Institut für Kernphysik

Westfälische Wilhelms-Universität
Münster

Konzept und Aufbau eines Kernspuremulsionsscanning-mikroskops

Diplomarbeit
vorgelegt von

Nicola Bruski

März 1998

Experimentelle Physik

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1

Einleitung

Neutrinos spielen in der Teilchen- und Astrophysik eine zentrale Rolle und die Kenntnis ihrer Eigenschaften ist daher von fundamentalem Interesse. Aber trotz zahlreicher Experimente sind noch viele Fragen ungeklärt, wie zum Beispiel die Frage nach den Neutrinomassen und einer daraus resultierenden Neurinomischung.
Diesen Problemen geht das CHORUS-Experiment am CERN nach. Es wird gezielt nach dem Auftreten eines ν_τ in einem ν_μ-Breitbandstrahl gesucht. Zum Nachweis der Reaktion wird ein Target aus Kernspuremulsion verwendet, das nach der Strahlzeit in einzelne Platten zerschnitten und unter dem Mikroskop ausgewertet wird.

Das Thema dieser Diplomarbeit ist das Konzept und der Aufbau eines Scanning-Mikroskops im Institut für Kernphysik in Münster. Das Vorbild für ein Gerät zur computergestützten Emulsionsanalyse stammt aus Japan, wo seit über zehn Jahren an dieser Technik gearbeitet wurde. Die Grundidee wurde übernommen, die Technik jedoch an die europäischen Standards angepaßt. Es entsteht ein Mikroskop, das Emulsionsplatten mit einer Größe von 40 cm $\times$ 80 cm in Sekunden mikrometergenau positionieren kann. Die Bildauslese wird mit Hilfe einer hochauflösenden CCD-Kamera (*Charge Coupeled Device*) betrieben. Ihre Daten werden durch DSPs (*Digital Signal Processor*) ausgewertet und zur weiteren Analyse von einem Rechner verarbeitet. Das System wird in der Lage sein, Emulsionsanalysen vollautomatisch durchzuführen.

Diese Arbeit beschäftigt sich im Kapitel 2 kurz mit den theoretischen Grundlagen der Neutrinophysik, die zum Verständnis des CHORUS-Experiments beitragen. Sein Aufbau mit dem Schwerpunkt Emulsionstarget und -analyse ist im Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 4 wird das Konzept des Mikroskops und dessen Umsetzung beschrieben. Kapitel 5 ist eine Einführung in die Techniken der digitalen Bildverarbeitung, wie sie für die Analyse der Emulsion benutzt werden können. Im Anhang A ist die bereits entwickelte Software erläutert, es schließt sich in Anhang B noch eine vertiefende Bedienungsanleitung zur Steuerungs-Hardware an.

Kapitel 2

Theorie

2.1 Das Standard-Modell und die schwache Wechselwirkung

Im Standard-Modell der Teilchenphysik ist das heutige Wissen von den kleinsten Teilchen und den zwischen ihnen wechselwirkenden Kräften zusammengefaßt. Im wesentlichen besteht es aus der QCD (Quantenchromodynamik), der starken Wechselwirkung zwischen Quarks, und der Glashow-Weinberg-Salam-Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung. Sie vereint die elektromagnetische Wechselwirkung und die schwache Kernkraft in einer einheitlichen Theorie. Steven Weinberg, Abdus Salam und Sheldon L. Glashow erhielten dafür 1979 den Nobelpreis. Das Standard-Modell wird bis heute experimentell bestätigt.
Man unterscheidet als fundamentale Klassen von Elementarteilchen Fermionen und Vektorbosonen. Ihre Eigenschaften sind in den folgenden Tabellen aufgelistet.

Fermionen: $J^P = 1/2^+$, **Materieteilchen**	
Leptonen: 3 Leptonfamilien	Quarks: 3 Quarkfamilien
$L_e = 1 \quad L_\mu = 1 \quad L_\tau = 1$ $\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \leftarrow Q{=}1 \\ \leftarrow Q{=}0 \end{matrix}$ und Antileptonen	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \leftarrow Q{=}2/3 \\ \leftarrow Q{=}-1/3 \end{matrix}$ und Antiquarks
Mögliche Wechselwirkungen: geladene Leptonen: El.-magnetisch und schwach ν's: schwach Die Leptonenfamilien verhalten sich bezüglich der elektroschwachen WW gleich (Lepton-Universalität)	Mögliche Wechselwirkungen: Alle

Vektorbosonen: $J^P = 1^-$, **Austauschteilchen zwischen Fermionen**	
Elektromagnetische Wechselwirkung	Photon γ, $m = 0$
Schwache WW	$W^\pm$ für geladene Ströme, Z^0 für neutrale Ströme
Starke WW	8 Gluonen

Die Gravitation ist vernachlässigt worden, da sie die Anziehung von Teilchen aufgrund ihrer Masse über große Reichweiten beschreibt.

Ein Fermion f geht unter Emission eines Vektorbosons V in ein Fermion f' über. Die Stärke der Wechselwirkung wird durch die Kopplungskonstante g beschrieben.
Laut Quantenfeldtheorie ist diese Wechselwirkung die Kopplung des Fermionenstroms j_α an ein Vektorfeld V_α (WW = Kopplungskonstante · Fermionenstrom · Vektorfeld).
Leptonenströme werden in der $(V - A)$-Theorie beschrieben. Man unterscheidet schwache geladene und neutrale Leptonenströme.

Geladene schwache Leptonenströme
Ein Strom heißt geladen, wenn sich bei dem Übergang $f \to f'$ die elektrische Ladung ändert. Unter Erhaltung der individuellen Leptonenzahl L_l bewirkt ein geladener (CC = charge current) Strom den Übergang $\nu_l \leftrightarrow l$ ($l = e, \mu, \tau$ mit $\Delta Q = \pm 1$).

Neutrale schwache Ströme
Sie bewirken die NC- (neutral current) Übergänge $\nu_l \leftrightarrow \nu_l$ mit $\Delta Q = 0$.

Schwache geladene und neutrale Quarkströme
Die Form der Quarkströme ist nach der $(V - A)$-Theorie analog zu denen der Leptonenströme.
Sie bewirken CC-Übergänge $q_1 \leftrightarrow q_2$ mit $\Delta Q = \pm 1$. Da es keine Forderung nach Erhaltung der Quarkfamilien gibt, können sich Übergänge mit abnehmender Wahrscheinlichkeit von einer Quarkfamilie zur nächsten und übernächsten ereignen (flavour-mixing).
Formal läßt sich die Quark-Mischung durch die unitäre 3×3 Mischungsmatrix U, der Kobayashi-Maskawa-Matrix, beschreiben. Die Matrixelemente sind die relativen Amplituden für die neun CC-Übergänge. Vereinfacht man die Matrix für schwache Prozesse, an denen nur die Quarks der ersten beiden Familien beteiligt sind, erhält man die zweidimensionale Cabibbo-Matrix.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = U_e \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad U_e = \begin{pmatrix} cos\Theta_c & sin\Theta_c \\ -sin\Theta_c & cos\Theta_c \end{pmatrix}$$

Θ_c ist der Cabibbo-Winkel.
Erweitert man die Matrix wieder von zwei auf drei Quarkfamilien, erhält man vier unabhängige Parameter (drei Winkel Θ, eine Phase δ).

Der interessierte Leser findet weiterreichende Informationen in [1], [2] und [3].

2.2 Neutrino-Oszillation

Dieser Abschnitt faßt die theoretischen Grundlagen der Neutrino-Oszillation kurz zusammen. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich in [4] und [5].

Unter Neutrino-Oszillation versteht man Übergänge, bei denen sich eine Neutrinoart in eine andere umwandelt. Dies ist nur möglich, wenn nicht alle Neutrinos die gleiche Masse haben, das heißt insbesondere, daß nicht alle masselos sind. Damit wären aber die Leptonflavourzahlen nicht erhalten.
Die bei der schwachen Wechselwirkung auftretenden Neutrinoarten ν_α mit fester Leptonzahl L_α werden Flavoureigenzustände genannt. Sie haben im allgemeinen keine scharfe Masse, d.h. sie sind keine Eigenzustände zum Massenoperator $M :< \nu_\alpha|M|\nu_\beta > \neq 0$ für $\alpha \neq \beta$. Sie sind Mischungen von nicht-entarteten Masseneigenzuständen, die sich mit der Zeit mit unterschiedlichen Phasen entwickeln. Daraus folgt eine zeitabhängige Mischung der verschiedenen Flavourzustände. Im Experiment würde man bei einer flavour-ändernden Oszillation eine andere Neutrinoart beobachten, als primär erzeugt wurde.

Phämenologische Grundlagen

Die Flavoureigenzustände $|\nu_\alpha >$ (zum Beispiel ν_e, ν_μ ...) und die Masseneigenzustände $|\nu_i >$ (ν_1, ν_2 ...) sind über die Mischungsmatrix U miteinander verbunden:

$$|\nu_\alpha >= \sum_i U_{\alpha i}|\nu_i >, \quad |\nu_i >= \sum_\alpha (U^+)_{i\alpha}|\nu_\alpha > = \sum_\alpha U^*_{\alpha i}|\nu_\alpha >$$

$$\text{U ist unitär; d.h. } U^+U = 1, \quad \sum_i U_{\alpha i}U^*_{\beta i} = \delta_{\alpha\beta}, \quad \sum_\alpha U_{\alpha i}U^*_{\alpha j} = \delta_{ij}.$$

Die Zustände $|\nu_i >$ sind als Eigenzustände der Massenmatrix stationäre Zustände mit der Zeitabhängigkeit

$$|\nu_i(t) >= e^{-iE_i t}|\nu_i >$$

mit $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$ für $p \gg m_i$ und $E \approx p$. Die zeitliche Entwicklung eines reinen Flavourzustands wird demnach beschrieben durch

$$|\nu_i(t)>= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_it}|\nu_i>= \sum_{i,\beta} U_{\alpha i} U^*_{\alpha j} e^{-iE_it}|\nu_\beta> .$$

Damit ergibt sich folgende zeitabhängige Übergangsamplitude für den Übergang $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$

$$A(\alpha \rightarrow \beta, t) \equiv <\nu_\beta|\nu(t)>= \sum_i U_{\alpha_i} U^*_{\beta_i} e^{-iE_it}|\nu_\beta> .$$

Einsetzen von E_i und Herausnahme des Phasenfaktors ergibt:

$$A(\alpha \rightarrow \beta, t) = \sum_i U_{\alpha i} U^*_{\beta i} e^{-i\frac{m_i^2}{2}\cdot\frac{L}{E}} = A(\alpha \rightarrow \beta, L)$$

$L = c \cdot t$, $(c = 1)$ ist der Abstand zwischen Neutrinoquelle ν_α und dem Detektor, in dem ν_β nachgewiesen wird. Aus der Amplitude folgt die Übergangswahrscheinlichkeit $P(\alpha \rightarrow \beta, t)$

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = |A(\alpha \rightarrow \beta, t)|^2 = |\sum_i U_{\alpha i} U^*_{\beta i} e^{-iE_it}|^2$$

$$= \sum_{i,j} U_{\alpha i} U^*_{\alpha j} U^*_{\beta i} U_{\beta j} e^{-i(E_i - E_j)t}$$

Dieser Term beschreibt die von der Zeit t abhängige Neutrinooszillation. Mit der Phasendifferenz $\Delta_{i,j} = (E_i - E_j)\, t = \frac{\delta m_{ij}^2}{2} \frac{L}{E}$ $(\delta m_{ij} = m_i^2 - m_j^2)$ wird die Abhängigkeit vom Abstand L gezeigt.
Durch die Unitaritätsrelation läßt sich dies auch schreiben als

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = \delta_{\alpha\beta} - 2\, RE \sum_{j<i} U_{\alpha i} U^*_{\alpha j} U^*_{\beta i} U_{\beta j} [1 - e^{-i\Delta_{ij}}].$$

Dieser Term vereinfacht sich bei CP-Invarianz ($U_{\alpha i}$ reell) zu

$$P(\alpha \rightarrow \beta, t) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{j>i} U_{\alpha i} U_{\alpha j} U_{\beta i} U_{\beta j} sin^2 \frac{\Delta_{ij}}{2}.$$

Für den einfachsten Fall n=2 für Oszillationen $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ gibt es einen Mischungswinkel Θ mit $0 \leq \Theta \leq \frac{\pi}{2}$, keine CP-Verletzung und eine Massendifferenz $\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$.
Die unitäre Transformation lautet:

$$\begin{pmatrix} \nu_a \\ \nu_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos\Theta & sin\Theta \\ -sin\Theta & cos\Theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Diese Matrix ist analog zur Cabibbo-Matrix.
Die Übergangswahrscheinlichkeiten lauten:

$$P(\nu_a \to \nu_a) = P(\nu_b \to \nu_b) = 1 - sin^2\, 2\,\Theta \cdot sin^2\, \frac{\Delta}{2}$$

$$P(\nu_a \to \nu_b) = P(\nu_b \to \nu_a) = sin^2\, 2\,\Theta \cdot sin^2\, \frac{\Delta}{2} = 1 - (P(\nu_a \to \nu_a))$$

$$\text{mit} \quad \Delta = \frac{\delta m^2}{2} \cdot \frac{L}{E}$$

Entsprechendes gilt für Antiteilchen.
Es wird deutlich, daß Oszillationen nur auftreten können, wenn der Mischungswinkel $\Theta \neq 0$ *und* die Massendifferenz $\delta m^2 \neq 0$ ist. Maximale Mischung erhält man für $\Theta = 45^o$. Der Mischungswinkel beschreibt die Amplitude, die Massendifferenz die Oszillationsfrequenz.

Kapitel 3

Das CHORUS-Experiment

Das CHORUS [1] - Experiment [6] sucht nach Neutrino-Oszillationen vom Typ $\nu_\mu \to \nu_\tau$. Der Nachweis erfolgt über eine ν_τ-induzierte charged-current (CC-) Reaktion:

$$\nu_\tau + N \to \tau^- + X.$$

Folgende Zerfallskanäle des τ^- werden untersucht:

$$\tau^- \to \begin{cases} \mu^- \bar{\nu_\mu} \nu_\tau & (17,3\%) \\ \pi^-(nh^0)\nu_\tau & (49,8\%) \\ \pi^+\pi^-\pi^-(nh^0)\nu_\tau & (14,9\%) \end{cases}$$

Die mittlere Lebensdauer des τ^- beträgt etwa 3×10^{-13}s. Dies entspricht einer Weglänge von etwa $c \cdot t = 90$ μm. Um die Topologie dieser CC-Reaktion nachweisen zu können, benötigt man einen Detektor mit hoher Ortsauflösung. Außerdem müssen zur korrekten Rekonstruktion des Ereignisses die Zerfallsprodukte nach Art, Ladung, Impuls und Energie identifiziert werden.

3.1 Der CHORUS-Detektor

Der CHORUS-Detektor (siehe Abbildung 3.1) ist als Hybriddetektor konzipiert, der Emulsionstechnik mit verschiedenen elektronischen Detektoren verbindet.

Der Aufbau besteht aus einem Emulsionstarget, einem Szintillationsfaserdetektor [7], einem Magnetspektrometer [8], einem Blei/Szintillationsfaser-Kalorimeter [9] und einem Myonspektrometer.

Die Spuren der geladenen Teilchen werden durch den Faserspurdetektor in die Emulsion zurückverfolgt. Zusammen mit dem Magnetspektrometer werden Ladung und Impuls des hindurchfliegenden niederenergetischen Teilchens bestimmt.

[1] **C**ERN **H**ybrid **O**scillation **R**esearch Apparat**US**

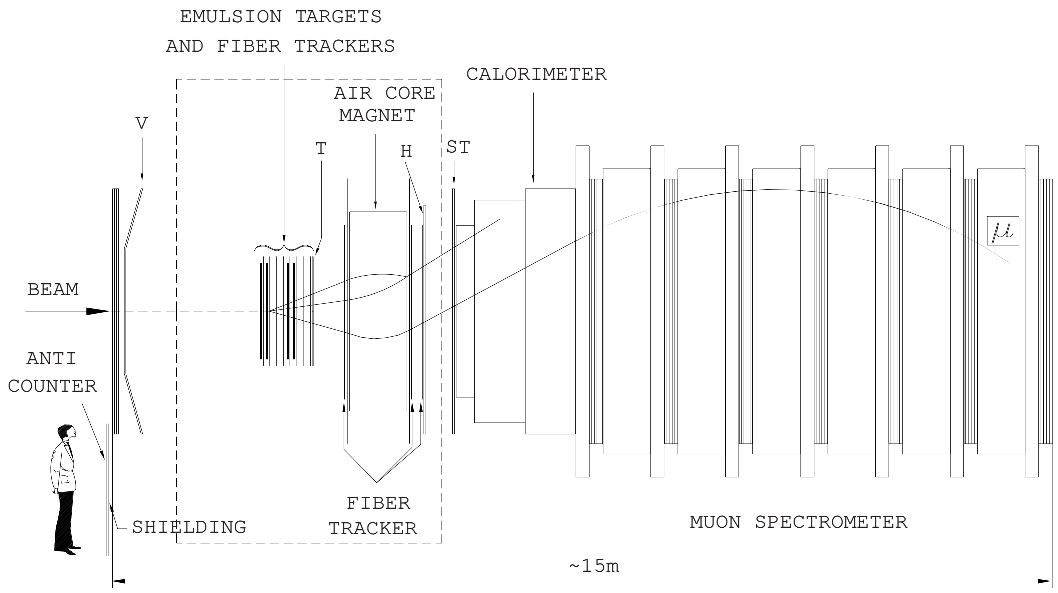


Abbildung 3.1: Der CHORUS-Detektor

Die Impulsauflösung beträgt dabei etwa $\Delta p/p \approx 0.3$ bei einer Teilchenenergie von 5 GeV.

Diese Informationen werden mit den kinematischen Information des Kalorimeters und Spektrometers verknüpft. Ereignisse, die den kinematischen Kriterien eines ν_τ charged-current Events entsprechen, werden vorsortiert, um später in der Emulsion genauer untersucht zu werden.

Im Kalorimeter werden Schauerrichtung und die Energie der in der CC-Reaktion entstandenen Hadronen gemessen. Es besteht aus drei Modulen, von denen zwei in "Spaghetti"-Technik mit szintillierenden Fasern in einer Blei-Matrix aufgebaut sind, der andere in Sandwichbauweise. Die Auflösung beträgt $\Delta E/E = 13\% \cdot \sqrt{E}(\mathrm{GeV})$ für Elektronen und $\Delta E/E = 32\% \cdot \sqrt{E}(\mathrm{GeV})$ für Hadronen.

Das Myon-Spektrometer mißt Impuls und Ladung mit einer Auflösung zwischen 10-20 % für ein Myon bei einem Impuls von weniger als 100 GeV. Sechs toroidal magnetisierte Eisenmodule erzeugen eine Feldstärke von etwa 1,8 Tesla. Zwischen den Modulen stehen Tracking-Einheiten aus Streamer Tubes und Driftkammern.

Weitere Informationen über den gesamten Detektor findet man in [6].

Das Targetmaterial, in dem die Neutrino-Wechselwirkung stattfindet, besteht aus insgesamt 770 kg Kernspuremulsion. Sie bietet eine räumliche Auflösung von etwa 1 μm und ist damit ideal für den Nachweis kurzlebiger geladener Teilchen.

Die Topologie der Neutrinowechselwirkung mit anschließendem Zerfall ist schematisch in Abbildung 3.2 gezeigt. Die vom Faserspurdetektor rekonstruierten Spuren werden durch dünne "Interface-Sheets" in die Emulsion zurückverfolgt. Sie haben eine sehr hohe Winkelauflösung, so daß der Vertex in der Emulsion mit hoher Genauigkeit lokalisiert werden kann.

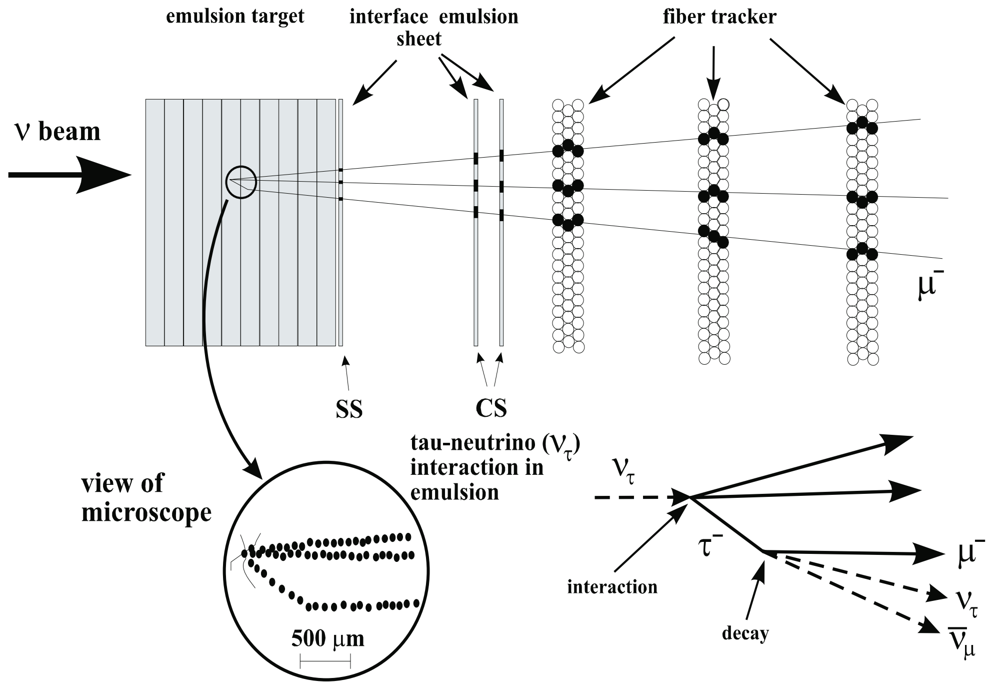


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung einer ν_τ-CC-Reaktion mit anschließendem Zerfall des τ^-. Teilchen, die durch eine Neutrino-Wechselwirkung entstanden sind, gehen gemäß der Strahlrichtung nahezu senkrecht durch die Emulsion.

Der WBB-Neutrino-Strahl

Der Neutrinostrahl der "West Area Neutrino Facility" wird durch Beschuß eines Beryllium-Targets mit 450 GeV Protonen des Super-Proton-Syncrotron (SPS) erzeugt. Es entstehen vor allem $\pi^\pm$ und $K^\pm$. Für die Erzeugung des reinen ν_μ-Strahls sind folgende Zerfälle wesentlich:

$$\begin{array}{lcl} \pi^+ & \rightarrow & \mu^+\nu_\mu \\ K^+ & \rightarrow & \mu^+\nu_\mu \\ K^+ & \rightarrow & \pi^0\mu^+\nu_\mu \end{array}$$

Durch zwei magnetische Linsen (Horn und Reflektor) werden negativ geladene Teilchen entfernt und positiv geladene Teilchen in den Stahl fokussiert. Unerwünschte Hadronen und geladene Leptonen werden in einer 370 m langen

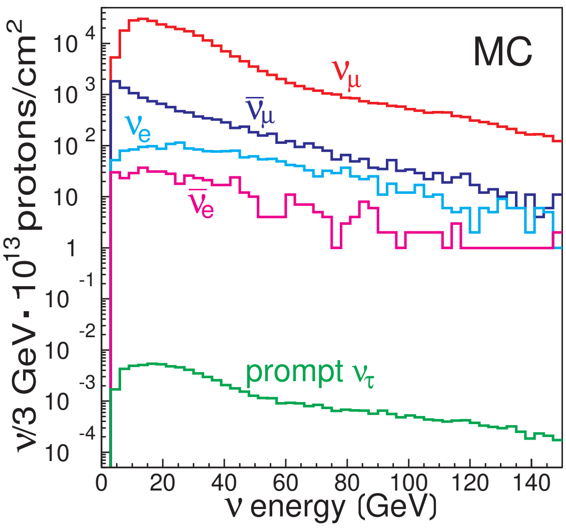


Abbildung 3.3: Das simulierte Neutrinospektrum des Wide Band Neutrino-Strahl für das CHORUS-Experiment im Emulsionstarget.

Abschirmung aus Eisen und Erdreich absorbiert [10]. Das Ergebnis ist ein Myon-Neutrino Breitband-Strahl mit einer mittleren Strahlenergie von 27 GeV [11]. Um einen möglichst hohen Neutrino-Fluß zu erzielen, wird keine Impulsselektion durchgeführt.

Das Spektrum des Neutrino-Strahls ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Neben den Myon-Neutrinos entstehen durch den Zerfall von nicht abgelenkten neutralen Kaonen auch geringe Verunreinigungen wie $\bar{\nu}_\mu$, ν_e und $\bar{\nu}_e$ zu 5,6 %, 0,7 % und 0,17 %. Die Tau-Neutrinos entstehen durch den Zerfall von D_s-Mesonen. Ihr Beitrag liegt aber lediglich bei 3,3 $\times$ 10^{-6} ν_τ Wechselwirkungen pro ν_μ Reaktion [12].

3.1.1 Das Emulsionstarget

Der detaillierte Aufbau des Targets ist in Abbildung 3.4 zu sehen.
Das Emulsionstarget besteht aus zwei Komponenten. Im eigentlichen Target, der "Bulk"-Emulsion, werden die Neutrino-Wechselwirkungen aufgenommen. Sehr dünn beschichtete Emulsionsplatten bilden eine Schnittstelle zwischen Fiber-Tracker und Target. Diese Interface-Sheets werden als SS (Special Sheet) und CS (Changeable Sheet) bezeichnet.

Das Material, aus dem die Emulsionsplatten hergestellt werden, besteht im wesentlichen aus Silberbromid in Gelatine mit einer Dichte von etwa 4 g/cm^3 [13]. Ein hindurchfliegendes geladenes Teilchen "belichtet" die Emulsion, ähnlich wie es bei einem fotografischen Film der Fall ist. Das Teilchen hinterläßt

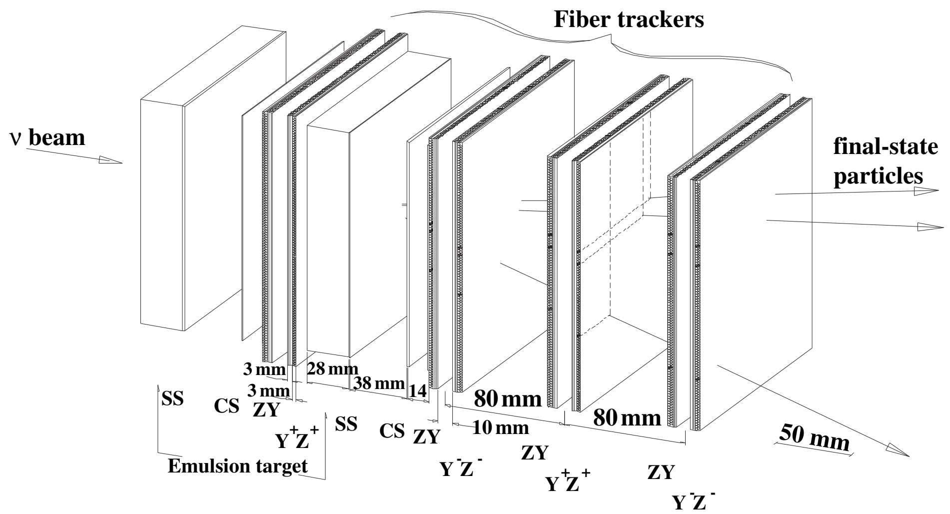


Abbildung 3.4: Aufbau einer Hälfte der Targetregion. Zwischen den Emulsionstargets mit den Interface-Sheets befinden sich Lagen von Faserspurdetektoren, die die Spurrekonstruktion durch die Emulsion möglich machen. Die zweite Hälfte des Targets ist identisch aufgebaut.

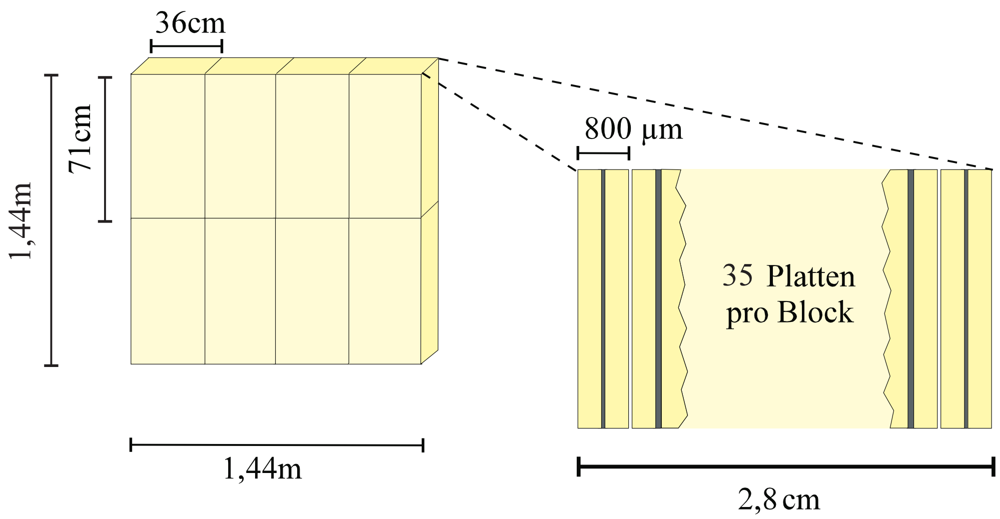


Abbildung 3.5: Aufbau der Bulk-Emulsion. Ein Emulsionsblock ist in 8 Module unterteilt, die jeweils aus 35 aneinandergelegten Emulsionsplatten bestehen.

nach dem Entwickeln eine Spur aus schwarzen Silberkörnern, die unter dem Mikroskop sichtbar gemacht werden kann. Die Korngröße beträgt etwa 0,6 μm, man findet in einer Spur etwa 300 Körner/mm. Damit ist das Target massiv und hochauflösend genug, um bei einer hohen Strahldichte minimal ionisierende Teilchen nachweisen zu können.

Bulk-Emulsion

Die Bulk-Emulsion hat ein Volumen von 206 Litern bei einer Masse von 770 kg. Das Target ist in vier Blöcke mit einer Fläche von 1,44 m $\times$ 1,42 m eingeteilt. Sie sind 2,8 cm dick und in jeweils 8 Module mit den Kantenlängen 71 cm $\times$ 36 cm aufgeteilt (siehe Abbildung 3.5). In einem Modul liegen je 35 Emulsionsplatten hintereinander. Die Platten sind jeweils 800 μm dick und bestehen aus einer 90 μm dicken, durchsichtigen Azetat-Folie als Basis, auf der auf beiden Seiten eine jeweils 350 μm dicke Schicht aus Kernspuremulsion aufgebracht ist (siehe Abbildung 3.6). Diese Seiten werden je nach Lage im Strahl als *upstream* (die dem Strahl zugewandte Seite) oder als *downstream* (die dem Strahl abgewandte Seite) bezeichnet.

Das Target ist in einem klimatisierten Raum bei 5 Grad Celsius und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % untergebracht. Dies sind die optimalen Bedingungen, bei denen durch die Temperatur das "Fading" der Emulsion gebremst wird. Beim Fading handelt es sich um Rekombinationsverluste, die zu einem Verblassen der Teilchenspur führen. Thermische Verzerrungen sind weitgehend unterbunden. Die Platten eines Moduls sind in Aluminium vakuumverpackt, um ein Austrocknen zu verhindern.
Nach zwei Jahren (Run I) wurde das Target einmal komplett ausgewechselt. In Run I und Run II wurden insgesamt über 1800 kg Emulsion verwendet.

Special und Changeable Sheet

Die "Interface Emulsion Sheets" haben eine Basis von 800 μm mit 100 μm breiten Emulsionsschichten auf beiden Seiten. Dadurch kann sich die Emulsion im Gegensatz zur Bulk zum Beispiel bei der Entwicklung kaum verziehen und bietet eine sehr genaue Winkelinformation über die Spur. Die Vorhersage des Faserspurdetektors erreicht eine räumliche Auflösung von etwa 150 μm bei einer Winkelgenauigkeit von $\sim$2 mrad. Durch das Special Sheet direkt an der Rückseite der Bulk wird die Genauigkeit auf 10 μm bei $\sim$1 mrad gesteigert. Damit sind Austrittspunkt und Winkel der Spur aus dem Target genau vorhergesagt, und die Extrapolation bis zum Vertex ist möglich.

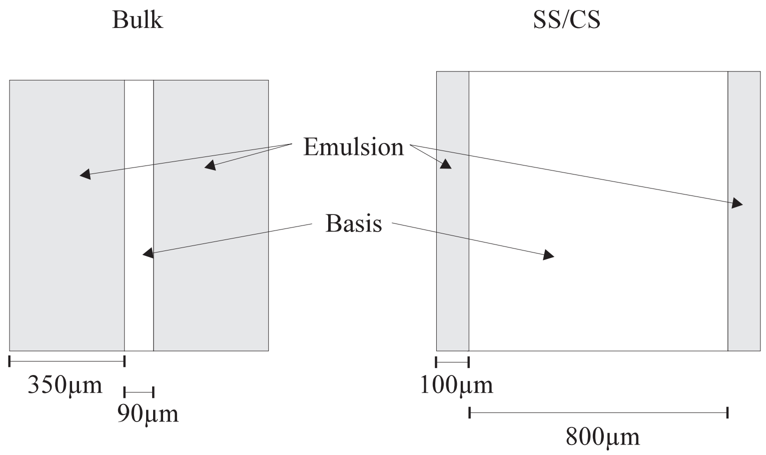


Abbildung 3.6: Vergleich zwischen SS/CS und Bulk-Emulsion

Das Special Sheet wird einmal im Jahr gewechselt, die Changeable Sheets alle drei bis sechs Wochen, um die Spurdichte durch den Untergrund gering zu halten.

3.2 Analyse

Die Analyse der Emulsionsplatten wird mit speziellen Mikroskopen vorgenommen. Ausgehend von den Vorhersagen der Faserspurdetektoren werden Teilchenspuren in CS und SS bis zum Vertex in der Bulk-Emulsion zurückverfolgt. Die Arbeitsweise der Mikroskope ist in Abbildung 3.7 gezeigt.

In der Emulsion werden durch Verschieben der Fokalebene des Objektivs Bilder in verschiedenen Tiefen mit einer Kamera aufgenommen. Aus diesen Bildern läßt sich die Spur des Teilchens wieder dreidimensional rekonstruieren.

Analysiert man den myonischen Zerfall des τ^-, hat man eine eindeutige Signatur des Ereignisses vorliegen. Ist ein einzelnes Myon mit einer Energie kleiner als 30 GeV identifiziert worden, wird die Spur in die Emulsion zurückverfolgt. Aus Gründen der Zeitersparnis beschränkt man sich zunächst auf das Scannen der Upstream-Seiten der Emulsion (siehe Abbildung 3.8, links). Ausgehend von den Vorhersagen des Fiber-Tracker werden die Platten "rückwärts" gescannt. In jeder Platte nimmt man über eine Tiefe von 100 μm sechzehn Bilder auf. Über Winkel- und Positionsmessung ist die Extrapolation der Spur bis in die Nachbarplatte möglich. Wird in der nächsten Platte an dem vorhergesagten Ort eine Spur mit dem entsprechenden Winkel wiedergefunden, ist der Track bis zu diesem Ort rekonstruiert. Dieses Verfahren wird als *Scan-back* bezeichnet.

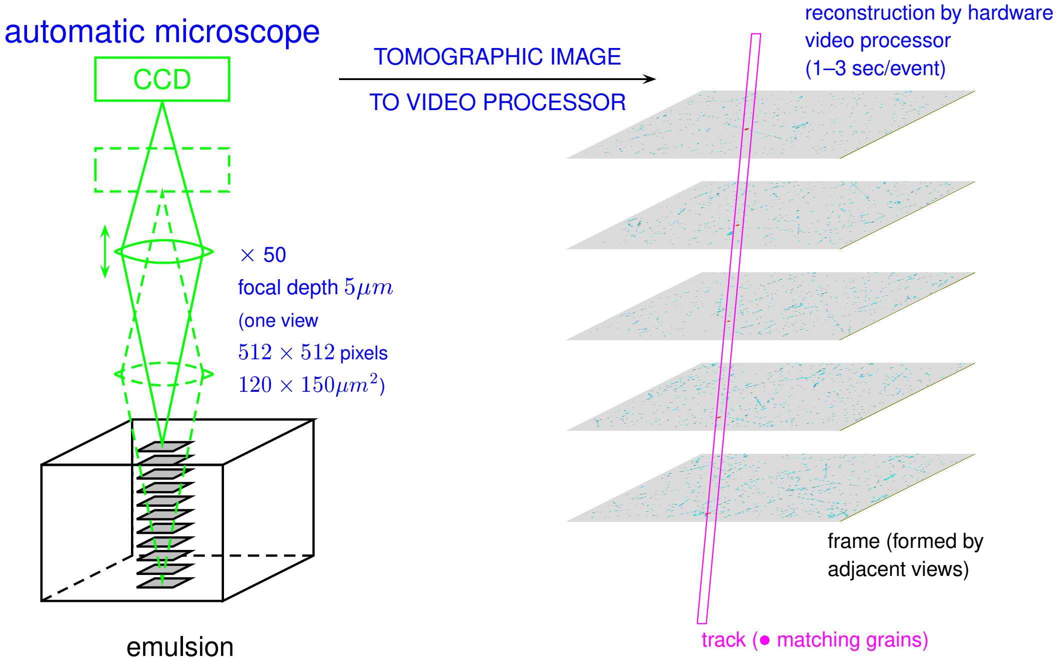


Abbildung 3.7: Bildanalyse mit Hilfe eines automatischen Mikroskops. Ein Emulsionsausschnitt wird in der Tiefe abgerastert. In der tomographischen Aufnahme wird die Spur dreidimensional rekonstruiert. Die Tiefenschärfe einer Aufnahme beträgt nur wenige μm.

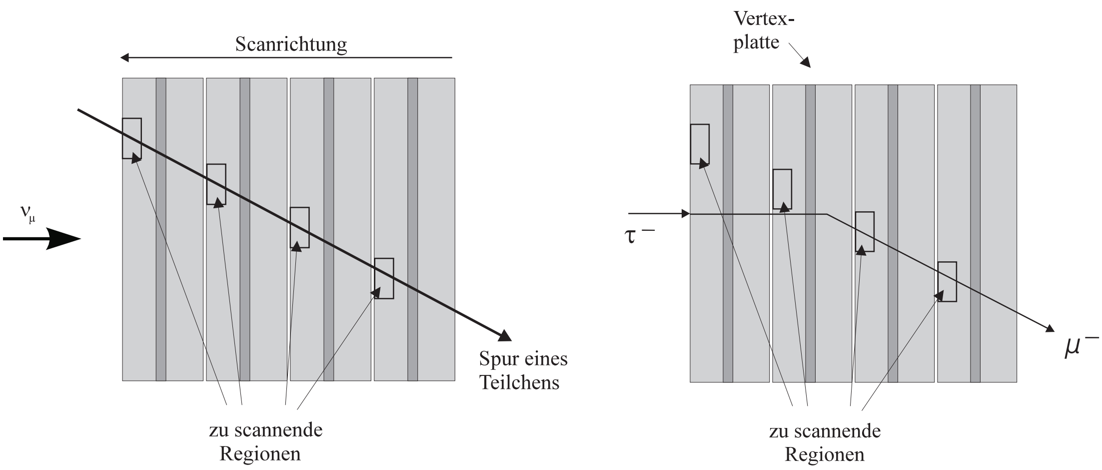


Abbildung 3.8: Scan-back Verfahren

Verliert sich die Spur nach einigen Platten (vergleiche Abbildung 3.8, rechts), werden noch zwei Anschlußplatten gescannt, um sicherzugehen, daß die Spur nicht aufgrund eines Materialfehlers verloren wurde. Die erste Platte, in der die Trajektorie nicht mehr wiedergefunden werden konnte, wird als Vertexplatte bezeichnet. Man geht davon aus, daß in dieser Platte die ν-Wechselwirkung, beziehungsweise der Zerfall des τ^-, stattgefunden hat.

Kann eine Knickstruktur ausgemacht werden, müssen Winkel und die Lebensdauer des Primärteilchens genau vermessen werden. Zu den weiteren möglichen Klassifizierungen der Spuren und speziellen Scanning-Verfahren siehe [14] und [15].

Allgemeines Scanning-Verfahren

Bei der mikroskopischen Untersuchung der Emulsion sind zwei mögliche Muster, Spur oder Vertex, von Interesse. Die Ansatzpunkte für das Erfassen dieser Strukturen sind hier zusammengestellt [16].

Bei einem Vertex unterscheidet man folgende Lagen (siehe Abbildung 3.9):

- Lage im vorderen Teil der Emulsion (upstream)
- im hinteren Teil der Emulsion (downstream)
- in der Basis

Der Vertex wird, wenn möglich, je am Anfangspunkt und an zwei weiteren Stellen vermessen.

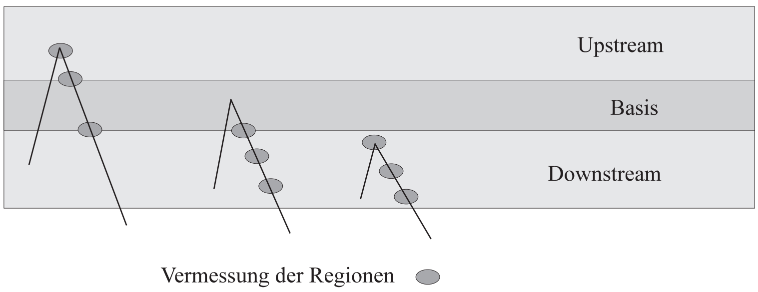


Abbildung 3.9: Meßpunkte für die Untersuchung eines Vertex

Aus diesen Punkten werden jeweils der Eintrittswinkel, Vertex-Position und Impact-Parameter berechnet. Dieser Parameter ist der kürzeste Abstand zwischen der Verlängerung des Sekundär-Tracks und dem Anfang des Primär-Tracks (siehe Abbildung 3.10).

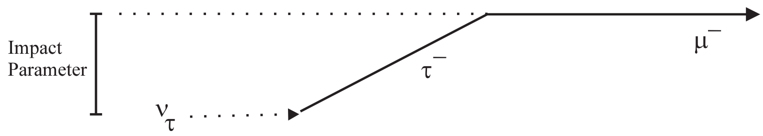


Abbildung 3.10: Die kleinste Distanz zwischen dem Vertexpunkt des ν_τ-induzierten Ereignisses und der Verlängerung der Myon-Spur wird als "Impact-Parameter" bezeichnet.

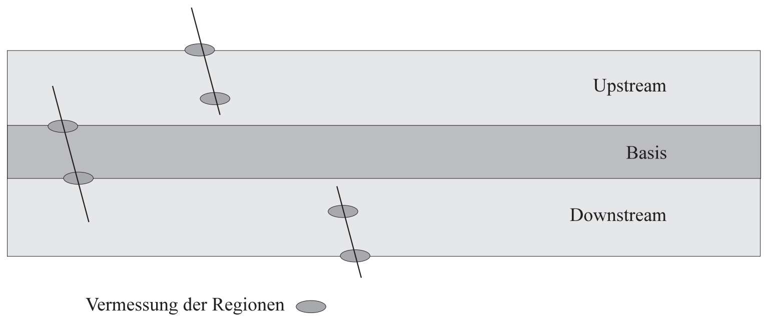


Abbildung 3.11: Meßpunkte für die Untersuchung eines Tracks

Von einer einzelnen Spur wird der Eintrittswinkel durch die Vermessung zweier Punkte bestimmt. Die genaueste Messung erfolgt an der Basis, da sich die Spur kaum verzogen haben kann. Bei der Vermessung einer nicht durch die Basis gehenden Spur wird ein Punkt auf der Außenfläche und ein anderer in der Emulsion vermessen (siehe Abbildung 3.11).

Wichtig bei jeder dieser Messungen ist es, einen durchgängigen, in der Nähe liegenden Referenz-Track, der möglichst im selben Bildausschnitt (Field-of-view) liegt, mitzuvermessen. Dadurch erhält man einen Anhaltspunkt, ob und wenn ja, wie stark die Emulsionsplatte in sich verzogen ist. Die nötige Korrektur für die Referenzspur kann gleichermaßen auf die Myonspur angewendet werden.

Diese Referenz wird von den sogenannten "X7-Myonen" geliefert. Dabei handelt es sich um einen Myonenstrahl, der ebenfalls durch die CHORUS-Experimentierhalle geführt wird. Der Winkel, mit dem die X7-Myonen durch die Emulsion fliegen, ist sehr genau bekannt (Intensitätsmaximum bei etwa $\alpha_y = -0,07$ rad, $\alpha_z = -0,02$ rad, gemessen im Detektorkoordinatensystem [17]). Mit diesen Myonen werden erste Winkeltestmessungen für die Scanningmikroskope durchgeführt. Die Tracks kommen sehr häufig vor und gehen gradlinig nahezu senkrecht durch die Emulsion. Durch die eindeutige und einfache Signatur sind sie gute Testkandidaten für allgemeines Trackfinding.

Fiducial Marks

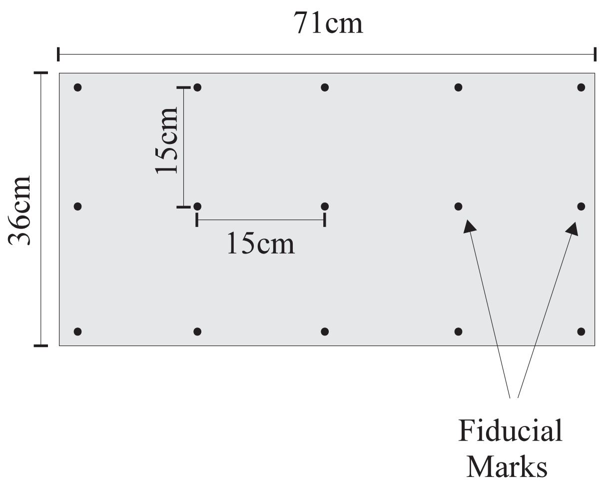


Abbildung 3.12: Karte der Kalibrierungspunkte auf SS und CS

Zur Orientierung wird auf die Emulsionsplatten ein Punktmuster aufgebracht, die ein emulsionseigenes Koordinatensystem bilden. Die 15 Kalibrierungspunkte (*Fiducial Marks*) haben untereinander einen Abstand von 15 cm (siehe Abbildung 3.12). Damit muß die Position einer Spur mit dem Mikroskop nur relativ zum nächsten Fiducial Mark vermessen werden. Die relative Ausrichtung der einzelnen Platten zueinander und zum Detektor wird mit Hilfe im gesamten Detektor nachgewiesener Myonen durchgeführt.

3.3 Untergrund

Die genaue Kenntnis des Untergrunds, der sich in dem daueraktiven Targetmaterial sammelt, ist von großer Wichtigkeit für die mögliche Fehlerbestimmung. Es werden bei bis zu 40.000 Spuren/cm^2 durch X7-Myonen und andere Teilchen etwa 20 Spuren/cm^2 aus den gesuchten charged-current Ereignissen erwartet.
Ein großer Teil des Untergrunds wird auch durch kosmische Höhenstrahlung (*cosmics*) verursacht. Aufgrund der Richtung der Spuren kann es durch solche Ereignisse zwar nicht zu Fehlinterpretationen kommen, aber die Sicht in der Emulsion wird einschränkt.
Daneben existieren mehrere Quellen von Teilchen, deren Zerfallstopologie und Sekundärteilchen denen der gesuchten Neutrino-Oszillation ähnlich sind.

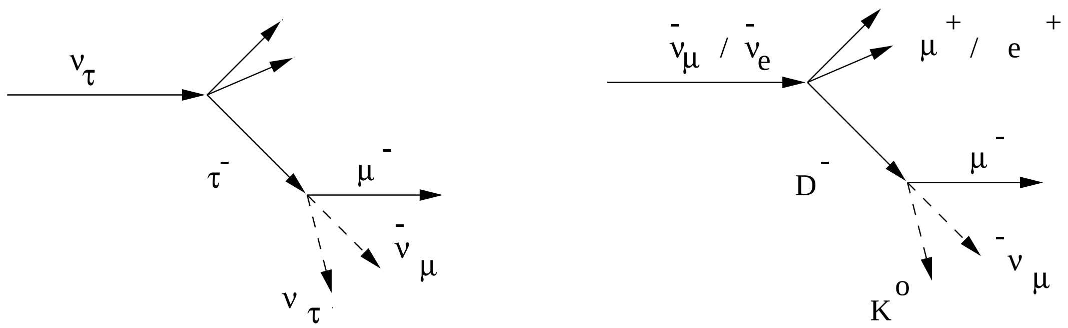


Abbildung 3.13: Vergleich der Signaturen für Tau-Signal und Charm-Untergrund

Fakes

Im Experiment kommt es auch zu Reaktionen, die in der Emulsion die gleiche Struktur und im Ausgangskanal die gleichen Zerfallsprodukte produzieren, wie sie bei einem ν_τ-induzierten Ereignis auftreten würden, jedoch nicht durch Neutrino-Oszillationen verursacht wurden.
Eine der Hauptquellen für falsch gedeutete Ereignisse ist Charm-Produktion durch den Antineutrino-Anteil des Neutrino-Stahls,

$$\bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_e)\, N \rightarrow \mu^+(e^+) + D^- + X$$

gefolgt von dem Zerfall des

$$D^- \rightarrow \mu^- + X'.$$

Die Topologie ist in Abbildung 3.13 gezeigt. Wird das μ^+ (e^+) des Primärvertex in der Emulsion durch den Detektor nicht identifiziert, kommt es zu einer falschen Interpretation des Events. Das μ^- im Sekundärvertex ist nicht durch die gesuchte Neutrino-Oszillation entstanden. Die Produktionsrate liegt aber bei unter $10^{-6} \times N^{cc}$ Ereignissen [14].

Eine weitere Reaktion, die fälschlicherweise als τ-Zerfall gedeutet werden kann, wird als *White Kink* - Struktur bezeichnet. Es handelt sich um die Streuung eines negativ geladenen Hadrons an einem Kern, ohne daß er einen sichtbaren Rückstoß erhält.

$$h^- + A \rightarrow h^- + A$$

Diese Topologie kann dem zweiten Zerfallskanal des $\tau^- \rightarrow h^-(nh^0)\nu_\tau$ ähnlich sehen. Es werden weniger als $3 \times 10^{-6} \times N^{cc}$ Ereignisse erwartet [14].

3.4 Weitere Physik

In der Emulsion können noch weitere kurzlebige Teilchen und Zerfallsmechanismen untersucht werden. Das umfaßt zum Beispiel die diffraktive Produktion von D_s-Mesonen im Target und deren Zerfall $D_s \rightarrow \tau\nu_\tau$. Es werden etwa 25 Ereignisse in vier Jahren Strahlzeit erwartet, aus denen eine Obergrenze für die Tau-Neutrinomasse und das Produktionsverhältnis von pseudoskalaren D_s zu Vektormesonen D_s^* bestimmt werden kann. Näheres dazu siehe [18].

Weiterhin kann die Produktions von "Same-Sign Dimuons" untersucht werden [19]. Bei diesem Vorgang werden zwei Myonen gleicher Ladung durch eine Neutrino-Wechselwirkung erzeugt. Sie können auf zwei Arten produziert werden: durch $c\bar{c}$-Bremsstrahlung oder durch die Oszillation eines D^0 in ein $\bar{D}^0$, das semileptonisch in ein zweites Myon zerfällt. Ein Auffinden dieser Ereignisse würde zum tieferen Verständnis des Same-Sign-Dimuon Produktionsprozesses beitragen. Man bekäme auch ein neues Limit für die D^0 - $\bar{D}^0$ Mischung.

Weitere Nebenprodukte sind *dimuon* Events. Sie entstehen durch Charm-Produktion in einer charged-current Neutrino-Nukleon Wechselwirkung mit anschließendem semi-leptonischen Zerfall des Charm-Quark:

$$\nu_\mu\, N \rightarrow \mu^- + D^+ + X, \qquad D^+ \rightarrow \mu^+ X^0 \nu_\mu$$

Bei diesem Event erhält man im Endzustand zwei Myonen entgegengesetzter Ladung, deren Topologie bis auf die Ladungen der des τ-Zerfalls entsprechen. Durch das positive Myon im Ausgangskanal besteht bei Energien unter 50 GeV keine Verwechselungsgefahr mit einer Neutrino-Oszillation.
Die positiven Myonen können gescannt werden, um die Effizienz eines Kink-Finding Algorithmus zu testen.

Kapitel 4

Scanning-Mikroskop

Ein Mikroskop zur Analyse des CHORUS-Targets ist in Münster im Aufbau. Es wurde so konzipiert, daß sämtliche Anforderungen an Genauigkeit, Schnelligkeit und Präzision, die zur Analyse der Emulsion benötigt werden, erfüllt sind. Ziel des Projekts war es nicht nur, die Technologie zur Auswertung der Emulsion aus Japan nach Europa zu bringen, sondern auch die Scanning-Kapazität für die Untersuchung von insgesamt über 2500 Platten, die während des Experiments verwendet wurden, zu vergrößern. Dabei geht es sowohl um die Suche nach Neutrino-Oszillationen wie auch um neue Erkenntnisse über Charm-Physik.

4.1 Aufbau

Eine schematische Zeichnung des Aufbaus ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Mikroskopiert wird nach dem "Durchlichtverfahren". Die Emulsionsplatte liegt auf dem optischen Tisch und wird von unten beleuchtet. Das Bild der Emulsion wird durch eine Mikroskopoptik von einer Kamera aufgenommen und dargestellt.
Das Außergewöhnliche an diesem Mikroskop sind seine Ausmaße. Die zu untersuchenden Teilchenspuren liegen in der Größenordnung von 1 μm, verteilt über einer Fläche von 36 cm $\times$ 72 cm. Eine Optik mit einer entsprechenden Vergrößerung zur Auflösung der Teilchenspuren ist sehr anfällig gegen Erschütterungen. Zur Dämpfung ist das Mikroskop auf einer 1,3 Tonnen wiegenden Granitplatte (2,06 m $\times$ 1,20 m $\times$ 0,2 m) aufgebaut worden. Sie ist zusätzlich auf Styroporblöcken gelagert, zwischen denen Ebenen von Sperrholz, Armaflex^{TM} und Preßholz eine große Bandbreite von Schwingungen auffangen.
Auf der Platte ist ein Lineartisch und ein Portal montiert. Die Linearführung bewegt den optischen Tisch mit einem Hub von 500 mm in y-Richtung. Die Bewegungen in x- und z-Richtung werden von Tischen ausgeführt, die an dem Portal montiert sind. Es besteht aus einem mit 20 Litern Beton ausgegossen Stahlträger. Der Lineartisch für die x-Richtung hat einen Hub von 950 mm, der der z-Richtung 100 mm. An der z-Achse ist die Mikroskopoptik mit Mikroskopkopf, Linse und

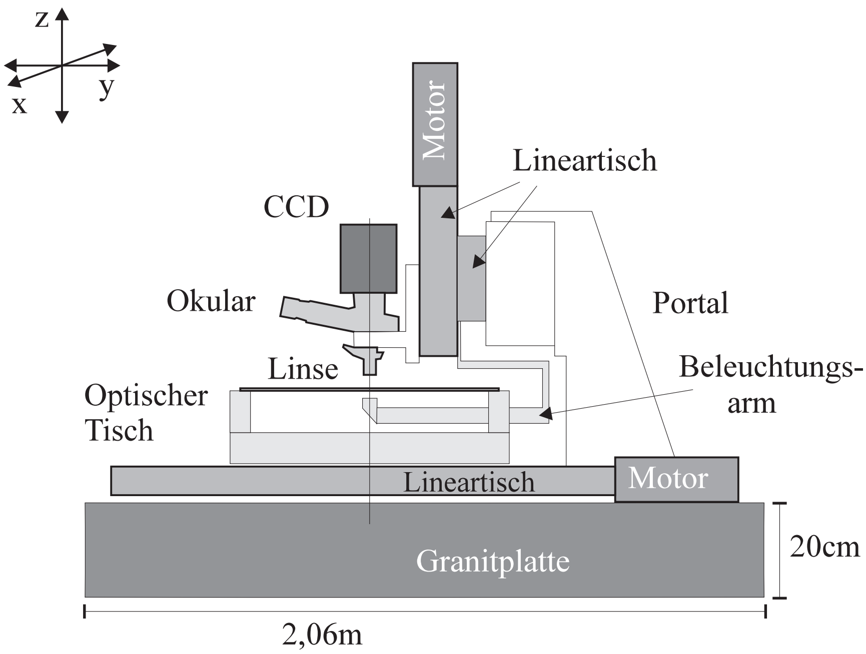


Abbildung 4.1: Seitaufriss des Mikroskops

Kamera befestigt. Beim Verfahren dieser Achse werden die tomographischen Bilder in der Emulsion aufgenommen.

Die Bilder werden mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet und zur Weiterverarbeitung an einen Rechner geschickt. Nach Analyse der Bilder wird die Emulsion neu positioniert. Der Rechner kontrolliert die Lineartische mit Hilfe einer CNC-Steuerung.
Das System ist so angelegt, daß eine vollautomatische Emulsionsanalyse möglich ist.

4.2 Positionierungstechnik

Das Positionierungssystem besteht aus drei Lineartischen, die jeweils mit Linearmeßsystemen ausgestattet sind. Es handelt sich um Produkte der Franke GmbH mit der Kennung PL06U [21]. Der schematische Aufbau einer Führung ist in Abbildung 4.2 gezeigt. In einen stabilen Rahmen sind die Führungsschienen eingebaut. Zwischen den Schienen befindet sich ein Schlitten, dessen Position durch Drehung der Gewindespindel verändert werden kann. Dies übernimmt ein DC-Servomotor, der außerhalb des Rahmens montiert ist. Der Schlitten führt den Meßkopf eines Linearmeßsystems zur genauen Positionsmessung mit. Weiterhin sieht man zwei Endschalter, die die Weglänge des Tisches begrenzen.

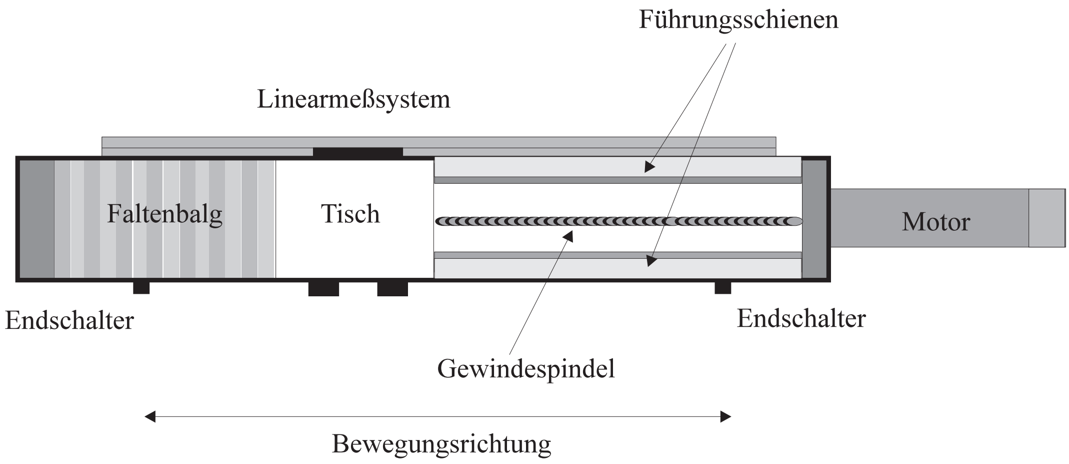


Abbildung 4.2: Aufbau einer Linearführung

4.2.1 Spezifikationen

Ein Linearführungssystem wird durch folgende Faktoren beschrieben:

1. Führungsgenauigkeit,
2. Positioniergenauigkeit entlang des zu fahrenden Weges,
3. Reproduzierbarkeit beim Wiederanfahren einer Position (Präzision),
4. Auflösung.

Führungsgenauigkeit

Die Führungsgenauigkeit ist eine Eigenschaft des Führungssystems, das zum Beispiel aus Kugeln oder Kreuzrollen bestehen kann, und kennzeichnet den Genauigkeitsgrad, mit dem die Bewegung in eine definierte Richtung stattfindet. Eine ideale Linearführung beschränkt die Bewegung eines Objekts auf genau eine Achse. Jede Abweichung von dieser Linie ist auf eine Ungenauigkeit des Führungssystems zurückzuführen.

Damit bleiben fünf mögliche Führungsfehler: Bewegung in Y-Richtung, Bewegung in Z-Richtung und Rotationsbewegungen um alle drei Achsen. Die Rotationen werden Rollen (X-Achse), Neigen (Y-Achse) und Gieren (Z-Achse) genannt (siehe Abbildung 4.3). Die Kombination von Neigen und einer Verschiebung in Z-Richtung wird als "Ebenheit" einer Führung, die Kombination von Gieren und Verschiebung in Y-Richtung als "Gradheit" bezeichnet. Kleine Winkelfehler können sich über größere Führungslängen zu merklichen Linearitätsabweichungen aufsummieren.

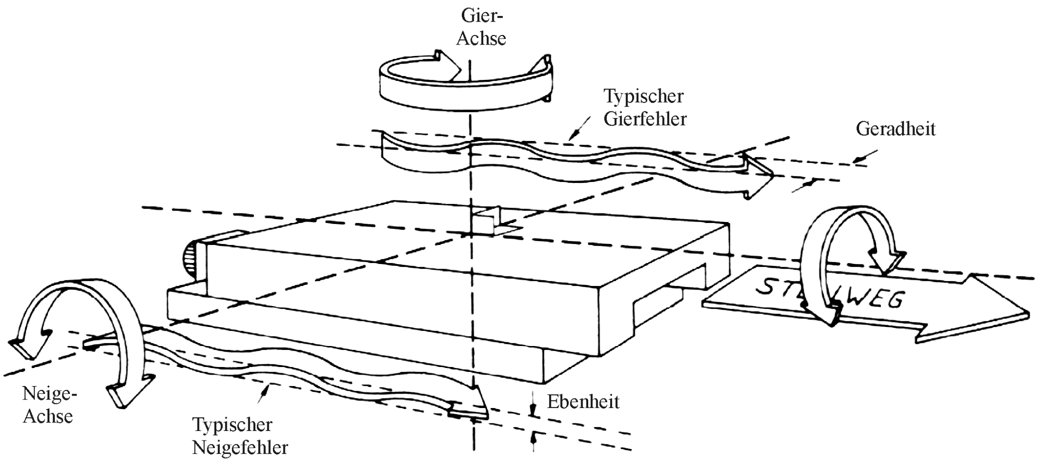


Abbildung 4.3: Fehler einer Linearführung

Positioniergenauigkeit

Mit Hilfe von Gewindespindeln wird die Rotation des Motors als lineare Bewegung der Tische umgesetzt. Die Qualität der Spindeln bestimmt die Positioniergenauigkeit. Verschiedene Spindelfehler können auftreten: Spindelsteigungsfehler, das heißt ein kumulierender Fehler über den Stellweg, periodische Fehler pro Spindelumdrehung und Umkehrspiel der Spindel.

In der Praxis wird die Position des Tisches über einen Linearencoder (siehe auch Abschnitt 4.2.4) bestimmt. Dies hat den Vorteil, daß Spindelfehler nicht in die Positioniergenauigkeit eingehen, sondern durch die Bestimmung der Position über den Encoder ausgeschaltet werden. Eine wesentliche Fehlerquelle stellt hingegen die thermische Ausdehnung dar. Das thermische Verhalten des Linearencoders ist hier das genauigkeitsbestimmende Element.

Präzision

Die Präzision eines Systems bezeichnet den Bereich, in dem die aktuelle Position (Ist-Position) variiert, wenn eine bestimmte theoretische Position (Soll-Wert) angefahren wurde (vergleiche Abbildung 4.4). Bei der Messung der Präzision wird die Soll-Position aus beliebigen Richtungen angefahren, um systemeigene Ungenauigkeiten, wie zum Beispiel das Umkehrspiel der Spindel, falls kein zusätzlicher Encoder verwendet wird, erkennen zu können. Bei einem System mit hoher Reproduzierbarkeit/Präzision ist die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert möglichst klein, unabhängig von der Richtung, aus der angefahren wird.

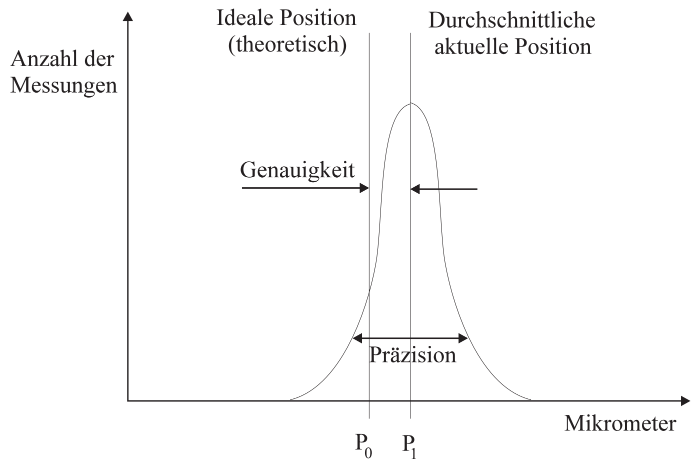


Abbildung 4.4: Genauigkeit und Präzision

Auflösung

Die Auflösung ist das kleinste Positionsinkrement, das noch von einem Kontrollsystem erfaßt werden kann. Dieses Kontrollsystem setzt sich aus dem mechanischen Positionierelement, dem Antrieb und einem elektronischen Controler zusammen. Daraus ergibt sich die Gesamtauflösung des Systems.

Münster-System

Die genaue Messung der vier Faktoren steht für das System in Münster noch aus. Aus den Angaben der Firma Franke lassen sich für das Positionierungssystem aber folgende Werte abschätzen:

- Die Führungstoleranz liegt laut Katalog für 100 mm Hub bei ca. 15 μm, für 500 mm bei ca. 25 μm und für 950 mm bei ca. 40 μm. In diese Größe geht maßgeblich die Ebenheit des Unterbaus unter der Führung ein. Deshalb ist jede Führung auf Stahl montiert, der mit einer Oberflächengenauigkeit von 10 μm/m geschliffen ist.

- Positioniergenauigkeit: Für die Spindel entsprechend der Spindelsteigung $\pm$ 0,03 mm/300 mm. Da jedoch mit einem Linearencoder gemessen wird, liegt der Fehler für die Positioniergenauigkeit in der Klasse von $\pm$ 5 μm. Diese Meßabweichung wird von der Herstellerfirma Heidenhain mit einem PTB-geprüften Kalibriernormal überwacht. Für die Erstellung des Herstellerprüfzertifikats wurden folgende Meßwerte protokolliert:

	x-Achse	y-Achse	z-Achse
Meßunsicherheit	$\pm$ 1 μm	$\pm$ 1 μm	$\pm$ 1 μm
maximale Meßabweichung	$\pm$ 1,3 μm	$\pm$ 1,4 μm	$\pm$ 0,4 μm

Die Position wurde alle 10 mm bestimmt, bei der x-Achse alle 20 mm.

- Die Präzision sollte im Bereich der Positioniergenauigkeit liegen.

- Die von der CNC-Steuerung noch auflösbare Eingabefeinheit liegt laut Katalog der Firma Franke [21] bei ± 0,0001 mm. Dieser Wert wird durch die Unsicherheit der Position relativiert.

Durch die Montage der 950 mm langen Achse am Portal und der 500 mm-Achse auf der Granitplatte ist eine Entkopplung von x- und y-Achse gegeben. Die Positionierungsfehler beider Achsen sind voneinander unabhängig gaußverteilt.

Einer der nächsten Schritte ist die Überprüfung dieser Werte. Da eine Messung im 1 μm Bereich mechanisch schwierig durchzuführen ist, werden hier optische Methoden zum Einsatz kommen. Es kommen die Vermessung mit einem Laser in Frage oder zum Teil die Benutzung der Mikroskopoptik selbst. Mit Hilfe eines Objektmikrometers (ein Glasträger mit 100 Teilungen pro Millimeter) können Positioniergenauigkeit, Auflösung und Präzision von von x- und y-Achse gemessen werden. Der Maßstab kann von der Optik ins "Fadenkreuz" genommen und von verschiedenen Positionen angefahren werden. Abweichungen bei der Positionierung von weniger als 1 μm werden sichtbar.

Um die Führungsgenauigkeit zu überprüfen, müßte man über die ganze Länge eines Tisches an einem geeichten Maßstab entlang fahren.

4.2.2 Gleichstrom-Motoren

Zur Positionierung der Tische werden Gleichstrom Servomotoren der Firma Baldor verwendet. Sie gewährleisten die nötige Genauigkeit, hohe Geschwindigkeiten und zeichnen sich durch Gleichförmigkeit in der Bewegung (also eine hohe Laufruhe während des Positioniervorgangs) aus. Bei der Positionierung müssen zum Beschleunigen oder Abbremsen Rampen benutzt werden (siehe Abbildung 4.5). Dabei gibt es die Grenzgeschwindigkeiten Start und Stop, unter denen nicht angefahren oder gewendet werden kann, ohne daß eine unregelmäßige Bewegung auftritt. Die Rotationsgeschwindigkeit ist proportional der angelegten Spannung, das Drehmoment proportional zum Strom.

Die für die Lineartische verwendeten Motoren der M3300-Serie können eine maximale Geschwindigkeit von 5000 Umdrehungen/Minute erreichen. Damit liegt die theoretische Spitzengeschwindigkeit, mit der die Tische gefahren werden können, bei 41,6 cm/s. Die Geschwindigkeit wird jedoch durch die Ausgangsspannungen und -ströme, die die angeschlossene Verstärkerstufe für die Motoren generieren kann, begrenzt. Eine so hohe Geschwindigkeit wäre für den Betrieb des Mikroskops auch nicht erforderlich.

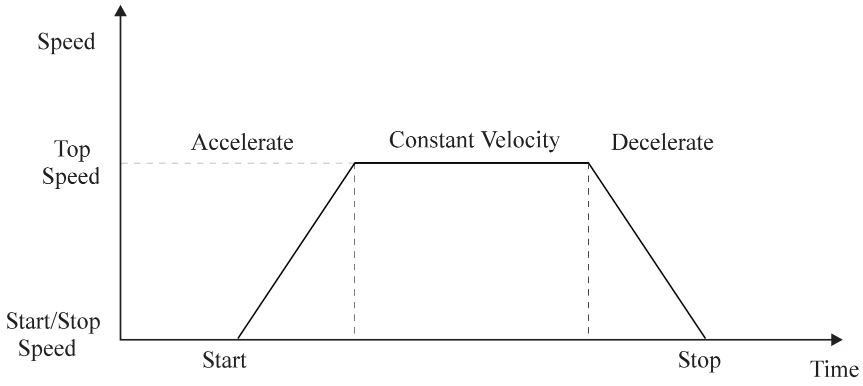


Abbildung 4.5: Um hohe Geschwindigkeiten ohne Unregelmäßigkeiten zu erreichen, muß die Spannung der Motoren über eine Beschleunigungs- und Bremsrampe geführt werden.

4.2.3 Steuerung

Die Koordination der Tische übernimmt eine CNC-Steuerung. Sie empfängt die Positionsangaben der Linearencoder und regelt gegebenenfalls die Position über die Verstärkerstufe nach. Mit der Steuerung sind auch die Endschalter der Tische verbunden. Werden sie durch Anfahren aktiviert, nimmt die Steuerung den Strom (Spannung) zurück und stellt sicher, daß der Tisch diesen Schalter nur noch in die Richtung wieder freifahren kann, aus der er gekommen ist.

Die Steuerung ist über eine serielle RS232 Schnittstelle mit dem Computer verbunden. Die Kommunikation erfolgt über die gängigen CNC-Befehle.

4.2.4 Encodersystem

Der Aufbau des Längenmeßsystems ist in Abbildung 4.6 gezeigt. Es handelt sich um ein gekapseltes Meßsystem mit einem Gehäuse aus Aluminium. Ein Abtastwagen wird reibungsarm an einem Glasmaßstab entlang geführt.

Das Heidenhain-Längenmeßsystem arbeitet nach dem Prinzip der photoelektrischen Abtastung feiner Strichgitter. Photoelemente erfassen dabei die Änderung von Lichtintensitäten. Das Verfahren wird als "abbildendes Meßprinzip" bezeichnet [20].

Das abbildende Meßprinzip mit 4-Feld-Abtastung

Beim "Durchlicht-Verfahren" (siehe Abbildung 4.7) wird mit zwei Gittern gleicher Gitterkonstante gearbeitet, die relativ zueinander verschoben werden. Beide Gitter werden von der einen Seite beleuchtet, während auf der anderen Seite die durch die Verschiebung erzeugten Hell-Dunkel-Modulationen mit

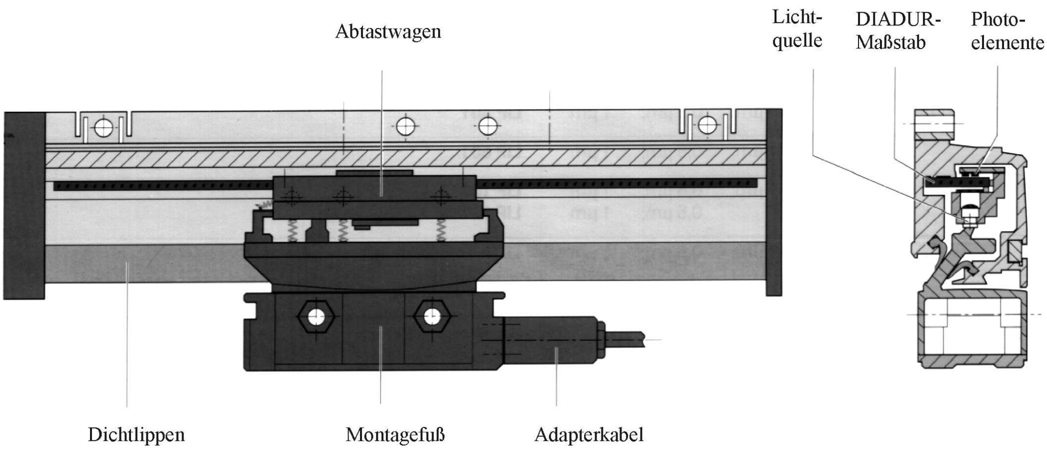


Abbildung 4.6: Schematischer Aufbau eines gekapselten Längenmeßsystems

Photoelementen aufgenommen werden.

Die Strichgitter auf der Abtastplatte sind um jeweils eine viertel Teilungsperiode zueinander verschoben. Dabei entspricht eine Teilungsperiode der Gitterkonstanten von 20 μm, die einzelnen Gitter sind also jeweils um 5 μm gegeneinander verschoben. Außerdem befindet sich hier eine Referenzmarke. Die gleiche Marke befindet sich auf dem Glasmaßstab. Überdecken sich die beiden Marken, ist eine absolute Position bestimmt worden. Zwischen zwei Referenzmarken erfolgt eine inkrementelle Messung.

Das Funktionsprinzip der inkrementellen Längenmessung ist noch einmal schematisch in Abbildung 4.8 gezeigt. Das Licht fällt durch die Gitter der Abtastplatte und dem des Glasmaßstabs auf die Photoelemente. Durch die Versetzung der Strichgitter gegeneinander registrieren die Photoelemente zum gleichen Zeitpunkt unterschiedliche Helligkeiten: Eins liegt komplett im Schatten, zwei im Halbschatten, und nur eins wird voll beleuchtet. Bei einer Bewegung des Glasmaßstabs ändern sich die Lichtintensitäten auf den Photoelementen und damit deren Ausgangsströme, wie es in der Abbildung 4.8 links unten dargestellt ist. Die Ausgangssignale sind um jeweils neunzig Grad verschobene sinusförmige Signale. Um zwei symmetrisch um die Nullinie verschobene verstärkte Ausgangssignale I_1 und I_2 zu erhalten, werden die Photoelemente antiparallel geschaltet.

Absolute und relative Position

Eine absolute Positionsbestimmung erhält man durch das Anfahren fest definierter Referenzmarken. Alle 20 mm ist auf dem Glasmaßstab eine abstandskodierte Referenzmarke vorhanden, so daß nach dem Überfahren von zwei Marken eine

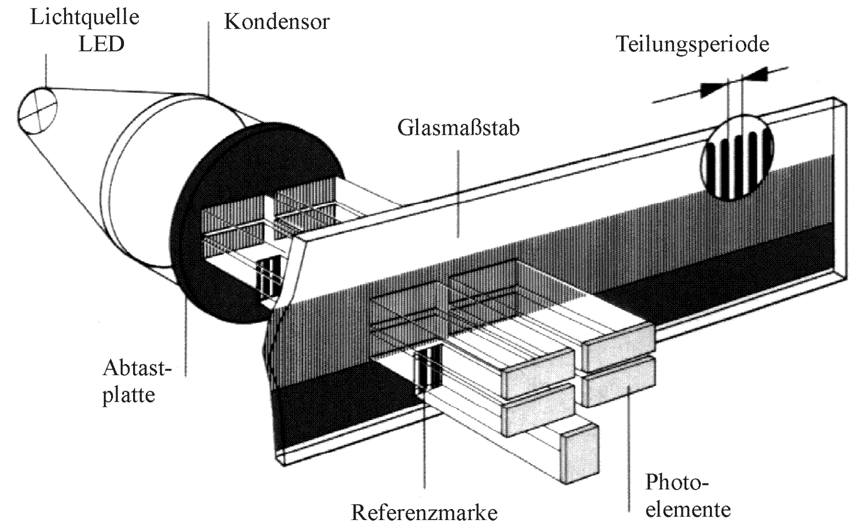


Abbildung 4.7: Durchlichtverfahren

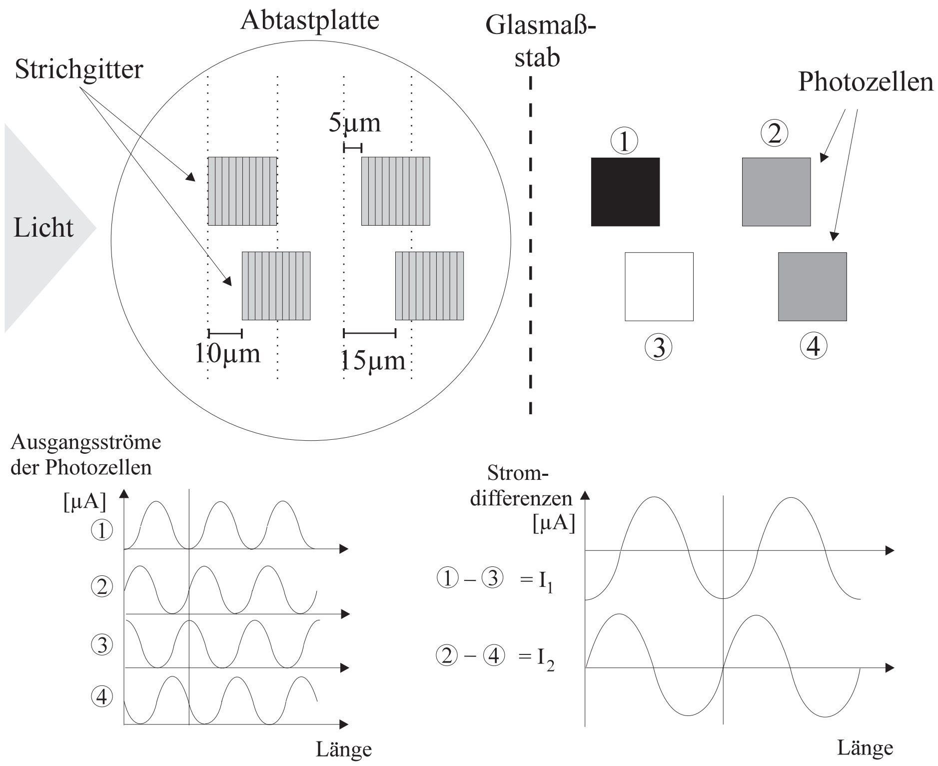


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Beleuchtungsverhältnisse beim Durchlichtverfahren mit Ausgangssignalen der Photoelemente.

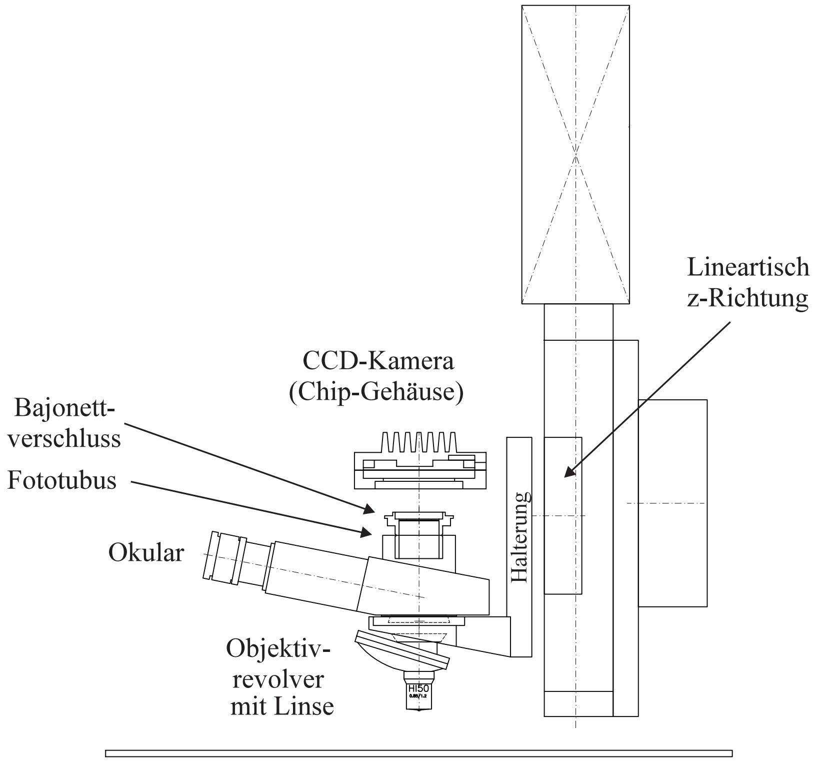


Abbildung 4.9: Detailansicht des Mikroskop-Kopfs

absolute Position verfügbar ist. Damit ist ein Meßschritt definiert. Zwischen den Marken erfolgt eine inkrementelle, also zählende Messung durch die Abtastung der periodischen Teilungsspur. Die Teilungen haben einen Abstand von 20 μm. Dazwischen wird mit einer Folgeelektronik 25-fach interpoliert, so daß man eine relative Genauigkeit von ≤ 1 μm erhält. Die Glasmeßstäbe liegen laut Hersteller in der Genauigkeitsklasse von 5 μm, das heißt, über die gesamte Weglänge ist ein absoluter Fehler von $\pm$ 5 μm möglich. Die beigefügten Meßprotokolle der Firma Heidenhain zeigen aber, daß die Ungenauigkeit der Längenmeßstäbe bei maximal $\pm$ 1.4 μm (Meßunsicherheit: $\pm$ 1 μm) liegt. Allerdings wurden für die Messung nur 17 (z-Achse) bis 51 (x-Achse) Werte protokolliert.

4.3 Optik

Die Optik (siehe Abbildung 4.9) besteht im wesentlichen aus einem Immersionsobjektiv und einer CCD-Kamera. Das Bild kann auch mit dem bloßen Auge durch das Okular betrachtet werden.
Die Immersionslinse ist ein speziell auf die Anforderungen der Emulsionsanalyse abgestimmtes Objektiv. Sie macht es möglich, eine scharf begrenzte Fokalebene in der Emulsion selbst zu verschieben, so daß ein dreidimensionales Betrachten

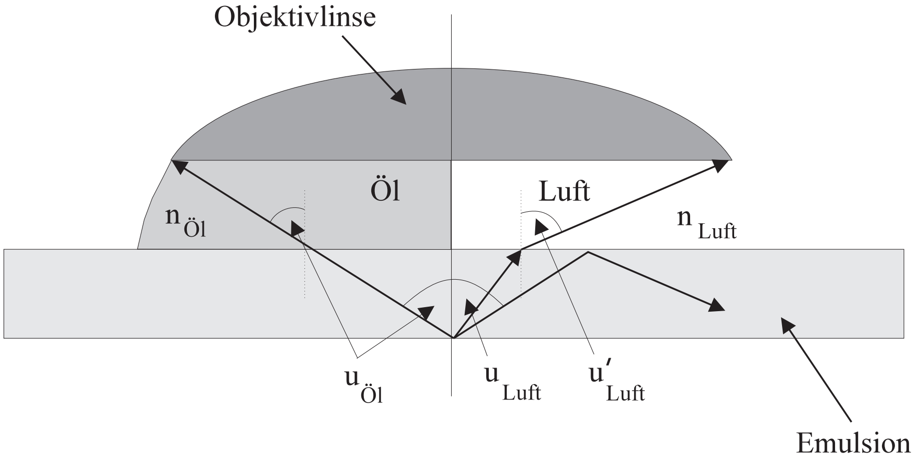


Abbildung 4.10: Funktionsweise einer Ölimmersionslinse im Vergleich mit einer Trockenlinse. Durch die Immersion wird am Übergang von Objekt zu Luft eine Brechung oder Totalreflexion des Strahls vermieden.

der Emulsion möglich ist.

4.3.1 Objektiv

Man unterscheidet bei Objektiven Trocken- und Immersionssysteme (siehe Abbildung 4.10). Immersionssysteme haben den Vorteil, daß durch eine Flüssigkeit zwischen Objekt und Objektiv eine Totalreflexion an der Oberfläche des Objekts vermieden wird, wenn die Immersion in etwa dem Brechungsindex von Objekt und Objektiv (meist um 1,5) entspricht. Sie vergrößert den Öffnungswinkel des Objektivs beträchtlich, und man erhält eine höhere Lichtintensität und somit mehr Informationen über das Objekt. Der Öffnungswinkel wird durch die numerische Apertur beschrieben. Abhängig davon ist auch das Auflösungsvermögen der Linse.

Auflösungsvermögen und numerische Apertur

Ein Lichtpunkt wird auch durch ein ideales optisches Gerät nicht als Punkt, sondern infolge der Beugung am Rand der Linse, der wie eine Lochblende wirkt, als Lichtscheibchen abgebildet. Das Beugungsbild der Lochblende entspricht einem hellen Kreis mit konzentrischen Hell-Dunkel-Ringen. Die Intensitätsverteilungen hinter der Blende werden mathematisch durch Bessel-Funktionen beschrieben. Die Winkel, unter denen minimale Intensität auftritt, ergeben sich aus den Nullstellen z der Besselfunktion erster Ordnung:

$$sin\phi_z = \frac{z \cdot \lambda}{r}$$

mit z = 0,61; 1,22; 1,62; 2,12 ...

Durch eine Linse mit der Brennweite f erhält man für die Radien r der dunklen Ringe

$$r = z \cdot \frac{\lambda \cdot f}{R}$$

und damit für den Durchmesser d des Hauptmaximums:

$$d = 1,22 \cdot \frac{\lambda \cdot f}{R}$$

mit f = Brennweite, R = Radius der Blende und λ = Wellenlänge [22].

Die Beugungsfiguren zweier Bildpunkte können als gerade noch getrennte Punkte wahrgenommen werden, wenn das Hauptmaximum des einen Punktes in das erste Beugungsminimum des anderen fällt. Damit liegt die Grenze des Auflösungsvermögens etwa bei dem Radius der Beugungsscheibchen der Bildpunkte.

Bei einem Mikroskop leuchtet das Objekt nicht selbst, sondern wird in der Brennebene des Objektivs durchstrahlt. Es bilden sich Beugungsstrahlen um die Strukturen des Objekts, die einem Kegel vom Öffnungswinkel $1,22\,\lambda/R$ entsprechen. Das zweite Objekt muß mindestens um diesen Winkel, das heißt um den Abstand

$$x_{min} \approx \frac{f \cdot \lambda}{r}$$

davon entfernt sein.
Mit Hilfe der numerischen Apertur $sin\,\varphi = r/f$, die den Öffnungswinkel des Objektivs beschreibt, kann diese Formel auch als

$$x_{min} \approx \frac{\lambda}{sin\,\varphi}$$

geschrieben werden. Nach Abbé entspricht dies dem kleinsten Abstand, den zwei Objekte haben dürfen, um im Mikroskop noch als getrennt wahrgenommen zu werden [23].

Eine Erhöhung des Auflösungsvermögens ist durch die Vergrößerung von φ und/oder die Verwendung einer Immersionsflüssigkeit mit hoher Brechzahl n zwischen Objekt und Objektiv möglich. Die Wellenlänge wird auf λ/n verringert und man erhält für die auflösbaren Abstände der Objekte

$$x_{min} = \frac{\lambda}{n \cdot sin\,\varphi}.$$

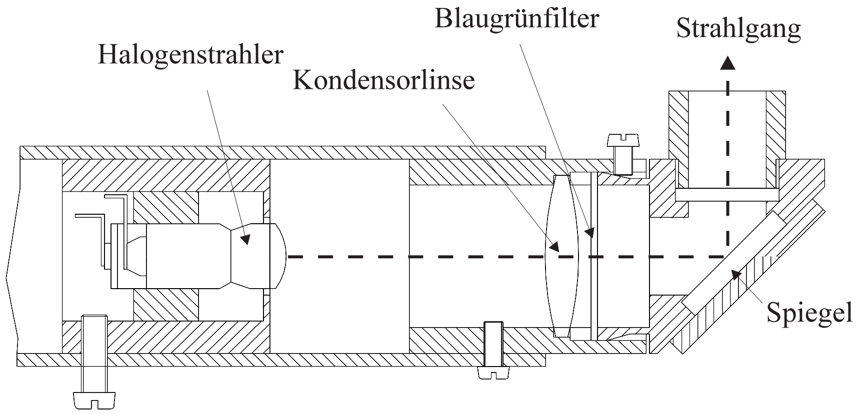


Abbildung 4.11: Beleuchtungsarm

Es wird deutlich, daß das Auflösungsvermögen optischer Systeme nicht beliebig steigerbar ist, insbesondere, da durch die optischen Eigenschaften der Emulsion die Wellenlänge der Beleuchtung auf etwa 550 nm festgelegt ist.

Das im Mikroskop verwendete Immersionsobjektiv der Firma Tiyoda hat 50-fache Vergrößerung, einen Arbeitsabstand von 1,2 mm und eine numerische Apertur von 0.85. Es ist auf den Brechungsindex der Emulsion ($n \approx 1{,}54$) abgestimmt. Diesen Brechungsindex muß auch das verwendete Immersionsöl aufweisen. Geeignet ist zum Beispiel ein Produkt der Firma Merck mit der Kennung 1.04699.055.

Zum Auffinden der Referenzpunkte (Fiducial Marks) wird eine normale 4-fach Vergrößerung benutzt.

4.3.2 Beleuchtung

Die Beleuchtung (siehe Abbildung 4.11) besteht aus einer 100 Watt starken Halogenbirne, einer Kondensorlinse, einem Blau-Grünfilter und einem Spiegel zur Umlenkung des Lichtstrahls. Ein Ventilator führt die entstehende Wärme ab.

Mit dem Filter wird die Kamera dem Sehvermögen des menschlichen Auges angepaßt. Sein Transmissionsmaximum liegt bei 550 nm und der Infrarotanteil der Lampe wird fast vollständig absorbiert. Da die CCD-Kamera in diesem Wel-

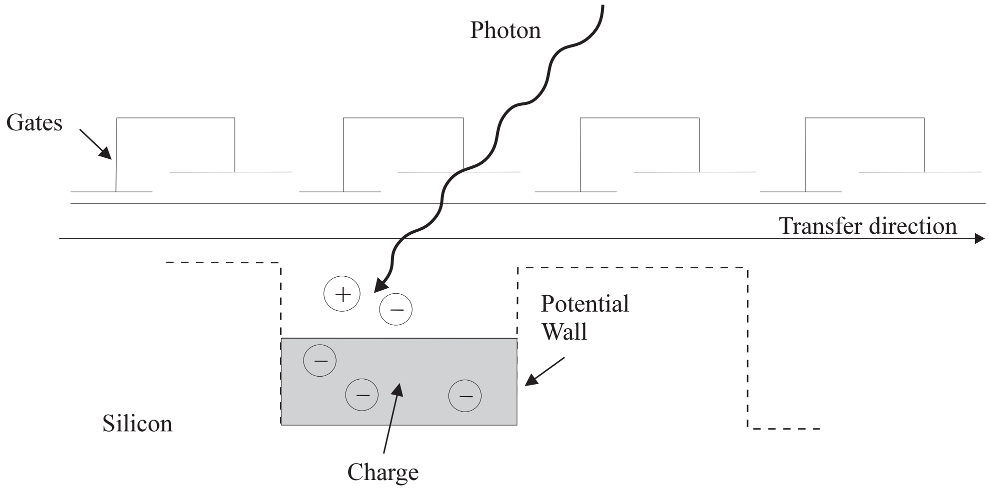


Abbildung 4.12: Funktionsprinzip eines CCD-Chips. Die im Halbleitermetall entstandenen Fotoelektronen werden in Potentialtöpfen gesammelt.

lenlängenbereich noch sehr sensitiv ist, würde das Bild ohne Filter zusätzlich aufgehellt und Informationen, die bereits als helle Punkte im Bild vorhanden sind, in die Sättigung geschoben. Weiterhin wird eine partielle Aufheizung und damit eine Verzerrung der Emulsion verhindert.

Außerdem ist durch den Filter der Kontrast und damit der Informationsgehalt zwischen Spur und unbelichteter (also "weißer") Emulsion besonders hoch [24].

4.4 Die CCD-Kamera

Zur digitalen Bildaufnahme wird eine CCD-Kamera (CCD = charge coupled device) benutzt. Eine solche Kamera wird mit einem Halbleiter-Chip betrieben, der ein optisches Bild in ein elektronisches Signal umwandelt.

CCD-Chips gehören zur Klasse der integrierenden Empfänger. Sie bestehen aus einem Raster einzelner Pixel, die wie eine zweidimensionale Matrix auf einen Silizium-Kristall geätzt werden. Jeder einzelne dieser Pixel ist eine Art Photodiode, ein sogenanntes "PhotoMOS"-Element. Die Kombination verschieden niedrig- und hochdotierter Halbleiter erzeugt einen pn-Übergang, der einen Potentialtopf für Leitungselektronen darstellt. Diese Halbleiterstrukturen können Ladungen sowohl speichern als auch weitertransportieren.

Im Prinzip arbeitet ein CCD-Chip wie folgt: Während der Aufnahmezeit wird die auftreffende Strahlung durch einen inneren lichtelektrischen Effekt in eine hierzu proportionale Ladung gewandelt. Diese Photoelektronen werden in den Potentialtöpfen gespeichert (siehe Abbildung 4.12). Das an dem Halbleiterüber-

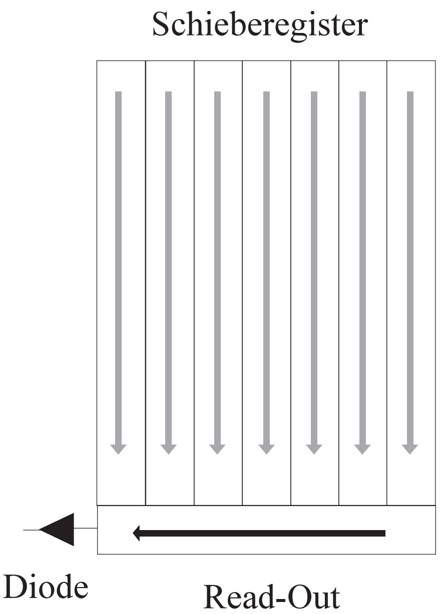


Abbildung 4.13: Ausleseprinzip einer CCD-Kamera. Synchron arbeitende Schieberegister transportieren die Ladung in ein Ausleseregister.

gang vorhandene Potential wird durch eine an den "Gates" angelegte Spannung wie ein Topf geformt, in dem sich die Elektronen sammeln [25].

Nach der Aufnahmezeit werden die Ladungen zeilenweise in ein Schieberegister zur Auslese transportiert. Dabei werden die Elektronen von einem Pixel in den Nachbarpixel umgeladen.

In der Auslesezeile werden die Ladungen dann über eine Diode in analoge Spannungen gewandelt (siehe Abbildung 4.13). Sie werden aneinandergereiht und können später zu einem Bild zusammengesetzt werden.

Die schnellste Art der "Weitergabe" von Ladungen erzielt man im Zwei-Phasen-Modus (siehe Abbildung 4.14). Ein Pixel des CCD-Chips besteht jeweils aus zwei Gates Φ_1 und Φ_2, an denen unterschiedliche Spannungen anliegen können. Dies entspricht unterschiedlich tiefen Potentialtöpfen, mit denen die Ladungen, wie in Abbildung 4.14 gezeigt, im zeitlichen Verlauf durch den Chip geschoben werden. Die Richtung läuft in diesem Fall von links nach rechts. Die Ladungen werden zu unterschiedlichen Zeiten A, B und C betrachtet. A ist die Ausgangsposition, alle Ladungen sind in einem tiefen Potentialtopf gesammelt. Zur Zeit B wird er etwas angehoben, während ein anderer, leerer Potentialtopf auf die gleiche Höhe abgesenkt wird. Noch sind aber beide Töpfe durch einen Potentialwall getrennt. Das ändert sich zur Zeit C, bei der der Potentialtopf mit den Ladungen über das Potential des Walls gehoben wird und die Ladungen in das tiefere Potential weiterfließen.

Das Verfahren funktioniert auch mit vier Gates pro Pixel einem

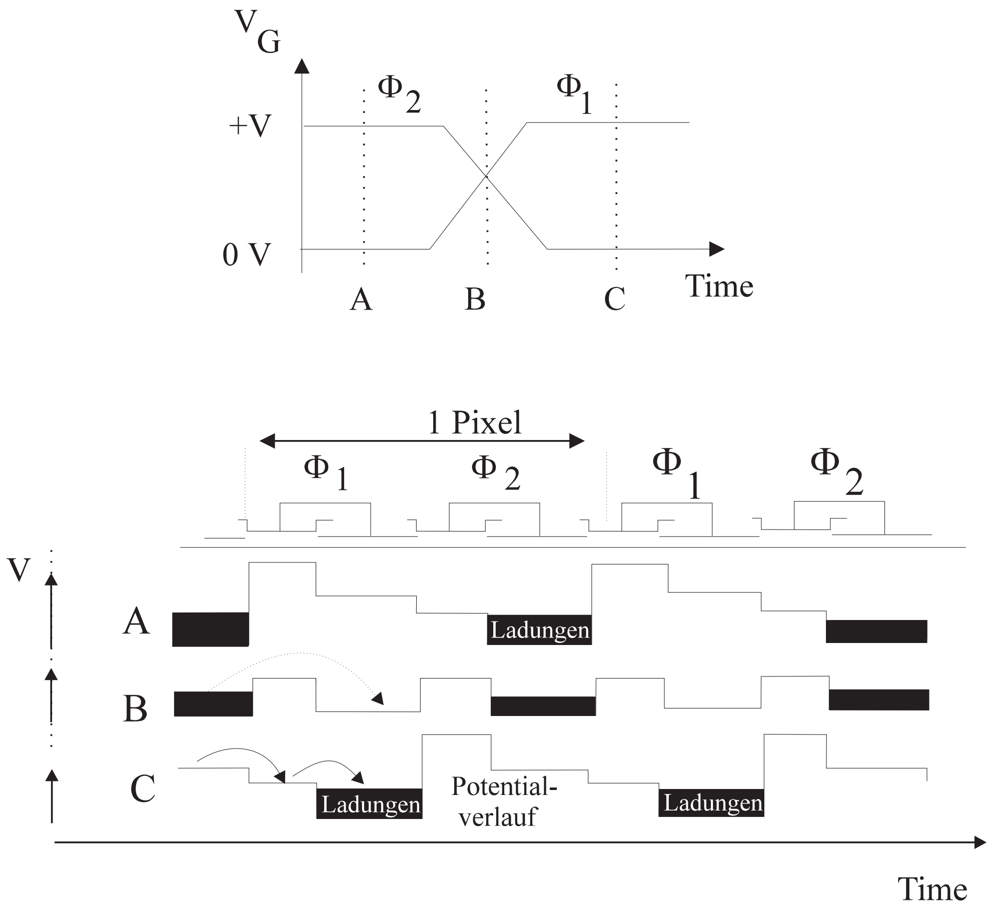


Abbildung 4.14: Zwei-Phasen Transfer. Das obere Diagramm zeigt die an den Gates anliegenden Spannungen zu den Zeiten A, B und C. In der unteren Zeichnung ist das daraus resultierende Heben und Senken der Potentialwälle dargestellt.

Vier-Phasen Takt. Das Risiko des Ladungsverlustes ist geringer, der zeitliche Aufwand jedoch höher.

Diese Auslesemethode kann nicht beliebig beschleunigt werden; es sind physikalische Grenzen gesetzt. Je schneller die Elektronen durchgereicht werden, desto verschmierter ist das Signal. Die im Augenblick technisch mögliche Höchstfrequenz liegt bei 20 MHz [26], die theoretisch mögliche Höchstfrequenz für eine Pixelgröße bis 20 μm bei etwa 70-80 MHz [27].

Die Potentialtöpfe können bei Überbelichtung des Chips "überlaufen". Die Ladungen überschwemmen dann die Nachbarpixel und im Bild wäre keine Struktur mehr erkennbar, es wäre nur ein heller Fleck zu sehen. Das kann durch *Antiblooming* verhindert werden. Die überschüssigen Ladungen werden durch Kanäle auf dem Chip abgeführt.

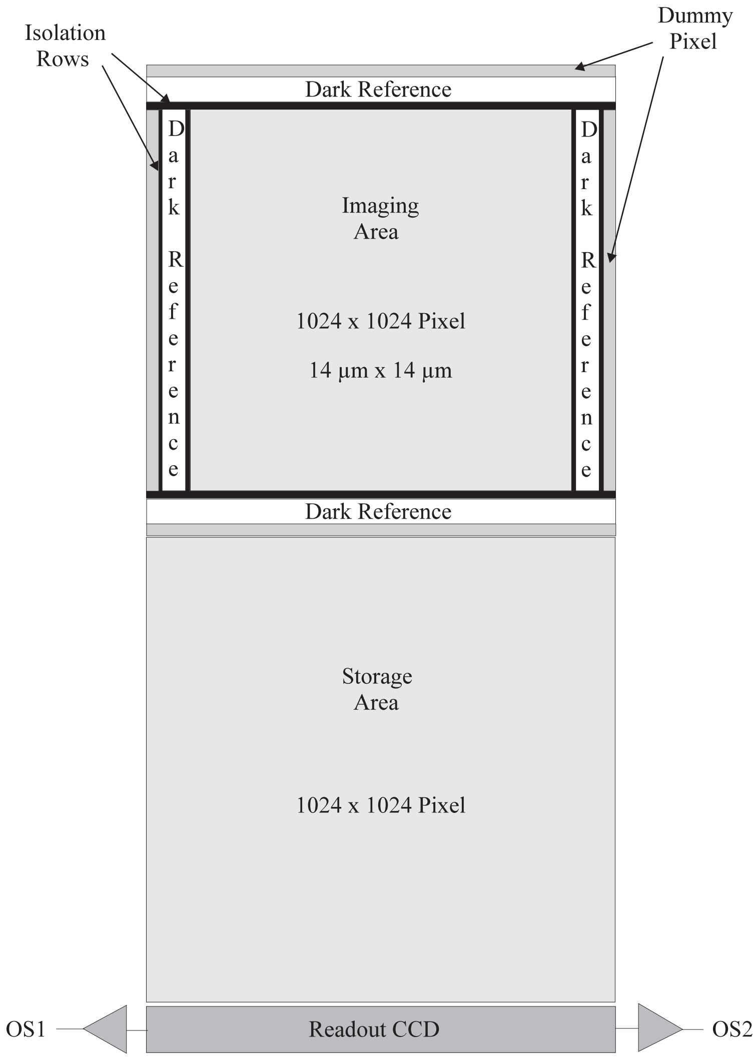


Abbildung 4.15: Schematischer Aufbau eines CCD Flächensensors.

Der CCD-Flächensensor

In Abbildung 4.15 ist ein Flächensensor mit einer Speicherzone dargestellt. Die optische Information wird in der *Image Zone* aufgenommen und nach einer vorgegebenen Integrationszeit in die abgedeckte *Memory Zone* verschoben und durch ein Schieberegister (CCD-Readout) zeilenweise ausgelesen. Das Register ist geteilt, so daß das Bild über zwei Dioden ausgelesen wird. Damit erreicht man eine effektive Auslesegeschwindigkeit von 40 MHz. In der zweidimensionalen Matrix des Chips ist jede Spalte ein CCD-Schieberegister, die untereinander isoliert sind. An den Rändern der Image-Zone gibt es zusätzliche abgedeckte Spalten, unter denen sich Referenzpixel für den dunkelsten Grauwert (*Dark Reference*) und "Dummy"-Pixel befinden.

Scanning Mode	Maximale Bildrate MODE 1 Bilder/s	Maximale Bildrate MODE 2 Bilder/s
1024(H) x 1024(V)	15	30
1024(H) x 512(V) progressive (non-interlaced)	30	60
1024(H) x 512(V) interlaced	30	60
512(H) x 512(V) progressive (non-interlaced)	30	60
512(H) x 512(V) interlaced	30	60

Tabelle 4.1: Die für die CCD-Kamera einstellbaren Scanning Moden. Die Datenrate bei Moden, die mit 512 Zeilen beziehungsweise Spalten arbeiten, ist bis auf 60 Bilder/s steigerbar. Dies erreicht man durch vertikales und/oder horizontales Binning von benachbarten Pixeln. Beim Binning werden zwei benachbarte Pixel zu einem zusammengefaßt und als Einheit ausgelesen.

Der Transfer des Bildes von der Image-Zone in die Memory-Zone geschieht während der "Field Blanking Period". Der Zeitraum ist kleiner als eine Millisekunde, um ein Verschmieren des Bildes durch die auch weiterhin auftreffende Ladung zu unterdrücken.
Die Auslese des Bildes erfolgt während der "video period". Die Synchronisationssignale, die für den korrekten Wiederaufbau des Bildes benötigt werden, sind das Ende einer Zeile beziehungsweise das eines Bildes. Diese Information liefern die Dummy-Pixel.

4.4.1 Der Kamera-Kit TH78KA88

Bei der für das Mikroskop verwendeten Kamera handelt es sich um eine 12-Bit Megapixel-Kamera der Firma Thomson-CSF Semiconducteurs Specifiques. Der Chip entspricht dem Flächensenor, der in Abbildung 4.15 vorgestellt wurde. Er ist in Image und Memory Zone aufgeteilt. Die Imaging Zone besteht aus 1024 $\times$ 1024 aktiven Pixeln, mit einer Größe von jeweils 14 μm $\times$ 14 μm. Der Sensor hat Antiblooming und ist mit einem Peltierkühler versehen. Die verschiedenen möglichen Betriebsarten des Chips sind in Tabelle 4.1 zusammengefaßt.

Zusätzlich existieren folgende externe Kontrollmöglichkeiten:

- Integrationszeit und Auslesekontrolle
- Festlegung des Betreibungsmodus

- Vertikales und Horizontales Binning
- Interlaced/Non-Interlaced Mode
- Reset
- Wahlmöglichkeit der vertikalen Frequenz (625 kHz oder 1,25 MHz), um die Sättigung optimal auszunutzen.

Die Daten, die die Kamera sendet, sind je nach Rate RS422 oder TTL Signale. RS422 ist ein asymmetrisches, paarweise getrenntes Signal. Es wird über zwei Leitungen gesendet. Der Empfänger subtrahiert die beiden Signale und erhält so wieder das ursprüngliche. Vorteil dieses Verfahrens ist es, daß sich Rauschen, das während des Übertragungsvorgangs aufgenommen wird, herausmittelt. Leider ist das Verfahren relativ aufwendig und langsam, so daß für hohe Datenraten (30 Bilder/s, 1024×1024) nur die Übertragung durch TTL Signale in Frage kommt. TTL Signale sind sehr schnelle, rein logische Rechtecksignale, die sich aber zur Übertragung über längere Strecken nicht eignen. Diesem Problem wird durch eine Zusatzkarte mit einem speziellen Signaltreiber Abhilfe geschaffen. Die TTL Signale werden in RS422 Signale gewandelt und über eine Busverbindung in den Rechner geschickt.

Um diese nicht-standardisierte Kamera mit einem konventionellen "Frame Grabber" verbinden zu können, der die Schnittstelle zwischen Computer und Kamera darstellt, ist eine sehr genaue Kenntnis der einzelnen Signale notwendig (siehe Abschnitt 4.5). Die Firma Matrox stellt hierfür eine Software zur Verfügung, bei der man die Kenngrößen der Signale eingibt (siehe Anhang A). Die Software kümmert sich dann darum, daß das Bild, das von der Kamera in dem so festgelegten Format geliefert wird, richtig zu einem auf einem Monitor darstellbaren Bild zusammengesetzt werden kann.

4.5 Videosignale

Es existieren bestimmte Standard-Videoformate, in denen analoge (Video)Kameras betrieben werden können. Der Standard für monochromatische Kameras in Europa ist hauptsächlich CCIR, in den USA RS170 und in Japan RS343. Die drei führenden Farbstandards sind PAL (Europa), SECAM (Frankreich, Russland) und NTSC (USA, Kanada, Japan). Die verschiedenen Formate unterscheiden sich geringfügig im Sendeprotokoll in Bezug auf die Anzahl der gesendeten Zeilen, Bildfrequenz und Farbstandard.

Nicht-standardisierte Videoformate weichen vom Standardvideo durch Timing und Signalcharakteristik ab. Dies ist der Fall bei digitalen Kameras und auch bei

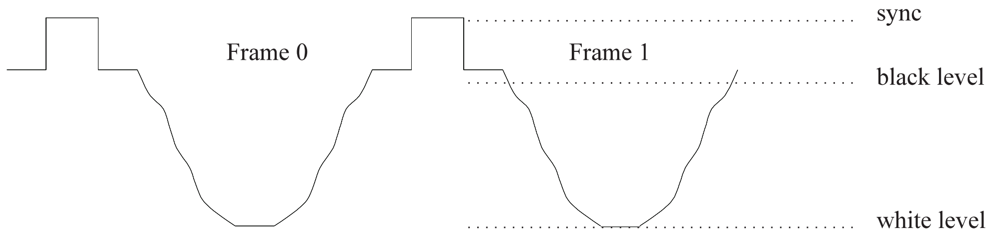


Abbildung 4.16: Nicht-Standardisiertes negatives Videosignal. Die Bilder sind untereinander durch ein definiertes Synchronisationssignal getrennt.

hochauflösenden Megapixel-Kameras. Für diese Kameras benötigt der Frame-Grabber eine höhere Abtastrate. Die Videosignale sind negativ statt positiv, helle Pixel liegen in einem negativeren Spannungsbereich als dunkle (siehe Abbildung 4.16 [28]). Steuerimpulsen wie Synchronisation, blanking und Sättigung werden digitale Werte zugewiesen. Es existieren zusätzliche Möglichkeiten wie asynchroner Reset oder externer Belichtungskontrolle.

4.5.1 Nicht-Standardisierte Videoformate

Synchronisationssignale

Für die horizontale und vertikale Synchronisation werden "blanking intervals" verwendet. Ein vertikales Intervall (vsync) trennt zwei Bilder, ein horizontales Intervall (hsync) zwei Zeilen.

Vertical Blanking

Zwischen zwei Bildern wird ein Trennungssignal gesendet, das sich aus "front" und "back porch" zusammensetzt (siehe Abbildung 4.17). Diese porches bestehen aus einer Serie von "equalisation pulses". Dazwischen befindet sich ein Synchronisationssignal, das je nach Signaltyp als Serie von Pulsen gesendet wird (serration pulses) oder ohne jeden Puls (block sync). Die serration pulses im Synchronisationsteil wurden früher bei der Fernsehtechnik für korrektes 2:1 interlacing benötigt, bei der heutigen Technik der Framegrabber wird statt dessen die systemeigene Pixel Clock (siehe auch Abschnitt 4.5.1) verwendet.

Horizontal Blanking

Das horizontale Synchronisationssignal besteht aus dem "front porch" der vorhergehenden Zeile, dem horizontalen Synchronisationssignal und dem "back porch" der nächsten Zeile (siehe Abbildung 4.18). Während dieser Zeit wird kein Bildinhalt übermittelt, auf einem Monitor findet der Zeilenrücklauf statt.

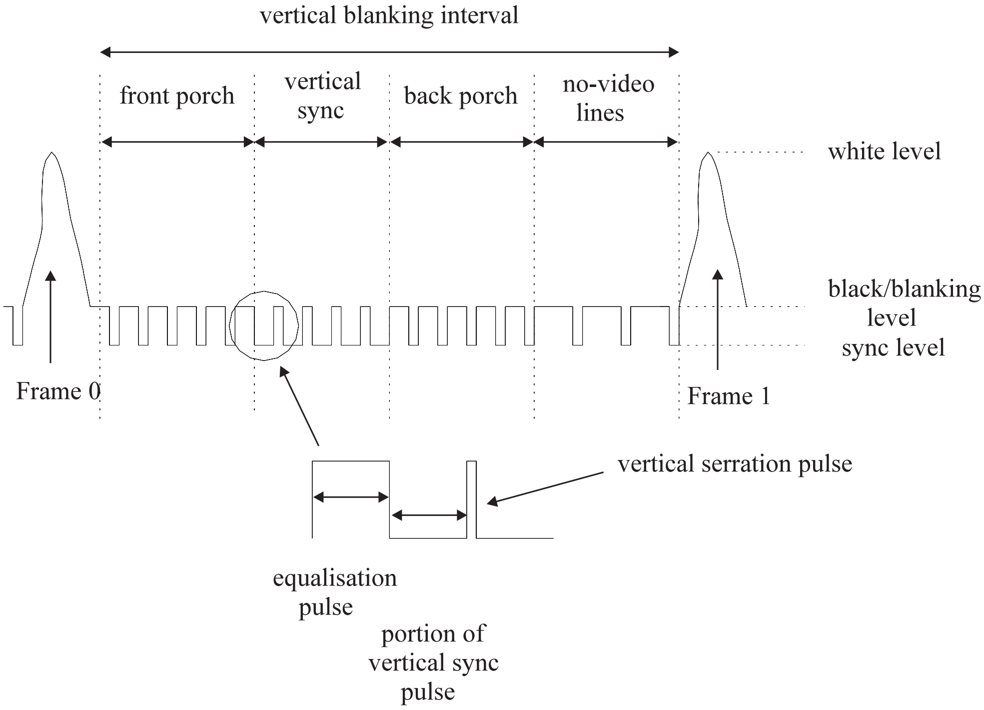


Abbildung 4.17: Vertikales Synchronisationssignal zwischen zwei Bildern einer Standard Kamera. Im Vergleich mit dem Nicht-Standardsignal 4.16 liegen die Bilddaten hier im positiven Spannungsbereich.

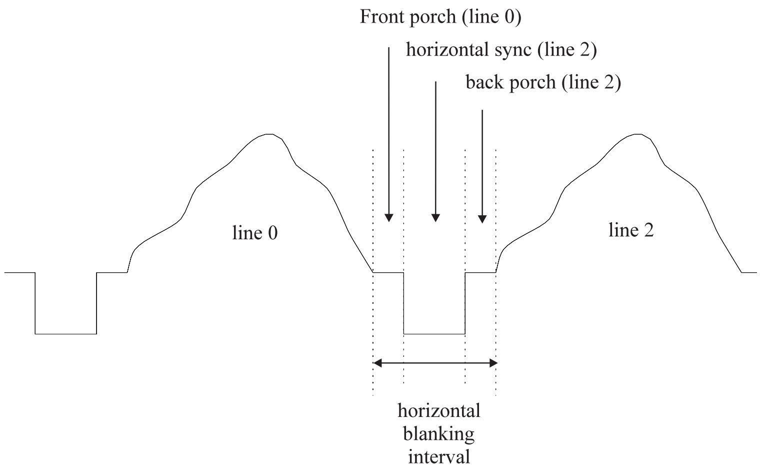


Abbildung 4.18: Horizontales Austastsignal. Dieses Signal trennt zwei Zeilen in einem Bild und ist wesentlich einfacher aufgebaut als das vertikale Synchronisationssignal.

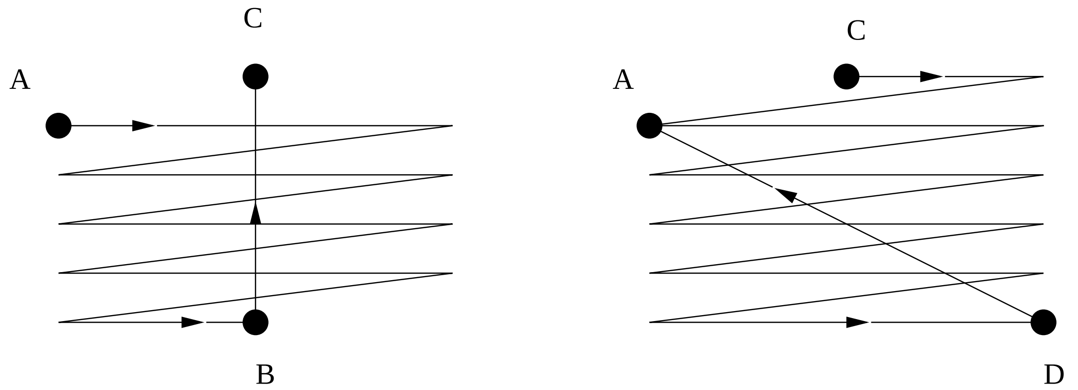


Abbildung 4.19: Zwei Halbbilder eines 11 Zeilen-Systems, wie sie beim Interlaced-Betrieb erstellt werden.

Die Synchronisationsimpulse, back porch, front porch und die Zeit der aktiven Bildaufnahme sind die maßgeblichen Größen, die das Video Timing einer Kamera festlegen [28].

Pixel Clock

Als Pixel Clock wird ein Timing-Signal bezeichnet, das eine Videozeile in einzelne Pixel zerteilt. Die Pixel Clock wird entweder von der Kamera oder vom Frame Grabber zur Verfügung gestellt. Es kann möglich sein, daß die Pixel Clock über den Regelkreis eines PLL (Phase Looked Loop), der Nachlaufsynchronisation generiert werden muß. Allerdings benötigt auch PLL ein Referenzsignal, wie zum Beispiel das Taktsignal eines schwingenden Piezokristalls, der sich auf der Frame Grabber Karte befindet, oder das externe hsync oder vsync Signal. Die Pixel Clock im CCIR-Format liegt bei einer Frequenz von 14,75 MHz. Der Fehler wird als Pixel Jitter bezeichnet. Er setzt sich aus Phasen- und Frequenz-Differenzen zwischen eintreffender Welle und Pixel Clock und dem Fehler durch den digitalen Abtastcharakter der Pixel Clock, der sich zwischen zwei festen Werten entscheiden muß, zusammen. Die zeitliche Dimension der Pixel Jitter ist 2-3 Nanosekunden.

Auslesemoden eines CCD-Chips

Es gibt zwei wesentliche Moden, in denen eine Kamera betrieben werden kann: *Interlaced* und *Non-Interlaced*.

Das Prinzip des Interlaced-Betriebs soll an Hand eines 11 Zeilen-Systems verdeutlicht werden (siehe Abbildung 4.19). Hier werden die geraden und ungeraden Zeilen eines Bildes abwechselnd wiedergegeben. Das erste Halbbild beginnt im Punkt A und endet im Punkt B. Von dort springt der schreibende Elektronen-

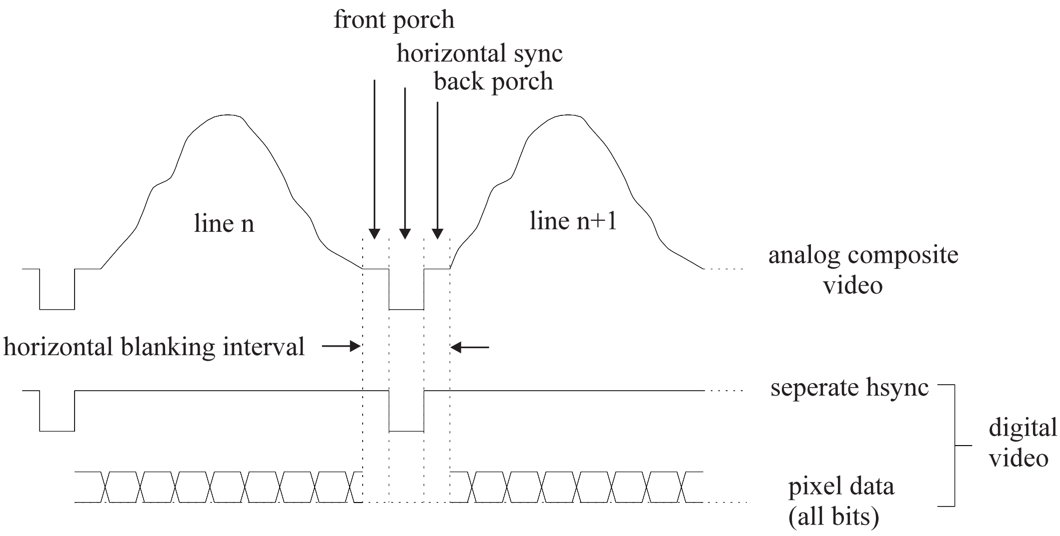


Abbildung 4.20: Vergleich zwischen einem analogen und einem digitalen Videosignal [28]

strahl nach oben und beginnt im Punkt C mit dem zweiten Halbbild, das im Punkt D endet. Durch diesen Zeilensprung sind beide Halbbilder korrekt ineinander verschachtelt und bilden das 11-Zeilen-Vollbild. Diese Verfahren wird auch als *Frame Integration Mode* bezeichnet. Für eine CCD-Kamera bedeutet dies, daß die geraden und ungeraden Zeilen abwechselnd ausgelesen werden.

Das Interlaced-Verfahren stammt aus der Fernsehtechnik, um dem menschlichen Auge eine höhere Bildwiederholfrequenz vorzutäuschen. Es werden üblicherweise 25 Bilder pro Sekunde übertragen; der Aufbau eines Bildes dauert also eine 25stel Sekunde. Damit würden die ersten Zeilen des Bildes schon wieder verblassen, während die untersten gerade in voller Helligkeit erscheinen. Dies führt zu starkem Flimmern. Dieser Effekt wird bei der Übertragung von 50 Halbbildern pro Sekunde unterdrückt.

Die Auslese eines CCD-Chips kann auch im *non-interlaced* Betrieb ausgeführt werden. Dabei wird nur mit dem ersten Halbbild, also nur mit den geraden oder ungeraden Zeilen gearbeitet. Das Videoausgangssignal ist hierbei halbiert. Dieser non-interlaced Betrieb kann ebenfalls das volle Ausgangssignal liefern, wenn zwei benachbarte Zeilen zusammen ausgelesen werden, also anstelle der Zeile 1 die Zeilen 1 und 2, anstelle von Zeile 3 die Zeilen 3 und 4, und so weiter. Das Verfahren wird auch als *Field Integration Mode* bezeichnet.

Digitale Video Signale

Die Zusammensetzung digitaler Videosignale (siehe Abbildung 4.20) beschränkt sich auf einen von zwei Spannungspegeln, auf logisch Null oder Eins. Diese Art

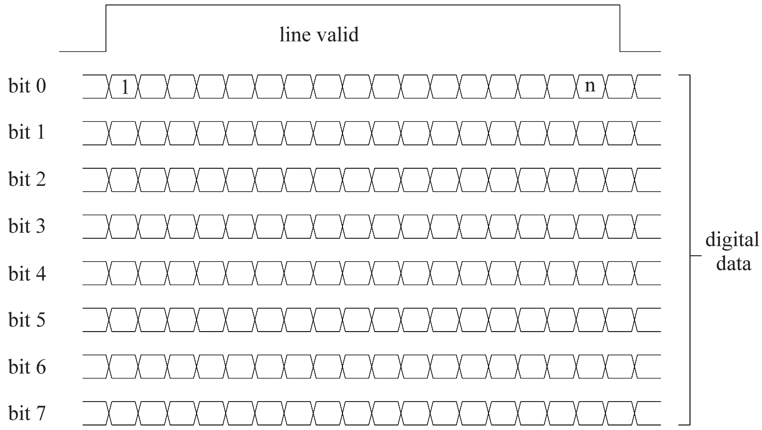


Abbildung 4.21: Digitales Videosignal mit 8-Bit Breite [28]

der Datenübertragung hat den Vorteil, daß das Signal kaum durch Rauschen oder andere verzerrende Mechanismen beeinflußt werden kann.

Jeder Pixel wird durch ein n-Bit-System dargestellt (vergleiche Abbildung 4.21). Ein Wert zwischen Null und 2^n stellt einen Grauwert dar. In einem 8-Bit-System kann dieser Wert also zwischen Null und 255 liegen. Je höher der Bit-Wert liegt, desto mehr Informationen über den einzelnen Pixel sind darin enthalten und desto genauer ist die Wiedergabe des Objekts.

Kapitel 5

Bildverarbeitung

In den verschiedensten Bereichen der Naturwissenschaften treten Fragestellungen auf, die die Auswertung vieler Bildern erforderlich machen. Der Mensch kann die im Bild enthaltenen visuellen Informationen über sein Sehvermögen aufnehmen und verarbeiten, aber bei großen Bildmengen ist dieses "manuelle" Verfahren sehr zeitaufwendig und fehleranfällig.

Der enorme Fortschritt der Computertechnologie macht einen breiten Einsatz digitaler Bildverarbeitung als Hilfsmittel zur Auswertung komplexer zwei- und dreidimensionaler Vorgänge möglich. Die Technik geht über das reine fotografische Festhalten von Bildern hinaus. Sichtbares kann maschinell wahrgenommen und quantitativ ausgewertet werden. Dadurch hat sich die Bildverarbeitung bereits zu einem wissenschaftlichen Standardwerkzeug entwickelt.

5.1 Digitale Bildverarbeitung und Mustererkennung

Digitale Bildverarbeitung ist ein Oberbegriff für die Verarbeitung digitaler Informationen mit einem Rechnersystem. Die hierbei verwendeten Methoden und Verfahren dienen der Manipulation und Informationsgewinnung aus Bildern. Die Arbeitsweise eines kompletten Bildverarbeitungssystems ist in Abbildung 5.1 gezeigt.

Ein Bild wird mit einer CCD-Kamera mit angeschlossenem Frame Grabber aufgenommen und kann mehrere Verarbeitungsschritte durchlaufen.

Bei der Bildvorverarbeitung wird das Bild modifiziert, ohne seinen Informationsgehalt wesentlich zu verändern.

Mögliche Transformationen sind zum Beispiel Shading-Korrekturen zur Anpassung des Bildhintergrundes. Dieses Korrekturverfahren ist besonders für die Mikroskopie interessant. Beleuchtungsunterschiede zwischen Bildmitte und Bild-

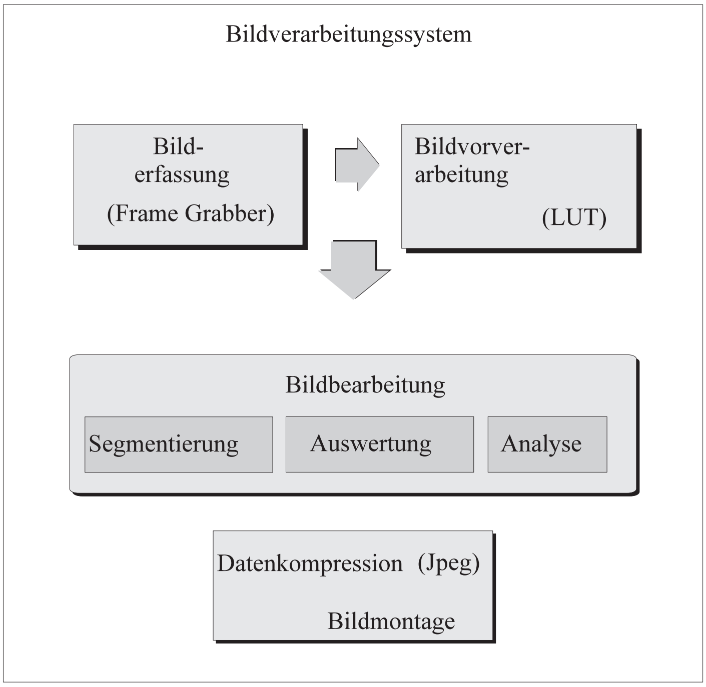


Abbildung 5.1: Schema eines modularen Bildverarbeitungssystems

rand, die aufgrund der punktförmigen Lichtquelle und der hohen Apertur in jedem Bild auftauchen, werden korrigiert und angeglichen. Durch lineare und nichtlineare Filterung kann schon im Vorfeld Rauschen reduziert werden, indem zum Beispiel Frequenzen mit wichtigen Informationen verstärkt und die übrigen unterdrückt werden. Dadurch können auch aufnahmetechnisch bedingte Digitalisierungsfehler beseitigt werden. Kontrast- und Helligkeitsmodifikationen verbessern den optischen Eindruck für den menschlichen Betrachter.

Ziel der Bildvorverarbeitung ist es, der Bildbearbeitung ein Bild zur Verfügung zu stellen, in dem Fehler unterdrückt und die interessanten Objekte bereits herausgearbeitet sind.

Bildbearbeitung gliedert sich in Segmentierung, Auswertung und Analyse.
Bei der Segmentierung werden die interessierenden Objekte vom übrigen Bildinhalt getrennt. Sich berührende Objekte werden erkannt und in Unterobjekte zerlegt. Die Objekte können nun einzeln vermessen und identifiziert werden. Um die Objekte herauszuarbeiten, finden Verfahren wie zum Beispiel Binarisierung ihre Anwendung. Dabei können dunkle Objekte von hellem Hintergrund getrennt werden, indem über einem Schwellwert alle Grauwerte auf schwarz und darunter auf weiß gesetzt werden. Die Anwendung von Filtern zur Aufbesserung verrauschter Bilder, zur Glättung oder zu Bildkontrastveränderungen können die Segmentierung unterstützen.

Für solche Operationen müssen Bilder vorher anhand von Maßzahlen, wie zum Beispiel einem Histogramm, bewertet werden.

Sind die Objekte selektiert, können sie in der Auswertung nach bestimmten Merkmalen sortiert werden. Graphische und geometrische Objekte können vermessen und/oder mit einem Muster verglichen werden. Besondere Punkte im Bild, wie zum Beispiel Kanten, die in eine bestimmte Richtung laufen, können detektiert werden.

Die Kompression von Bilddaten zur effektiven Speicherung und Übertragung gehört ebenfalls zur Bildbearbeitung. Hier kann sich noch eine Bildaufbereitung in Form von Texteinblendungen und Markierungszeichen anschließen. Dies umfaßt auch Bildmontagefunktionen wie Ausschneiden, Kopieren, Löschen und Einsetzen.

5.2 Grundlagen

Die Digitalisierung eines Bildes geschieht in zwei Schritten: Rasterung und Quantisierung. Bei der Rasterung wird das Bild mit einem Gitter überlagert, das weder zu grob sein darf, da Informationen verloren gehen können, noch zu fein, da es sonst zu einem sehr hohen Rechenaufwand kommt. Bei der Quantisierung wird dann jedem Rasterstück ein Grauwert aus einer Grauwertmenge zugewiesen, die sich zwischen 0 (schwarz) und 255 (weiß) bewegt. Ein Grauwertbild läßt sich durch folgende Punkte beschreiben:

$G = \{0, 1, ..., 255\}$	Grauwertmenge im 8-Bit Bild
$x = 0, 1, ..., L-1$	Bildzeilen
$y = 0, 1, ..., R-1$	Bildspalten
(x,y)	Ortskoordinaten des Bildpunktes
$S(x,y)$, $S \in G$	Grauwert eines Bildpunktes (Pixel) in der Bildmatrix an der Stelle (x,y)

Neben Grauwertbildern unterscheidet man noch mehrere andere Bildtypen: Binärbilder, Zweipegelbilder und logische Bilder.

Binärbilder bestehen aus den Grauwerten 0 und 1 und benötigen zur Speicherung nur ein Bit pro Pixel. Da sie sich aber nicht zur Darstellung eignen, wandelt man sie in Zweipegelbilder, in denen man dem Wert 1 zum Beispiel den Grauwert 255 zuweist. Bei logischen Bildern legt der Grauwert die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Klasse fest. Dabei kann der Hintergrund eines Bildes mit dem Grauwert 255 als Klasse "Bildhintergrund" kodiert sein, schwarze Striche als Grauwert 0 und Klasse "Linie".

Jeder Pixel mit Ausnahme der Randpunkte hat acht Nachbarpunkte. Sie werden in die Kategorien 4- und 8-Nachbarn eingeordnet (siehe Abbildung 5.2).

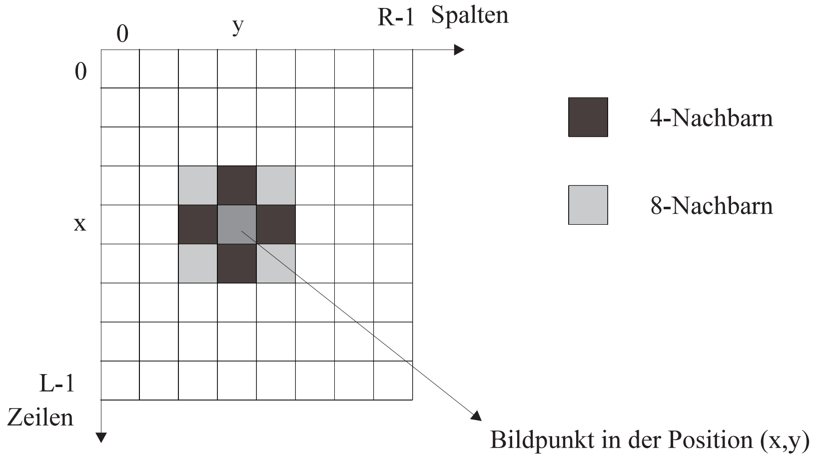


Abbildung 5.2: Bildmatrix eines digitalisierten Grauwertsbildes mit Koordinatensystem und 4- und 8- Nachbarn [30]

Die Charakterisierung von Bildern

Digitalisierte Bilder können durch Maßzahlen beschrieben werden. Die wichtigsten sind hier zusammengestellt.

Für ein Grauwertbild mit L Zeilen, R Spalten und $M = L \cdot R$ Bildpunkten berechnet sich der **Mittelwert** wie folgt:

$$m_S = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{R-1} S(x,y)$$

Mit diesem Wert erhält man eine Aussage, ob das Bild insgesamt heller oder dunkler ist [29].

Die mittlere quadratische Abweichung ist eine statistische Größe und läßt eine Aussage über den **Kontrast** des Bildes zu [29]:

$$q_S = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{R-1} (S(x,y) - m_s)^2 = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{R-1} S(x,y)^2 - {m_s}^2$$

Um die Verteilung der Grauwerte im Bild zu berechnen, erstellt man das **Histogramm** der relativen Häufigkeiten.

$$p_S(g) = \frac{a_g}{M}, \quad g = 0, 1, ..., 255$$

a_g bezeichnet die Häufigkeit des Auftretens eines Grauwerts g in S. Es gilt:

$$\sum_{g=0}^{255} p_S(g) = 1 \qquad \text{für} \qquad 0 \leq p_S(g) \leq 1$$

Die relativen Häufigkeiten eines dunklen Bildes mit wenig Kontrast sind vor allem für kleine Werte von g besetzt, ein helles Bild für große Werte von g. Ein kontrastreiches Bild besetzt im Idealfall alle relativen Häufigkeiten $p_S(g) = 1/256$. Zur Verbesserung des Kontrastes kann ein Histogramm modifiziert werden. Dafür benötigt man die relativen Summenhäufigkeiten

$$h_S(g) = \sum_{k=0}^{g} p_S(k), \quad g = 0, 1, ..., 255.$$

Wegen

$$\sum_{g=0}^{255} p_S(g) = 1 \quad \text{gilt:} \quad 0 \leq h_S(g) \leq 1.$$

Aus einem Histogramm $p(g)$ läßt sich die Entropie, also der mittlere Informationsgehalt eines Bildes, berechnen [30]:

$$H = -\sum_{g=0}^{255} (p_S(g) \cdot log_2 p_S(g)) \qquad \text{für} \qquad p_S(g) \neq 0.$$

Dieses Maß spielt für die Reduzierung der Datenmenge eine wichtige Rolle.

5.3 Bildvorverarbeitung

In diesem Abschnitt werden Verfahren zur Bildverbesserung durch Analyse und Modifikation der Grauwerte eines Bildes besprochen. Diese Art der Verarbeitung wird als Bildpunktanalyse bezeichnet, da nur der einzelne Bildpunkt eines Eingangsbildes zur Berechnung des entsprechenden Ausgangsbildpunkts benötigt wird.

Bildpunktrechnungen sind die einfachsten Bildverarbeitungsfunktionen und können in einer LUT (*Look-up-table*) Tabelle bearbeitet werden. Solche LUT-Operationen sind sehr schnell und in den meisten Systemen Hardware-unterstützt. Ein LUT ist ein Speicher, der sich zwischen D/A-Wandler und dem weiteren Rechner befindet. Sein Inhalt wird nur einmal berechnet und für das Ausgangsbild $A(x, y)$ jeweils abgefragt.

$$A(x, y) = LUT(B(x, y))$$

Die LUT werden als Diagramme dargestellt. Die Grauwerte des Eingangsbildes bilden die Abzisse, die Grauwerte des Ausgangsbilds die Ordinate.

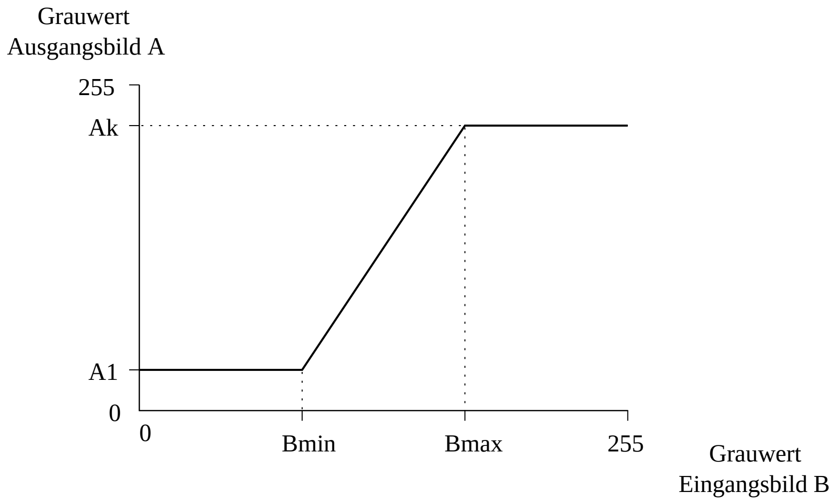


Abbildung 5.3: Kennlinie zur Kontrastanreicherung des Eingangsbildes B von B_{min} bis B_{max} auf das Ausgangsbild A von A_1 bis A_k. [31]

Lineare Skalierung

Bei einer linearen Skalierung wird das Histogramm der Grauwerte eines Eingangsbilds B mit Werten zwischen B_{min} und B_{max} gespreizt. Es ergibt sich ein Ausgangsbild A mit deutlich höherem Kontrast. Für eine optimale Darstellung sollten möglichst alle Grauwerte von 0 bis 255 voll genutzt werden.

Die Gleichung für lineare Skalierung lautet [31]:

$$A(x, y) = \frac{A_k - A_1}{B_{max} - B_{min}} \cdot (B(x, y) - B_{min}) + A_1$$

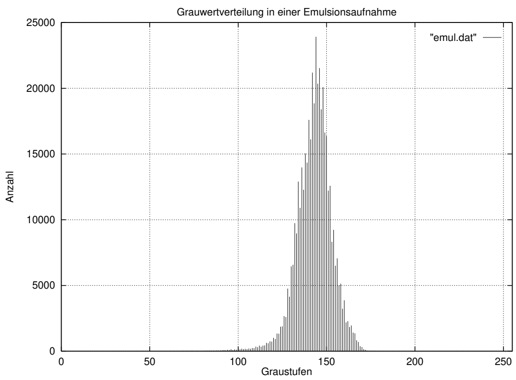
mit $B_{min} \leq B(x, y) \leq B_{max}$ und $A_1 \leq A(x, y) \leq A_k$. Nach dieser Gleichung wurde das Histogramm 5.4 berechnet. Einen schnellen Überblick bietet die Kennlinie des Verfahrens (siehe Abbildung 5.3). Wie sich die Veränderung in einem Bild ausdrückt, sieht man in Abbildung 5.5. Man sieht auch deutlich, daß diese Skalierung für die Emulsionsanalyse nicht ideal ist. Die interessanten Punkte sind zwar eindeutig verstärkt, was aber auch auf Abschattungen im Originalbild zutrifft. Dieser Untergrund ist im Ausgangsbild zu dominant.

Weitere Skalierungsmöglichkeiten

Je nach Eingangsbild und Anforderung an das Ausgangsbild werden verschiedene Skalierungsmöglichkeiten benötigt. Alternativen zur linearen Skalierung sind in Abbildung 5.6 aufgezeigt.

Die Kennlinien können durch folgende Transformationsfunktionen beschrieben werden:

- Lineare Kennlinie: $y = x$. Das Originalbild wird nicht verändert.



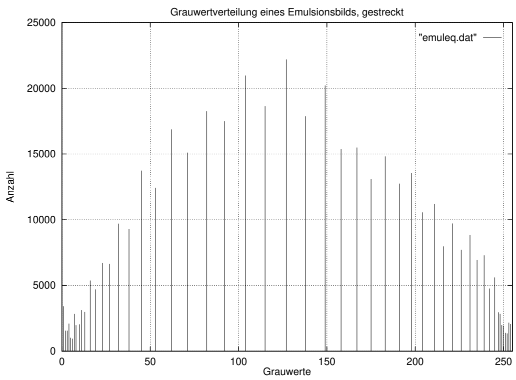
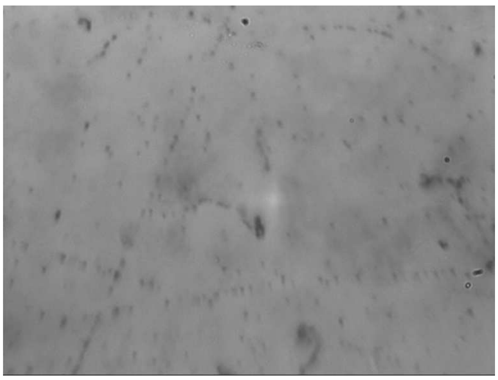


Abbildung 5.4: Links ist das Originaldiagramm zu sehen, rechts die Grauwertspreizung.



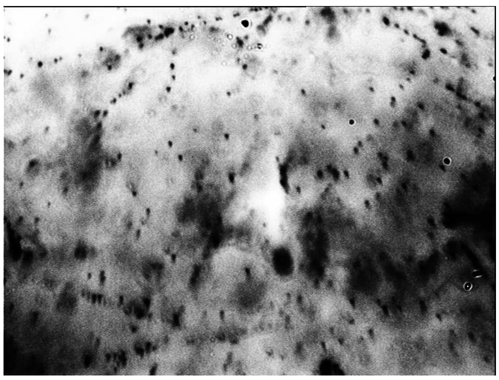


Abbildung 5.5: Links ist die originale Emulsionsaufnahme zu sehen, rechts eine ähnliche Aufnahme, aufbereitet durch die Grauwertspreizung.

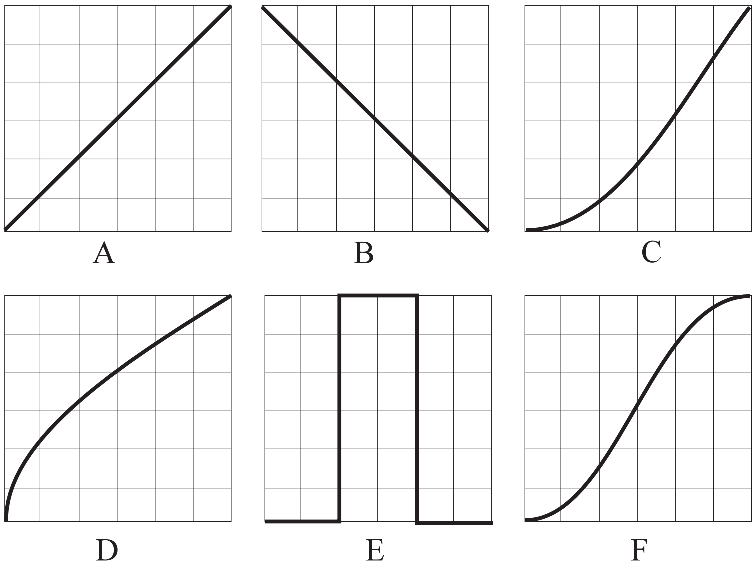


Abbildung 5.6: Verschiedene Beispiele zu Kennlinien: A) lineare Kennlinie, B) Kennlinie zur Invertierung, C) quadratische Kennlinie, D) Quadratwurzel E) Binarisierung, F) Gauß-Funktion [31]

- Negative lineare Kennlinie: $y = -x$. Durch diese Kennlinie erhält man das Negativbild.
- Quadratische Kennlinie: $y = \frac{x^2}{255}$. Das Bild erscheint im Ganzen abgedunkelt, da die niedrigen Grauwerte zusammengeschoben werden.
- Wurzelkennlinie: $y = \sqrt{256x}$. Dunkle Bereiche des Bildes werden aufgeweitet, das Bild wirkt insgesamt heller.
- Binarisierung: $y = \begin{cases} 0 & x < x_u \\ 1 & x_u \leq x \leq x_o \\ 0 & x > x_o \end{cases}$
  Das Ergebnis ist ein Schwarz-Weißbild, in dem nur noch grobe Konturen erkennbar sind.
- Gauß-Funktion: $y = 255 - \frac{5795}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}$ für $x \leq x \leq 255$ und $\sigma = 82, m = 0$ [31]. Das Ergebnis einer solchen Operation ist ein sehr kontrastreiches Bild, da dunkle und helle Bereiche noch stärker auseinandergezogen werden, allerdings nicht so stark wie bei der linearen Skalierung.

Aus diesen Skalierungsmethoden muß diejenige herausgesucht werden, die das Bild am optimalsten für die Bildverarbeitung aufbereitet. Im allgemeinen sollten die Bilder kontrastreich und die interessanten Objekte deutlich mit einer scharfen Randbegrenzung herausgestellt sein. Das ist ein guter Ausgangspunkt für die weitere Bildverarbeitung.

5.4 Bildverarbeitung

Durch die Bildverarbeitung werden Informationen gezielt aus einem Bild extrahiert und analysiert. Während bei der Bildvorverarbeitung das Bild in seinem Informationsgehalt nicht oder nur sehr wenig verändert wurde, werden hier uninteressante Informationen verworfen und können auch im Nachhinein nicht wieder hergestellt werden. Man beschränkt sich nicht mehr auf die Modifikation des einzelnen Pixels, sondern betrachtet seine Umgebung und läßt sie in weitere Berechnungen einfließen.
Diese Verfahren werden als Nachbarschaftsoperationen bezeichnet (vergleiche Abbildung 5.2). Ein neuer Bildpunkt im Ausgangsbild $A(x,y)$ wird aus der lokalen Nachbarschaft des entsprechenden Eingangsbildpunktes $B(x,y)$ berechnet. Dies kann eine 3×3, eine 5×5 oder entsprechend andere Umgebung sein. Wichtig sind diese lokalen Grauwertoperationen zum Beispiel für die Extraktion von markanten Punkten und Linien. Man erkennt sie nur durch Differenzen zwischen verschiedenen Pixeln.

Diskrete Ableitungen erster Ordnung

Eine Kante ist eine Grauwertänderung benachbarter Bildpixel. Um eine Kante zu detektieren, benötigt man diskrete Ableitungen erster und zweiter Ordnung. Dabei wird die Ableitung eines zweidimensionalen Feldes durch Differenzen zwischen benachbarten Bildpunkten in x- und y-Richtung beschrieben.

$$\text{x-Richtung:} \quad \frac{\partial S(x,y)}{\partial x} \approx \Delta_x S(x,y) = \frac{S(x,y) - S(x-\Delta x, y)}{\Delta x}$$

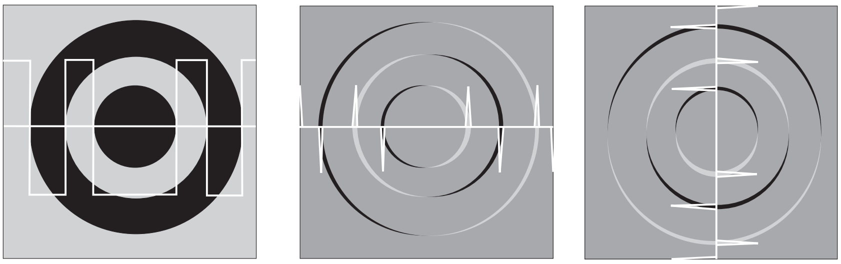
und entsprechendes gilt für die y-Richtung.
Im diskreten Fall vereinfacht sich dies zu

$$\Delta_x S(x,y) = S(x,y) - S(x-1,y).$$

Dies kann auch als Faltungsmatrix C_x geschrieben werden:

$$C_x = |-1\ 1| \quad \text{(Gradientenfilter)} \tag{5.1}$$

Die Filter werden in der Bildverarbeitung als Matrizen bezeichnet, sie sind es jedoch nicht im streng mathematischen Sinn. Die Werte in der Matrix werden mit den Grauwerten des Eingangsbilds multipliziert, indem die Matrix zeilenbeziehungsweise spaltenweise über das Bild "geschoben" wird (ein Beispiel folgt später in Abbildung 5.8). Da negative Werte im Ausgangsbild nicht dargestellt werden können, nimmt man vom Ergebnis der "Matrizenmultiplikation" jeweils den Betrag (dargestellt durch die Betragsstriche rechts und links von der Matrix).



A B C

Abbildung 5.7: Pseudoplastisches Bild mit Intensitätsverlauf entlang einer Zeile: A: Ausgangsbild, B: erste Ableitung in horizontaler Richtung, C: erste Ableitung in vertikaler Richtung.

Das Ergebnis einer solchen Operation ist ein pseudoplastisches Bild. Strukturreiche Bereiche werden hervorgehoben und weniger strukturreiche unterdrückt (siehe Abbildung 5.7 [31]).

Die Herstellung eines Gradientenfelds erfordert für jeden Bildpunkt die Differenzierung in zwei orthogonale Richtungen. Man benötigt also für eine Matrix jeweils einen Vektorgradienten in x- und y-Richtung.
Der Gradientenfilter (5.1) hat den Nachteil, keinen symmetrischen Bezugspunkt zu haben, der aber in den folgenden Matrizen berücksichtigt ist:

$$C_x = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad C_y = \begin{vmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Ein Anwendungsbeispiel dazu ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Durch die Matrizenmultiplikation ist die Grauwertkante deutlich hervorgehoben, strukturarme Bereiche werden unterdrückt.

Dieses Verfahren zur Bildanalyse soll am CERN eingesetzt werden. Dabei wird das Bild jedoch nur zeilenweise differenziert und zusammenhängende Teile nach bestimmten Kriterien geordnet [32].

Diskrete Ableitung 2. Ordnung

Um strukturreiche Bereiche noch stärker hervorzuheben, setzt man diskrete Ableitungen zweiter Ordnung ein. Dabei gilt für die x-Richtung:

$$\Delta_x^2 S(x, y) = S(x + 1, y) + S(x - 1, y) - 2S(x, y).$$

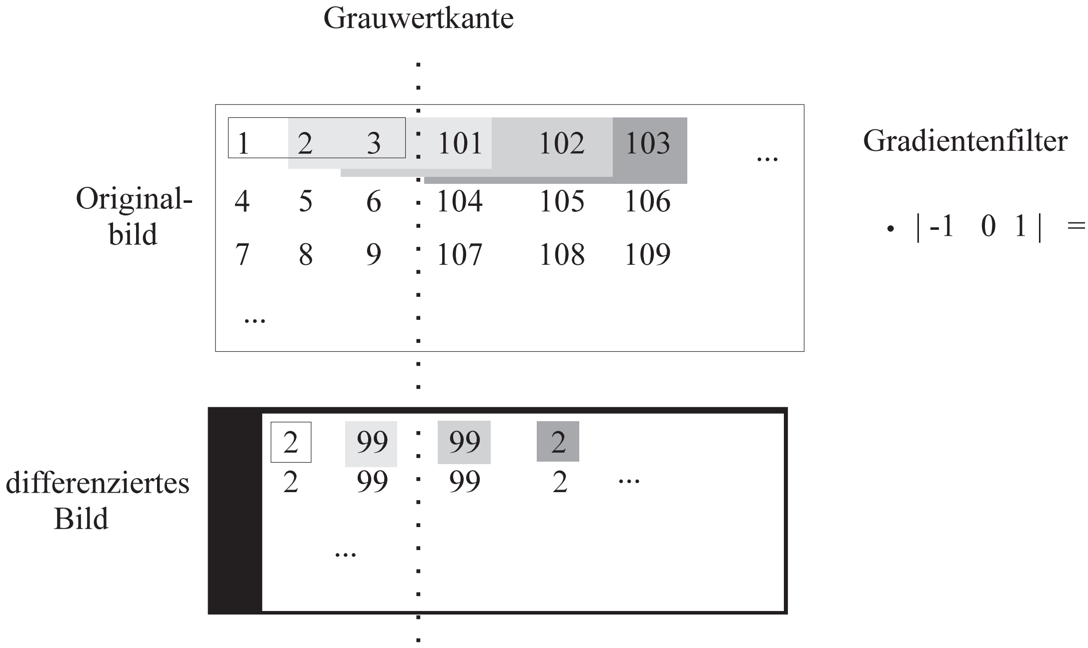


Abbildung 5.8: Die Grauwertmatrix eines Bildes wird mit einem Gradientenfilter multipliziert. Das Ergebnis ist ein neues Bild, in dem jeder Punkt aus seinem jeweils linken und rechten Nachbarn errechnet wurde. Die Randpunkte werden im Ergebnisbild durch einen schwarzen Rahmen ersetzt. Soll das Ergebnis einer Filteroperation wieder in einem Bild mit der Grauwertmenge $G = \{0, 1, ..., 255\}$ dargestellt werden, muß das Ergebnisbild gegebenenfalls geeignet skaliert werden.

Objekt	Gradientenfilter nach 5.1	Laplace nach 5.2
Einzelpunkt	Punkt verschmiert	Punkt verstärkt
Endpunkt einer Linie	Linie etwas verbreitert, Grauwert konstant	Linie stark verbreitert und verstärkt, deutlich tieferer Grauwert, Linienende besonders verstärkt.
Linie	Linie verbreitert	Linie verstärkt
Kante	Linie	verbreiterte Linie
Fazit	gutes Detektieren von Kanten	besondere Hervorhebung von Linien, Linienenden und Punkten

Tabelle 5.1: Wirkung der ersten und zweiten Ableitung auf verschiedene geometrische Objekte.

Damit lassen sich die Faltungsmatrizen C_{L_h} und C_{L_v} konstruieren:

$$C_{L_h} = \begin{vmatrix} 1 & -2 & 1 \end{vmatrix} \quad C_{L_v} = \begin{vmatrix} 1 \\ -2 \\ 1 \end{vmatrix}$$

Die Summe der beiden partiellen zweiten Ableitungen nach x und y wird als Laplace-Operator bezeichnet. Die digitale Realisierung sieht wie folgt aus:

$$\nabla^2 S(x,y) = S(x+1,y) + S(x-1,y) + S(x,y+1) + S(x,y-1) - 4S(x,y).$$

Die Filtermatrix kann als 4er- oder 8er-Nachbarschaft verwendet werden:

$$C_{L_1} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad C_{L_2} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \tag{5.2}$$

Die Auswirkungen der Filter auf geometrische Objekte im Bild sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Auf diese Art kann man je nach Verwendungszweck mit dem entsprechenden Filter die gewünschte Information aus einem Bild herausfiltern.

Die entsprechenden Funktionen und Filtermatrizen findet man in der einschlägigen Fachliteratur [29, 30, 31].

Fouriertransformation

Ein weiteres wichtiges Hilfsmittel in der Bildverarbeitung ist die Fouriertransformation. Diese Theorie verknüpft Orts- und Frequenzbereich und läßt so die zur Bildung der Signale notwendigen Frequenzanteile erkennen. Sie bildet die Grundlage bei systemtheoretischen Betrachtungen und gibt Einblick in die inneren Zusammenhänge von Signalen.

Die Fouriertransformation wird zum Beispiel zur digitalen Filterung eingesetzt. Grauwertstörungen durch systematische Fehler bei Aufnahme oder Digitalisierung werden im Frequenzbereich eliminiert.

Dazu werden frequenzselektive Filter wie Hochpaß, Tiefpaß, Bandpaß und Bandsperre benutzt, die einen definierten Durchlaß-, Sperr- oder Übergangsbereich haben. Tiefpässe zum Beispiel schwächen hohe Frequenzanteile ab, das Bild wird unschärfer. Bei einem Hochpaß werden niedrige Ortsfrequenzen unterdrückt. Dabei werden Grauwertkanten deutlich sichtbar.

Auch bei der Bildkodierung kann es günstiger sein, statt der Grauwerte im Ortsbereich die Fourierkoeffizienten im Ortsfrequenzbereich mit einer geringeren Bandbreite zu übertragen.

5.5 Das Matrox-Board

Ein komplettes Bildverarbeitungssystem bildet die Matrox Genesis Karte. Sie besteht aus einem Frame Grabber zur Bildaufnahme, einem DSP-Prozessor zur schnellen Datenverarbeitung und einer Graphikkarte. Das System ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

Die Karte gliedert sich in drei Teile:

- Das "grab"-Modul. Die Daten einer CCD-Kamera werden hier in Empfang genommen. Das Modul kann sowohl analoge wie auch digitale Daten verarbeiten. Analoge Daten werden durch A/D Wandler in digitale umgewandelt. Das Board kann von hier aus auch Steuerimpulse senden, wenn es als Master in Betrieb genommen wurde. Dann gibt das Board horizontale und vertikale Synchronisationsimpulse vor, ebenso wie Trigger- oder Exposure-Signale. Auch die Pixel-Clock kann hier generiert werden. Umgekehrt kann das Board im Slave-Modus arbeiten und diese Signale von der Kamera empfangen.
  Das grab-Modul wird durch die Matrox Intellicam Software an die Kamera angepaßt. Bei erfolgreicher Adaption der Kamera an die Karte wird das Bild auf einem Monitor dargestellt, andernfalls erhält man eine Fehlerinformation. Die Software unterstützt Standard- und nichtstandardisierte Kameras. Weiterhin befinden sich hier die Look-Up-Tabelle zur schnellen Bildvorverarbeitung. Durch einen Connector werden die Daten in das Main-Board

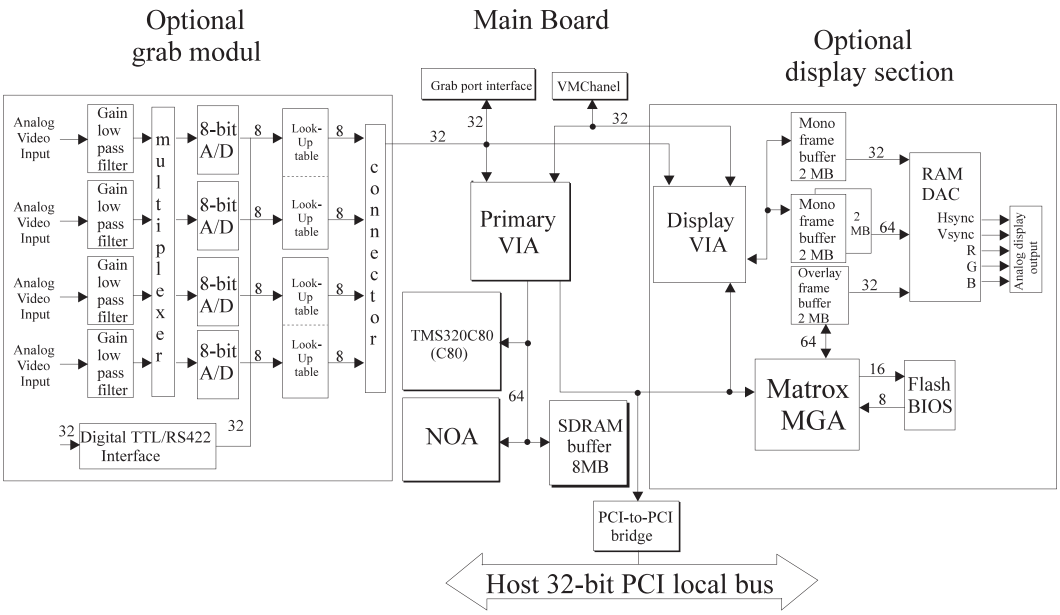


Abbildung 5.9: Matrox Genesis-Board

weitergeleitet.

- Das Main-Board ist das Rechner-Modul. Hier befindet sich das Herzstück der Karte, ein Texas Instruments TMS320C80-Chip. Die Hauptaufgabe des Multi-Prozessor DSP ist die Bildbearbeitung. 8 MB SDRAM sorgen für schnelle Speicherzugriffe. Ein VIA (Video Interface ASIC) kontrolliert die optimale Geschwindigkeit des Datentransfers zwischen den On-Board Komponenten und dem Host-Rechner.
  Das Board kann über einen PCI-Bus mit der Außenwelt kommunizieren. Die Datentransferrate beträgt bis zu 132 MByte/s.

- Für die graphische Darstellung der Bilder wird die "Display Section" benötigt. Es handelt sich um eine hochauflösende Graphikkarte mit 8 MB WRAM und eigenem Display VIA. Der Speicher ist in jeweils 2 MB für Rot, Grün und Blau bei Farbdarstellungen eingeteilt, bei monochromatischen Bildern stehen volle 6 MB zuzüglich 2 MB Overlay-Buffer zur Verfügung.

Die drei Teile der Karte sind untereinander völlig entkoppelt. Jedes Modul kann selbstständig arbeiten.

TMS320C80

Der Texas Instruments TMS320C80-Chip (siehe Abbildung 5.10) erbringt die eigentliche Rechenleistung. Der Prozessor kann durch vier parallel arbeitende

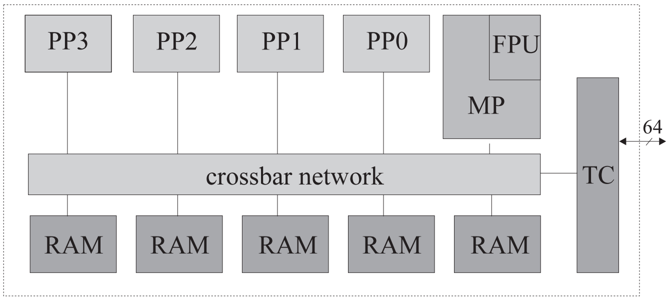


Abbildung 5.10: Schematischer Aufbau des TMS320C80 Prozessors

PP0-3:	Parallele Prozessoren (vier DSPs mit 32-bit integer units)
MP:	Master Prozessor (32-bit RISC-Prozessor mit Floating Point Unit (FPU))
TC:	Transfer Controler (überträgt Daten zwischen internem und externem Speicher)
RAM:	Speicher
crossbar network:	interner Datenbus zwischen Prozessoren und Speicher

DSPs und einem RISC-Prozessor bis zu zwei Billionen Operationen pro Sekunde durchführen. Der Chip hat intern 50 KByte RAM und ein hochleistungsfähiges Netzwerk, in dem bis zu 4,2 GByte pro Sekunde transferiert werden können. Für die Verbindung nach außen sorgt ein Transfer Controler, der bis zu 400 MByte pro Sekunde an das Genesis-Board abgibt. Der C80 arbeitet mit einer Taktfrequenz von 50 MHz.

Zu diesem Prozessor gibt es eine spezielle Library, die viele gängige Bildverarbeitungsfunktionen beinhaltet. Einige Leistungsbewertungszahlen sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt.

Software

Die Programmierung des Genesis-Boards wird durch eine mitgelieferte Bibliothek unterstützt. Die *Matrox Genesis Native Library* ist eine Board-spezifische C-Bibliothek, mit expliziter Kontrolle über die Bildaufnahme, -verarbeitung, Transfer zum Host-Rechner und Bilddarstellung. Die Bibliothek stellt umfangreiche Bildverarbeitungsfunktionen zur Verfügung. Für spezielle Operationen wie zum Beispiel Parallelisierung der Verarbeitung ist direkter Zugriff auf die einzelnen

	Operation	Processing Time
Punkt-operationen	Grauwerthistogramm	3.0 ms
	Addition zweier Bilder	2,7 ms
Nachbarschafts-operationen	Faltung mit einer (3×3) Matrix	9,5 ms
	Blobanalyse für 100 Blobs	8 ms

Tabelle 5.2: Herstellerangaben für Verarbeitungsgeschwindigkeiten eines 512 x 512 x 8-bit Bildes

Knotenpunkte wie Master Prozessor und Parallel Prozessor möglich. Die Software ist ausführlicher in Anhang A beschrieben.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Der Aufbau des Emulsions-Scanningmikroskops, so wie er in der Arbeit vorgestellt wurde, ist im wesentlichen abgeschlossen.

Die CNC-Steuerung kann über den PC angesprochen werden und die Lineartische sind im Handbetrieb fahrbar. Für den Dauerbetrieb ist aus Sicherheitsgründen noch die Nachrüstung der Tische mit Hardware-Endschaltern, Not-Aus Knöpfen und Gummipuffern notwendig. Nach diesen abschließenden Arbeiten kann mit der Vermessung der Positioniergenauigkeit der Tische begonnen werden.

Die optische Einrichtung wurde vorläufig mit einer analogen 2/3 Zoll CCD-Kamera in Betrieb genommen, bis die für die Megapixel-Kamera notwendige Wandlerkarte für die Datenübertragung über eine Strecke von vier bis fünf Metern zur Verfügung steht. Erste Bildverarbeitungsalgorithmen können entwickelt und getestet werden. Je nach Ergebnis kann man sich für ein Schwellwertverfahren (siehe Anhang A) oder den Gradientenfilter als Spurerkennungsmethode entscheiden. Weitere Möglichkeiten der Bildverarbeitung, die als Library von Matrox zur Verfügung gestellt werden, sollten erprobt werden.

Das Münster-System wird sich in Bezug auf die Software an die Entwicklungen am CERN anpassen. Ziel ist es, möglichst viele der bereits entwickelten Algorithmen zu übernehmen. Die CERN-Mikroskope werden in C++ programmiert, so daß die grundlegende Struktur übernommen werden kann und lediglich die Hardware-spezifischen Klassen Motor und DSP, die die Programmierung der Positionierung und der Bildverarbeitung enthalten, umgearbeitet werden müssen.

Die Arbeiten an der Mikroskop-Hardware werden noch etwa 6 Wochen in Anspruch nehmen, bis die Testphase für die Positionierungseinrichtung beginnen kann. Danach können weitere Programmierarbeiten in Angriff genommen werden.

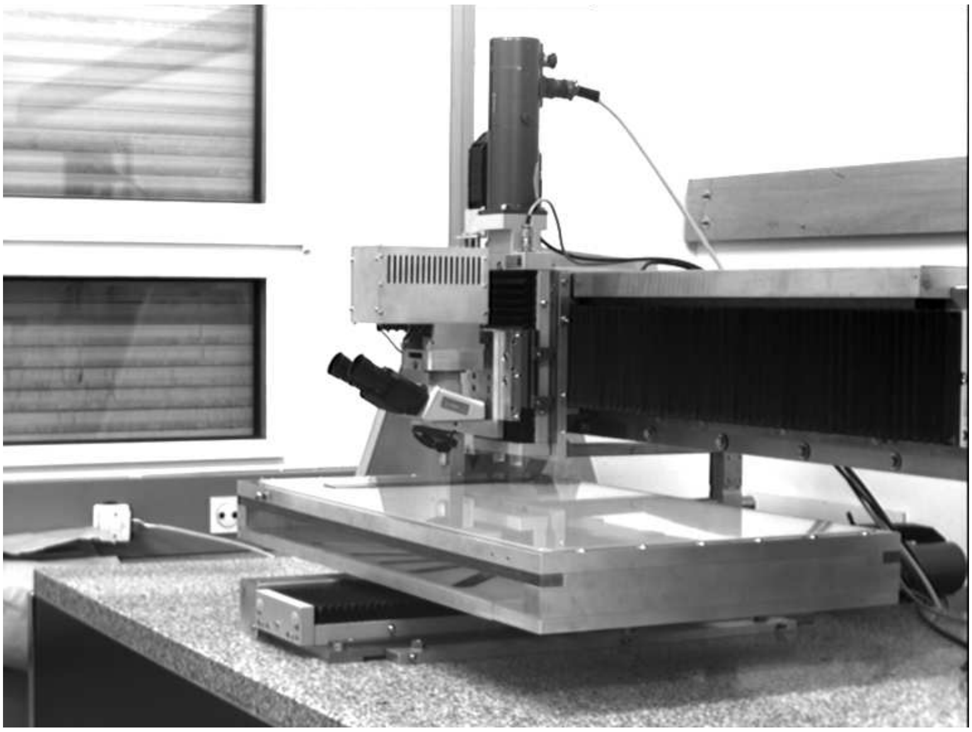


Abbildung 6.1: Das Münster-Mikroskop wartet auf seine Programmierung.

Anhang A

Die Matrox-Software

Die Firma Matrox bietet zu der Genesis-Karte umfangreiche Software an, deren Pakete auf mehreren Ebenen arbeiten. Auf höchster Ebene steht die *MIL-Library*. Sie enthält viele grundlegende Bildverarbeitungsfunktionen auf C-Basis und kann plattformunabhängig mit allen Matroxprodukten zusammenarbeiten.
Weiterhin gibt es eine board-spezifische Bibliothek, die *Genesis Native Library*. Ihre Bildverarbeitungsfunktionen greifen direkt auf die Hardware der Karte zu. Außerdem ist es möglich, den C80 Prozessor mit einem speziellen Compiler von Texas Instruments direkt zu programmieren.

Mit Hilfe der Genesis-Library wurde ein Programm zur Analyse der Emulsionsaufnahmen geschrieben, das Teilchenspuren selbstständig erkennt und deren Koordinaten festhält. Dieses Verfahren soll in Echtzeit durchgeführt werden.

A.1 Matrox Intellicam

Als erstes wird die Schnittstelle zwischen Kamera und Genesis-Karte mit der Matrox Intellicam Software erstellt. Das Interface ist ein DCF-Dokument (*digitizer configuration format*).
In den Dokument werden die Video-Timings und -Formate definiert. Auch besondere Kameratypen werden berücksichtigt. Die Software Intellicam.exe ist im Verzeichnis C:\MIL\intelcam auf dem angeschlossenen NT-Rechner zu finden.

Adaption einer Standard-Kamera

Als vorläufige CCD-Kamera wird eine Kamera verwendet, die unter den europäischen TV-Standard fällt. In der Kamera ist ein monochromatischer 2/3 Zoll CCD-Chip der Firma Sony eingebaut. Er liefert 25 Bilder/s bei einer Grauwerttiefe von 8 Bit. Die Ausgangssignale sind analog. Zur Adaption der Kamera an das Matrox-Board wird wie folgt vorgegangen:

- Systemauswahl: Ist das Board richtig erkannt, ist es als Target-System als "Genesis Device 0" mit einem "A" gekennzeichnet. Ist es nur als "Virtuel Device" angeführt, muß das Setup der Karte erneut durchgeführt werden.
- Festlegung des Formats des Video-Signals: CCIR (europäische Video-Norm) Dadurch sind alle Parameter korrekt festgelegt. Die Default-Einstellungen für dieses Signal erkennen das Kamera-Signal als analog, $768 \times 578 \times 8$ Bit, interlaced und Frame Scan. Die Pixel Clock ist auf 14,75 MHz eingestellt.

Diese Default-Einstellungen funktionieren, man kann sie aber noch individuell der Kamera anpassen, indem man zum Beispiel die Anzahl der auszulesenden Spalten und Zeilen vergrößert. Beim Verstellen der Parameter kann es dazu kommen, daß keine Bildaufnahme mehr möglich ist. Bei zu groben Einstellungen kann das ganze Genesis-System abstürzen, so daß es auch durch einen Neustart des Programms nicht wieder gestartet werden kann. In diesem Fall muß der Computer ganz abgeschaltet werden, um die autark arbeitende Karte wieder in einen definierten Zustand zu bringen.

Adaption einer Nicht-Standard Kamera

Die Erstellung eines DCF-Files für eine nicht-standardisierte Kamera ist wesentlich schwieriger. Ein Dokument enthält über 600 Einträge. Die Erstellung wird allerdings durch die graphische Benutzeroberfläche vereinfacht.

A.2 Entwickelte Software

Erste Versuchsalgorithmen zur Emulsionsanalyse sind bereits entwickelt worden. Es wurden als erstes zwei prinzipielle Probleme gelöst:
Erstens, die vollständige Analyse von zwei verschiedenen Bildern und der Vergleich der Ergebnisse, zweitens, das Einlesen und Verarbeiten von 25 Bildern/s in Echtzeit. Zusätzlich existiert ein Analyseprogramm, das ein Histogramm eines Grauwertbildes erstellt. Sämtlich Programme sind in dem Verzeichnis C:\Programme\DevStudio\MyProjects zu finden.

Bildanalyse

Um eine Spurrekonstruktion durchführen zu können, müssen aufeinanderfolgende Bilder miteinander verglichen werden. Die Spur des gesuchten geladenen Teilchens geht mit einem sehr kleinen Winkel nahezu senkrecht durch die Emulsion, das heißt, man sieht von Bild zu Bild einen dunklen Fleck (*Blob*), der seine Position nicht oder nur sehr langsam ändert.

Damit ist ein wesentliches Kriterium für die Analyse gefunden: Der Fleck muß in jedem Bild etwa an der gleichen Stelle auftauchen. Blobs von Spuren, die mit einem größeren Winkel durch die Emulsion gehen, ändern ihre Position bedeutend schneller, der Untergrund ist von Bild zu Bild verschieden. Dieses Auswahlkriterium kann umgesetzt werden, indem die Blobs erst aus dem einen Bild extrahiert und dann deren Positionen mit denen der Blobs aus dem nächsten Bild verglichen werden. Haben sich ihre Positionen von Bild zu Bild zu stark geändert, können sie als Spurkandidaten verworfen werden.

Für die Extraktion der Blobs wird ein Schwellwertverfahren angewendet. Dazu wird das Bild binarisiert, indem eine Grauwertschwelle gelegt wird. Alle Werte unter 100 werden auf 255 (weiß) gesetzt, alles darüber auf 0 (schwarz). Dieser Schwellwert wurde nach Sichtung eines Grauwerthistogramms festgelegt, in dem die dunkelsten Punkte etwa in den niedrigsten 10 % der Verteilung zu finden sind.

Die Binarisierung ist die Voraussetzung für die Anwendung eines Blobfinding-Algorithmus, der durch die Genesis-Library zur Verfügung gestellt wird. Dieser Algorithmus kann zusammenhängende weiße Gebiete erkennen und komplett vermessen. Für unsere Anwendung reicht es, die Zentrumskoordinaten der Punkte zu extrahieren. Sie werden als x- und y-Koordinate in der Einheit Pixel gespeichert. Die als Blobs erkannten dunklen Flecken werden zur Kontrolle durch eine Umrahmung gekennzeichnet.

Wenn dieser Algorithmus wiederholt wurde, stehen zwei Datensätze mit Zentrumskoordinaten zur Verfügung, die miteinander verglichen werden. Koordinaten, die innerhalb einer Umgebung von 10 Pixeln liegen, werden als "wiedergefunden" erkannt, gekennzeichnet und gespeichert. Diese Daten können nun wieder mit den Daten aus dem dritten Bild verglichen werden.

Damit sind die ersten Schritte für eine Spurrekonstruktion getan. Zwei aufeinanderfolgende, unterschiedliche Emulsionsaufnahmen können analysiert und mögliche Spurkandidaten extrahiert werden. Besteht eine Korrelation zwischen den Blobs, die in beiden Bildern auftauchen, wird sie festgestellt und steht für weitere Analysen zur Verfügung. Dieses Verfahren kann iterativ angewendet werden, so daß jeweils Übereinstimmungen zwischen zwei Bildern mit der darauf folgenden dritten Aufnahme verglichen werden. Daraus kann man ein Verfahren entwickeln, das eine Spur nicht nur über zwei Bilder, sondern durch die ganze Emulsion verfolgt.

Bildbearbeitung in Echtzeit

Um eine kontinuierliche und schnelle Verarbeitung der Emulsionsaufnahmen zu gewährleisten, ohne daß zwischendurch ein Bild mit unter Umständen wichtigen Informationen verloren geht, müssen die eintreffenden Daten auf verschiedene Speicher verteilt werden. Während ein Bild in einen Speicher eingelesen wird, kann ein zweites aus einem anderen ausgelesen und verarbeitet werden. Wichtig ist die Synchronisation zwischen den Speichern.

Ein erstes Versuchsprogramm nimmt 25 Bilder/s in zwei Speichern auf, binarisiert sie und stellt sie auf dem Monitor dar.

Histogramm

Ein Histogramm gibt einen Überblick über ein Bild und läßt eine aussagekräftige Beurteilung zu. Das dafür entworfene Programm analysiert ein Bild, erstellt das Grauwertprofil und stellt das Ergebnis graphisch dar. Die verwendete Histogrammfunktion ist in der Genesis-Library vorhanden.

Bei extremen Abweichungen von einem als ideal vorgegebenen Histogramm können automatisch Korrekturmaßnahmen in die Wege geleitet werden. Das könnten zum Beispiel eine Regulierung der Beleuchtung oder die Anwendung einer Grauwertspreizung sein.

Außerdem erhält man durch ein Histogramm die Werte der dunkelsten Pixel (Spurkandidaten) im Bild. Sie können als Schwellwert für die Binarisierung bei der Bildanalyse verwendet weden.

A.2.1 Weiterentwicklung

Bei der Weiterentwicklung der Algorithmen gibt es zwei prinzipielle Richtungen, die verfolgt werden können: die Verfeinerung des Schwellwertverfahrens oder die Anwendung der Differenzierungsmethode, wie sie am CERN eingesetzt werden soll.

Generell sollte man für eine optimale Vorverarbeitung sorgen, da sie in beiden Fällen nützlich ist. Die Grauwerte der Emulsionsbilder liegen etwa zwischen 90 und 170. Hier sollte auf jeden Fall eine Spreizung der Grauwerte über den LUT, wie es bereits im Kapitel 5 besprochen wurde, zur Kontrastverbesserung vorgenommen werden.

Für die Binarisierung muß ein objektives Kriterium geschaffen werden, nach der die Grauwertschwelle gesetzt wird. Im Augenblick muß die Schwelle subjektiv anhand des Histogramms gesetzt werden. Dieser Vorgang sollte automatisiert werden.

Der Vergleichsalgorithmus für zwei Datensätze von Schwerpunktskoordinaten erkennt zur Zeit nur Punkte wieder, die in einer kegelförmigen xy-Umgebung von $\pm$ 10 Pixeln liegen. Eine Richtungsselektion wäre der nächste Schritt in Richtung Winkelmessung.

Eine Alternative zum bisher verwendeten Blobfindingalgorithmus ist die Anwendung eines Gradientenfilters. Gebiete zwischen einer steil ansteigenden Flanke

(Übergang von weiß zu schwarz) und einer steil abfallenden Flanke (Übergang von schwarz zu weiß) können je nach Größe als Kandidat für eine Spur bewertet werden. Liegen zwischen den Flanken beispielsweise mehr als 50 Pixel, was einem Durchmesser von etwa 18 μm entsprechen würde, kann der Fleck als Untergrund verworfen werden. Je nach Größe der Spur im Bild kann eine entsprechende Schwelle festgelegt werden.

Anhang B

CNC-Steuerung

B.1 Benutzerhinweise

ACHTUNG: Dieses Gerät kann unkontrolliert reagieren. Es existieren keine Sicherheitsmaßnahmen, die diese Zustände abfangen könnten.
Bei falscher Handhabung kann das Gerät die angeschlossenen Lineartische, Encoder und Motoren zerstören. Deshalb ist es äußerst wichtig, die von der Firma Franke für das Gerät eingestellten Parameter nicht willkürlich zu verändern. Grobe Fehleinstellung provoziert unter Umständen ein Überfahren der Endschalter. Generell empfiehlt es sich, direkt nach Inbetriebnahme der CNC-Steuerung einen Referenzlauf über die drei Achsen durchzuführen.
Diese Beschreibung ist als Ergänzung zum Handbuch "Bahnsteuerung SM400" von SM Elektronik zu sehen.

B.2 Parametereinstellung

Mit dem Terminal-Emulationsprogramm Vt101p der Firma Schlenker Elektronik kann die CNC-Steuerung vom Host-Rechner aus bedient werden. Nach der Initialisierung der CNC-Steuerung erscheint in dem Terminalfenster ein Menü mit folgenden Punkten:

Referenzlauf

Diese Menü sollte erst nach Überprüfung der Parameter (korrekt für dieses Meßsystem?) ausgeführt werden.
Als erstes ist die Reglerfreigabe auf EIN zu stellen. Die Eingabe der Achsen produziert der jeweiligen Referenzlauf, die Eingabe F den automatischen Referenzlauf in der Reihenfolge, wie sie im Parameterblock 1 eingetragen ist.
Es wird immer nur der motorseitige Endschalter als Referenzpunkt angefahren. Anschließend wird der Schalter so weit freigefahren, daß der erste Referenzim-

puls des Längenmeßsystems erreicht wird. Hier wird der Nullpunkt des Systems festgelegt.

Handbetrieb

Beim Handbetrieb der Achsen kann man die Geschwindigkeit als F (Vorschub) in Impulsen/Umdrehung angeben. Die in den Parameterblöcken angegebene Obergrenze kann dabei nicht überschritten werden. Override ist ergänzend zur Geschwindigkeit. 100% entspricht dem eingegebenen Vorschub, darunter ist langsamer und drüber ist schneller als angegeben. Mit Angabe einer Achse und P<Zahl> kann eine bestimmte Position angefahren werden. Liegt sie außerhalb des gültigen Fahrbereichs, trifft der Schlitten auf den Endschalter und die Positionierung wird unterbrochen.
In den Registern können feste Werte gespeichert werden. Im CNC-Programm werden sie dann nur noch über R<Registernummer> aufgerufen. Das Fließkommaregister wird entsprechend für Fließkommazahlen benötigt.
Das Ändern der Ein- und Ausgänge bezieht sich auf die zusätzliche I/O-Schnittstelle.
Der Merker funktioniert nur mit SPS-Option, die bei uns nicht vorhanden ist.
Die Anzeige der End- bzw. Referenzschalter ist nur aktiv, wenn tatsächlich ein Schalter angefahren ist. Dann wird jeglicher Vorschub abgebrochen. Der Endschalter wird auch als aktiv (angefahren) registriert, wenn das Kabel zum Endschalter abgezogen ist.

Programmerstellung

Hier kann man ein CNC-Programm erstellen und als Datei auf der RAM-Karte abspeichern. Das Programm kann editiert, kopiert und der Speicherverbrauch angezeigt werden. Empfehlenswert ist bei jeglicher Programmerstellung als erstes die Zeile "M13 G74X G74Y G74Z M70". Damit werden die Regler freigeschaltet (M13), ein Referenzlauf für die entsprechende Achse durchgeführt (G74..) und der Referenzlaufmerker gelöscht (M70). In einem CNC-Programm werden die Kommandos in einer Zeile gleichzeitig und die in einer Spalte nacheinander durchgeführt.

Automatik Betrieb

In diesem Menü kann das auf der RAM-Karte gespeicherte Programm ausgeführt werden. Einzelsatzbetrieb arbeitet das angegebene Programm zeilenweise ab.

RS232 Schnittstelle

Hier sind die Parameter der RS232 Schnittstelle seitens der Steuerung angegeben. Es ist möglich, ein auf der RAM-Karte gespeichertes CNC-Programm von hier über die Schnittstelle zum Host-Rechner zu schicken oder zu empfangen.

SPS anwählen

Diese Option ist für uns nicht verfügbar.

Parametereingabe

Die hier aufgelisteten Parameterwerte bestimmen die Grenzen des Systems. Sie dürfen nicht willkürlich verändert werden.

- Parameterblock 1 und 2
  Die Referenzlauffolge (XYZ) gibt die Reihenfolge der Achsen für den automatischen Referenzlauf an. Die Antriebsart ist Servo für alle drei Motoren. Bei Autostart sollte ein N stehen, nicht eingeschaltet. Die Laufrichtung des Motors ist - (negativ). Diese Angabe sollte nicht verändert werden, das sonst der falsche Referenzschalter angefahren werden kann.

  Die weiteren Angaben haben nichts mit unserer Anwendung zu tun und sollten unverändert gelassen werden.

- Parameterblock X...A
  Für jede Achse existiert ein separater Parameterblock, in dem die individuellen Daten eingetragen sind. Sie dürfen nicht verwechselt werden.

A **Datenformat:** Das Datenformat gibt die Anzahl der Nachkommastellen an. Voreingestellt ist 2, die Einheit ist Millimeter. Die Veränderung dieses Parameters ist unkritisch. Beispiel: 2: 1.00 mm; 4: 0.0001 mm.

B/C **Getriebefaktor Zähler/Nenner:** Diese Angaben beziehen sich auf die Auflösung des verwendeten Meßsystems und darf nicht verändert werden. Glasmeßstab: 1/50 entspricht einer Umdrehung in 50 Teilschritten.

D **Schleppfehler:** Der Schleppfehler ist beliebig veränderbar. Einheit: Impulse/Umdrehung. Die Zahl bezieht sich auf die Impulse, die fehlen dürfen, bevor die Steuerung abschaltet. Da schon beim Anfahren Impulse verloren gehen, darf der Schleppfehler nicht zu klein gewählt werden (z.B. 10), allerdings auch nicht wesentlich größer als in den Vorgabeparametern.

E **Rampe:** Hier wird die Steilheit der Beschleunigungs- und Bremsrampe eingetragen. Ist sie zu steil eingetragen, gibt es schon beim Anfahren des Systems einen Schleppfehler.

F/G	**KV-Faktor/Regelfaktor A:** Diese Faktoren sollten nicht verändert werden. Sie sind eine Art Härtereglung. Je höher sie eingestellt sind, desto schärfer regelt das System die einzelnen Schritte nach. Bei sehr hohem KV-Faktor beim Anfahren einer Position kann es zu unkontrolliertem Ruckeln kommen, da die Steuerung die Position immer wieder nachregelt.
H/I	**+/- Verfahrbereich:** Die Position der Softwareendschalter sollte nicht verändert werden. Der Verfahrbereich darf nur kleiner gewählt werden, andernfalls kann es zu einem Überfahren kommen.
J	**Eilgang:** Höchstgeschwindigkeit für die Motoren. Einheit: Impulse/Umdrehung.
K	**Referenzlaufgeschwindigkeit:** Sie darf nicht zu hoch sein, da sonst die Gefahr des Überfahrens der Endschalter besteht!
L	**Stillstandsüberwachung:** Der umgekehrte Schleppfehler. Nach dieser Anzahl von Impulsen wird ein Fehler gemeldet. Er tritt auf, wenn eine Position angefahren wurde und der Schlitten durch andere Einflüsse von dieser Position verschoben wird. Kleine Veränderungen sind erlaubt.
M	**Genauigkeitshaltgrenze:** Innerhalb dieses Positionsfensters (Impulse/Umdrehung) gilt eine Position als "getroffen". Es empfiehlt sich aus Gründen der Genauigkeit, das Fenster nicht zu groß zu wählen. Bei einem zu kleinen Fenster ist es der Steuerung u.U. nicht möglich, den Punkt anzufahren.
N	**Freifahren:** Diese Anzahl von Impulsen/Umdrehung wird der Tisch automatisch wieder vom Referenzendschalter (E-) weggefahren. Es wird die erste absolute Eichmarke des Meßsystems angefahren und hier die Position auf Null gesetzt.
O	**Spielausgleich:** Spiel der Spindel beim Vor- und Rückwärtslauf sollte nicht vorhanden sein. Bei Verwendung von Encodern könnte es nötig sein, bei den Heidenhain-Meßstäben nicht.

Die Motoren geben, sobald eine Bewegung auftritt, Impulse an die Steuerung zurück. Bei Stillstand werden keine Impulse gesendet. Tritt ein Fehler auf, wird die Motorspannung auf eine Art "Leerlauf" zurückgenommen.

B.3 Übertragungsprotokoll

Für die Befehlsübertragung wird ein bestimmtes Protokoll von der Steuerung erwartet. Die CNC-Befehle müssen als "String" gesendet werden.
Die empfohlene Version für den laufenden Betrieb ist
STX <Befehl> ETX BCC.
BCC ist ein Blockcheck, der Übertragungsfehler bemerkt und einen Fehlercode zurückliefern kann. Für manuelle Tests einzelner Befehle reicht folgende Version

aus:
STX <Befehl> EOT (CR)
STX, ETX, EOT = ASCII-Zeichen, 1 Byte
Befehl = CNC-Befehle beliebiger Länge

B.4 Die Hardware

Bei den Lineartischen selber sind folgende Punkte wissenswert:

Endschalter

Endschalter können überfahren werden! Die Endschalter, wie sie von der Firma eingebaut wurden, sind reine Softwareendschalter. Sie arbeiten induktiv, das heißt, bei Vorbeiführen eines Metallstücks ändert sich das Magnetfeld und der Schalter wird aktiviert. Bei den Lineartischen übernehmen diese Funktion die jeweils äußeren, an den Schlitten angebrachten Metallstifte. Erreicht der Tisch einen Endschalter, wird nicht automatisch das ganze System abgeschaltet. Eine Weiterfahrt in die andere Richtung ist möglich.
Bei der Durchführung eines Referenzlaufs wird als erstes einer der Endschalter gesucht. Die Schalter und Motoren sind so verkabelt, daß dies *immer* der auf der Motorseite liegende Schalter sein muß. Er wird als Schalter E - bezeichnet, der andere, nicht auf der Motorseite liegende Schalter als E +.

Wartung

Die Tische müssen regelmäßig gewartet werden. Die Spindeln sind mit dem Schmieröl *Klüber Isoflex Topas NCA 52* gefettet. Sie dürfen nicht trockenlaufen. Die Wartungsintervalle hängen von der Beanspruchung des Systems ab. Empfohlen sind Wartungsintervalle von 700 Betriebsstunden.
An den Motoren sind die Kohlebürsten regelmäßig zu kontrollieren. Sie befinden sich hinter den aufschraubbaren Verschlüssen rechts und links am Motor. Im neuen Zustand sind die Kohlestäbe ca. 1 cm lang. Wenn sie bis auf die Hälfte abgenutzt sind, sollten sie ersetzt werden. Dies ist nach Auskunft der Firma Franke nach etwa 2 Jahren Betrieb der Fall.

Literaturverzeichnis

[1] G. Musiol, J. Ranft, R. Reif, D. Seeliger, *Kern- und Elementarteilchenphysik*, 2. Auflage, Verlag Harry Deutsch, 1995

[2] K. Grotz, H.V. Klapdor, *Die schwache Wechselwirkung in Kern-, Teilchen- und Astrophysik, Eine Einführung*, BG Teubner, Stuttgart 1987

[3] C. Berger, *Teilchenphysik, Eine Einführung*, Springer Lehrbuch, 1996

[4] Otto Nachtmann, *Elementarteilchenphysik, Phänome und Konzepte*, Vieweg 1996

[5] N. Schmitz, *Neutrinophysik*, BG Teubner, Stuttgart 1997

[6] M. de Jong et al. ,*A New Search For ν_μ - ν_τ Oszillation*, CERN-PPE/93-131, July 1993

[7] P. Annis et al., *THE CHORUS SCINTILLATING FIBER TRACKER AND OPTO-ELECTRONIC READOUT SYSTEM*, CERN-PPE/97/100, 28.07.97

[8] F. Bergsma et al., Nucl. Instrum. Methods **A 357**, 243 (1995)

[9] S. Buontempo et al., Nucl. Instrum. Methods **A 349**, 70 (1994)

[10] G. Acquistapace et al., *The West Area Neutrino Facility for CHORUS and NOMAD experiments (94-97 operation)*, CERN ECP / 95-14, 31. July 95

[11] Vittorio Palladino, *NEUTRINOS FROM THE CERN SPS*, University and INFN Napoli, Italy

[12] Bart Van De Vyver, P. Zuchelli, *Prompt ν_τ background in Wide Band ν_μ Beams*, CERN-PPE/96-113, August 1996

[13] R. Ferreira, H. Wong, *PHYSICS AND SIMULATION OF WHITE KINK BACKGROUND*, CHORUS Internal note

[14] Dirk Rondeshagen, *THE CHORUS NEUTRINO OSZILLATION EXPERIMENT*, presented at the XXV SLAC Summer Institute on Particle Physics: Physics of Leptons, August 4-15, 1997

[15] Dirk Rondeshagen, Promotion in Vorbereitung.

[16] Y. Kotaka et al., *Manuel Scanning Instructions*, December 14, 1996

[17] E. Eskut et al. *The CHORUS Experiment to search for* $\nu_\mu \to \nu_\tau$, CERN-PPE/97-33

[18] Oliver Melzer, Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität (1997)

[19] Dirk Bonekämper, Promotion in Vorbereitung.

[20] HEIDENHAIN, *NC-Längenmeßsysteme*, Katalog vom Oktober 1996

[21] Franke, *Wälzlager, Linearführungen, Bewegungs- und Positionierungstechnik*, Katalog

[22] Bergmann Schäfer, *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3, Optik* 6. Auflage, Walter De Gruyter, 1974

[23] Gerthsen Kneser Vogel, *Physik*, 16. Auflage, Springer-Verlag, 1989

[24] Bart Van de Vyver, private Unterredung, CERN

[25] A. Rost, *Grundlagen der Elektronik*, 3. Auflage, Akademie Verlag, 1992

[26] Thomson Composants Militaires et Spatiaux, *The CCD Image Sensor*, DB2 - CCD - 12 88

[27] Nucletron Electronic, *EEV CCD Seminar* 25.-26. November 1996 at ESO in Garching

[28] Matrox Imaging Tutorial, *Camera Interface Guide*, http://www.matrox.com/imgweb/support/camguidem.htm

[29] Peter Haberäcker, *Digitale Bildverarbeitung, Grundlagen und Anwendungen*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1991

[30] Peter Haberäcker, *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1995

[31] Wolfgang Abmayr, *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*, B.G. Teubner Stuttgart, 1994

[32] Beverley Friend, private Unterredung, CERN

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen herzlich danken, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt und zu ihrem Gelingen beigetragen haben:

Prof. Dr. Dieter Frekers, für die Bereitstellung eines interessanten und herausfordernden Themas im Rahmen der internationalen CHORUS-Kollaboration und für die Finanzierung mehrerer Besuche von Collaboration Meetings und CERN-Aufenthalten.

Dr. Heinrich Wörtche, für die Betreuung der Arbeit vor Ort, viele praktische Ratschläge und viele konstruktive Gespräche.

Helmut Baumeister für größtes Engagement von der Anfertigung der ersten CAD-Zeichnung bis zur Endmontage des Mikroskops. Durch ihn und seine Erfahrung wurde das Projekt entscheidend vorangetrieben.

Der gesamten Arbeitsgruppe Frekers, insbesondere Dirk Bonekämper und Dirk Rondeshagen für die unermüdliche Beantwortung von Fragen zum CHORUS-Experiment und die kontinuierliche Versorgung mit Veröffentlichungen zu diesem Thema, ebenso wie für die Hilfe bei vielen Computerproblemen.
Matthias Hartig, Sven Rakers, Thomas Wolff, Frank Ellinghaus, Markus Hagemann, Kirsten Holtz und Bernard Krüsemann für die nette und entspannte Arbeitsatmosphäre und viele anregende Diskussionen.

Den Mitgliedern der CHORUS-Kollaboration, besonders Oliver Melzer für die Besorgung der Immersionslinse, Aimo Bülte, Wilfried Flegel, Beverley Friend, Bart Van De Vyver, Christian Weinheimer und vielen anderen für hilfreiche Tips und Gespräche.

Herrn Heynitz für die Beratung in Elektronikfragen, seinen Mitarbeitern der Elektronikwerkstatt, ebenso wie Norbert Bücker und seinen Kollegen der feinmechanischen Werkstatt, die mir alle mit Rat und Tat zur Seite standen.

Meinen Eltern, Freunden und Kommilitonen für die vielfältigste Unterstützung während des Studiums.

Hiermit erkläre ich, daß ich diese Arbeit ohne fremde Hilfe verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Münster, im März 1998