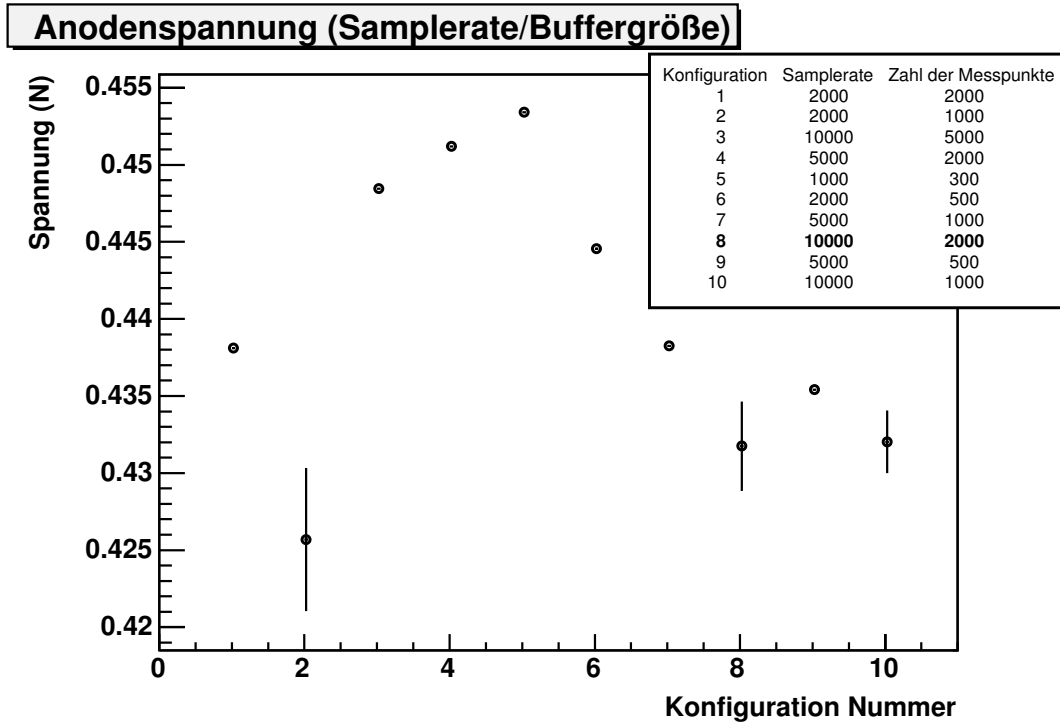
nungen für die ersten Drähte der Testkammer, gemessen mit der Bukarester Maschine. Abbildung 6.13 zeigt die mit der Heidelberger Maschine aufgenommenen Fehler. Um einen mittleren Fehler angeben zu können, wurden die Messpunkte mit einer Konstanten gefittet. Der Wert der Konstanten  $p_0$  ist im Graphen angegeben. Der mittlere Fehler übersteigt bei keiner der vier Messungen  $5 \cdot 10^{-4}$  N. Der maximale Fehler für die Kathodendrahtspannungsmessungen liegt unter 0,0014 N oder 0,2%. Für die Anodenspannungen liegt er maximal bei 0,004 N oder 1%. Jeweils gemessen mit dem Heidelberger Instrument.

### 6.1.6 Abtastrate und Buffergröße

Testmessungen haben gezeigt, dass die aus dem Leistungsspektrum bestimmten Schwingungsfrequenzen von der Abtastrate und der Zahl der Messpunkte abhängt. Dies steht scheinbar in keinem Zusammenhang mit dem Abtasttheorem, welches besagt, dass die Abtastrate mindestens der doppelten Frequenz des abzutastenden Signals entsprechen muss. Für den Abstand zweier Frequenzlinien im Fourierraum gilt  $\Delta f = \frac{\text{Abtastrate}}{N-1}$  [Rup93]. Um das Verhalten zu untersuchen, wurden jeweils 300 Spannungsmessungen an zwei verschiedenen Anodendrähten für verschiedene Werte der Parameter Abtastrate und Punktmengengröße durchgeführt. Da die Spannung abhängig vom Quadrat der Frequenz ist, ist auch diese mit einem resultierenden systematischen Fehler behaftet. Die Tendenz der Messpunkte in Abbildung 6.14 zeigt ein ähnliches Verhalten. Es ist zu erkennen, dass die gemessene Spannung zu kleineren Verhältnissen  $\frac{\text{Abtastrate}}{\text{Punktmenge}}$  steigt. Da der Fehler systematisch ist, stört er die Messung nicht wirklich, da die Hauptaufgabe des Wire-Test-Device eine vergleichende, keine absolute Spannungsmessung sein soll. Der systematische Fehler muss hier auf  $\Delta T = 0,02$  N abgeschätzt werden. Da bei den Testmessungen eine Abtastrate von  $10 \frac{\text{KS}}{\text{s}}$  bei einer an das Leistungsspektrum übergebenen Punktmenge  $N = 2000$  die subjektiv besten Ergebnisse lieferte, wurde diese Einstellung verwendet.

## 6.2 Positionsmessungen

Zusätzlich zu den Spannungsmessungen werden mithilfe des in Abschnitt 4.2.1 erklärten Positionssensors die Drahtpositionen und Abstände zum vorhergehenden Draht bestimmt.



**Abbildung 6.14:** Aufgetragen ist die gemessene Spannungen in Abhängigkeit des Verhältnisses von Abtastrate und der Zahl der an das Leistungsspektrum übergebenen Punkte  $N$ . Pro Messpunkt liegen 300 Messwerte zugrunde. Die verwendete Konfiguration ist in Fettschrift hervorgehoben. Die Fehlerbalken ergeben sich aus  $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Zu erkennen ist ein systematischer Fehler von 0,02 N.

### 6.2.1 Gaußbreite der Positionsmessungen

Ähnlich wie schon bei den Messungen der Spannungen wurden die Abstände eines jeden Drahtes zum vorhergehenden Draht in einem X-Y-Plot aufgetragen. Auf der X-Achse ist die Drahtnummer und auf der Y-Achse der Abstand zum vorhergehenden Draht eingezeichnet. In dieser Auftragung sind fehlende oder verschobene Drähte sofort zu erkennen.

Die in Abbildung 6.15 gezeigten Daten wurden mit der für das Heidelberger Labor gebauten Maschine aufgenommen.

Im linken Plot der Abbildung 6.15 lässt einen Drahtabstand von 30 mm statt dem Normwert von 5 mm bei zwei Drähten im hinteren Bereich der Kammer ablesen. Es fehlen hier demnach 2 mal 5 Drähte. Außerdem scheinen bei etwa Drahtnummer 185 zwei Drähte etwas verschoben zu sein.

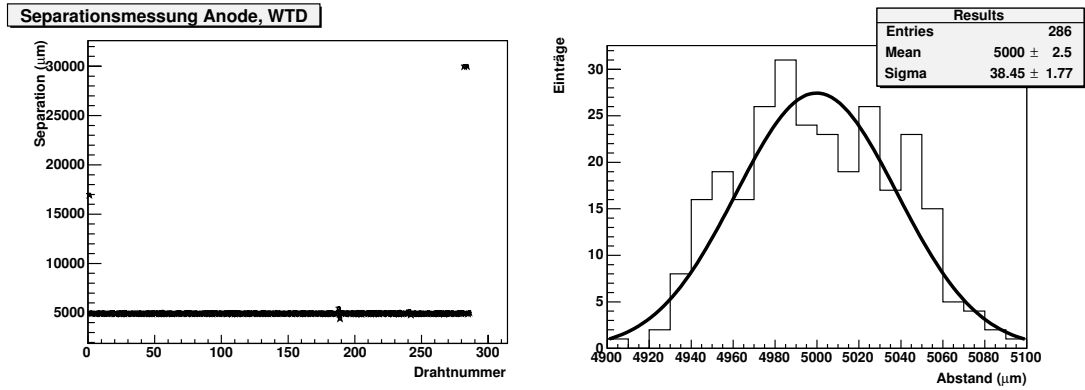
Das rechte Bild der Abbildung zeigt die Breite der Abstandsmessungen. Der mittlere Abstand wurde mit  $5000 \mu\text{m}$  sehr genau bestimmt. Die Schwankungen der Abstandsmessung liegen in einem Fehlerbereich von  $38,5 \mu\text{m}$ .

Für die Kathodendrahtebene zeigt sich ein ähnliches Bild. Abbildung 6.16 zeigt die gemessenen Werte im X-Y-Plot und die Breite der Verteilung im Histogramm. Auch hier wurde der mittlere Abstand mit  $2500 \mu\text{m}$  sehr genau bestimmt. Der Fehler beträgt hier  $46,9 \mu\text{m}$ .

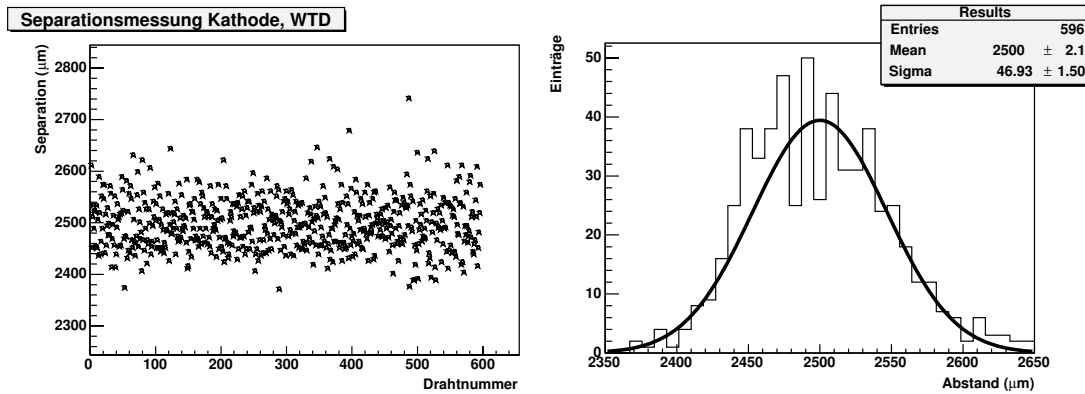
Mit dem Bukarester Wire-Tension-Meter wurden die in Abbildung 6.17 gezeigten Messpunkte für die Anodenabstände aufgenommen. Es wurde dieselbe Testkammer benutzt, die schon mit der Heidelberger Apparatur vermessen wurde. Zu sehen ist, dass im Bereich, in dem die Heidelberger Maschine  $2 \times 5$  fehlende Drähte entdeckt hat, hier  $2 \times 1$  Draht und  $2 \times 4$  Drähte fehlende Drähte gefunden worden sind, bei denen die Abstände jedoch leicht vom Normwert abzuweichen scheinen. Faktisch hat die Heidelberger Maschine die zwei mal fünf fehlenden Drähte richtig erkannt. Die Bukarester Maschine muss von einer reflektierenden Oberfläche im Fokus des optischen Sensors irritiert worden sein. Dies könnte vielleicht ein gerissener und quer über der Kammer liegender Draht oder auch nur ein erhöhtes Untergrundrauschen sein (das Signal-zu-Rauschverhältnis beträgt bei den Anodendrähten nur etwa  $\frac{0,8\text{V}}{0,5\text{V}} = 1,6$ ).

Im Histogramm ist zu erkennen, dass auch diese Maschine hervorragend verarbeitet ist, und in der Lage ist, die mittleren Abstände der Drähte mit einem Fehler von  $28,2 \mu\text{m}$  auf  $4998 \mu\text{m}$  zu bestimmen.

Die Kathodendrahtabstände wurden mit im Mittel  $2499 \mu\text{m}$  und einem Fehler



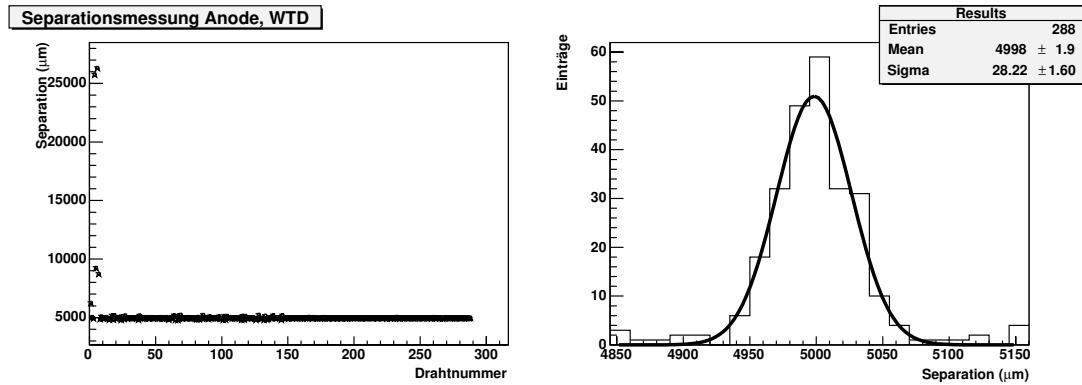
**Abbildung 6.15:** Separationsmessungen der Anodendrahtebene einer Testkammer in Münster mit dem für die Universität Heidelberg gebauten Wire-Test-Device.



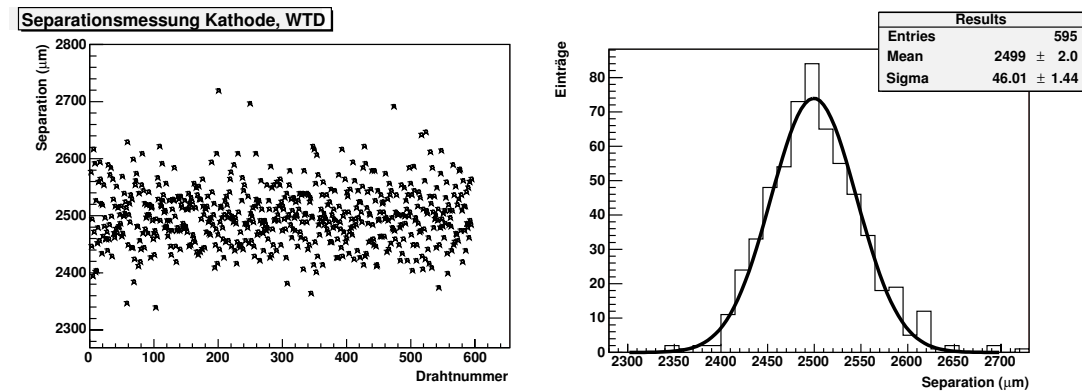
**Abbildung 6.16:** Separationsmessungen der Kathodendrahtebene einer Testkammer in Münster mit dem für die Universität Heidelberg gebauten Wire-Test-Device.

von  $46 \mu\text{m}$  ebenfalls sehr genau bestimmt. Die Ergebnisse hierzu sind der Abbildung 6.18 zu entnehmen.

Die sehr genauen Ergebnisse lassen auf eine sehr genaue Verarbeitung von Laufrollen und Bewegungsmechanik der Maschine und auf einen funktionierenden Messalgorithmus schließen. Außerdem sind die Drähte sehr exakt auf der Testkammer positioniert worden.



**Abbildung 6.17:** Separationsmessungen der Anodendrahtebene einer Testkammer in Münster mit dem für das NIPNE Bukarest gebauten Wire-Test-Device.



**Abbildung 6.18:** Separationsmessungen der Kathodendrahtebene einer Testkammer in Münster mit dem für das NIPNE Bukarest gebauten Wire-Test-Device.

## 6.2.2 Reproduzierbarkeit der Drahtabstandsmessungen

Eine Fehlerquelle bei der wiederholten Bestimmung der Drahtpositionen ist der Algorithmus (siehe Abschnitt 6.1). Beim Anfahren des Reflexionssignalmaximums eines Drahtes wird ein Bereich zwischen den zwei 70% (Kathodendrähte) bzw. 80%-Schwellen (für die Anodendrähte) des Reflexionspeaks angefahren. Abbildung 6.19 zeigt das aufgenommene Reflexionssignal eines Anoden- und eines Kathodendrahtes. Die beiden Schwellen sind eingezeichnet.

Man erkennt, dass die beiden Schwellenpunkte über  $100 \mu\text{m}$  weit auseinander liegen. Das Maximum liegt im Idealfall in der Mitte zwischen den beiden Schwel-

lenpunkte. Der Fehler soll hier auf  $\pm 50 \mu\text{m}$  beziffert werden.

Um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse abschätzen zu können, wurde der Abstand von zwei Drähten mit beiden gebauten Maschinen sehr oft vermessen. Für die Bukarester Maschine sind die Ergebnisse in Abbildung 6.20 für einen Anodendraht und einen Kathodendraht gezeigt.

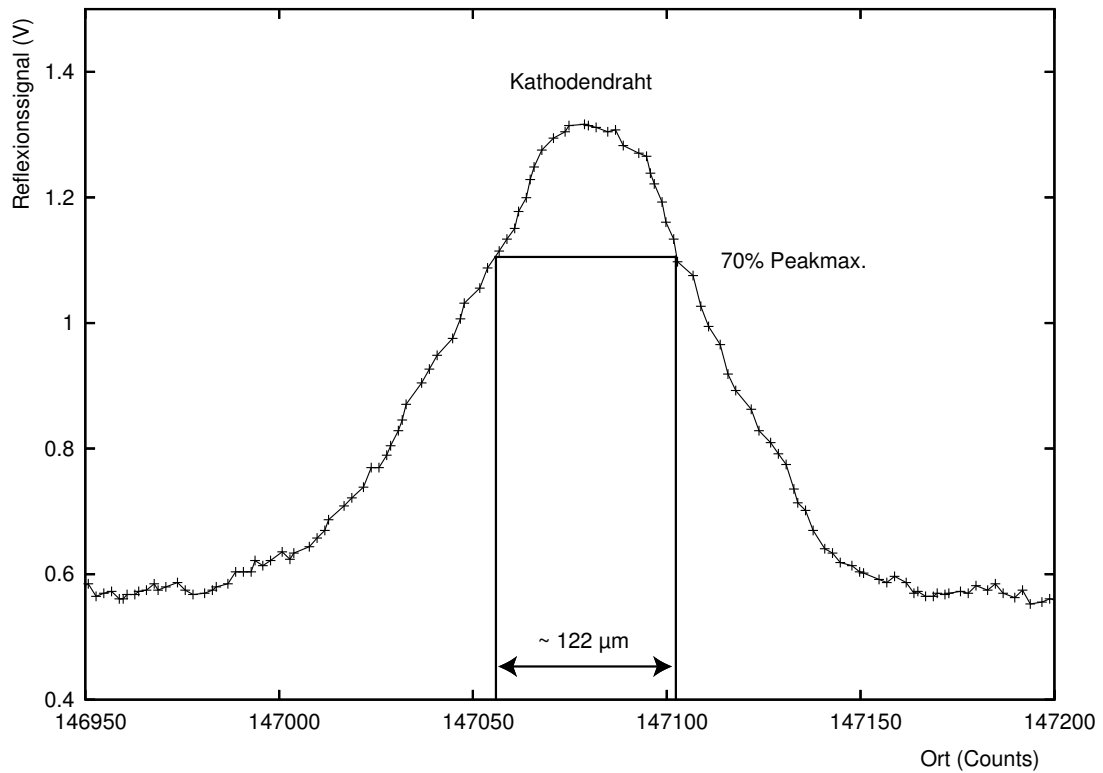
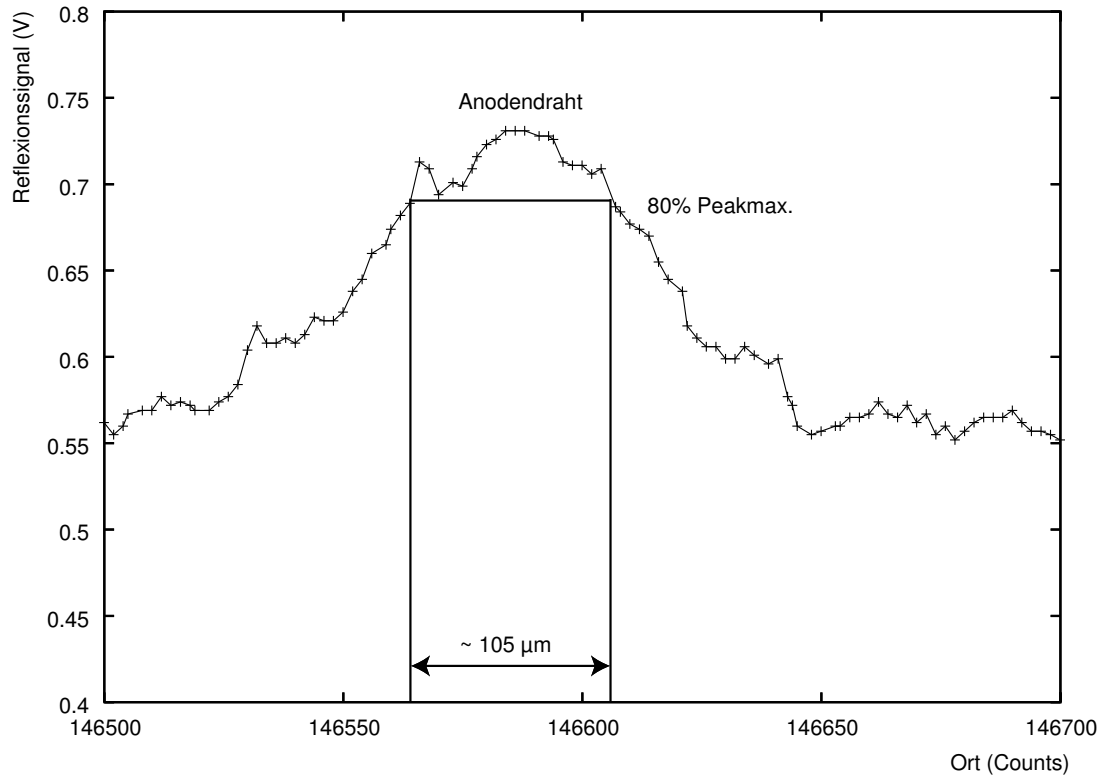
Die dünneren Anodendrähte wurden bei 502 Messungen mit einem Fehler von  $2,85 \mu\text{m}$  genau bestimmt. Die Messung der breiteren Kathodendrähte lieferte bei 429 Messwerten einen Fehler von  $13,8 \mu\text{m}$ .

Bei der Heidelberger Maschine sind nur sehr wenige Messpunkte aufgenommen worden. Mit einer Statistik von 33 Messpunkten für die Anodendrähte erhält man so einen Fehler von  $12,4 \mu\text{m}$ . Für die Kathodendrähte erhält man mit noch geringerer Statistik von 26 Messwerten einen Fehler für die Abstandsbestimmung von  $6,9 \mu\text{m}$ .

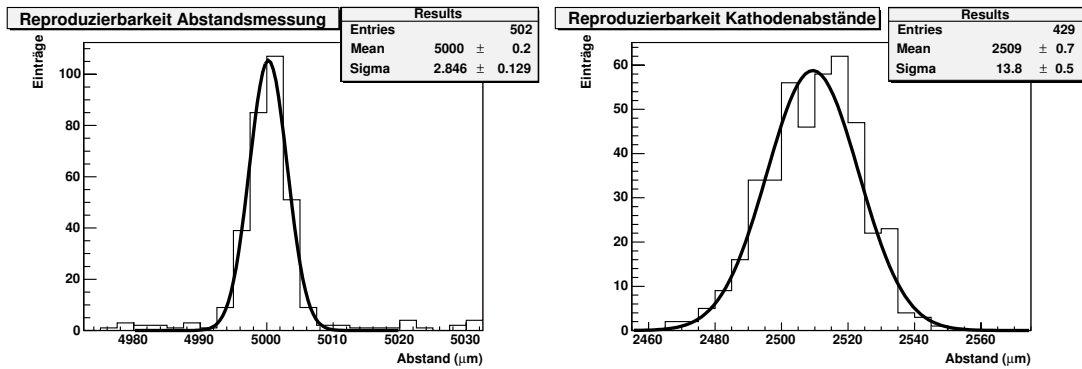
### 6.2.3 Profil der Abstandsmessungen

Die zuvor beschriebene Reproduzierbarkeitsmessung wurde für die ersten 9 Drähte der Anodenebene und für die ersten 18 Drähte der Kathode durchgeführt. Die Mittelwerte der Messungen sind mit einem Fehlerbalken von  $\Delta x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$  in den Abbildungen 6.22 bis 6.25, jeweils für beide gebauten Maschinen und beide Drahtebenen, aufgetragen und mit einer Konstanten gefittet. Auf den rechten Seiten der Abbildungen ist der Fehler  $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$  für die einzelnen Drähte aufgetragen und mit einer Konstanten gefittet worden.

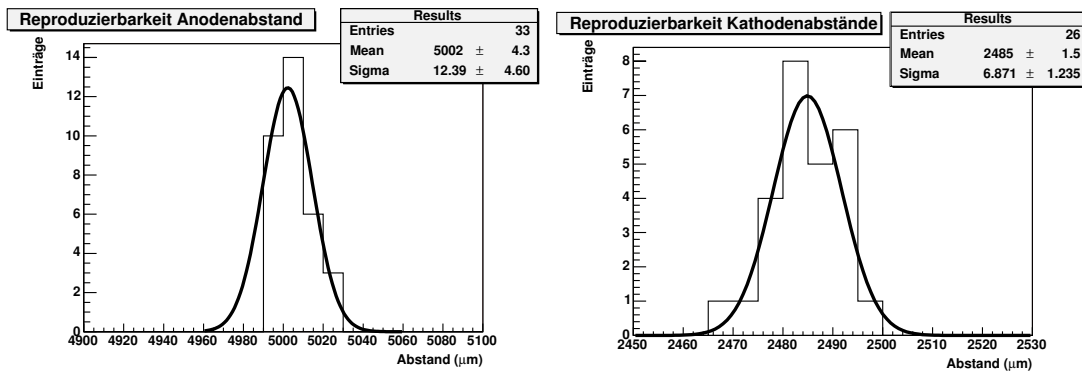
Nimmt man die angefitteten Konstanten als Maß für die Reproduzierbarkeit der Messungen, so erhält man für die Bukarester Maschine einen Fehler von  $5,2 \mu\text{m}$  für die Anode und  $1 \mu\text{m}$  für die Kathode. Die mit der Heidelberger Apparatur in einer viel geringeren Statistik bestimmten Messpunkte liefern eine Abweichung von  $3,9 \mu\text{m}$  für die Anode und von  $1,9 \mu\text{m}$  für die Kathode. Besonders die Werte für die Kathodenfehler sind erstaunlich, da sie kleiner als die physikalische Auflösung des Längenmesssystems von  $2,5 \mu\text{m}$  sind.



**Abbildung 6.19:** Sensorsignal bei Überfahrt eines Drahtes. Eingezeichnet ist die Breite des Peaks bei 70% des Maximums (Kathode) bzw. 80% des Maximums (Anode).



**Abbildung 6.20:** Reproduzierbarkeit der Abstandsmessung zweier Drähte der Anoden- und der Kathodendrahtebene mit dem Bukarester Wire-Test-Device.



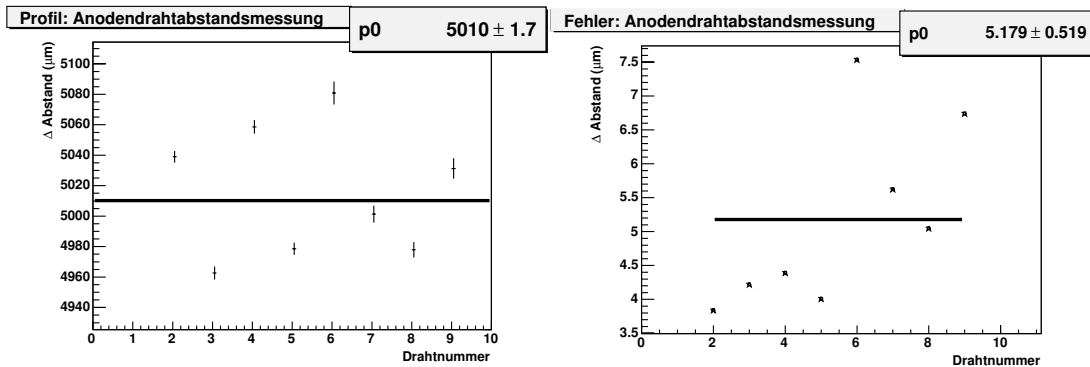
**Abbildung 6.21:** Reproduzierbarkeit der Abstandsmessung zweier Drähte der Anoden- und der Kathodendrahtebene mit dem Heidelberger Wire-Test-Device.

### 6.3 Diskussion der Gesamtfehler

Für die Spannungsmessung kann man aus den diskutierten Fehlerquellen einen Gesamtfehler bestimmen.

Im *best case* ist dieser auf die mittlere Abweichung der Reproduzierbarkeitsmessung zurückzuführen. Die mittlere Abweichung überschreitet bei keiner Messung 0,0005 N. Eine vergleichende Messung kann somit für die Kathodenebene mit einer Sollspannung von 1,2 N mit einem Fehler von 4% durchgeführt werden. Für die Anodendrähte mit einer Sollspannung von 0,45 N beträgt der Fehler 11%. Für eine absolute Spannungsmessung addiert sich der systematische Fehler von 0,02 N, welcher aus der Wahl von Abtastfrequenz und Buffergröße resultiert.





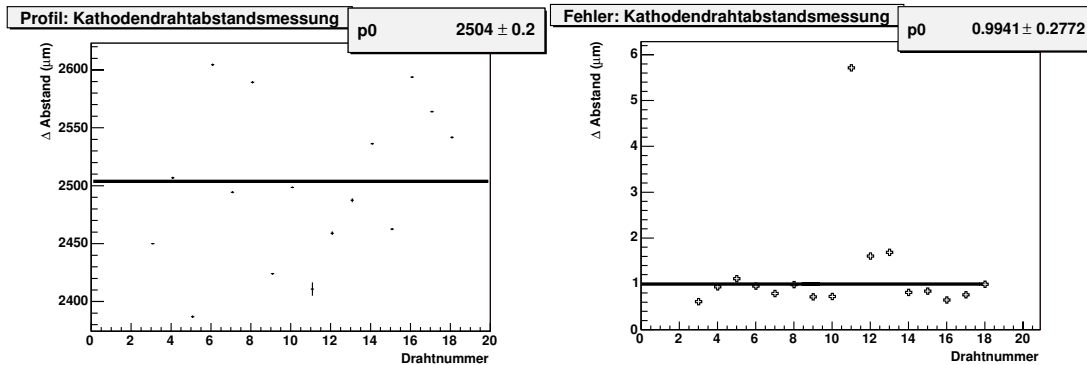
**Abbildung 6.22:** Profil und Fehler der Abstandsmessungen für die ersten 9 Anodendrähte aufgenommen mit dem Bukarester Wire-Test-Device. Die eingezeichneten Fehler ergeben sich als  $\Delta x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Es liegen 502 Messwerte pro Messpunkt zugrunde.

Dies führt zu einem Fehler von 4,5% für die Anodendrähte und 1,7% für die Kathodendrähte.

Der Fehler im *average case* resultiert aus dem der transversalen Verschiebung und dem maximalen Fehler der Reproduzierbarkeitsmessungen. Er beträgt bei einer vergleichenden Messung für die Anodendrähte  $(0,003 + 0,004) N = 0,007 N$  ( $\cong 1,5\%$ ) und für die Kathodendrähte  $(0,003 + 0,0014) N = 0,0044 N$  ( $\cong 0,36\%$ ). Für eine absolute Fehlerangabe muss wieder der systematische Fehler von 0,02 N hinzugenommen werden. Die Anodenspannung kann so auf 6% und die Kathodenspannung auf 2% genau bestimmt werden.

Im *worst case* ist der Fehler der Sensor-zu-Draht Positionsmessung, der transversalen Verschiebung der Kopfposition und der maximale Fehler der Reproduzierbarkeitsmessungen zu addieren. Der Fehler für die Spannungstests der Anodendrähte beträgt so  $(0,0055 + 0,004 + 0,003) N = 0,0125 N$  ( $\cong 2,8\%$ ). Für die Kathodendrähte errechnet man  $(0,00004 + 0,0014 + 0,003) N = 0,00444 N$  ( $\cong 0,37\%$ ). Für eine absolute Spannungsmessung ergeben sich so Fehler von 7,2% für die Anodendrahtmessungen und 2% für die Kathodendrahtmessungen.

Ein Vergleich mit dem Wire-Stretch-Meter WSM ist schwierig, da hierzu nicht genügend Messdaten vorliegen. Vergleicht man die Breiten der Spannungsmessungsverteilungen einer Kammer, so erreicht man mit dem Wire-Test-Device ein um den Faktor 10 kleineres Gaußsigma ( $0,001 N$  beim Wire-Test-Device gegenüber  $0,0101 N$  beim WSM). Die Gaußbreiten der Kathodenmessungen sind aufgrund des Spannungsabfalls in der Mitte der Kammern nur schlecht vergleichbar. Nimmt

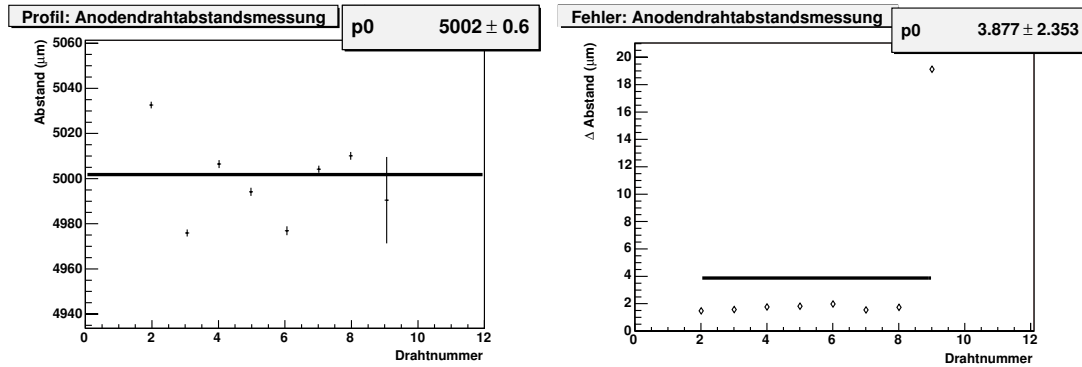


**Abbildung 6.23:** Profil und Fehler der Abstandsmessungen für die ersten 20 Kathodendrähte aufgenommen mit dem Bukarester Wire-Test-Device. Die eingezeichneten Fehler ergeben sich als  $\Delta x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Es liegen 429 Messwerte pro Messpunkt zugrunde.

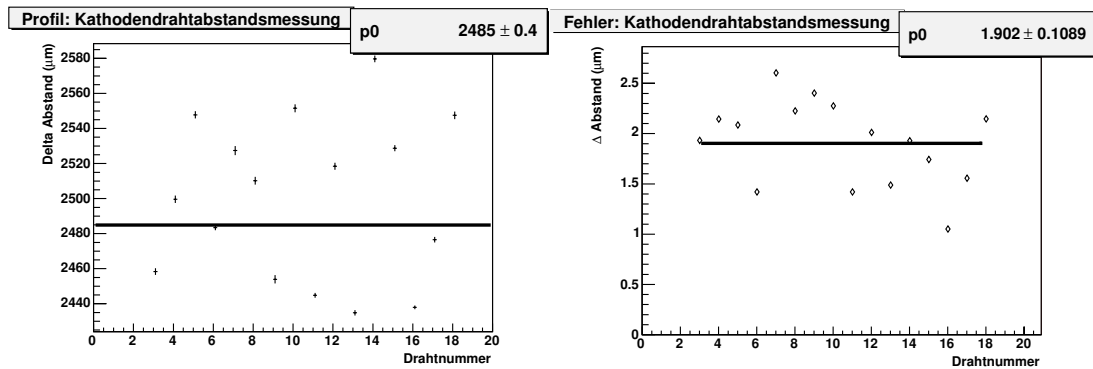
man aufgrund von ähnlicher Kathodendrahtzahl und ähnlichem Betrag des Spannungsabfalls ähnliche Kammergeometrien an, so kann vorsichtig  $\sigma_{\text{WSM}} = 0,046 \text{ N}$  mit einem  $\sigma_{\text{WTD}} = 0,0018 \text{ N}$  verglichen werden und eine beim Wire-Test-Device um den Faktor 25 schmalere Gaußverteilung gefunden werden.

Der Fehler der Positionsmessung ergibt sich aus der Summe des systembedingten Fehlers von  $50 \mu\text{m}$  und dem im Vergleich dazu geringen Fehler von  $< 10 \mu\text{m}$ , welcher durch die Reproduzierbarkeitsmessungen motiviert wird. Der Fehler für die Positionsmessungen soll somit auf  $\pm 60 \mu\text{m}$  abgeschätzt werden.

Bei einem Anodendrahtabstand von nominell 5 mm beträgt der relative Fehler 1,2%. Bei einem Kathodendrahtabstand von 2,5 mm ist ein relativer Fehler von 2,4% anzunehmen.



**Abbildung 6.24:** Profil und Fehler der Abstandsmessungen für die ersten 9 Anodendrähte aufgenommen mit dem Heidelberger Wire-Test-Device. Die eingezeichneten Fehler ergeben sich als  $\Delta x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Es liegen 33 Messwerte pro Messpunkt zugrunde.



**Abbildung 6.25:** Profil und Fehler der Abstandsmessungen für die ersten 20 Kathodendrähte aufgenommen mit dem Heidelberger Wire-Test-Device. Die eingezeichneten Fehler ergeben sich als  $\Delta x = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ . Es liegen 26 Messwerte pro Messpunkt zugrunde.



## 7. Zusammenfassung

Simulationen der Gasverstärkung und des elektrischen Feldes einer TRD-Auslesekammer haben gezeigt, dass die Kontrolle von Spannung und Position der Anoden- und Kathodendrähte im Rahmen der Produktionskontrolle notwendig ist.

In dieser Arbeit wird die Entwicklung und Inbetriebnahme einer Maschine dokumentiert, welche automatisiert, und somit für den Benutzer zeitsparend, Spannung und Position von Drähten in Vieldrahtproportionalkammern bestimmen kann.

Durch die Art der mechanischen Konstruktion und den Verzicht auf Spezialbauteilen wie etwa Linearführungen konnte der Kostenrahmen gering gehalten werden, ohne Einbußen der Messpräzision hinnehmen zu müssen.

Das System besteht aus einem über die Vieldrahtkammer verfahrbaren Messinstrument, der Ansteuerelektronik und einem LabVIEW PC, welcher die Kontrolle und Steuerung der Maschine übernimmt. Viele sowohl bei den mechanischen als auch bei den elektronischen Komponenten verwendete Standardbauteile sind, wie auch die Datenerfassungshardware, leicht einem neuen Einsatzzweck zuzuführen falls die Maschine außer Betrieb genommen oder modifiziert werden soll.

Im Vergleich zu bisherigen Testmethoden zeigen sich klare Vorteile in Punkto Bedienbarkeit, Präzision und Messgeschwindigkeit.

Die bisher gebauten Maschinen des entwickelten Typs sind in den ALICE TRD Laboratorien der Universität Darmstadt und am National Institute of Physics and Nuclear Engineering in Bukarest, Rumänien in Betrieb genommen worden. Sie können Drahtabstände mit einer Genauigkeit von besser als  $\pm 60 \mu\text{m}$  bestimmen.

Drahtspannungen können mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,7 \text{ cN}$  (Anode) bzw.  $\pm 0,44 \text{ cN}$  (Kathode) relativ zueinander bestimmt werden. Absolute Spannungsmessungen können mit Genauigkeiten von  $\pm 2,7 \text{ cN}$  (Anode) bzw.  $\pm 2,44 \text{ cN}$  (Kathode) vorgenommen werden.

Die entwickelte Maschine bietet somit eine für die Qualitätskontrolle der TRD-Produktion ausreichende Messgenauigkeit.



## 8. Anhang

### 8.1 Anhang I - Technische Zeichnungen

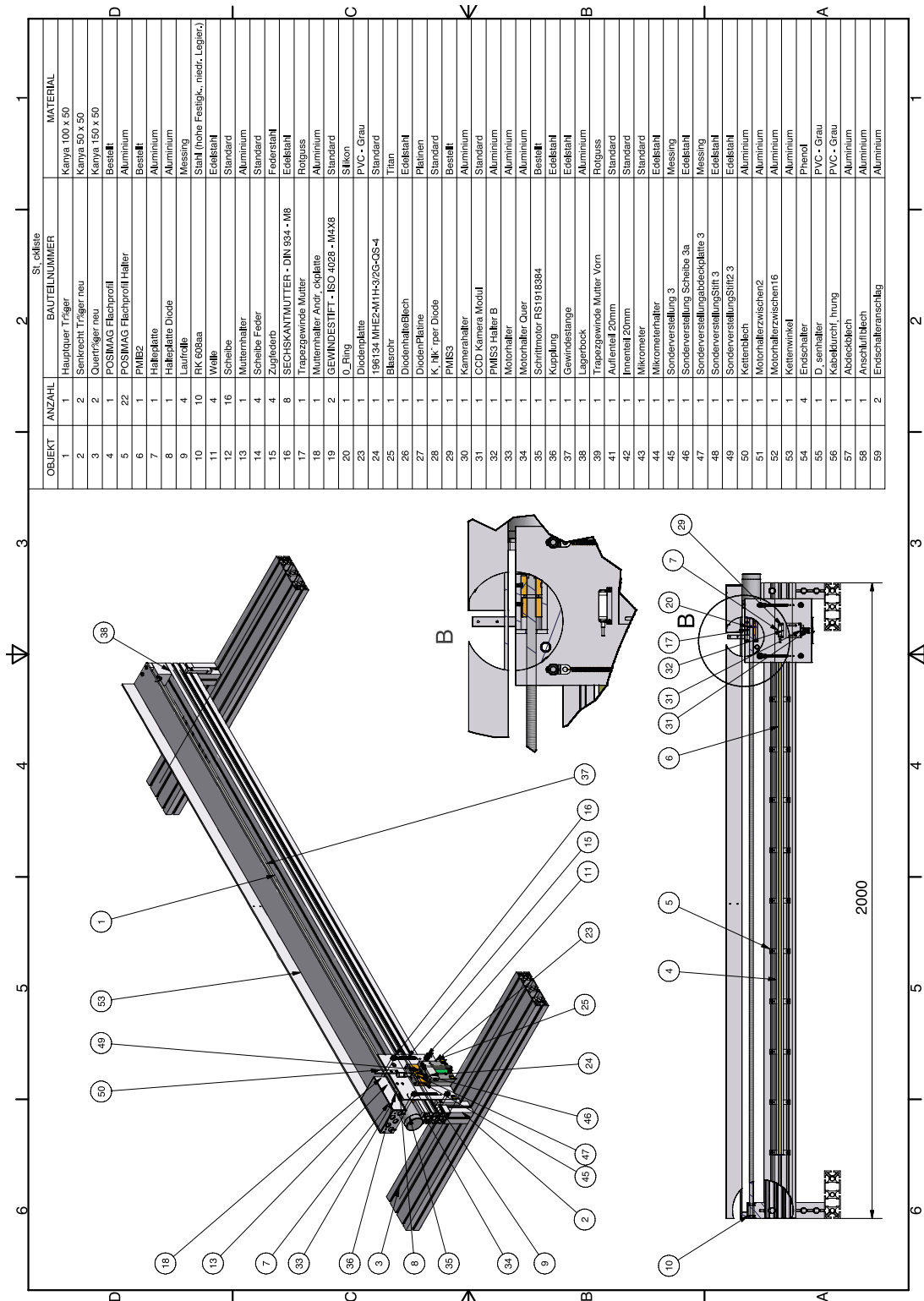
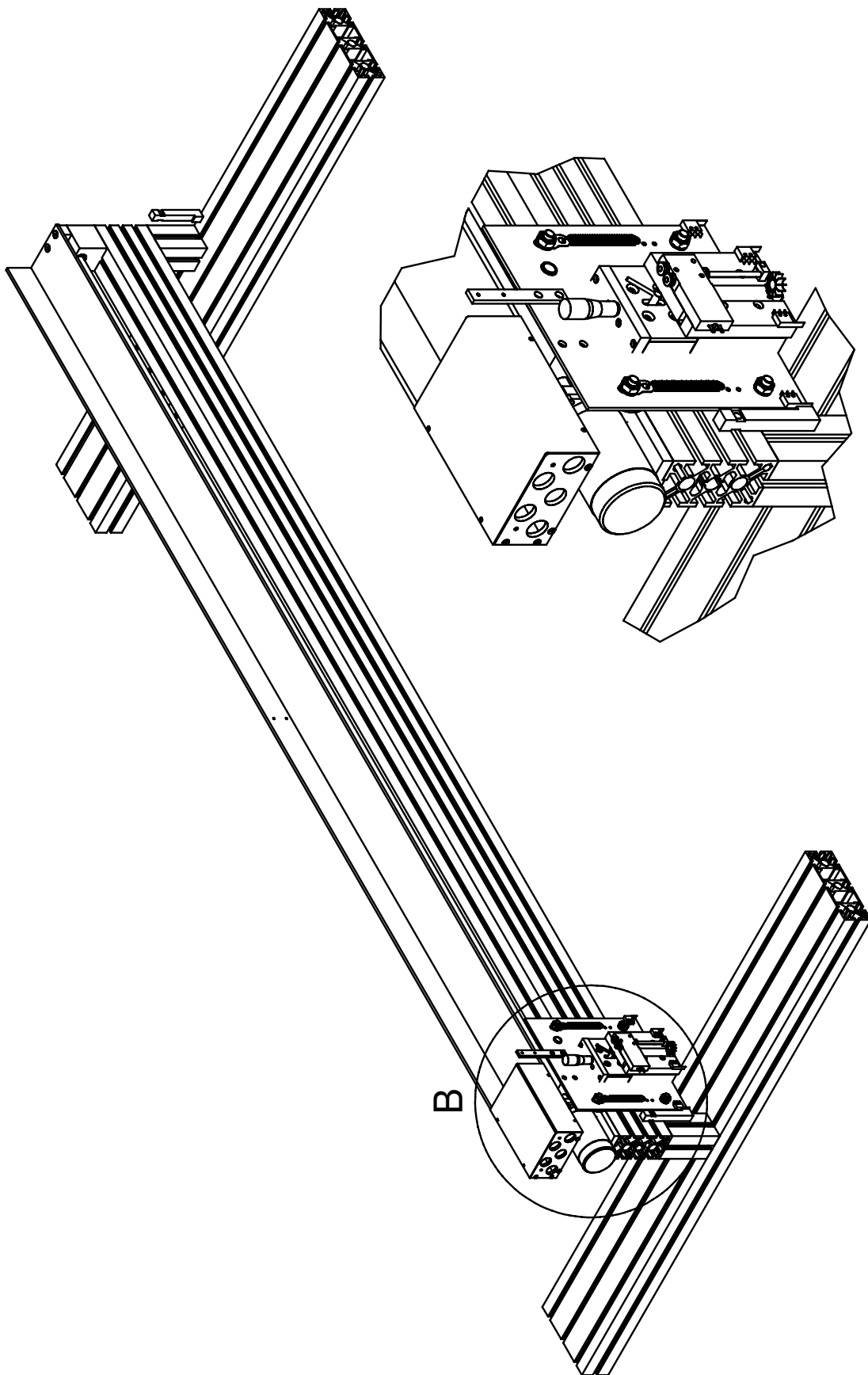


Abbildung 8.1: Stückplan und Zeichnung der Testmaschine. Im Ausschnitt sind zwei Muttern gezeigt, welche das Laufspiel des Laufwagens vermeiden sollen.





**Abbildung 8.2:** Zeichnung der Testmaschine. Im Ausschnitt ist der Laufwagen vergrößert dargestellt.



## 8.2 Anhang II - Schaltpläne

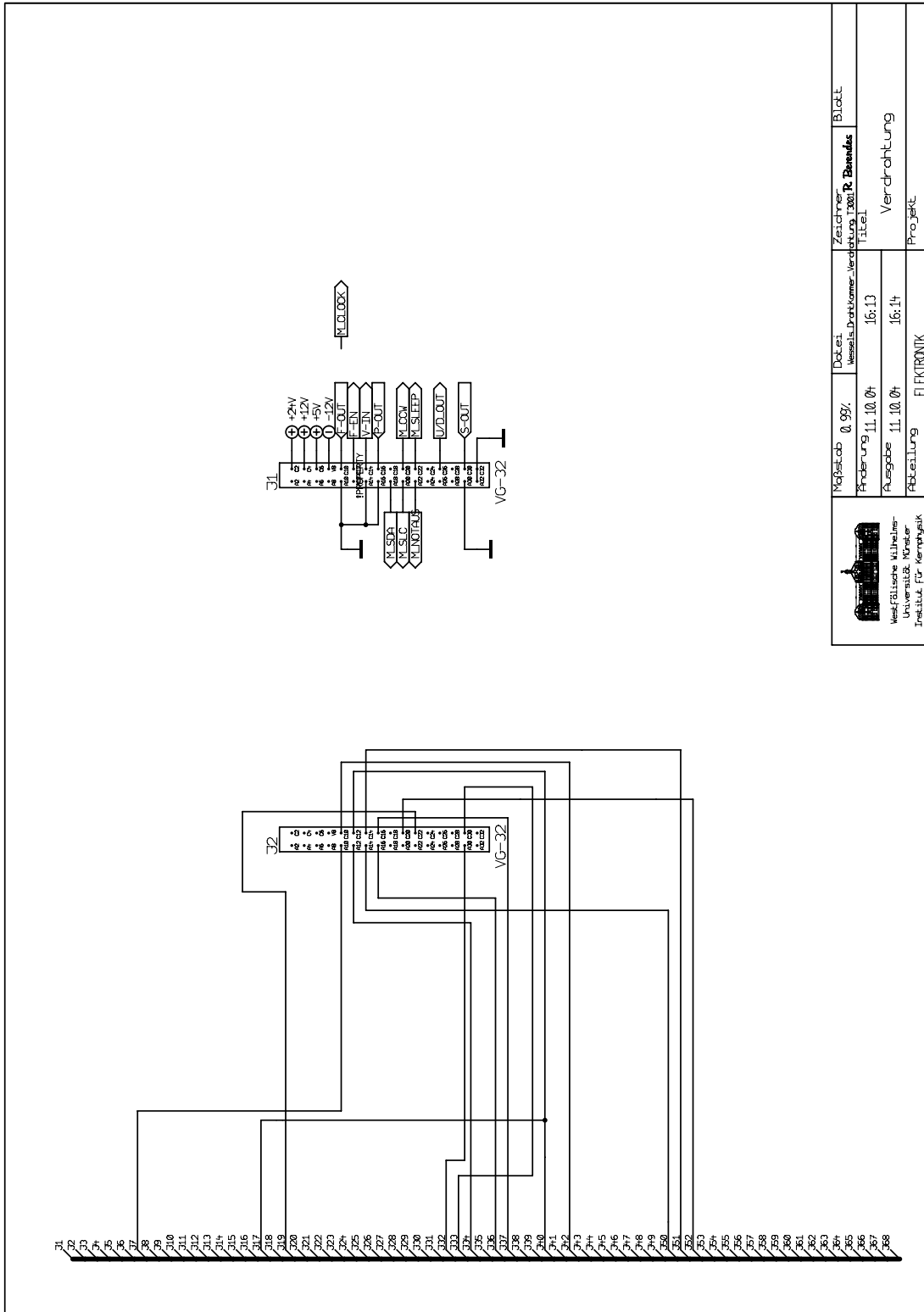
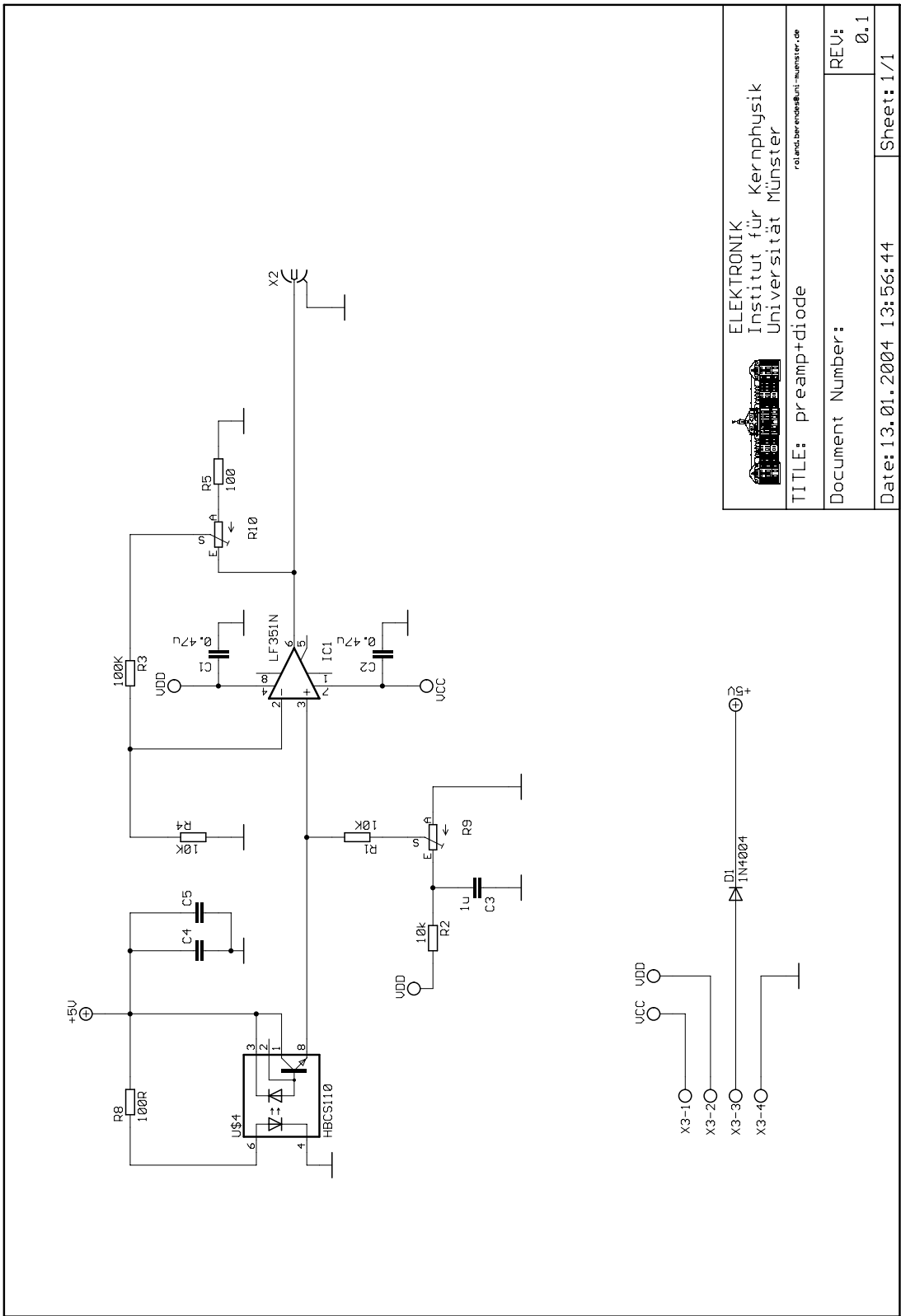


Abbildung 8.3: Verdrahtungsplan und Anschlussbelegung der Signale auf dem Bus und dem Connector-Block an der Schnittstelle zur DAQ-Karte.



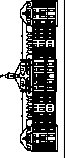
|   |            |
|---|------------|
|  <p>ELEKTRONIK<br/>Institut für Kernphysik<br/>Universität Münster<br/><small>roland.berensdottner@muenster.de</small></p> |            |
| TITLE: preamp+diode   |            |
| Document Number:  | REV: 0.1   |
| Date: 13.01.2004 13:56:44   | Sheet: 1/1 |

Abbildung 8.4: Schaltplan des Vorverstärkers mit optischem Sensor.

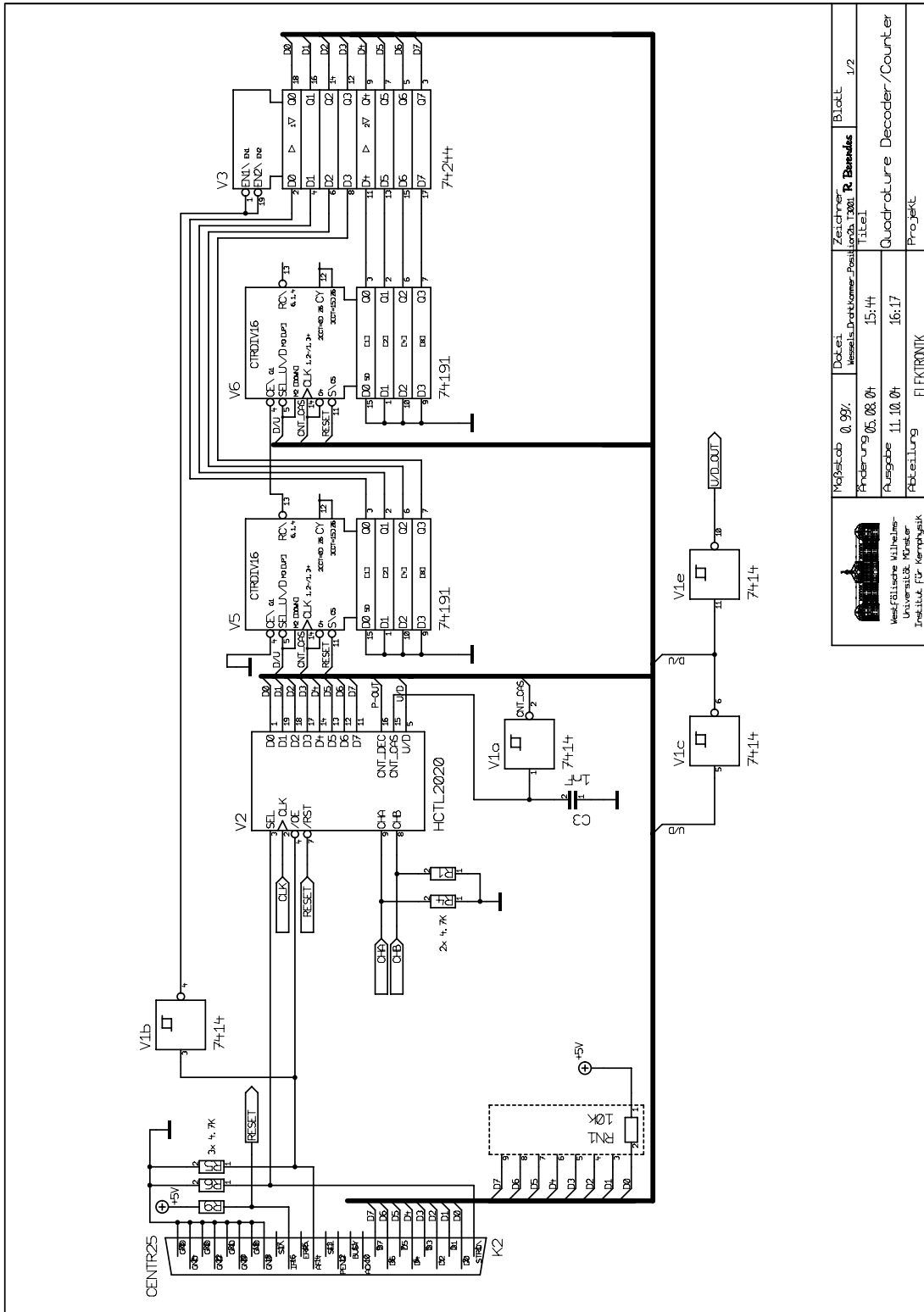
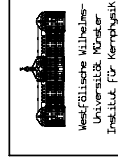


Abbildung 8.5: Schaltplan der Positionsignalverarbeitung mit Quadratur Dekoder.

|           |            |       |                            |          |             |       |     |
|-----------|------------|-------|----------------------------|----------|-------------|-------|-----|
| Maßstab   | 0,99%      | Datst | Wesels, Drehtkomer_Posil   | Zeichner | R. Barendus | Blatt | 1/2 |
| Änderung  | 05.08.04   | 15:44 | Titel                      |          |             |       |     |
| Abteilung | ELEKTRONIK | 16:17 | Quadrature Decoder/Counter |          |             |       |     |
| Projekt   |            |       | Projekt                    |          |             |       |     |



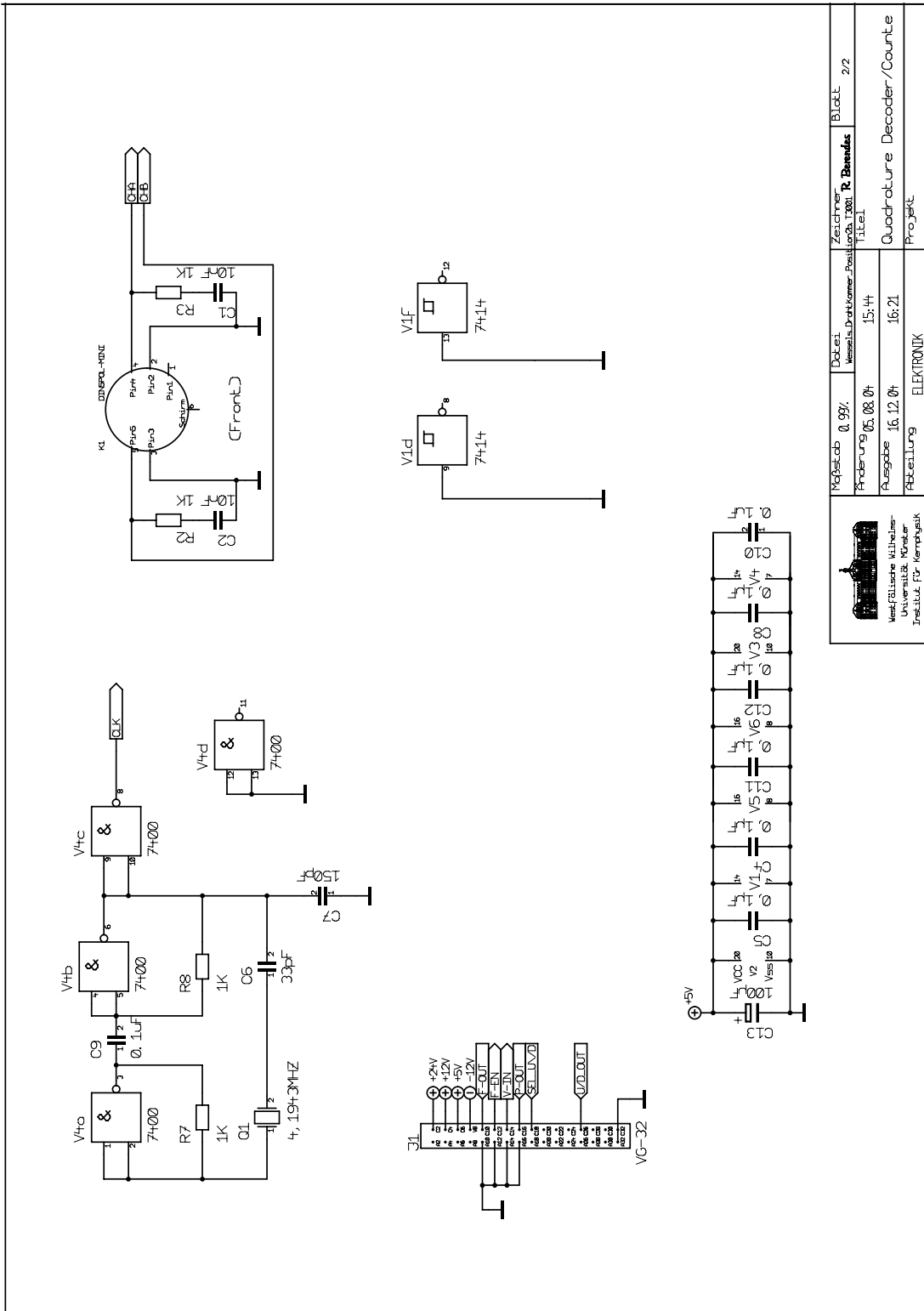
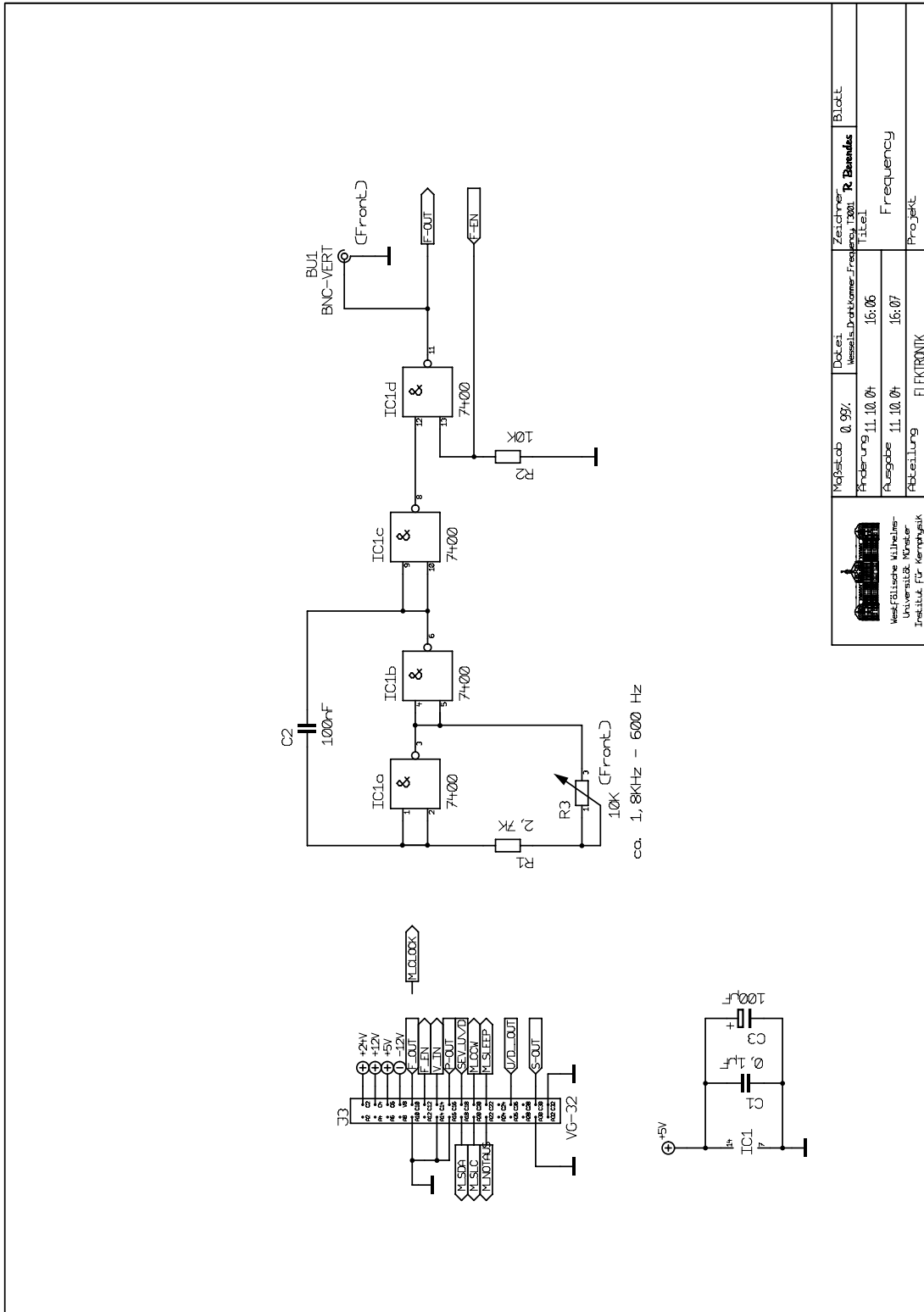


Abbildung 8.6: Schaltplan des Taktgebers für die Positionssignalverarbeitungseinheit [Püt88].

|  |           |            |   |          |           |                            |     |
|--|-----------|------------|---|----------|-----------|----------------------------|-----|
|  | Maßstab   | 0,99%      | Dat Lei                                   | Zeichner | R. Bannas | Blatt                      | 2/2 |
|  | Änderung  | 05.08.08   | Verstellt, Drat, Kommer, Position, 1,2001 | Titel    |           |                            |     |
|  | Ausgabe   | 16.12.08   | 15.14                                     |          |           | Quadrature Decoder/Counter |     |
|  | Abteilung | ELEKTRONIK | 16:21                                     |          |           | Projekt                    |     |



|           |          |       |                                   |          |            |       |
|-----------|----------|-------|-----------------------------------|----------|------------|-------|
| Maßstab   | 0,99%    | Datei | Hessels.Draft.kommu.FreqGenp.1300 | Zeichner | R. Barends | Blatt |
| Änderung  | 11.10.04 |       |                                   | Titel    | Frequency  |       |
| Ausgabe   | 11.10.04 |       |                                   | Projekt  | Frequency  |       |
| Abteilung |          |       | ELEKTRONIK                        |          |            |       |

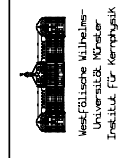


Abbildung 8.7: Schaltplan des 1kHz TTL Frequenzgenerators als Taktgeber für die Motorsteuerung.



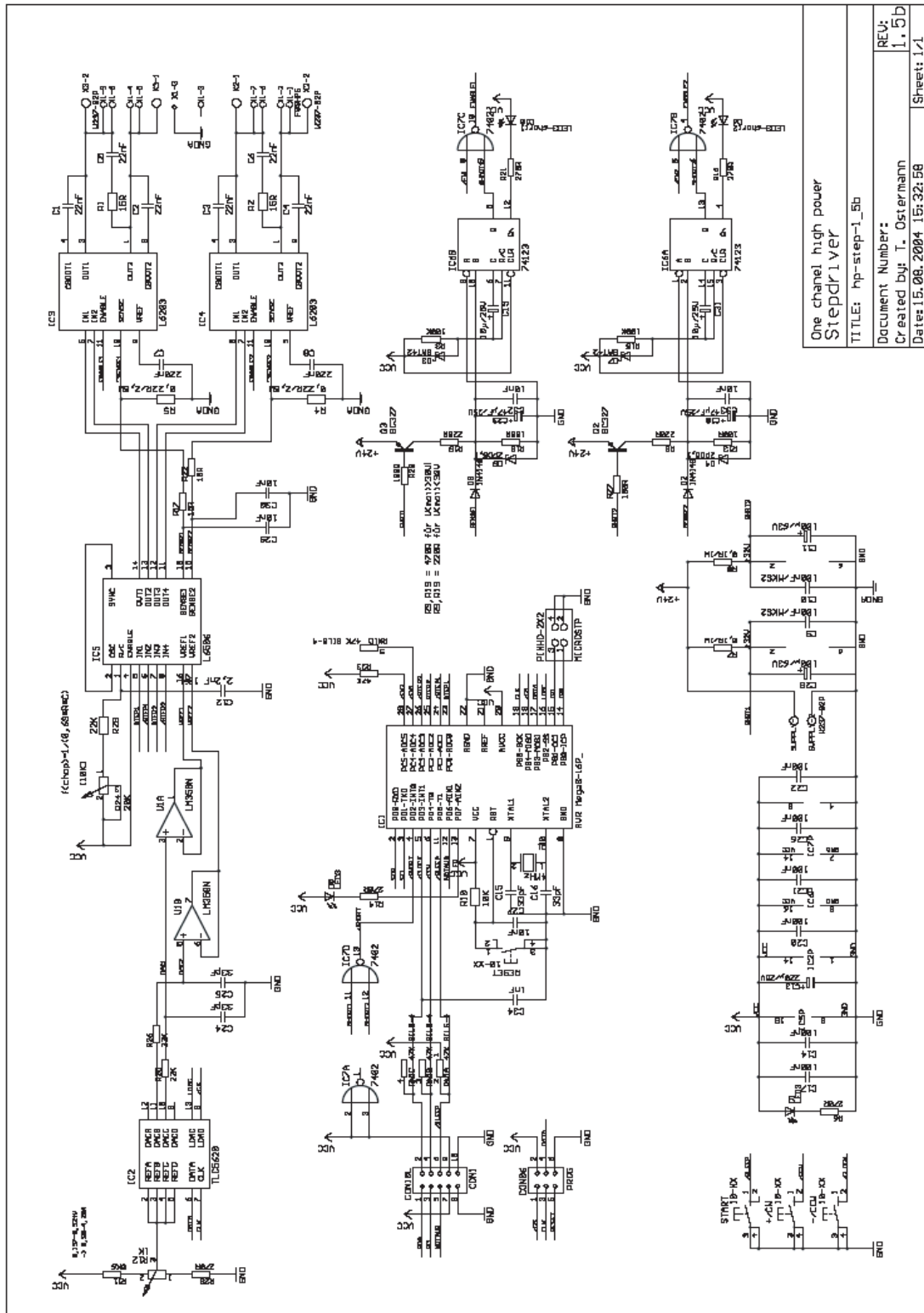


Abbildung 8.8: Stromlaufplan der Schrittmotorsteuerung [Ost01].

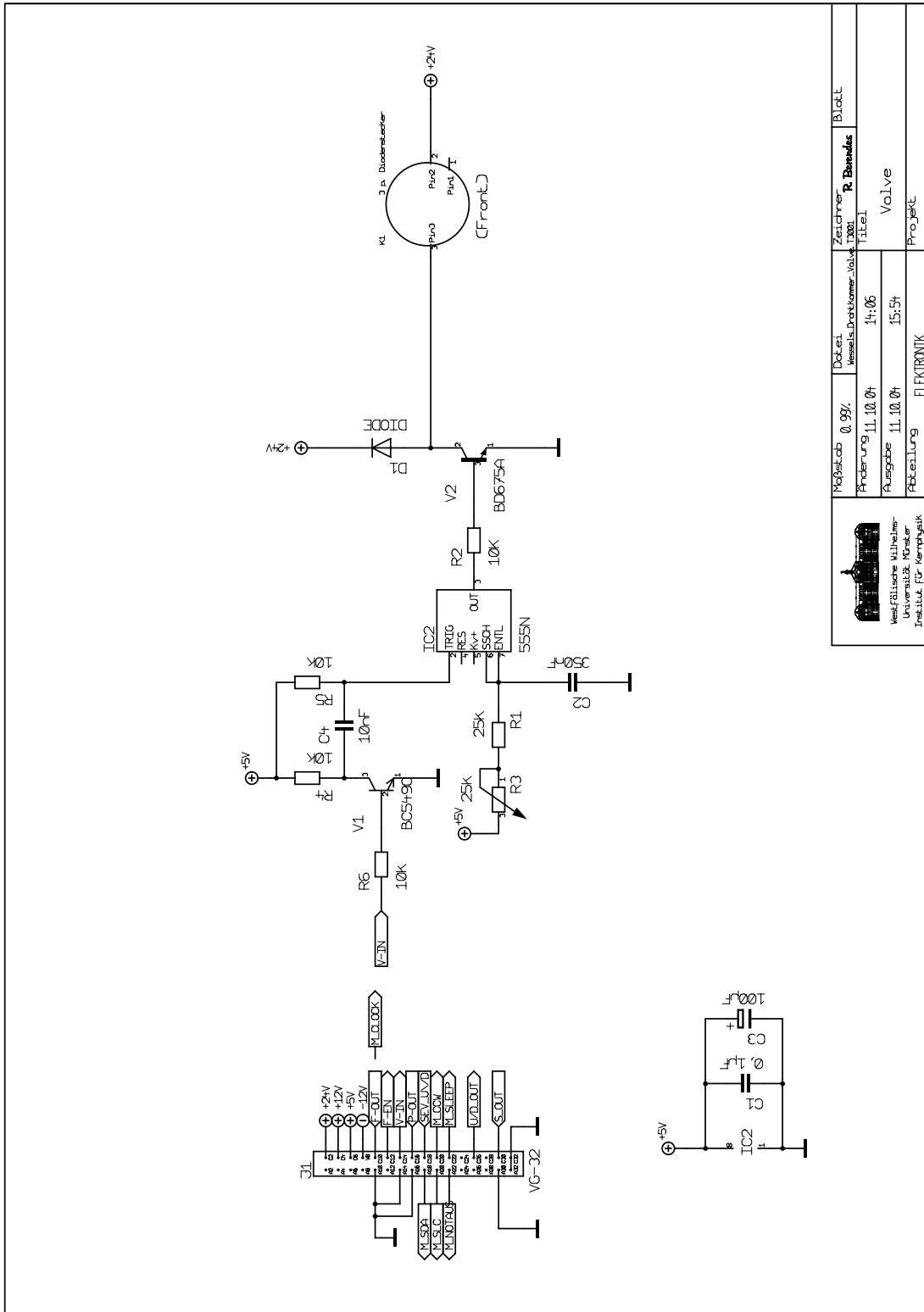


Abbildung 8.9: Schaltplan der Magnetventilsteuerng.

|  |           |            |       |                         |          |             |       |
|--|-----------|------------|-------|-------------------------|----------|-------------|-------|
| <br>Westfälische Wilhelms-Universität Münster<br>Institut für Mechanik | Maßstab   | 0,99%      | Datst | Messst.Drehkammer_Vol.1 | Zeichner | R. Barendus | Blatt |
|  | Anderung  | 11.10.04   |       | 14.06                   | Titel    |             |       |
|  | Ausgabe   | 11.10.04   |       | 15.54                   | Projekt  |             |       |
|  | Abteilung | ELEKTRONIK |       |                         |          |             |       |

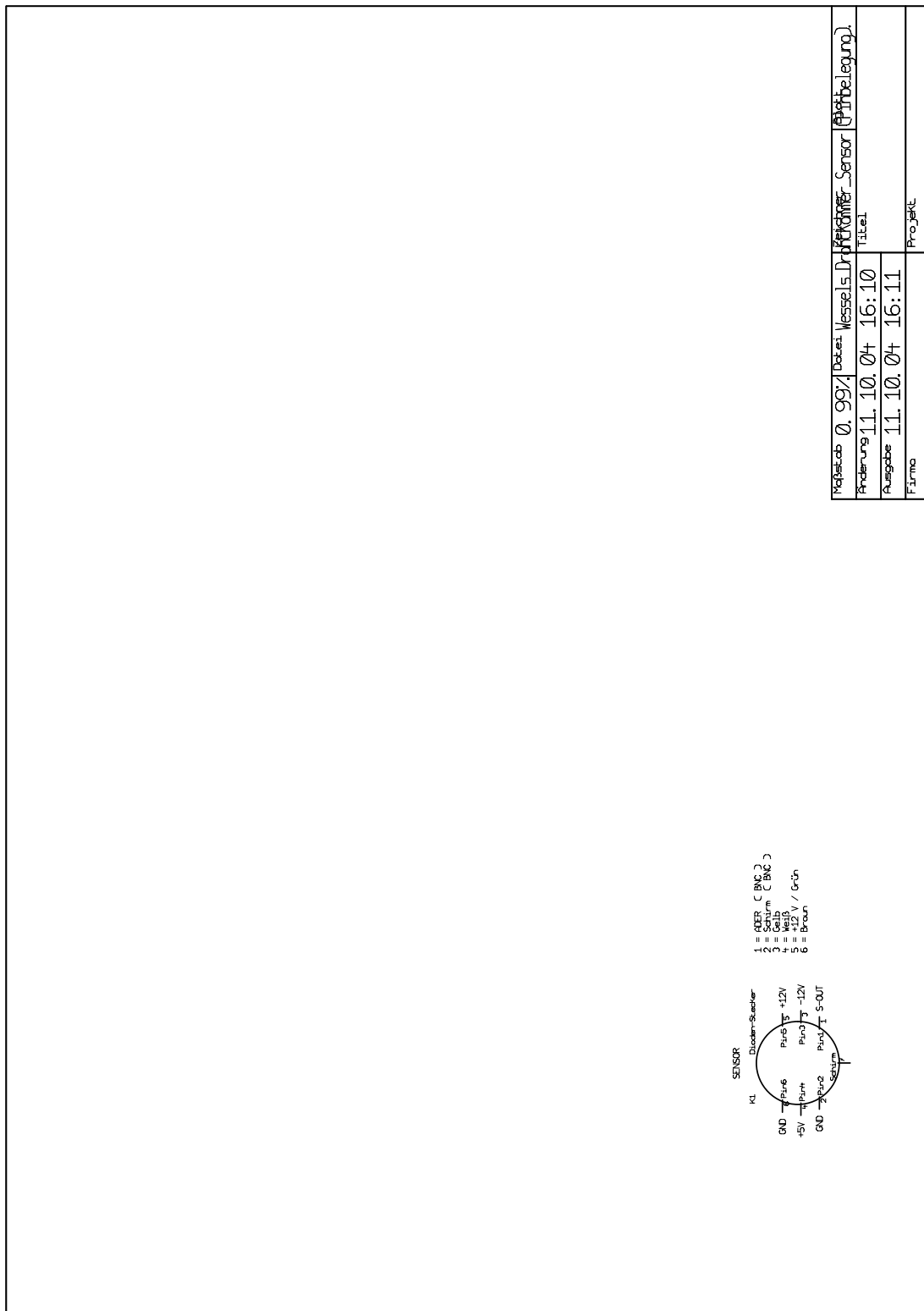
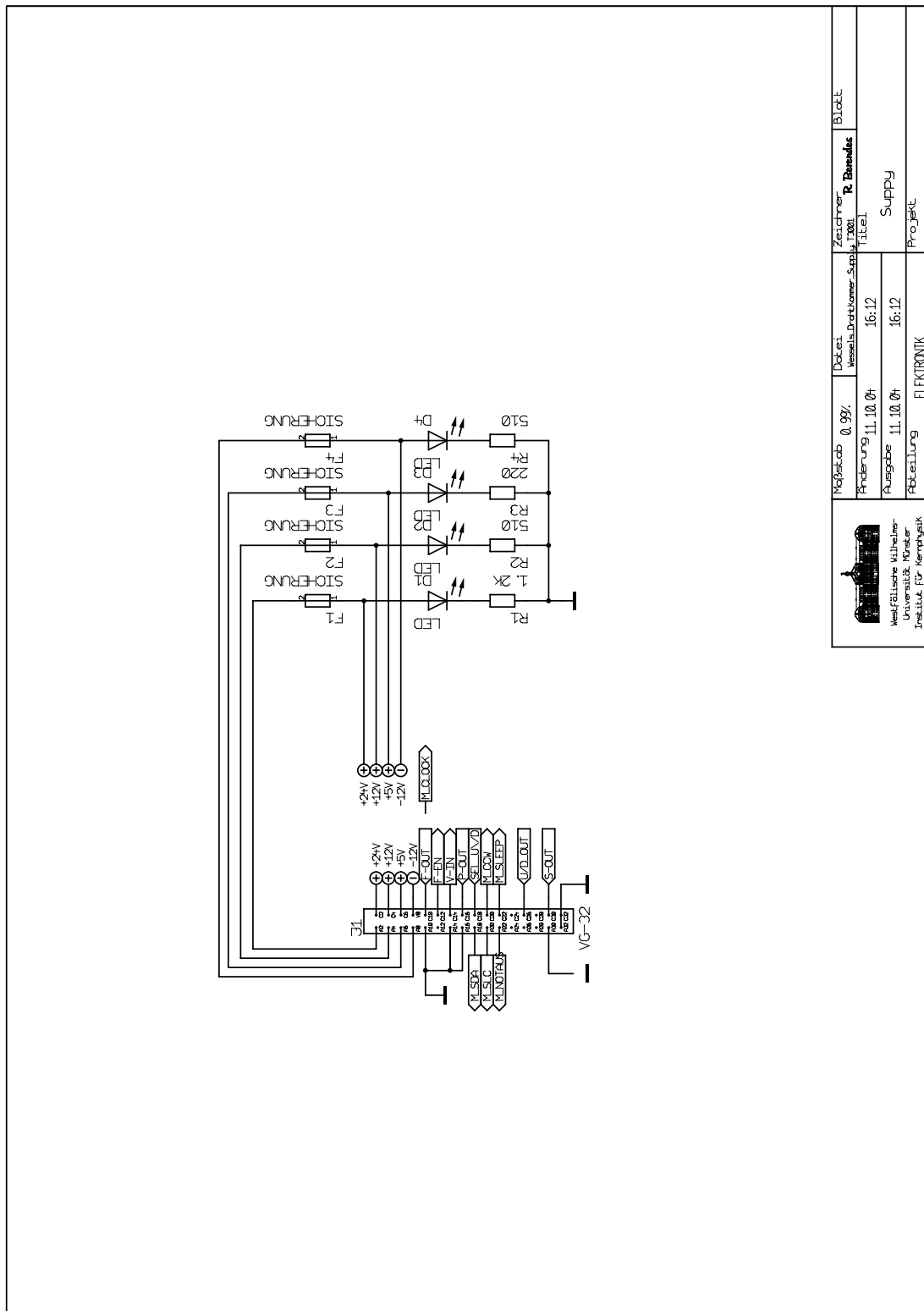


Abbildung 8.10: Steckerpinbelegung für den optischen Sensor.



|  |           |            |          |             |       |
|--|-----------|------------|----------|-------------|-------|
|  | Maßstab   | 0,99%      | Zeichner | R. Barendus | Blatt |
|  | Änderung  | 11.10.04   | Titel    | Supply      |       |
|  | Ausgabe   | 11.10.04   | Projekt  |             |       |
|  | Abteilung | ELEKTRONIK |          |             |       |

Abbildung 8.11: Schaltplan für die Spannungsversorgungskontrolleinheit.

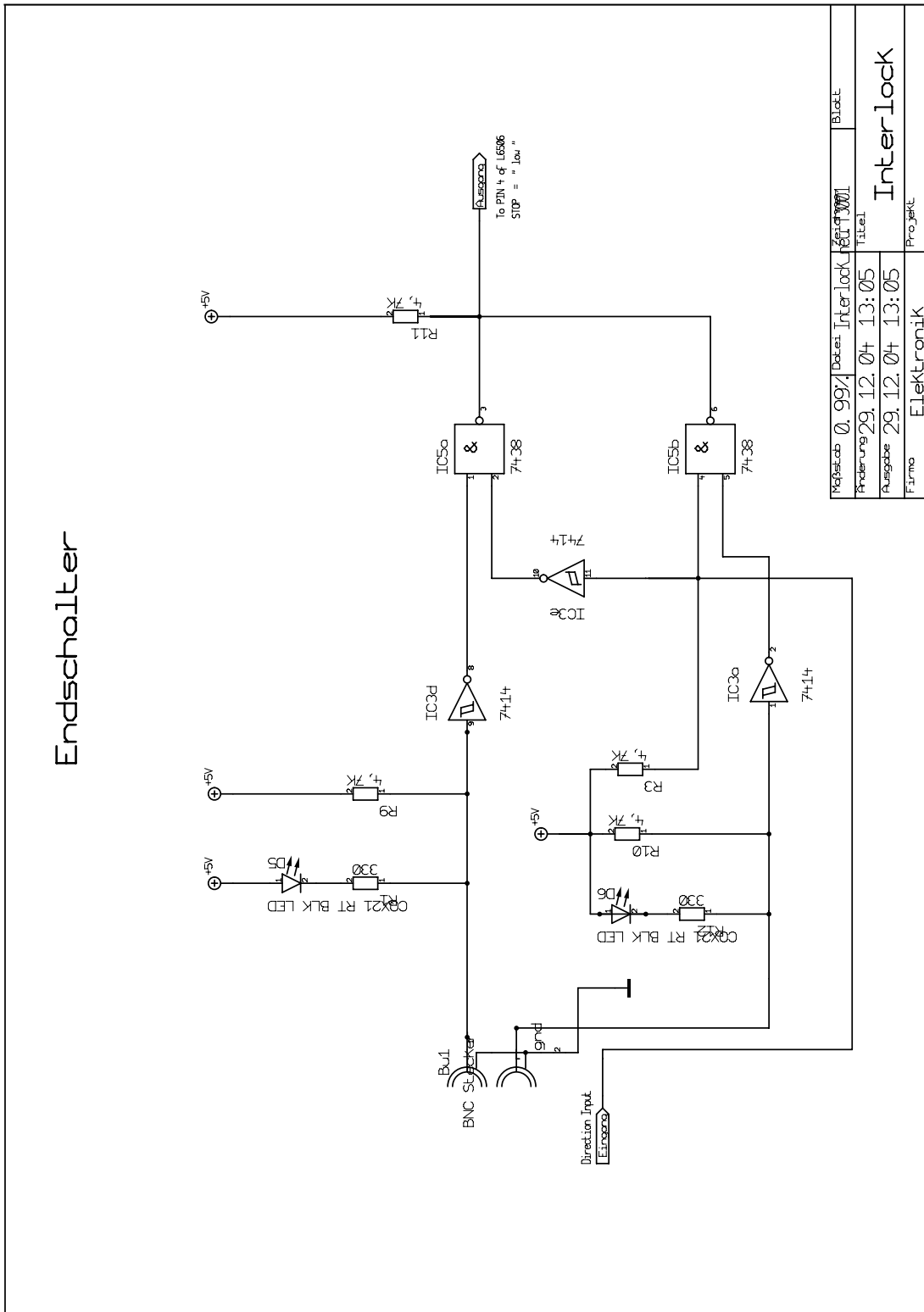


Abbildung 8.12: Schaltplan des Endabschaltersystems.

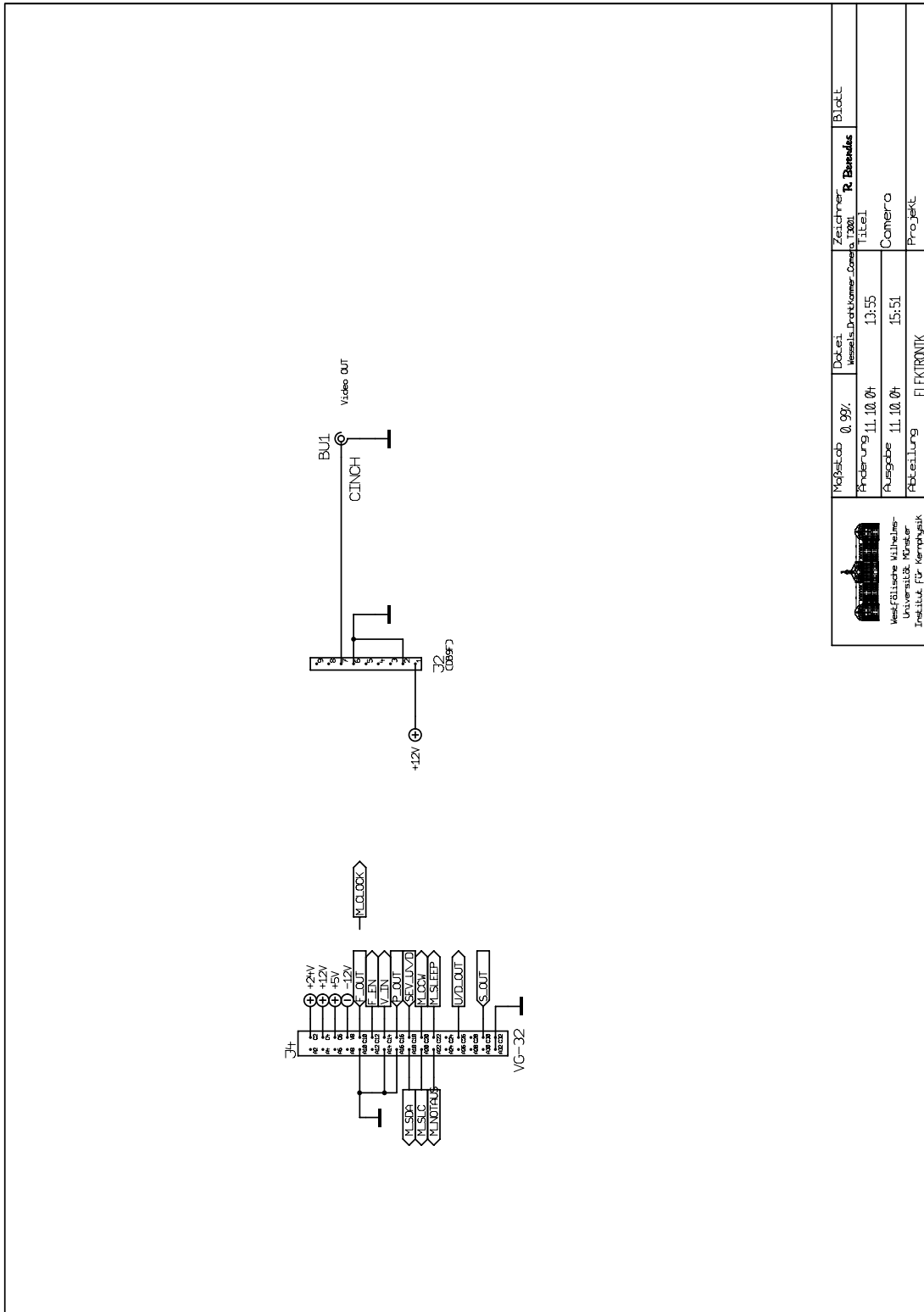


Abbildung 8.13: Stromlaufplan des Camerasignals.

|  |           |            |        |   |          |             |       |
|--|-----------|------------|--------|---|----------|-------------|-------|
|  | Maßstab   | 0,99%      | Datent | Westfälische Wilhelms-Universität Münster | Zeichner | R. Barendus | Blatt |
|  | Änderung  | 11.10.04   | 13:55  |   | Titel    | Camera      |       |
|  | Ausgabe   | 11.10.04   | 15:51  |   |          |             |       |
|  | Abteilung | ELEKTRONIK |        |   |          | Projekt     |       |

# Literaturverzeichnis

- [Adl05] Clemens Adler. *persönliche Mitteilung*. Universität Heidelberg (2005).
- [AT99] CERN photo AC Team. *CERN-AC-9906026* (1999).
- [Blo98] Volker Blobel, Erich Lohrmann. *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Teubner (1998).
- [BM01] P. Braun-Munzinger, J. Stachel. *Particle Ratios, Equilibration, and the QCD Phase Boundary*. nucl-th/0112051, (2001).
- [Col94a] ATLAS Collaboration. *Technical Proposal*. CERN/LHCC/94-43, LHCC/P2 (1994).
- [Col94b] CMS Collaboration. *Technical Proposal*. CERN/LHCC/94-38, LHCC/P1 (1994).
- [Col95] ALICE Collaboration. *Technical Proposal for A Large Ion Collider Experiment at the CERN LHC*. CERN/LHCC/95-71, LHCC/P3 (15. Oktober 1995).
- [Col98] LHCb Collaboration. *Technical Proposal*. CERN/LHCC/98-4, LHCC/P4 (1998).
- [Col99] TOTEM Collaboration. *Technical Proposal*. CERN/LHCC/99-7, LHCC/P5 (1999).
- [Con96] Mark Convery. *A Device for Quick and Reliable Measurement of Wire Tension*. BaBar TNDC-96-39, (1996).
- [Dig87] Werner Digel, *u. a.* (Herausgeber) *Meyers großes Taschenlexikon*, Band 18. B.I. Taschenbuchverlag (1987).

- [Dol93] B. Dolgoshein. *Transition radiation detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 326(1993):434.
- [FMD04] ALICE FMD. *Technical Design Report*. CERN-LHCC-2004-025, ALICE TRD 011 (10. September 2004).
- [Gmb05] Goodfellow GmbH. *Produktkatalog* (2005).
- [Has72] Eilhard Haseloff. *Das TTL-Kochbuch*. Texas Instruments Deutschland GmbH (1972).
- [HMP98] ALICE HMPID. *Technical Design Report*. CERN-LHCC-98-19, ALICE TRD 1 (14. August 1998).
- [Ins97] National Instruments. *PCI-MIO E Series User Manual*. National Instruments Corp. (1997).
- [Jam01] Rahman Jamal, Andre Hagedstedt. *LabVIEW - Das Grundlagenbuch*. Addison-Wesley (2001).
- [Kar01] Frithjof Karsch. *Lattice Results on QCD Thermodynamics*. hep-ph/0103314 - BI-TP 2001/06, (2001).
- [Kar04] F. Karsch. *Quark Gluon Plasma 3*. World Scientific Publishing (2004).
- [LHC04] LHC. *LHC Design Report Volume III*. CERN-LHCC (2004).
- [Loh95] L. Lohonyai. *Wire Strech Meter - Model WSM-660 - User Manual*. KFKI Budapest (1995).
- [Mah01] T. Mahmoud. *Talk - The Transition Radiation Detector of ALICE (TRD)* (2001).
- [Mah04] Tariq Mahmoud. *Development of the Readout Chamber of the ALICE Transition Radiation Detector and Evaluation of its Physics Performance in the Quarkonium Sector*. Dissertation, Universität Heidelberg (2004).
- [Mot01] Oriental Motors (2001).
- [Mül95] B. Müller. *Physics and signatures of the quark-gluon plasma*. Rep. Prog. Phys. 58 No 6, 611-636, (June 1995).



- [Mül04] Berndt Müller. *Heavy ion physics at the LHC*. Large Hadron Collider Phenomenology, (2004).
- [Ost01] Thorsten Ostermann. *Schrittmotoren - Motor Basics*. (2001).
- [PAR04] *Review of Particle Physics*. Physics Letters B, 592(2004).
- [Pei97] Thomas Peitzmann. *Kernmaterie unter extremen Bedingungen - Die Experimentelle Suche nach dem Quark-Gluon-Plasma* -. Habilitationsschrift Universität Münster (1997).
- [Pet04] Mihai Petrovici. *persönliche Mitteilung*. NIPNE Bucharest (2004).
- [PHO99] ALICE PHOS. *Technical Design Report*. CERN/LHCC 99-4, ALICE TRD 2 (5. März 1999).
- [Pov99] Bogdan Povh, Klaus Rith, Christoph Scholz. *Teilchen und Kerne*. Springer (1999).
- [Puc98] Norbert Pucker, Christian Lang. *Mathematische Methoden in der Physik*. Spektrum Verlag (1998).
- [Püt88] Jean Pütz. *Experimente: Elektronik*. vgs Verlagsgesellschaft (1988).
- [Rup93] Werner Rupprecht. *Signale und Übertragungssysteme*. Springer Lehrbuch (1993).
- [Sha99] Q. Shafi, Z. Tavartkiladze. *Proton Decay, Neutrino Oscillations And Other Consequences From Supersymmetric SU(6) With Pseudo-Goldstone Higgs*. Nucl.Phys. B573 (2000) 40-56, BA-99-39, (1. May 1999).
- [spe96] ALICE forward muon spectrometer. *Technical Proposal Addendum 1*. CERN/LHC 96-32, LHC/P3-Addendum 1 (15. Oktober 1996).
- [Sto04] Hr. Storms. *persönliche Mitteilung*. Hensen GmbH (2004).
- [Tip98] Paul Tipler. *Physik*. Spektrum Lehrbuch Verlag (1998).
- [TOF00] ALICE TOF. *Technical Design Report*. CERN/LHCC 2000-12, ALICE TRD 8 (16. Februar 2000).

- 
- [TPC00] ALICE TPC. *Technical Design Report*. CERN/LHCC 2000-001, ALICE TRD 7 (7. Januar 2000).
- [TRD01] ALICE TRD. *Technical Design Report*. CERN/LHCC 2001-021, ALICE TRD 9 (3. Oktober 2001).
- [Wes01] J.P. Wessels. *The ALICE Transition Radiation Detector*. ALICE-PUB-2001-55, Version 1.0(2001).
- [Won94] C.-Y. Wong. *Introduction to High-Energy Heavy-Ion Collisions*. World Scientific Publishing Co. (1994).
- [ZV98] Buch und Zeit Verlag (Herausgeber) *Großes Handbuch Technische Formeln*. Buch und Zeit Verlagsgesellschaft (1998).

## 9. Danksagung

Ich möchte am Ende die Gelegenheit nutzen und all denen danken, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Johannes Wessels danke ich für die interessante Themenstellung und die Möglichkeit, die Arbeit am Institut für Kernphysik zu verfassen. Ich danke ihm für die zahlreichen, interessanten und lehrreichen Aufenthalte in Heidelberg, Köln, der GSI in Darmstadt, am CERN in Genf und am NIPNE in Bukarest und für die Möglichkeit in einer internationalen Kollaboration mitarbeiten zu können. Prof. Dr. Rainer Santo danke ich für die zahlreichen Anregungen und auch für die Vermittlung der Arbeitsgruppe.

Dr. Damian Bucher danke ich für die Betreuung der Arbeit, die vielen Tipps und Hilfestellungen und für die geduldige Beantwortung von nicht immer klugen Fragen.

Dr. Klaus Reygers danke ich für die ständige Diskussionsbereitschaft und vielen Hilfestellungen.

Bei Hans-Werner Ortjohann und Roland Berendes bedanke ich mich für die tolle Zusammenarbeit, die vielen gute Ideen zur Lösung technischer Probleme und die ständige Bereitstellung einer helfenden Hand.

Für die Erstellung der Baupläne und technischen Zeichnungen bin ich Hans-Werner Ortjohann dank schuldig.

Roland Berendes danke ich für die Zeichnungen und Entwürfe der elektronischen Komponenten.

Beim Team der mechanischen Werkstatt bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit und die hervorragende Ausarbeitung der mechanischen Bauteile.

Beim Team der E-Werkstatt möchte ich mich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit und die Fertigung der elektronischen Komponenten bedanken.

Dr. Clemens Adler danke ich für geduldige Tests des Prototypen und viele Hinweise und Vorschläge zu Verbesserungen.

Prof. Dr. Mihai Petrovici danke ich für den interessanten Aufenthalt in Bukarest und die hilfreichen Diskussionen.

Ich danke Dr. Damian Bucher, Dr. Christian Klein-Bösing, Dr. Klaus Reygers, Daniel und Marc Gottschlag und Nico Mühlenschulte für die kritische Durchsicht des Manuskripts dieser Arbeit.

Christoph Baumann danke ich für die spassige Arbeitszeit im gemeinsamen Büro und die gemeinsame Studienzzeit.

Ich danke H.-H. Adam, J. Auffenberg, D. Emschermann, Dr. R. Glasow, J.-F. Grosse-Oetringhaus, N. Heine, M. Hoppe, PD Dr. A. Khoukaz, T. Mersmann, T. Rausmann, B.Sahlmüller, A. Täschner, W. Verhoeven, A. Wilk und O. Zaudtke für die gute Atmosphäre in der Arbeitsgruppe.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für die ständige Unterstützung die es mir ermöglicht hat, mich ganz auf mein Studium zu konzentrieren. Meinen Brüdern Daniel und Marc danke ich fürs Quatschmachen, Dasein aber auch für ihre vielen Hilfen. Meiner Oma danke ich ebenfalls für die Unterstützung und die vielen gebackenen Kuchen.

Besonders danke ich auch meinen Freunden, Mitbewohnern und Ex-Mitbewohnern für zahlreiche Ablenkungen und dafür, dass es sie gibt!

Der Kaffeemaschine danke ich für unermüdliche Produktion von manchmal lebensrettendem Getränk.

Meinen Fingern danke ich für tapferes Tippen nicht nur dieser Arbeit.

Außerdem danke ich all denen, die ich hier vergessen habe und bitte sie, mir dies nachzusehen.

# Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, 7. Februar 2005

**Holger Gottschlag**