

Entwicklung und Realisierung  
eines experimentellen Aufbaus für  
die Messung der  
paritätsverletzenden Asymmetrie  
in Elektron-Proton-Streuung unter  
Rückwärtswinkeln

Diplomarbeit  
von  
Boris Fabian Gläser  
geb. in Mainz

Institut für Kernphysik  
Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Mainz, den 5. Januar 2005

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                               |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                                             | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Vorüberlegungen</b>                                           | <b>3</b>  |
| 2.1      | Seltsamkeit im Nukleon . . . . .                                              | 3         |
| 2.2      | Kinematik der elastischen Elektron-Nukleon-Streuung . . . . .                 | 4         |
| 2.3      | Paritätsverletzende Asymmetrie . . . . .                                      | 5         |
| 2.4      | Statistischer Gütefaktor und Meßzeiten . . . . .                              | 8         |
| <b>3</b> | <b>Das A4-Experiment</b>                                                      | <b>13</b> |
| 3.1      | Meßprinzip des A4-Experiments . . . . .                                       | 13        |
| 3.2      | Experimenteller Aufbau . . . . .                                              | 15        |
| 3.2.1    | Die Quelle polarisierter Elektronen und der MAMI Be-<br>schleuniger . . . . . | 18        |
| 3.2.2    | Das Flüssig-Wasserstoff-Target . . . . .                                      | 19        |
| 3.2.3    | Das PbF <sub>2</sub> -Kalorimeter . . . . .                                   | 22        |
| 3.2.4    | Die Ausleseelektronik MEDUSA . . . . .                                        | 25        |
| 3.2.5    | Die Luminositätsmonitore . . . . .                                            | 28        |
| 3.2.6    | Die Polarimeter . . . . .                                                     | 30        |
| <b>4</b> | <b>Das neue A4 Experiment</b>                                                 | <b>33</b> |
| 4.1      | Die Anforderungen an das A4-Kalorimeter und die Streugeometrie                | 33        |
| 4.2      | Rotierbare Plattform . . . . .                                                | 36        |

|          |                                                |           |
|----------|------------------------------------------------|-----------|
| 4.3      | Der Umbau in Experimentierhalle 4 . . . . .    | 40        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>            | <b>45</b> |
| <b>A</b> |                                                | <b>47</b> |
| A.1      | Konstruktionszeichnungen . . . . .             | 47        |
| A.2      | Überwachung der Experimentierhalle 4 . . . . . | 72        |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                   | <b>73</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                    | <b>77</b> |

# Kapitel 1

## Einleitung

Im Konstituenten-Quark-Modell wird der innere Aufbau des Protons durch ein  $d$ - und zwei  $u$ -Quarks, die sogenannten Konstituenten-Quarks beschrieben. Eine genauere Beschreibung bei hohen Impulsüberträgen liefert das Quark-Parton-Modell. Hier tragen auch Gluonen und Seequarks, virtuelle Quark-Antiquark-Paare, zu den Eigenschaften des Nukleons bei. Protonen besitzen insgesamt keine Seltsamkeit, d. h. die Quantenzahl der Seltsamkeit ist  $S=0$ . Bei unterschiedlicher räumlicher Verteilung der Ladung oder der magnetischen Momente der  $\bar{s}$ - und  $s$ -Seequarks ergeben sich aber nichtverschwindende Beiträge zu den Formfaktoren. Die Messung der paritätsverletzenden Asymmetrie in der elastischen Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen an unpolarisierten Protonen erlaubt wegen der unterschiedlichen schwachen Ladung von  $d$ - und  $s$ -Quarks daher Rückschlüsse auf die Beiträge der Strangeness zu den Formfaktoren des Nukleons. Abhängig vom Streuwinkel der Elektronen mißt man unterschiedliche Linearkombinationen des seltsamen elektrischen und seltsamen magnetischen Formfaktors. Unter Vorwärtswinkeln dominiert der elektrische, unter Rückwärtswinkeln der magnetische Formfaktor.

Die Kollaboration A4 am Elektronenbeschleuniger MAMI des Instituts für Kernphysik der Universität Mainz mißt die paritätsverletzende Asymmetrie in der elastischen Elektron-Proton-Streuung unter einem Streuwinkel von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$ . Als Streuzentrum dient ein unpolarisiertes Flüssig-Wasserstofftarget, das mit einem longitudinal polarisierten Elektronenstrahl beschossen wird. Die Zählrate der dabei elastisch gestreuten links- bzw. rechtshändig polarisierten Elektronen wird in einem vollständig absorbierenden Tscherenkow-Kalorimeter bestimmt. Thema der vorliegenden Arbeit ist ein Umbau des experimentellen Aufbaus, um Asymmetriemessungen unter Rückwärtswinkeln von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  durchführen zu können. Auf diese Weise können weitere Linearkombinationen aus seltsamem elektrischen und seltsamem magnetischen Formfaktor bestimmt werden.

Kapitel 2 erläutert zunächst die theoretischen Grundlagen des Experiments. Im Kapitel 3 wird der vorhandene Detektoraufbau erörtert. Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Anforderungen an das Experimentes zur Messung unter Rückwärtswinkeln und dem Umbau des Detektors. Am Ende der Arbeit wird eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und ein Ausblick auf weitere mögliche Experimente gegeben.

# Kapitel 2

## Theoretische Vorüberlegungen

### 2.1 Seltsamkeit im Nukleon

Die sichtbare Welt besteht aus Neutronen, Protonen und Elektronen. Elektronen sind nach heutigem Kenntnisstand punktförmige Teilchen ohne innere Struktur (Elementarteilchen). Neutronen und Protonen sind im Gegensatz dazu zusammengesetzte Teilchen, die aus Quarks und Gluonen aufgebaut sind. Das Proton besteht nach dem Konstituenten-Quark-Modell aus zwei u-Quarks und einem d-Quark, das Neutron aus einem u-Quark und zwei d-Quarks, die über die starke Wechselwirkung zusammengehalten werden. Die Gluonen, welche die starke Kraft vermitteln, haben nach der Quantenchromodynamik (QCD) aber die Möglichkeit, sich in Quark-Antiquark-Paare aufzuspalten. Auf diese Weise wird ein Quark-Antiquark-See im Nukleon generiert. Das Nukleon besteht somit aus vielen Quarks und Antiquarks, die permanent erzeugt und vernichtet werden und die Summe ihrer Baryonenzahlen eins ist. Die See-Quarks tragen nicht zu den Quantenzahlen des Nukleons bei, da sie immer als Quark-Antiquark-Paare auftreten. Die leichtesten Quarks sind die up- (u), down- (d) und strange-Quarks (s). Die schwersten sind die charm- (c), bottom- (b) und top-Quarks (t). Unter der Annahme, daß die schweren Quarks wegen ihrer Masse im Quark-Antiquark-See stark unterdrückt sind, kann man davon ausgehen, daß die einzigen Bestandteile des Sees die leichten u-, d- und s-Quarks sind.

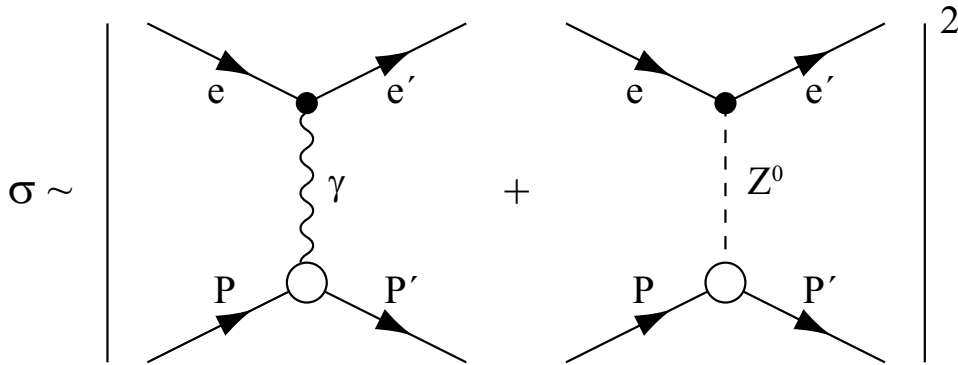
Aufgrund der See-Quark-Dynamik stellt sich das Nukleon als ein komplexes und dynamisches Objekt dar und seine Eigenschaften können durch den  $s\bar{s}$ -See mitbestimmt werden. Sind die räumlichen Verteilungen der  $s$ - und  $\bar{s}$ -Verteilungen der Seequarks verschieden, so können sie Beiträge zu dem Ladungsradius und dem magnetischen Moment des Nukleons leisten. Dies ist vergleichbar mit dem elektrischen Formfaktor des Neutrons. Das Neutron be-

sitzt keine elektrische Ladung, hat aber durch die unterschiedliche Verteilung von positiver und negativer Ladung einen elektrischen Ladungsradius.

Beobachtungen in den Massenspektren und den Wechselwirkungen der Hadronen deuten auf einen Beitrag des Strange-Quarksees von bis zu 30% zur Masse der Baryonen hin [9]. Es gibt auch Hinweise, daß die Seltsamkeit einen wesentlichen Beitrag zum Spin des Nukleons liefert [25][8]. Die Untersuchung der Beiträge der Seltsamkeit zur Verteilung der elektrischen Ladung und der Magnetisierung des Nukleons ist ebenso von großem Interesse und ist daher ein Ziel des A4-Experiments.

## 2.2 Kinematik der elastischen Elektron-Nukleon-Streuung

In Bornscher Näherung der elektroschwachen Theorie kann die elastische Elektron-Nukleon-Streuung durch einen Ein-Boson-Austausch beschrieben werden. Außer dem rein elektromagnetischen Photon-Austausch trägt auch der Austausch eines  $Z^0$ -Bosons zum Wirkungsquerschnitt bei. Dieser ist proportional zum Quadrat der Summe der entsprechenden Streuamplituden. Abb. 2.1 zeigt das zugrundeliegende Feynman-Diagramm in niedrigster Ordnung der Störungsreihe.



**Abbildung 2.1:** Feynman-Graphen zum  $\gamma$ - und  $Z^0$ -Austausch.

Symbolischer Wirkungsquerschnitt der elastischen Elektron-Streuung (e) am Proton (P) dargestellt durch Feynman-Graphen in niedrigster Ordnung Störungsrechnung.

Der Impuls- und Energietransfer bestimmt die Kinematik der elastischen Elektron-Nukleon Streuung. Das einlaufende Elektron mit dem Viererimpuls  $p$  wird am Proton gestreut und läuft unter dem Laborwinkel  $\theta$  mit dem Viererimpuls  $p'$  aus. Das Nukleon bleibt während des Streuprozesses im Grundzustand, wobei es den gesamten Energie- und Impulstransfer aufnimmt. Bei der

Streuung eines relativistischen Elektrons an einem ruhenden Nukleon kann die Ruhemasse des Elektrons vernachlässigt werden. Die Energie  $E'$  des auslaufenden Elektrons ist keine unabhängige Variable. Aus Energie- und Impulserhaltung folgt, daß sie kinematisch durch die Energie des einlaufenden Elektrons  $E$  und den Laborstreuwinkel  $\theta$  bestimmt ist (Zweikörperprozeß).

$$E' = \frac{E}{1 + (2E/M) \sin^2(\theta/2)} \quad (2.1)$$

Das ausgetauschte Boson überträgt den quadratischen Viererimpuls  $Q^2$ , der eine charakteristische Lorentz-Invariante des Streuprozesses ist, auf das Nukleon. Er ist gegeben durch:

$$Q^2 = 4EE' \sin^2(\theta/2) \quad (2.2)$$

Die Rosenbluth-Formel gibt den differentiellen Wirkungsquerschnitt für die elastische Elektron-Nukleon-Streuung an [24]:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E, \theta) = \frac{\alpha^2 E'}{4 E^3 \sin^4(\theta/2)} \left[ ((F_1^{p,n})^2 + \kappa^2 \tau (F_2^{p,n})^2) \cos^2(\theta/2) + 2 \tau (F_1^{p,n} + \kappa F_2^{p,n})^2 \sin^2(\theta/2) \right] \quad (2.3)$$

Der kinematische Faktor  $\tau$  ist definiert als  $\tau \equiv Q^2/4m_N^2$  und  $\kappa$  ist das anomale magnetische Moment des Nukleons.  $F_1$  und  $F_2$  sind die Pauli- und Dirac-Formfaktoren. Sie können durch die elektrischen (E) und magnetischen (M) Sachs-Formfaktoren

$$G_E = F_1 - \tau F_2 \quad G_M = F_1 + F_2 \quad (2.4)$$

ausgedrückt werden. Aus Messungen zum gleichen  $Q^2$  unter verschiedenen Streuwinkeln  $\theta$  können die elektrischen und magnetischen Formfaktoren separiert werden.

## 2.3 Paritätsverletzende Asymmetrie

Die Paritätsoperation P beschreibt die Punktspiegelung eines physikalischen Zustands am Koordinatenursprung. Sie ist im Rahmen der Quantenmechanik eine innere, diskrete Symmetrietransformation. Für eine skalare Wellenfunktion  $\Psi$  bzw. ein Diracfeld  $\Psi_D$  gilt:

$$P\Psi(\vec{x}, t) = \Psi(-\vec{x}, t) \quad \text{bzw.} \quad P\Psi_D(\vec{x}, t) = \gamma_0\Psi_D(-\vec{x}, t) \quad (2.5)$$

Für die Eigenwerte des Paritätsoperators folgt daraus, daß sie entweder  $\pi = +1$  oder  $\pi = -1$  sind. Eine besondere Eigenschaft der schwachen Wechselwirkung ist die Verletzung der Parität, d.h. sie hebt die Spiegelsymmetrie auf und setzt so die Existenz einer Vorzugshändigkeit voraus. Zur Messung der Paritätsverletzung wird ein Experiment mit seinem gespiegelten verglichen, wobei der Wirkungsquerschnitt eine pseudoskalare Komponente enthält, die im gespiegelten Experiment ihr Vorzeichen ändert und so die beiden Systeme unterscheidbar macht. Im Falle des A4-Experimentes wird die Messung am Spiegelexperiment durch die Umkehrung der Helizität des Elektronenstrahls ermöglicht. Die Helizität ist eine pseudoskalare Größe und beschreibt die Projektion des Spins auf die Impulsrichtung:

$$H = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}||\vec{p}|} \quad (2.6)$$

Im Falle einer longitudinalen Ausrichtung des Elektronenspins zum Impuls ist  $H = \pm 1$ , bei transversaler Ausrichtung ist  $H = 0$ . Die Paritätstransformation ändert die Richtung des Impulses, aber nicht die Richtung des Spins. Das bedeutet, daß die Paritätsoperation linkshändige (L) in rechtshändige (R) Teilchen verwandelt und umgekehrt. Für Elektronen gilt:

$$P|e_L\rangle = |e_R\rangle \quad P|e_R\rangle = |e_L\rangle \quad (2.7)$$

Dies kann ausgenutzt werden, um die Paritätsverletzung in der Streuung von links- bzw. rechtshändig polarisierten Elektronen an unpolarisierten Protonen zu untersuchen. Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  dieser Reaktion besteht aus folgenden Komponenten:

$$\sigma \propto |\mathcal{M}_\gamma + \mathcal{M}_{Z^0}|^2 = \underbrace{|\mathcal{M}_\gamma|^2}_{\propto \frac{1}{Q^4}} + 2 \underbrace{|\mathcal{M}_\gamma^* \mathcal{M}_{Z^0}|}_{\propto \frac{1}{Q^2} \frac{1}{Q^2 + M_{Z^0}^2}} + \underbrace{|\mathcal{M}_{Z^0}|^2}_{\propto \frac{1}{(Q^2 + M_{Z^0}^2)^2}} \quad (2.8)$$

Der erste Term beschreibt die paritätserhaltende, rein elektromagnetische Wechselwirkung. Der zweite ist der Interferenzterm zwischen elektromagnetischer und paritätsverletzender schwacher Wechselwirkung. Bei Impulsüberträgen bis ca.  $1 \text{ GeV}^2/c^2$ , wie sie derzeit mit den Elektronenenergien von MAMI am Experiment erreichbar sind, kann wegen der hohen Masse  $M_{Z^0}$  des  $Z^0$ -Bosons der dritte Term vernachlässigt werden. Die Veränderung des Wirkungsquerschnitts durch die schwache Wechselwirkung ist aber zu klein, um

sie direkt messen zu können. Aus diesem Grund mißt man nicht die Differenz, sondern die Asymmetrie des Wirkungsquerschnitts von links- und rechtshändig polarisierten Elektronen. Die paritätsverletzende Asymmetrie ist definiert als:

$$A_{PV} \equiv \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L} \quad (2.9)$$

Die paritätserhaltende elektromagnetische Wechselwirkung des ersten Terms fällt hierbei heraus.

Mit Hilfe der Sachs-Formfaktoren  $G_{E,M}^{p,n}$  und der elektroschwachen Vektorformfaktoren  $\tilde{G}_{E,M}^p$  kann die Asymmetrie für die Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen an unpolarisierten Protonen wie folgt dargestellt werden [23]:

$$A_{PV} = \left[ \frac{-G_F Q^2}{4\pi\alpha\sqrt{2}} \right] \times \frac{\epsilon\tilde{G}_E^p G_E^p + \tau\tilde{G}_M^p G_M^p - (1 - 4\sin^2\theta_W)\sqrt{1-\epsilon^2}\sqrt{\tau(1+\tau)}G_A^p G_M^p}{\epsilon(G_E^p)^2 + \tau(G_M^p)^2} \quad (2.10)$$

Hierbei sind:  $G_F = 1.1664 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$  die Fermi-Kopplungskonstante,  $\tau = Q^2/4m_N^2$  der halbe Energieübertrag auf das Proton,  $\alpha$  die Feinstrukturkonstante,  $\epsilon = [1 + 2(1 + \tau)\tan^2(\theta/2)]^{-1}$  die Polarisation des virtuellen Photons,  $\theta$  der Labor-Streuwinkel,  $\theta_W$  der schwache Mischungswinkel und  $Q^2$  der Impulsübertrag.

Mit den Beiträgen der Strange-Quarks zu den Vektorformfaktoren des Nukleons  $G_{E,M}^s$  und den strangeness unabhängigen elektromagnetischen Sachsformfaktoren  $G_{E,M}^{p,n}$  können die elektroschwachen Vektorformfaktoren  $\tilde{G}_{E,M}^p$  wie folgt dargestellt werden:

$$\tilde{G}_{E,M}^p = (1 - 4\sin^2\theta_W)G_{E,M}^p - G_{E,M}^n - G_{E,M}^s \quad (2.11)$$

In Bornscher Näherung erhält man aus Gleichung 2.11 und Gleichung 2.10 für die paritätsverletzende Asymmetrie :

$$A_{PV} = A_V + A_S + A_A \quad (2.12)$$

$$= \left[ \frac{-G_F Q^2}{4\pi\alpha\sqrt{2}} \right] \times \left\{ (1 - 4\sin^2\theta_W) - \frac{\epsilon G_E^p G_E^n + \tau G_M^p G_M^n}{\epsilon(G_E^p)^2 + \tau(G_M^p)^2} - \right. \quad (2.13)$$

$$\left. \frac{\epsilon G_E^p G_E^s + \tau G_M^p G_M^s}{\epsilon(G_E^p)^2 + \tau(G_M^p)^2} - \right. \quad (2.14)$$

$$\left. \frac{(1 - 4\sin^2\theta_W)\sqrt{1 - \epsilon^2}\sqrt{\tau(1 + \tau)}G_M^p G_A^p}{\epsilon(G_E^p)^2 + \tau(G_M^p)^2} \right\} \quad (2.15)$$

Der Term 2.13 ( $A_V$ ) beschreibt hierbei die Asymmetrie ohne Strangeness-Beitrag. Der Term 2.14 ( $A_S$ ) enthält die Beiträge der seltsamen Quarks zu den Vektorformfaktoren des Nukleons und der Term 2.15 ( $A_A$ ) den Beitrag der Axialvektorkopplung. Der schwache Axialformfaktor  $G_A^p$  ist aufgrund des Vorfaktors  $(1 - \sin^2\theta_W) \simeq 0.08$  stark unterdrückt.

Die kinematischen Faktoren  $\epsilon$  und  $\tau$  sind vom Impulsübertrag  $Q^2$  und vom Laborstreuwinkel  $\theta$  abhängig. Die Formfaktoren in Gleichung 2.12 tragen daher unterschiedlich zur Asymmetrie bei. Unter Vorwärtsstreuwinkeln  $\theta < 90^\circ$  dominiert  $G_E^s$  über  $G_M^s$ , während unter Rückwärtsstreuwinkeln  $G_M^s$  begünstigt und  $G_E^s$  unterdrückt wird. Führt man Messungen unter Vorwärts- und Rückwärtsstreuwinkeln bei gleichem  $Q^2$  durch, kann man nicht nur Linearkombinationen von  $G_E^s$  und  $G_M^s$  bestimmen, sondern beide Formfaktoren für diesen Impulsübertrag separieren.

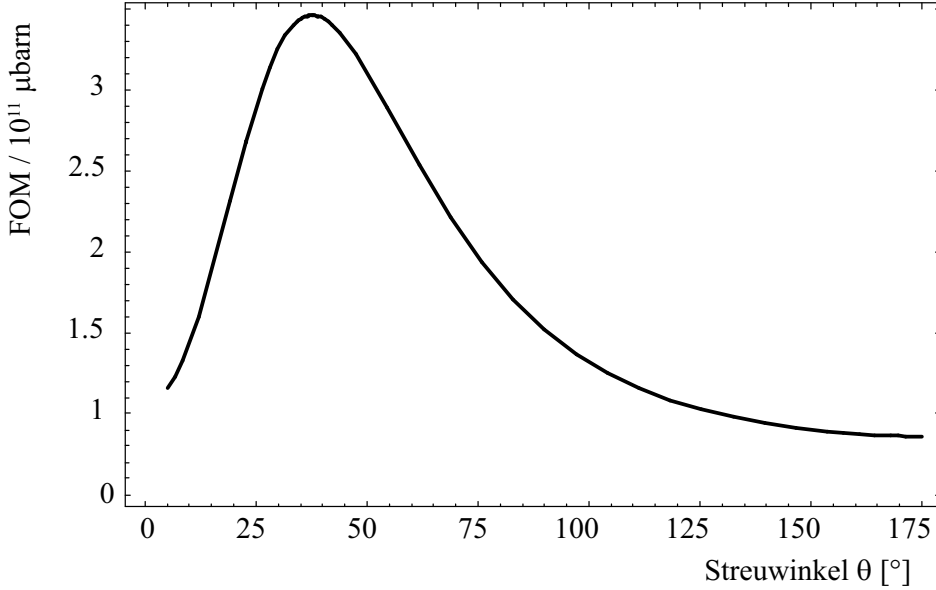
## 2.4 Statistischer Gütefaktor und Meßzeiten

Der optimale kinematische Bereich zur Durchführung eines Experimentes wird durch einen statistischen Gütefaktor beschrieben, der auch Figure of Merit (FOM) genannt wird. Das Maximum der FOM gibt an, wann  $\delta A/A$  minimal ist, bzw. mit welcher Kinematik in einer vorgegebenen Zeit der kleinste statistische Fehler in der Asymmetriemessung zu erreichen ist. Der Kehrwert des Gütefaktors ist bei einer festen Meßdauer proportional zum Meßfehler. Die FOM ist wie folgt definiert:

$$FOM = A^2 \cdot \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (2.16)$$

Für das A4-Experiment wurde so der Winkelbereich bestimmt, in dem man

bei gegebener Meßdauer und einem gegebenen  $Q^2$  die kleinste statistische Unsicherheit in der Asymmetrie erhält. Der ideale Streuwinkel wurde im Rahmen einer Doktorarbeit [13] bei einem Impulsübertrag von  $Q^2 = 0,227 \text{ GeV}^2/c^2$  (dies entspricht einer Elektronenenergie von 854,3 MeV) zu  $\theta = 35^\circ$  bestimmt (siehe Abb. 2.2).



**Abbildung 2.2:** Statistischer Gütefaktor (FOM).

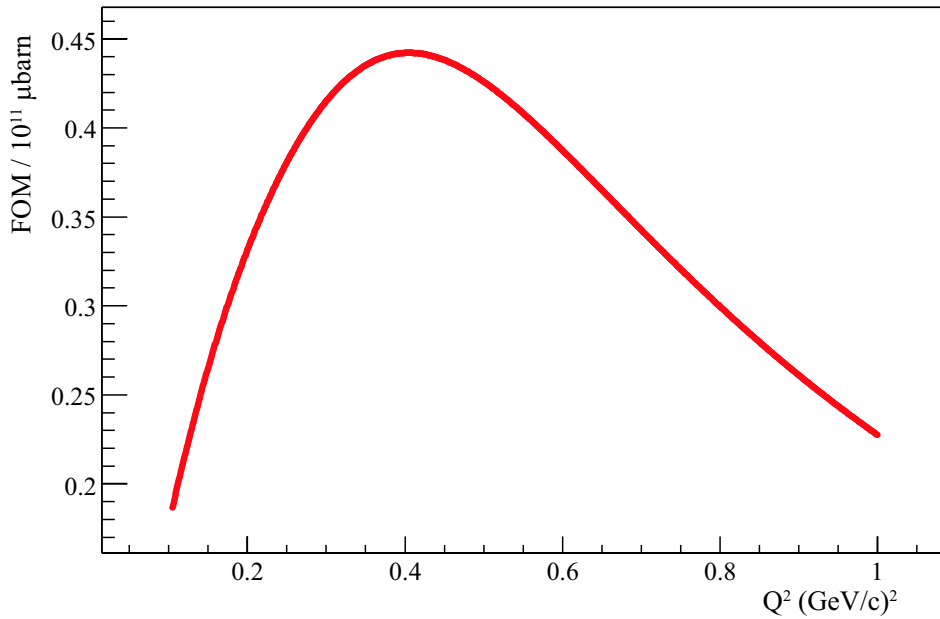
Der statistische Gütefaktor (FOM) ist gegen den Streuwinkel  $\theta$  bei festem Impulsübertrag von  $Q^2 = 0,227 \text{ GeV}^2/c^2$  aufgetragen.

Für Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln ist die Geometrie, und somit auch der Streuwinkel von  $\theta = 145^\circ$  des Detektors durch seine Bauart schon vorgegeben. Daher beschreibt die FOM hier die Abhängigkeit der statistischen Unsicherheit vom Impulsübertrag (siehe Abb. 2.3).

Aus der Definition von  $A_{Roh}$  (2.17) läßt sich über deren Fehler die minimale Gesamtzahl der elastischen Streueignisse  $N_{Min}$  ableiten, die zum Erreichen einer bestimmten statistischen Genauigkeit nötig ist. Mit Hilfe der Gaußschen Fehlerfortpflanzung, der Annahme großer Zählraten, so daß  $\delta N^\pm = \sqrt{N^\pm}$ ,  $\delta N^+ \simeq \delta N^-$  und  $N^+ \simeq N^-$ , und da die erwartete Asymmetrie in der Größenordnung  $10^{-5}$  liegt, folgt aus Gleichung 3.1:

$$\delta A_{Roh} = \frac{\sqrt{1 - (A_{Roh})^2}}{\sqrt{N^+ + N^-}} \simeq \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (2.17)$$

Um die Zählratenasymmetrie  $A_{Roh}$  mit einem Fehler von 10% zu bestimmen, folgt für die minimale Anzahl der im Detektor zu registrierenden elastischen



**Abbildung 2.3:** Statistischer Gütefaktor für Messungen unter Rückwärtswinkeln. Der statistische Gütefaktor (FOM) ist gegen den Impulsübertrag bei einem festen Streuwinkel von  $\theta = 145^\circ$  aufgetragen.

Ereignisse  $N_{Min}$  aus Gleichung 2.17:

$$N_{Min} \geq (10\% \times A_{Roh})^2 \quad (2.18)$$

Bei Messungen unter Vorwärtstreuwinkeln von  $\theta = 35^\circ$  und der verwendeten Elektronenstrahlenergie von 854,3 MeV (dies entspricht einem Impulsübertrag von  $Q^2 = 0,227 \text{ GeV}^2/c^2$ ) ist bei einem Streuwinkel von  $35^\circ$  die Asymmetrie ohne Strangeness-Beitrag  $A_0 = (-6,30 \pm 0,43) \text{ ppm}$ . Es müssen also ca.  $N_{Min} = 2 \cdot 10^{12}$  elastisch gestreute Elektronen im Detektor registriert werden, um die geforderte Genauigkeit zu erreichen. Dies entspricht einer Meßzeit von ca. 600 h bei einem Elektronenstrom von  $20 \mu\text{A}$  und einer Polarisierung von 80%. Werte, um die gleiche statistische Genauigkeit für Messungen unter Rückwärtswinkeln von  $\theta = 145^\circ$  zu erreichen, sind in Tabelle 2.1 angegeben. Die Meßzeiten verkürzen sich im Vergleich zu Vorwärtstreuwinkel-Messungen, da hier ein doppelt so langes Target verwendet wird und die zu messenden Asymmetrien um ca. eine Größenordnung höher sind.

|                                             | E=320MeV                 | E=510 MeV                |
|---------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| $Q^2$                                       | $0,23 \text{ GeV}^2/c^2$ | $0,48 \text{ GeV}^2/c^2$ |
| $d\sigma/d\Omega$                           | $12,94 \text{ nb/sr}$    | $3,23 \text{ nb/sr}$     |
| $\sigma$                                    | $8,18 \text{ nb}$        | $2,04 \text{ nb}$        |
| Elastische Rate                             | $864 \text{ kHz}$        | $216 \text{ kHz}$        |
| Asymmetrie $A_0$                            | $-16,75 \text{ ppm}$     | $-36,57 \text{ ppm}$     |
| Benötigte elastische Ereignisse $N_{Min}$   | $5,6 \cdot 10^{11}$      | $1,17 \cdot 10^{11}$     |
| Erforderliche Meßzeit für $\Delta A/A=10\%$ | $182h$                   | $153h$                   |

**Tabelle 2.1:** Meßzeiten unter Rückwärtsstreuwinkeln.

Die Meßzeiten beziehen sich auf einen Streuwinkel von  $\theta = 145^\circ$ . Die Raumwinkelakzeptanz des Kalorimeters beträgt  $\Delta\Omega = 0,63 \text{ sr}$ . Die Luminosität ist  $L = 1,06 \cdot 10^{38} s^{-1} \cdot cm^{-2}$  bei einem Strahlstrom von  $I = 20 \text{ } \mu\text{A}$  und unter Verwendung eines 20 cm langen Targets. Die gewünschte statistische Genauigkeit beträgt  $\Delta A/A = 10\%$



# Kapitel 3

## Das A4-Experiment

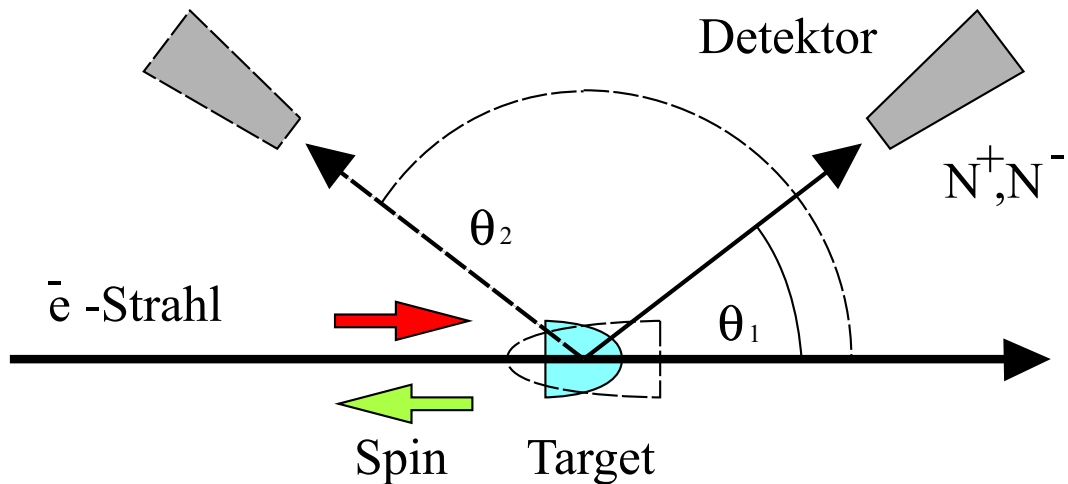
### 3.1 Meßprinzip des A4-Experiments

In Abb. 3.1 ist das grundlegende konzeptionell sehr einfache Meßprinzip des A4-Experiments dargestellt. An einem unpolarisierten Proton-Target werden polarisierte Elektronen gestreut. Diese werden in einem definierten Raumwinkelbereich von einem Kalorimeter nachgewiesen. Dabei werden die Zählraten für die beiden Polarisationsrichtungen des Elektronenstrahls gemessen. Aus den gewonnenen Daten kann dann die Zählratenasymmetrie der elastisch am unpolarisierten Proton-Target gestreuten Elektronen bestimmt werden. Die Zählratenasymmetrie  $A_{Roh}$  ist wie folgt definiert:

$$A_{Roh} = \frac{N^+ - N^-}{N^+ + N^-} \quad (3.1)$$

$N^\pm$  ist die Anzahl der im Kalorimeter nachgewiesenen elastisch gestreuten rechtshändig (+) bzw. linkshändig polarisierten (−) Elektronen bezüglich der longitudinalen Polarisationsrichtung des Elektronenstrahls. Aus der gemessenen Asymmetrie  $A_{Roh}$  kann die physikalische Asymmetrie gewonnen werden. Kleine Änderungen der Strahlparameter während des Umschaltens der Strahlpolarisation von + nach − bewirken kleine Änderungen der Zählrate und resultieren in sogenannten falschen Asymmetrien. Zum Beispiel ruft eine Änderung des Stroms bei der Umschaltung der Polarisation von + nach − eine triviale Änderung der gemessenen Zählraten  $N^\pm$  hervor. In ähnlicher Weise ruft eine Änderung der Strahlenergie bzw. der Strahllage eine Änderung des Wirkungsquerschnitts bzw. des Detektorraumwinkels  $d\Omega$  hervor. Alle diese Effekte rufen falsche Zählratenasymmetrien hervor und müssen wegen der kleinen Größenordnung der Asymmetrie von  $10^{-6}$  empfindlich gemessen

werden. Dazu müssen Korrekturen aufgrund von Fluktuationen der experimentellen Bedingungen berücksichtigt werden [11]. Diese unterteilen sich in zwei Klassen, nämlich Schwankungen, die von dem Umschaltprozeß der Polarisation hervorgerufen werden (helizitätskorrelierte Fluktuationen) und solchen die davon unabhängig sind (Fluktuationen die nicht mit der Helizität korreliert sind). Zu den nicht helizitätskorrelierten Korrekturen gehören Korrekturen aufgrund von Targetdichtefluktuationen, Nichtlinearitäten der Luminositätsmonitore und Doppeltreffern des Detektors. Die Korrekturen aufgrund von Schwankungen des Stroms, der Energie, des Winkels und der Position des Elektronenstrahls sind sowohl helizitätskorreliert, wenn sie während der Umschaltung der Polarisation auftreten, als auch nicht mit der Helizität korreliert, wenn sie zwischen zwei Umschaltvorgängen auftreten. Eine weitere Korrektur kommt aus dem Polarisationsgrad des Elektronenstrahls. Aus der geforderten Genauigkeit für die Bestimmung der strangeness-abhängigen Vektorformfaktoren  $G_{E,M}^s$  resultiert eine relative Genauigkeit von 10% oder kleiner in der Bestimmung der physikalischen Asymmetrie.



**Abbildung 3.1:** Das Meßprinzip des A4-Experiments.

Polarisierte Elektronen werden an einem unpolarisierten Flüssig-Wasserstoff-Target gestreut und die Streuraten werden unter Vorwärtstreuwinkeln  $\Theta_1$  von  $35^\circ$  bis  $40^\circ$  oder unter Rückwärtstreuwinkeln  $\Theta_2$  von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  in einem Kalorimeter detektiert. Zur Messung unter Rückwärtswinkeln wird das Target gedreht und zur Erhöhung der Streuraten durch ein längeres ersetzt.

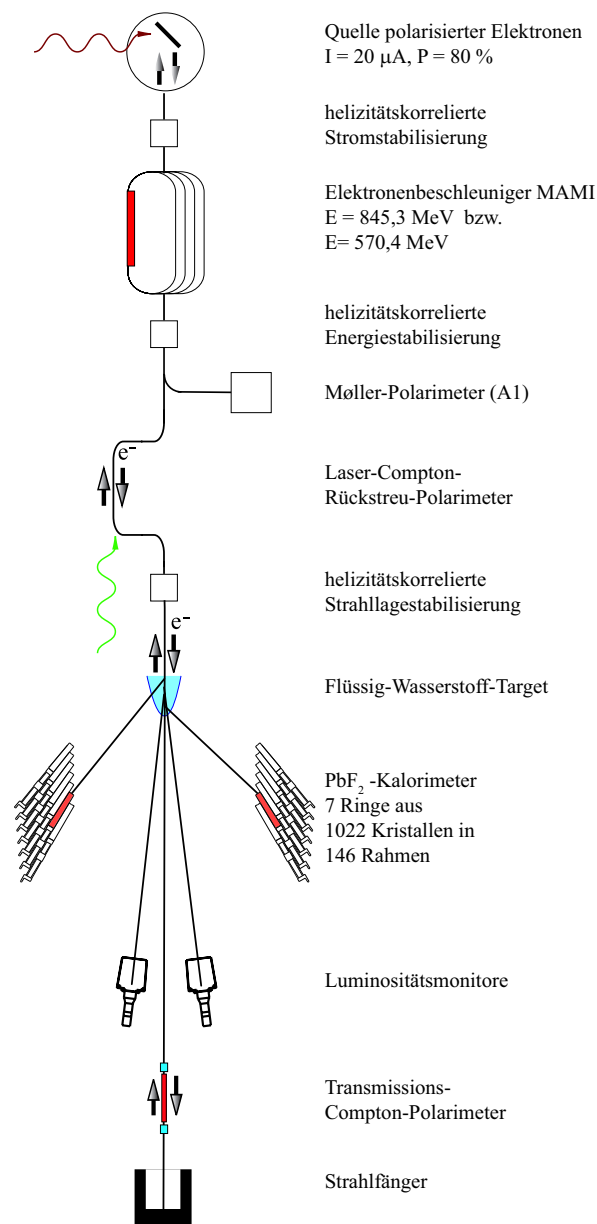
Im A4-Experiment wurde bis jetzt unter Vorwärtswinkeln bei einem Streuwinkel von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$  gemessen; Messungen unter Rückwärtswinkeln von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  werden folgen. Unter Vorwärtswinkeln sind bereits Messungen mit transversal und longitudinal polarisiertem Elektronenstrahl bei Strahlenergien von 854,3 MeV und 570,4 MeV durchgeführt worden [19][20][21][22]. Dies ent-

spricht einem Impulsübertrag von  $Q^2 = 0,23 \text{ GeV}^2/c^2$  bzw.  $Q^2 = 0,11 \text{ GeV}^2/c^2$ . Um aus den Messungen mit longitudinal polarisiertem Strahl die seltsamen elektrischen und magnetischen Formfaktoren bestimmen zu können, müssen Messungen bei gleichem Impulsübertrag unter Rückwärtswinkeln durchgeführt werden. Bei  $Q^2 = 0,23 \text{ GeV}^2/c^2$  entspricht dies einer Elektronenenergie von 320 MeV. Messungen unter Rückwärtswinkeln bei  $Q^2 = 0,10 \text{ GeV}^2/c^2$  sind bereits von der SAMPLE-Kollaboration durchgeführt worden. Ebenfalls sind Messungen von HAPPEX unter Vorwärtswinkeln bei  $Q^2 = 0,48 \text{ GeV}^2/c^2$  durchgeführt worden. Diese sollen vom A4-Experiment unter Rückwärtswinkeln bei einer Strahlenergie von 510 MeV ergänzt werden.

## 3.2 Experimenteller Aufbau

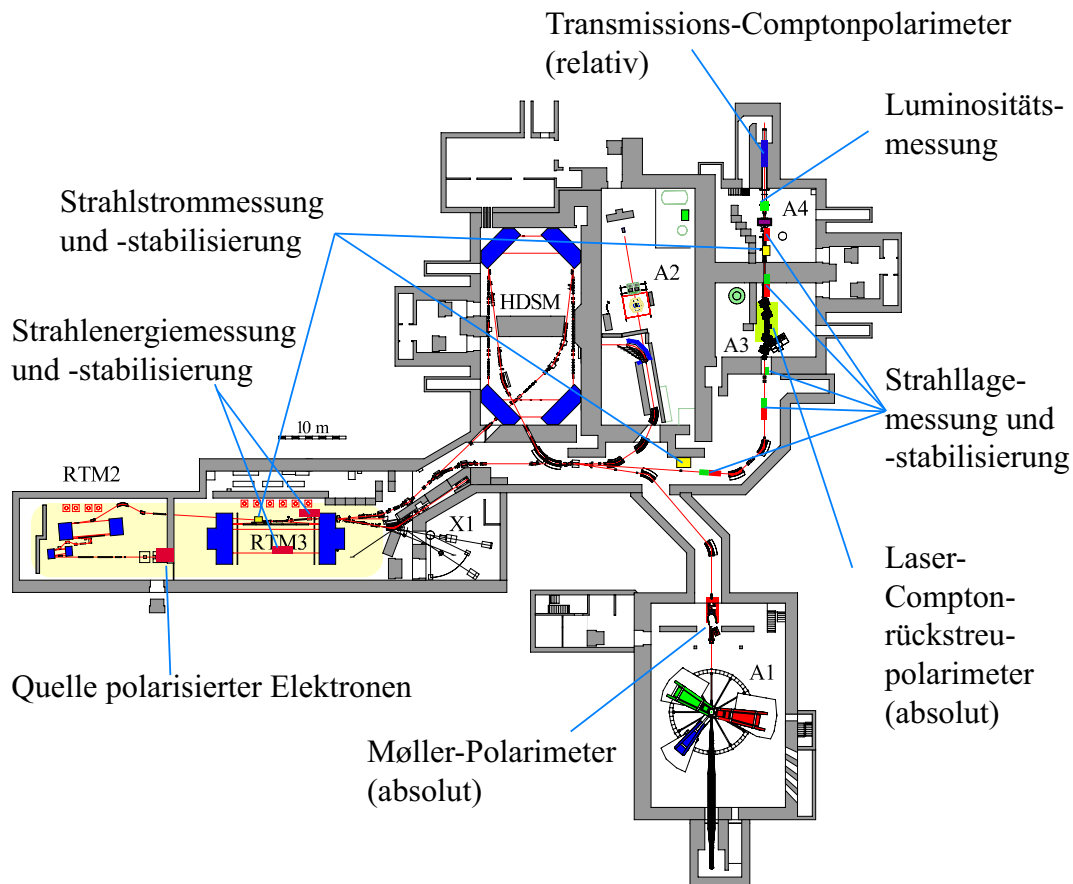
Mit der Entwicklung des A4-Experimentes wurde 1994 am Institut für Kernphysik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz begonnen. Der Aufbau zur Messung der paritätsverletzenden Elektron-Proton-Streuung unter Vorwärtswinkeln begann im Sommer 1999. Erste Messungen folgten 2000 mit dem halb bestückten Kalorimeter, das 2003 voll ausgebaut wurde. Der Umbau zur Messung unter Rückwärtswinkeln begann im August 2004. Der grundlegende Aufbau des A4 Experiments ist in Abb. 3.2 dargestellt.

Aus der polarisierten Quelle werden die Elektronen mit einem Strom von  $20 \mu\text{A}$  und einer Polarisation von ca. 80% nach einer ersten helizitätskorrelierten Stromstabilisierung in den Rennbahnbeschleuniger MAMI eingekoppelt. Die erreichbare maximale Elektronenenergie des Beschleunigers liegt derzeit bei ca. 880 MeV. Die Stahlparameter Strom Energie und Lage werden im MAMI und auch in der nachfolgenden Strahlführung ständig kontrolliert und nachgeregelt. Da eine präzise Kenntnis der Elektronenpolarisation notwendig ist, kann diese nun von zwei Polarimetern überwacht werden. Das Møller-Polarimeter kann jedoch im Gegensatz zum Laser-Compton-Rückstreu-Polarimeter nicht gleichzeitig zu einem laufenden Experiment betrieben werden. Ein weiteres Polarimeter ist noch vor dem Strahlfänger aufgebaut. Danach treffen die Elektronen auf ein Flüssig-Wasserstoff-Target. In Messungen unter Vorwärtsstreuwinkeln wird ein 10 cm langes Target verwendet, für Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln ein 20 cm langes, um eine höhere Luminosität zu erreichen. Ein Teil der im Target gestreuten Elektronen wird dann im  $\text{PbF}_2$ -Kalorimeter detektiert. Je nachdem, ob Messungen unter Vorwärts- oder Rückwärtsstreuwinkeln vorgenommen werden, deckt das Kalorimeter den Streuwinkelbereich  $\theta$  von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$  bzw. von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  ab. Ein weiterer Teil der gestreuten Elektronen wird unter kleinen Winkeln ( $\theta = 4,4^\circ$  bis  $10^\circ$ ) von acht Luminositätsmonitoren nachgewiesen. Um systematische Veränderungen der



**Abbildung 3.2:** Schematischer Aufbau des A4-Experiments.

Die aus der Quelle für polarisierte Elektronen mit einem Polarisationsgrad von ca. 80% und einem Strom von  $20 \mu\text{A}$  extrahierten Elektronen können nach einer ersten helizitätskorrelierten Stromstabilisierung in MAMI auf eine Maximalenergie von ca. 880 MeV beschleunigt werden. Sämtliche helizitätskorrelierten Strahlparameter wie Lage, Strom und Energie werden in MAMI und der anschließenden Strahlführung kontrolliert und stabilisiert. Nach den ersten beiden Polarimetern werden die Elektronen in einem Flüssig-Wasserstoff-Target gestreut. Die Energie der gestreuten Elektronen wird mit einem  $\text{PbF}_2$ -Kalorimeter gemessen und anschließend histogrammiert. Das Kalorimeter deckt unter Vorwärtstreuwinkelmessungen den Streuwinkelbereich von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$ , unter Rückwärtstreuwinkelmessungen den von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  ab. Zusätzlich werden die unter kleinen Winkeln gestreuten Elektronen in Luminositätsmonitoren nachgewiesen. Die Polarisation des Elektronenstrahls wird mit drei Polarimetern bestimmt.

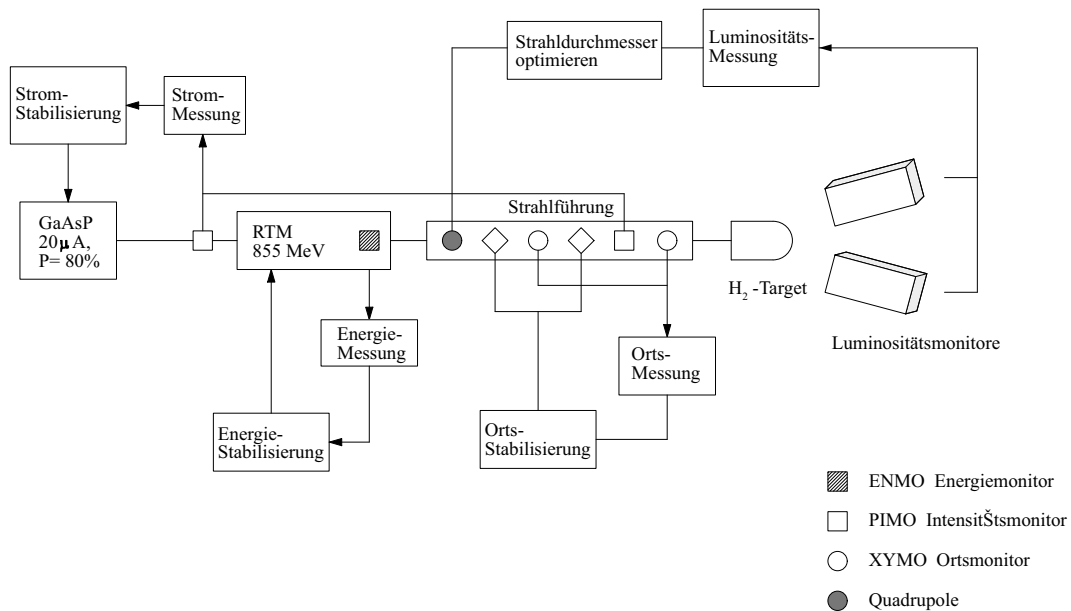


**Abbildung 3.3:** Übersicht über den Elektronenbeschleuniger MAMI und die Experimentierhallen.

Das A4-Experiment ist in den Experimentierhallen A3 und A4 aufgebaut. Die in der Quelle erzeugten polarisierten Elektronen werden in den einzelnen Stufen des Elektronenbeschleunigers MAMI beschleunigt und zum Experiment transportiert. Die einzelnen Parameter des Elektronenstrahls (Strom, Energie und Lage) werden hierbei ständig mit Mikrowellenkavitäten überwacht und über Regelkreise stabilisiert. Eine präzise Kenntnis der Elektronenpolarisation ist ebenfalls nötig. Die Polarisation wird daher von drei Polarimetern überwacht. Die Dichtefluktuationen des Flüssig-Wasserstoff-Targets werden von acht Luminositätsmonitoren permanent überwacht.

Asymmetrie durch Targetdichte- und Strahlfluktuationen zu trennen und zu korrigieren, ist zusätzlich zur Messung des Strahlstroms die Messung der Luminosität notwendig. Nach dem Target trifft der Elektronenstrahl auf das dritte Polarimeter, ein Transmissions-Compton-Polarimeter, und schließlich auf den Strahlfänger. Die einzelnen Stationen sind in den folgenden Kapiteln (3.2.1 bis 3.2.6) genauer beschrieben.

### 3.2.1 Die Quelle polarisierter Elektronen und der MAMI Beschleuniger



**Abbildung 3.4:** Übersicht über die Strahlstabilisierungen.

Alle helizitätskorrelierten Strahlparameter (Lage, Strom und Energie) müssen während eines laufenden Experimentes kontrolliert und nachgeregelt werden. Hierzu wurde ein Monitorsystem entwickelt, das es erlaubt die Strahlparameter aktiv zu stabilisieren. Um Dichtefluktuationen des Flüssig-Wasserstoff-Targets zu kontrollieren wurde zusätzlich ein Luminositätsmonitorsystem aufgebaut. So kann über Quadrupole im Beschleuniger der Strahldurchmesser optimiert werden, um Dichtefluktuationen zu minimieren.

Die polarisierte Quelle besteht aus einem uniaxial deformierten GaAs-Kristall ('strained layer') als Photokathode, der mit 100 ps langen zirkular polarisierten Lichtpulsen eines gepulsten Halbleiterlasers beleuchtet wird. Die durch Photoeffekt aus dem Kristall austretenden polarisierten Photoelektronen werden mit einer Hochspannung von 100 kV aus der Quelle entnommen und in das MAMI eingespeist [3]. Die Wiederholrate des Lasers von 2,45 GHz

ist auf die Hochfrequenz der MAMI-Beschleunigersektion abgestimmt. Die Helizität des Elektronenstrahls wird über die Helizität des zirkular polarisierten Laserlichtes, die mit einer Pockelszelle umgeschaltet werden kann, festgelegt. Die Elektronenquelle liefert longitudinal polarisierte Elektronen mit einer mittleren Polarisierung von 80 % bei einem Stahlstrom von  $20\ \mu\text{A}$ .

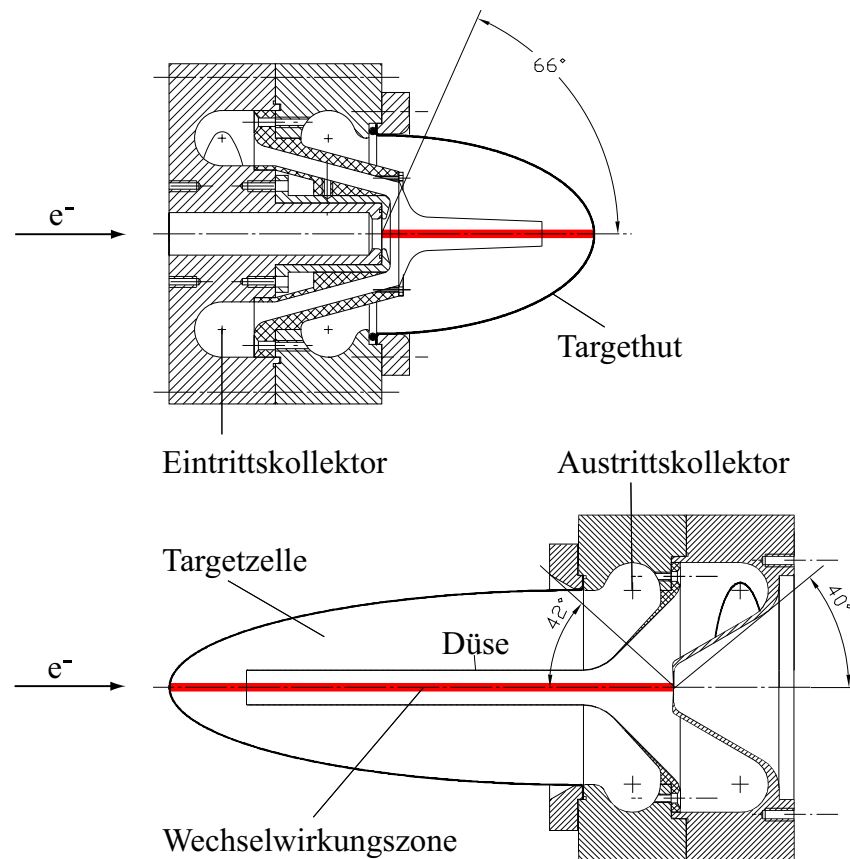
Der Elektronenbeschleuniger MAMI ist aus drei hintereinandergeschalteten Rennbahnbeschleunigern ('Racetrack Microtron': RTM), die einen 3,46 MeV Linearbeschleuniger als Injektor verwenden, aufgebaut. Eine Erweiterung des Beschleunigers um eine vierte Stufe ist im Aufbau. Das Funktionsprinzip des Mikrotron-Beschleunigers ist das Zurückführen des Elektronenstrahls in denselben Linearbeschleuniger. Am MAMI werden normalleitende Hochfrequenzkavitäten mit einer Frequenz von 2,45 GHz eingesetzt. Nach der ersten Beschleunigerstufe (RTM 1) haben die Elektronen eine Energie von 14,35 MeV und werden in RTM 2 auf 180 MeV beschleunigt. In der dritten Stufe gewinnen sie eine Energie von 7,5 MeV pro Umlauf. Dies führt zu einer Maximalenergie von 855 MeV nach 90 Umläufen. Die Maximalenergie kann durch Erhöhung des Dipolfeldes von RTM 3 noch auf 882 MeV gesteigert werden. Bei den im A4-Experiment verwendeten Energien von 854,3 MeV und 570,4 MeV ist die relativistische Spindynamik bei der Präzession des Elektronenspins so ausgerichtet, daß der Elektronenspin am Target longitudinal ausgerichtet ist.

Da zur Durchführung des A4-Experiments präzise Stabilisierungen verschiedener Strahlparameter erforderlich sind, wurden in Zusammenarbeit mit der Beschleunigergruppe des Instituts für Kernphysik verschiedene Regelsysteme entwickelt, die diese Größen kontinuierlich überwachen und auf ihre Sollwerte nachregeln. Die überwachten Strahlparameter sind Lage, Strom und Energie. Eine Übersicht aller Stabilisierungssysteme mit ihren Rückkopplungsmöglichkeiten zeigt Abb. 3.4.

### 3.2.2 Das Flüssig-Wasserstoff-Target

Das A4-Experiment stellt besondere Anforderungen an den Wasserstoff-Kühlkreislauf und die Targetzelle. Die vom Elektronenstrahl unter Vorwärtstreuwinkeln im 10 cm langen bzw. unter Rückwärtstreuwinkeln im 20 cm langen Target deponierte Wärmeleistung von 100 W bzw. 200 W bei  $20\ \mu\text{A}$  Strahlstrom muß so effizient abgeführt werden, daß relative Targetdichteschwankungen durch Blasenbildung bzw. Sieden unter  $10^{-3}$  in 20 ms gehalten werden [11]. Unter Rückwärtswinkeln wird eine 20 cm lange Targetzelle verwendet, um eine größere Rate rückgestreuter Elektronen zu erreichen und so die Meßzeit zu verkürzen.

Die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs wird, um des Kochens des Tar-



**Abbildung 3.5:** Aufbau des Flüssig-Wasserstoff-Targers.

Das obere Bild zeigt das Target für Messungen unter Vorwärtstreuwinkeln, das untere das für Messungen unter Rückwärtstreuwinkeln. Wegen der gewünschten Winkelauflösung des  $\text{PbF}_2$ -Kalorimeters beträgt die Länge des Targethuts für Messungen unter Vorwärtswinkeln 10 cm. Bei Messungen unter Rückwärtswinkeln wird, um größere Rückstreuraten zu erhalten, ein 20 cm langer Targethut verwendet. Der Elektronenstrahl tritt hier an der Spitze des Targethutes ein, um zu verhindern, daß die rückgestreuten Elektronen mit dem Aluminium der Targetbasis wechselwirken. Das Target besteht aus mehreren mit Indium gedichteten Aluminiumbauteilen. Der flüssige Wasserstoff tritt am Eintrittskollektor ein und fließt dann in eine Düse, in der das Maximum der Flußgeschwindigkeit erreicht wird. Durch den Austrittskollektor verläßt der Wasserstoff das Target. Das Eintrittsfenster (Vorwärtstreuwinkel) bzw. Austrittsfenster (Rückwärtstreuwinkel) hat eine Dicke von  $75\ \mu\text{m}$ . Der Targethut hat eine Wandstärke von  $250\ \mu\text{m}$ , die an der Spitze auf  $100\ \mu\text{m}$  verkleinert wurde. Die Wände der Düse sind  $200\ \mu\text{m}$  dick. Dadurch ist gewährleistet, daß der  $66^\circ$ - (Vorwärtswinkel) bzw.  $138^\circ$ -Kegelbereich (Rückwärtswinkel) so materialarm wie möglich ist. Im Rückwärtstreu-Target ist daher auch der Bereich um das Strahlaustrittsfenster ausgespart, um die Rate der im Aluminium gestreuten Elektronen zu minimieren. Das Target ist über eine thermische Brücke am Kryostat befestigt, um Bewegungen durch Temperaturveränderungen und mechanische Erschütterungen so gering wie möglich zu halten.

gets zu minimieren, möglichst weit unter dem Siedepunkt (d.h. unterkühlt) bei 14 K gehalten, da Wasserstoff nur einen geringen Temperaturunterschied von 6 K zwischen Gefrier- und Siedepunkt aufweist und bei diesen Temperaturen eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit hat. Um eine maximale Flußgeschwindigkeit in der Targetzelle zu erreichen, wurden der Kühlkreislauf und der Wärmetauscher so optimiert, daß der von der Flüssig-Wasserstoff-Pumpe aufgebaute Druckunterschied fast vollständig im Target abfällt [2]. Der so in der Targetzelle entstehende turbulente Fluß erhöht durch den transversalen Volumenaustausch im flüssigen Wasserstoff die effektive Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffs. Außerdem wird der Querschnitt des Elektronenstrahls während des Experiments auf seine maximale Größe eingestellt, um die deponierte Wärmeleistung möglichst weit im Target zu verteilen. Dieses neue Konzept ermöglicht es, auf ein Rastern des Elektronenstrahls (schnelle Modulation der Strahlposition auf dem Target) zu verzichten.

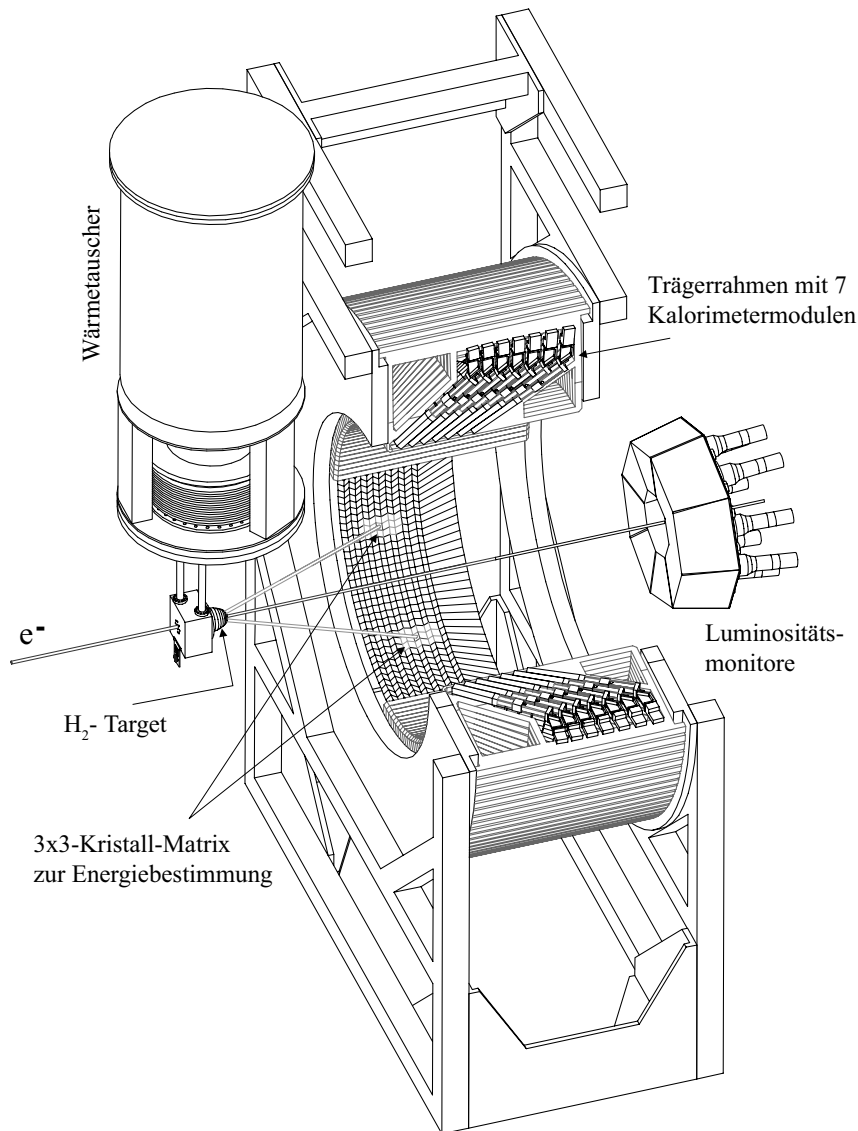
Eine schematische Darstellung der Targetzelle zeigt Abb. 3.5. Das obere Bild zeigt das Target für Messungen unter Vorwärtsstreuwinkeln, das untere das für Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln. Das Target besteht aus mehreren mit Indium gedichteten Aluminiumbauteilen. Nachdem der flüssige Wasserstoff in einen runden strahlsymmetrischen Kollektor eintritt, fließt er in eine Düse von ca. 12 mm Durchmesser, die den größten Strömungswiderstand im gesamten Kühlkreislauf darstellt und eine turbulente Strömung erzeugt. Am Austrittskollektor verläßt der Wasserstoff die Targetzelle. Im Vorwärtsstreu-Target tritt der Elektronenstrahl durch eine  $75\text{ }\mu\text{m}$  dicke Aluminiumfolie, das Strahleintrittsfenster, in die Targetzelle ein und verläßt sie an der ca.  $100\text{ }\mu\text{m}$  dicken Spitze des 10 cm langen Targethutes. Im Rückwärtsstreu-Target tritt der Elektronenstrahl an der ebenfalls  $100\text{ }\mu\text{m}$  dicken Spitze des 20 cm langen Targethutes ein und verläßt es durch das Strahlaustrittsfenster am Ende der Wechselwirkungszone. Das Strahlaustrittsfenster ist in diesem Fall ein fester Bestandteil des Aluminiumdrehteils der Targetbasis, das den Eintrittskollektor für den Wasserstoff enthält. Die Spitze des Targethutes ist in beiden Targets nachbearbeitet, um die Wandstärke an dieser Stelle zu minimieren und so Wechselwirkungen des Elektronenstrahls mit dem Aluminium zu verringern. Aus diesem Grund ist auch das Strahleintritts- bzw. Strahlaustrittsfenster so dünn wie möglich ausgeführt. Im Rückwärtsstreu-Target tritt der Elektronenstrahl an der Spitze des Target-Hutes ein, um zu verhindern, daß die rückgestreuten Elektronen mit dem Aluminium der Target-Basis wechselwirken. Der Targethut ist in beiden Targets parabolisch ausgeführt und hat eine Dicke von ca.  $250\text{ }\mu\text{m}$ . Im Vorwärtsstreu-Target ist er 10 cm lang, im Rückwärtsstreu-Target 20 cm. Für das Rückwärtsstreu-Target verwendet man einen längeren Hut, um die Wechselwirkungszone der Elektronen mit dem Wasserstoff zu vergrößern. Dadurch kann die Rate der rückgestreuten Elektronen, die weitaus geringer ist als die der in Vorwärtsrichtung gestreuten, erhöht und somit die

Meßzeit verkürzt werden. Die Massenbelegung für ein gestreutes Elektron auf dem Weg zum Detektor sollte möglichst gering sein. Daher hat der Targethut eine parabolische Form, die gewährleistet, daß ihn die gestreuten Elektronen möglichst senkrecht zu seiner Oberfläche durchqueren und so möglichst wenig Energie im Aluminium verlieren. Aus dem selben Grund hat auch die Düse eine Wandstärke von  $200\ \mu\text{m}$ . Sie ist im Rückwärtsstreu-Target etwas mehr als doppelt so lang wie im Vorwärtsstreu-Target. Um bei Messungen unter Rückwärtswinkeln Wechselwirkungen der in Vorwärtsrichtung gestreuten Elektronen mit der Aluminium Target-Basis zu minimieren, ist hier der Bereich um das Strahlaustrittsfenster in einem Kegel mit Öffnungswinkel  $40^\circ$  um die Strahlrichtung ausgespart.

Das Target befindet sich am niedrigsten Punkt des Kühlkreislaufes. Der flüssige Wasserstoff wird durch einen Gegenwärmetauscher am höchsten Punkt des Kreislaufs gekühlt. Der Gegenwärmetauscher ist über einen 400 W Helium-Kühler mit einem He-He-Wärmetauscher verbunden. Die Temperatur des einströmenden Heliums wird aktiv mit einer Heizung im Helium-Kreislauf geregelt, um die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs knapp über dem Gefrierpunkt zu halten. Mit Hilfe einer Tangentialpumpe mit 100 Hz Rotationsfrequenz der Pumpenturbine können Massenflüsse bis zu  $25\ \text{g/s}$  im Wasserstoff-Kühlkreislauf erzeugt werden. Acht Temperatursensoren ermöglichen zusammen mit der Heizung und einem PC eine stabile Regelung des Target-Kühlkreislaufes. Eine zusätzlich eingebaute Heizung erlaubt den Betrieb ohne Pumpe bei niedrigen Strahlströmen. Der Wasserstoff zirkuliert dann allein aufgrund der natürlichen Konvektion.

### 3.2.3 Das $\text{PbF}_2$ -Kalorimeter

Die elastisch im Target gestreuten Elektronen werden über eine kalorimetrische Ein-Arm-Messung nachgewiesen. Der Nachweis der gestreuten Protonen ist nicht notwendig. In der elastischen Streuung reicht die Messung des Winkels und der Energie des gestreuten Elektrons, um die Kinematik festzulegen. Daher bestimmt das vollabsorbierende Kalorimeter den Winkel  $\theta$  und die Energie  $E'$  der in das Kalorimeter gestreuten Elektronen. Das Kalorimeter ist modular aufgebaut und besteht mittlerweile vollausgebaut aus 1022  $\text{PbF}_2$ -Kalorimetermodulen, die einen Streuwinkelbereich von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$  bei Messungen unter Vorwärtsstreuwinkeln bzw.  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  unter Rückwärtsstreuwinkeln abdecken. Ein Modul besteht aus einem  $\text{PbF}_2$ -Kristall der an eine Halterung mit integrierem Photomultiplier angeklebt ist. Die Kalorimetermodule sind rotationssymmetrisch um den Elektronenstrahl angebracht und decken den gesamten Azimutwinkelbereich ab (Abb. 3.6). Jeweils sieben dieser Einzelmodule sind in einem Rahmen zusammengefaßt. Das Kalorimeter setzt



**Abbildung 3.6:** Schnittzeichnung des A4-Kalorimeters für Vorwärtsstreugeometrie. Das Kalorimeter ist modular aufgebaut und besteht aus 1022 PbF<sub>2</sub>-Kristallen. Der Elektronenstrahl trifft von links auf das Flüssig-Wasserstoff-Target. Zur Bestimmung der Energie eines in das Kalorimeter gestreuten Teilchens wird die Summe des Tscherenkow-Lichtes einer 3×3-Matrix aus PbF<sub>2</sub>-Kristallen (zentrales Kalorimetermodul und acht Nachbarmodule) gebildet. Die Targetzelle mit dem Wärmetauscher ist ebenfalls eingezeichnet. Die acht Luminositätsmonitore befinden sich unter kleinen Vorwärtsstreuwinkeln hinter dem Kalorimeter und ermöglichen eine Normierung der im Kalorimeter auftretenden Zählratenschwankungen auf Targetdichtefluktuationen. Die Zeichnung zeigt den Aufbau zur Messung unter Vorwärtsstreuwinkeln. Für Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln wird das Kalorimeter um 180° gedreht strahlaufwärts vor das Target gestellt. Das Target wird dabei ebenfalls gedreht und durch ein verlängertes ersetzt, um höhere Rückwärtsstreuraten zu erhalten.

sich aus 146 solcher Rahmen zusammen [1]. Die Signale des Kristalls jedes Moduls werden von einem Photomultiplier ausgelesen [10].

Um Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln mit dem A4-Kalorimeter durchführen zu können, muß es strahlaufwärts vor das Flüssig-Wasserstoff-Target gestellt werden. Außerdem muß es um  $180^\circ$  um die Vertikale gedreht werden, damit die Kristalle wieder auf die Mitte des Targets zeigen. So kann ein Streuwinkelbereich von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  abgedeckt werden. Andere Streuwinkelbereiche sind aufgrund der fest im Kalorimeter eingebauten Kristalle nicht sinnvoll zu messen, da sich die in den Kristallen entstehenden elektromagnetischen Schauer über zu viele Kristalle ausbreiten würden und so die Energie- und Ortsauflösung des Kalorimeters beeinträchtigen würden. Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln wurden beim Aufbau des Kalorimeters jedoch nicht berücksichtigt. Das Kalorimeter kann nur strahlabwärts hinter dem Target linear verschoben werden. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neue Lagerung des Kalorimeters entwickelt. Das Kalorimeter wird jetzt zusammen mit der Streukammer und dem Target mit Kühlsystem auf eine um das Streuzentrum rotierbare Plattform gestellt. Ein einfacher und schneller Umbau zwischen Messungen unter Vorwärts- und Rückwärtsstreuwinkeln ist so gewährleistet.

Der Detektor muß die elektromagnetischen Schauer elastisch gestreuter Elektronen von denen anderer Streuprozesse unterscheiden können. Die Pionproduktion ist bei der Streuung am Proton die inelastische Reaktion mit dem kleinsten Energieverlust. Unter einem Elektronenstreuwinkel von  $35^\circ$  ist die kinetische Energie eines inelastisch gestreuten Elektrons daher um mindestens 120 MeV kleiner als die eines elastisch gestreuten. Mit einer Ortsauflösung von 1,2 cm und einer Targetlänge von 10 cm ist die für eine ausreichende Trennung notwendige relative Energieauflösung  $\frac{\delta E}{E}$  ungefähr  $3,5\% / \sqrt{E/GeV}$ . Um die zu messende Asymmetrie durch Ratenverluste nicht zu verfälschen, müssen die Totzeiten der Detektormodule wegen der erforderlichen hohen Raten möglichst kurz sein. Die Strahlungsfestigkeit der einzelnen Detektorkristalle ist ein weiteres Kriterium bei der Wahl des Kalorimetermaterials. Der Detektor erleidet im Laufe der Messungen eine Energiedeposition von einigen 10 krad, die die Lichtausbeute nicht beeinflussen darf.

Daher wurde  $PbF_2$  als Kalorimetermaterial gewählt.  $PbF_2$  zeichnet sich durch eine hohe Lichtausbeute und kurze Signale aus. Das schnelle Antwortverhalten beruht auf der Generierung von Tscherenkow-Licht. Die Abklingzeit des Tscherenkow-Lichtes hängt nur von der Geometrie der Kristalle und deren Lichtsammlung ab. Das Photomultipliersignal ist nach 20 ns abgeklungen und zeigt keine Szintillationskomponenten. Im Vergleich zu anderen Tscherenkow-Materialien besitzt  $PbF_2$  eine außergewöhnlich hohe Transmission mit einer Transmissionskante bei ca. 250 nm. Verglichen mit Bleiglas hat  $PbF_2$  auf-

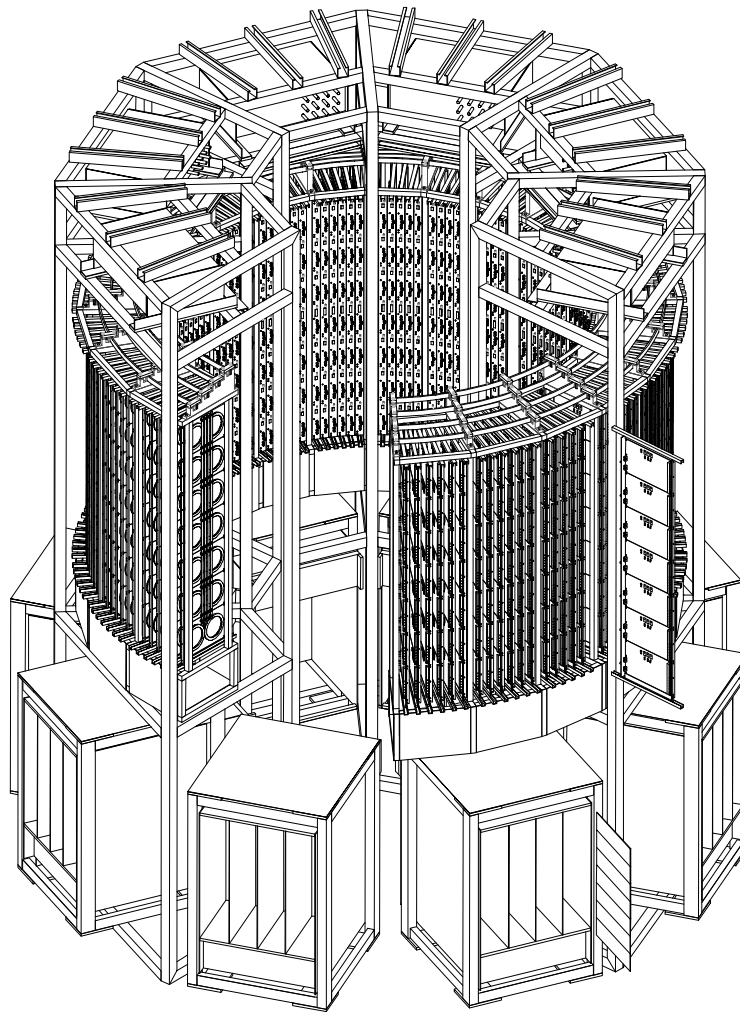
grund seiner Transparenz im ultravioletten Spektralbereich eine doppelt so hohe Ausbeute an Photonen und verbessert so die Energieauflösung des Kalorimeters deutlich. Untersuchungen haben gezeigt, daß Strahlenschäden der  $\text{PbF}_2$ -Kristalle durch das Experiment keinen merklichen Einfluß auf die Energieauflösung haben. Außerdem kann die Abnahme der Transmission durch Strahlenschäden bei Dosen über 100 krad durch Bestrahlung mit blauem Licht rückgängig gemacht werden [1].

Eine detaillierte Beschreibung des A4-Kalorimeters findet sich in zwei Dissertationen [1], [10]. Das Kalorimeter wurde 2000 mit 511 Kanälen in Betrieb genommen und von 2001 bis 2003 parallel zur Datenname vollständig ausgebaut. Der Umbau der Lagerung des Kalorimeters, um Messungen auch unter Rückwärtsstreuwinkeln durchführen zu können, hat im August 2004 begonnen (Siehe Kapitel 4).

### 3.2.4 Die Ausleseelektronik MEDUSA

Das A4-Experiment stellt hohe Anforderungen an die Ausleseelektronik des Kalorimeters. Für ein Experiment müssen ca.  $10^{13}$  elastisch gestreute Elektronen bei Gesamtraten von 100 MHz detektiert und die zugehörigen Energien histogrammiert werden. Ratenverluste durch die Totzeit der Elektronik müssen hierbei minimiert werden. Diese Anforderungen sind mit handelsüblicher Standardelektronik nicht zu bewältigen. Daher wurde ein streng paralleles Datenerfassungskonzept entwickelt [17]. Das Kalorimeter wird in  $3 \times 3$ -Kristall-Matrizen aufgeteilt, wobei jeder Kristall außer den Randkristallen das Zentrum einer solchen Matrix ist. Alle Kristalle erhalten einen vollständigen Elektronikkanal, der mit seinen Nachbarkristallen in der Matrix vernetzt ist, um die analoge Summe der Signale bilden zu können. Jeder Elektronikkanal ist auch für die Digitalisierung und Speicherung der Daten verantwortlich. Um eine falsche Energiebestimmung durch Doppeltreffer (Pile-Up) zu verhindern, müssen zwei zeitlich sehr nah hintereinander eintreffende Teilchen von der Elektronik auch als solche erkannt werden. Die Anforderungen an die Elektronik waren daher eine Doppelpulserkennung ab 5 ns Signalabstand, 20 ns Integrationszeit zur Energiemessung und totzeitfreie Digitalisierung. Ein Ereignis wird digitalisiert, wenn genügend Energie in den Kristallen einer  $3 \times 3$ -Kristall-Matrix deponiert wurde und das Ereignis zeitlich wie räumlich von anderen getrennt war.

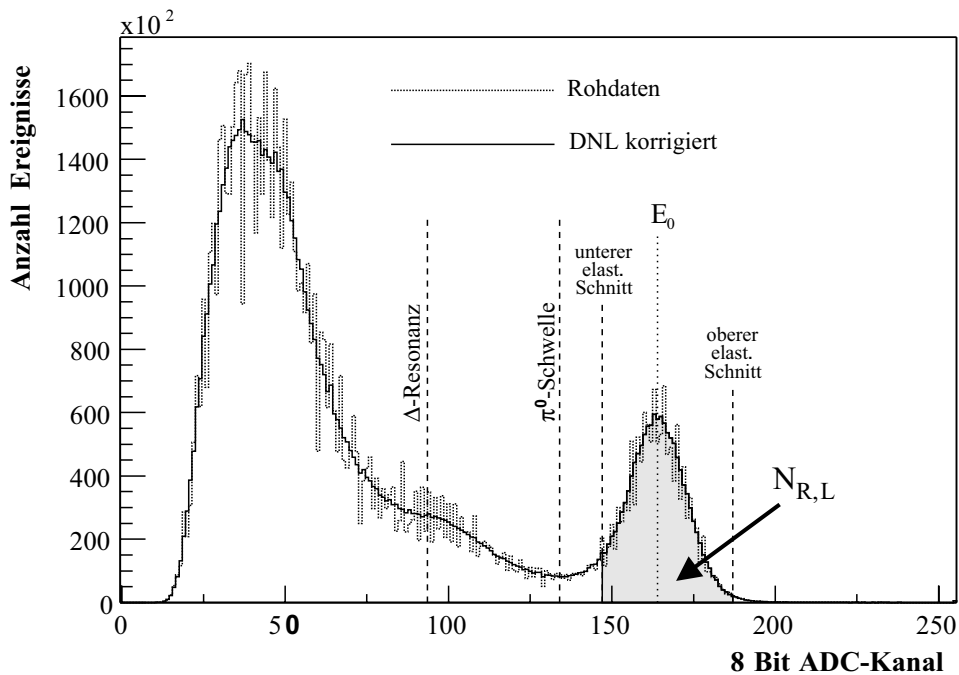
Abb. 3.7 zeigt die entwickelte Elektronik eingebaut in den Elektronikturm (MEDUSA). Wegen der starken Vernetzung für den benötigten Informationsaustausch sind die Analog-Karten in der gleichen Weise wie die zugehörigen Kalorimeter-Module angeordnet. So ist der räumliche Abstand zwischen benachbarten Kanälen immer gleich groß und die Signallaufzeiten sind minimal



**Abbildung 3.7:** Schnittzeichnung durch den Elektronikturm MEDUSA.

Der Elektronikturm besteht im voll ausgebauten Zustand aus 146 mit jeweils 7 Analogkarten bestückten Rahmen und 8 VME-Crates, die mit insgesamt 146 Histogrammierungskarten bestückt den digitalen Teil bilden. An den Frontseiten der Rahmen, die ins Innere des Turms zeigen, sind die 1022 Signalkabel angeschlossen. Die Ausgänge zum digitalen Teil sind an der Rückseite der Rahmen, wie auch die Anschlüsse zur Vernetzung der einzelnen Nachbarrahmen untereinander.

[10]. Ein Elektronikkanal besteht aus zwei galvanisch getrennten Einheiten. Ein analoger Teil erkennt selbsttriggernd ein im Kanal auftretendes Ereignis und bestimmt dessen Energie aus der integrierten Ladung der zugehörigen  $3 \times 3$ -Matrix. Der Analogteil erkennt zusätzlich Doppelpulse innerhalb des Integrationsfensters. Um dies leisten zu können, müssen zwischen den analogen Einheiten Signale ausgetauscht werden, wobei jedes Modul mit seinen 24 näch-



**Abbildung 3.8:** Energiespektrum einer  $3 \times 3$ -Kalorimetermatrix bei einem Streuwinkel  $\theta$  von  $35^\circ$  und einer Strahlenergie von  $854,3 \text{ MeV}$ . Die Anzahl der detektierten Ereignisse ist gegen den ADC-Kanal aufgetragen. Ein ADC-Kanal entspricht einem Energie-Intervall. Die Linie der elastisch gestreuten Elektronen  $E_0$  ist um Kanal 166 zu erkennen. Die inelastischen Ereignisse links von  $E_0$  überwiegen um ca. eine Größenordnung die elastischen. Aus dem Spektrum wird innerhalb definierter Intervallgrenzen die Anzahl  $N^\pm$  der elastisch gestreuten Elektronen für die Bestimmung der Asymmetrie  $A_{Roh}$  extrahiert. Am linken Rand wird das Spektrums durch die Diskriminatorschwelle abgeschnitten.

sten Nachbarn kommunizieren muß [16]. Der zweite Teil eines Elektronikkanals ist der digitale Teil, der die vom analogen Teil akzeptierten Ereignisse totzeitfrei histogrammiert.

Abb. 3.8 zeigt ein typisches Energiespektrum einer  $3 \times 3$ -Matrix des Kalorimeters bei einem Streuwinkel von  $35^\circ$  und einer Strahlenergie von  $854,3 \text{ MeV}$ . Es sind sowohl die Rohspektren, die aus dem Speicher der Histogrammierungselektronik ausgelesen werden, als auch die auf differentielle Nichtlinearitäten (DNL) des 8-Bit Digital-Analog-Wandlers korrigierten Spektren für beide Polarisationsrichtungen aufgetragen. Da der Fehler in den Einzelkanälen größer ist als die zu messende Asymmetrie, können die Spektren für die unterschiedlichen Polarisationsrichtungen kaum unterschieden werden. Auf der rechten Seite des Spektrums ist die Grenzenergie  $E_0$  der elastisch am Wasserstoff gestreuten

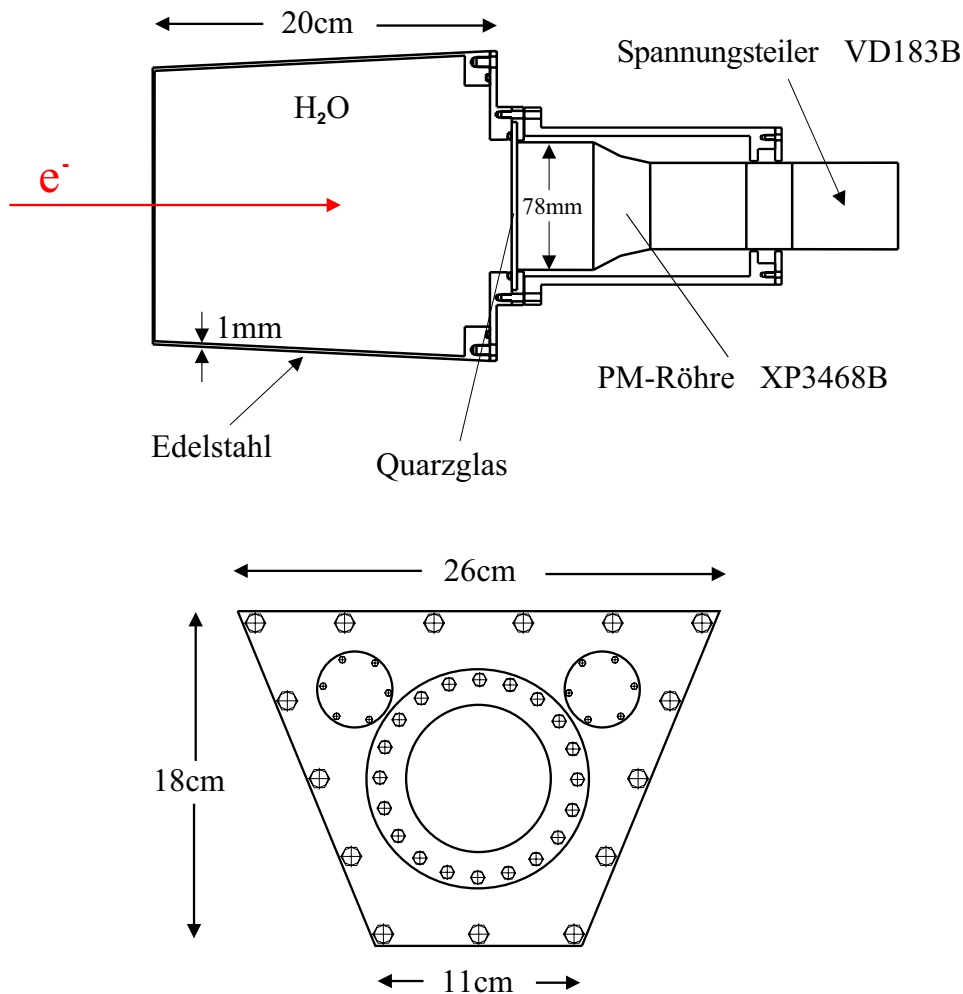
Elektronen zu erkennen. Die inelastischen Ereignisse auf der linken Seite dominieren das Spektrum. Es sind ebenfalls die charakteristischen Energien der  $\Delta$ -Resonanz und der  $\pi^0$ -Schwelle markiert. Um die Rohsymmetrie  $A_{Roh}$  aus den gewonnenen Daten extrahieren zu können, müssen die inelastischen von den elastischen Ereignissen getrennt werden. Die Untergrundprozesse haben eine andere Asymmetrie als die elastischen und würden die Rohasymmetrie verfälschen. Um die Anzahl der elastisch gestreuten Elektronen zu bestimmen, müssen Schnitte definiert werden [6]. Die Schnitte sind ebenfalls in der Abbildung eingezeichnet.

### 3.2.5 Die Luminositätsmonitore

Die acht Luminositätsmonitore sind symmetrisch um den Elektronenstrahl unter kleinen Vorwärtsstreuwinkeln angebracht (Abb. 3.6). Sie decken einen Streuwinkelbereich von  $4,4^\circ$  bis  $10^\circ$  ab. Die Ereignisrate unter diesen kleinen Winkeln ist sehr hoch, daher muß strahlenfestes Material verwendet und integral gemessen werden. Zum Einsatz kommen Wasser-Tscherenkow-Detektoren. Wasser ist sehr strahlenfest, leicht zu handhaben und kostengünstig. Tscherenkow-Detektoren besitzen zudem eine sehr schnelle Signalantwortzeit von wenigen Nanosekunden, die nur von der Detektorgeometrie zur Lichtsammlung bestimmt wird.

Die Luminositätsmessung ist zusätzlich zur Messung des Strahlstroms notwendig. Auf diese Weise können Targetdichtefluktuationen von Strahlstromschwankungen getrennt und überwacht werden. Mit dem Strahlstrom unkorrelierte Luminositätsschwankungen werden von Targetdichtefluktuationen verursacht. Targetdichtefluktuationen führen zu einer Verkürzung der effektiven Targetlänge und somit auch zu einer Verringerung der Luminosität.

Da die Luminositätsmonitore die Targetdichtefluktuationen überwachen, ist eine Luminositätsmessung bei Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln ebenfalls wichtig, zumal da ein längeres Target verwendet wird, in dem vom Elektronenstrahl auch mehr Energie deponiert wird. Die Luminositätsmonitore müssen hier denselben Raumwinkelbereich abdecken wie bei Messungen unter Vorwärtsstreuwinkeln. Wird nun für Messungen unter Rückwärtsstreuwinkeln das Kalorimeter zusammen mit der Streukammer, an deren Endflansch die Luminositätsmonitore befestigt sind, gedreht, so decken sie den falschen Streuwinkelbereich ab. Je nachdem an welcher Seite der Flansch mit den Luminositätsmonitoren an die Streukammer angebracht werden würde, würden sie entweder rückgestreute Elektronen sehen, da sie zwar im richtigen Abstand zum Target montiert wären, aber auf der falschen Seite, oder sie würden einen zu großen Raumwinkel abdecken, da sie zwar auf der richtigen Seite montiert wären, aber aufgrund der Geometrie der Streukammer zu dicht am Target ste-



**Abbildung 3.9:** Aufbau eines Luminositätsmonitors.

Da die acht Luminositätsmonitore in einem Ring symmetrisch um den Elektronenstrahl angebracht sind, haben sie die Form eines Pyramidenstumpfes mit trapezoidaler Grundfläche. Das von den Elektronen im Wasser erzeugte Tscherenkow-Licht wird am Ende des Edelstahlbehälters von einem Photomultiplier ausgelesen. Wegen der hohen Strahlenbelastung des Detektors ist der Photomultiplier mit einem Quarzglas-Fenster ausgestattet und durch ein weiteres Quarzglas-Fenster vom Wasservolumen getrennt. Um Rückstreuungen auf das Kalorimeter zu verhindern, ist der Detektor so materialarm wie möglich gebaut. Die Stärke des verwendeten Edelstahls beträgt nur 1 mm.

hen würden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine Streukammerv Verlängerung entwickelt, die garantiert, daß der Raumwinkel der Luminositätsmonitore der gleiche bei Vorwärts- wie bei Rückwärtsstreu winkeln ist.

### 3.2.6 Die Polarimeter

Der Polarisationsgrad des Elektronenstrahls ist für das A4-Experiment eine wichtige Größe. Die gemessene Asymmetrie  $A_{Mess}$  ist direkt proportional zum Polarisationsgrad  $P$  des Elektronenstrahls.

$$A_{Mess} = P \cdot A_{PV} \quad (3.2)$$

Der Fehler in der Bestimmung des Polarisationsgrades geht direkt in die Genauigkeit der Asymmetriemessung ein. Daher wird in der Bestimmung des Polarisationsgrades eine Genauigkeit von 1% über die gesamte Meßdauer eines Experimentes angestrebt. Während einer Strahlzeit wird derzeit wöchentlich die Polarisation des Elektronenstrahls absolut von einem Møller-Polarimeter der A1-Kollaboration bestimmt. Sie beträgt im Mittel 80%. Da sich der Polarisationsgrad aber zeitlich ändert, soll auch der Verlauf dauerhaft von zwei A4-Polarimetern bestimmt werden. Daher wurde Ende 2002 ein relativ messendes Transmissions-Compton-Polarimeter in Betrieb genommen. Außerdem wurde 2002 mit dem Aufbau eines absolut messenden Laser-Compton-Rückstreu-Polarimeters begonnen, welches sich derzeit in der Erprobungsphase befindet.

Das A1-Møller-Polarimeter nutzt zur Bestimmung des Polarisationsgrades des Elektronenstrahls die Helizitätsabhängigkeit der Møllerstreuung aus, um die longitudinale Spinpolarisation aus parallel und antiparallel orientierten Strahl- und Targetpolarisationsrichtungen zu bestimmen. Das Polarimeter verwendet eine ca. 10  $\mu\text{m}$  dicke magnetisierte Reineisenfolie als Target mit einer Elektronenpolarisation von ca. 8%. Es kann eine Genauigkeit von 2,1% erreichen [4].

Das Transmissions-Compton-Polarimeter nutzt die Polarisationsabhängigkeit der Comptonstreuung aus, um den Polarisationsgrad des Elektronenstrahls zu bestimmen. Der Elektronenstrahl erzeugt im Target und in Kohlenstoffstreuern polarisierte Bremsstrahlung, die auf einen Permanentmagneten trifft und an den polarisierten Elektronen dieses Magneten gestreut wird. Dies führt in Abhängigkeit von der Helizität des Elektronenstrahls zu einer Veränderung in der Durchlässigkeit des Magneten bzw. im Teilchenfluß hinter dem Magneten. Die hieraus resultierende Asymmetrie im Teilchenfluß ist proportional zum Polarisationsgrad der Elektronen. Das Polarimeter vermißt die longitudinale Einstellung des Elektronenspins am Ort des Targets [26]. Es ist in Experimen-

tierhalle 4 zwischen Kalorimeter und Strahlfänger aufgebaut.

Das Laser-Compton-Rückstreu-Polarimeter nutzt ebenfalls die Polarisationsabhängigkeit der Comptonstreuung aus. Es bestimmt bei laufender Asymmetriemessung zerstörungsfrei und kontinuierlich die absolute Polarisation des Elektronenstrahls. Der Elektronenstrahl wird hierbei frontal mit einem Laserstrahl der Wellenlänge 514,5 nm überlagert. Die Photonen werden wegen der hohen Energie der Elektronen zum größten Teil in einen engen Kegel um den Elektronenstrahl zurückgestreut. Wegen der Polarisationsabhängigkeit des Comptonwirkungsquerschnitts mißt man beim Wechsel der Polarisation des Laserlichtes eine Asymmetrie in der Anzahl der rückgestreuten Photonen, aus der der Polarisationsgrad des Elektronenstrahls bestimmt werden kann. Mit Hilfe einer magnetischen Schikane aus vier Dipolmagneten werden die Photonen, die nahezu parallel zum Elektronenstrahl laufen, von den Elektronen getrennt, um sie in einem NaI-Kalorimeter nachweisen zu können. Die Diplomarbeiten [18][15] befassen sich mit Voruntersuchungen zur Realisierung des Polarimeters und die Arbeiten [7][14] mit dem endgültigen Aufbau in Experimentierhalle 3.



# Kapitel 4

## Das neue A4 Experiment

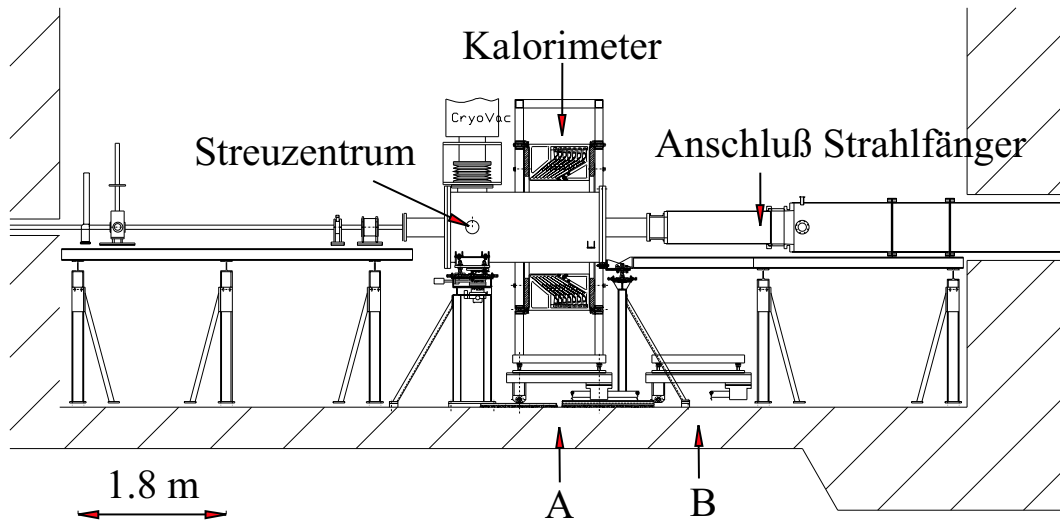
Um den seltsamen elektrischen und magnetischen Formfaktor des Nukleons separat bestimmen zu können (siehe Kapitel 2), sind nicht nur Messungen der paritätsverletzenden Elektron-Proton-Streuung unter Vorwärtswinkeln, wie in Kapitel 3 beschrieben, nötig, sondern auch Messungen unter Rückwärtswinkeln. Ein Meßaufbau unter Rückwärtswinkeln eröffnet außerdem weitere Möglichkeiten zur Messung von Single-Spin-Asymmetrien [6].

Aus verschiedenen Gründen ist der jetzige experimentelle Aufbau hierfür noch nicht geeignet. So ist zum einen der mechanische Aufbau für eine Messung unter Rückwärtswinkeln nicht gegeben, zum anderen ist die veränderte Streugeometrie für eine solche Messung beim Aufbau des Kalorimeters nicht berücksichtigt worden. Das folgende Kapitel befasst sich mit den neuen Anforderungen an die Rückwärtsstreuexperimente. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für einen Aufbau unter Rückwärtsstreuwinkeln entwickelt, konstruiert und realisiert, der es ermöglicht schnell zwischen Vorwärts- und Rückwärtsstreuwinkeln zu wechseln.

### 4.1 Die Anforderungen an das A4-Kalorimeter und die Streugeometrie

Wie man in Abb. 4.1 erkennt, steht das A4-PbF<sub>2</sub>-Kalorimeter im bestehenden Aufbau ca. 1 m strahlabwärts hinter dem Streuzentrum, wobei die Detektorkristalle auf einen Punkt im Bereich des 10 cm langen Targets zeigen. Sie können so einen Streuwinkelbereich von 30° bis 40° abdecken.

Um Messungen unter Rückwärtswinkeln durchführen zu können, müssen die Kristalle von strahlaufwärts aus auf das Target zeigen. Sie können so einen



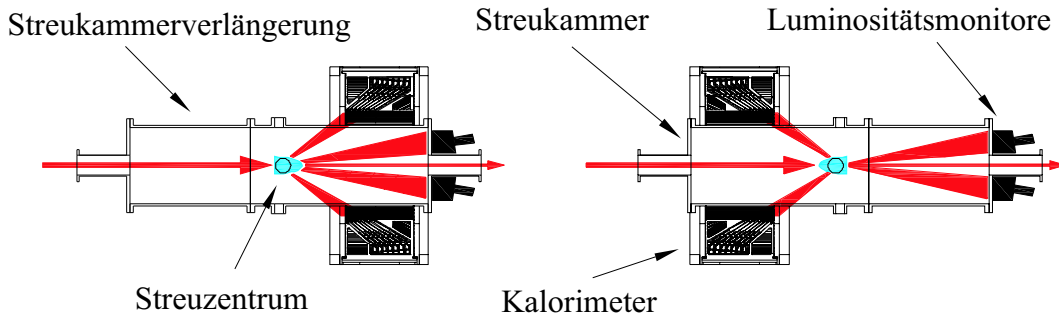
**Abbildung 4.1:** Bestehender Aufbau in der Experimentierhalle 4.

Der Elektronenstrahl kommt von links. Das Kalorimeter kann nur von Position A nach Position B verschoben, aber nicht gedreht werden. Die Streukammer ist fest mit dem Boden verbunden und kann nicht bewegt werden.

Streuwinkelbereich von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  abdecken. Andere Winkelbereiche sind nur unter Verschlechterung der Kalorimetereigenschaften möglich, da die Kristalle fest im Kalorimetergestell montiert sind. Verschiebt man den Detektor ein Stück nach vorn oder hinten, führt dies dazu, daß die Kristalle nicht mehr direkt auf das Streuzentrum zeigen. Dadurch verschlechtert sich die Energie- wie auch die Ortsauflösung des Kalorimeters, da die in den Kristallen entstehenden elektromagnetischen Schauer dann nicht mehr nur auf Matrizen aus  $3 \times 3$  Kristallen beschränkt sind, die von der Elektronik zur Energie- und Ortsbestimmung ausgelesen werden.

Für Messungen unter Rückwärtswinkeln muß das Kalorimeter also vor das Streuzentrum gestellt und um  $180^\circ$  um die Vertikale gedreht werden. In Abb. 4.1 erkennt man, daß das Kalorimeter nur von Punkt A nach Punkt B verfahren werden kann, um die Streukammer montieren und demontieren zu können. Eine Rotation des Detektors ist nicht möglich. Daher wird eine neue Lagerung für das Kalorimeter benötigt.

Abb. 4.2 zeigt eine Skizze der Streugeometrie des neuen Experimentieraufbaus für Vorwärts- (links) und Rückwärtsstreuwinkel (rechts). Der Elektronenstrahl trifft von links auf das Target. Unter Vorwärtswinkeln deckt das Kalorimeter den Streuwinkelbereich von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$ , die Luminositätsmonitore den Bereich von  $4,4^\circ$  bis  $10^\circ$  ab. Unter Rückwärtswinkeln muß das Kalorimeter den Streuwinkelbereich von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  abdecken. Die Luminositätsmonitore



**Abbildung 4.2:** Streugeometrie mit dem neuen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und realisierten Experimentieraufbau.

Der Elektronenstrahl kommt von links. Das linke Bild zeigt den Aufbau für Messungen unter Vorwärtswinkeln, das rechte den für Messungen unter Rückwärtswinkeln. Da nicht nur die Kristalle des Kalorimeters im richtigen Winkel auf das Target zeigen müssen, sondern auch die Luminositätsmonitore, ist eine Verlängerung der Streukammer nötig.

hingegen müssen denselben Bereich von  $4,4^\circ$  bis  $10^\circ$  wie unter Vorwärtswinkeln abdecken. Der Umbau beschränkt sich somit nicht auf das Kalorimeter.

Eine Möglichkeit wäre, die Luminositätsmonitore zu verkleinern und näher an das Streuzentrum zu bringen. Dazu müßten aber neue Detektoren entwickelt werden, die dann den Umbau zwischen Vorwärts- und Rückwärtswinkelmessungen erschweren würden.

Eine bessere, sowie einfachere und kostengünstigere Lösung ist die Verlängerung der vorhandenen Streukammer (Abb. 4.2), da sie garantiert, daß der Raumwinkel der Luminositätsmonitore der gleiche bei Vorwärts- wie bei Rückwärtsstreuwinkeln ist. Die Verlängerung sollte dabei einen größeren Durchmesser haben als die Ausdehnung der Luminositätsmonitore, um vergleichbare Messungen wie unter Vorwärtswinkeln zu erreichen, und um den entstehenden Strahlungsuntergrund zu minimieren. Um den Untergrund gerade bei Messungen unter Rückwärtswinkeln weiter zu verringern, muß auch die Wandstärke der Verlängerungskammer minimiert werden.

Der so modifizierte Aufbau kann benutzt werden, um Messungen unter Vorwärts- wie Rückwärtswinkeln mit geringem Umbauaufwand durchzuführen. Die beiden Endflansche der Streukammern werden entfernt, das Kalorimeter mitsamt den Vakuumkammern um  $180^\circ$  um das Target gedreht und die beiden Flansche wieder montiert. Der rechte Flansch mit den Luminositätsmonitoren muß wieder auf der rechten Seite der Vakuumkammern montiert werden.

Es ist daher sinnvoll, das Kalorimeter zusammen mit den Streukammern auf

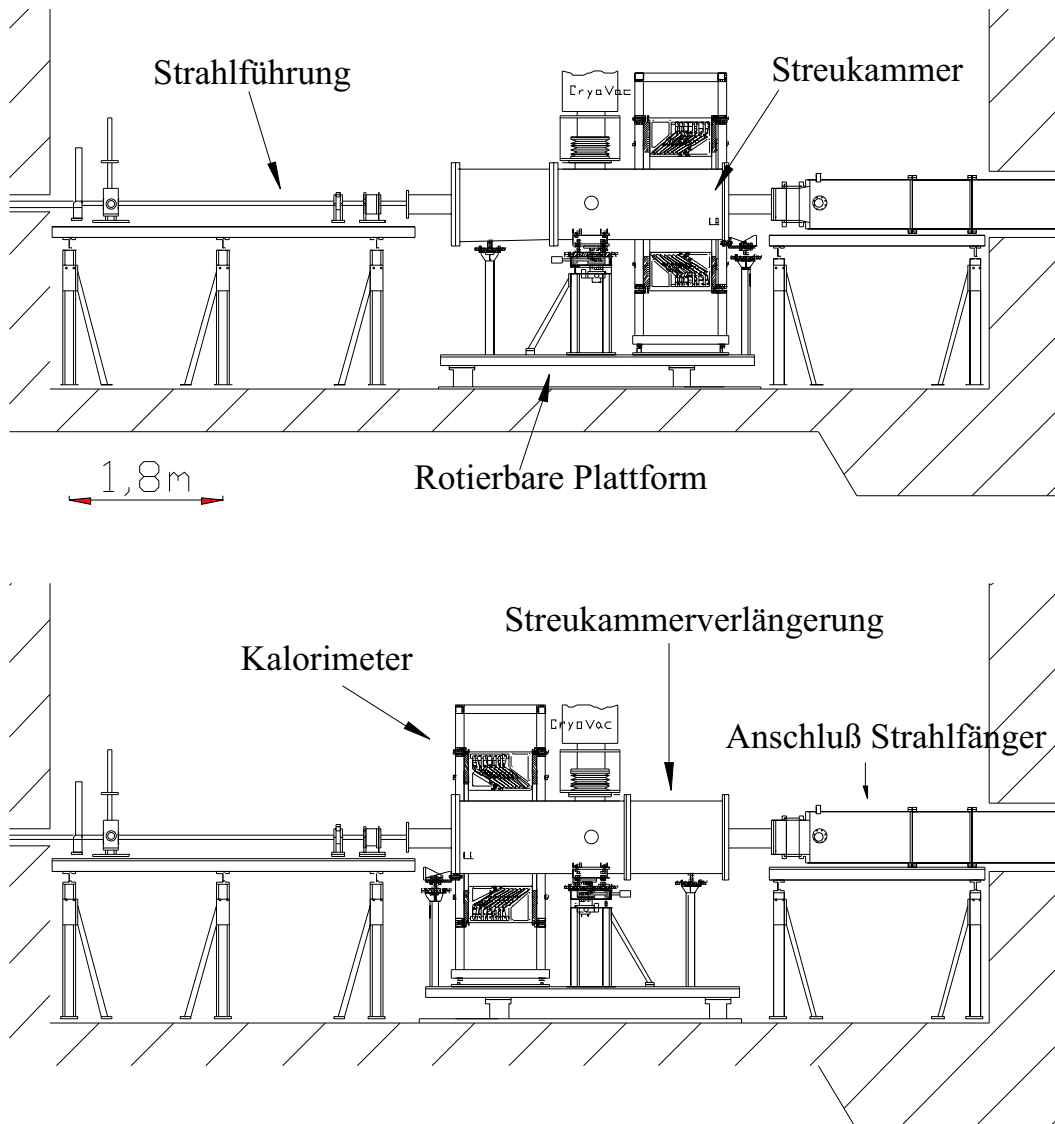
eine um das Streuzentrum drehbare Plattform zu positionieren. Ein Umbau zwischen Vorwärts- und Rückwärtswinkelmessung ist dann schnell und einfach möglich.

## 4.2 Rotierbare Plattform

Abb. 4.3 zeigt den im Rahmen dieser Arbeit realisierten Gesamtaufbau in Experimentierhalle 4. Der Elektronenstrahl kommt von links. Das obere Bild zeigt die Position zur Messung unter Vorwärtswinkeln, das untere die zur Messung unter Rückwärtswinkeln. Das Kalorimeter steht zusammen mit den Streukammern und dem Kryosystem auf einer um das Target rotierbaren Plattform. Ein Umbau ist dann wie in Kapitel 4.1 beschrieben möglich.

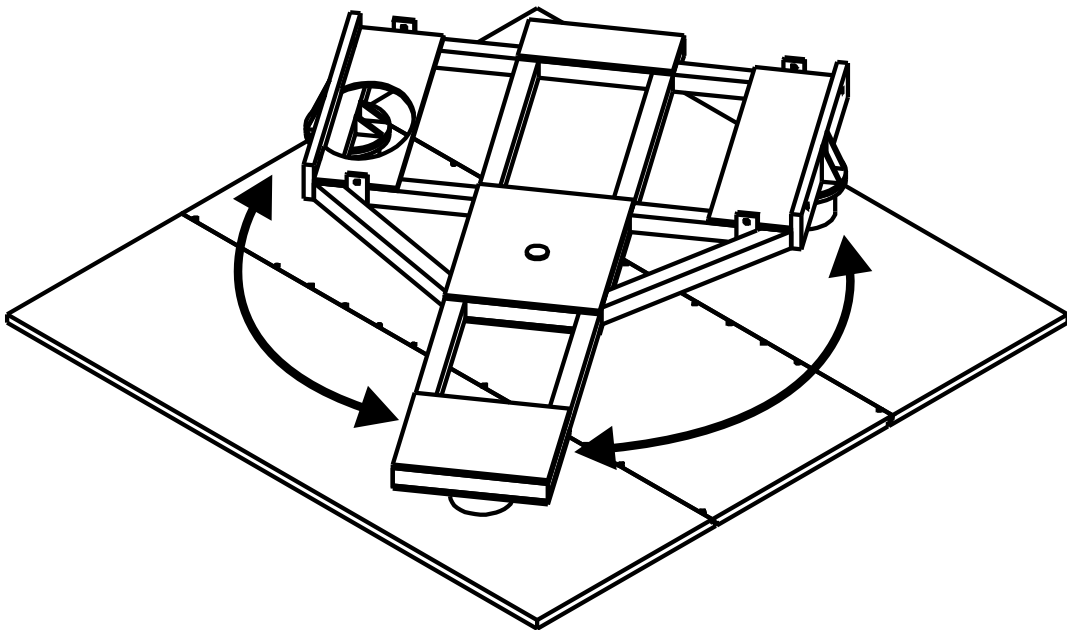
Da das Kalorimeter aus 1022 ca. 1 kg schweren, sehr empfindlichen Kristallen besteht, die an ihrer Halterung jeweils auf einer Fläche von nur ca.  $0,5 \text{ cm}^2$  angeklebt sind, bestehen besondere Anforderungen an die Lagerung und Führung der Plattform während des Rotierens des Kalorimeters von Vorwärts- zu Rückwärtsstreuwinkeln und umgekehrt. Die Plattform darf bei der Drehung keinesfalls in Schwingung geraten, noch darf sie Vibrationen oder Stöße erzeugen, die auf die Kristalle übertragen werden können, da sonst die Kristalle von ihren Halterungen abbrechen könnten. Außerdem sollte ein Einstützen des Aufbaus nach dem Umdrehen einfach möglich sein.

Zur Auswahl für die Lagerung der Plattform wurden verschiedene Systeme untersucht, unter anderem ein Ringschienensystem, einfache Rollen, Kugelrollen, Luftkissen und Öl-Gleitfüße. Wird die Plattform auf einfachen Rollen oder Kugelrollen gelagert, ist ein einfaches Einstützen nach dem Umdrehen möglich, da der Aufbau frei auf dem Boden verschoben werden kann. Es können jedoch Vibrationen und Stöße bei der Drehung entstehen, wenn die Rollen über Bodenunebenheiten oder Verschmutzungen rollen. Bei einem Schienensystem kann man diese Unebenheiten oder Verschmutzungen zwar leichter vermeiden, jedoch sind reibungsarme Linearkugellagersysteme wie sie derzeit verwendet werden für runde Schienen nicht erhältlich. Ein einfaches Einstützen des Aufbaus ist aufgrund der fest verlegten Schiene auch nicht möglich. Man müsste sie daher äußerst genau verlegen, da ein nachträgliches Umpositionieren nicht möglich wäre. Eine Lagerung auf Luftkissen kommt nicht in Frage, da diese durch die ständig austretende Luft in Schwingung geraten und diese an die Plattform übertragen. Durch die Hubhöhe von ca. 1 cm kann bei einem plötzlichen Druckabfall im Kompressor außerdem großer Schaden am Kalorimeter angerichtet werden. Eine elegante Lösung sind Öl-Gleitfüße. Das Prinzip entspricht etwa dem des Luftkissens, nur wird hier Öl anstelle von Luft zum Heben verwendet. So kann der Aufbau quasi auf einem Ölfilm schwimmen. Abb. 4.5



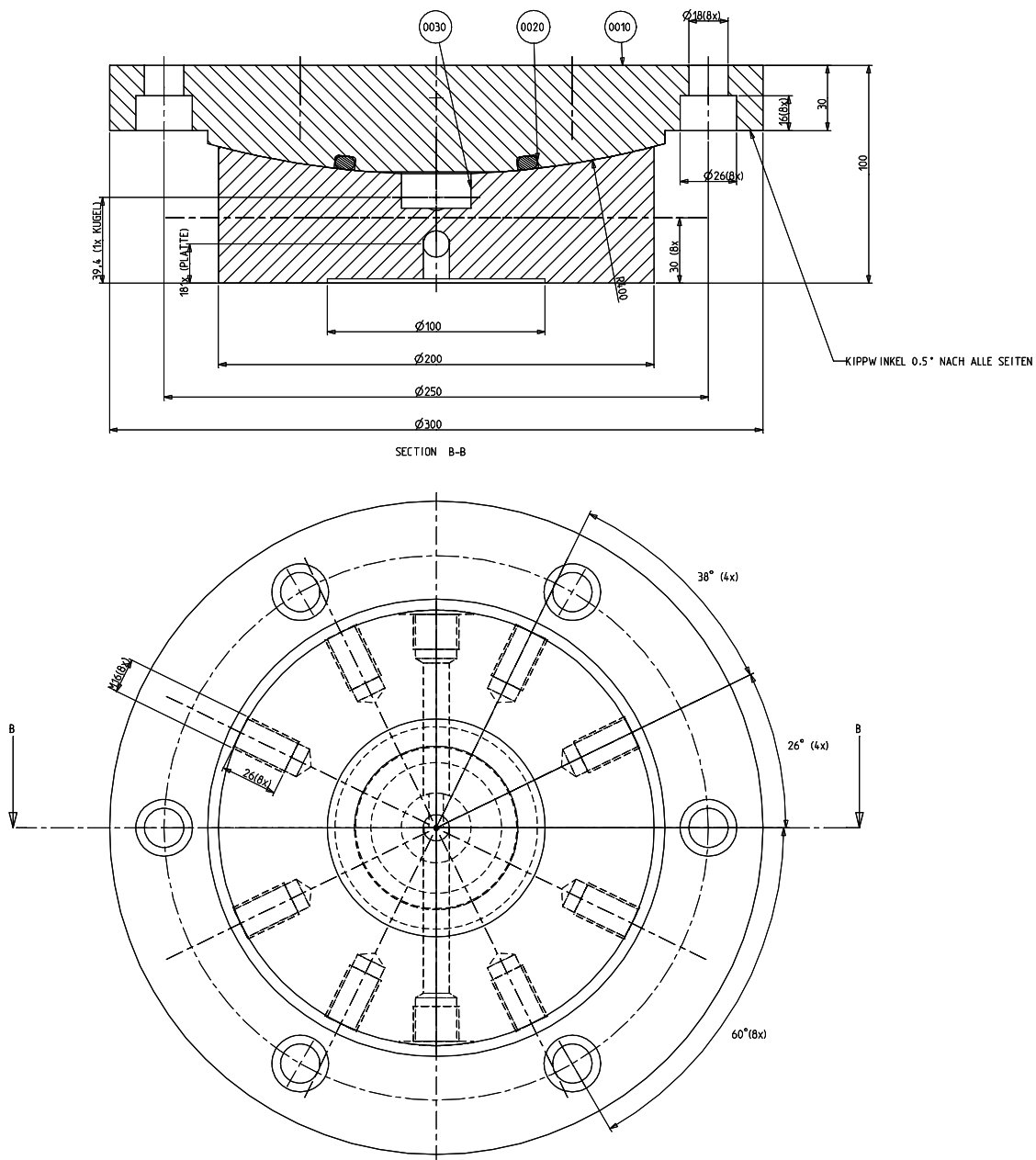
**Abbildung 4.3:** Experimentierhalle 4 mit dem neuen im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Experimentieraufbau.

Der Elektronenstrahl kommt von links. Das Kalorimeter ist zusammen mit den Vakuumkammern auf einer um das Streuzentrum rotierbaren Plattform montiert. Das obere Bild zeigt die Positionierung für Messungen unter Vorwärtswinkeln, das untere unter Rückwärtswinkeln. Die auf dem Bild nicht dargestellten Luminositätsmonitore sind an dem Flansch zwischen Streukammer und dem Anschluß zum Strahlfänger befestigt. Zum Umbau zwischen Messungen unter Vorwärts- und Rückwärtswinkeln müssen die beiden Flansche an den Vakuumkammern entfernt werden. Dann kann die Plattform mitsamt den Aufbauten um  $180^\circ$  gedreht werden. Der Flansch mit den Luminositätsmonitoren muß immer zwischen den Vakuumkammern und dem Anschluß zum Strahlfänger befestigt werden.



**Abbildung 4.4:** Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, konstruierte und realisierte Supportsystem, bestehend aus der rotierbaren Plattform, den Öl-Gleitfüßen und der Bodenplatte.  
Die Plattform ist auf drei Öl-Gleitfüßen über einer geschichteten Stahlplatte montiert. Eine vibrations- und stoßfreie Drehung und Positionierung ist so gewährleistet.

zeigt die Konstruktionszeichnung eines Gleitfußes. Der Fuß besteht aus zwei Teilen. Der obere wird fest an dem zu verfahrenen Teil befestigt, der untere gleitet auf der Bodenplatte. Die zwei Teile sind nicht miteinander verbunden, sondern gleiten in zwei sphärischen Flächen aufeinander. So können Verkippungen bis  $0,5^\circ$  einzelner Füße untereinander und gegenüber der Bodenplatte, bzw. Verkippungen durch leichte Bodenwellen beim Verfahren ausgeglichen werden. Pumpt man Öl in den Zylinder des unteren Teils (Durchmesser 100 mm), wird der Fuß bei genügend hohem Druck leicht angehoben (ca. 0,1 mm) und kann auf dem zwischen den Dichtflächen (Durchmesser 200 mm) und dem Boden entstehenden Ölfilm gleiten. Vibrationen können so vermieden werden, da das Öl im Gegensatz zu Luft wegen seiner Viskosität weniger stark an den Rändern des Fußes ausströmt. Es werden auch keine Dichtlippen wie beim Luftkissen verwendet, die durch die schnell austretende Luft in Schwingungen versetzt werden, sondern breite Dichtflächen die das schnelle Ausströmen des Öls verhindern. Durch die geringe Hubhöhe von ca. 0,1 mm besteht auch keine Gefahr für die Kristalle bei einem plötzlichen Druckabfall. Ein einfaches Einjustieren nach dem Drehen ist auch möglich, da der Aufbau von Hand frei auf dem Boden verschoben werden kann. Es bestehen aber besondere Ansprüche an die Oberflächenbeschaffenheit des Bodens. Daher muß zusätzlich eine stählerne



**Abbildung 4.5:** Konstruktionszeichnung eines Gleitfußes der Firma Rexroth Hydrauldyne.

Der untere Teil des Fußes mit Durchmesser 100 mm wird über einen Kompressor mit Öl versorgt. Der entstehende Druck hebt den Fuß ca. 0,1 mm vom Boden und er kann so auf dem zwischen den Dichtflächen (Durchmesser 200 mm) und dem Boden entstehenden Ölfilm gleiten. Der mittlere sphärische Teil mit Radius 400 mm wird ebenfalls mit Öl befüllt, so daß der obere auf dem unteren Teil gleiten kann. Dadurch kann eine Verkipfung von  $0,5^\circ$  des oberen Teils gegen den Boden in allen Richtungen erreicht werden, um Verkipfungen mehrerer Füße untereinander und gegenüber dem Boden oder leichte Bodenwellen ausgleichen zu können.

geschlichtete<sup>1</sup> Bodenplatte in der Experimentierhalle 4 verlegt werden.

Abb. 4.4 zeigt die Plattform mit Bodenplatte und Gleitfüßen. Ein hier verwendeter Gleitfuß kann maximal 5 Tonnen Last aufnehmen, was ausreichend ist, da der Gesamtaufbau ca. 6 Tonnen wiegt.

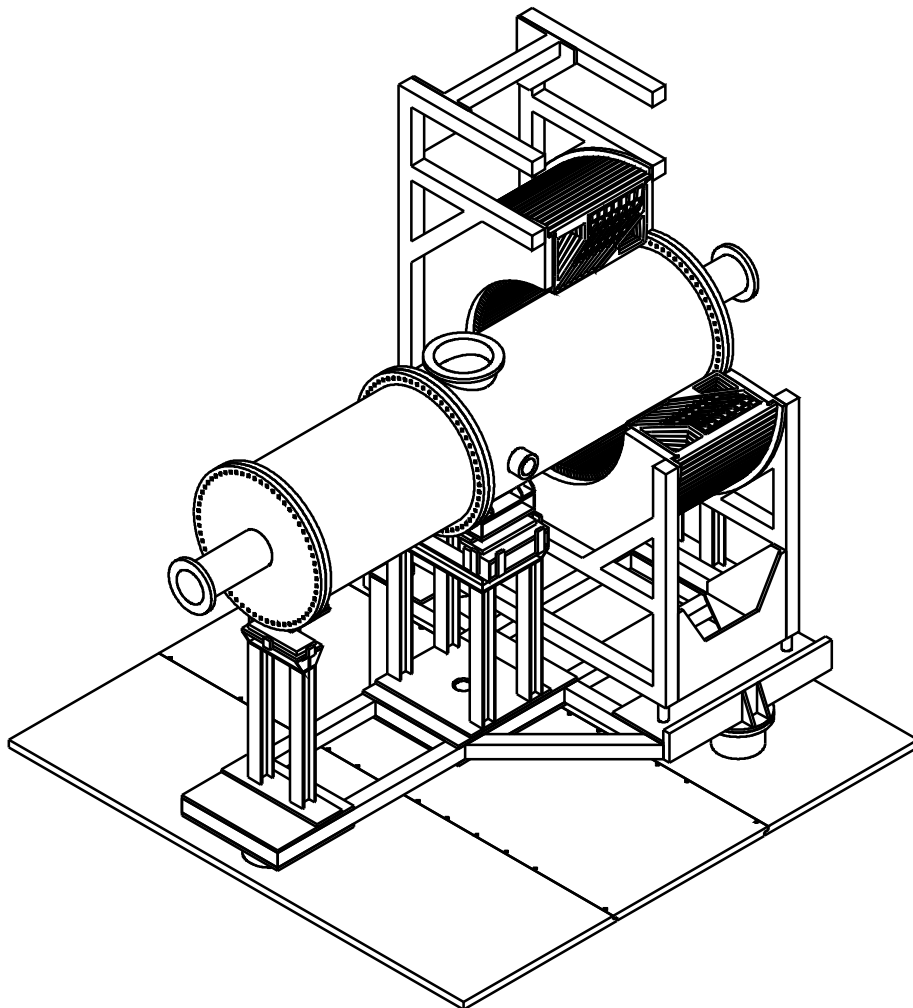
### 4.3 Der Umbau in Experimentierhalle 4

In Abb. 4.6 ist eine Übersicht des resultierenden Gesamtaufbaus zu sehen. Der Kryostat (Siehe Abb. 4.3) ist der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Der Umbau in Experimentierhalle 4 hat Anfang August mit dem Entkabeln des Kalorimeters begonnen und wird voraussichtlich bis Ende Februar 2005 beendet. In der ersten Woche wurden die Kabel zwischen dem Kalorimeter und der Ausleseelektronik bzw. der Hochspannungsversorgung der Photomultiplier ausgebaut. Die 2044 Kabel mußten komplett demontiert werden, da der Detektor etwas weiter rechts in der Halle (Siehe Abb. 4.1 und Abb. 4.3) wieder aufgebaut wird und daher eine neue Kabelführung benötigt wird. Um den Detektor drehen zu können, müssen die Kabel detektorseitig immer wieder entfernt werden. Eine elegante Lösung, die es erlaubt, den Aufbau verkabelt zu drehen, ist aufgrund der zu geringen Länge der Kabel nicht möglich. Eine Verlängerung der Kabel ist wegen der Verschlechterung der Signalqualität nicht in Betracht gezogen worden. In der zweiten Woche wurden die Streukammer und ihre Halterungen entfernt, sowie der Anschluß zum Strahlfänger, da dieser durch einen kürzeren ersetzt wird.

Der nächste Schritt ist, das Kalorimeter und seine derzeitige Plattform zu entfernen, um die neue Bodenplatte verlegen zu können. Hierzu wurden verschiedene Konzepte entwickelt, da die empfindlichen Kristalle des Kalorimeters beim Transport keinen Schaden nehmen dürfen. Die verschiedenen Möglichkeiten waren ein Hubportal, eine Luftkissenbahn und ein Umbau des existierenden Hallenkrans in Verbindung mit einer Traverse. Ein Hubportal oder eine Luftkissenbahn von Fremdfirmen hätte den Ansprüchen genügt, wobei das Hubgerüst (siehe Abb. 4.8) im Gegensatz zu Luftkissen (Siehe Kapitel 4.2) favorisiert wurde. In Anbetracht langfristiger Vorteile wurde sich jedoch für den Umbau des existierenden Hallenkrans und die Fertigung einer Traverse entschieden. Der Umbau des Krans besteht darin, einen Frequenzwandler in die Steuerung zu integrieren um die Geschwindigkeiten des Hebens, Senkens und Verfahrens zu verringern. Mit Hilfe einer Traverse kann der Detektor dann gefahrlos bewegt werden. Abb. 4.7 zeigt die Traverse und den Kalorimeterrahmen. Die Traverse wird mit vier Seilen direkt über den Aufhängungen am Kalorimeterrahmen be-

<sup>1</sup>geschlichtet = Rauhtiefe  $R_z$  zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 40  $\mu\text{m}$

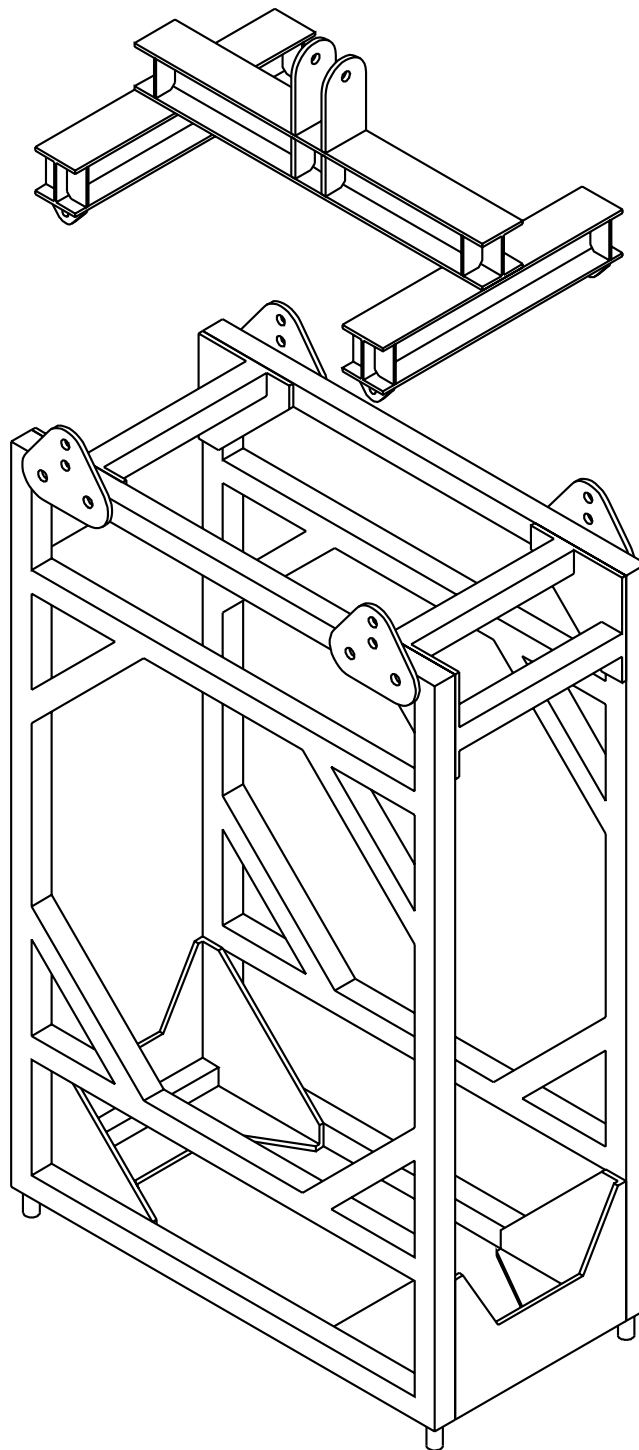


**Abbildung 4.6:** Der veränderte Gesamtaufbau der im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und realisiert wurde.

Ein einfacher und schneller Umbau für Messungen unter Vorwärts- und Rückwärtswinkeln ist gewährleistet. Der Kryostat ist der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

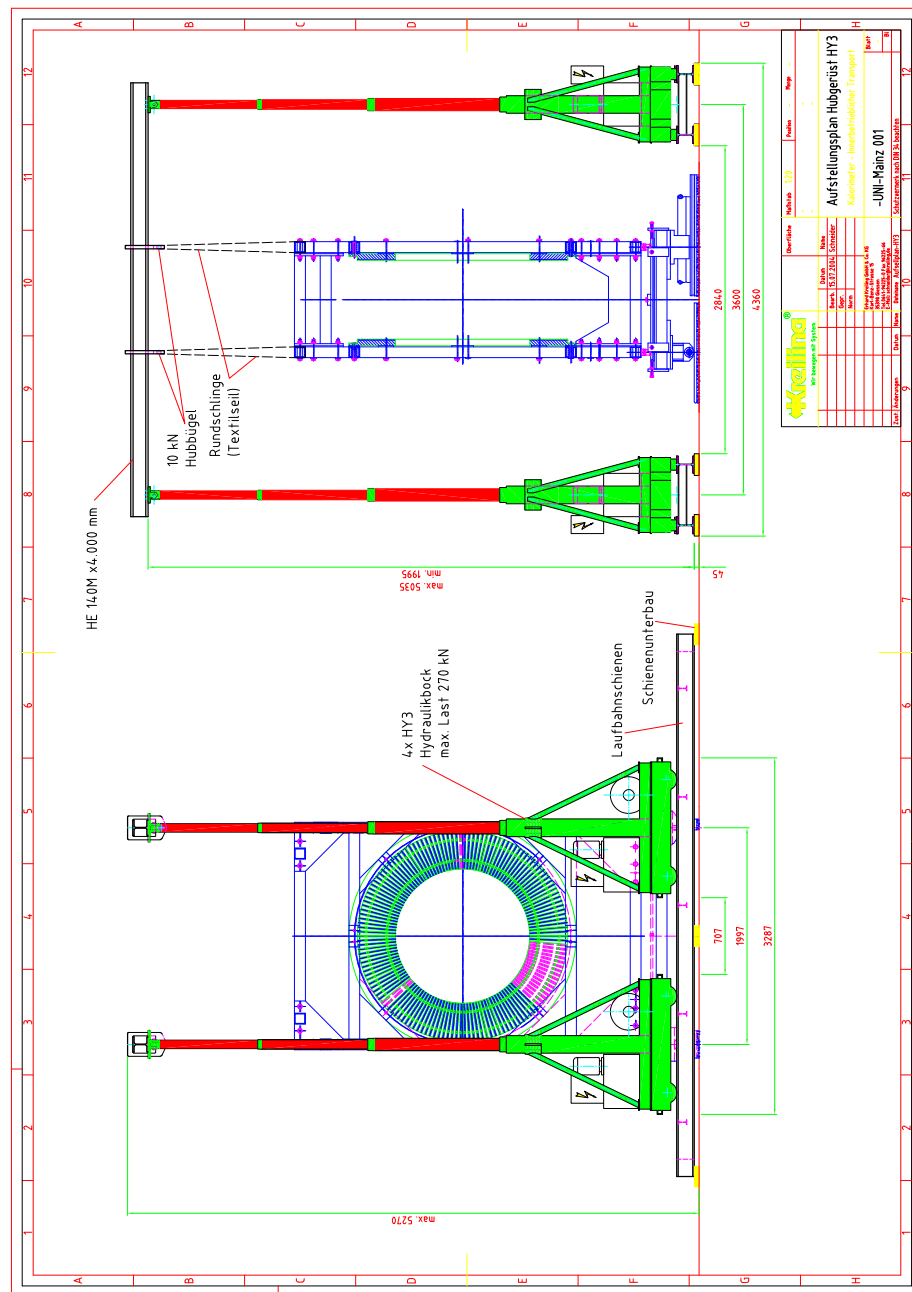
festigt. Würde auf die Traverse verzichtet, könnte der Rahmen durch die schräg einwirkenden Kräfte verzogen werden. Liegt der Schwerpunkt des Kalorimeters nicht ganz zentrisch, was dazu führt, daß der Detektor leicht schräg angehoben wird, kann dies mit unterschiedlich langen Seilen ausgeglichen werden. Der Umbau des Krans und die Fertigung der Traverse sind bereits abgeschlossen. Alle anderen von Fremdfirmen bestellten Teile sind ebenfalls geliefert.

Die Bodenplatte, auf die die rotierbare Plattform gestellt wird, wird Anfang



**Abbildung 4.7:** Traverse mit Kalorimeterrahmen.

Die Traverse wird mit vier Seilen an Aufhängungen am Detektorrahmen befestigt, um einen Verziehen des Rahmens beim Heben zu vermeiden.



**Abbildung 4.8:** Aufstellungsplan des Hubportals der Firma Reiling.

Januar verlegt werden. Hierauf werden dann das Kalorimeter und die Vakuumkammern montiert und die Strahlführung wird wieder geschlossen. Anfang März 2005 sollte dann die erneute Verkabelung abgeschlossen und das Experiment wieder funktionsbereit sein.

## Kapitel 5

# Zusammenfassung und Ausblick

Die A4-Kollaboration am Mainzer Mikrotron (MAMI) untersucht den Beitrag der Seltsamkeit zu den Vektorformfaktoren des Protons. Dazu wurde die paritätsverletzende Asymmetrie  $A_{PV}$  in der Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen an unpolarisierten Protonen unter einem Streuwinkel  $\theta$  von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$  und bei den Impulsüberträgen  $Q^2$  von  $0,231 \text{ GeV}^2/c^2$  und  $0,108 \text{ GeV}^2/c^2$  gemessen. Auf diese Weise kann eine Linearkombination des seltsamen elektrischen Vektorformfaktors  $G_E^s$  und des seltsamen magnetischen Vektorformfaktors  $G_M^s$  zu einem festen  $Q^2$  bestimmt werden. Um die Formfaktoren separieren zu können, müssen Messungen bei gleichem  $Q^2$  aber einer anderen Kinematik durchgeführt werden. Zusätzlich eröffnet ein Meßaufbau unter Rückwärtswinkeln weitere Möglichkeiten zur Messung von Single-Spin-Asymmetrien.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuer Experimentieraufbau für das A4-Experiment entwickelt, konstruiert und realisiert, mit dem es möglich ist, die paritätsverletzende Asymmetrie in der Streuung von longitudinal polarisierten Elektronen an unpolarisierten Protonen sowohl weiterhin unter Vorwärtsstreuwinkeln von  $30^\circ$  bis  $40^\circ$ , als auch erstmals unter Rückwärtsstreuwinkeln von  $140^\circ$  bis  $150^\circ$  messen zu können.

Zu diesem Zweck wurde ein neuer Support für das A4-PbF<sub>2</sub>-Kalorimeter entwickelt. Das Kalorimeter wird hierbei zusammen mit der Streukammer, an die die Luminositätsmonitore und das Target mit Kryosystem montiert sind, auf eine vertikal um das Streuzentrum rotierbare Plattform gestellt. Um zu gewährleisten, daß die Luminositätsmonitore auch unter Rückwärtsstreuwinkel-Messungen den richtigen Raumwinkelbereich von  $4,4^\circ$  bis  $10^\circ$  abdecken, ist zusätzlich eine Streukammerv Verlängerung konstruiert und realisiert worden. Diese wird ebenfalls auf der neuen Plattform an die bestehende Streukammer montiert. Dieser neue Experimentieraufbau ermöglicht es, schnell zwischen

Vorwärts- und Rückwärtsstreuwinkeln zu wechseln.

Der Umbau hat Anfang August in Experimentierhalle 4 des Institutes für Kernphysik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz mit der vollständigen Entkabelung des A4-Kalorimeters begonnen. Anschließend wurden das Kryotarget-System, die Luminositätsmonitore und die Streukammer sowie ein Teil der Strahlführung ausgebaut. Um das Kalorimeter von seinem derzeitigen Standort zu entfernen, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Konzepte entwickelt, von denen sich der Umbau des bestehenden Hallenkrans in Kombination mit einer Traverse, die ein Verziehen des Kalorimeterrahmens während des Hebens verhindert, als das beste erwies. Der Umbau des Krans und die Fertigung der Traverse sind bereits abgeschlossen. Ebenso sind alle von Fremdfirmen benötigten Teile geliefert.

Anfang Januar wird mit dem weiteren Umbau fortgefahren. Dazu wird das Kalorimeter mit seinem derzeitigen Support entfernt, um die neue Bodenplatte verlegen zu können. Anschließend wird die drehbare Plattform montiert und auf ihr schließlich das Kalorimeter zusammen mit der Streukammer mit Verlängerung und dem Kryotarget-System aufgebaut. Als letztes muß der Aufbau wieder verkabelt und getestet werden. Mit einer Rückkehr zum Meßbetrieb ist Anfang bis Mitte März zu rechnen.

Im Rahmen des neuen Teilprojektes H7 des SFB 433 "Vielkörperstruktur stark wechselwirkender Systeme" sind Messungen unter Rückwärtswinkeln mit transversal polarisiertem Elektronenstrahl geplant. Zunächst werden jedoch Messungen unter Rückwärtswinkeln mit longitudinal polarisierten Elektronen an Wasserstoff sowie Deuterium bei Impulsüberträgen  $Q^2$  von  $0,23 \text{ GeV}^2/c^2$  und  $0,45 \text{ GeV}^2/c^2$  durchgeführt.

# Anhang A

## A.1 Konstruktionszeichnungen

Im folgenden sind sämtliche Konstruktionszeichnungen, die den Umbau des A4-Experimentes im Rahmen dieser Arbeit betreffen, aufgeführt.

Die Zeichnungen A.1 bis A.13 beziehen sich auf die rotierbare Plattform mit Bodenplatte. Die Zeichnungen A.14 und A.15 zeigen die Vakuumkammervverlängerung und den Verbindungsflansch an die Strahlführung zum Stahlfänger. Die Zeichnungen A.16 und A.24 schließlich stellen die Halterungen und ihre Einzelteile für die Vakuumkammern auf der Plattform dar.

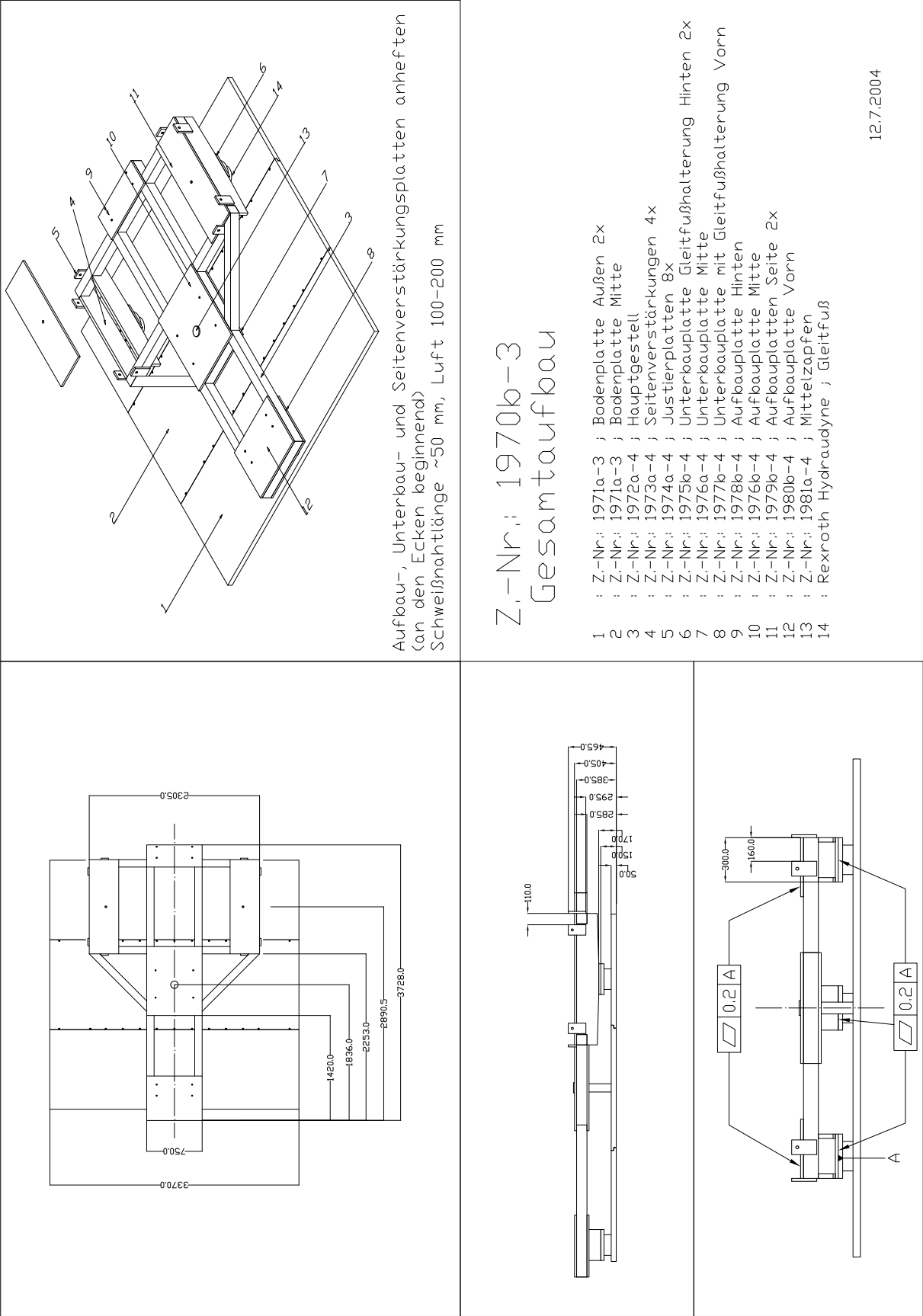


Abbildung A.1

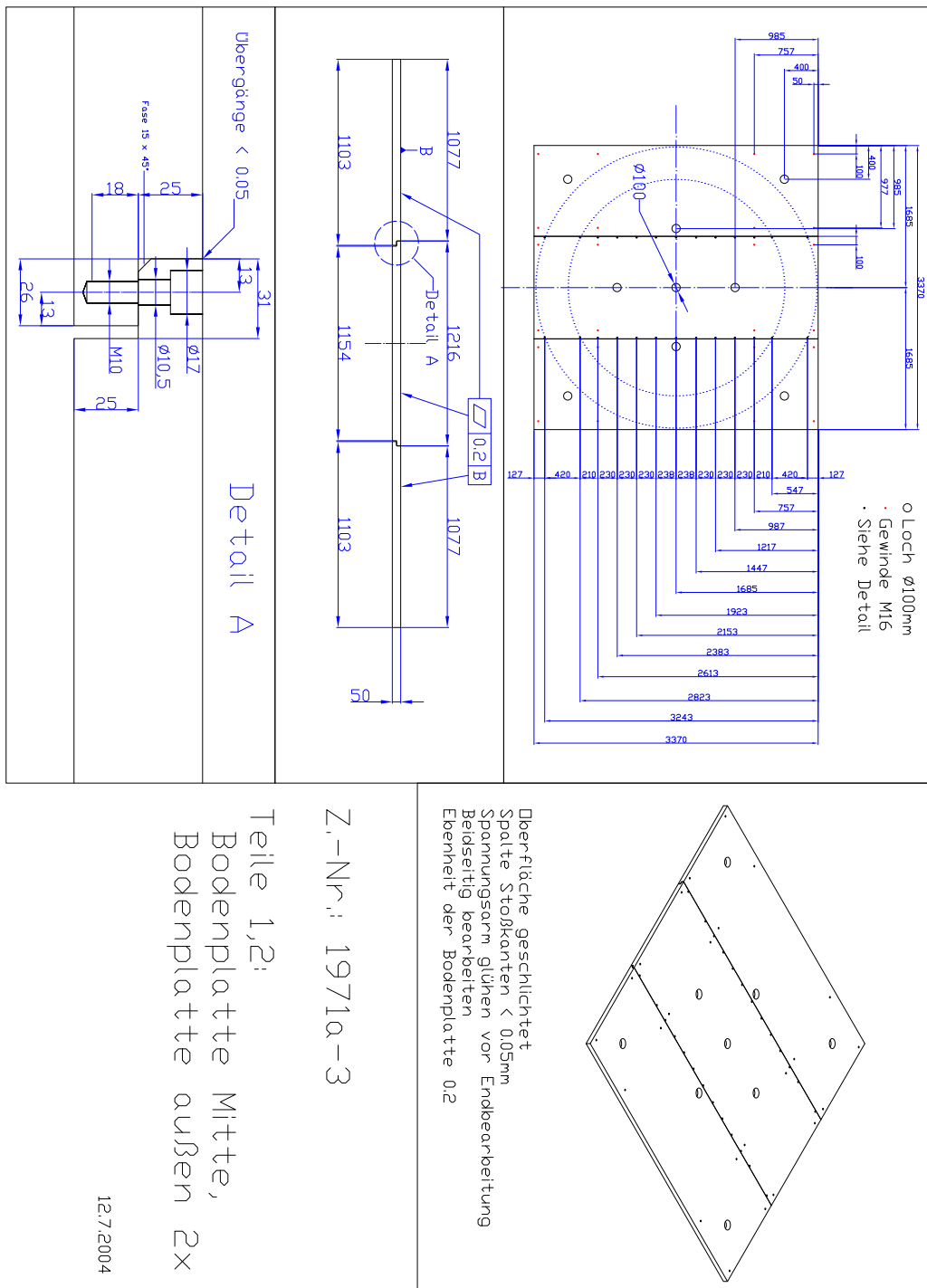
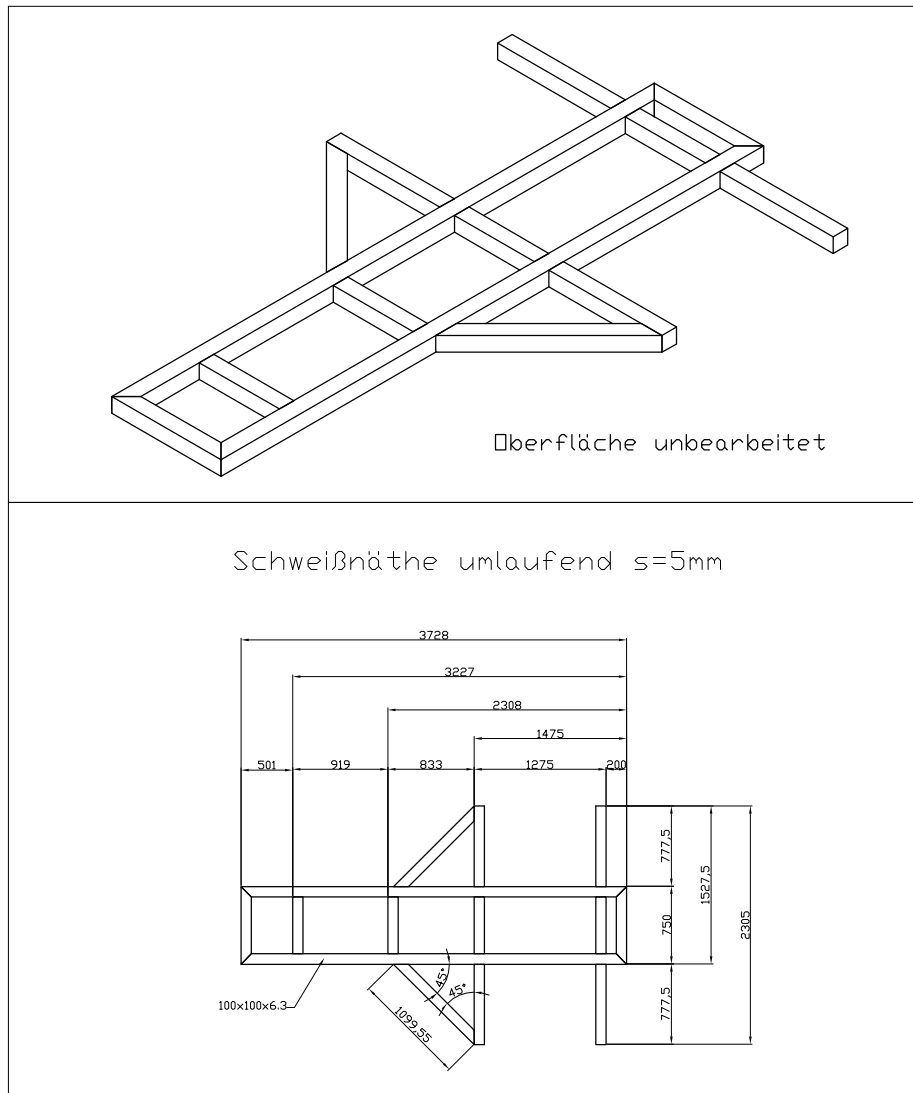


Abbildung A.2



Z.-Nr.: 1972a-4

Teil 3: Hauptgestell

12.7.2004

Abbildung A.3

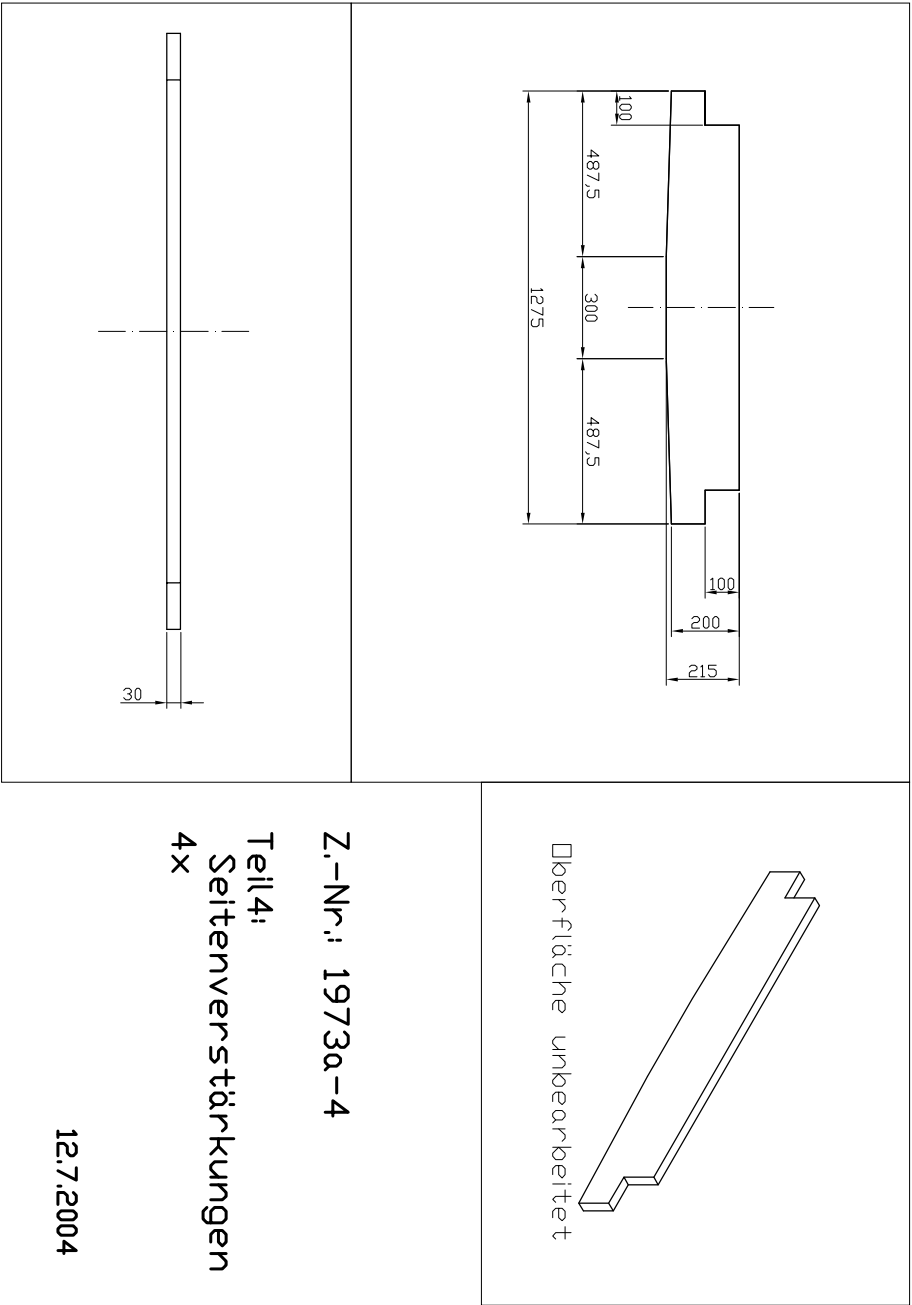


Abbildung A.4

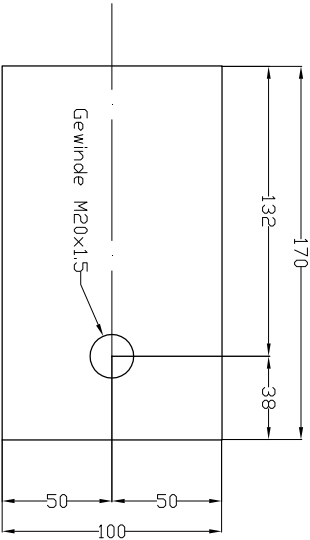
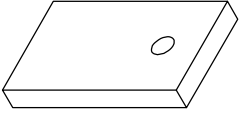
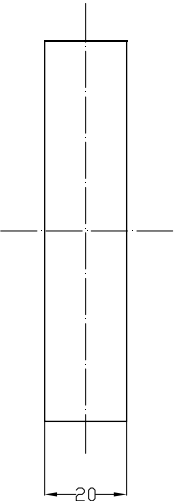
|                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  <p>Können nach<br/>Oberflächenbearbeitung der<br/>Teile 11 (Aufbauplatten Seite)<br/>angeschweißt werden.</p> <p>Oberfläche unbearbeitet</p> |
|   | <p>Z.-Nr.: 1974a-4</p> <p>Teil 5:</p> <p>Justierplatten 8x</p> <p>12.7.2004</p>                                                                                                                                                   |

Abbildung A.5

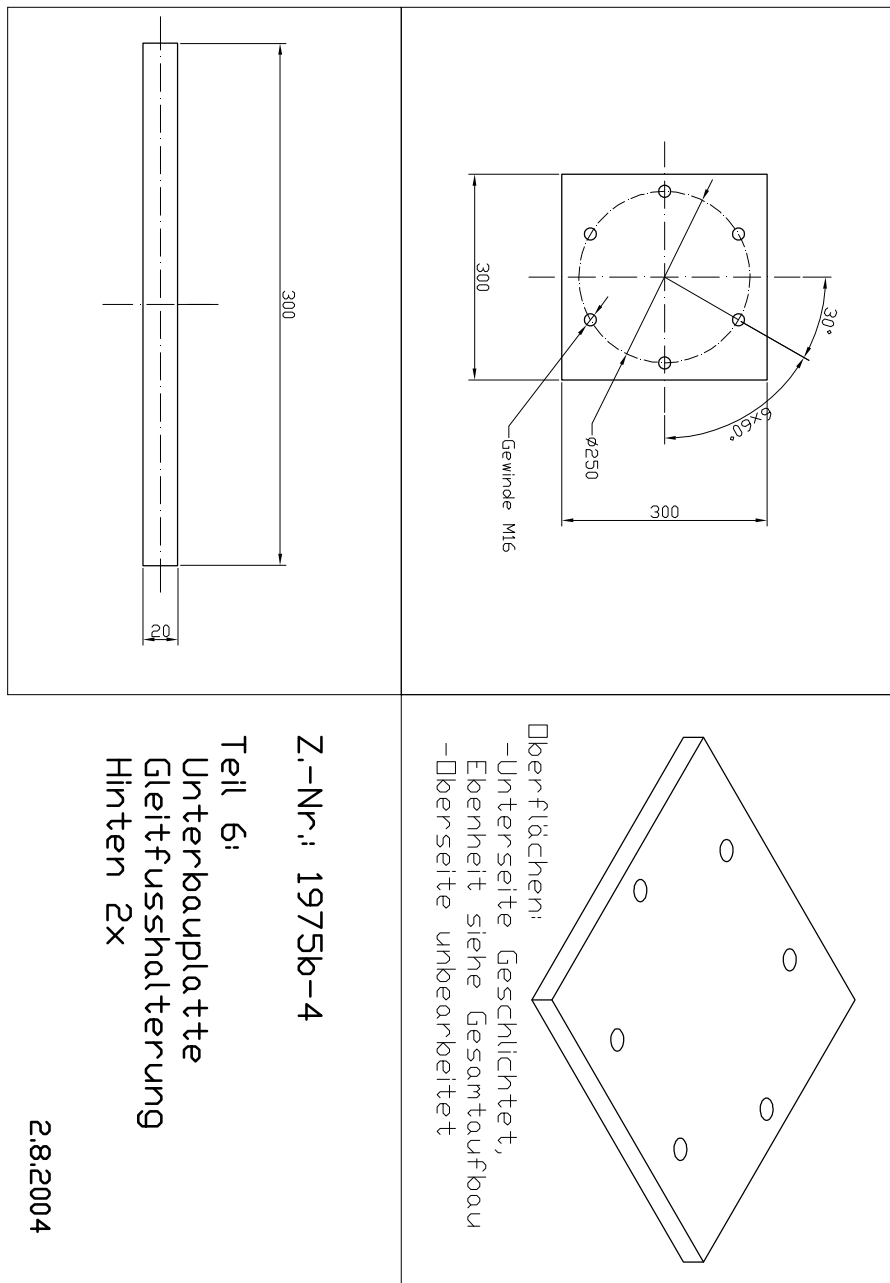


Abbildung A.6

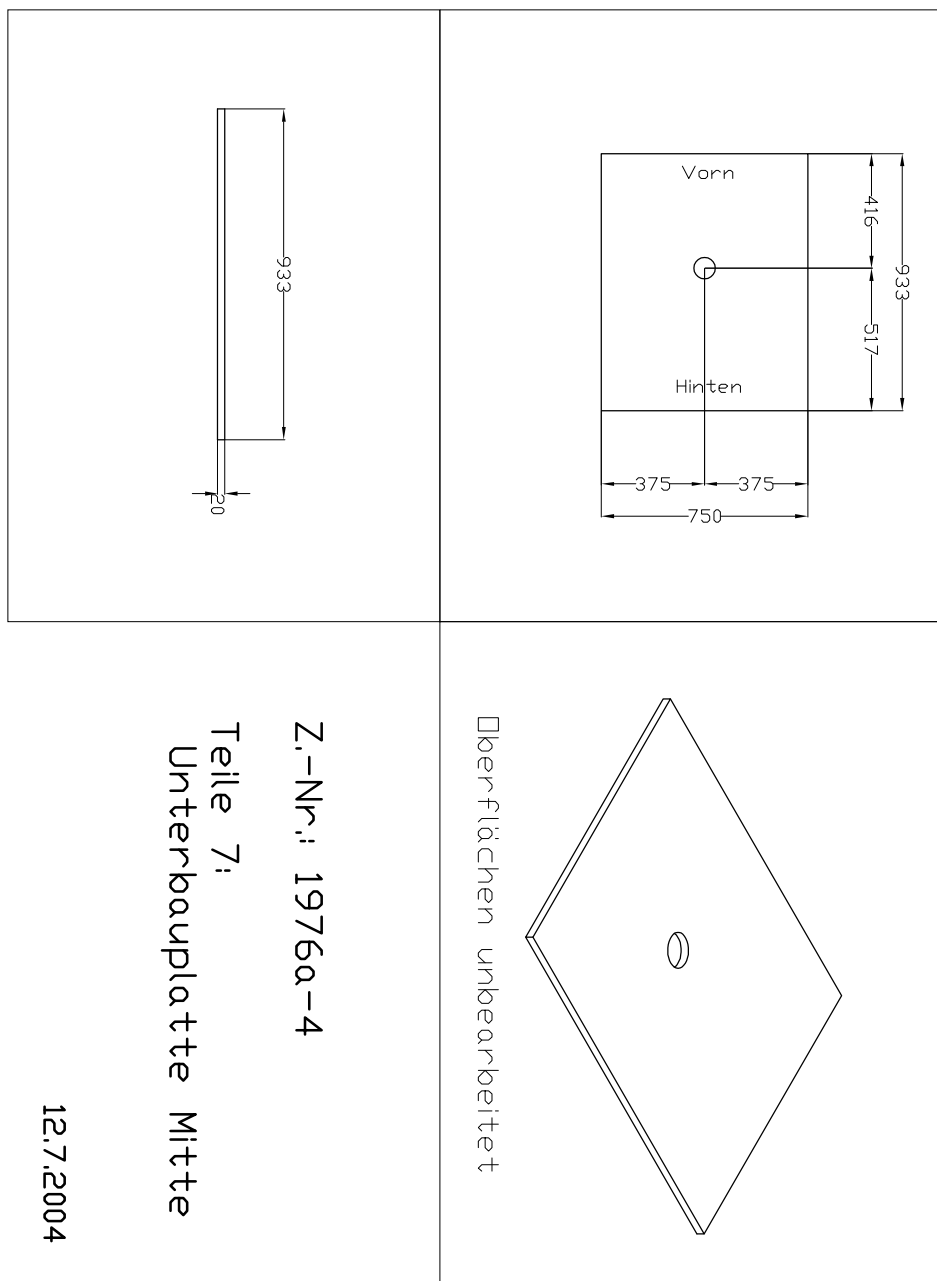


Abbildung A.7

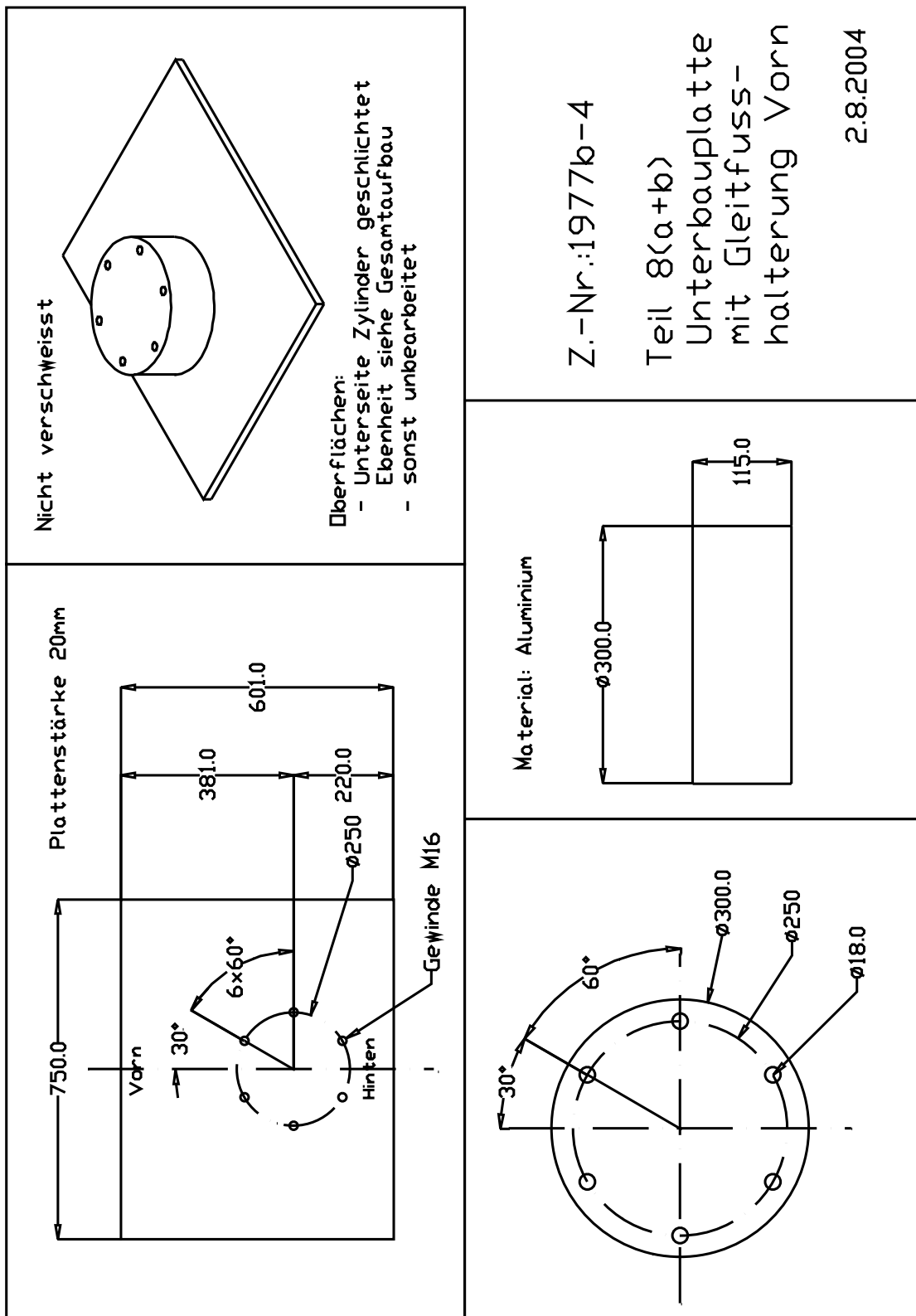


Abbildung A.8

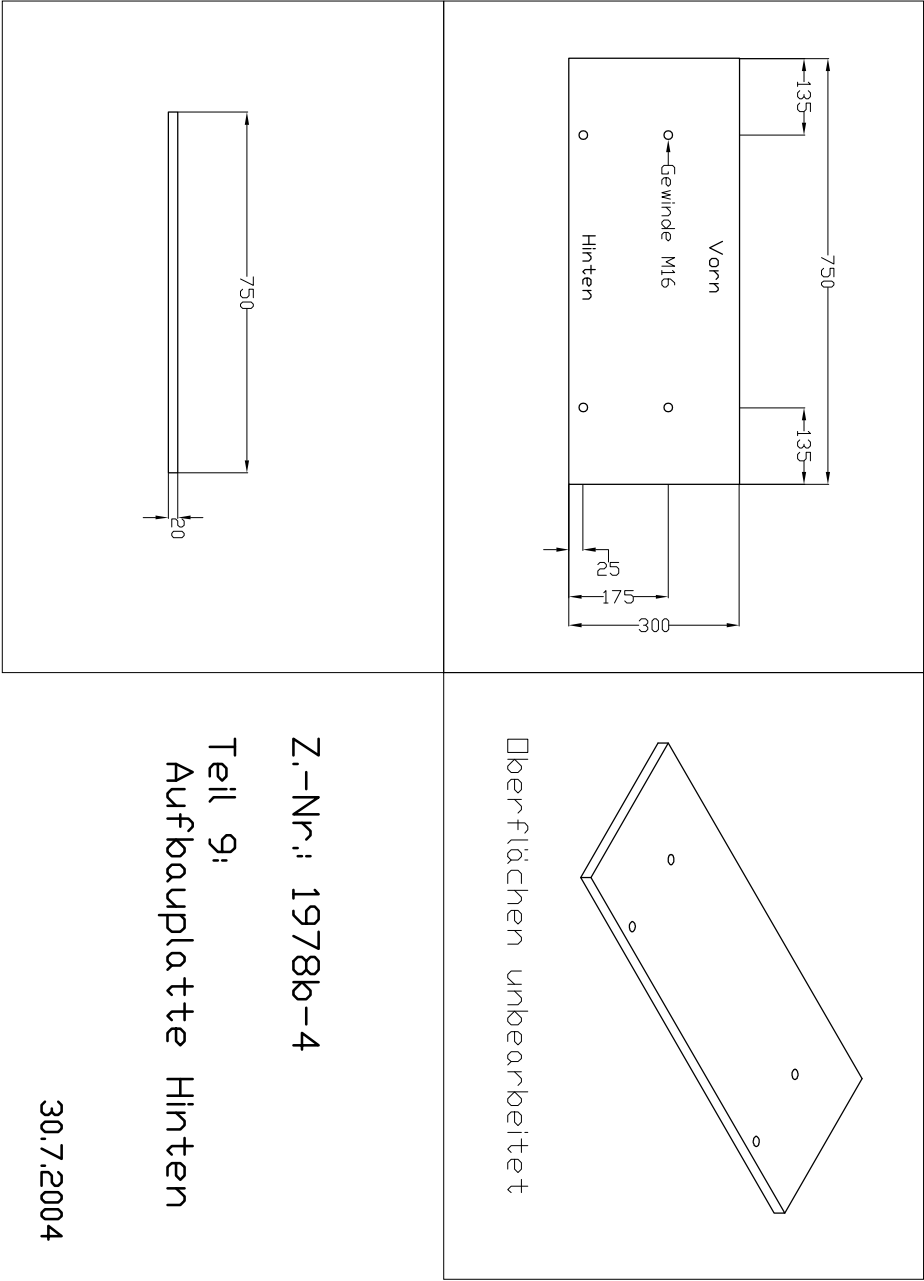


Abbildung A.9

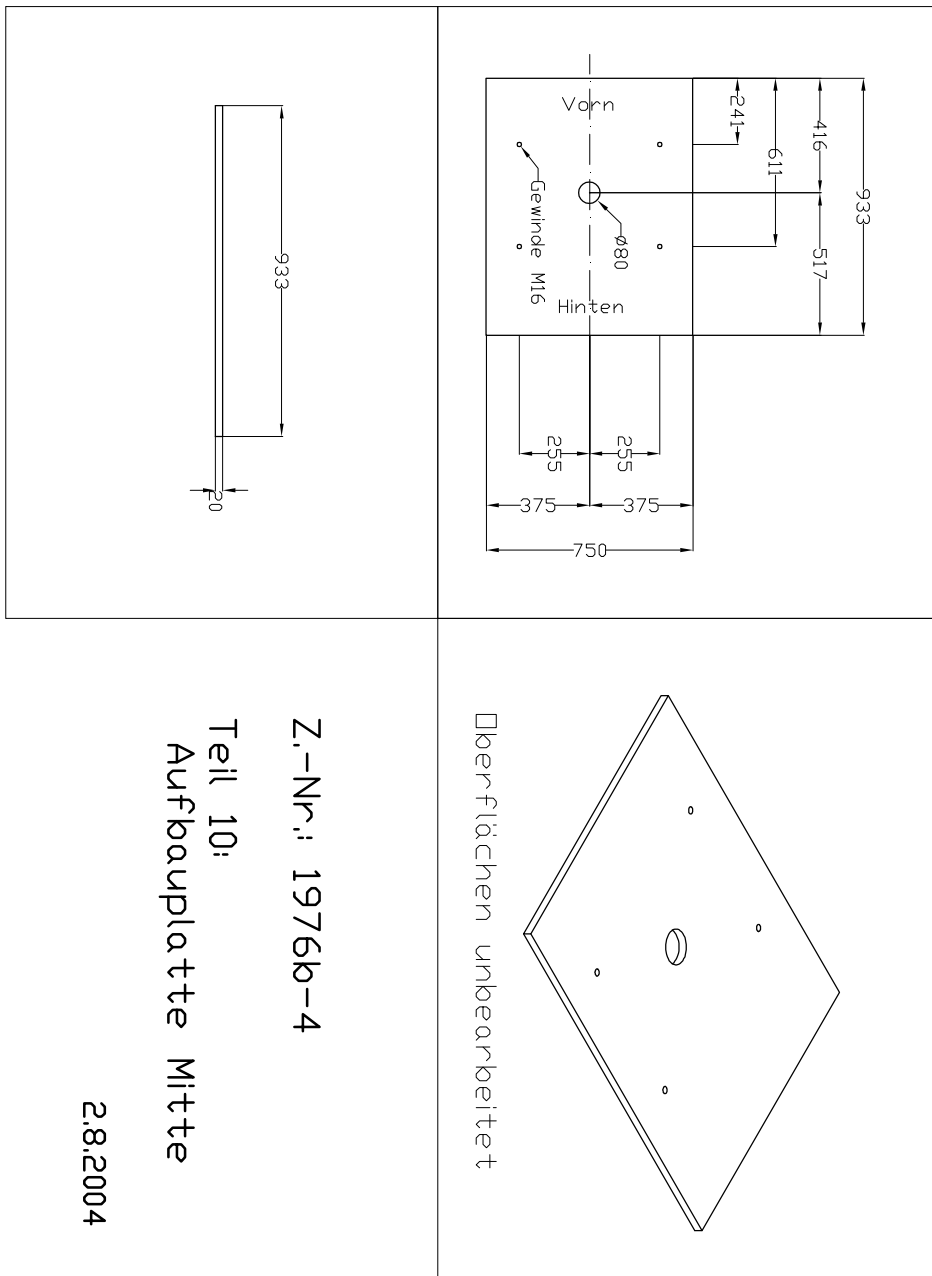


Abbildung A.10

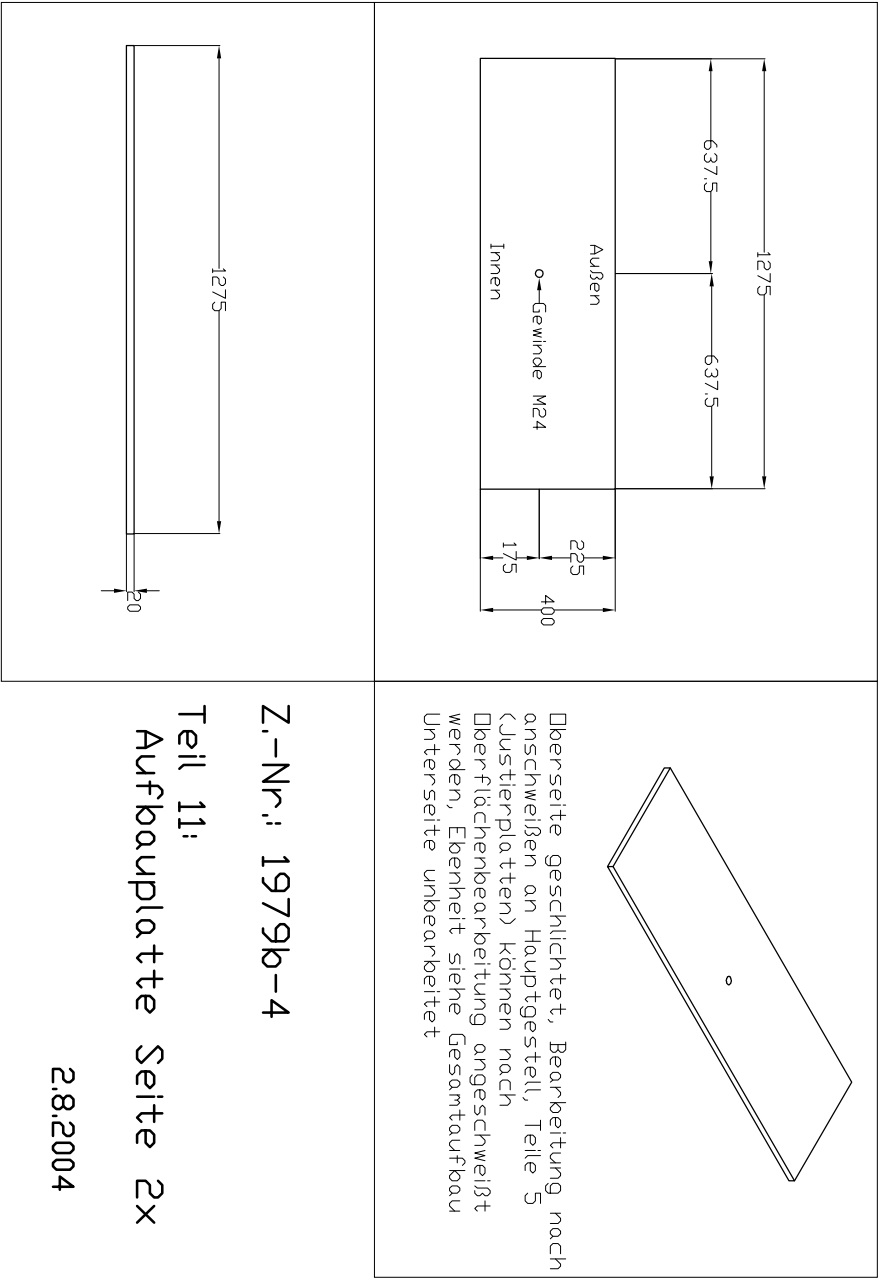


Abbildung A.11

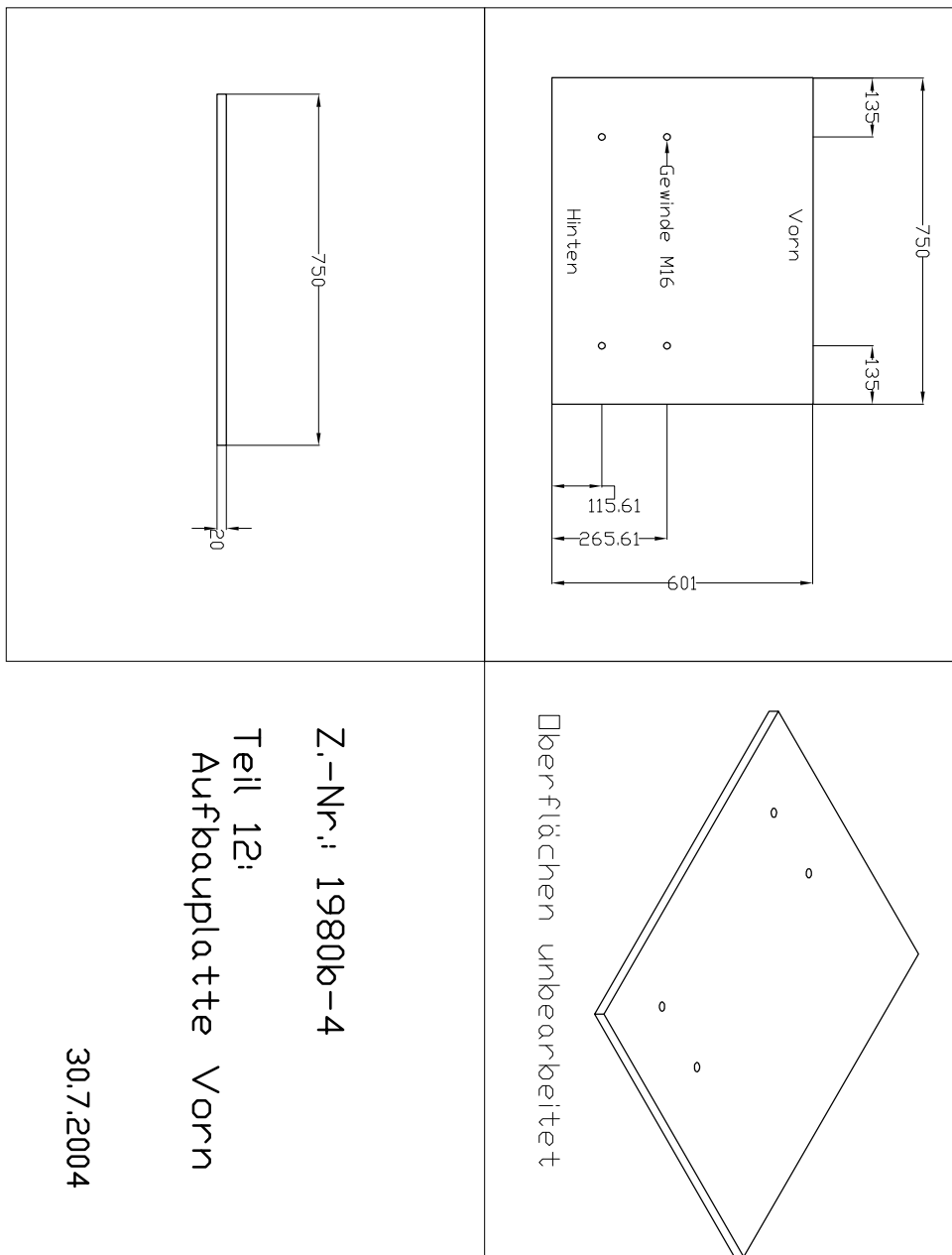


Abbildung A.12

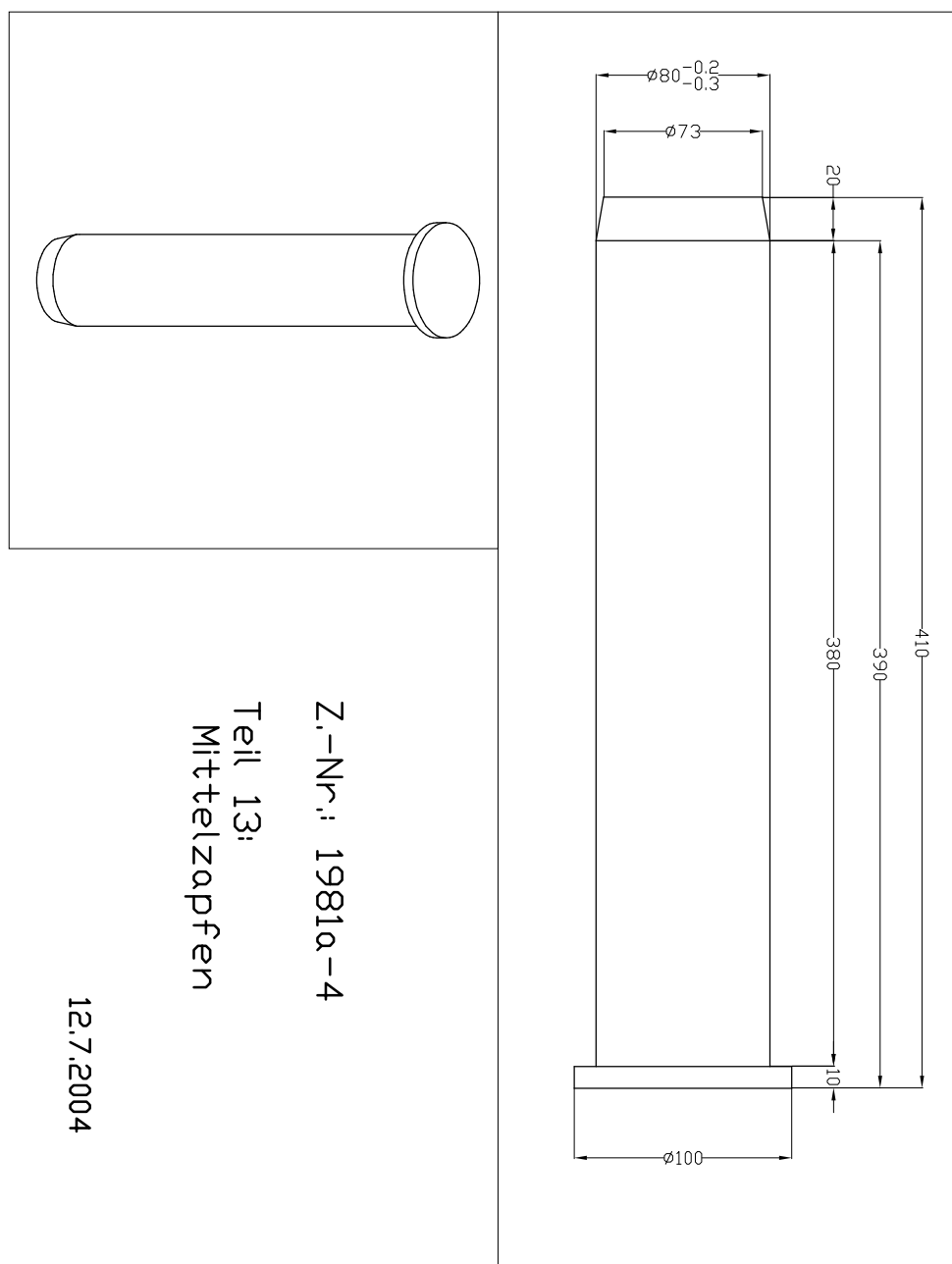


Abbildung A.13

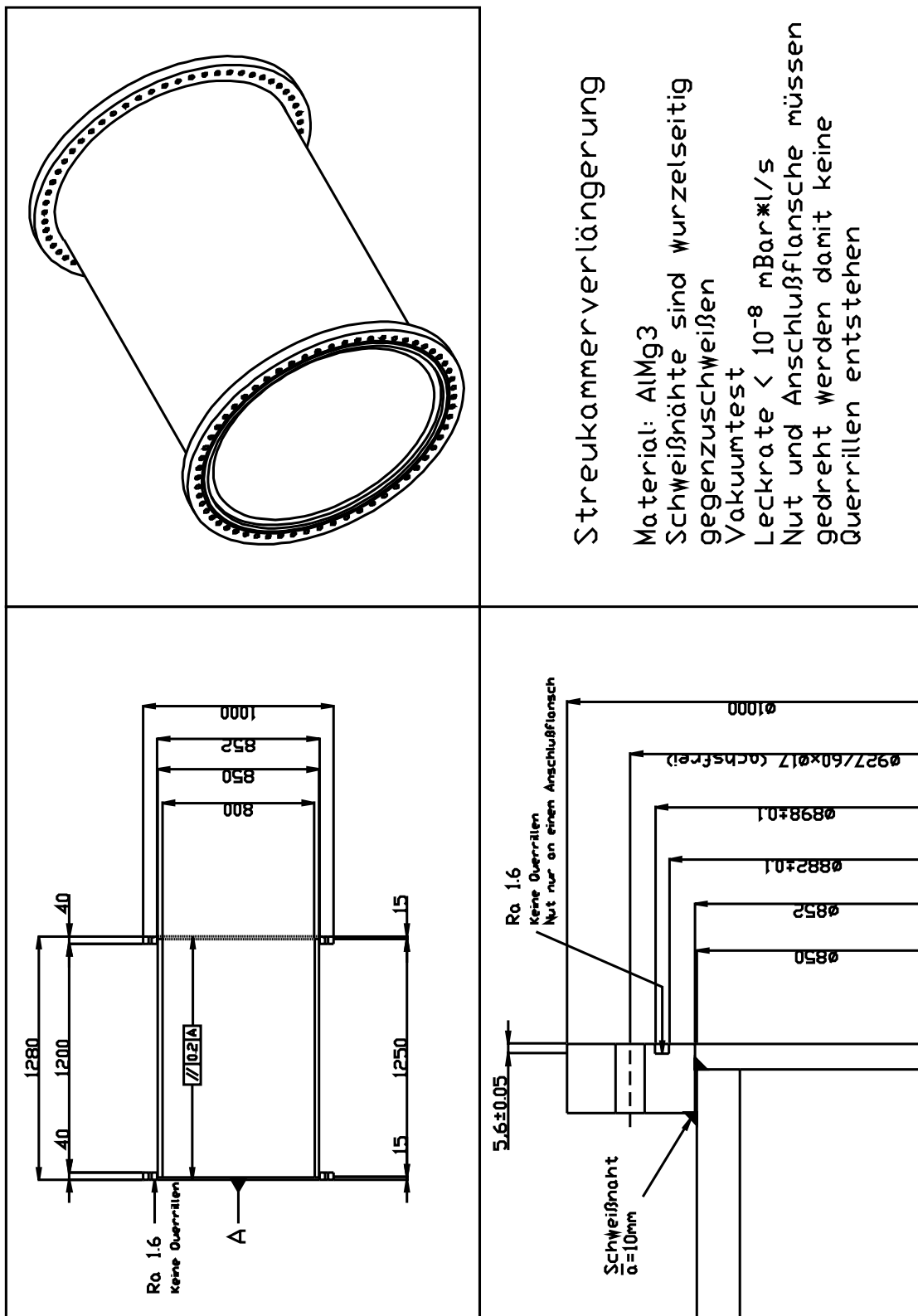


Abbildung A.14

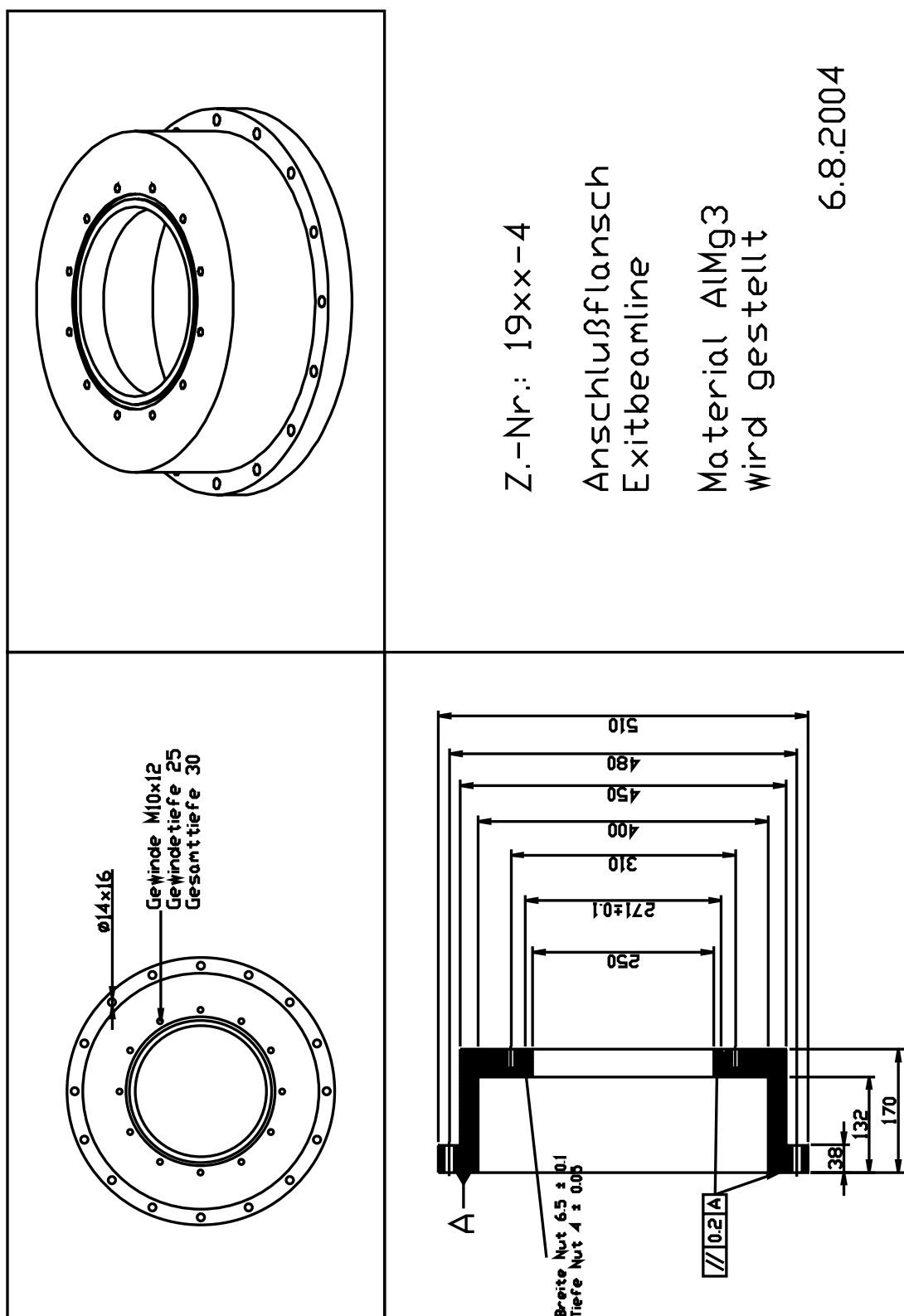
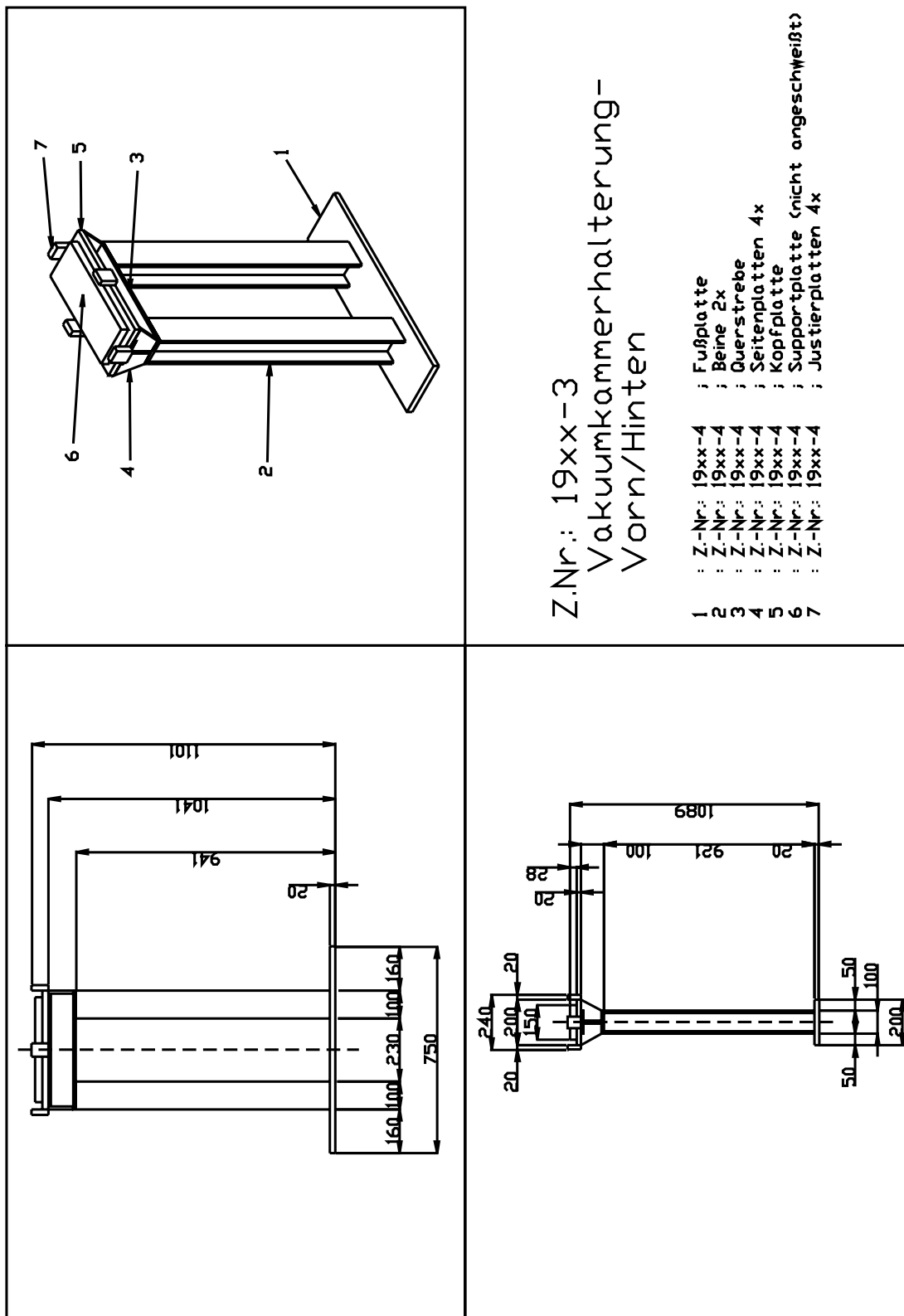


Abbildung A.15



### Abbildung A.16

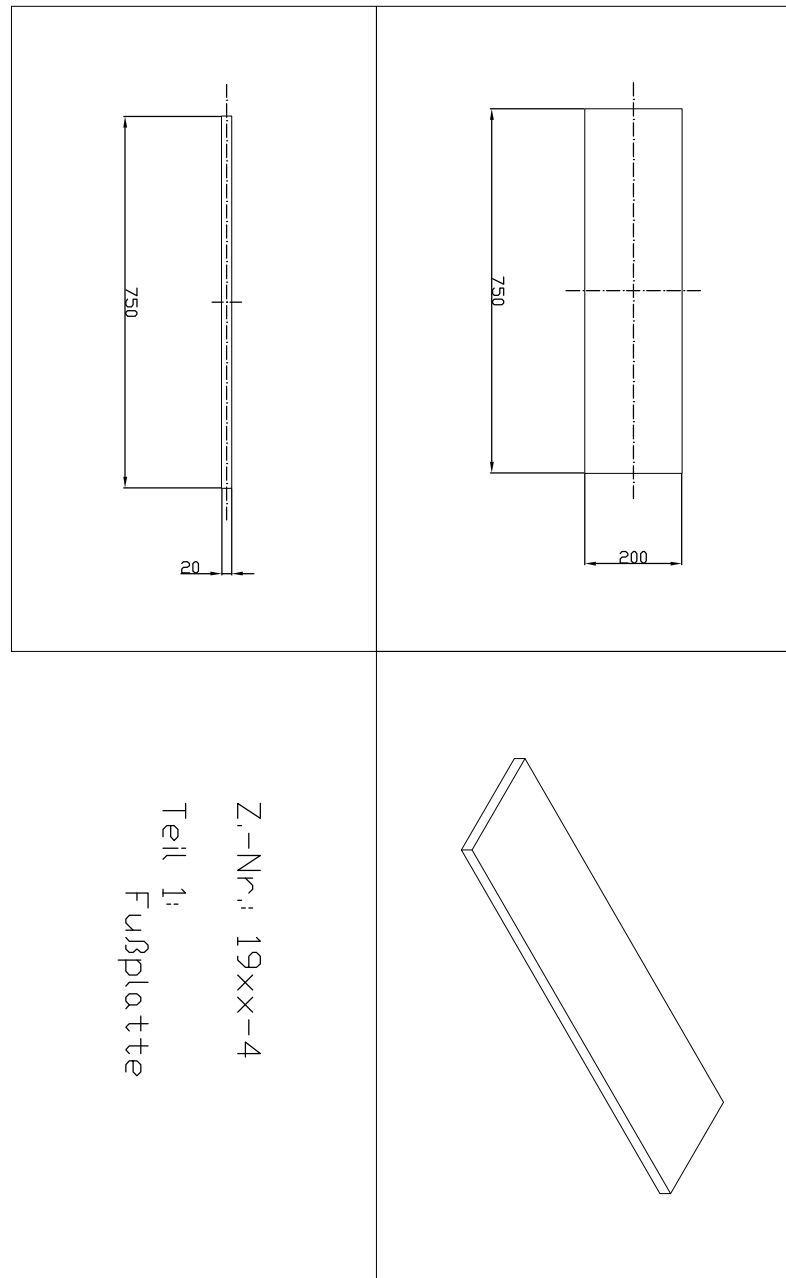


Abbildung A.17

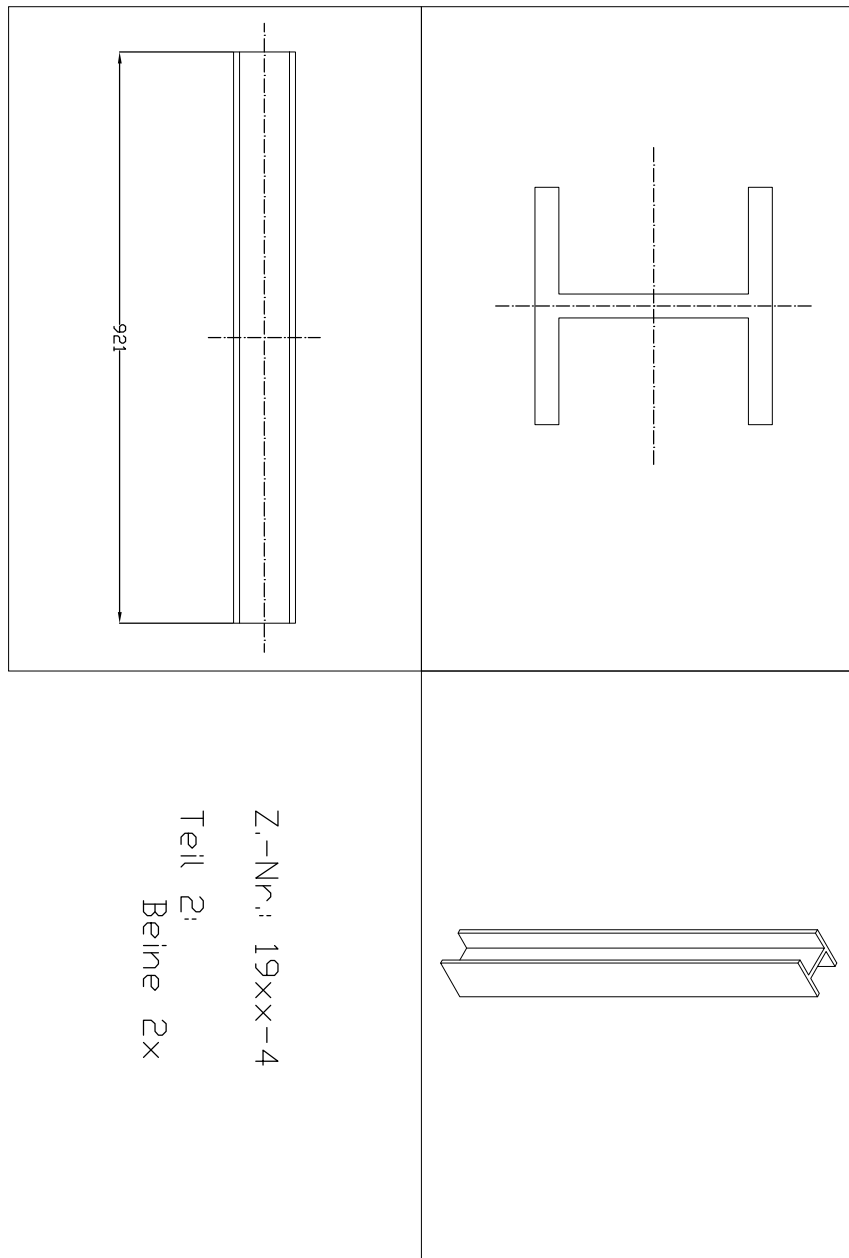


Abbildung A.18

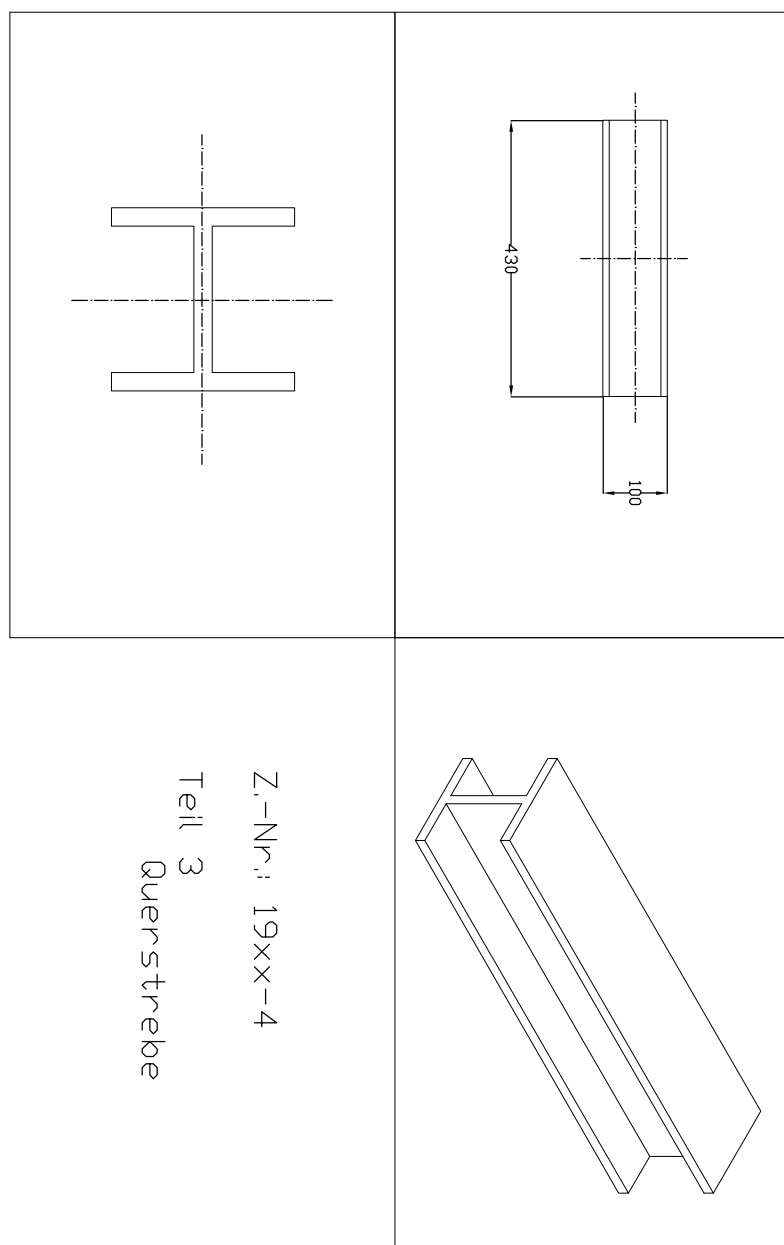


Abbildung A.19

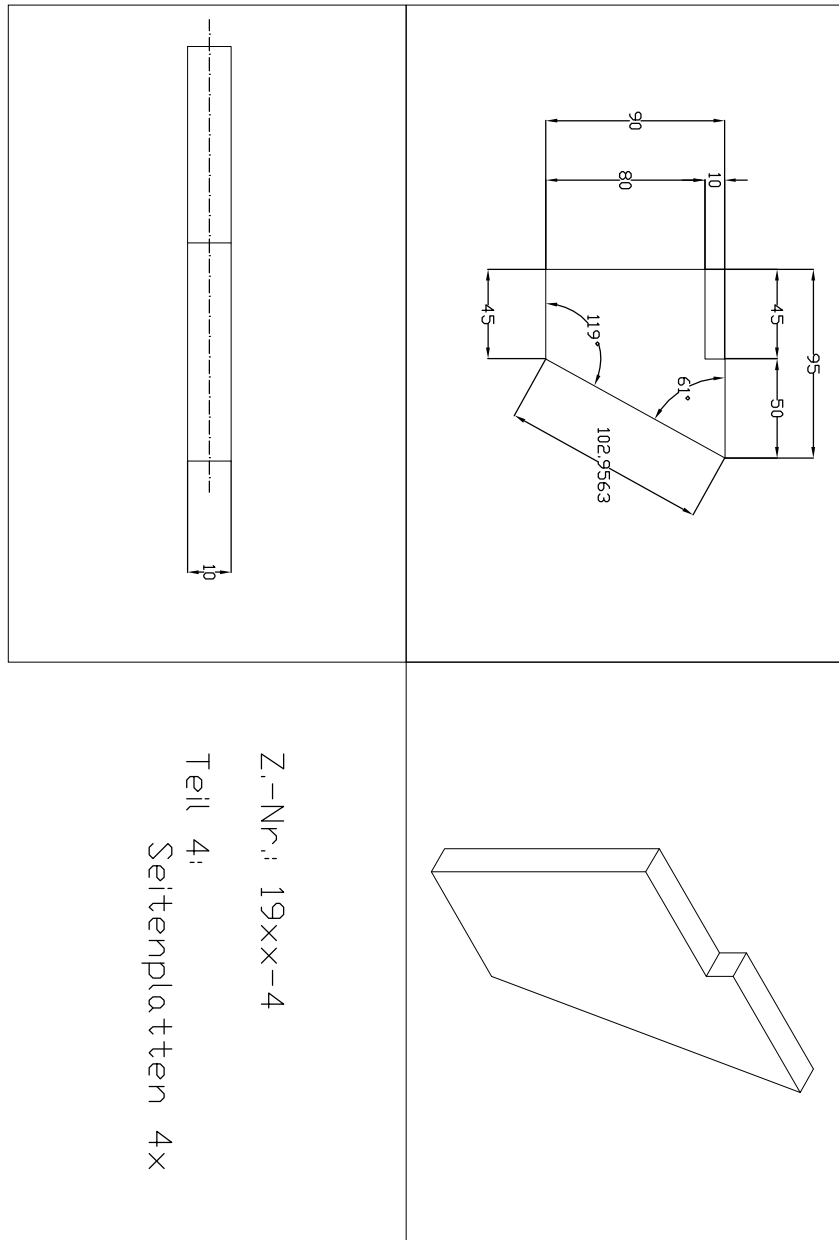


Abbildung A.20

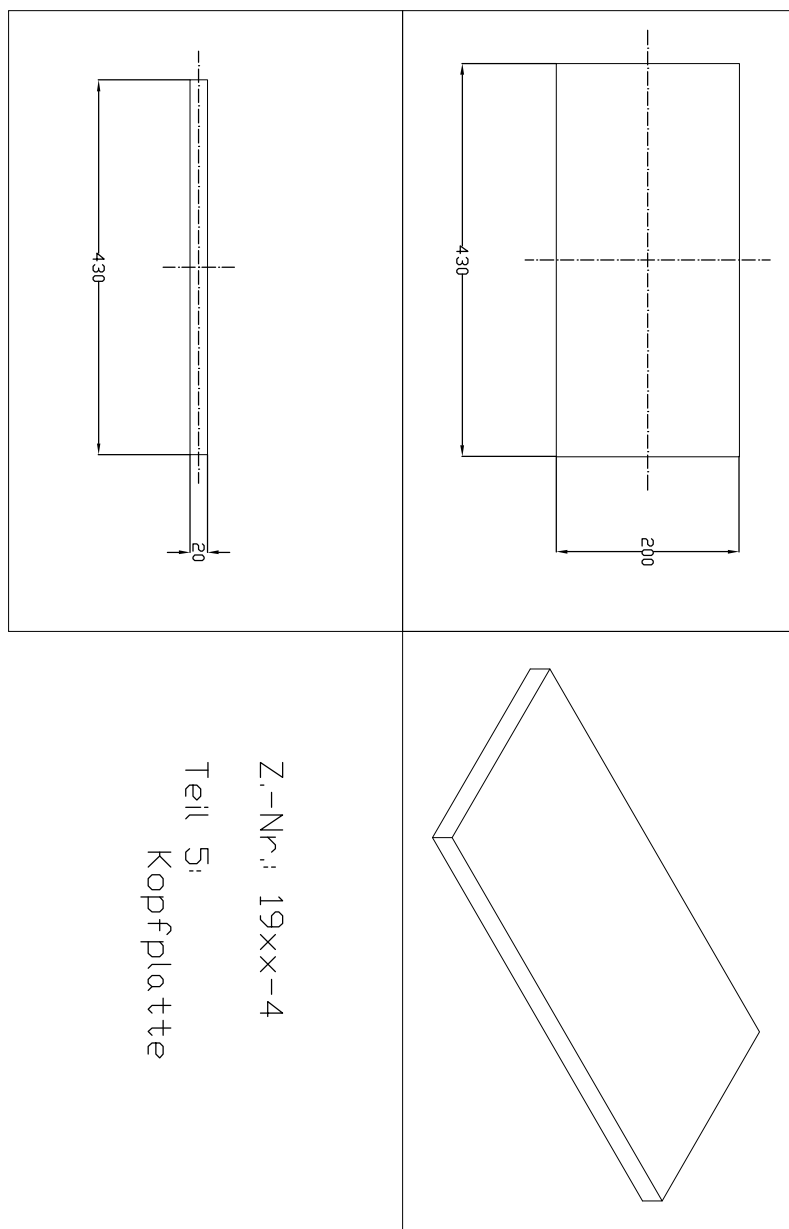


Abbildung A.21

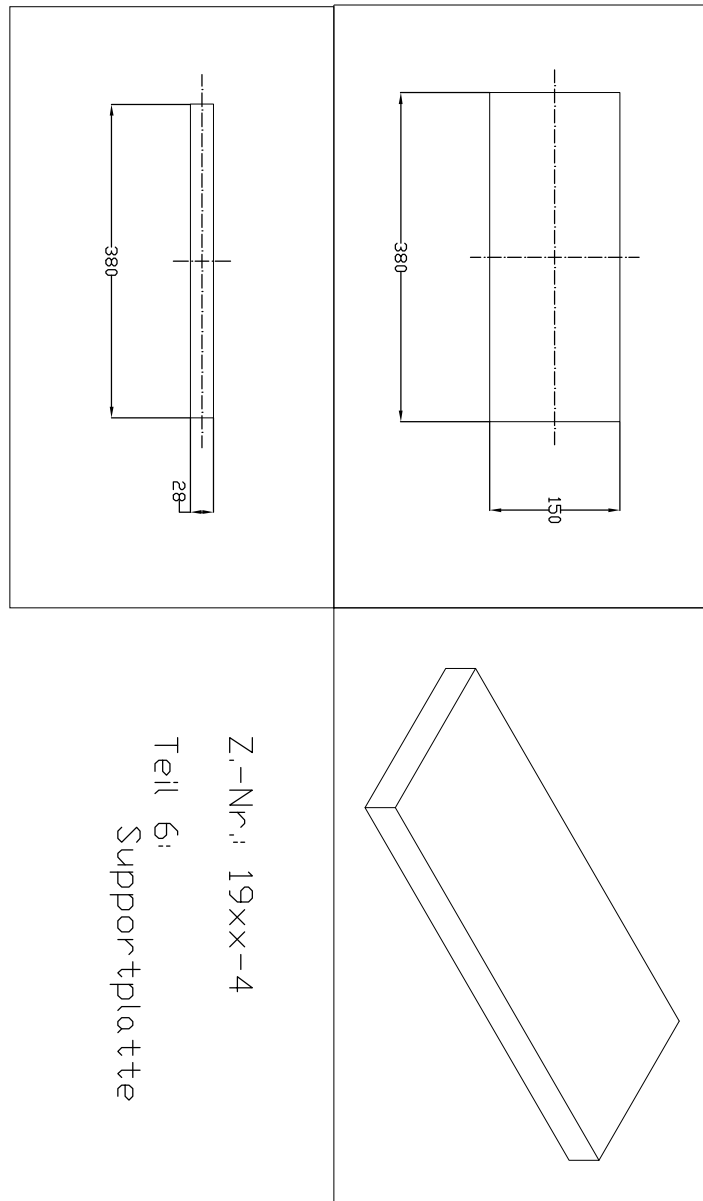


Abbildung A.22

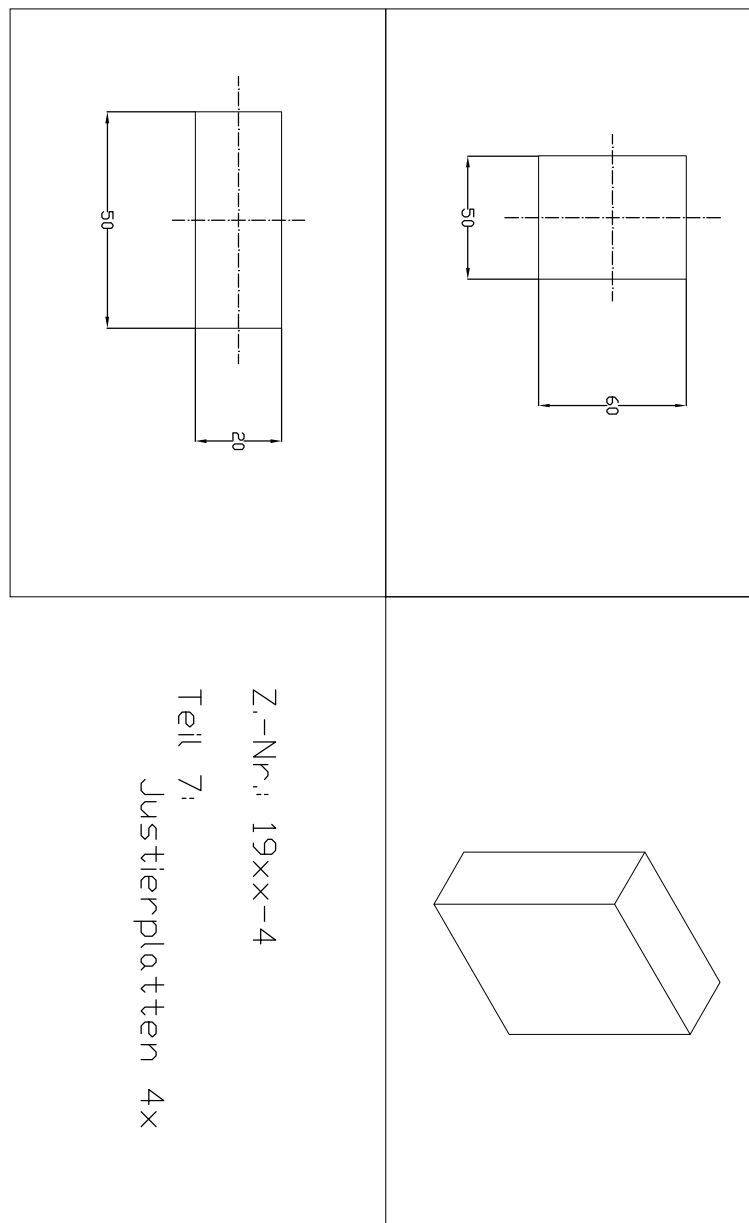


Abbildung A.23

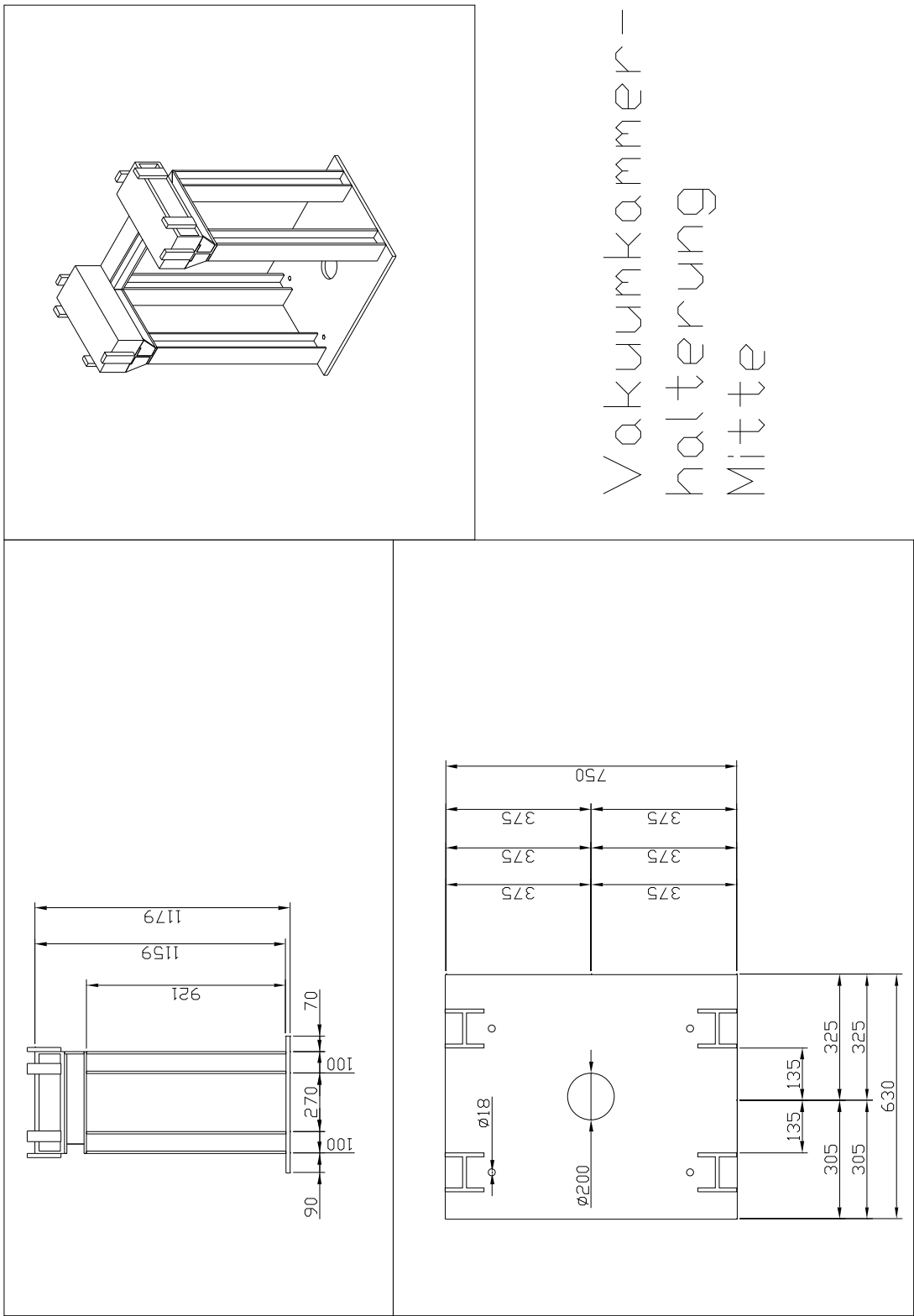


Abbildung A.24

## A.2 Überwachung der Experimentierhalle 4

Da der Umbau des apparativen Aufbaus in Experimentierhalle 4 bestmöglich dokumentiert werden sollte, ist im Rahmen dieser Arbeit eine Kameraüberwachung in der Halle eingerichtet worden. Dazu wurde eine handelsübliche, über einen PC fernsteuerbare Digitalkamera (Canon PowerShot A75) zusammen mit einem PC in der Halle fest aufgestellt. Die Kamera nimmt in regelmäßigen Abständen (10 s bis 1 h) Bilder der Halle auf und sendet sie an den angeschlossenen PC, von wo aus sie auf die Webseite der A4-Kollaboration des Instituts für Kernphysik der Universität Mainz übertragen werden. Das aktuelle Bild ist unter folgender Internetadresse abzurufen:

<http://www.kph.uni-mainz.de/A4/HalleA4/Hall.html>

Zusätzlich werden die aufgenommenen Bilder zu einem Film zusammengefügt. Dieser Vorgang ist jedoch noch nicht automatisiert. Der aktuelle Film kann im WMV-Format unter der folgenden Internetadresse heruntergeladen werden:

<http://www.kph.uni-mainz.de/A4/HalleA4/Hallenfilm.wmv>

Die folgende Abbildung zeigt eines dieser Bilder.



Abbildung A.25

# Abbildungsverzeichnis

|     |                                                                                                                                                                               |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Feynman-Graphen zum $\gamma$ - und $Z^0$ -Austausch . . . . .                                                                                                                 | 4  |
| 2.2 | Statistischer Gütefaktor (FOM) . . . . .                                                                                                                                      | 9  |
| 2.3 | Statistischer Gütefaktor für Messungen unter Rückwärtswinkeln                                                                                                                 | 10 |
| 3.1 | Das Meßprinzip des A4-Experiments . . . . .                                                                                                                                   | 14 |
| 3.2 | Schematischer Aufbau des A4-Experiments . . . . .                                                                                                                             | 16 |
| 3.3 | Übersicht über den Elektronenbeschleuniger MAMI und die Experimentierhallen . . . . .                                                                                         | 17 |
| 3.4 | Übersicht über die Strahlstabilisierungen . . . . .                                                                                                                           | 18 |
| 3.5 | Aufbau des Flüssig-Wasserstoff-Targers . . . . .                                                                                                                              | 20 |
| 3.6 | Schnittzeichnung des A4-Kalorimeters für Vorwärtsstreugeometrie                                                                                                               | 23 |
| 3.7 | Schnittzeichnung durch den Elektronikturm MEDUSA . . . . .                                                                                                                    | 26 |
| 3.8 | Energiespektrum einer $3 \times 3$ -Kalorimetermatrix . . . . .                                                                                                               | 27 |
| 3.9 | Aufbau eines Luminositätsmonitors . . . . .                                                                                                                                   | 29 |
| 4.1 | Bestehender Aufbau in der Experimentierhalle 4 . . . . .                                                                                                                      | 34 |
| 4.2 | Streugeometrie mit dem neuen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und realisierten Experimentieraufbau . . . . .                                                             | 35 |
| 4.3 | Experimentierhalle 4 mit dem neuen im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Experimentieraufbau . . . . .                                                                         | 37 |
| 4.4 | Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, konstruierte und realisierte Supportsystem, bestehend aus der rotierbaren Plattform, den Öl-Gleitfüßen und der Bodenplatte . . . . . | 38 |

|      |                                                                                                        |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.5  | Konstruktionszeichnung eines Gleitfußes der Firma Rexroth Hy-<br>draudyne . . . . .                    | 39 |
| 4.6  | Der veränderte Gesamtaufbau der im Rahmen dieser Arbeit ent-<br>wickelt und realisiert wurde . . . . . | 41 |
| 4.7  | Traverse mit Kalorimeterrahmen . . . . .                                                               | 42 |
| 4.8  | Aufstellungsplan des Hubportals der Firma Reiling . . . . .                                            | 43 |
| A.1  | Übersicht rotierbare Plattform mit Bodenplatte . . . . .                                               | 48 |
| A.2  | Konstruktionszeichnung Bodenplatte . . . . .                                                           | 49 |
| A.3  | Konstruktionszeichnung Hauptgestell . . . . .                                                          | 50 |
| A.4  | Konstruktionszeichnung Seitenverstärkungen . . . . .                                                   | 51 |
| A.5  | Konstruktionszeichnung Justierplatten . . . . .                                                        | 52 |
| A.6  | Konstruktionszeichnung Unterbauplatten Hinten . . . . .                                                | 53 |
| A.7  | Konstruktionszeichnung Unterbauplatte Mitte . . . . .                                                  | 54 |
| A.8  | Konstruktionszeichnung Unterbauplatte Vorn mit Gleitfußhal-<br>terung . . . . .                        | 55 |
| A.9  | Konstruktionszeichnung Aufbauplatte Hinten . . . . .                                                   | 56 |
| A.10 | Konstruktionszeichnung Aufbauplatte Mitte . . . . .                                                    | 57 |
| A.11 | Konstruktionszeichnung Aufbauplatten Seite . . . . .                                                   | 58 |
| A.12 | Konstruktionszeichnung Aufbauplatte Vorn . . . . .                                                     | 59 |
| A.13 | Konstruktionszeichnung Mittelzapfen . . . . .                                                          | 60 |
| A.14 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerverlängerung . . . . .                                              | 61 |
| A.15 | Konstruktionszeichnung Verbindungsflansch Exitbeamline . . . . .                                       | 62 |
| A.16 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Vorn und<br>Hinten . . . . .                              | 63 |
| A.17 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Fuß . . . . .                                             | 64 |
| A.18 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Beine . . . . .                                           | 65 |
| A.19 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Querstrebe . . . . .                                      | 66 |
| A.20 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Seitenplatten . . . . .                                   | 67 |
| A.21 | Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Kopfplatte . . . . .                                      | 68 |

---

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| A.22 Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Supportplatte  | 69 |
| A.23 Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Justierplatten | 70 |
| A.24 Konstruktionszeichnung Vakuumkammerhalterung Mitte . . . .  | 71 |
| A.25 Photo vom Umbau der Experimentierhalle 4 . . . . .          | 72 |



# Literaturverzeichnis

- [1] ACHENBACH, P.: *Aufbau eines Bleifluorid-Kalorimeters zur Messung der Paritätsverletzung in der elastischen Elektronenstreuung*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik, Diss., 2000
- [2] ALTAREV, I.: *A high liquid hydrogen target for the parity violation experiment*. Preprint submitted to Elsevier Preprint
- [3] AULENBACHER U. A. 1994 AULENBACHER, K.; NACHTIGALL, Ch.; ANDRESEN, H. G.; BERMUTH, J.; DOMBO, Th.; DRESCHER, P.; EUTENEUER, H.; FISCHER, H.; HARRACH, D. v.; HARTMANN, P.; HOFFMANN, J.; JENNEWEIN, P.; KAISER, K. H.; KÖBIS, S.; KREIDEL, H. J.; LANGBEIN, J.; PETRI, M.; PLÜTZER, S.; REICHERT, E.; SCHEMIES, M.; SCHÖPE, H. J.; STEFFENS, K. H.; STEIGERWALD, M.; TRAUTNER, H.; WEIS, T.: *The MAMI source of polarized electrons*. Nucl. Instrum. Methods Phys. Research A391 (1997), S. 498–506
- [4] BARTSCH, P.: *Aufbau eines Möllerpolarimeters für die Drei-Spektrometer-Anlage und Messung der Helizitätsasymmetrie in der Reaktion  $p(e \rightarrow e'p)\pi_0$  im Bereich der  $\Delta$ -Resonanz*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik, Diss. 2001
- [5] BAUNACK, S.: *Echtzeitkalibration des elektromagnetischen A4-Kalorimeters*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Diplom-Arbeit, März 1999. – 72 S
- [6] BAUNACK, S.: *Untersuchungen der Strangeness im Nukleon mittels paritätsverletzender Elektron-Streuung unter Vorwärtswinkel*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik, Diss. in Vorbereitung, voraussichtlich Ende 2003
- [7] DIEFENBACH, J.: *Aufbau einer elektronischen Stabilisierung für das A4-Comptonpolarimeter*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Diplom-Arbeit, Februar 2003. –
- [8] EUROPEAN MUON COLLABORATION: *Measurement of the ratios of deep inelastic muon-nucleus cross-sections on various nuclei compared to deuterium*. Phys. Lett. B206 (1988), S. 603–610
- [9] GASSER, J. ; LEUTWYLER, J. ; LOCHER, M. ; SAINIO, M. *Extracting the pion-nucleon sigma term from data*. Phys. Lett. B213 (1988), S. 85–90
- [10] GRIMM, K.: *Aufbau eines Lichtauslesesystems für ein Bleifluorid-Kalorimeter zur Messung der Paritätsverletzung in der elastischen Elektronenstreuung*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Dissertation, Januar 2002. –
- [11] HAMMEL, T.: *Luminositätsmessung und helizitätskorrelierte Effekte für ein Experiment zur paritätsverletzenden Elektronenstreuung*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Dissertation 2003

- [12] ANIOL, K. A. et al: *New Measurement of Parity Violation in Elastic Electron-Proton Scattering and Implications for strange form factors*. Phys.Lett. B509 (2001) 211-216
- [13] HEINEN-KONSCHAK, E.: *Vorbereitende experimentelle Studien für die Messung der Paritätsverletzung in der elastischen ep-Streuung*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik, Diss., 1994
- [14] IMAI, Y.: *Entwicklung eines optischen Systems für ein Compton-Rückstreupolarimeter*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Diplom-Arbeit, Februar 2003. –
- [15] KETTER, W.: *Entwurf zum Bau eines optischen Resonators für ein Comptonrückstreupolarimeter*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Diplom-Arbeit, Dezember 1998. – 37 S
- [16] KÖBIS, S.: *Entwicklung eines Triggersystems zur Selektion elastischer Elektronenstreuereignisse in einem schnellen Kalorimeter*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik, Diss., 1998
- [17] KOTHE, R.: *Aufbau eines Prüfstandes zur Qualitätskontrolle der A4-Experimentelelektronik und Charakterisierung eines Analog-Digital-Wandlers*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Fachbereich Physik, 1999
- [18] LOPES GINJA, A.: *Vorstudien zum Bau eines Polarisationsmonitors für ein paritätsverletzendes Experiment*. Mainz, Joh. Gutenberg-Universität, Institut für Kernphysik, Diplom-Arbeit, Dezember 1996. – 79 S
- [19] MAAS, F. E.: *Parity violating electron scattering at the MAMI facility in Mainz: The strangeness contribution to the form factors of the nucleon*. European Physics Journal A 17,339 (2003)
- [20] MAAS, F. E.: *Measurement of the strange quark contributions to the nucleon's form factors at  $Q^2=0.230\text{ GeV}^2/c^2$* . Phys. Rev. Lett 93, 022002 (2004)
- [21] MAAS, F. E.: *Measurement of the transverse beam spin asymmetrie in elastic electron proton scattering and the inelastic contribution to the imaginary part of the two-photon exchange amplitude*. nucl-ex/0410013
- [22] MAAS, F. E.: *Evidence for strange quark contributions to the nucleon's form factors at  $Q^2=0.108\text{ GeV}^2/c^2$* . nucl-ex/0412030 93, 022002 (2004)
- [23] MUSOLF, M. J. ; DONNELLY, T. W. ; DUBACH, J. ; POLLOCK, S. J. ; KOWALSKI, S. ; BEISE, E. J.: *Intermediate-Energy semileptonic probes of the hadronic neutral current*. Physics Reports 239 (1994), Nr. 1&2
- [24] ROSENBLUTH, M. N.: *An experimental review of the nucleon form factors*. Phys. Rev. 79 (1950), S. 615
- [25] SPIN MUON COLLABORATION: *Spin Structure of the proton from Polarized inclusive deep inelastic muon-proton scattering*. Phys. Rev. D56 (1997), S. 5330–5358
- [26] WEINRICH, C.: Private Mitteilung, 2003

# Danksagung

Am Ende möchte ich all denen danken, die an der Entstehung dieser Arbeit beteiligt waren und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben.

Zunächst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Dietrich v. Harrach für die interessante Aufgabenstellung und die Möglichkeit an diesem spannenden und ambitionierten Experiment mitarbeiten zu können.

Bei meinem Betreuer Dr. Frank Maas möchte ich mich für sein Interesse am Fortgang der Arbeit und seine Unterstützung besonders bedanken. Er nahm sich bereitwillig die Zeit, mir mit Rat und Wissen zur Seite zu stehen und ausführlich auf meine Fragen und Probleme einzugehen.

Der gesamten Arbeitsgruppe A4 um Herrn Prof. Dr. Dietrich v. Harrach spreche ich meinen Dank aus für das angenehme und konstruktive Arbeitsklima. Mein besonderer Dank gilt hier Sebastian Baunack, Thorsten Hammel, Luigi Capozza und dem ehemaligen A4ler Patrick Achenbach für die tatkräftige Unterstützung bei dieser Arbeit, aber auch für die spannenden Stunden nach dem Schaffen. Ebenso muß ich mich bei Rainer Kothe bedanken, ohne den ich nie so weit gekommen wäre.

Auch möchte ich mich bei denjenigen am Institut für Kernphysik bedanken, die mich bei den technischen Arbeiten tatkräftig unterstützt haben. Insbesondere Herrn Jürgen Rosche für die Unterstützung bei der Planung der benötigten Teile und der Auswahl der mit der Fertigung beauftragten Firmen. Ebenso gilt mein Dank der Beschleunigerwerkstatt um Herrn Bengard und besonders Herrn Jürgen Neumann für die vielen Arbeiten, die er bereits für den Umbau des Experiments übernommen hat und auch noch übernehmen wird. Die Feinmechanische Werkstatt um Herrn Luzius darf wegen der vielen kleinen oder großen Teile, die sie für den Umbau ohne Zögern angefertigt hat auch nicht ungenannt bleiben. Und auch der Vakuumwerkstatt um Herrn Schön gebührt mein Dank für ihre tatkräftige Unterstützung.

Herrn Schilling danke ich für die Hilfe in allen Fragen die Kryotechnik und das Target betreffend und seiner unkomplizierten Hilfe in finanziellen Fragen.

Ebenso gilt mein Dank dem Hausmeister und den Damen der Verwaltung, die mir immer schnell und unkompliziert bei meinen Anliegen weiterhelfen.

Meinen Eltern danke ich dafür, daß sie mir mein Studium überhaupt erst ermöglicht haben und mich immer uneingeschränkt unterstützt haben.

Als letztes danke ich all meinen Freunden für die Ablenkung und Entspannung nach der Arbeit.

