

---

# Simulation des Magnetsystems des 180° Streuexperiments am QClam-Spektrometer in CST Studio

---

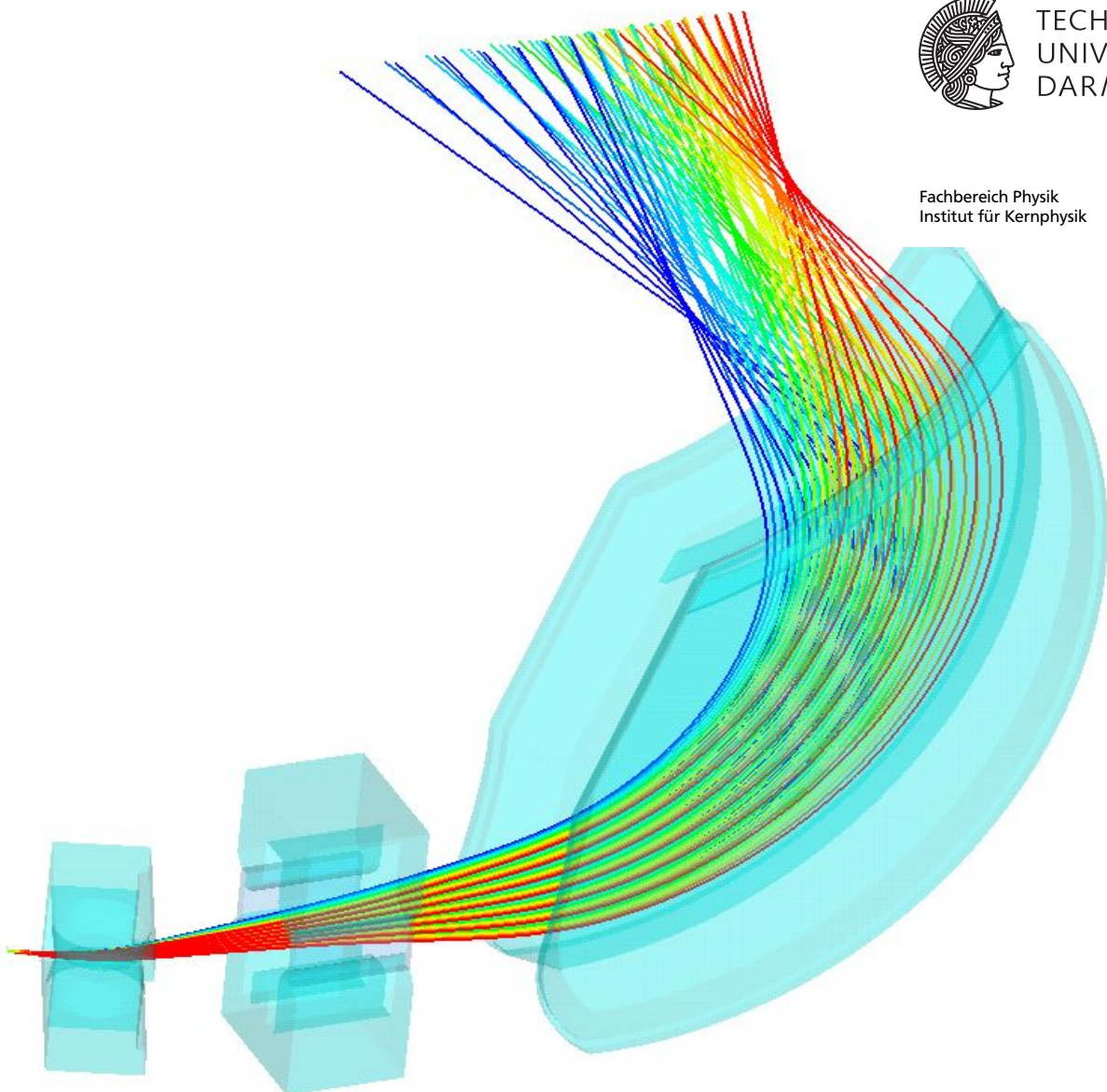
Simulation of the magnetic system of the 180° scattering-experiment at the  
QClam-Spectrometer in CST Studio  
Bachelor-Thesis von Sebastian Heil  
November 2011

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Physik  
Institut für Kernphysik



Simulation des Magnetsystems des 180° Streuexperiments am QClam-Spektrometer in CST Studio  
Simulation of the magnetic system of the 180° scattering-experiment at the QClam-Spectrometer in  
CST Studio

Vorgelegte Bachelor-Thesis von Sebastian Heil

1. Gutachten: Prof. Dr. Peter von Neumann-Cosel
2. Gutachten: Belash Bozorgian

Tag der Einreichung:

---

## Zusammenfassung

---

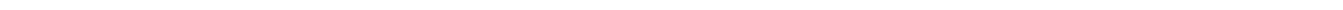
Für die Untersuchung der Kernstruktur werden Streuexperimente verwendet, wobei sich ein Streuwinkel von  $180^\circ$  besonders eignet, um magnetische Formfaktoren zu bestimmen. In dieser Thesis soll das QClam-Spektrometer und das zugehörige  $180^\circ$  Streusystem am Institut für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt in CST Studio simuliert werden. Während die Simulationen des Separationsmagneten und des Pentapols die gemessenen Feldverteilungen gut reproduzieren, fällt die Beurteilung der Simulation des QClam-Dipols mangels Messdaten schwer. Die Simulationen des Gesamtsystems zeigen unerwartete Abbildungsfehler, weshalb die Fokalebenen nicht bestimmt werden können.

---

## Abstract

---

Scattering experiments are used for investigation of nuclear structure. For measuring magnetic form factors a scattering angle of  $180^\circ$  is particularly favourable. This thesis presents simulations of the QClam spectrometer and the associated  $180^\circ$  scattering system at the Institut für Kernphysik at Technische Universität Darmstadt by means of CST Studio. While simulations of the separation magnet and pentapole give appropriate illustration of the measured magnetic field, evaluating the simulation of the QClam dipole proves to be difficult due to the lack of measured data. Simulations of the complete system show unexpected aberrations which hinder the determination of the focal planes.

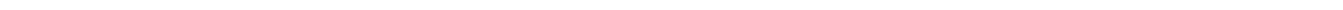


---

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1. Elektronenstreuung . . . . .	6
2.2. 180° Streuexperiment . . . . .	8
2.3. Detektoren . . . . .	9
2.4. CST Studio . . . . .	10
<b>3. Geometrische Abmessungen und Näherungen</b>	<b>12</b>
3.1. Geometrie des Separationsmagneten . . . . .	12
3.2. Geometrie des Pentapols . . . . .	13
3.2.1. Näherung der Polschuh-Geometrie durch Kreissegmente . . . . .	13
3.2.2. Interpolation einer Skizze . . . . .	13
3.2.3. Geometriedaten des Herstellers . . . . .	14
3.3. Geometrie des QClam-Dipols . . . . .	15
<b>4. Simulation der einzelnen Komponenten</b>	<b>16</b>
4.1. Simulation des Separationsmagneten . . . . .	16
4.1.1. Messung der Feldverteilung . . . . .	19
4.1.2. Vergleich der gemessenen Daten mit der Simulation . . . . .	19
4.2. Simulation des Pentapols . . . . .	22
4.2.1. Messung der Feldverteilung . . . . .	23
4.2.2. Vergleich der gemessenen Daten mit der Simulation . . . . .	23
4.3. Simulation des QClam-Dipols . . . . .	26
<b>5. Simulation des gesamten Systems</b>	<b>31</b>
5.1. QClam-Betrieb . . . . .	32
5.1.1. Vertikale Streuebene . . . . .	32
5.1.2. Horizontale Streuebene . . . . .	34
5.2. 180° Betrieb . . . . .	35
5.2.1. Vertikale Streuebene . . . . .	35
5.2.2. Horizontale Streuebene . . . . .	36
5.3. Fokalebenen . . . . .	38
<b>6. Fazit</b>	<b>40</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>41</b>
<b>B. Anhang zum Pentapol</b>	<b>43</b>
<b>C. Anhang zum QClam</b>	<b>50</b>



---

## 1 Einleitung

---

Seit der Entdeckung des Atomkerns durch Rutherford [Rut11] im Jahre 1911 ist die Untersuchung der Struktur von Materie durch Streuexperimente zu einem der grundlegenden Messverfahren der Kernphysik geworden. So wird auch heute noch die Kernstruktur mittels Elektronenstreuung mit dem S-DALINAC (Superconducting-Darmstadt-Linear-Accelerator) [Ric96] am Institut für Kernphysik an der Technischen Universität Darmstadt untersucht.

Dazu gibt es am S-DALINAC unter anderem das QClam-Spektrometer [Kni91] mit einem Aufbau, der die Messung von Elektronen unter einem Streuwinkel von  $180^\circ$  erlaubt [Lüt94]. Dabei werden der ankommende Elektronenstrahl und die um  $180^\circ$  gestreuten Elektronen durch einen Separationsmagneten getrennt. Der bisher verwendete Separationsmagnet führte jedoch durch seinen geringen Polschuhabstand und die damit einhergehende Interaktion mit dem Strahlhalo zu einem Strahlungsuntergrund, der mit einem neuen Separationsmagneten reduziert werden soll. Für die Inbetriebnahme ist neben den mechanischen Anpassungen der Streukammer an den neuen Magneten die Bestimmung der Abbildungseigenschaften des modifizierten Detektorsystems notwendig.

Im Zuge dieser Bachelor-Thesis soll daher mit Hilfe der Simulations-Software CST Studio das Spektrometer simuliert werden. Dazu werden erst Simulationen der einzelnen Komponenten erstellt und die resultierenden Magnetfelder überprüft. Anschließend wird aus den Komponenten das Spektrometer zusammengesetzt. Durch die Simulation von Elektronenstrahlen unterschiedlicher Energie bei ausgezeichneten Streuwinkeln in horizontaler und vertikaler Ebene werden die Abbildungseigenschaften des QClam-Spektrometers und des  $180^\circ$  Systems ermittelt, um daraus die Lage der Fokalebene zu bestimmen.

In Kapitel 2 werden dafür zunächst die Grundlagen der Elektronenstreuung, des  $180^\circ$  Streusystems, des QClam-Spektrometers und der Simulations-Software erläutert.

Anschließend fasst Kapitel 3 die verwendeten Informationen zu den Geometrien der einzelnen Komponenten des Detektorsystems zusammen und erläutert die durch fehlende Informationen bedingten Näherungen.

Im Anschluss werden in Kapitel 4 die Simulationen der einzelnen Komponenten beschrieben und mit Messungen verglichen.

Abschließend werden in Kapitel 5 die Simulationen des Detektorsystems mit und ohne Separationsmagnet geschildert sowie die Trajektorien von Elektronen unter verschiedenen Streuwinkeln untersucht, um daraus letztlich die Lage der Fokalebene zu ermitteln.

---

## 2 Grundlagen

---

Um die Struktur von Atomkernen zu untersuchen, nutzt man im Allgemeinen die Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit dem Kern. Dabei werden diese mit festgelegter Energie entweder auf ein feststehendes Target geschossen oder zur Kollision mit einem zweiten Teilchenstrahl gebracht. Aus der resultierenden Winkel- und Energieverteilung der gestreuten Projektile können die Eigenschaften des Targets ermittelt werden.

In diesem Kapitel wird speziell auf die Elektronenstreuung und die Realisierung einer Messung unter einem Streuwinkel von  $180^\circ$  eingegangen. Weiterhin wird die Funktionsweise des QClam-Spektrometers zur Detektion der Elektronen erläutert und die verwendete Simulations-Software beschrieben.

---

### 2.1 Elektronenstreuung

---

Als Leptonen wechselwirken Elektronen nicht über die starke Wechselwirkung. Aufgrund ihrer Ladung unterliegen sie jedoch der Coulomb-Wechselwirkung und eignen sich daher besonders, um die Ladungs- und somit die Protonenverteilung im Atomkern zu untersuchen. Begünstigend kommt hinzu, dass das Elektron keine innere Struktur besitzt und mit einem Radius  $R_e < 10^{-22}$  m als punktförmig angenommen wird [Deh88].

Bei Betrachtung der Streuung eines relativistischen Elektrons an einer punktförmigen, spinlosen Ladung, beschreibt die Mottsche Streuformel

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2}{4\mathbf{p}^2\beta^2 \sin^4(\theta/2)} [1 - \beta^2 \sin^2(\theta/2)] \quad (2.1)$$

die Coulomb-Wechselwirkung und gibt den Wirkungsquerschnitt  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  für eine Streuung in ein infinitesimales Raumwinkelintervall  $d\Omega$  an [MoM65], wobei

- $\beta = v/c$ ,
- $\alpha$  die Feinstrukturkonstante,
- $\mathbf{p}$  den Impuls des Elektrons und
- $\theta$  den Streuwinkel bezeichnen.

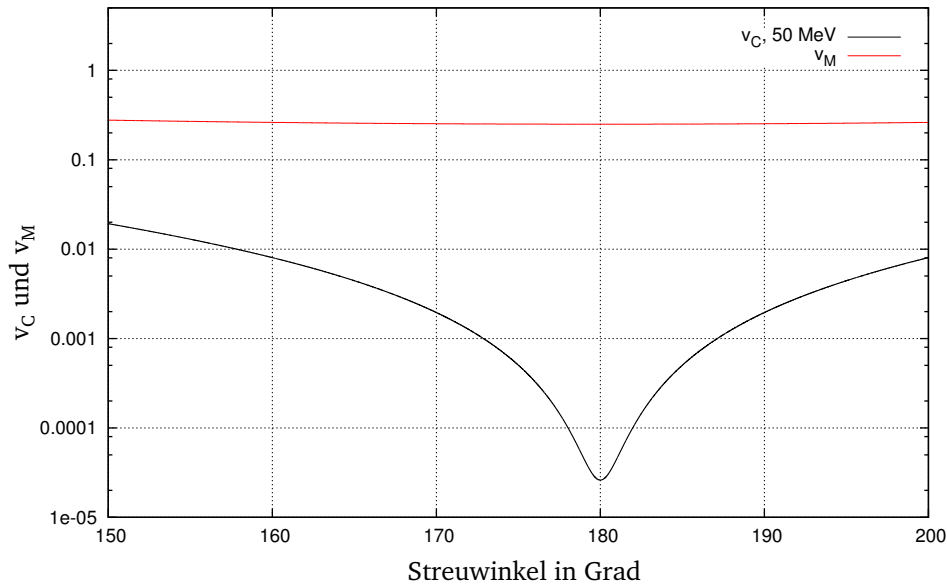
Wird stattdessen die Wechselwirkung eines Elektrons mit einem ausgedehnten Atomkern betrachtet, so lässt sie sich nach [Ran66] durch die Summe eines Coulomb-Anteils

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_C = \left(\frac{Ze^2}{E_0}\right)^2 \frac{1}{\eta} \frac{\cos^2(\theta/2) + \gamma^{-2} \sin^2(\theta/2)}{4 \sin^4(\theta/2)} |F_C|^2 \quad (2.2)$$

und eines magnetischen Anteils

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M = \left(\frac{Ze^2}{M_p c^2}\right)^2 \frac{1}{\eta^2} \frac{1 + \sin^2(\theta/2)}{8 \sin^4(\theta/2)} \frac{2(J+1)}{3J} \mu_N^2 |F_M|^2 \quad (2.3)$$





**Abbildung 2.1.:** Die Winkelabhängigkeit der Faktoren  $v_M$  und  $v_C$  des Wirkungsquerschnitts für Elektronen mit einer Energie von 50 MeV zeigt, dass für Winkel um  $180^\circ$  der Coulomb-Anteil stark unterdrückt ist.

beschreiben, wobei

- $Z \cdot e$  die Kernladung,
- $E_0$  die Energie des Elektrons,
- $M_p$  die Masse des Protons,
- $\eta = 1 + \frac{2E_0}{M_t c^2} \sin^2(\theta/2)$  mit der Masse des Targetkerns  $M_t$ ,
- $\gamma$  den Lorentzfaktor,
- $J$  den Gesamtdrehimpuls des Targetkerns,
- $\mu_N$  das Kernmagneton und
- $F$  den jeweiligen Formfaktor bezeichnen.

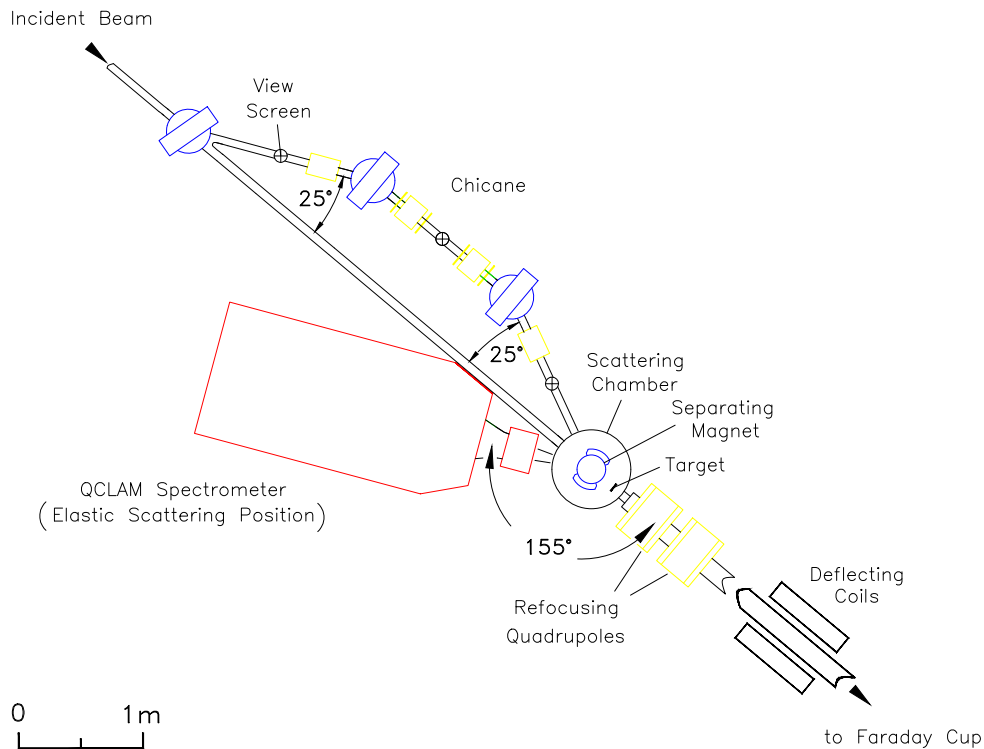
In Abbildung 2.1 ist die Winkelabhängigkeit der Faktoren

$$v_C = \frac{\cos^2(\theta/2) + \gamma^{-2} \sin^2(\theta/2)}{4 \sin^4(\theta/2)} \quad (2.4)$$

und

$$v_M = \frac{1 + \sin^2(\theta/2)}{8 \sin^4(\theta/2)} \quad (2.5)$$

der Wirkungsquerschnitte dargestellt. Der Faktor des Coulomb-Anteils  $v_C$  ist aufgrund der Abhängigkeit von  $\gamma$  energieabhängig und exemplarisch für Elektronen der Energie 50 MeV dargestellt, während der magnetische Faktor energieunabhängig ist. Es zeigt sich, dass für einen Streuwinkel von  $180^\circ$  der Coulomb-Anteil des Wirkungsquerschnitts stark unterdrückt ist. Zusätzlich ist bei diesem Winkel der Untergrund durch Bremsstrahlung reduziert [BrD04], weshalb sich ein Streuwinkel von  $180^\circ$  besonders eignet, um magnetische Formfaktoren zu messen.



**Abbildung 2.2.:** Eine Skizze des 180° Streuexperiments. Ablenkmagnete (blau) lenken den Elektronenstrahl durch die Schikane in die Streukammer. Der Separationsmagnet lenkt den Strahl zurück auf die ursprüngliche Bahn, auf der dieser nach dem Target im Faraday Cup gestoppt wird. Die am Target um 180° gestreuten Elektronen werden vom Separationsmagneten in das QClam-Spektrometer (rot) gelenkt. Des Weiteren sind die Fokussiermagnete (gelb) eingezeichnet. [Lüt94]

Bedingt durch die endliche Apertur eines Detektorsystems ist es jedoch nur möglich in einem endlichen Winkelintervall um 180° zu messen, wobei eine Verkleinerung der Apertur zu einem günstigeren Verhältnis von  $v_M$  zu  $v_C$  führt, gleichzeitig jedoch die Zählrate reduziert und somit die Messdauer erhöht.

## 2.2 180° Streuexperiment

Die Messung bei einem Streuwinkel von 180° birgt die Problematik, dass der Detektor nicht den Weg des einfallenden Strahls blockieren darf. Dies macht es erforderlich den einfallenden Strahl und die um 180° gestreuten Projektile zu trennen.

Für den am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt vorhandenen Aufbau wird dies durch einen Separationsmagneten realisiert. Der Aufbau ist in Abbildung 2.2 skizziert. Der Elektronenstrahl wird durch eine Schikane abgelenkt und unter einem Winkel von 25° in die Streukammer geführt. In dieser befindet sich der Separationsmagnet, der den Elektronenstrahl um 25° zurück auf den ursprünglichen Strahlverlauf lenkt. Hinter dem Separationsmagneten trifft der Elektronenstrahl auf das Target und wird danach im Faraday Cup gestoppt. Die am Target um 180° elastisch gestreuten Elektronen werden durch den Separationsmagneten wiederum um 25° abgelenkt und treten dann in das QClam-Spektrometer ein.

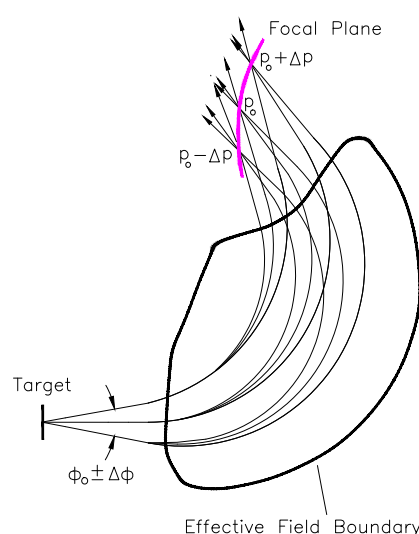
## 2.3 Detektoren

Um die Resultate eines Streuexperimentes aufzunehmen, werden heutzutage Detektorsysteme verwendet, die im Allgemeinen aus verschiedenen Detektoren zusammengesetzt sind. Zwei grundlegende Konzepte bei Detektoren sind die Kalorimeter und die Spurenkammern.

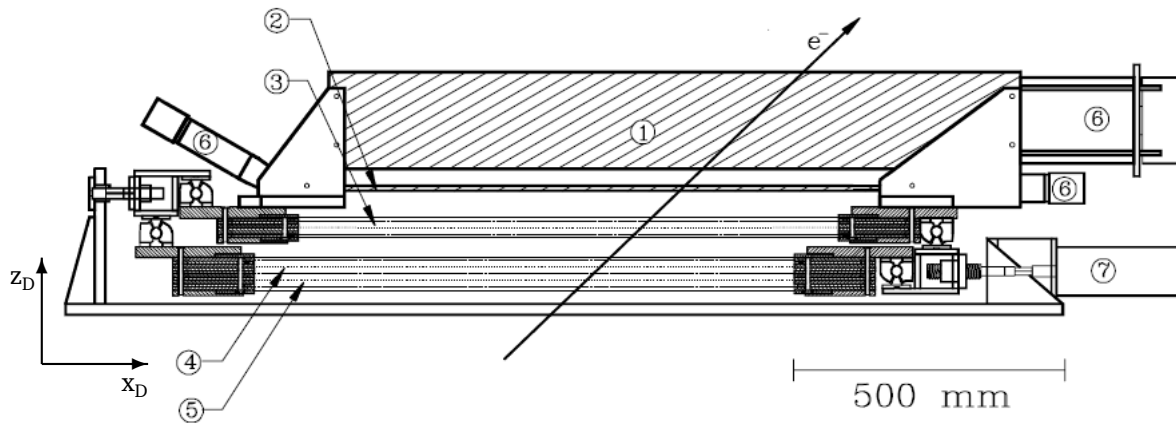
Kalorimeter werden verwendet, um die Energie eines Teilchens zu bestimmen, indem es seine gesamte Energie darin deponiert. Dafür werden beispielsweise Szintillatoren verwendet, die beim Durchgang von ionisierender Strahlung die deponierte Energie in Form von Licht abgeben. In Kombination mit einem photosensitiven Detektor, zum Beispiel einer Photodiode, kann die deponierte Energie bestimmt werden. Da bei hinreichender Größe des Szintillators die gesamte Energie in diesem deponiert wird, kann somit die Gesamtenergie eines Teilchens bestimmt werden.

Spurenkammern dienen primär der Rekonstruktion der Trajektorie im Detektor. Dies wird beispielsweise mit einer Drahtkammer erreicht, bei der in konstantem Abstand Drähte durch das Kammervolumen gespannt sind. Zwischen den Drähten liegt eine Spannung an, sodass die von ionisierender Strahlung erzeugten Ladungen von diesen Drähten gesammelt werden. Durch Auswertung der Signale der einzelnen Drähte und ihrer zeitlichen Abfolge kann auf die Position der Ionisationen und somit die Trajektorie rückgeschlossen werden, wobei die Auflösung durch den Abstand der Drähte bedingt wird. Misst man mit einem weiteren Detektor den Zeitpunkt des Teilchendurchgangs und dessen Zeitdifferenz zum Auftreten des Signals in der Drahtkammer, lässt sich bei gegebener Driftgeschwindigkeit der Ladungen die Ortsauflösung erhöhen, wobei der Detektor dann als Driftkammer bezeichnet wird.

Für die Messung des Zeitpunkts des Teilchendurchgangs können neben den bereits erwähnten Szintillatoren Tscherenkow-Detektoren verwendet werden. Diese nutzen die Tscherenkow-



**Abbildung 2.3.:** Eine Prinzipskizze des QClams mit den Elektronenbahnen für drei verschiedene Impulse und vertikale Streuwinkel. Die Elektronenbahnen gleicher Impulse schneiden sich auf der Fokalebene, hinter der der Detektor liegt. [Lüt94]



**Abbildung 2.4.:** Eine Darstellung des Detektorsystems des QClam-Spektrometers. [Rei00]  
 1 Tscherenkow-Detektor, 2 Szintillator, 3-5 Vieldrahtdriftkammern,  
 6 Photomultiplier, 7 Verschiebevorrichtung

Strahlung, die auftritt, wenn sich ein geladenes Teilchen schneller als die lokale Lichtgeschwindigkeit in einem Medium bewegt, die dann durch photosensitive Detektoren registriert werden. Da nur geladene Teilchen Tscherenkow-Strahlung erzeugen, eignen sich diese Detektoren auch für die Selektion von Teilchenarten.

Das QClam-Spektrometer ist eines von zwei Spektrometern am S-DALINAC und somit auf die Detektion von Elektronen ausgelegt. Für die Bestimmung der Energie detektierter Elektronen wird am QClam-Spektrometer die dispersive Eigenschaft eines Dipols, dessen Polschuhe gegeneinander geneigt sind, genutzt. Diese Neigung führt zu einem Feldgradienten, der es ermöglicht, Elektronen gleicher Energie zu fokussieren. Das Prinzip wird in Abbildung 2.3 für drei verschiedene Energien und vertikale Streuwinkel verdeutlicht. Da die resultierende Fokalebene gekrümmt ist, das Detektorsystem hingegen gerade, kann aus der Ortsinformation des Detektorsystems nicht direkt auf die Energie des Elektrons geschlossen werden. Deshalb ist das Detektorsystem darauf ausgelegt, die Trajektorie eines Elektrons zu bestimmen, sodass der Durchstoßpunkt in der Fokalebene nachträglich berechnet werden kann. Abbildung 2.4 zeigt die verwendete Detektoranordnung. Die Driftkammern 4 und 5 liefern die  $X_D$ -Koordinate der Durchstoßpunkte in der Detektorebene und den Durchstoßwinkel  $\vartheta_D$ . Die um  $26,5^\circ$  in der Detektorebene gedrehte Driftkammer 3 ermöglicht die Ermittlung der  $Y_D$ -Koordinate der Durchstoßpunkte. Ein nachfolgender Szintillator bestimmt den Zeitpunkt des Elektronendurchgangs. Zusätzlich wird das Signal eines Tscherenkow-Detektors zum Triggern verwendet, um den Untergrund durch Gammastrahlung zu reduzieren.

## 2.4 CST Studio

CST Studio ist eine Simulationsumgebung für elektromagnetische Feldprobleme auf Basis der Methode der finiten Elemente. Bei den verwendeten Modulen handelt es sich um das „CST EM Studio“ und das „CST Particle Studio“.

Für die Simulation werden Volumen definiert, denen Materialeigenschaften zugewiesen werden. Es wird in dieser Arbeit vor allem zwischen Materialien mit linearer und nicht-linearer Permeabilität unterschieden. Im Gegensatz zu linearen Materialien ist für nicht-lineare Materia-

---

lien die Permeabilität abhängig von der vorherrschenden magnetischen Feldstärke. Zusätzlich wird mittels definierter Spulen und Strompfade die zu simulierende Stromverteilung übergeben.

Aus diesen Informationen wird auf einem definierten Gitter das Magnetfeld errechnet. Die Berechnung erfolgt für lineare Materialien direkt aus der gegebenen Stromverteilung. Für nicht-lineare Materialien wird aus der Feldverteilung eines linearen Materials eine Permeabilitätsverteilung ermittelt, aus der dann eine neue Feldverteilung errechnet wird. Durch Wiederholung dieser Schritte wird die Permeabilitäts- und Feldverteilung approximiert. Jeder einzelne Zyklus der Berechnung dauert etwa genauso lange wie die Simulation des linearen Materials. Auf diese Weise werden im Verlauf der Thesis die Feldverteilungen ermittelt.

Zusätzlich zu der Berechnung der Magnetfelder werden mit CST Studio die Trajektorien von Elektronen ausgehend von definierten Quellen simuliert, indem sie durch Vorwärtsiteration der Startbedingungen der Elektronen ermittelt werden.

---

### 3 Geometrische Abmessungen und Näherungen

---

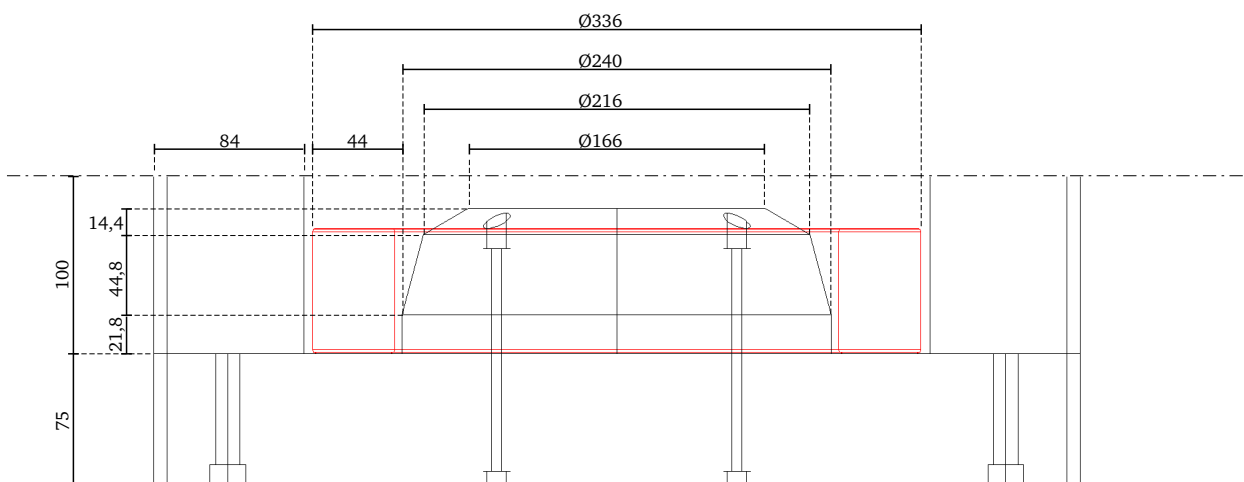
Um die Feldverteilung der verschiedenen Komponenten zu simulieren, mussten diese in CST Studio nachgebildet werden. Dafür wurden die kombinierten Informationen aus technischen Zeichnungen, Skizzen und Messungen verwendet. Dennoch war es an einigen Stellen unumgänglich, Formen durch Näherungen abzuschätzen, da die notwendigen Unterlagen nicht zur Verfügung standen. Im Folgenden wurden die zugrunde liegenden geometrischen Informationen zusammengefasst sowie die vorgenommenen Näherungen erläutert.

---

#### 3.1 Geometrie des Separationsmagneten

---

Der Separationsmagnet ist ein Dipol mit runden Polschuhen und einem Polschuhabstand von 38 mm. Da dieser frei zugänglich war, wurden die Maße anfangs von Hand abgemessen. Für die Bereiche, die durch die Spulen schwer zugänglich waren, wurden CAD-Zeichnungen herangezogen, anhand derer auch die restlichen Abmessungen überprüft werden konnten. Die verwendeten Daten wurden in den Abbildungen 3.1 und A.2 zusammengefasst.



**Abbildung 3.1.:** Eine Frontansicht der unteren Hälfte des Separationsmagneten. Die obere Hälfte ist spiegelbildlich. Alle Angaben sind in Millimeter. Details wie Bohrungen und Abschrägungen des Jochs wurden in der Simulation nicht berücksichtigt.

---

## 3.2 Geometrie des Pentapols

---

Bei dem Pentapol handelt es sich um einen Quadrupolmagneten, der durch einen neutralen, fünften Pol ergänzt wurde. Als integraler Bestandteil des QClam-Spektrometers war dieser nicht frei zugänglich, weshalb Abmessungen von Hand lediglich in begrenztem Maße möglich waren. Die grundlegenden Abmessungen des Pentapols konnten aus der technischen Zeichnung B.7 vollständig abgelesen werden. Bezüglich der Formen der Polschuhe wurde in der technischen Zeichnung jedoch auf Tabellen verwiesen, die zunächst nicht zur Verfügung standen. Somit war es unumgänglich die Polschuh-Geometrie anzunähern.

Ziel dabei war, durch schrittweise Anpassung der anfänglich geschätzten Geometrie die gemessene Feldverteilung zu reproduzieren. Insbesondere wurde angenommen, dass der Pentapol entlang der Strahlachse eine gleichbleibende Geometrie besitzt.

Nachdem die Reproduktion des Magnetfelds mit den anfänglichen Ansätzen nicht gelang, wurden die Konstruktionsunterlagen beim Hersteller Bruker BioSpin GmbH angefragt. Diese wurden in B.7 bis B.13 aufgeführt.

---

### 3.2.1 Näherung der Polschuh-Geometrie durch Kreissegmente

---

Der erste Ansatz die Polschuh-Geometrie anzunähern war, diese durch jeweils ein Kreissegment zu beschreiben. Dazu wurden die Radien der Kreise auf Grundlage der technischen Zeichnung mittels geometrischer Betrachtungen abgeschätzt. Des Weiteren wurde versucht die Radien am Pentapol zu messen, was aufgrund der schlechten Zugänglichkeit nur ungenau möglich war. Die dabei ermittelten Radien wurden in Tabelle 3.1 aufgeführt.

---

### 3.2.2 Interpolation einer Skizze

---

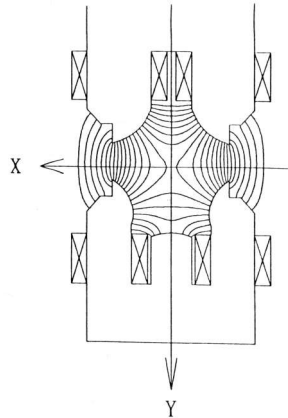
Nachdem die Ergebnisse der Simulationen des Pentapols mit kreisförmigen Polschuhen nicht der erwarteten Feldverteilung entsprachen, wurde versucht auf anderen Wegen Informationen über

Pol	$R_{\text{Fit}}$	$R_{\text{techn.Zeichn.}}$	$R_{\text{gemessen}}$	$R_{\text{Hersteller}}$
oben links	123,5 mm	113 mm	117,8 mm	126,0 mm
oben rechts	127,2 mm			
unten links	93,3 mm	86 mm	85,3 mm	77,2 mm
unten rechts	93,8 mm			
mitte	130,2 mm	130 mm	136,7 mm	140,5 mm

**Tabelle 3.1.:** Liste der ermittelten Radien für die Näherung der Polschuh-Geometrie des Pentapols. Diese wurden aus Abbildung 3.2 des Magneten durch Fitten von Kreisfunktionen ermittelt, aus der technischen Zeichnung in Abbildung B.7 abgeschätzt und durch Messung am Quadrupol erhalten. Außerdem sind die aus den Herstellerdaten ermittelten Radien aufgeführt. Da alle genannten Radien lediglich als Startpunkte für die Simulation verwendet wurden, wurden keine expliziten Unsicherheitsbetrachtungen vorgenommen.

die Polform zu erhalten. Ein Ansatz beruhte auf der in Abbildung 3.2 dargestellten Skizze des Pentapols mit seiner Feldverteilung, von der angenommen wurde, dass sie maßstabsgetreu ist. Dementsprechend wurde versucht, die Polform durch Ablesen einzelner Punkte und anschließendes Fitten von Polynom- und Kreisfunktionen zu erhalten. Dies ist für jeden der fünf Pole in den Abbildungen B.1, B.2 und B.3 dargestellt.

Wie sich zeigte, wurden die Polformen in Abbildung 3.2 gut durch Kreisabschnitte beschrieben, weshalb die daraus ermittelten Radien ebenfalls in Tabelle 3.1 aufgeführt sind.



**Abbildung 3.2.:** Eine Skizze des Pentapols und seiner Feldverteilung. An dieser wurde versucht durch Interpolation die Polschuh-Geometrie zu ermitteln. Das eingezeichnete Koordinatensystem fand keine Verwendung in der vorliegenden Thesis. [Kni91]

### 3.2.3 Geometriedaten des Herstellers

Nachdem die genannten Ansätze in Kapitel 4.2 nicht zu den erwarteten Ergebnissen führten, wurde der Hersteller des Magneten angeschrieben. Aus den zugesandten Unterlagen konnten die Polformen ermittelt werden.

Zwar ließen sich diese durch Kreisabschnitte nähern, deren Radien in Tabelle 3.1 aufgeführt wurden, dennoch wurden in den Simulationen abschließend die folgenden Polynome verwendet, da an dieser Stelle somit keine Notwendigkeit für Näherungen bestand.

Obere Pol:

$$x(y) = 226,2 + 5,122y + 0,09517y^2 + 0,001112y^3 + 7,718 \cdot 10^{-6}y^4 + 2,733 \cdot 10^{-8}y^5 + 3,802 \cdot 10^{-11}y^6 \quad (3.1)$$

Untere Pol:

$$x(y) = 879,0 - 36,73y + 0,7498y^2 - 0,008589y^3 + 0,00005645y^4 - 1,99 \cdot 10^{-7}y^5 + 2,918 \cdot 10^{-10}y^6 \quad (3.2)$$

Neutraler Pol:

$$y(x) = -135,4 - 0,006936y^2 + 0,000016y^4 - 2,989 \cdot 10^{-8}y^6 + 2,769 \cdot 10^{-11}y^8 - 1,336 \cdot 10^{-14}y^{10} + 3,13 \cdot 10^{-18}y^{12} - 2,392 \cdot 10^{-22}y^{14} - 1,317 \cdot 10^{-26}y^{16} \quad (3.3)$$

In den Abbildungen B.4, B.5 und B.6 wurden die Daten des Herstellers mit den entsprechenden Fits dargestellt.



---

### 3.3 Geometrie des QClam-Dipols

---

Der QClam-Dipol ist ein Dipol aus zwei planen, geneigten Polschuhen, der am Strahlaustritt durch einen optionalen Shim-Einsatz abgeschlossen wird.

Zur Geometrie des QClam-Dipols lagen ausführliche technische Zeichnungen vor, die in C.3 bis C.14 aufgeführt sind. Dennoch gab es Informationen zu Details, die nicht zur Verfügung standen. Diese betrafen einerseits den Strahleintritt des QClam-Dipols und andererseits den Shim-Einsatz. Somit war es notwendig, durch Näherungen die gewünschten Formen zu erzeugen.

Um die Polschuhform am Strahleintritt nachzubilden, wurde diese in zwei Bereiche unterteilt. Im unteren Teil wurde diese durch einen Kreisabschnitt mit einem Radius von 300 mm beschrieben. Dieser Abschnitt ging in einen sinusförmigen Verlauf mit einer Amplitude von 37,92 mm, einer Periodenlänge von 1271 mm und einer Länge von 318 mm über.

Aus dem in C.1 dargestellten Plot der Kontur des Shim-Einsatzes war es möglich, die fehlenden Daten zu dessen Geometrie durch Ablesen einzelner Punkte und anschließendes Fitten eines Polynoms zu ermitteln. Das erhaltene Polynom war

$$y(x) = -1265,38 + 0,049724 \cdot x + 0,0004637 \cdot x^2 - 8,3969 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 3,9736 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 + 3,7494 \cdot 10^{-12} \cdot x^5, \quad (3.4)$$

wobei das verwendete Koordinatensystem auf dem in der technischen Zeichnung C.11 als 7 bezeichneten Punkt um  $36,5^\circ$  in der Darstellungsebene gedreht lag.

Außerdem gab es die Diskrepanz, dass die technischen Zeichnungen einen Neigungswinkel der Polschuhe von  $2,59^\circ$  enthielten, während [Kni91] den Neigungswinkel mit  $2,54^\circ$  angab. Die Simulationen wurden fast ausschließlich mit einem Neigungswinkel von  $2,59^\circ$  durchgeführt, im Rahmen der Fehlersuche jedoch auch Simulationen mit  $2,54^\circ$ . Da die Änderung des Neigungswinkels keine Änderung am Fehler bewirkte, wurde der in den technischen Zeichnungen genannte Winkel als korrekt angenommen.

Den Abschluss des Spektrometers bildet schließlich der in Kapitel 2.3 beschriebene Detektor, der auf dem in Abbildung C.2 skizzierten Aufsatz montiert wird, der auf der in Abbildung C.13 dargestellten Vakuumkammer angebracht ist.

---

## 4 Simulation der einzelnen Komponenten

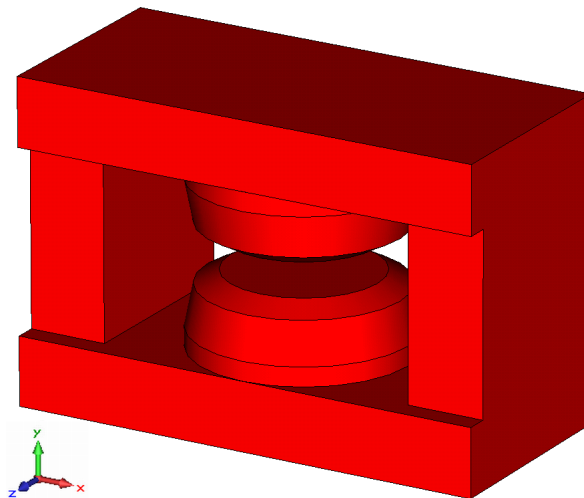
---

Nach einer anfänglichen Einarbeitung mit der Software CST Studio wurde damit begonnen die einzelnen Komponenten in jeweils isolierten Simulationen zu konstruieren und zu simulieren. Dabei wurde zunächst die Geometrie der Magnete erzeugt und durch Spulen oder Strompfade ergänzt. Ausgehend von den gewählten Materialeigenschaften und Stromstärken wurden dann die Funktionsfähigkeit der in CST Studio aufgebauten Geometrien sowie die resultierende Feldverteilung überprüft. Die einzige Materialeigenschaft, die für die durchgeführten Simulationen eine Rolle spielte, war die Permeabilitätszahl der auftretenden Materialien und ihre Abhängigkeit von dem Magnetfeld. Der Solver der Simulations-Software wurde für lineare Materialien auf eine Genauigkeit von  $10^{-9}$  eingestellt, während diese für nicht-lineare Materialien auf  $10^{-6}$  reduziert werden musste, um die Konvergenz der Simulation zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Simulationen wurden als Textdateien exportiert, mit Mathematica ausgewertet und mit Gnuplot visualisiert.

---

### 4.1 Simulation des Separationsmagneten

---



**Abbildung 4.1.:** Eine Abbildung der Simulation des Separationsmagneten. Die Spulen wurden dabei ausgeblendet, um die Sicht auf die Pole zu ermöglichen. Des Weiteren wurde das für den Separationsmagneten verwendete Koordinatensystem abgebildet, wobei dessen Ursprung in der Mitte des Separationsmagneten liegt.

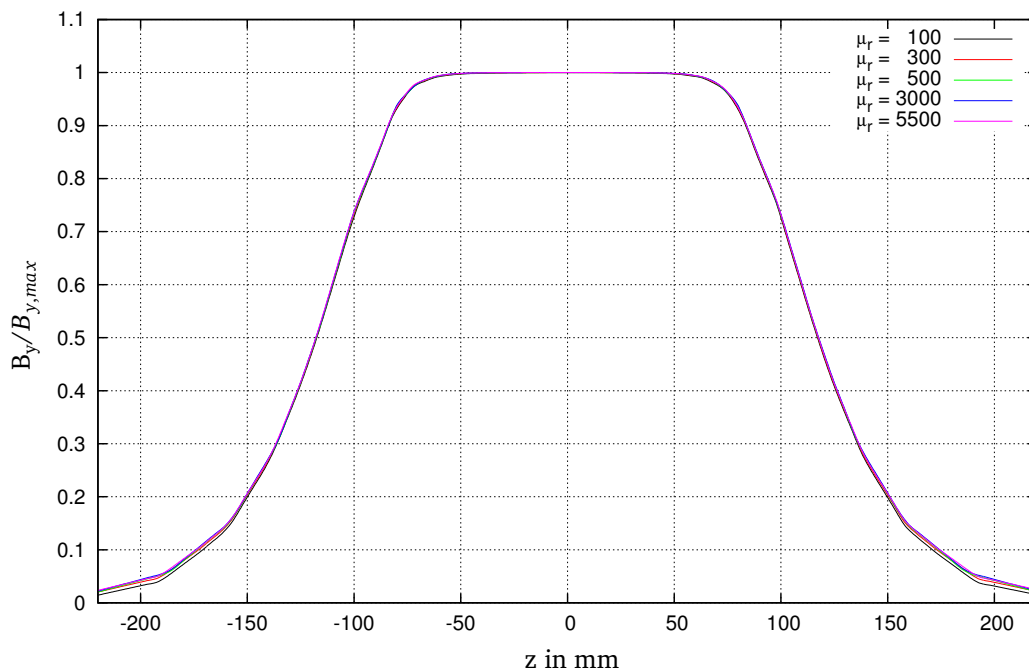
Der Separationsmagnet wurde vollständig aus Quadern und Zylindern erzeugt, die mit der Funktion „edge camfer“ für die Abschrägung der Polschuhe bearbeitet wurden. Die Spule konnte durch in CST enthaltene Funktionen direkt als Spule generiert werden. Die erzeugte Geometrie wurde in Abbildung 4.1 dargestellt. Alle Koordinaten- und Achsenangaben für den Separationsmagneten beziehen sich auf das in dieser Abbildung dargestellte Koordinatensystem.

Durch das Variieren der Auflösung des verwendeten Gitters und Vergleichen der erhaltenen Felddaten wurde eine Auflösung gewählt, die ausreichend hoch war, um akkurate Ergebnisse zu

erzeugen, ohne die Simulationsdauer und den Speicherbedarf unnötig zu vergrößern. Die Abstände der Gitterpunkte wurden zu rund 3 mm gewählt, wobei lokale Schwankungen durch die Software an kritischen Punkten automatisch erzeugt wurden. Mit diesen Einstellungen konnte der Separationsmagnet für verschiedene Stromstärken und Materialeigenschaften, insbesondere lineare und nicht-lineare Permeabilitäten, simuliert werden.

### Simulation mit linearem Material

Zunächst wurde die resultierende Magnetfeldverteilung mit einem linearen Material in Abhängigkeit der gewählten Permeabilitätszahl untersucht. Dafür wurde die Simulation für  $\mu_r = 100$ , 300, 500, 3000 und 5500 bei einer Stromstärke von jeweils 9,85 A durchgeführt. Die resultierenden Felddaten wurden aus CST Studio exportiert und mit Mathematica weiter ausgewertet. Dort wurden die Ergebnisse auf die magnetische Flussdichte im feldglatten Bereich normiert, um die verschiedenen Simulationen vergleichen zu können. Dieser Vergleich erfolgte dann entlang der Z-Achse durch das Zentrum des Separationsmagneten anhand der Y-Komponente der magnetischen Flussdichte. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen zeigte die Form der Feldverteilung keine wesentliche Abhängigkeit von der Permeabilitätszahl. Die magnetische Länge lag bei 245,8 mm mit einer Spannweite von 1,5 mm.

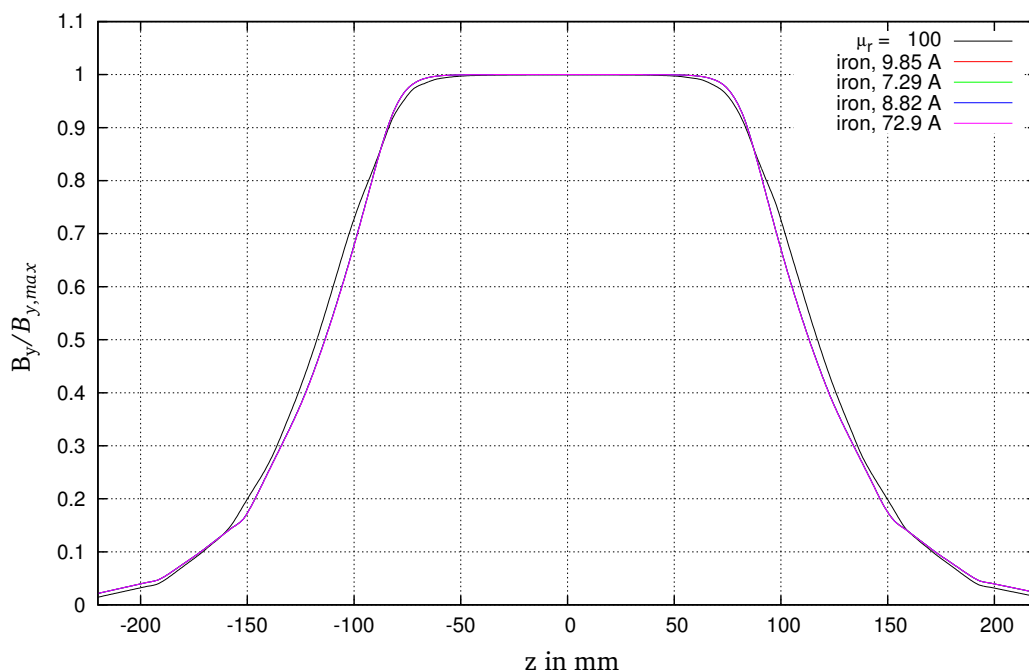


**Abbildung 4.2.:** Die mit einem linearen Material simulierten magnetischen Flussdichten  $B_Y$  entlang der Z-Achse durch das Zentrum des Separationsmagneten für verschiedene Permeabilitätszahlen. Die Flussdichten wurden jeweils auf den feldglatten Bereich normiert.

## Simulation mit nicht-linearem Material

Neben den bereits aufgeführten Simulationen mit einer konstanten Permeabilitätszahl konnten in CST Studio auch solche mit einer feldabhängigen Permeabilitätszahl durchgeführt werden. Dabei wurde auf das in CST Studio vordefinierte Material „iron“ zurückgegriffen, dessen Abhängigkeit der Permeabilitätszahl von der magnetischen Feldstärke in Abbildung A.1 angegeben wurde. Der Verlauf der Y-Komponente der magnetischen Flussdichte wurde entlang der Z-Achse durch das Zentrum des Separationsmagneten für verschiedene Stromstärken untersucht und in Abbildung 4.3 mit einem Verlauf des linearen Materials verglichen. Es zeigte sich, dass die magnetische Flussdichte für nicht-lineare Materialien einen leicht anderen Verlauf aufwies, wobei die magnetischen Längen bei 240,9 mm mit einer Spannweite kleiner 0,1 mm lagen. Demnach war die magnetische Länge für das nicht-lineare Material rund 2% kleiner als für ein lineares Material.

Um die Qualität der Simulationen einschätzen zu können, waren jedoch Vergleichsdaten notwendig, die aus der im Folgenden beschriebenen Messung stammten.



**Abbildung 4.3.:** Die mit einem nicht-linearen Material simulierte, normierte magnetische Flussdichten  $B_Y$  entlang der Z-Achse durch das Zentrum des Separationsmagneten für verschiedene Stromstärken, verglichen mit dem Verlauf für ein lineares Material.

---

### 4.1.1 Messung der Feldverteilung

---

Bereits im Rahmen eines Versuchs des Fortgeschrittenen-Praktikums „Magnetfeldmessung“ wurde die Feldverteilung des Separationsmagneten mit einem CNC-Tisch in der horizontalen Ebene durch das Zentrum des Magneten vermessen. Dabei wurde ein Gitter von 40 x 40 Punkten in Abständen von jeweils fünf Millimetern in beiden Richtungen abgefahren und die vertikale Komponente der magnetischen Flussdichte mit Hilfe einer Hall-Sonde aufgenommen. Der Magnet wurde mit einer Stromstärke von 9,85 A betrieben, wobei die magnetische Flussdichte im homogenen Bereich bei rund 62 mT lag. Diese Messdaten wurden als Grundlage verwendet, um die Ergebnisse der Simulationen des Separationsmagneten zu überprüfen.

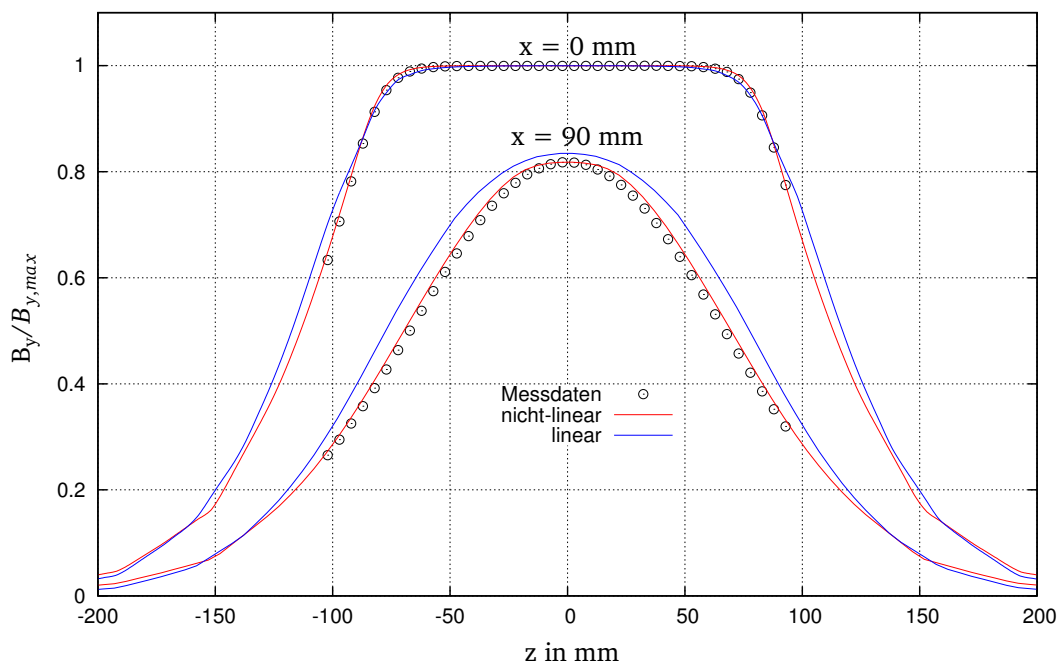
---

### 4.1.2 Vergleich der gemessenen Daten mit der Simulation

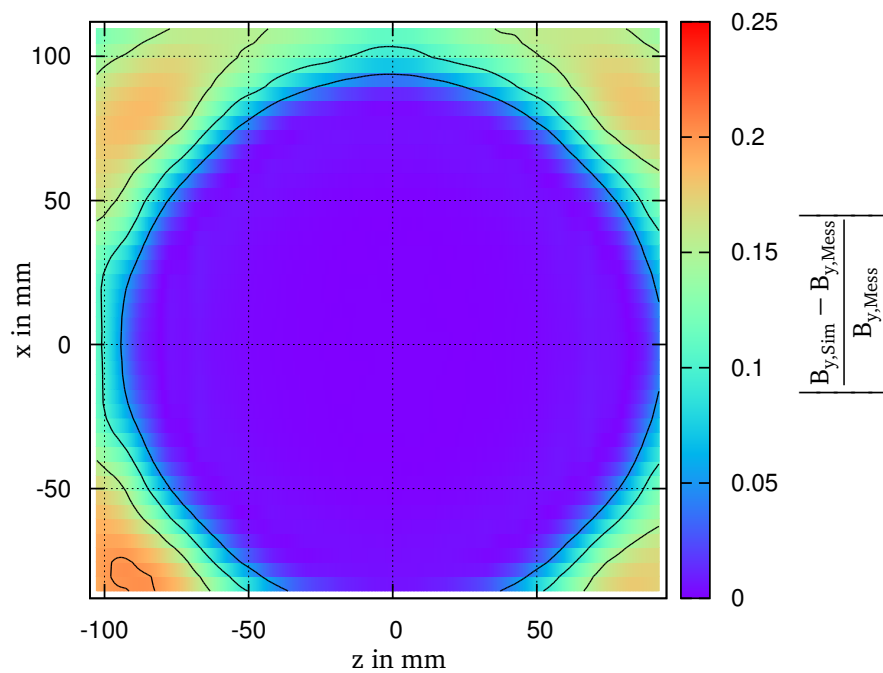
---

Die Auswertung der Simulations- und Messdaten erfolgte mit Mathematica. Der Ursprung des in der Messung verwendeten Koordinatensystems lag auf dem Startpunkt der Messung, das in Abbildung 4.1 dargestellte Koordinatensystem der Simulation hingegen im Zentrum des Separationsmagneten, sodass zunächst der Versatz der Koordinatensysteme bestimmt werden musste. Entlang der X-Koordinate wurde bereits in der Auswertung des Fortgeschrittenen Praktikums das Zentrum des Magneten ermittelt und konnte somit direkt verwendet werden. Um den Abstand in Z-Richtung zu erhalten, wurden die Mess- und Simulationsdaten bei fester X-Koordinate entlang der Y-Achse in Mathematica durch Interpolationsfunktionen genähert. Zusätzlich wurden die Simulationsdaten auf die Messdaten normiert, um die Feldverteilungen vergleichen zu können, ohne die simulierte Stromstärke exakt anpassen zu müssen. Dieses Vorgehen war gerechtfertigt, da die Form der simulierten Flussdichte für nicht-lineare Materialien bei Änderungen der Stromstärke in guter Näherung unverändert blieb. Mit den so erhaltenen Interpolationsfunktionen wurde unter Ausnutzung der Symmetrie der Feldverteilung die Z-Koordinate des Zentrums ermittelt, was einen direkten Vergleich der Simulations- und Messdaten ermöglicht.

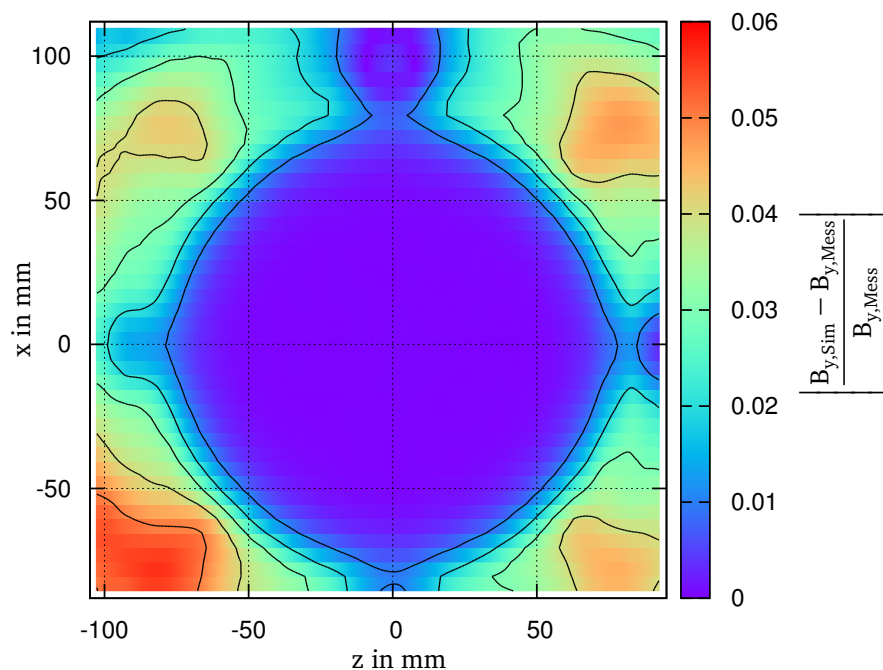
Dieser Vergleich wurde in Abbildung 4.4 exemplarisch für eine Gerade durch das Zentrum des Magneten sowie das Randfeld entlang der Z-Achse dargestellt. Des Weiteren wurde die relative Abweichung der auf den feldglatten Bereich normierten Simulationsdaten von den Messdaten über die gesamte gemessene Fläche in den Abbildungen 4.5 und 4.6 für ein lineares und ein nicht-lineares Material dargestellt. Es zeigte sich, dass die Simulation mit dem nicht-linearen Material die gemessenen Daten mit einer maximalen relativen Abweichung von unter 6% wiedergab, während die Simulationen mit linearem Material Abweichungen von bis zu 20% aufwiesen. Da diese Abweichungen jedoch ausschließlich im Randfeld auftraten, konnten auch die Simulationen mit linearem Material als hinreichend genau angesehen werden, sodass sie für die Simulationen des gesamten Systems in Kapitel 5 verwendet werden konnten.



**Abbildung 4.4.:** Ein Vergleich der simulierten vertikalen Flussdichte mit den gemessenen Werten entlang der Z-Achse des Separationsmagneten. Der obere Graph wurde durch das Zentrum, der Untere in einem Abstand von 90 mm vom Mittelpunkt aufgenommen. Es zeigte sich deutlich, dass der zentrale Verlauf durch lineare und nicht-lineare Materialien gut beschrieben wurde, während im Randfeld und somit für den gesamten unteren Graphen deutliche Abweichungen der linearen Simulationen auftraten.



**Abbildung 4.5.:** Ein Konturplot der relativen Abweichung der simulierten von der gemessenen Y-Komponente der magnetischen Flussdichte des Separationsmagneten, simuliert mit einem linearen Material mit  $\mu_r = 100$ . Der feldglatte Bereich wurde gut wiedergegeben, im Randfeld treten Abweichungen von bis zu 20% auf.



**Abbildung 4.6.:** Ein Konturplot der relativen Abweichung der simulierten von der gemessenen Y-Komponente der magnetischen Flussdichte des Separationsmagneten, simuliert mit dem nicht-linearen Material „iron“. Hier wurde das Randfeld mit relativen Abweichungen von maximal 6% simuliert.

---

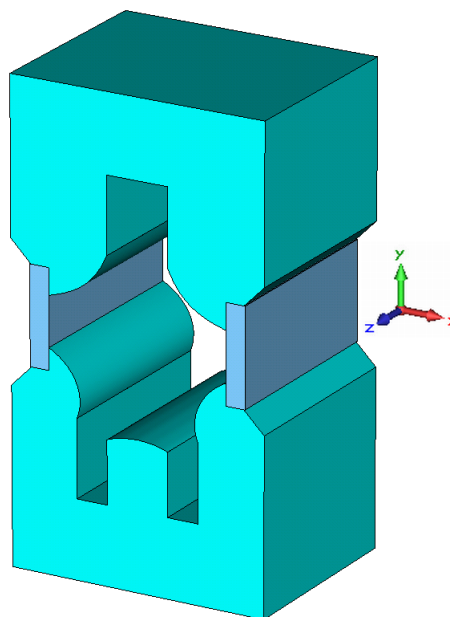
## 4.2 Simulation des Pentapols

---

Der Pentapol wurde in CST Studio fast vollständig aus Quadern zusammengesetzt. Lediglich die Polschuhe wurden durch analytisch definierte Flächen erzeugt, wobei das Hauptaugenmerk wie in Kapitel 3.2 dargelegt auf Kreisabschnitten lag. Die Geometrie wurde daher so erzeugt, dass die Radien und Anfangswinkel der Pole als Parameter übergeben werden konnten ohne die Geometrie bearbeiten zu müssen. Die konstruierte Geometrie wurde in Abbildung 4.7 mit dem im Folgenden verwendeten Koordinatensystem dargestellt.

Analog zu der Simulation des Separationsmagneten bestand für den Pentapol die Wahl eines linearen oder nicht-linearen Materials, wobei davon ausgegangen wurde, dass alle Pole aus dem gleichen Material gefertigt wurden. Bezüglich der nicht-linearen Materialien zeigte sich jedoch nach der ersten Simulation, dass die Anzahl der rund 40 notwendigen Simulationszyklen zu groß war, um in der endgültigen Simulation verwendet zu werden. Daher wurde sich in den Simulationen auf lineares Material konzentriert, dessen Permeabilitätszahl zwar im Rahmen der Fehlersuche variiert wurde, für die vorliegenden Ergebnisse jedoch immer  $\mu_r = 300$  betrug.

Das für die Simulationen verwendete Gitter hatte im Allgemeinen eine Maschenweite von 2 mm entlang der X- und Y-Achse und 10 mm entlang der Z-Achse. Im Verlauf der Fehlersuche wurde die Auflösung an den Polschuhen bis auf 0,35 mm verfeinert und beibehalten, um sie als Fehlerquelle auszuschließen.



**Abbildung 4.7.:** Die simulierte Geometrie des Pentapols mit den endgültigen Polformen aus den Herstellerdaten. Die Spulen wurden dabei ausgeblendet, um die Polformen vollständig sichtbar zu machen. Außerdem wurde das für den Pentapol verwendete Koordinatensystem abgebildet, wobei dessen Ursprung im Konstruktionsursprung liegt.



---

## 4.2.1 Messung der Feldverteilung

---

Um die Simulationsergebnisse des Pentapols überprüfen zu können, standen zwei Datensätze zur Verfügung. Die in Tabelle A.1 aufgeführten Messwerte der vertikalen magnetischen Flussdichte wurden aus [Kni91] entnommen und dort bei einer Stromstärke von 225 A gemessen. Außerdem wurde im Zuge dieser Bachelor-Thesis die Feldverteilung in vertikaler Richtung des Pentapols mit einem CNC-Tisch gemessen.

Vor der Messung wurde die Funktionsfähigkeit des Kühlsystems und der Stromversorgung des QClam-Detektors sichergestellt sowie dessen Steuerung erlernt. Nachdem das Spektrometer betriebsbereit war, wurde der CNC-Tisch vor der Streukammer aufgebaut, wobei ein Defekt des Antriebs die Messung verzögerte. Da sich der Pentapol im eingebauten Zustand befand, musste die Messsonde über die Streukammer durch das Strahlrohr eingeführt werden. Hierfür wurde eine Aluminiumhalterung konstruiert, die vom CNC-Tisch bis über die Streukammer verlief, dann abknickte und vertikal in die Streukammer führte. Dort wiederum wurde ein Aluminiumrohr befestigt, in dessen Spitze eine Hall-Sonde untergebracht war. Es wurde ein vorhandenes Skript angepasst, um ein quaderförmiges Volumen zu vermessen. Dabei wurde in X-Richtung über eine Strecke von 50 mm in Abständen von 2 mm, in Y-Richtung über 36 mm in Abständen von 2 mm sowie in Z-Richtung über 240 mm in Abständen von 20 mm gemessen.

Die aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den vorhandenen Messwerten ursprünglich geplante Stromstärke von 225 A ließ sich über die Remote-Steuerung nicht einstellen. Über die lokale Steuerung konnte zwar eine Stromstärke von 225 A eingestellt werden, das Netzteil schaltete sich jedoch nach rund 3 Minuten Betrieb mit der Anzeige „external error“ ab. Es war davon auszugehen, dass die Abschaltung durch einen Temperatursensor ausgelöst wurde, weshalb die Stromstärke zunächst auf 112,5 A reduziert wurde. Bei dieser lief die Stromversorgung ohne Abschaltung. Da die Halterung magnetische Elemente enthielt, musste überprüft werden, ob die Halterung durch das Magnetfeld verbogen wird. Hierfür wurde die Position der Messsonde bei größtmöglicher Annäherung an den Magneten im ein- und ausgeschalteten Zustand überprüft, wobei keine Abweichung festgestellt werden konnte.

Mit Hilfe einer Weicheisen-Abschirmung wurde die Messsonde daraufhin kalibriert und der Messbereich der Messapparatur auf ein Maximum von 30 mT eingestellt. Wie sich hierbei zeigte, lag ein erwähnenswerter Anteil der gemessenen vertikalen Flussdichte oberhalb von 30 mT, weshalb entweder der Messbereich vergrößert oder die Stromstärke reduziert werden musste. Da die direkte Vergleichbarkeit zu der Messung aus [Kni91] nach der ersten Änderung des Stroms nicht länger gegeben war, wurde die Stromstärke auf 80 A reduziert. Mit diesen Einstellungen konnte die Messung durchgeführt werden.

---

## 4.2.2 Vergleich der gemessenen Daten mit der Simulation

---

Der Vergleich der Simulationsdaten mit den aus [Kni91] entnommenen Messdaten zeigte unabhängig von den gewählten Polradien stets die gleichen systematischen Abweichungen. Die in Tabelle A.1 aufgeführten Simulationswerte wiesen immer eine deutlich größere Asymmetrie entlang der Y-Achse auf, als die Messwerte erwarten ließen. Diese Abweichung blieb selbst für Simulationen mit nicht-linearen Materialien erhalten und konnte durch die Wahl von Radien, die mit den Messungen der Geometrie nicht vereinbar waren, nur unwesentlich beeinflusst werden.

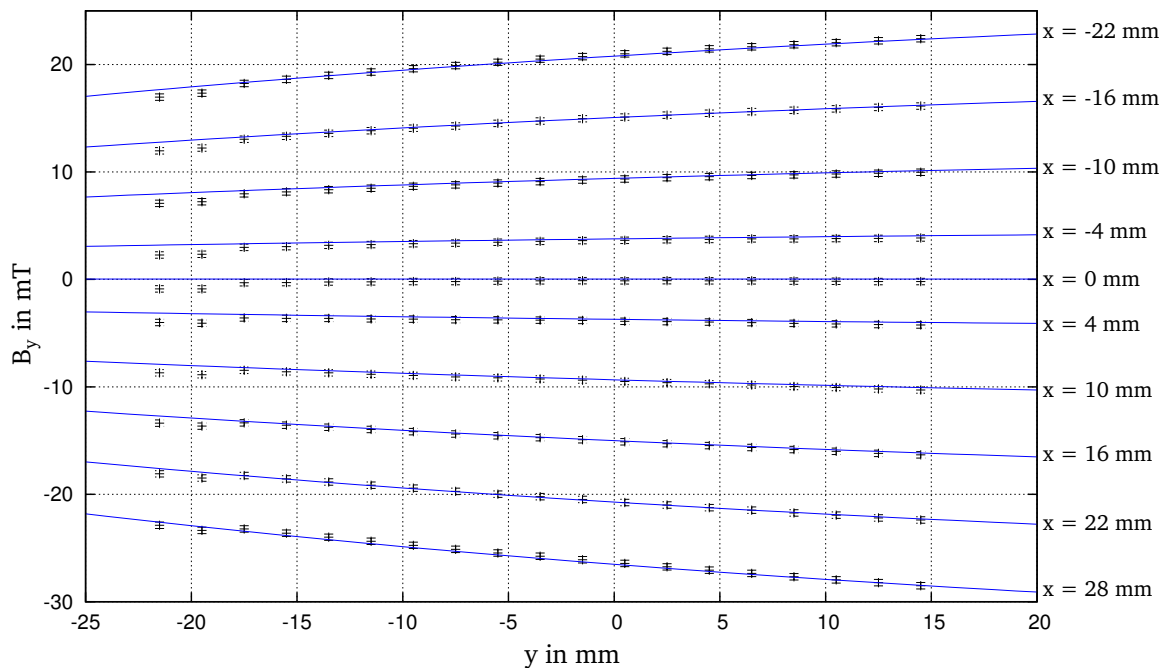
---

Auch die Verwendung der Daten des Herstellers führte zu keiner Änderung an der Asymmetrie der Simulation. Die mit diesen Daten simulierte horizontale Komponente der magnetischen Flussdichte stimmte jedoch mit der vermeintlichen vertikalen Komponente der Messung aus [Kni91] vergleichsweise gut überein. Aus diesem Grund wurden die horizontalen Komponenten der Flussdichte für die Simulation mit den tatsächlichen Polformen in Tabelle A.1 aufgeführt. Obwohl auch diese Daten Abweichungen aufwiesen, wurde abschließend davon ausgegangen, dass die in [Kni91] genannte vertikale Flussdichte die horizontale Flussdichte bezeichnet. Die Ursache der verbliebenen Abweichungen kann durchaus in der Simulation mit linearem Material begründet liegen.

Bevor die im Rahmen dieser Thesis aufgenommenen Messwerte mit den Simulationen verglichen werden konnten, musste erneut das Koordinatensystem der Messung bestimmt werden. Bedingt durch die Symmetrie des Magneten musste die Y-Komponente der magnetischen Flussdichte auf der Symmetrieebene verschwinden. Dieser Nulldurchgang sollte ausgenutzt werden, um das Zentrum des Magneten zu ermitteln. Es wurde erwartet, dass die vertikale Komponente der magnetischen Flussdichte entlang der Y-Achse für  $x = 0$  konstant Null ist. Eine Betrachtung der Verläufe entlang der Y-Achse für verschiedene X-Koordinaten zeigte, dass die Flussdichte nicht bei Null, sondern bei rund 7 mT einen konstanten Verlauf aufwies. Die Ursache dieses Offsets konnte nicht sicher festgestellt werden, ein Messfehler ist jedoch nicht auszuschließen.

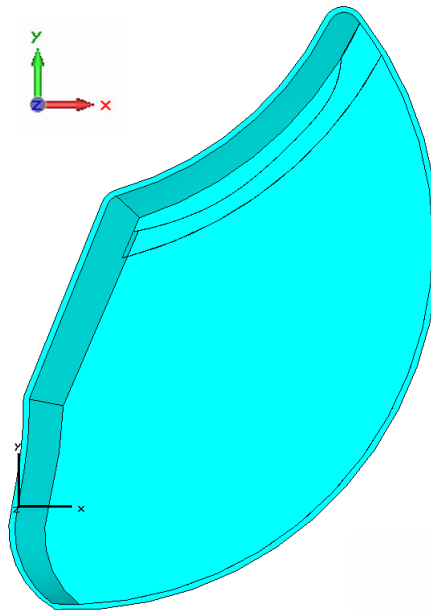
Der Vergleich der Messdaten mit der Simulation mit den endgültigen Polformen zeigte allerdings unter Berücksichtigung eines Offsets von 6,9 mT eine gute Übereinstimmung. Abbildung 4.8 zeigte für mehrere X-Positionen den simulierten und gemessenen Feldverlauf entlang der Y-Achse bei festem  $z$  unter Berücksichtigung des Offsets. Für dessen Unsicherheit wurden 0,3 mT angenommen, die somit die Unsicherheit der Messung dominierte.

Die Messwerte für  $y < -18$  zeigten für große Z-Koordinaten stets eine systematische Abweichung, die vermutlich auf eine Berührung des Strahlrohrs durch die Messsonde zurückzuführen ist, wodurch die Messposition an diesen Punkten verändert wurde. Eine weitere Unsicherheit in der Positionsbestimmung ergab sich durch die Ausrichtung der Messapparatur und die somit auftretenden Winkel zwischen den Simulations- und Messachsen. Um diese abzuschätzen, wurden die Koordinaten aller Nulldurchgänge der vertikalen Feldkomponente entlang der X-Achse durch das Volumen verglichen. Dabei ergab sich für die beiden Koordinatensysteme in der XZ-Ebene ein Winkel kleiner  $0,3^\circ$ , während sich in der XY-Ebene ein Winkel von rund  $1^\circ$  ergab. Für die X-Koordinate ergab sich somit über die gemessene Strecke von 36 mm in Y-Richtung eine Abweichung von 0,6 mm zwischen dem ersten und dem letzten Messwert. Dies führte zu einer systematischen Abweichung, sodass Messwerte bei kleinem  $y$  um bis zu 0,4 mT zu klein waren. Für die YZ-Ebene konnte kein Winkel bestimmt werden.



**Abbildung 4.8.:** Der Verlauf der vertikalen Komponente der magnetischen Flussdichte des Quadrupols entlang der Y-Achse für verschiedene X-Koordinaten bei  $z = 0$ . Die gemessenen Werte wurden in schwarz eingezeichnet, während der zugehörige simulierte Verlauf in blau dargestellt wurde. Die systematische Abweichung der gemessenen Werte bei  $y < -18$  ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Messsonde bei diesen Koordinaten das Strahlrohr berührte und somit die Messposition verändert wurde.

### 4.3 Simulation des QClam-Dipols



**Abbildung 4.9.:** Eine Darstellung des simulierten Polschuhs des QClam-Dipols mit Shim-Einsatz, ohne Spule und Joch. Um den Ursprung des verwendeten Koordinatensystems zu verdeutlichen, wurde das schwarze Koordinatensystem am Eingang des QClam-Dipols eingefügt.

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Komponenten konnte der Dipol des QClams nicht aus einfachen Geometrien zusammengesetzt werden. Stattdessen wurde ausgehend von einem Zylinder die Geometrie durch Ausschneiden erzeugt. Aufgrund anfänglicher Probleme bei der Erzeugung der Geometrie wurde deren Komplexität an kritischen Stellen reduziert und nach Möglichkeit auf analytisch definierte Flächen verzichtet. Auf diese Weise wurde der in Abbildung 4.9 dargestellte Polschuh erzeugt.

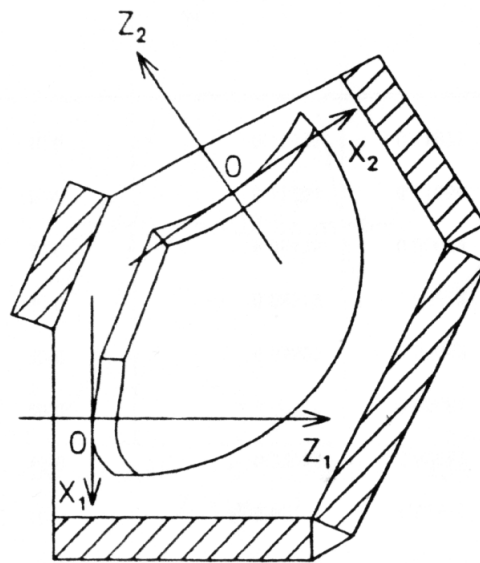
Um die Spulen zu erzeugen, konnte nicht auf die in CST Studio eingebauten Funktionen für Spulen zurückgegriffen werden. Stattdessen wurden die Konturen des erzeugten Polschuhs als Kurven extrahiert, skaliert, kopiert und als Strompfade definiert, um die Spulen zu simulieren.

Nach dem Ergänzen des Jochs konnte die Simulation des Dipols durchgeführt werden. Für nicht-lineare Materialien zeigte sich, dass nach mehrtägiger Simulation die eingestellte Genauigkeit von  $10^{-6}$  nach über 100 Simulationszyklen nicht erreicht wurde, weshalb eine solche Simulation unter den gegebenen Bedingungen ausgeschlossen war. Daher wurden die Simulationen auf lineares Material beschränkt, wobei die Permeabilitätszahl zu  $\mu_r = 300$  gewählt wurde. Da keine Messungen für den Dipol vorlagen, wurden die Simulationsergebnisse durch Vergleich mit aus [Kni91] entnommenen Abbildungen der Feldverteilung qualitativ überprüft.

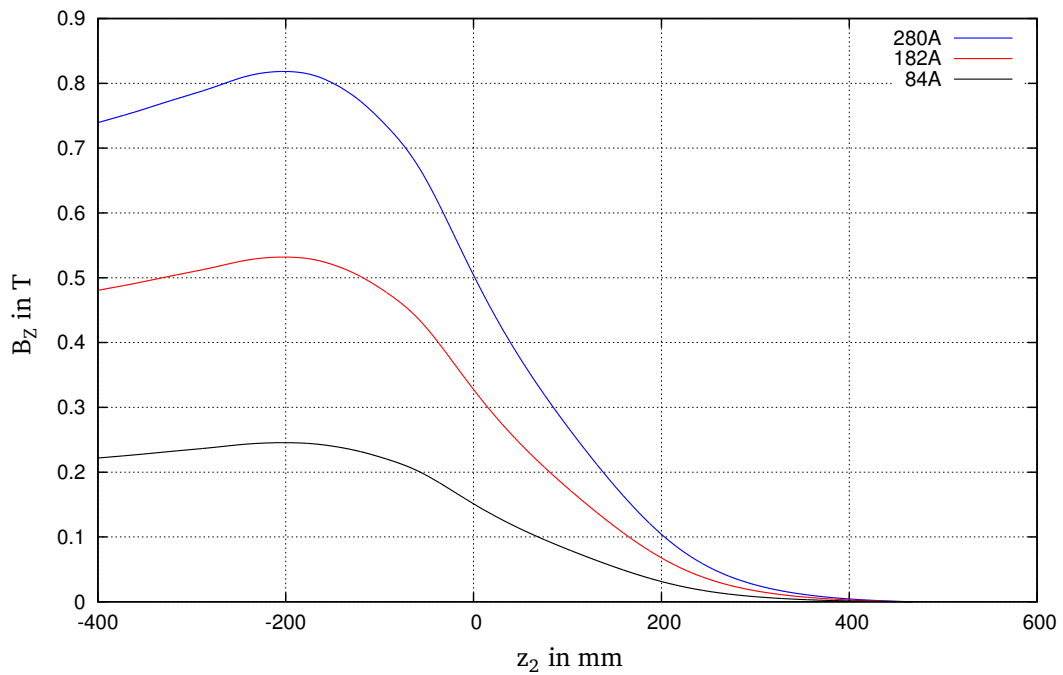
Zu Beginn wurde der QClam-Dipol mit Stromstärken von 280 A, 182 A und 84 A simuliert. Es wurde der Verlauf der Z-Komponente der magnetischen Flussdichte entlang der in Abbildung 4.10 definierten  $Z_2$ -Achse aufgenommen. Der Vergleich der in Abbildung 4.11 dargestellten Verläufe mit Abbildung 4.12 wurde dann genutzt, um die Simulation auf die Referenzabbildungen zu normieren.

Im Anschluss wurde die Feldverteilung am Ausgang des Dipols bei einer Stromstärke von 280 A ausgewertet. Der Vergleich der in Abbildung 4.13 dargestellten Simulationsergebnisse mit Abbildung 4.14 zeigte, dass die grundlegenden Strukturen vorhanden waren, wobei die Simulation eine größere Symmetrie aufwies, als die Messwerte erwarten ließen.

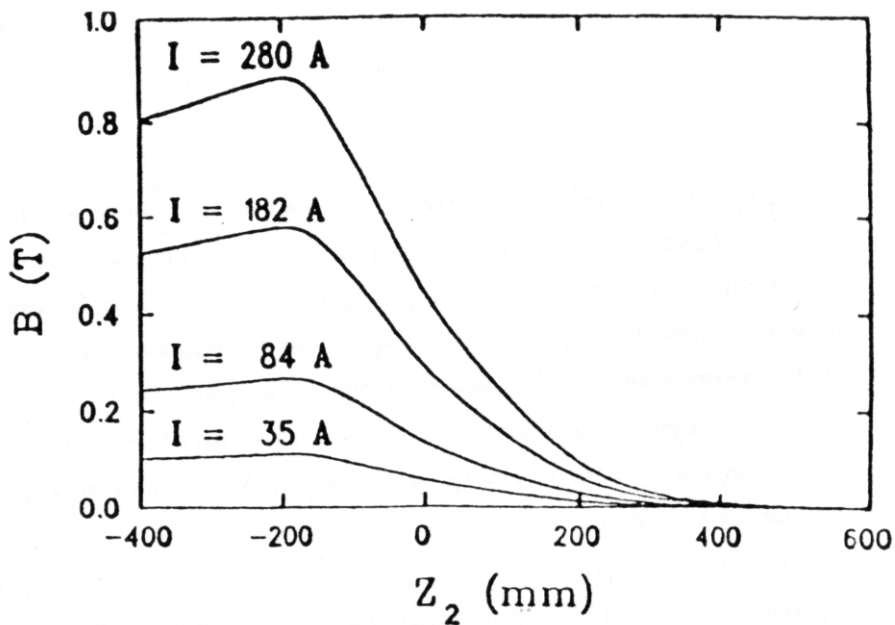
Deutlich stärkere Abweichungen zeigten sich für den Strahleintritt, dessen Simulationsergebnisse in Abbildung 4.15 dargestellt wurden. Hier lag die maximale Flussdichte von 0,8 T deutlich unter dem nach Abbildung 4.16 erwarteten Wert von 0,925 T. Des Weiteren deutete sich an, dass die Flussdichte entlang der  $Z_1$ -Achse langsamer abfiel als erwartet. Dies würde das in Abschnitt 5.1.1 beobachtete Verhalten erklären, dass Elektronen auf den äußeren Bahnen verglichen mit denen der inneren Bahnen zu stark abgelenkt wurden.



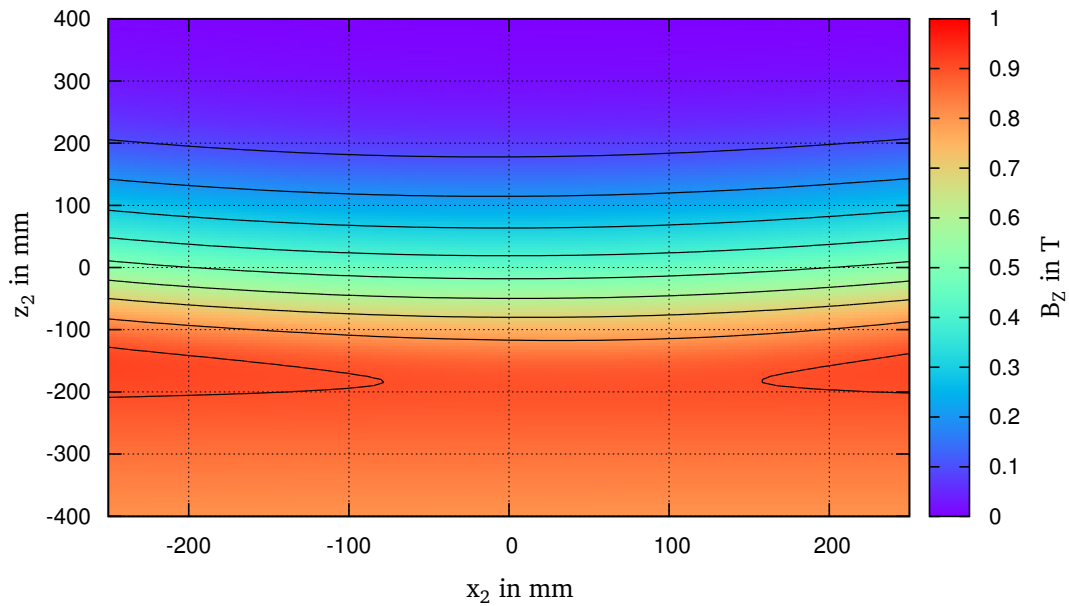
**Abbildung 4.10.:** Eine Skizze des QClam-Dipols mit den Koordinatensystemen für Strahleintritt und Strahlaustritt. [Kni91]



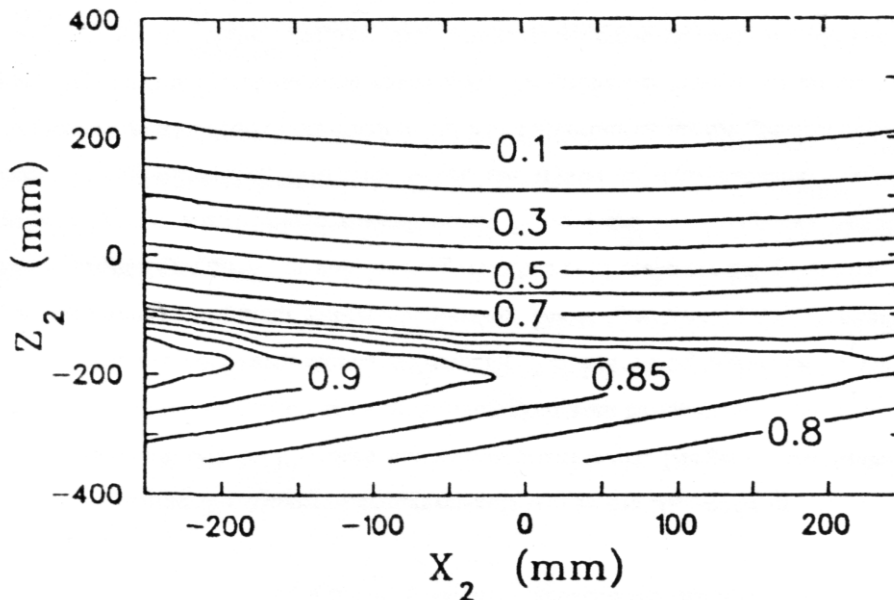
**Abbildung 4.11.:** Verlauf der Z-Komponente der simulierten magnetischen Flussdichte entlang der in Abbildung 4.10 definierten  $Z_2$ -Achse bei verschiedenen Stromstärken. Diese Daten wurden verwendet, um die simulierte Feldverteilung auf die Werte aus Abbildung 4.12 zu normieren.



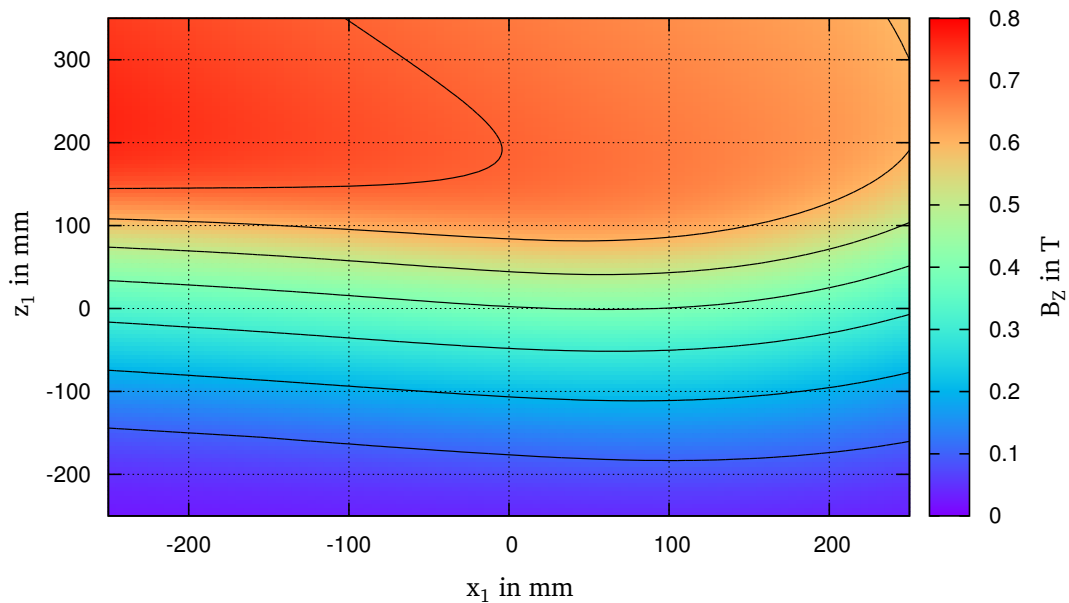
**Abbildung 4.12.:** Gemessener Verlauf der Z-Komponente der magnetischen Flussdichte entlang der in Abbildung 4.10 definierten  $Z_2$ -Achse bei verschiedenen Stromstärken. [Kni91]



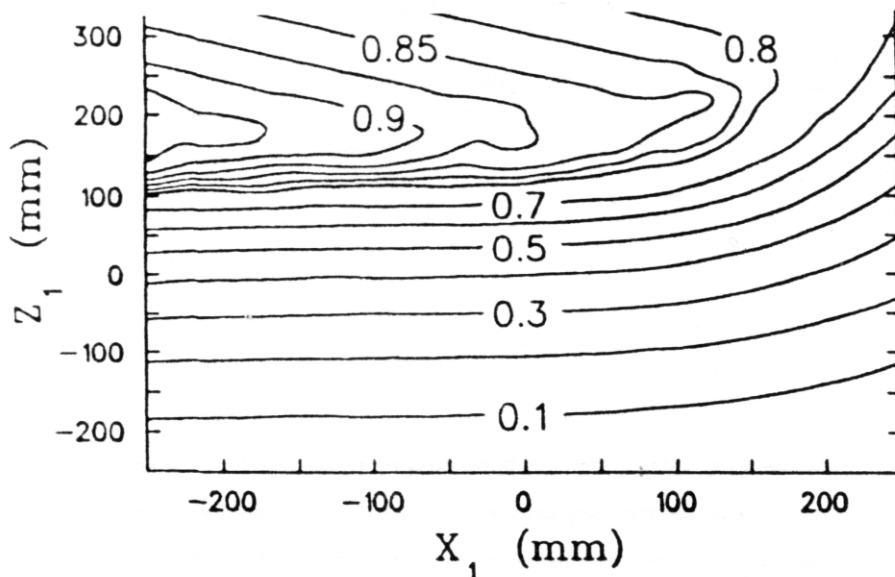
**Abbildung 4.13.:** Konturplot der Z-Komponente der simulierten, normierten magnetischen Flussdichte des Strahlaustritts des QClam-Dipols. Das dabei verwendete Koordinatensystem wurde in Abbildung 4.10 durch  $X_2$  und  $Z_2$  definiert. Der Vergleich mit Abbildung 4.14 zeigte, dass die grundlegende Struktur korrekt war, wobei Abweichungen zu erkennen waren.



**Abbildung 4.14.:** Konturplot der gemessenen Z-Komponente der magnetischen Flussdichte des Strahlaustritts des QClam-Dipols bei einer Stromstärke von 280 A. Das dabei verwendete Koordinatensystem wurde in Abbildung 4.10 durch  $X_2$  und  $Z_2$  definiert. [Kni91]



**Abbildung 4.15.:** Konturplot der Z-Komponente der simulierten und normierten magnetischen Flussdichte des Strahleintritts des QClam-Dipols. Das dabei verwendete Koordinatensystem wurde in Abbildung 4.10 durch  $X_1$  und  $Z_1$  definiert. Der Vergleich mit Abbildung 4.16 zeigte, dass die grundlegende Struktur korrekt war. Jedoch lag das Maximum mit rund 0,8 T deutlich unter dem erwarteten Maximum von 0,925 T. Gleichzeitig deutete sich an, dass die Flussdichte entlang der  $Z_1$ -Achse in positiver Richtung langsamer abfiel als erwartet.



**Abbildung 4.16.:** Konturplot der gemessenen Z-Komponente der magnetischen Flussdichte des Strahleintritts des QClam-Dipols bei einer Stromstärke von 280 A. Das dabei verwendete Koordinatensystem wurde in Abbildung 4.10 durch  $X_1$  und  $Z_1$  definiert. [Kni91]



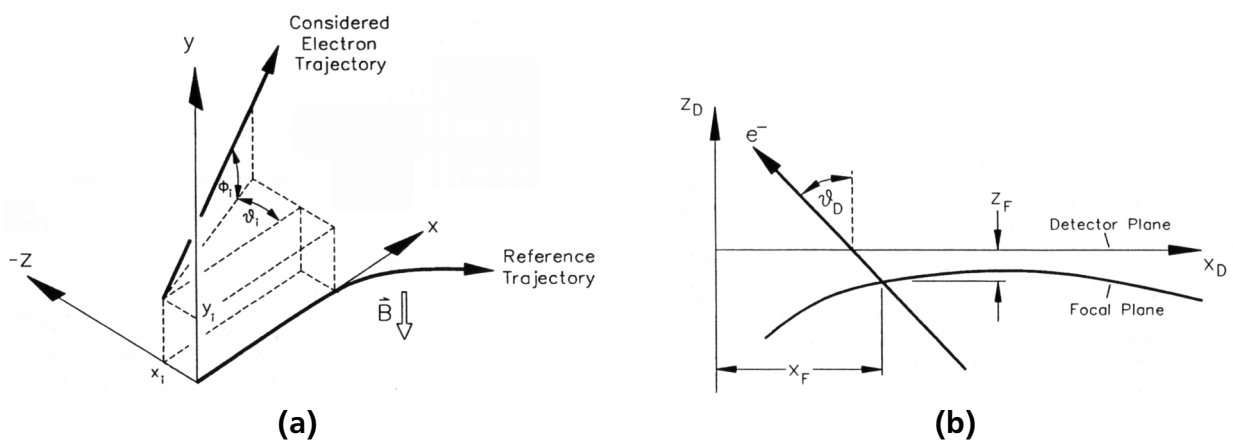
## 5 Simulation des gesamten Systems

Nach den Simulationen der einzelnen Komponenten wurden diese in einer „Particle-Tracking“ Simulation zusammengesetzt, um das Gesamtsystem zu simulieren. Für lineare Materialien betrug die Simulationsdauer bereits über 3 Stunden. Da die Simulation des QClam-Dipols mit nicht-linearen Materialien auch nach 100 Zyklen nicht konvergierte, war mit einer Simulationszeit von über 300 Stunden für das Gesamtsystem zu rechnen, sodass auf Simulationen mit nicht-linearen Materialien verzichtet wurde. Die Permeabilitätszahl wurde dabei für den Separationsmagneten auf  $\mu_r = 10000$  und für die restlichen Magnete auf  $\mu_r = 300$  gesetzt. Dies ergab sich aus den zum Zeitpunkt des Importierens eingestellten Werten der einzelnen Projekte und hat keine weitergehende Begründung. Aufgrund der Ergebnisse aus Abschnitt 4.1 war nicht davon auszugehen, dass die Wahl der Permeabilitätszahl einen Einfluss auf die Form der Feldverteilung hatte.

Zu Beginn wurde ein aus dem Zentrum der Streukammer kommender, defokussierter Elektronenstrahl ohne Separationsmagnet ( $I_{Sep} = 0$ ) simuliert, um die grundlegende Funktionsfähigkeit der Simulation zu überprüfen und die Stromstärken des QClam-Dipols und Pentapols aufeinander abzustimmen. Die Strahlenergie wurde auf 69 MeV gesetzt und die eingestellten Stromstärken lagen nach weiteren Anpassungen aus Abschnitt 5.1.2 bei  $I_{QClam} = 107,3$  A und  $I_{Pentapol} = 97,8$  A.

Im Anschluss wurden Punktquellen definiert, die ausgehend von der Position an der sich im Experiment das Target befindet, Elektronen mit gegebener Energie unter einem gegebenen vertikalen ( $\phi$ ) oder horizontalen ( $\vartheta$ ) Streuwinkel erzeugten.

Abschließend wurde ein „Particle-Monitor“ in der Detektorebene definiert, mit dem die Eigenschaften der Elektronen beim Auftreffen auf die Detektorebene ausgelesen werden konnten. Für die Auswertung der Eigenschaften der Elektronenbahnen in der Detektorebene wurde das in Abbildung 5.1b dargestellte Koordinatensystem eingeführt, dessen XY-Ebene in der Detektorebene lag. Angaben in diesem Koordinatensystem wurden mit dem Index D gekennzeichnet. Die so aufgenommenen Abbildungseigenschaften wurden im Folgenden mit aus [Lüt94] entnommenen Simulationen verglichen.



**Abbildung 5.1.:** Abbildungen der für die Simulation des gesamten Systems verwendeten Streuwinkel und des Koordinatensystems der Detektorebene. [Lüt94]

---

## 5.1 QClam-Betrieb

---

Die ersten Simulationen wurden ohne Separationsmagnet ( $I_{Sep} = 0$ ) durchgeführt, sodass die Simulation an den bekannten Abbildungseigenschaften des QClam-Spektrometers überprüft werden konnte. Um diese zu bestimmen, wurden Punktquellen im Zentrum der Streukammer platziert, die Elektronen mit Energien von 55,2 MeV bis 69 MeV in 1,38 MeV Schritten unter verschiedenen Winkeln erzeugten. Die Referenzbahn bei  $\vartheta = \phi = 0$  verlief dabei in horizontaler Ebene zentral durch den Pentapol in das Spektrometer. Die Eigenschaften der Elektronen beim Auftreffen auf den Detektor wurden mittels eines „Particle-Monitors“ ausgelesen.

---

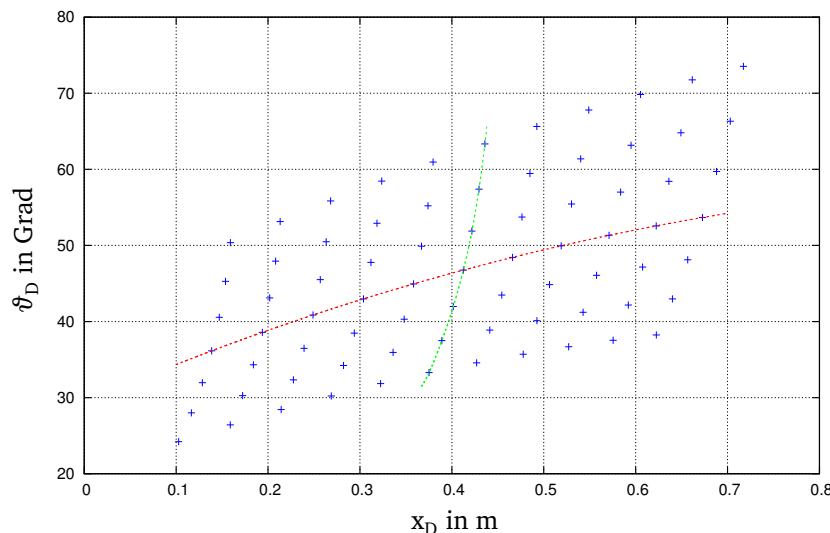
### 5.1.1 Vertikale Streuebene

---

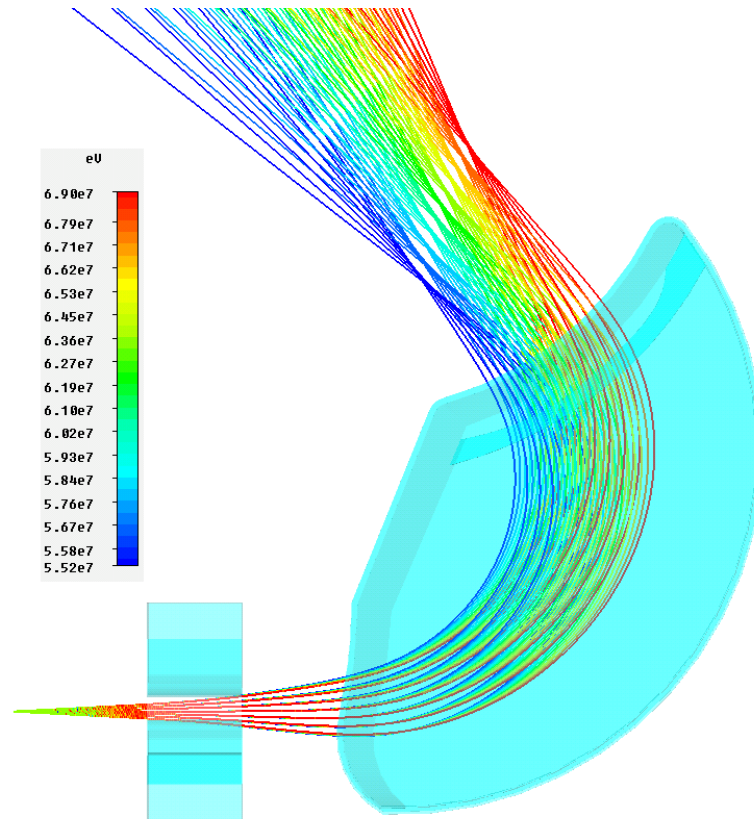
Für die Simulation der vertikalen Abbildungseigenschaften wurden Elektronen mit den oben genannten Energien bei verschiedenen vertikalen Streuwinkeln simuliert. Der vertikale Streuwinkel wurde in  $1^\circ$  Schritten von  $-3^\circ$  bis  $+3^\circ$  variiert, während der horizontale Winkel bei  $\phi = 0$  belassen wurde.

Eine erste Betrachtung der simulierten Trajektorien in Abbildung 5.3 zeigte das erwartete fokussierende Verhalten, wobei eine detailliertere Ansicht in Abbildung 5.4 darlegte, dass die Fokussierung nicht den Erwartungen entsprach, siehe Abschnitt 5.3.

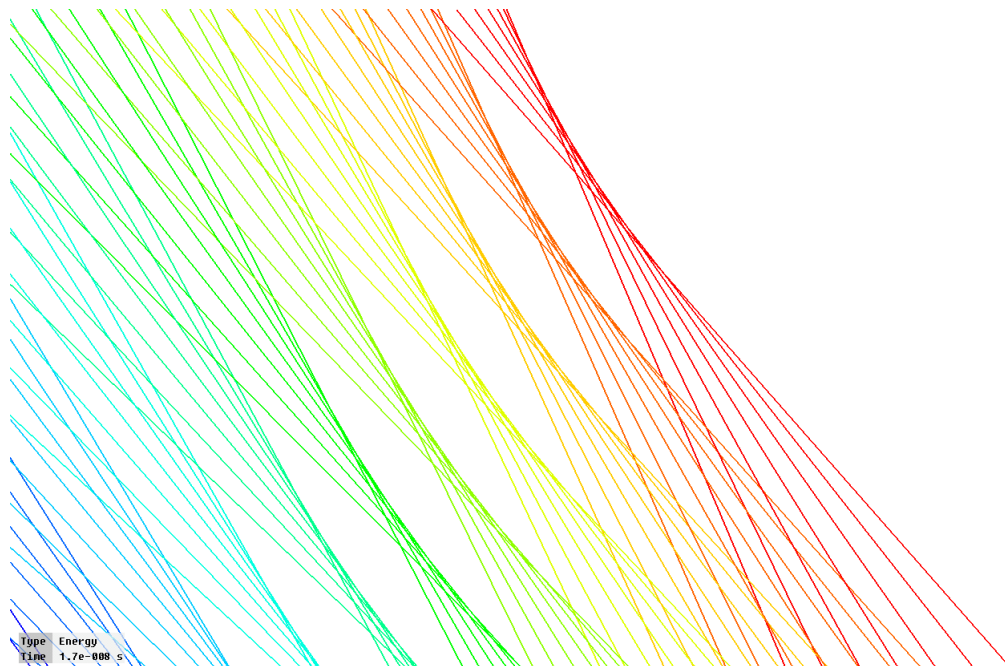
Um später die Fokalebene des QClam-Spektrometers bestimmen zu können, wurden die Durchstoßwinkel und -orte der Elektronen in der Detektorebene aufgenommen. Die Ergebnisse wurden in Abbildung 5.2 aufgetragen und durch Kennzeichnungen des Streuwinkels  $\vartheta = 0$  sowie der zentralen Energie von 62,1 MeV ergänzt. Es zeigte sich der vergleichsweise schlechte Fokus durch den Überlapp der Durchstoßorte  $x_D$  für Elektronen unterschiedlicher Energie.



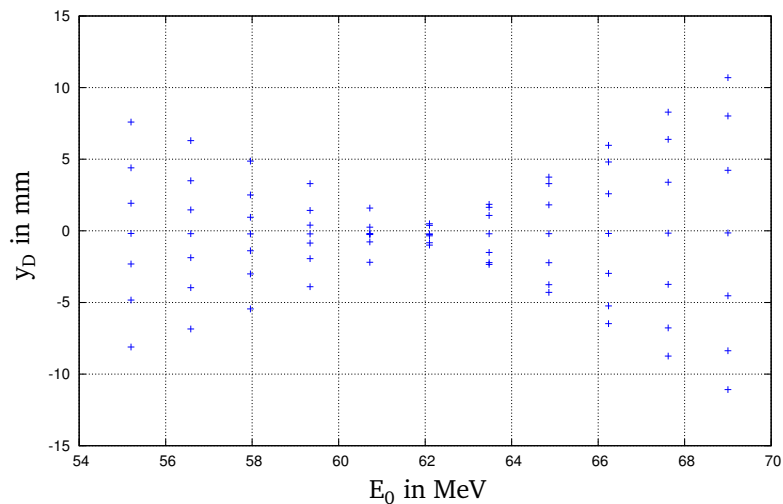
**Abbildung 5.2.:** Die Durchstoßwinkel  $\vartheta_D$  der Elektronen in der Detektorebene, aufgetragen über die Durchstoßorte  $x_D$  für die Simulation des QClam-Spektrometers mit Energien zwischen 55,2 MeV und 69 MeV und vertikale Streuwinkel zwischen  $-3^\circ$  und  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten. Die grüne Linie kennzeichnet Elektronen der Energie 62,1 MeV, die rote Linie Elektronen mit vertikalem Streuwinkel  $\phi = 0$ .



**Abbildung 5.3.:** Die Simulation des QClam-Spektrometers zeigte grundlegend die erwarteten fokussierenden Eigenschaften.



**Abbildung 5.4.:** Die Betrachtung der Fokusse der Simulation des QClam-Spektrometers im Detail zeigte, dass die Trajektorien außen, also bei negativen vertikalen Streuwinkeln, zu stark abgelenkt wurden.



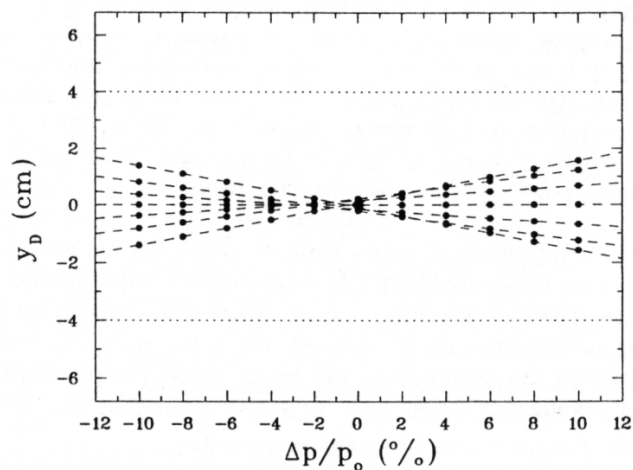
**Abbildung 5.5.:** Durchstoßorte  $y_D$  der Elektronen in der Detektorebene, aufgetragen über die Energie der Elektronen der Simulation des QClam-Spektrometers für horizontale Streuwinkel zwischen  $-3^\circ$  und  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten.

### 5.1.2 Horizontale Streuebene

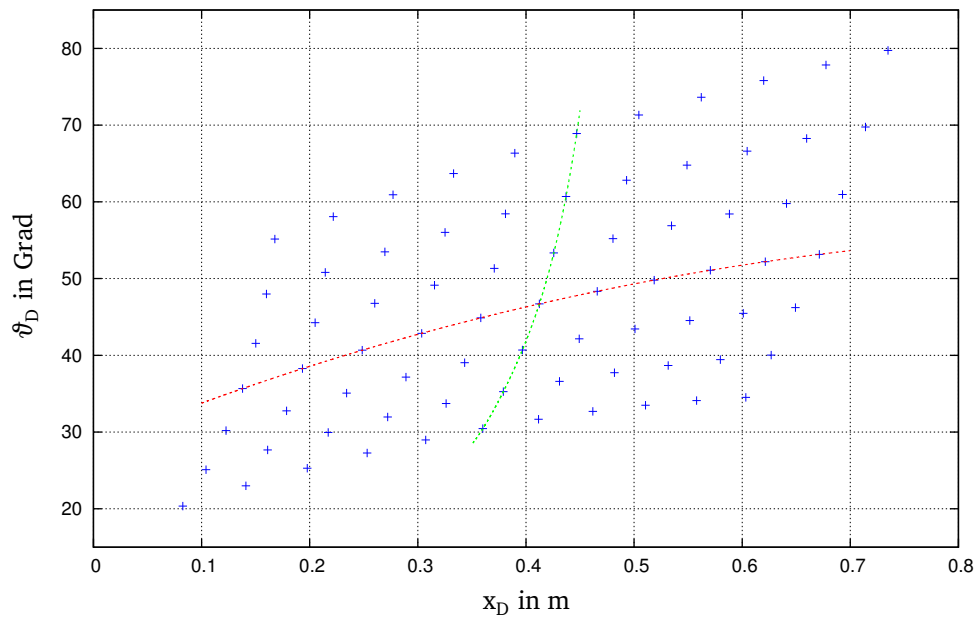
Die Simulation der horizontalen Streuebene erfolgte mit Elektronen mit den in Abschnitt 5.1 genannten Energien unter horizontalen Streuwinkeln  $\vartheta$  von  $-3^\circ$  bis  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten. Dabei wurden die Durchstoßorte  $y_D$  in der Detektorebene und die Energie der Elektronen aufgenommen.

Anhand dieser Daten wurde die Stromstärke des Pentapols rückwirkend angepasst, sodass der Fokus bei der zentralen Energie von 62,1 MeV lag.

Die abschließend erhaltenen Ergebnisse der horizontalen Streuebene wurden in Abbildung 5.5 aufgetragen, wobei sie den aus Abbildung 5.6 erwarteten Verlauf gut reproduzierten.



**Abbildung 5.6.:** Die in [Lüt94] simulierte Durchstoßorte  $y_D$  der Elektronen für das QClam-Spektrometer bei horizontalen Streuwinkeln von  $-3^\circ$  bis  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten bei verschiedenen Impulsen. Die gepunktete Linie markiert dabei die Ränder der Nachweisfläche des Detektors, während die gestrichelten Linien Elektronen gleicher Streuwinkel verbinden.



**Abbildung 5.7.:** Durchstoßwinkel  $\vartheta_D$  der Elektronen in der Detektorebene, aufgetragen über die Durchstoßorte  $x_D$  der Simulation des  $180^\circ$  Systems für Energien zwischen 55,2 MeV und 69 MeV für vertikale Streuwinkel zwischen  $-3^\circ$  und  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten. Die grüne Linie kennzeichnet Elektronen der Energie 62,1 MeV, die rote Linie Elektronen mit vertikalem Streuwinkel  $\phi = 0$ .

---

## 5.2 $180^\circ$ Betrieb

---

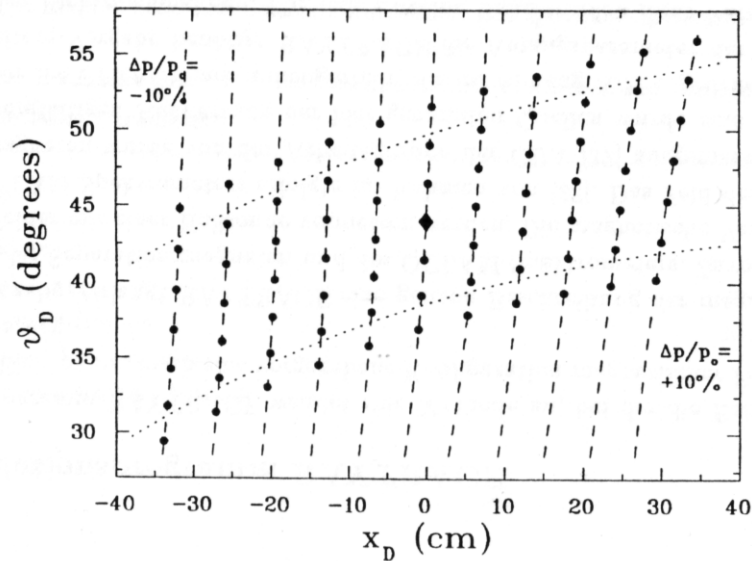
Nach den Simulationen des QClams wurde das  $180^\circ$  System simuliert. Der Separationsmagnet wurde mit einer Stromstärke von  $I_{Sep} = 47,15$  A simuliert, sodass die Elektronen der zentralen Energie von 62,1 MeV für  $\vartheta = \phi = 0$  mittig in das QClam-Spektrometer gelenkt wurden. Um die Abbildungseigenschaften zu bestimmen, wurden erneut Punktquellen definiert, die Elektronen mit Energien von 55,2 MeV bis 69 MeV in 1,38 MeV Schritten unter verschiedenen Streuwinkeln erzeugten. Diese wurden nicht im Zentrum der Streukammer platziert, sondern um 220 mm in Richtung Faraday-Cup versetzt. Die Referenzbahn bei  $\vartheta = \phi = 0$  verlief horizontal in Richtung Zentrum der Streukammer.

---

### 5.2.1 Vertikale Streuebene

---

Die vertikalen Abbildungseigenschaften wurden mit Elektronen der genannten Energien unter vertikalen Streuwinkeln von  $-3^\circ$  bis  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten simuliert, während der horizontale Streuwinkel auf  $\vartheta = 0$  gesetzt wurde. Wie bereits im QClam-Betrieb zeigte die Auswertung der Simulationen im  $180^\circ$  Betrieb eine Fokussierung, die nicht den Erwartungen entsprach. Der Vergleich der Simulationsergebnisse in Abbildung 5.7 mit den aus [Lüt94] entnommenen Simulationsergebnissen in Abbildung 5.8 zeigte besonders deutlich den schon in Abschnitt 5.1.1 angesprochenen Überlapp der Durchstoßorte  $x_D$  für Elektronen unterschiedlicher Energie.



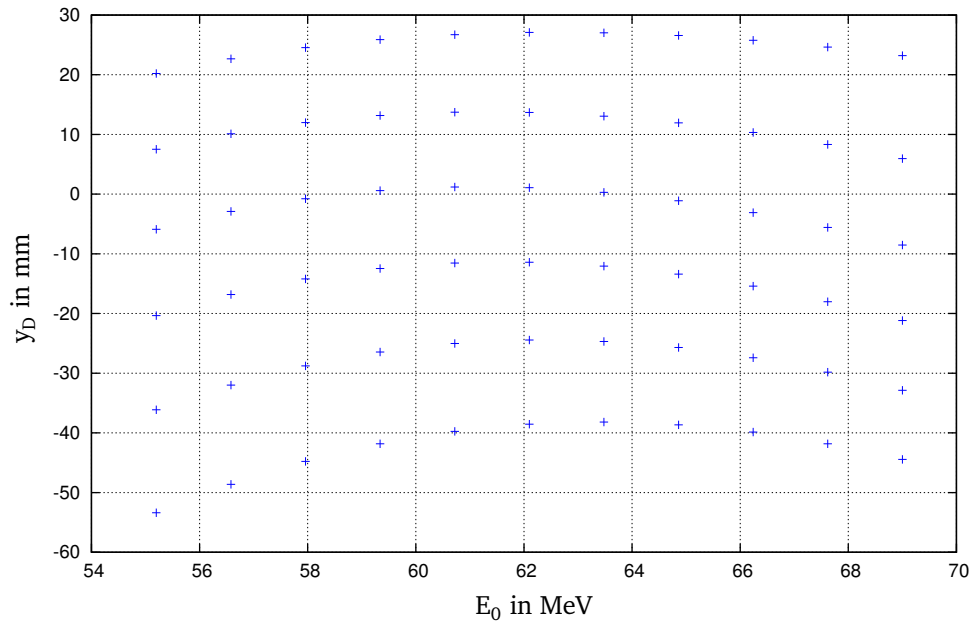
**Abbildung 5.8.:** Die in [Lüt94] simulierte Durchstoßwinkel und -orte für Elektronen verschiedener Impulse und vertikaler Streuwinkel. Die gestrichelten Linien verbinden Elektronen gleicher Impulse, während die gepunkteten Linien die Begrenzung des Streuwinkels durch den Polschuhabstand des alten Separationsmagneten markieren.

## 5.2.2 Horizontale Streuebene

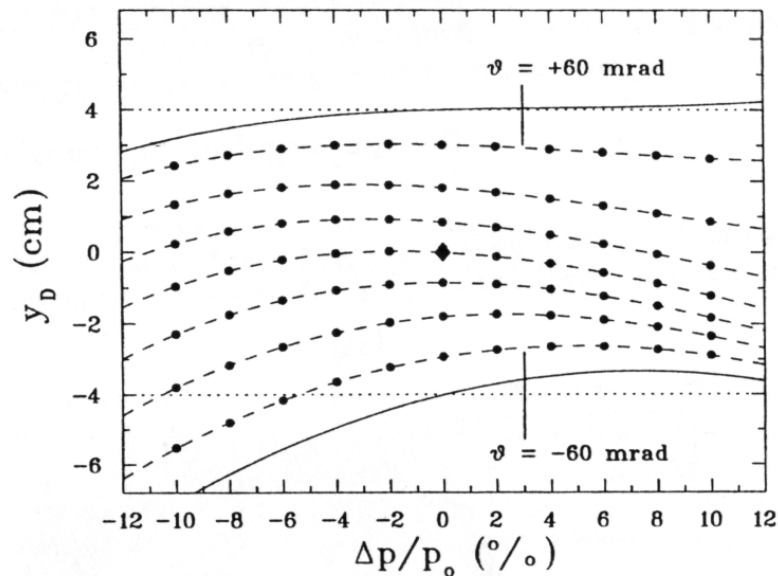
Die horizontalen Abbildungseigenschaften wurden mit Elektronen der in 5.2 genannten Energien durchgeführt, wobei diesmal der horizontale Streuwinkel von  $-2^\circ$  bis  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten variiert wurde. Der Streuwinkel von  $-3^\circ$  wurde lediglich aufgrund eines Übertragungsfehlers nicht simuliert.

Der Vergleich der so erhaltenen Ergebnisse in Abbildung 5.9 mit den aus [Lüt94] entnommenen Simulationen in Abbildung 5.10 zeigte für die neuen Simulationen eine etwas stärkere Streuwinkelabhängigkeit der Durchstoßorte  $y_D$ , als es mit dem alten Separationsmagneten der Fall war. Gleichzeitig erschien die Energieabhängigkeit etwas geringer.

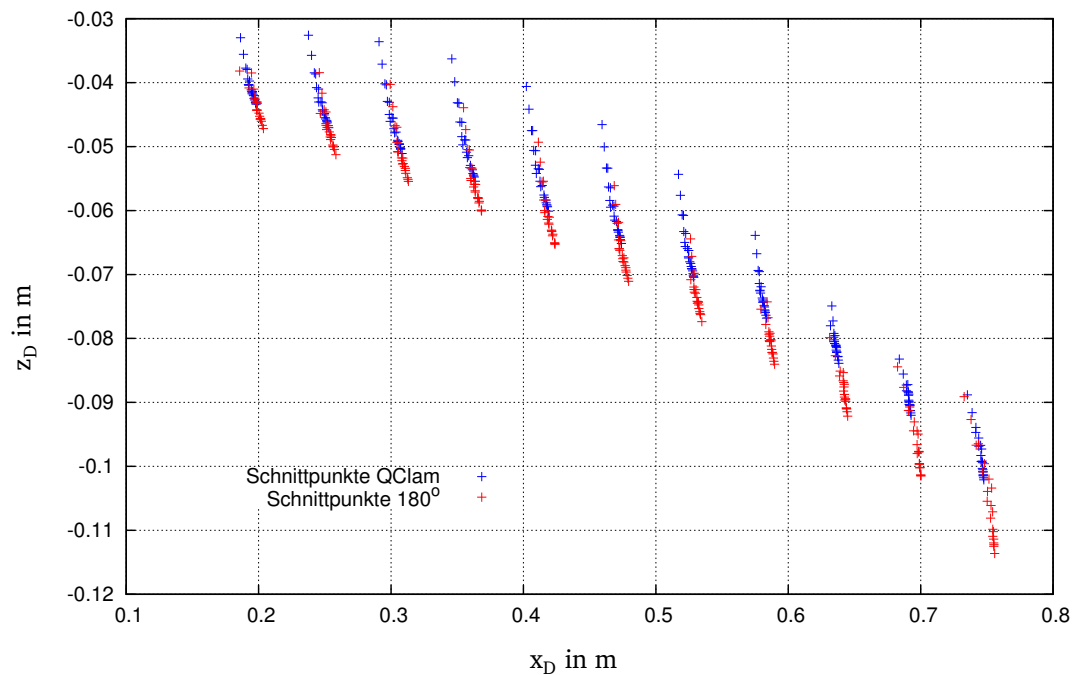
Da der Abstand des Targets vom Zentrum der Streukammer für den neuen Separationsmagneten vergrößert wurde, war für das neue  $180^\circ$  System von einer vergrößerten Winkelabhängigkeit von  $y_D$  auszugehen. Gleichzeitig war der Einfluss des Fehlers, der die schlechte Fokussierung in der vertikalen Streuebene der Simulationen bedingt, nicht abzuschätzen, weshalb keine quantitativen Aussagen getroffen werden konnten.



**Abbildung 5.9.:** Durchstoßorte  $y_D$  der Elektronen in der Detektorebene, aufgetragen über die Energie der Elektronen der Simulation des  $180^\circ$  Systems für horizontale Streuwinkel zwischen  $-2^\circ$  und  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten.



**Abbildung 5.10.:** Die in [Lüt94] für den  $180^\circ$  Betrieb simulierte Durchstoßorte  $y_D$  für Elektronen verschiedener Impulse bei horizontalen Streuwinkeln zwischen  $-3^\circ$  und  $3^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten. Die gestrichelten Linien verbinden Elektronen gleichen Streuwinkels. Die gepunktete Linie markiert die Begrenzung durch die Detektornachweisfläche, während die Durchgezogenen die Begrenzung durch die Spektrometer-Apertur angeben.



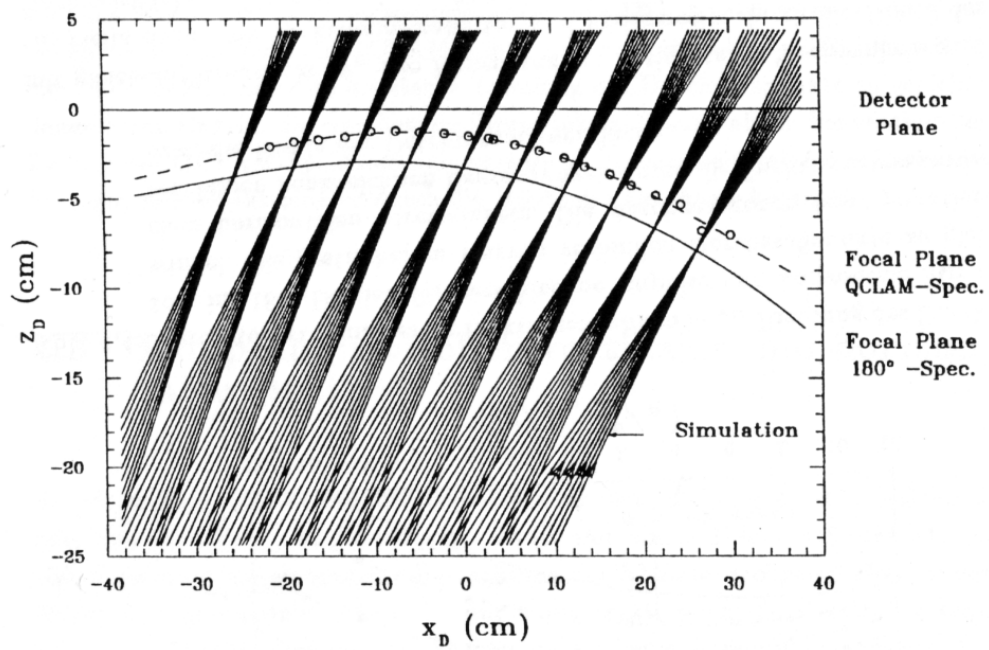
**Abbildung 5.11.:** Lage der Schnittpunkte aller Elektronenbahnen gleicher Energie der Simulationen der vertikalen Streuebene über der Detektorebene. Die Punkte der Simulation des QClams wurden in blau dargestellt, die Punkte des  $180^\circ$  Systems in rot. Aufgrund der großen Streuung der Werte ließ sich die Lage der Fokalebene nicht bestimmen. Es war zu erkennen, dass die Fokalebene im  $180^\circ$  System weiter von der Detektorebene entfernt liegt.

### 5.3 Fokalebene

Abschließend wurde versucht die Lage der Fokalebene zu ermitteln. Dabei wurden aus den Simulationen der vertikalen Streuebene die aufgenommenen Durchstoßwinkel und -orte verwendet, um die Abstände der Schnittpunkte der Elektronenbahnen gleicher Energie zur Detektorebene zu berechnen. Diese wurden in Abbildung 5.11 im Koordinatensystem der Detektorebene für den QClam-Betrieb in blau und für den  $180^\circ$  Betrieb in rot dargestellt. Die resultierende Streuung der Schnittpunkte war jedoch so groß, dass keine quantitativen Rückschlüsse auf die Lage der Fokalebene gezogen werden konnte. Es war jedoch zu erkennen, dass die Fokalebene des  $180^\circ$  System weiter von der Detektorebene entfernt lag als die Fokalebene des QClam-Spektrometers.

Die in [Lüt94] simulierten Verläufe der Fokalebene wurden in Abbildung 5.12 dargestellt und zeigten, dass eine solche Streuung der Schnittpunkte nicht zu erwarten war, zumal der bereits erfolgte Einsatz des Spektrometers darlegt, dass die realen Abbildungseigenschaften besser sind. Die Ursache der schlechten Fokussierung blieb bis zum Abschluss der Thesis unbekannt.





**Abbildung 5.12.:** Die in [Lüt94] simulierten Lagen der Fokalebene für das QClam-Spektrometer und den 180° Betrieb.

---

## 6 Fazit

---

Die Simulation des Separationsmagneten mit nicht-linearem Material zeigte, dass die simulierte magnetische Flussdichte die Messwerte mit einer relativen Abweichung von maximal 6% gut wiedergab. Die Simulationen mit linearem Material wiesen relative Abweichungen von bis zu 20% auf. Da diese auf den Randbereich beschränkt waren, ist davon auszugehen, dass auch Simulationen mit linearem Material geeignet sind, um die Feldverteilung zu simulieren.

Bei der Untersuchung des Pentapols stellte sich heraus, dass die Näherung der Polschuh-Geometrie durch Kreisabschnitte grundsätzlich mit den Herstellerdaten vereinbar war. Nachdem jedoch die tatsächlichen Polformen bekannt waren, bestand nicht länger die Notwendigkeit für diese Näherungen.

Der Vergleich der simulierten Feldverteilung des Pentapols mit den im Rahmen dieser Thesis gemessenen Werten zeigte eine gute Übereinstimmung unter Berücksichtigung eines Offsets, der auf einen Messfehler zurückzuführen ist.

Im Gegensatz dazu konnte aufgrund der geringen Anzahl an Messdaten zur Feldverteilung des QClam-Dipols dessen Simulation nicht ausreichend überprüft werden. Es deuteten sich jedoch Abweichungen an, deren Ursache nicht abschließend ermittelt werden konnte.

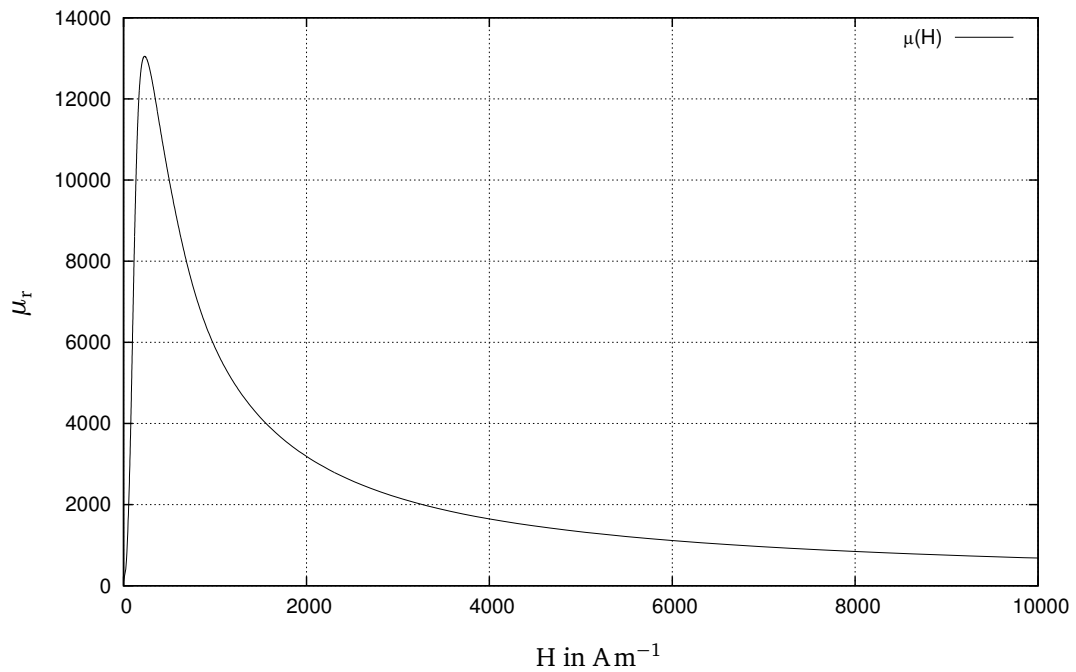
Die Simulationen des QClam-Spektrometers und der 180° Systems konnten bedingt durch die lange Simulationsdauer nur mit linearen Materialien durchgeführt werden. Die Simulationen der Elektronen-Trajektorien zeigten grundlegend die erwarteten Abbildungseigenschaften des Spektrometers. Im Detail zeigte sich jedoch ein Abbildungsfehler, der die Bestimmung der Fokusse und somit der Fokalebene verhinderte.

Die Ursache des Abbildungsfehlers blieb bis zum Abschluss der Thesis unbekannt. Neben Fehlern in der Geometrie des QClam-Dipols könnten auch die linearen Materialeigenschaften Abbildungsfehler erzeugt haben. Da die Form des Abbildungsfehlers an eine Koma erinnert, besteht auch die Möglichkeit, dass der QClam-Dipol nicht optimal zur Strahlachse ausgerichtet war. Dies wären mögliche Ausgangspunkte für weitergehende Untersuchungen der Abbildungseigenschaften.

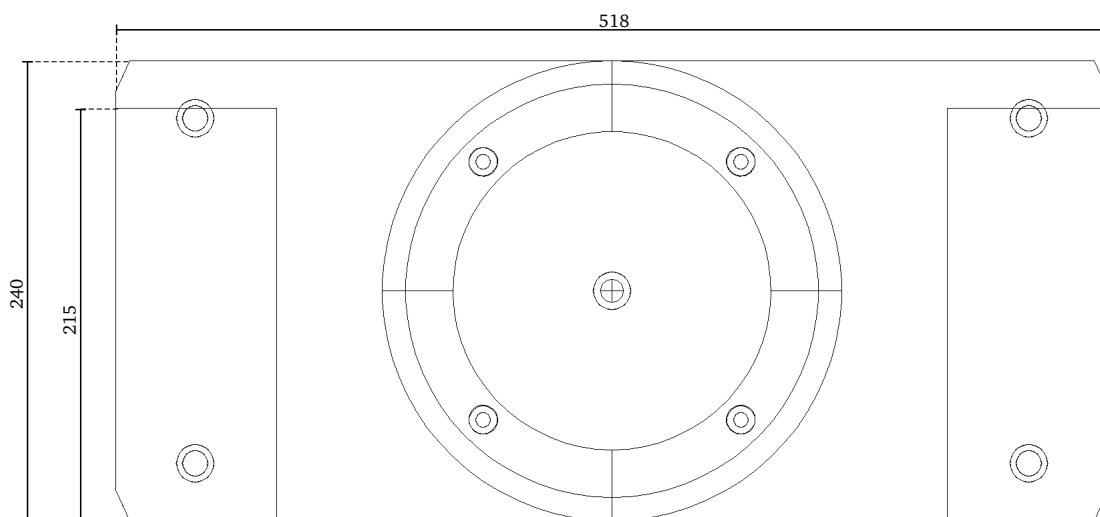
---

## A Anhang

---



**Abbildung A.1.:** Feldabhängigkeit der Permeabilitätszahl des in CST Studio vordefinierten Materials „iron“ .



**Abbildung A.2.:** Draufsicht des Separationsmagneten. Alle Angaben sind in Millimeter. Details wie Bohrungen und Abschrägungen des Jochs wurden in der Simulation nicht berücksichtigt.

Radien in mm							
		oben	113	125	100	150	polynom
		unten	86	93,5	70	70	
		mitte	130	130	135	135	
X in mm	Y in mm	$B_{y,mess}$ in T	$B_{y,sim}$ in T				$B_{x,sim}$ in T
40	40	0,11995	0,12694	0,12426	0,13423	0,12533	0,11600
40	-40	0,11525	0,07333	0,07169	0,07743	0,07409	0,10917
30	30	0,08627	0,09179	0,08982	0,09720	0,09105	0,08693
30	-30	0,08493	0,06177	0,06036	0,06544	0,06237	0,07777
20	20	0,05559	0,05870	0,05742	0,06220	0,05840	0,05894
20	-20	0,05552	0,04537	0,04433	0,04812	0,04567	0,04891
10	10	0,02760	0,02797	0,02735	0,02963	0,02786	0,03180
10	-10	0,02759	0,02464	0,02408	0,02612	0,02468	0,02155
-10	10	0,02741	0,02783	0,02721	0,02963	0,02796	0,03180
-10	-10	0,02759	0,02450	0,02394	0,02611	0,02478	0,02156
-20	20	0,05510	0,05856	0,05728	0,06220	0,05851	0,05895
-20	-20	0,05527	0,04524	0,04420	0,04811	0,04577	0,04892
-30	30	0,08519	0,09165	0,08968	0,09720	0,09115	0,08694
-30	-30	0,08435	0,06164	0,06023	0,06544	0,06246	0,07779
-40	40	0,11804	0,12671	0,12401	0,13424	0,12541	0,11602
-40	-40	0,11425	0,07320	0,07157	0,07743	0,07418	0,10921

**Tabelle A.1.:** Vergleich der aus [Kni91] entnommenen Messwerte der Beträge der vertikalen Komponente der magnetischen Flussdichte mit Simulationen für verschiedene Radien der Polschuhe und linearem Material. Die verwendete Stromstärke betrug 225 A. Dabei wurden die Vorzeichen der Koordinaten der Messwerte aus Gründen der Vergleichbarkeit gedreht und somit das in Abbildung 4.7 dargestellte Koordinatensystem verwendet.

## B Anhang zum Pentapol

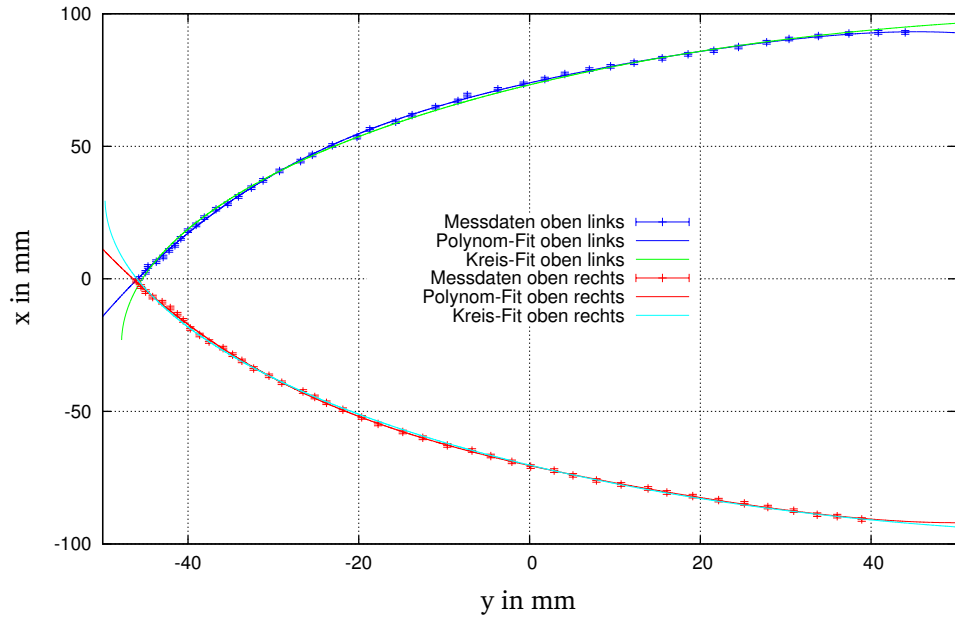


Abbildung B.1.: Die aus der Skizze des Pentapols abgelesenen Polformen der oberen Pole mit jeweils einem Polynom- und einem Kreisfit.

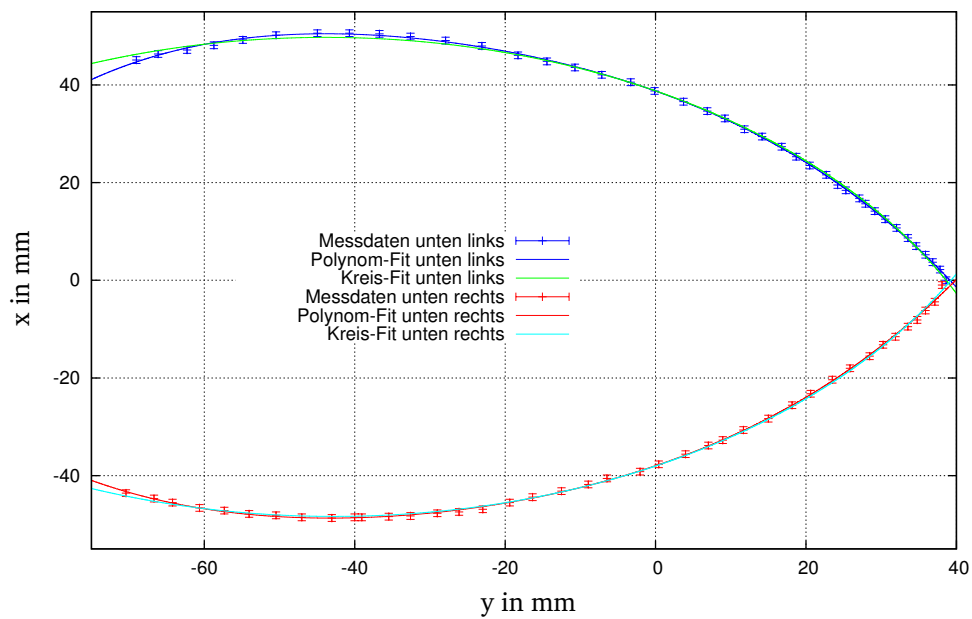
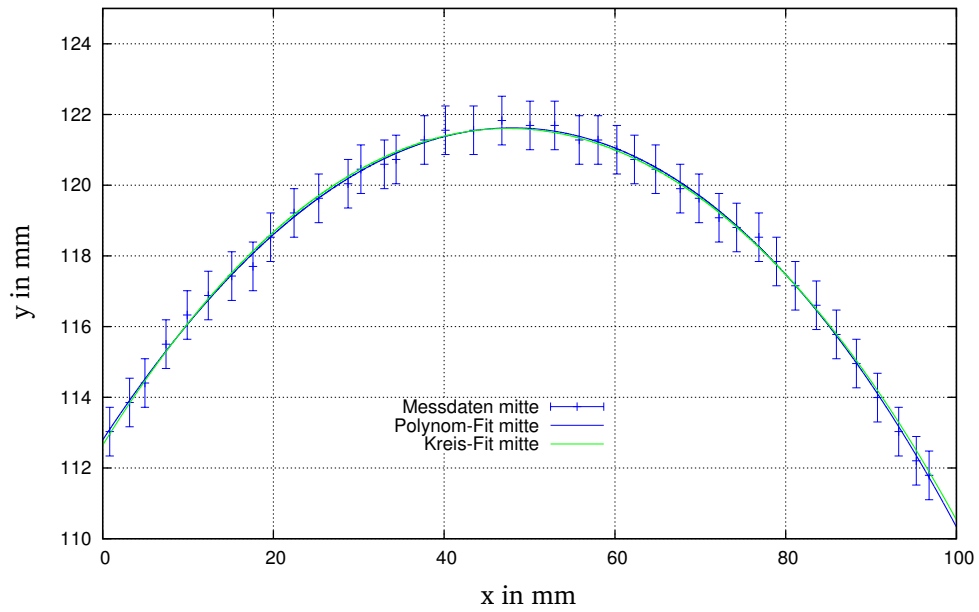
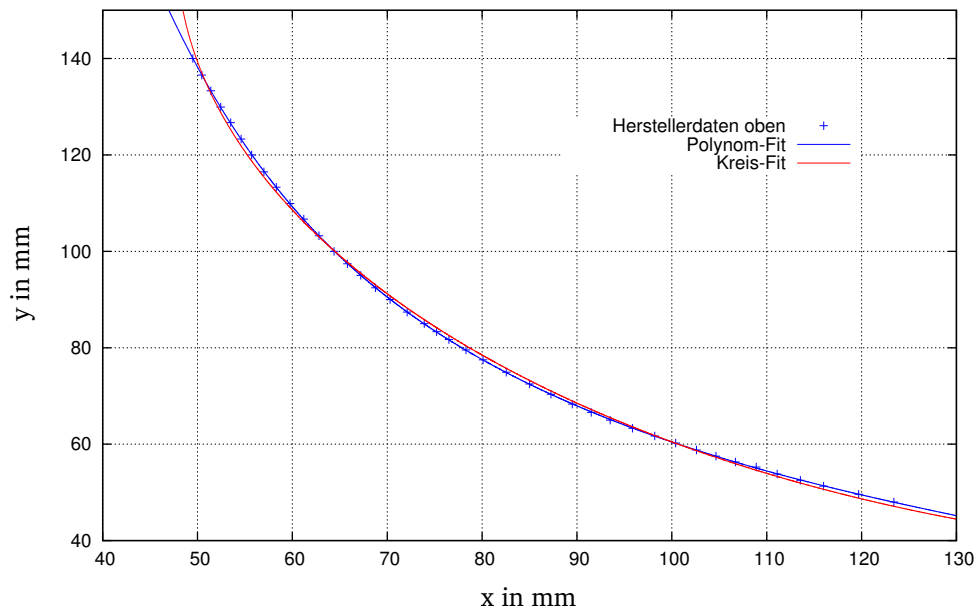


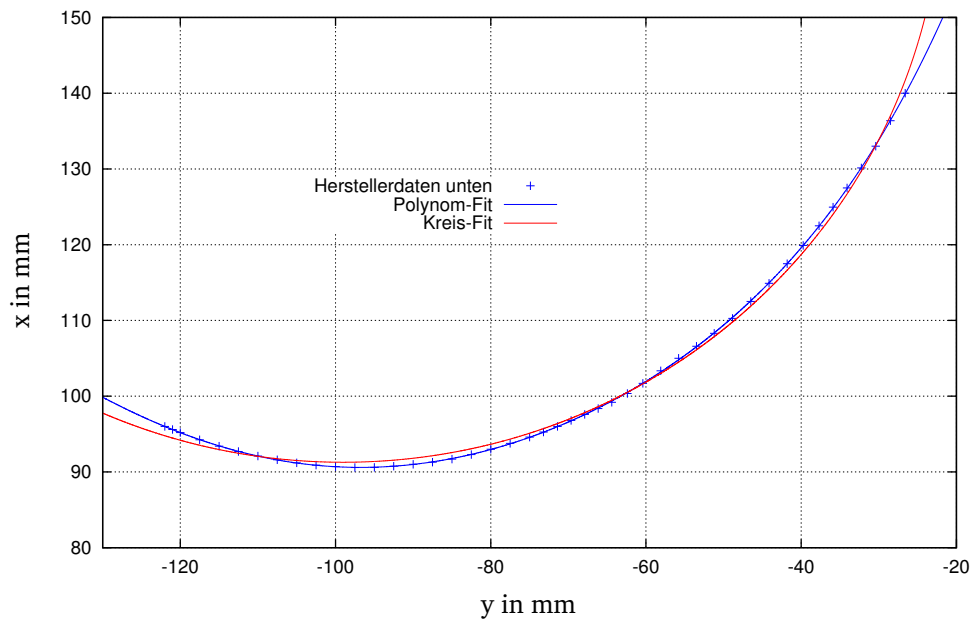
Abbildung B.2.: Die aus der Skizze des Pentapols abgelesenen Polformen der unteren Pole mit jeweils einem Polynom- und einem Kreisfit.



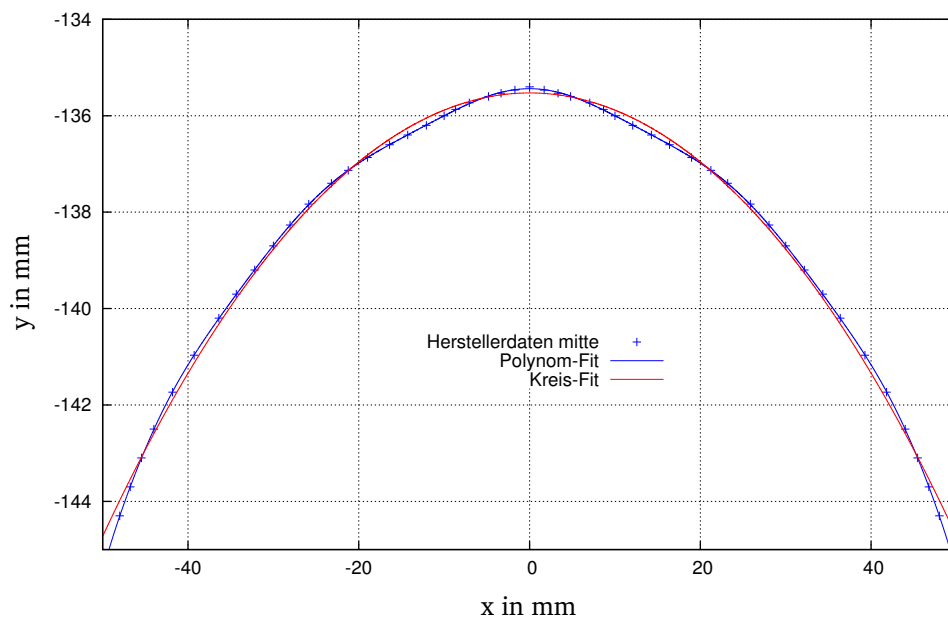
**Abbildung B.3.:** Die aus der Skizze des Pentapols abgelesene Polform des mittleren Pols mit jeweils einem Polynom- und einem Kreisfit.



**Abbildung B.4.:** Die vom Hersteller des Pentapols übermittelte Polform der oberen Pole mit jeweils einem Polynom- und einem Kreisfit.



**Abbildung B.5.:** Die vom Hersteller des Pentapols übermittelte Polform der unteren Pole mit jeweils einem Polynom- und einem Kreisfit.



**Abbildung B.6.:** Die vom Hersteller des Pentapols übermittelte Polform des mittleren Pols mit jeweils einem Polynom- und einem Kreisfit.





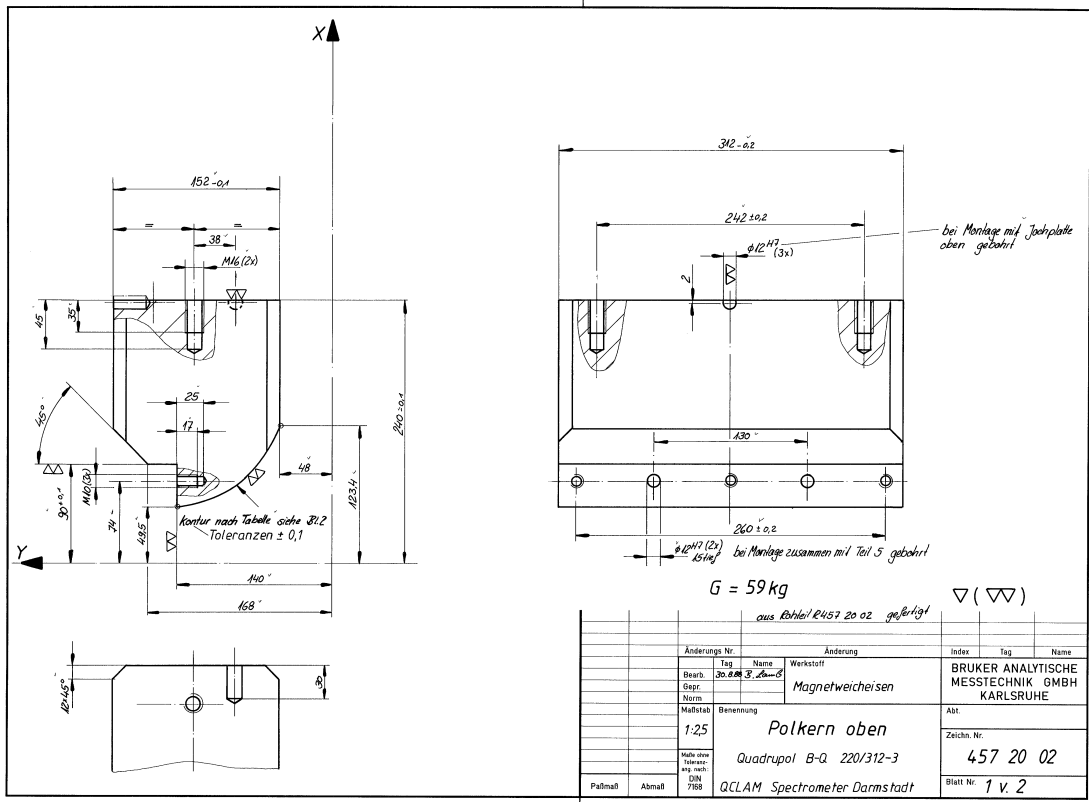


Abbildung B.8.: Das vom Hersteller zugesandte Datenblatt der oberen Pole.

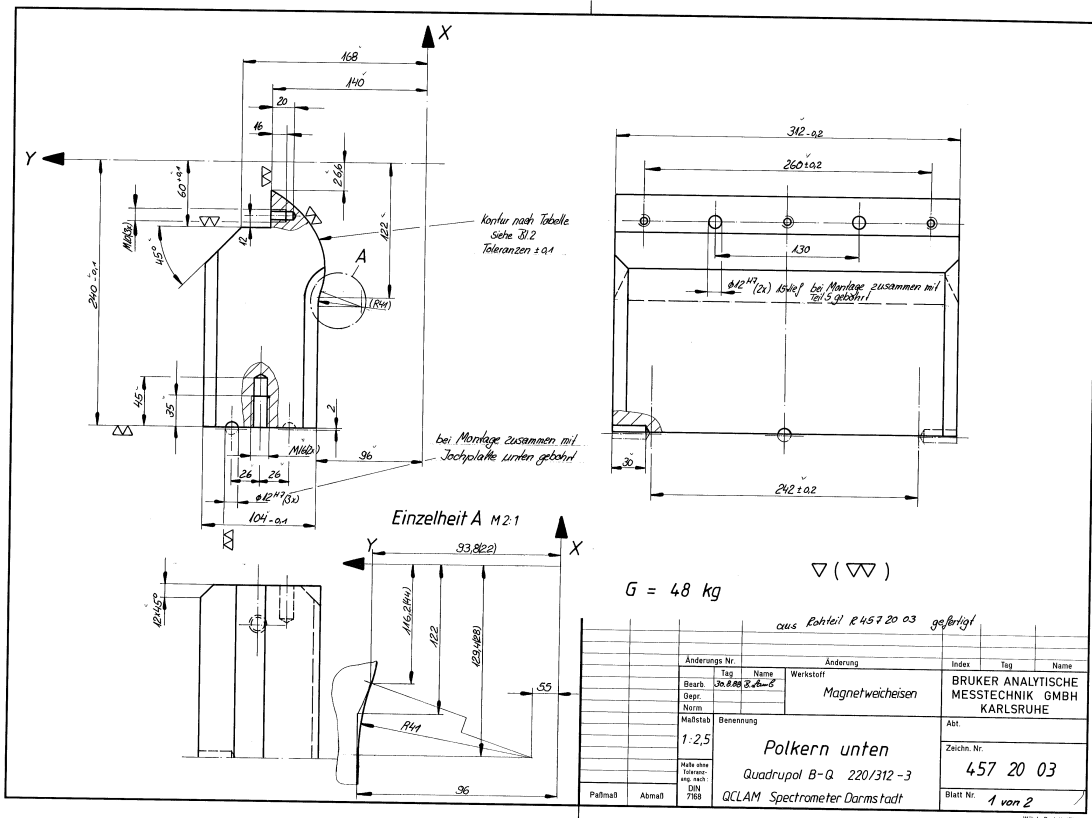


Abbildung B.9.: Das vom Hersteller zugesandte Datenblatt der unteren Pole.

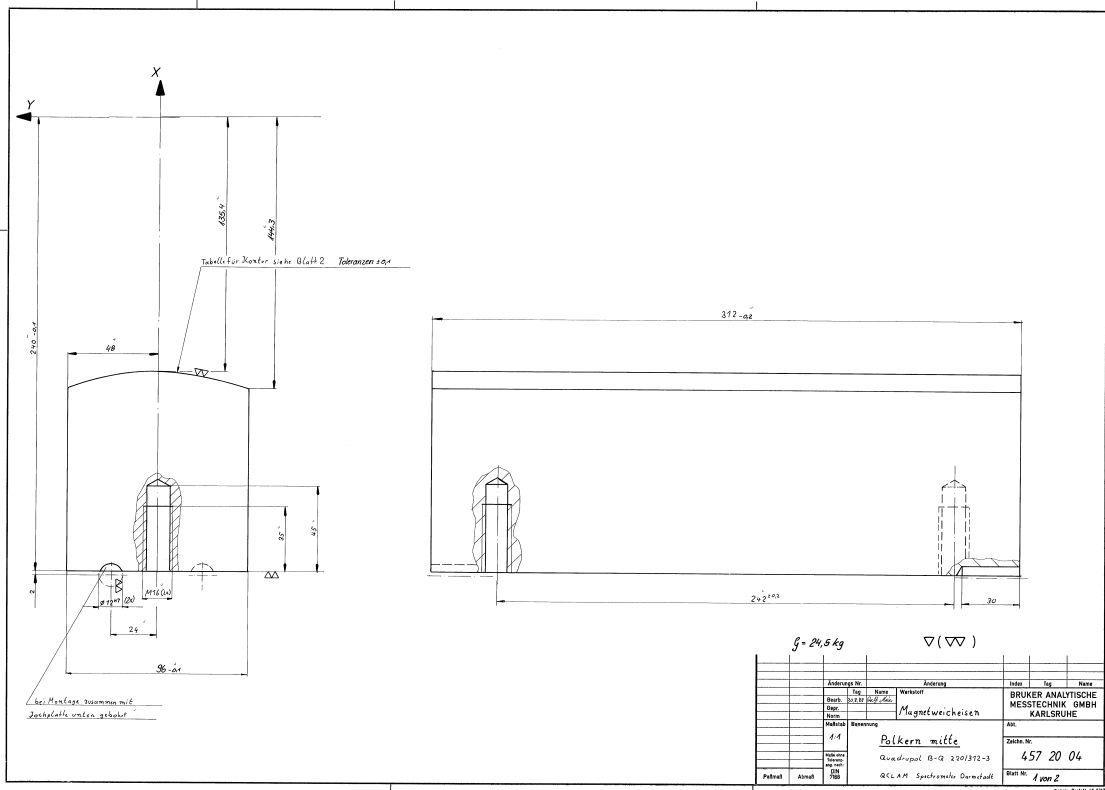


Abbildung B.10.: Das vom Hersteller zugesandte Datenblatt des neutralen Pols.

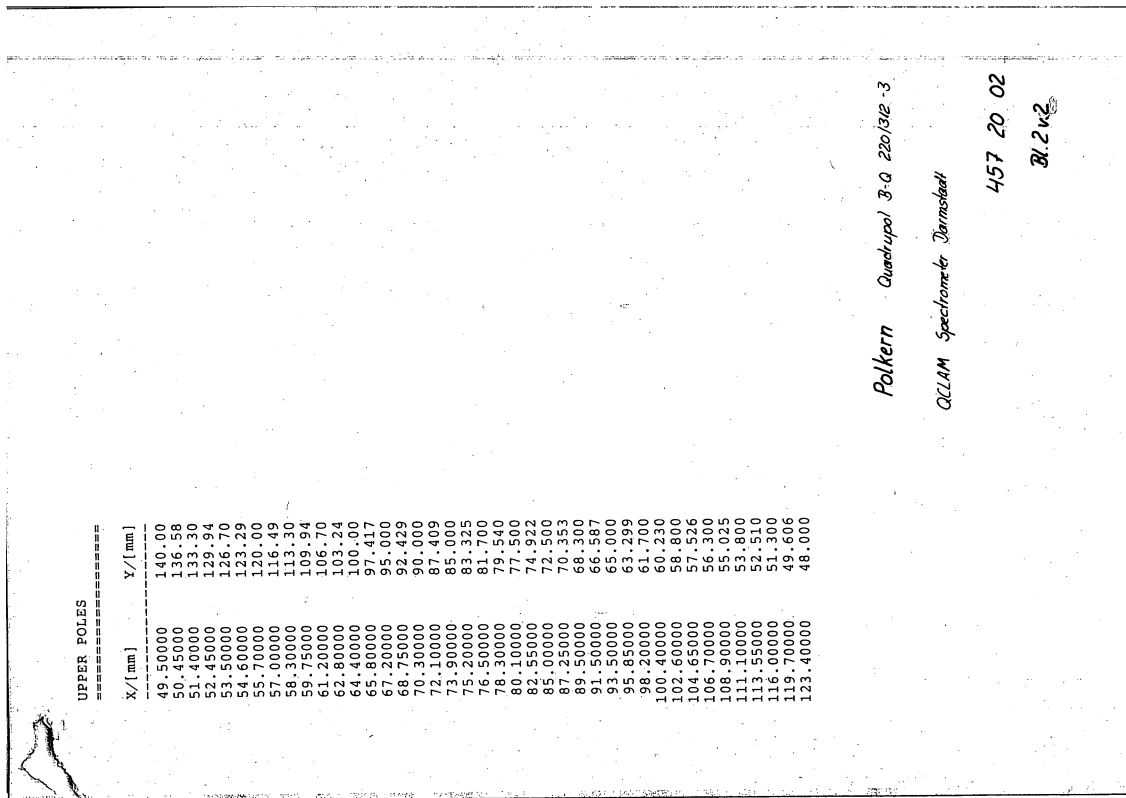


Abbildung B.11.: Die vom Hersteller zugesandten Daten zur Form der oberen Pole.

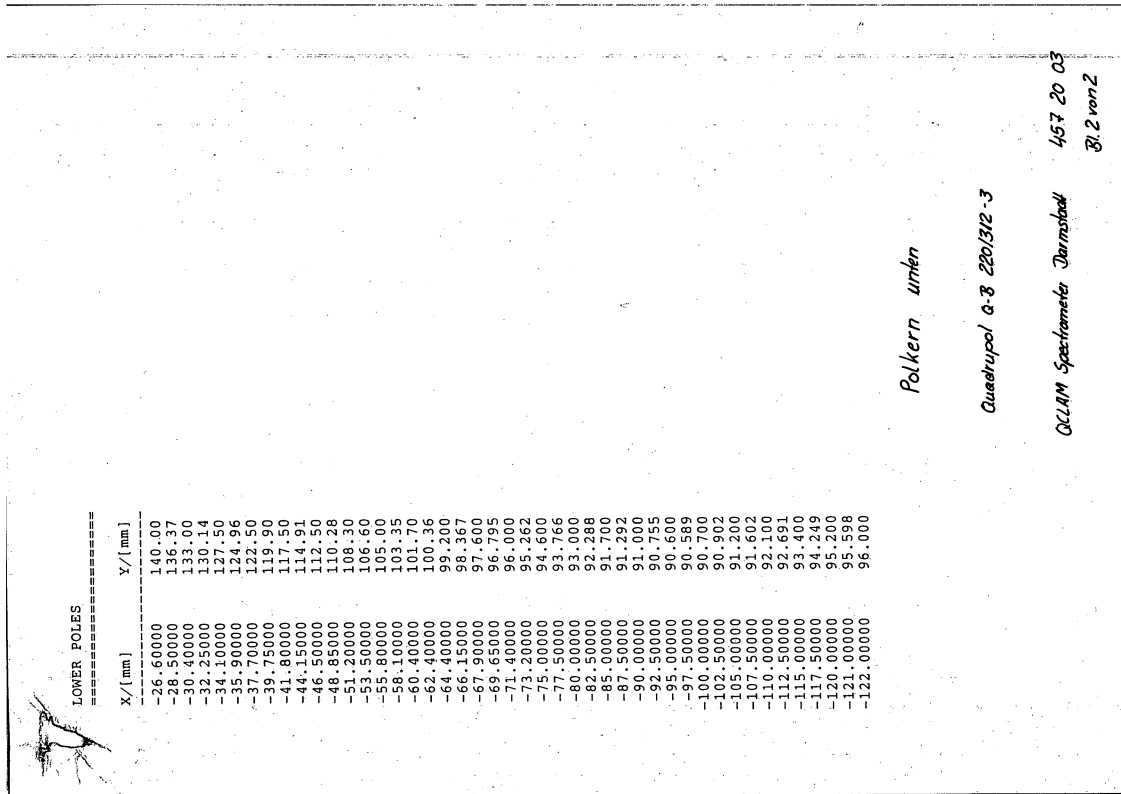


Abbildung B.12.: Die vom Hersteller zugesandten Daten zur Form der unteren Pole.

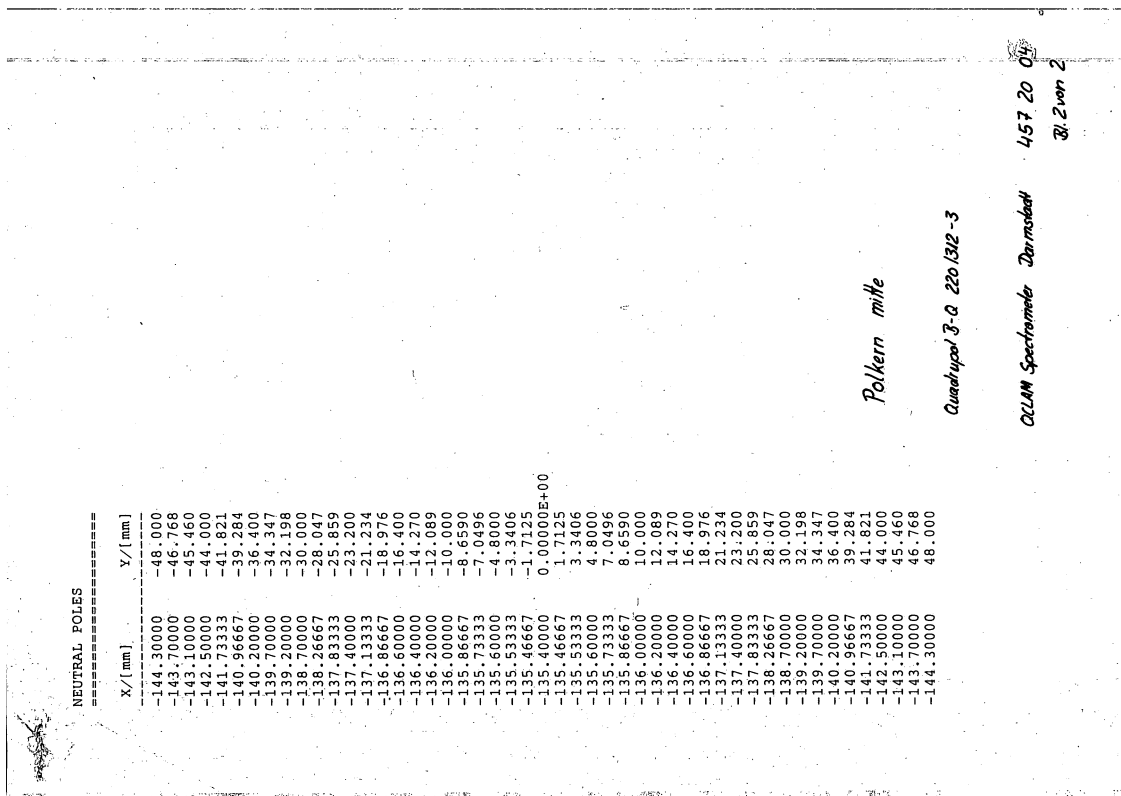


Abbildung B.13.: Die vom Hersteller zugesandten Daten zur Form des neutralen Pols.

## C Anhang zum QClam

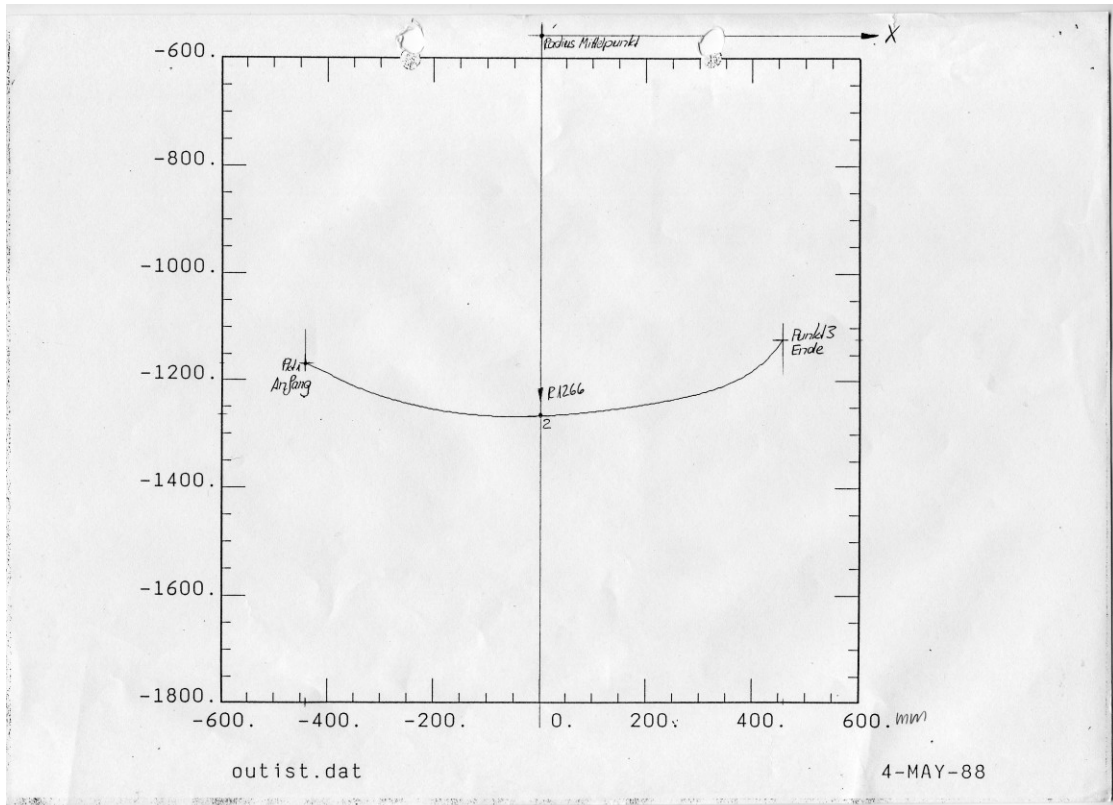
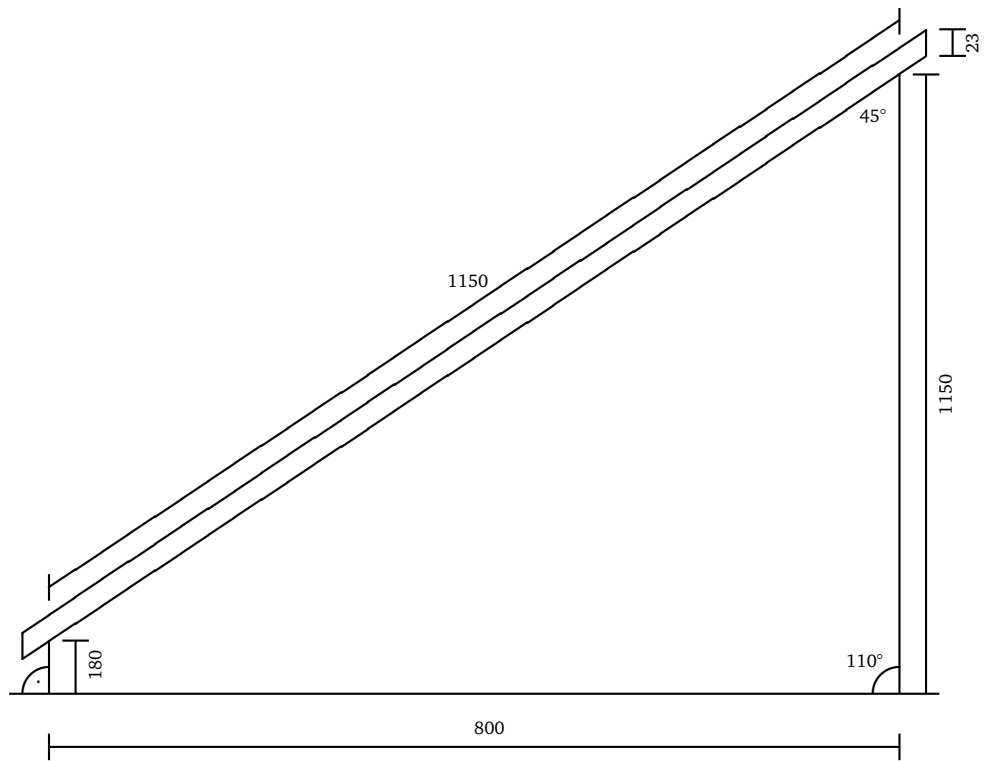


Abbildung C.1.: Plot der Kontur des Shim-Einsatzes.



**Abbildung C.2.:** Aufsatz der Vakuumkammer des QClams, auf dem der Detektor befestigt ist.  
Alle Angaben sind in Millimeter.



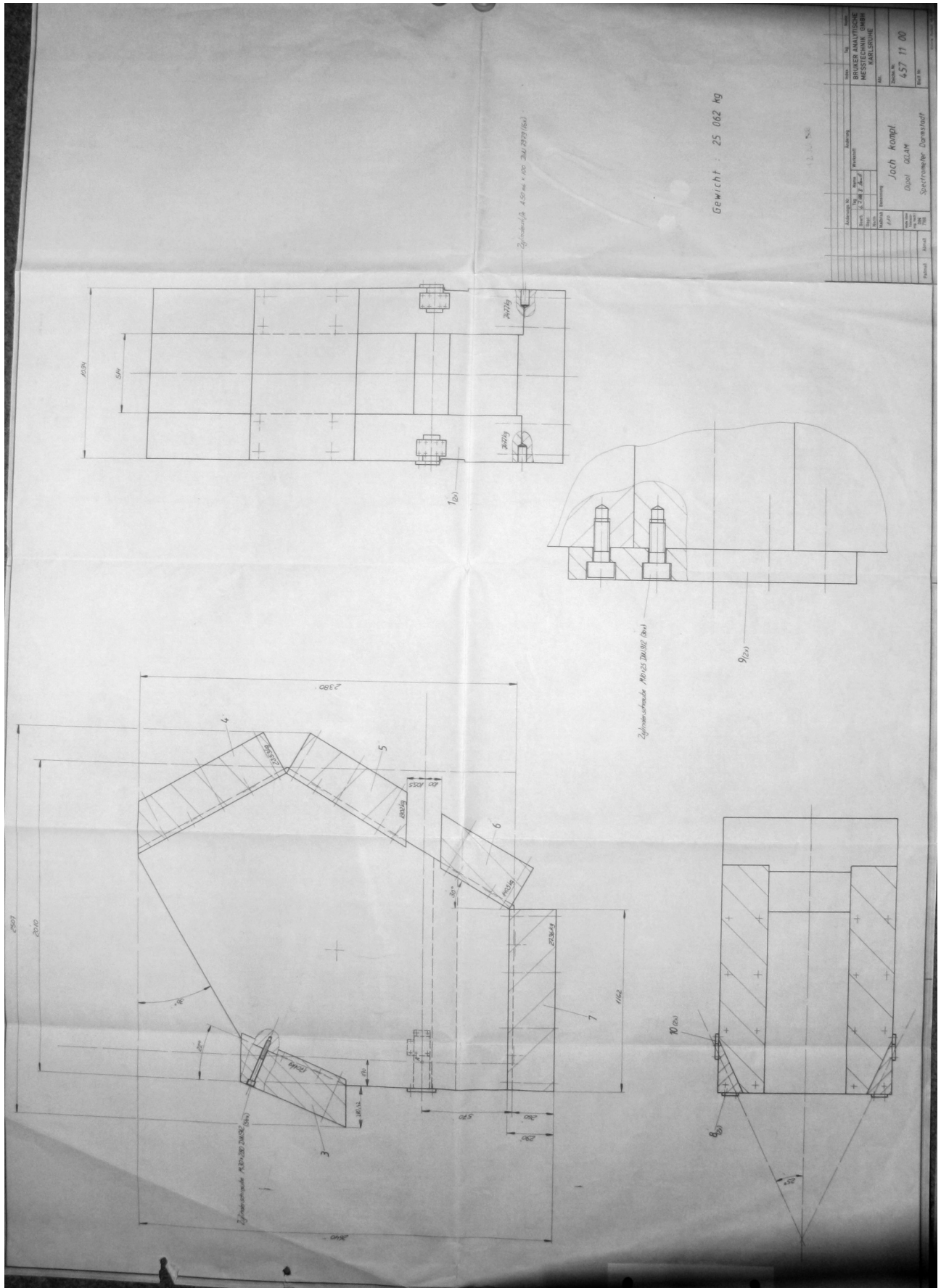


Abbildung C.4.: Technische Zeichnung des Jochs des QClams.

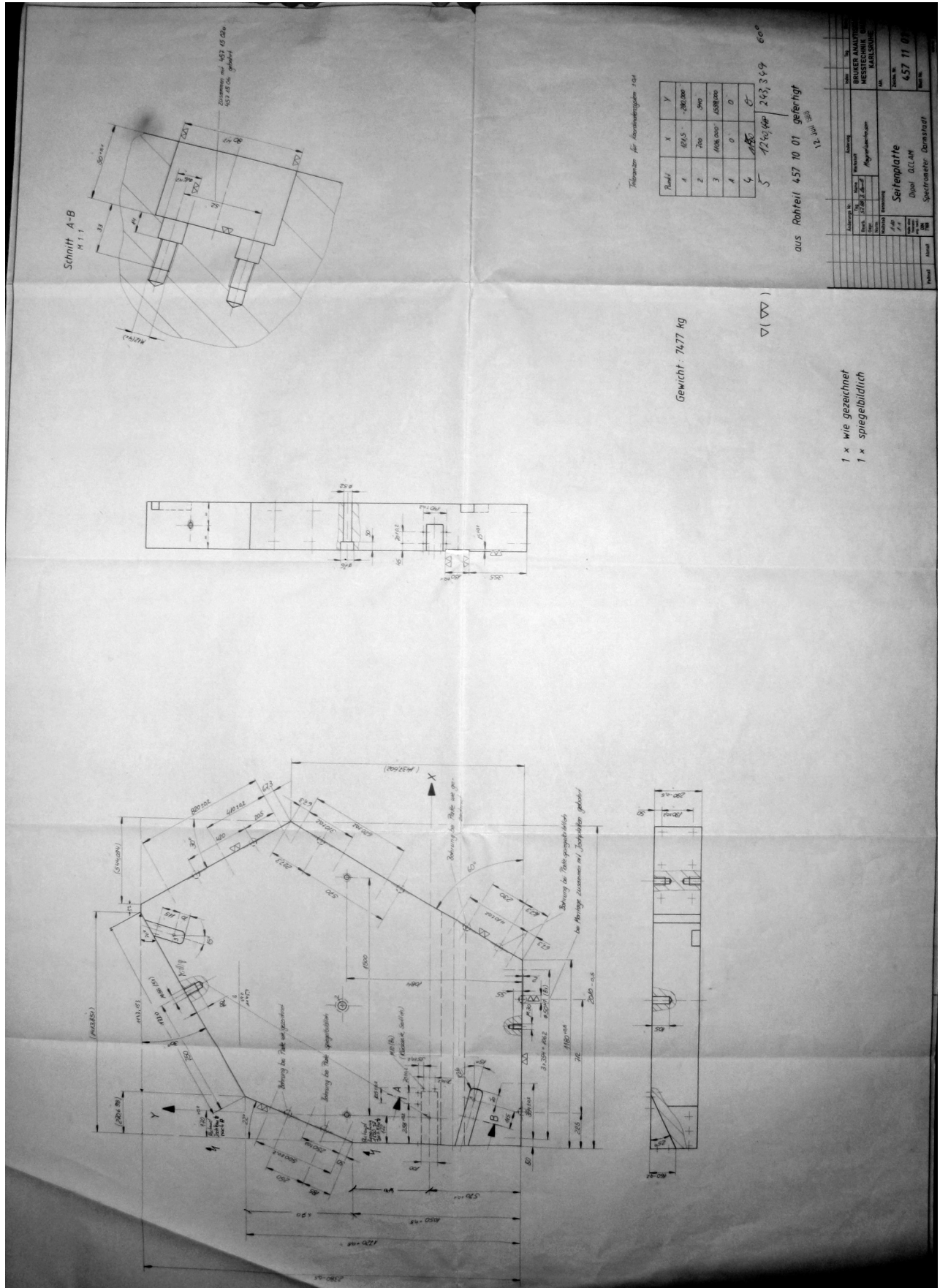


Abbildung C.5.: Technische Zeichnung der Seitenplatte des Jochs des QClams.



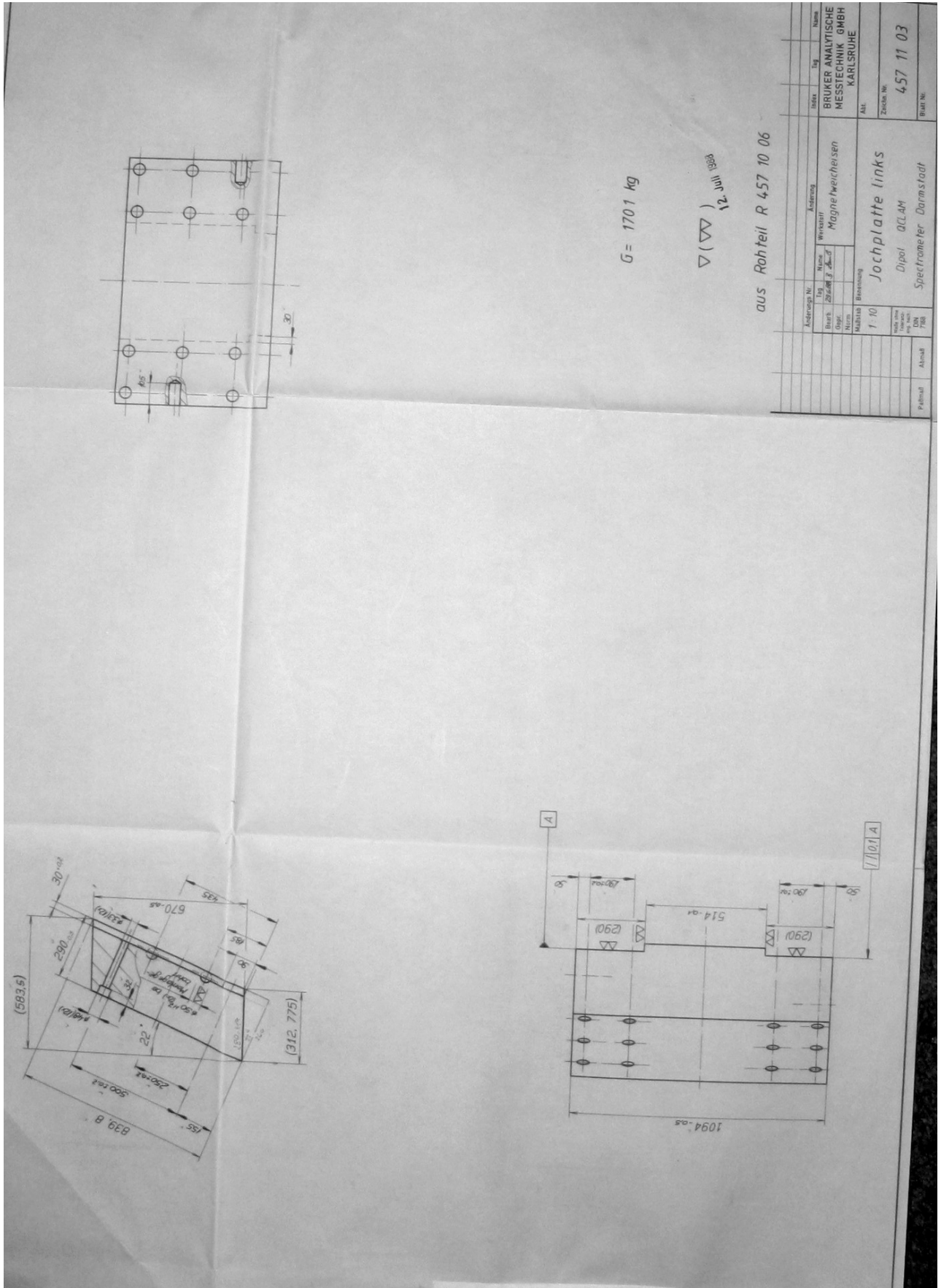


Abbildung C.6.: Technische Zeichnung der linken Jochplatte des QClams.

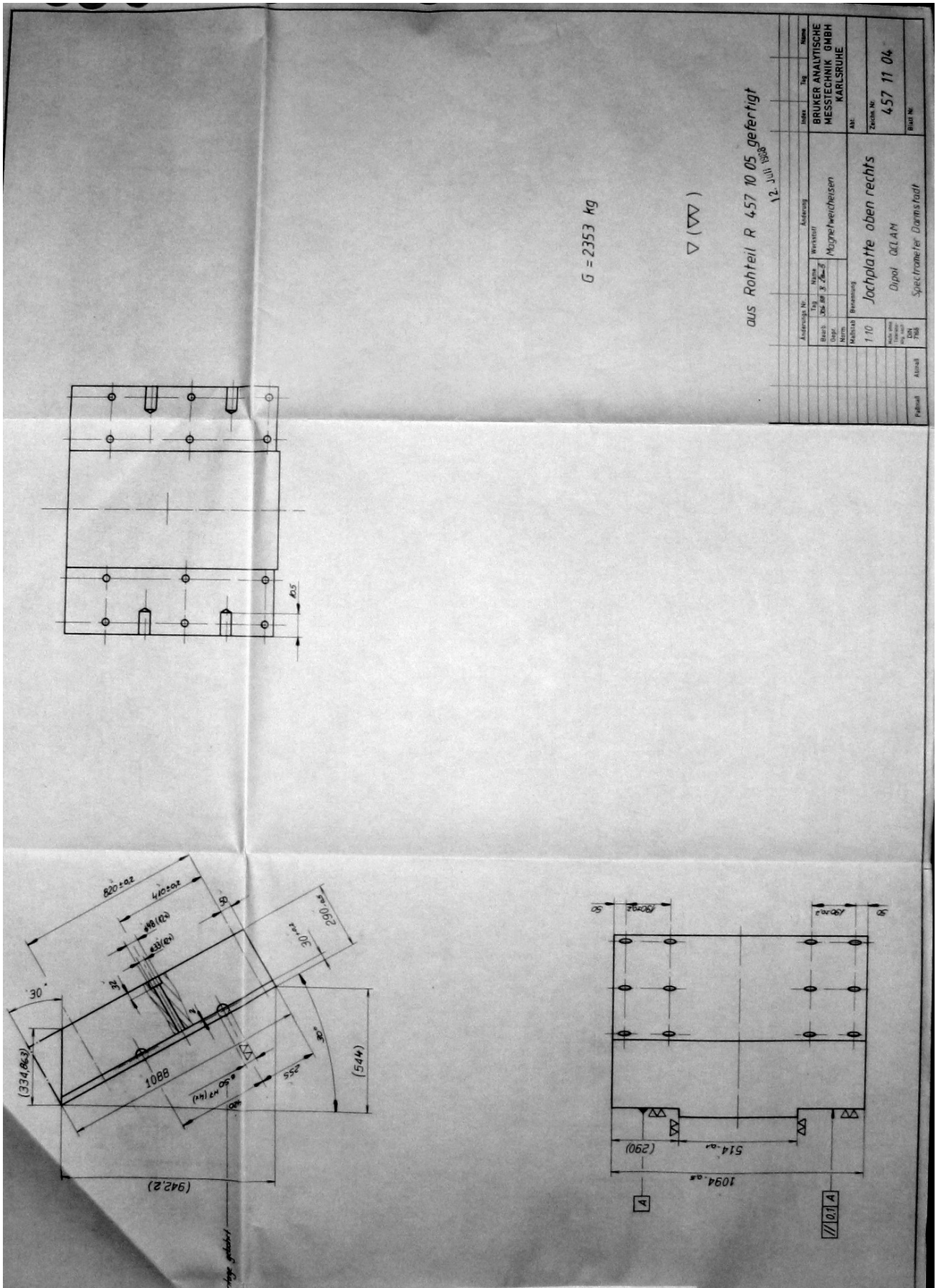


Abbildung C.7.: Technische Zeichnung der rechten oberen Jochplatte des QClams.

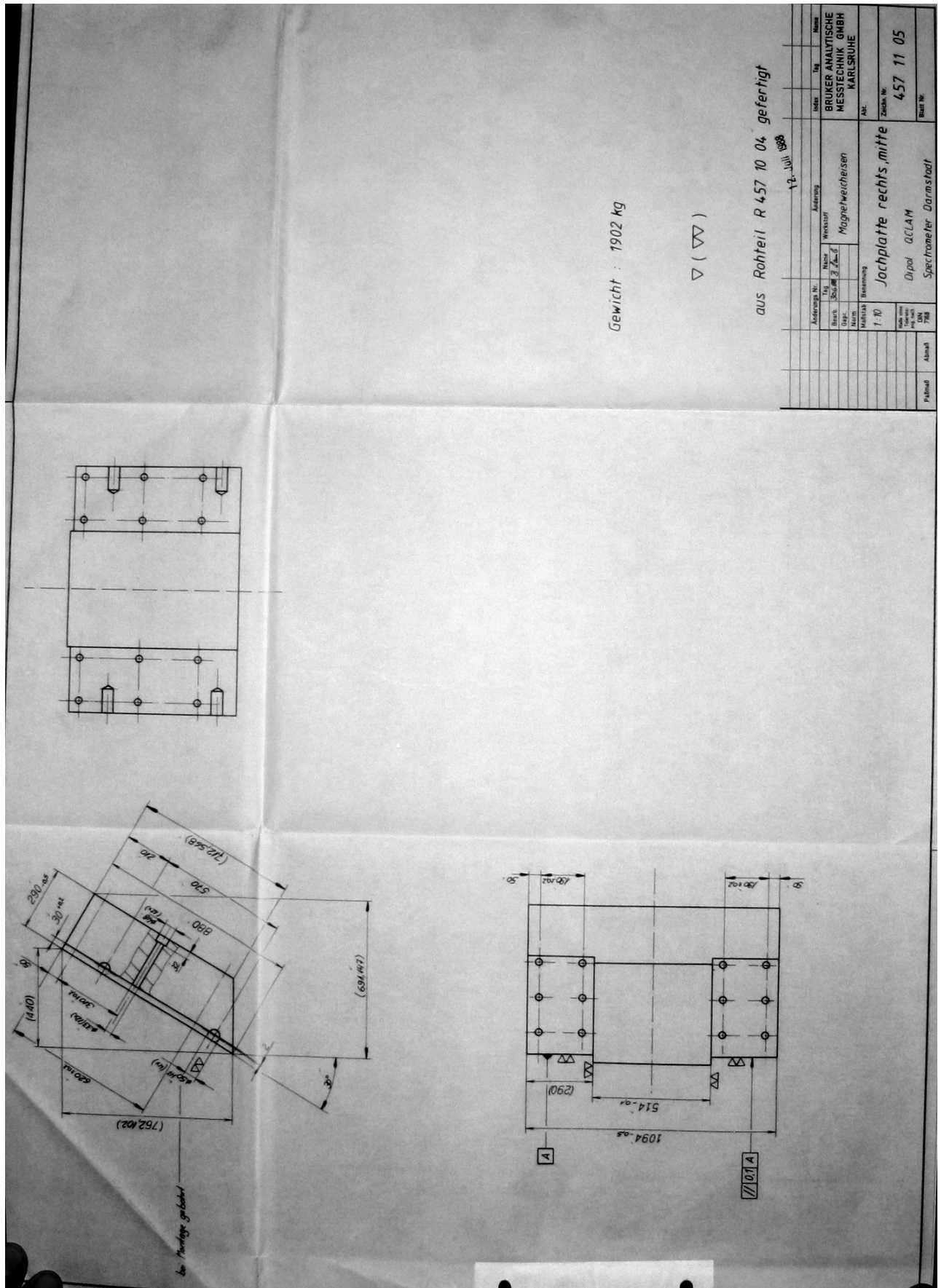


Abbildung C.8.: Technische Zeichnung der rechten mittleren Jochplatte des QClams.

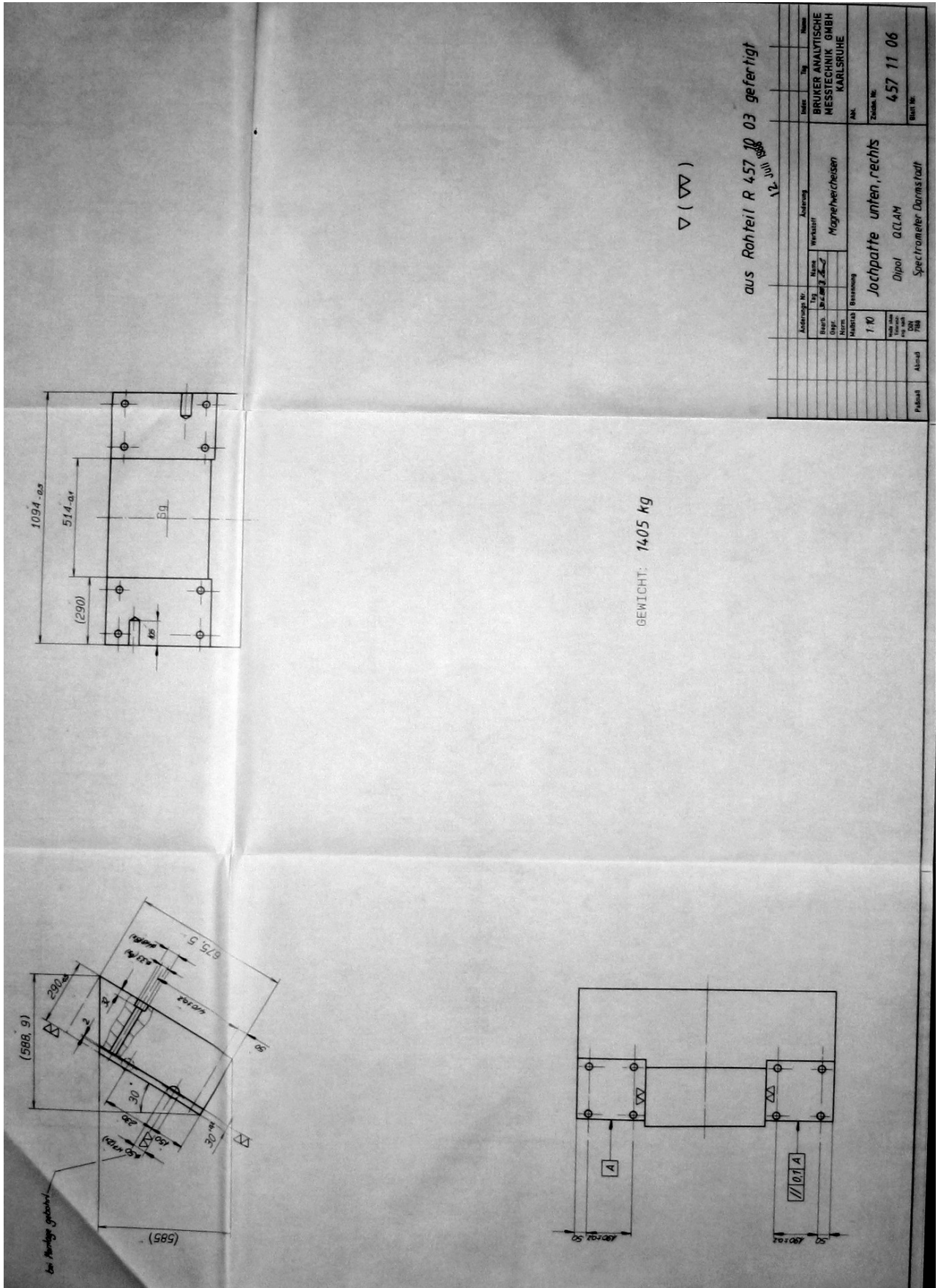


Abbildung C.9.: Technische Zeichnung der rechten unteren Jochplatte des QClams.

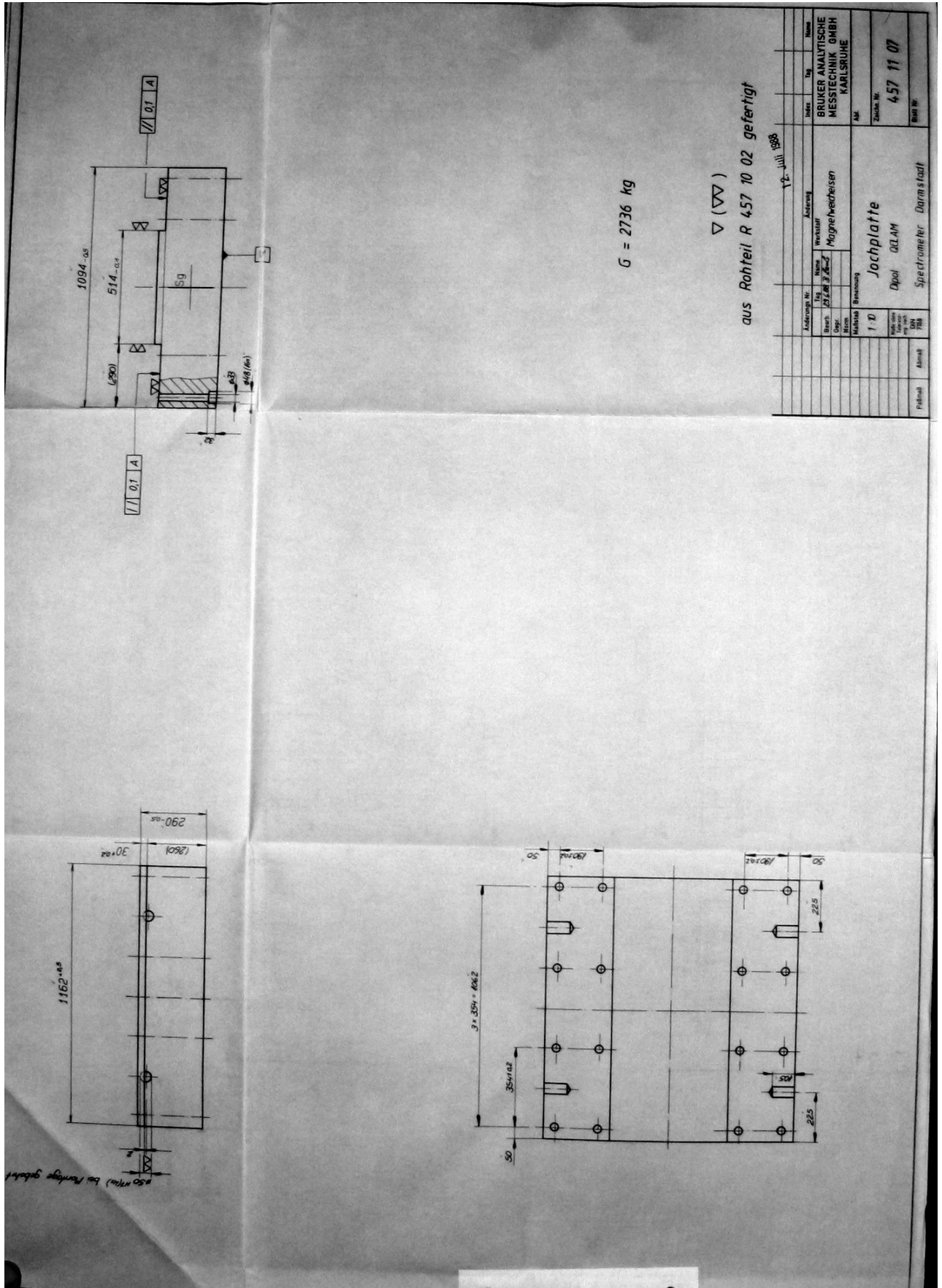


Abbildung C.10.: Technische Zeichnung der unteren Jochplatte des QClams.

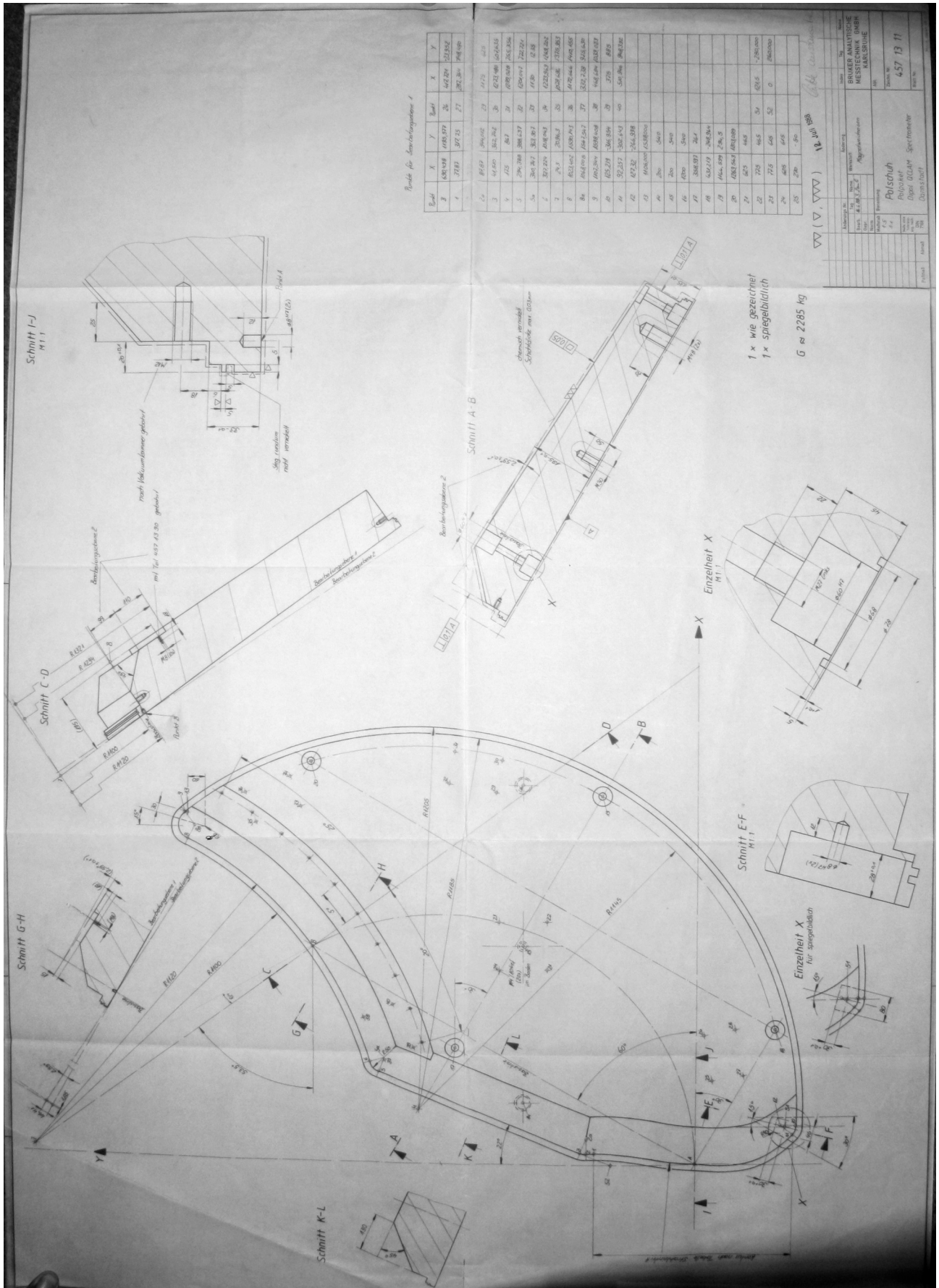


Abbildung C.11.: Technische Zeichnung des Polschuhs des QClams.

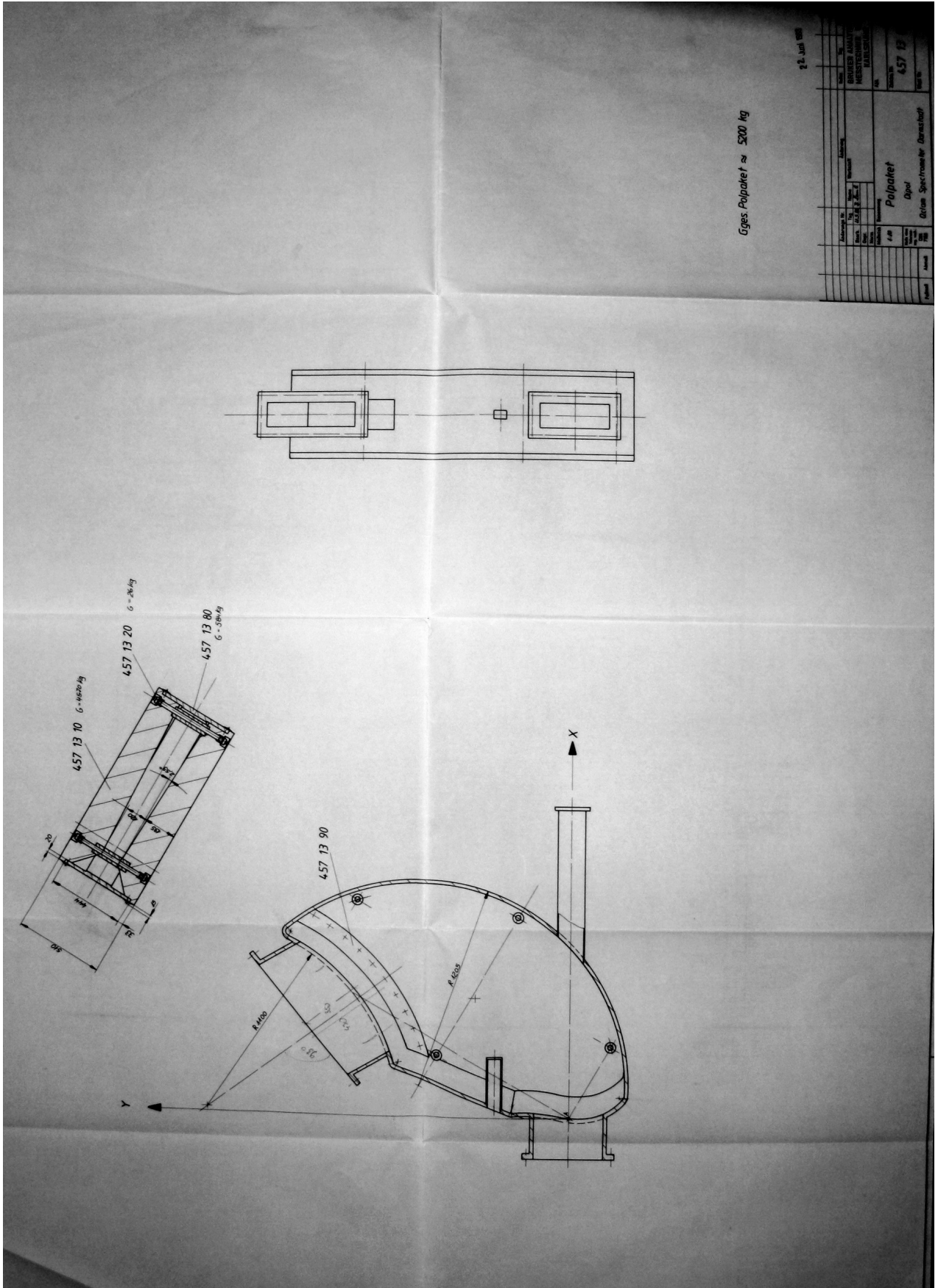


Abbildung C.12.: Technische Zeichnung des Polpakets des QClams.

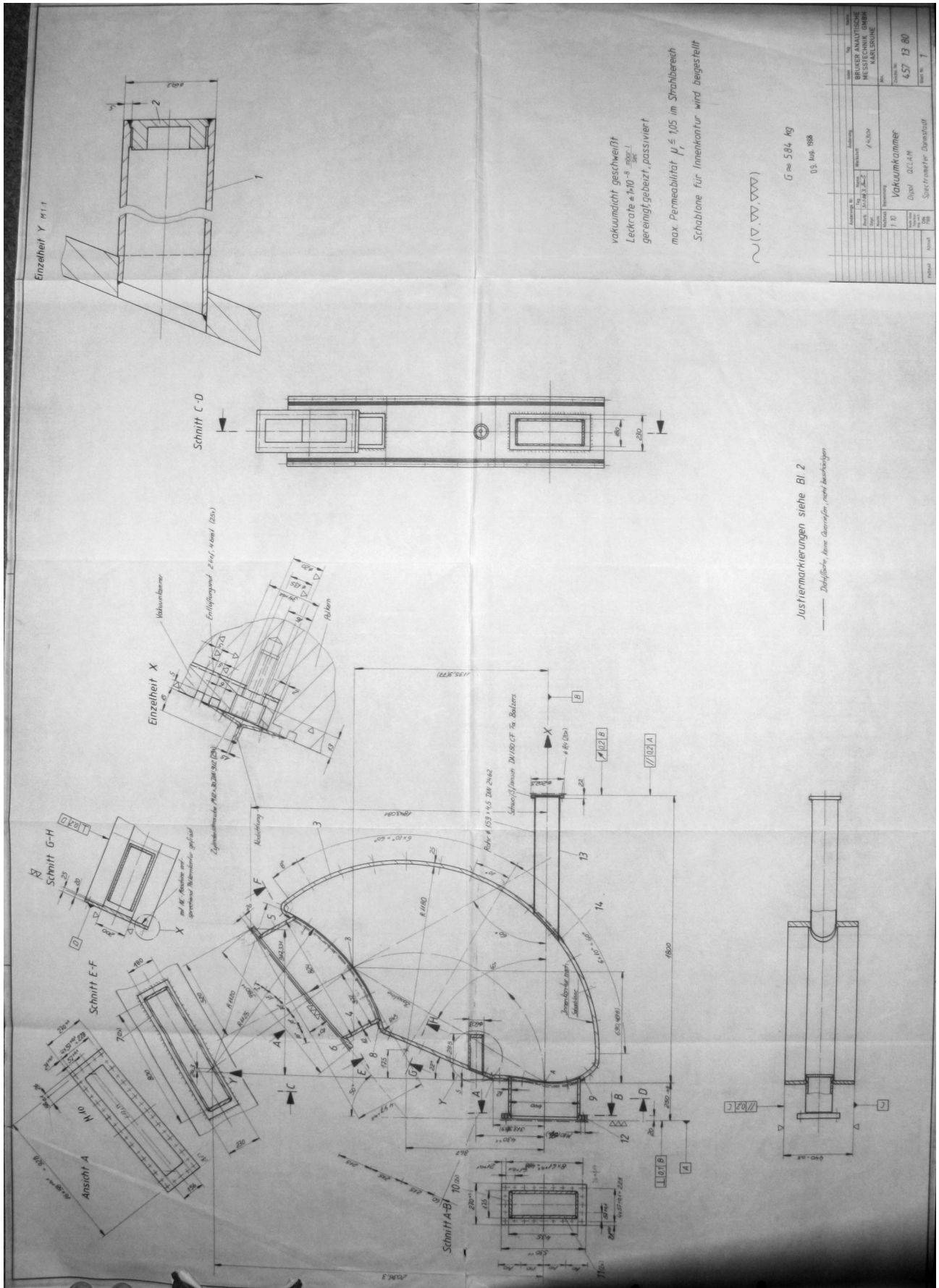


Abbildung C.13.: Technische Zeichnung der Vakuulkammer des QClams.



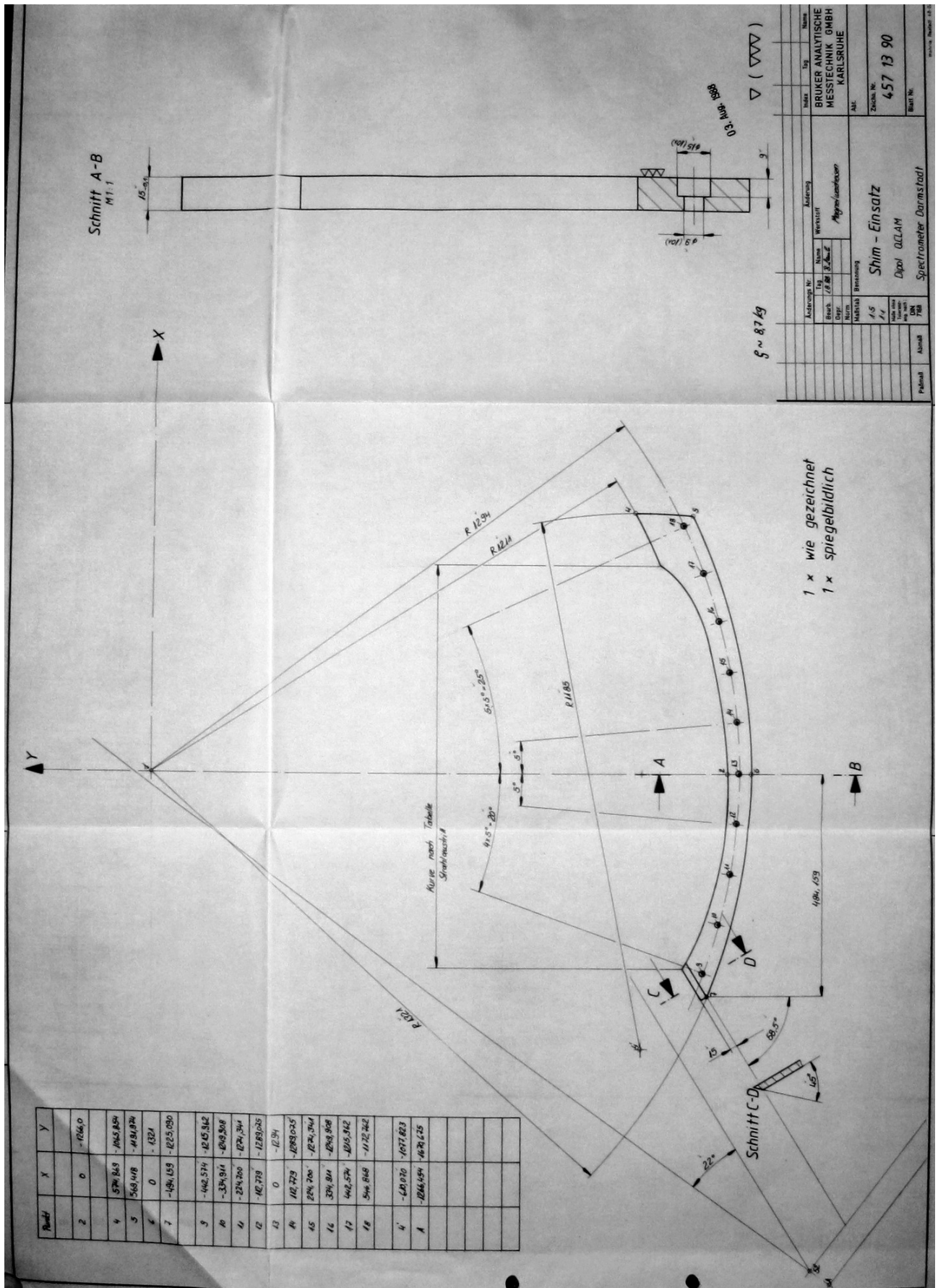


Abbildung C.14.: Technische Zeichnung des Shim-Einsatzes des QClams.

---

## Literaturverzeichnis

---

- [BrD04] S. Brandt, H.D. Dahmen: *Elektrodynamik. Eine Einführung in Experiment und Theorie*. Auflage 4, S. 438ff, Springer (2004)
- [Deh88] H. Dehmelt: *A Single Atomic Particle Forever Floating at Rest in Free Space: New Value for Electron Radius*. Physica Scripta, Band 22, S. 102ff (1988)
- [Kni91] M. Knirsch: *Konzeption, Aufbau und Erprobung eines hochauflösenden QCLAM-Elektronenspektrometers mit großem Raumwinkel und hoher Impulsakzeptanz am Elektronenbeschleuniger S-DALINAC*. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt (1991)
- [Lüt94] G.C. Lüttge: *Entwicklung und Aufbau eines Magnetsystems für Elektronenstreuung unter 180° und vollständige Bestimmung der Magnetischen Dipol- und Quadrupolstärkeverteilung in  $^{28}\text{Si}$* . Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt (1994)
- [MoM65] N.F. Mott, H.S.W. Massey: *The Theory of Atomic Collisions*. Clarendon Press (1965)
- [Ran66] R.E. Rand: *Design of a 180° electron scattering facility*. Nuclear Instruments and Methods, Band 39, S. 45ff (1966)
- [Rei00] B. Reitz: *Weiterentwicklung des Detektorsystems am QCLAM-Spektrometer des S-DALINAC und Untersuchung der Reaktionen  $^{48}\text{Ca}(e,e')$  und  $^{58}\text{Ni}(e,e')$  unter 180°*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt (2000)
- [Ric96] A. Richter: *Operational Experience at the S-DALINAC*. Proc. EPAC 1996. Sitges/Barcelona. IOP Publishing, Bristol S. 110ff (1996)
- [Rut11] E. Rutherford: *The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom*. Philosophical Magazine Series 6, Band 21 S. 669ff (1911)

---

## Erklärung zur Bachelor-Thesis

---

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelor-Thesis ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 26. November 2011

---

(Sebastian Heil)