

ASTRONOMIE

Nutzung astronomischer Plattenarchive

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften im Fachbereich Physik
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von

Renate Budell
aus Bottrop

— 1998 —

Dekan:	Professor Dr. N. Schmitz
Erster Gutachter:	Professor Dr. W. C. Seitter
Zweiter Gutachter:	Professor Dr. H. Dürbeck
Tag der mündlichen Prüfung:	29.06.98
Tag der Promotion:	29.06.98

Inhaltsverzeichnis

1	Die Bedeutung der Photographie in der Astronomie	1
1.1	Photographie im Zeitalter der elektronischen Empfänger	1
1.2	Zur Geschichte der Astrophotographie	3
1.3	Das PDS 2020 GM Mikrodensitometer	5
2	Mikrodensitometrie	9
2.1	Grundlagen des Meßverfahren	9
2.2	Motivation	9
2.3	Optische Grundlagen	11
2.4	Die Beleuchtungs- und Meßoptik der PDS 2020 GM	11
2.5	Der optische Aufbau anderer Mikrodensitometer	14
3	Logarithmische Verstärker	17
3.1	Analoge Logarithmierung	17
3.2	Konzepte anderer Arbeitsgruppen	23
3.3	Der Verstärker von C.C. Volkmer	23
3.4	Der MD 3.2 Verstärker/Konverter	24
3.4.1	Das Verstärker/Konverter-Modul	25
3.4.2	Die Anzeige-Einheit (display unit; DU)	30
3.4.3	Das Dateninterface (Data Interface; DI)	31
3.4.4	Das Schaltpult-Interface (panel interface; PI)	32
3.4.5	Das Netzteil (power supply unit; PSU)	33
3.4.6	Die Zusammenschaltung aller Komponenten	33
3.4.7	Justierung des Verstärker/Konverter-Moduls	34

4	Testmessungen mit dem Mikrodensitometer	35
4.1	Die Reaktionsgeschwindigkeit des Verstärker/Konverters	35
4.2	Das Rauschen	41
4.2.1	Rauschen der Photo-Multiplier-Röhre	41
4.2.2	Photonenrauschen	42
4.2.3	Verstärkerrauschen	43
4.3	Nichtlinearitäten in der Dichteskala	46
4.3.1	Digitalisierungsfehler in der Festspeichertabelle	47
4.3.2	Nichtlinearitäten in der Verstärkerschaltung	47
4.3.3	Nichtlinearität der Photo-Multiplier-Röhre	49
4.3.4	Nichtlinearitäten durch den optischen Aufbau	51
4.4	Einfluß der Raumbelichtung auf die Messung	53
5	Astrophotographie	55
5.1	Silberhalogenidkristalle	56
5.2	Herstellung einer Silberhalogenid-Emulsionen	57
5.3	Gebäuchliche Emulsionstypen	57
5.4	Die Schwärzungskurve	58
5.5	Die Hypersensibilisierung	60
5.6	Entwicklung	61
5.7	Fixierung	67
5.8	Wässerung	68
5.9	Untersuchung der Körnerstruktur mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM	69
5.9.1	Die Kodak 101-01-Emulsion	69
5.9.2	Die Kodak IIa-O-Emulsion	74
5.9.3	Die Kodak IIIa-J-Emulsion	79
5.10	Alterungserscheinungen bei der Archivierung	79
6	Untersuchungen zur Qualität von Folienkopien des ESO/SERC-ATLAS	89
6.1	Einleitung	89
6.2	Vergleich von Originalplatten und Folienkopie	90
7	Zusammenfassung	99
A	Bedienung des MD 3.X Verstärker/Konverter	103
A.1	Anzeigeeinheit	103
A.2	Einstellungen	103
A.3	Die Fehlerschutzschaltung	104
A.4	Aufzeichnung der Daten	104

B	Technische Beschreibung des MD3.X	107
B.1	Funktionsbeschreibung der analogen Einheiten:	
	AAU2.3 und ALU2.4	107
B.1.1	Die Funktion der AAU	107
B.1.2	Die Funktion der ALU	108
B.1.3	Konzept der Stromversorgung	109
B.1.4	Belegung der Steckverbinder	109
B.1.5	J5: Stromversorgung	111
B.2	Schaltung der Digitalen Logarithmischen Einheit (DLU)	121
B.2.1	Die Ablaufsteuerung	121
B.2.2	Die Adressdekodierung	121
B.2.3	Die Logarithmierung	123
B.2.4	Die Stromversorgung	123
B.2.5	Die EPROM-Tabelle	123
B.2.6	Die Schutzschaltung für die PMT	125
B.2.7	Pinbelegung der Verbindungsstecker	126
B.3	Demontage der ALU und der DLU zu Reparaturzwecken	136
B.4	Schaltung der Anzeige Einheit (Display Unit, DU)	138
B.4.1	Funktion der Anzeige der Daten	138
B.4.2	Anzeige von unerlaubten Betriebszuständen	139
B.4.3	Umschaltung verschiedener Betriebszustände	140
B.4.4	Ansteuerung der 7-Segmentanzeige	141
B.4.5	Pinbelegung der Steckverbindungen	144
B.5	Das Daten Interface DI 2.3	152
B.5.1	Funktion des Daten Interface	152
B.5.2	Mechanischer Aufbau	153
B.5.3	Der PDS-Anschluß; J 12	153
B.5.4	Der Rechneranschluß; J 13	154
B.5.5	Stromversorgung; J 14 und J 15	154
B.5.6	Vorherige Daten-Interfaces	155
B.6	Das Schaltpult-Interface (Panel Interface; PI)	160
B.6.1	Beschreibung	160
B.6.2	Funktion	160
B.6.3	Aufbau	160
B.6.4	Überwachung der Hochspannung	160

B.6.5	Anschluß an die Schalter im Schaltpult	160
B.6.6	Pinbelegung der Steckverbindungen	161
B.7	Schaltung und Funktion des Netzteils	166
B.7.1	Beschreibung der Schaltung von PSU 19	166
B.7.2	Beschreibung der Schaltung von PSU 55	166
B.7.3	Verdrahtung der Niedervoltspannungen	167
B.7.4	Verdrahtung der Netzleitungen	167
B.8	Justierung des Verstärker/Konverters	176
Literaturverzeichnis		179
Danksagungen		184
Lebenslauf		185

Kapitel 1

Die Bedeutung der Photographie in der Astronomie

1.1 Photographie im Zeitalter der elektronischen Empfänger

Die Photoplatte hat für mehr als einhundert Jahre die Entwicklung der Astronomie wesentlich bestimmt. Bis etwa 1985 war die Photographie die vorherrschende Methode in der Astronomie, zweidimensionale Bilder aufzuzeichnen. Bis dahin wurden photoelektrische Empfänger vorwiegend zur Messung von Lichtmengen eingesetzt. In den dreißiger Jahren gab es Photozellen mit Verstärkern in Vakuumröhrentechnik, mit denen brauchbare Helligkeiten von astronomischen Objekten gemessen werden konnten (Whitford 1932). Der ersten beiden Photomultiplier kam 1935 von RCA und Philips auf den Markt. Ein verbessertes Nachfolgemodell wurde von RCA ab 1943 hergestellt und erfolgreich für die Photometrie einzelner astronomischen Objekte angewendet. Mit der Einführung der Bildwandlerröhren wurden erste Experimente mit zweidimensionalen photoelektrischen Bildwandlern an astronomischen Teleskopen gemacht. Der Gewinn an Reichweite (bei oft gleichzeitigem Verlust an Auflösung) stand zunächst nicht im Verhältnis zum betriebenen Aufwand.

Erst die Entwicklung der CCDs brachte eine deutliche Verbesserung der zweidimensionalen photoelektrischen Bildempfänger. Mit der Möglichkeit immer größere Bildfelder mit CCDs abzubilden, haben diese Empfänger in den 90er Jahren die astronomische Photographie weit überholt. Die Quantenausbeute bei CCDs kann bis zu 80% betragen, während bei der Photoplatte sie nur zwischen 0.1% und 3% liegt. Damit verkürzt sich die Belichtungszeit der Objekte erheblich. Ein weiterer Vorteil der CCDs ist die Linearität dieser Empfänger: Das Ausgangssignal ist proportional zur Anzahl der eingefallenen Photonen. Die komplizierten Kalibrationen, die bei der Photoplatte nötig sind, können hier entfallen. Zunächst war die geringe Größe ein Nachteil für die CCDs. Die derzeit benutzten CCDs haben aber bereits eine maximale Größe von etwa $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ und bestehen aus 2048×2048 Pixeln. Damit kann beim Anglo–Australien Schmidt–Teleskop ein Himmelfeld von etwa $1^\circ \times 1^\circ$ aufgenommen werden. Das ist $\frac{1}{25}$ des Feldes einer üblichen Photoplatte von $350\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ von Schmidtspiegeln. Größere CCDs sind derzeit in Entwicklung. Das Feld eines Schmidt–Teleskops in den galaktischen Polregionen enthalten im Durchschnitt einhunderttausend Objekte. In der galaktischen Scheibe, kann die Dichte der Objekte so groß sein, daß eine Trennung der Einzelobjekte nicht mehr möglich ist.

Bedeutend sind die vielen alten Platten, die sich in den Archiven der astronomischen Institute befinden. Es gibt etwa 1 500 000 Platten, aufgenommen von 187 Teleskopen mit Weitwinkeloptik.

In der genannten Summe sind 213 Atlanten enthalten. Tsvetkov et al. (1994) sammeln die Daten der Photoplatten und stellt sie in computerlesbarer Form zur Verfügung. Diese Photoplatten werden gebraucht, um den Lichtwechsel von Sternen über Jahrzehnte zu verfolgen. Nach einem Supernovaausbruch ist es wichtig, Informationen über den ursprünglichen Stern zu bekommen.

Die ältesten Photoplatten, auf die wir zurückgreifen können sind mehr als hundert Jahre alt. Der erste photographische Atlas ist die *Carte de Ciel*, die 1882 angefangen wurde (King 1955). Für die Vermessung der Eigenbewegung der Sterne sind diese Platten von unschätzbarem Wert. In der Astrometrie ist man wegen der kleinen scheinbaren Bewegung der Sterne auf große Epochendifferenzen zwischen zwei Beobachtungen angewiesen (z.B. Tucholke 1989, Hiesgen 1995). Selbst nach der Einführung von großflächigen CCDs werden die vorhandenen Photoplatten immer noch gebraucht, da mit ihnen eine Epochendifferenz von bis zu 100 Jahren zu erreichen ist.

Parallel zum Einsatz der Photoplatte hat die Astronomie Geräte zu ihrer Auswertung entwickelt. Ein Werkzeug, das bis in unsere Zeit benutzt wurde, ist der Abbe-Komparator. Damit können die Abstände von Spektrallinien auf einer Photoplatte bis zu einer Genauigkeit von etwa $1\ \mu\text{m}$ gemessen werden. Heute werden die Spektren- und Direktphotoplatten mit Hilfe von Mikrodensitometern vermessen. Zwei PDS 2020 GM Mikrodensitometer arbeiten im Astronomischen Institut Münster (AIM). Ihre hohe Genauigkeit wurde durch die hier vorliegende Arbeit noch einmal verbessert, so daß zahlreiche statistische Arbeiten entstehen konnten, die bisher nicht möglich waren.

Ein großes Problem der CCDs ist die Archivierung der Daten. Die meisten Daten werden auf Bändern gespeichert, die keine Langzeitarchivierung ermöglichen. Die Lebensdauer von optischen Speichermedien ist bisher noch nicht bekannt. Bereits jetzt sind wahrscheinlich viele Beobachtungen mit CCDs verloren gegangen, weil sie nicht ordnungsgemäß archiviert wurden. Oft reicht nur der Weggang eines Mitarbeiters aus, um Daten zu vergessen und wegzuworfen. (West 1992)

Der Stern FG Sagittae zeigt, wie vorteilhaft es ist, Photoplatten aus beinahe 100 Jahren benutzen zu können. FG Sge ist ein Stern, der ein zweitesmal im Herzprung-Russel-Diagramm (HRD) in Richtung Riesenast läuft. Der Stern wurde als Veränderlicher 1944 entdeckt und seit dem systematisch beobachtet. Van Genderen & Gautchy (1995) werteten die alten Photoplatten aus. Von 1900 bis 1944 wurden Photoplatten untersucht, auf denen FG Sge zufällig beobachtet war. In der zweite Hälfte unseres Jahrhunderts gibt es dazu Photoplatten von FG Sge, die systematisch in Tautenburg aufgenommen wurden, sowie an anderer Stelle mit CCDs. Damit konnte insgesamt ein großer Abschnitt der raschen Entwicklung eines wiederkehrenden Sterns verfolgt werden.

Ein weiteres Beispiel für die Wichtigkeit älterer Informationen ist die Supernova 1987 A in der großen Magellanschen Wolke (LMC). Nach ihrem Ausbruch konnte mit Hilfe früherer Beobachtungen der ursprüngliche Stern identifiziert und klassifiziert werden (White & Malin 1987). Daraus ergaben sich neue Erkenntnisse für Entwicklungsmodelle von frühen massereichen Sternen (Maeder 1987).

Die oben genannten Gründe unterstreichen die Bedeutung des photographischen Prozesses und der Meßmaschinen für die Langzeitbeobachtungen von Himmelskörpern. Die beiden Mikrodensitometer des AIM gehören zu den vergleichsweise wenigen betriebenen Hochleistungsmaschinen dieser Größe. Die ausgezeichnete Genauigkeit sollte so lange wie möglich genutzt werden. Die vorliegende Arbeit umfaßt das Wissen über die Maschinen und die Photographie, das nötig ist, um auch weiteren Generationen die Photoplatte als Speichermedium für astronomische Daten zugänglich und verständlich zu machen.

1.2 Zur Geschichte der Astrophotographie

Die Entwicklung der Photographie begann in dem 2. Viertel des 19. Jahrhunderts. Zwei voneinander unabhängige Verfahren wurden benutzt. Louis Daguerre stellte im Jahr 1839 sein Verfahren der Öffentlichkeit vor. Die Daguerrotypen sind Positive auf Metallplatten, die nicht kopierbar sind. Dieses Verfahren konnte nur wenig weiterentwickelt werden. Der Grundstein zum heutigen photographischen Prozeß wurde von Fox Talbot gelegt. Er begann 1833 mit Experimenten. Bei seinem Verfahren benutzte er eine Mischung aus Silbernitrat und Kochsalz, das er auf Papier auftrug. Zuerst nutzte er die Schwärzung des Papiers durch die direkte Einwirkung des Lichtes auf sein Paper. Die fertigen Bilder waren aber nicht lange haltbar. Sie blichen nach wenigen Wochen wieder aus. Als nächstes fand er eine Möglichkeit, die Bilder haltbarer zu machen. Es war eine erste Form der Fixierung. Einen großen Fortschritt gab es, als er eine Möglichkeit fand, das Papier zu entwickeln. Damit erreichte er eine erhebliche Verkürzung der Belichtungszeit, denn ein nur schwach sichtbares belichtetes Bild wurde jetzt chemisch verstärkt und gut sichtbar gemacht. Seine Aufnahmen waren Negative, die nachher beliebig oft kopiert werden konnten.

Darauf aufbauend erfand Frederick Scott Archer 1851 das Kollodiumverfahren. Mit ihm wird die lichtempfindliche Schicht mit Hilfe von Kollodium auf eine Glasplatte aufgetragen. Die Platte mußte direkt vor der Aufnahme beschichtet, im nassen Zustand belichtet und anschließend sofort entwickelt werden. Die erreichte Empfindlichkeit war verglichen zu den ersten Verfahren sehr groß. Es war jedoch noch relativ umständlich zu handhaben.

1880 führte Eastman die Trockenplatte ein. Das Kollodium wurde gegen Gelatine getauscht. Dadurch wurde die Platte empfindlicher und das Verfahren einfacher. Die Photoplatte konnte jetzt lang vor der Aufnahme industriell gefertigt werden. Damit begann die Bedeutung der Photographie für die Astronomie und die Anwendung in vielen anderen Bereichen.

In der Astronomie wurde früh versucht mit Teleskopen, astronomische Objekte aufzunehmen. Wegen der Unempfindlichkeit der ersten Verfahren konnten nur Aufnahmen von den beiden hellsten Objekten, Sonne und Mond, gemacht werden. Belichtungszeiten, die länger als wenige Minuten dauerten, waren wegen der ungenauen Nachführung der Teleskope nicht möglich.

Erste erfolgreiche Aufnahmen von Sternen wurden 1857 von Bond, Whipple und Black gemacht (Bond 1858). Die Nachführung des Teleskops war wesentlich verbessert worden und die Kollodiumplatte stand zur Verfügung. Für die Stellarastronomie wurden die Vorteile der Photographie schnell erkannt und genutzt. Wegen der Atmosphärenschwankung wurden die Aufnahmen vom Mond und den großen Planeten immer noch nicht von ausreichenden Qualität, so daß weiterhin auch handgezeichnete Bilder entstanden.

Nebel und Galaxien konnten zunächst nicht aufgenommen werden, da die Platten zu unempfindlich waren. Die erste Aufnahme des Orionnebels gelang H. Draper im Jahr 1880. Sie zeigte nur die hellsten Regionen. Nach 1882 wurden viele Nebel photographiert, die zu schwach waren, um mit dem Auge entdeckt und beobachtet zu werden. (Scheiner 1897)

1812 entdeckte J. Fraunhofer dunkle Linien im Sonnenspektrum (Fraunhofer 1817). 1823 machte er erste visuelle Beobachtungen von Spektren von hellen Sternen. Die erste Aufnahme des Sonnenspektrums wurde von A. E. Becquerel im Jahr 1842 gemacht (Becquerel 1842). Spektren von Sternen konnten zunächst noch nicht aufgenommen werden, da diese zu lichtschwach sind. W. Huggins und A. Miller machten 1863 erste Versuche mit der Photographie des Sirius-Spektrums (Huggins & Miller 1864). Die Aufnahme zeigt jedoch noch keine Linien. 1872 gelang es H. Draper das erste Sternspektrum mit Linien aufzunehmen (Draper 1877). Spektren von Sternen, konnte

jetzt aufgezeichnet und später mit verfeinerten Methoden vermessen werden. 1889 ermittelt H. C. Vogel die erste genügend genaue Radialgeschwindigkeit eines Sterns (Vogel 1889).

Die Photographie wurde in der Folge das Standardverfahren in der Astronomie. Teleskope wurden speziell für die photographische Aufnahmen konstruiert.

1.3 Das PDS 2020 GM Mikrodensitometer

Am AIM befinden sich zur Digitalisierung von Photoplatten zwei PDS 2020 GM Mikrodensitometer der Firma Perkin Elmer USA. PDS I wurde 1982 geliefert. PDS II wurde im Sommer 1990 installiert. Beide Mikrodensitometer sind nahezu baugleich, da das ältere 1988 durch Perkin Elmer auf den neuesten Stand der Technik gebracht wurde. Beide Geräte wurden von Mitarbeitern des AIM verbessert. Der neue Verstärker/Konverter verbessert die photometrische Genauigkeit. Er ist Gegenstand dieser Arbeit und wird in Kapitel 3.4 beschrieben. Winkelkötter (1992) hat in Zusammenarbeit mit Teuber den Umbau auf berührungslose Haidenhain-Maßstäbe durchgeführt. (Die ursprünglichen Maßstäbe mit Rollführungen waren für unsere Beanspruchung nicht geeignet.) Im Jahr 1996 wurden die Maschinen an einen neuen modernen Scan-Computer angeschlossen und die Software neu gestaltet. Bei den Computern handelt es sich um PCs, die mit dem Betriebssystem Linux ausgestattet sind. Die Daten werden jetzt direkt vom Verstärker/Konverter eingelesen. Dadurch konnten einige Begrenzungen durch das Mikroprozessorsystem der Geräte ausgeschaltet werden. An dem Umbau war beteiligt: Budell, Hiesgen, Sand, Schimpke, Ungruhe. Diese Erweiterung wird Kapitel 3.4.3 beschrieben.

Im folgenden finden sich einige Leistungsmerkmale der Mikrodensitometer. Auf den nächsten 3 Seiten werden die Geräte anhand von Photos vorgestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Bilder befindet sich jeweils in der Bildunterschrift.

Positionswiederholbarkeit bei einer Kante	$\pm 0.2 \mu\text{m}$
Positionswiederholbarkeit beim Stern	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Positionsdrift in 24 Stunden	$< 1.0 \mu\text{m}$
photometrische Drift eines Sterns über 24 Stunden	$0.01 D$



Abbildung 1.1: Gesamtansicht des Mikrodensitometer I.

Das tragende Gestell ist eine Stahlkonstruktion. Darauf liegt ein großer Granitblock, der als Fläche für 6 weitere Granitblöcke dient, die hochkant aufgestellt sind. Die Granitblöcke sind die Unterlage für die beweglichen Teile des Mikrodensitometers: (1) der X-Wagen, der die Glasplatte trägt, auf der die Photoplatte befestigt werden kann. (2) der C-Frame. Dabei handelt es sich um einen beweglichen C-förmigen Granitblock, der die Beleuchtungseinrichtung, die Optik und den Photoempfänger trägt. Seine Bewegung verläuft senkrecht zur Bewegung des X-Wagen. Alle Granitblöcke sind auf $1\ \mu\text{m}$ genau bearbeitet und mit der gleichen Genauigkeit gegeneinander justiert. In der Stahlkonstruktion befinden sich die Steuerelektronik und die verschiedenen Stromversorgungen. Das Mikrodensitometer wiegt etwa 3 t und hat eine Kantenlänge von ca. 2 m in zwei Dimensionen. Die Höhe beträgt von den vier einstellbaren Füßen etwa 1.70 m bis zur Oberkante des C-Frames. Für dieses Photo wurde das Schaltpult entfernt.

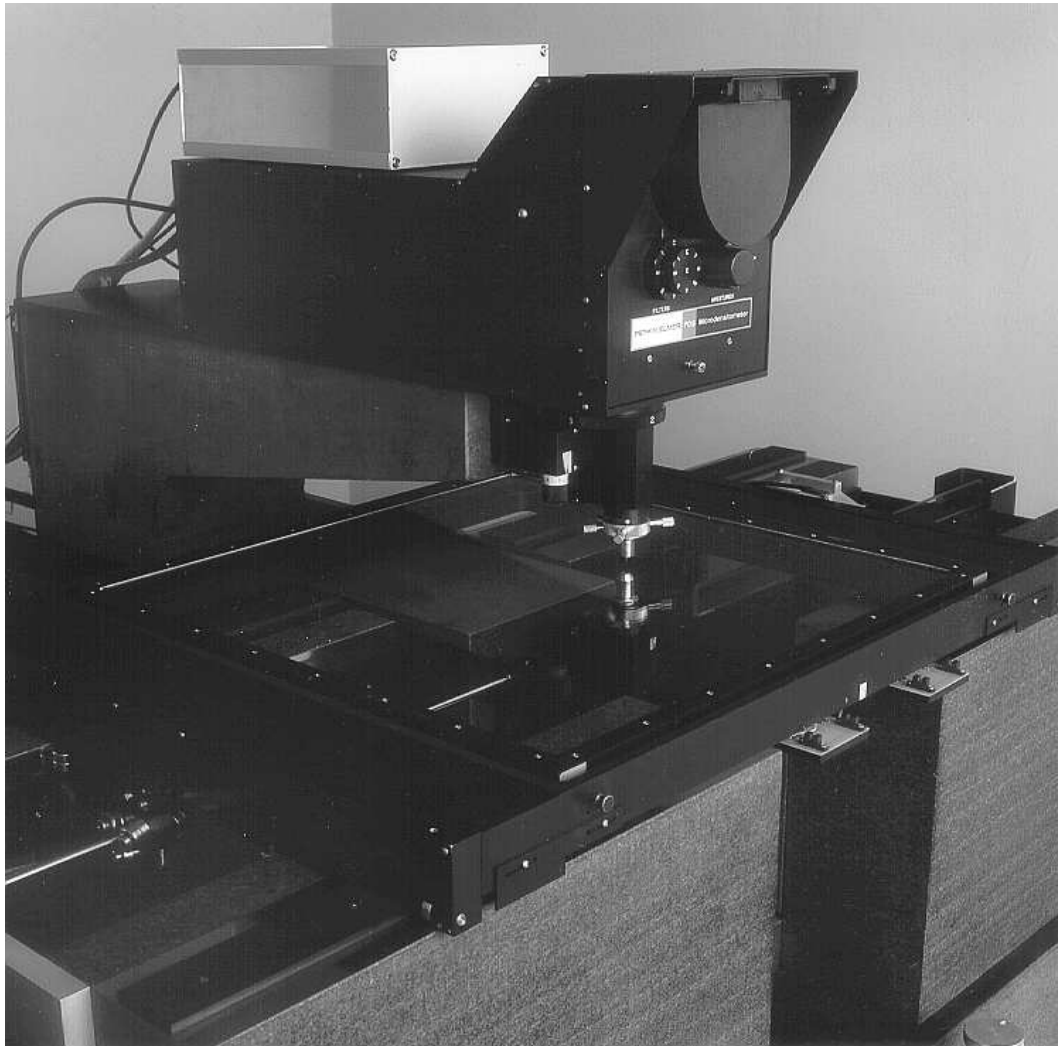


Abbildung 1.2: X-Wagen und C-Frame.

Der X-Wagen besteht aus einem Aluminiumrahmen, in dem eine Glasplatte eingelegt ist. Auf diese Glasplatte wird die Photoplatte gelegt und so befestigt, daß sich die beiden Platten nicht gegeneinander bewegen können. Im Bild links unten erkennt man die Laufschiene, auf denen der X-Wagen fährt. Der Vortrieb geht über eine rotierende Stahlachse, die von 6 schräggestellten Drehlagern umgeben ist. Durch diese Lager wird der Vortrieb auf den X-Wagen übertragen. Die maximale Geschwindigkeit ist 200 mm/s. Rechts in der Mitte des Bildes erkennt man das Ende des Haidenhain-Maßstabs, der auf einem Granitblock befestigt ist. Er ist mit einem Strichgitter mit einem Abstand von $10\mu\text{m}$ unterteilt. Der Abtastkopf befindet sich am X-Wagen und liest die Positionsänderung optisch an den Strichen ab. Mit Hilfe der Elektronik wird eine Einstellgenauigkeit von $1\mu\text{m}$ erreicht. Der C-Frame besteht aus einem C-förmig gearbeiteten Granitblock. Er ist in Y-Richtung bewegbar, wegen des Gewichts von etwa 500 kg jedoch nur mit einer Geschwindigkeit von maximal 20 mm/s. Am Granitblock sind oben und (nicht sichtbar) unten die Gehäuse mit den optischen Elementen untergebracht. Die Beleuchtungsoptik befindet sich unterhalb des X-Wagens. Davon ist nur das Beleuchtungsmikroskop zu erkennen. Die Meßoptik befindet sich oberhalb der Glasplatte. Der Verstärker/Konverter befindet sich in dem hellen Aluminiumgehäuse auf dem C-Frame.

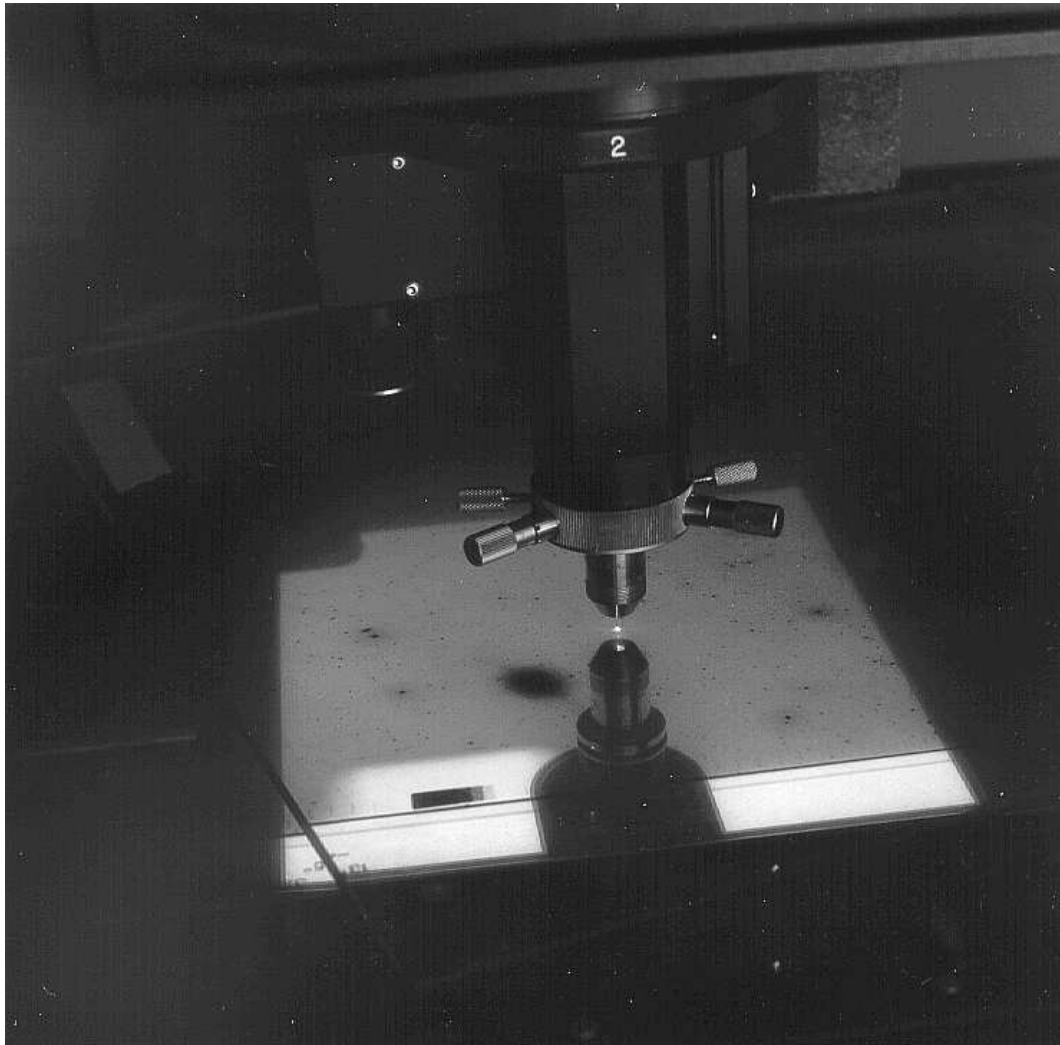


Abbildung 1.3: Abtastung einer Photoplatte

Das Bild zeigt das Mikrodensitometer II während der Digitalisierung einer Folienkopie des ESO/SERC-Atlas. Sie wurde von oben mit einer weiteren Glasplatte abgedeckt, damit alle Bereiche der Folie im gleichen Fokus liegen (Hiesgen 1988). Unten sieht man das Objektiv des Beleuchtungsmikroskops. Der restliche Teil der unteren Optik ist hier durch die Leuchtplatte verdeckt. Der weiße Fleck auf der Folie in der Mitte der Platte ist die Abbildung der Beleuchtungsblende (s. Kapitel 2.2). (Die sternförmige Verzerrung des Flecks ist nicht real. Sie entsteht durch Beugung an der Blende der Aufnahmeoptik.) Oberhalb der Glasplatte ist das Objektiv des Meßmikroskops zu sehen. Mit Hilfe der 4 Schrauben läßt es sich so justieren, daß beide Mikroskope auf einer optischen Achse liegen. Der elliptische, dunkle Fleck links neben den Objektiven ist ein Bild der Galaxie NGC 5128. Etwas weiter unten links erkennt man auf dem hellen durchsichtigen Glas die Kalibrationsflecken, mit deren Hilfe photometrische Messungen durchgeführt werden können (Scheuer 1983). Obwohl das Licht der Leuchtplatte sehr schwach ist, wird es während der Messung ausgeschaltet.

Kapitel 2

Mikrodensitometrie

Mikrodensitometer dienen zur Registrierung bzw. Digitalisierung der Bildinformationen einer Photoplatte oder eines anderen transparenten Objekts. Das gesamte Objekt wird dabei in ein Raster von einzelnen Bildelementen eingeteilt. Ein einzelnes Bildelement nennt man Pixel. Ein Pixel ist sehr klein im Verhältnis zur Gesamtfläche des Objekts. Jedes Pixel wird durch eine Ortsangabe und einen Wert für die Transparenz an diesem Ort repräsentiert.

2.1 Grundlagen des Meßverfahren

Zur Messung der Transparenz eines Objektes wird es von einer Seite mit einem Lichtstrahl mit definierter Intensität I_0 beleuchtet. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die Intensität I des Lichtes gemessen, das durch das Objekt hindurchstrahlt. Das Verhältnis beider Intensitäten ist die *Transmission* $T = \frac{I}{I_0}$.

Die Dynamik eines Mikrodensitometers überdeckt z.B. einen Intensitätsbereich von 1:100 000. Aus technischen Gründen werden lineare Detektoren benutzt, d.h. das Ausgangssignal des Detektors ist proportional zur Intensität des Lichtes am Sensor. Im Falle des Mikrodensitometers am Astronomischen Institut Münster (AIM) ist der Sensor eine Photo-Multiplier-Röhre (Photoelektronenvervielfacherröhre, PMT).

Der große Dynamikbereich läßt sich nicht ohne weiteres technisch weiterverarbeiten, da die nachfolgende Elektronik dazu nicht in der Lage ist. Deshalb muß das Signal komprimiert werden. Als geeignetes Verfahren zur Komprimierung hat sich die Logarithmierung herausgestellt. Das logarithmierte Signal, $D = \lg \frac{1}{T}$, wird als *Dichte* bezeichnet. Das ist übrigens das gleiche Verfahren, das die Natur im beim Auge anwendet. Auch hier werden die großen Intensitätsunterschiede durch Logarithmieren komprimiert.

In diesem Teil der Arbeit werden die Schwächen der analogen Logarithmierung aufgezeigt und ein neues Konzept vorgestellt: der Verstärker/Konverter. Doch zuerst soll gezeigt werden, warum dieser Aufwand für die Messung astronomischer Photoplatten notwendig ist.

2.2 Motivation

Die Information eines Bildes besteht aus den Kontrasten der einzelnen Bildteile. Die absoluten Intensitäten besitzen keine bildrelevanten Informationen. Die Verhältnisse der Kontrastwerte

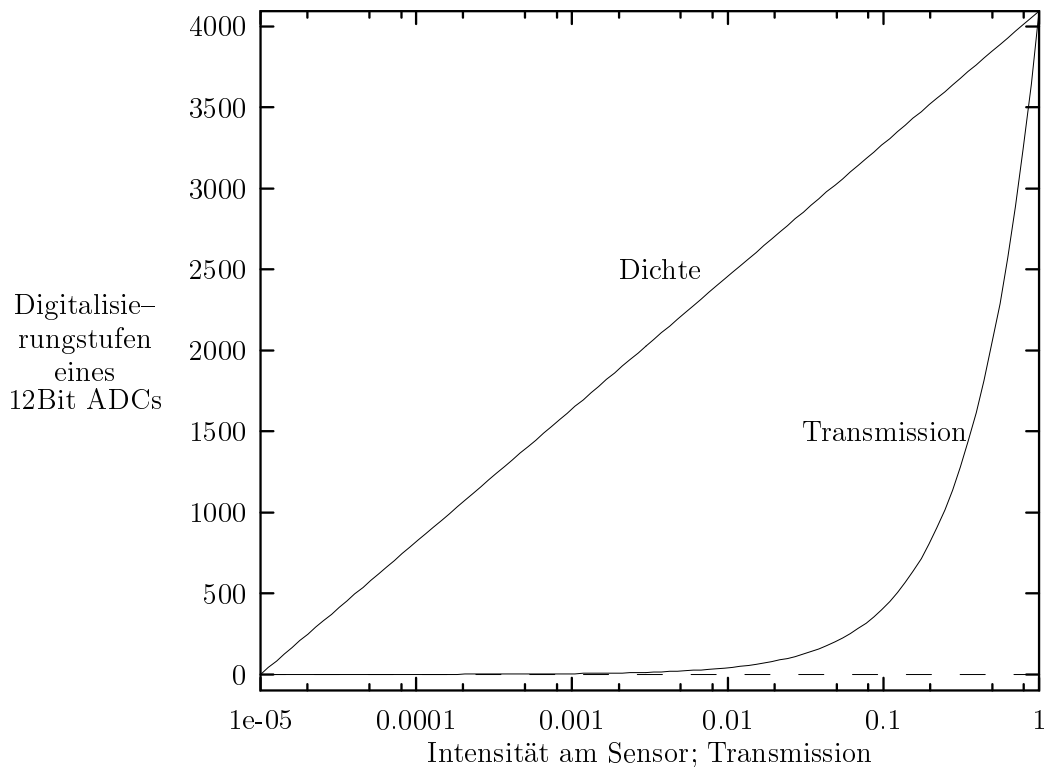


Abbildung 2.1: Diese Graphik vergleicht die Kontrastauflösung bei der Messung in Transmission mit der Kontrastauflösung in Dichte. Für eine eingehende Erklärung dieser Graphik verweise ich auf den Abschnitt 2.2.

sind normalerweise unabhängig von der Intensität der Beleuchtung. Ob die vorliegende Arbeit bei Sonnenschein oder bei Kerzenlicht gelesen wird, ist für die Lesbarkeit der Schrift unwichtig. Das Auge führt automatisch eine Anpassung an die mittlere Helligkeit durch.

Aus Abbildung 2.1 können wir entnehmen, wie die Kontraststufen eines 12 Bit Analog-Digital-Wandlers (Analog-Digital-Converter, ADC) verteilt sind. Auf der Abszisse ist die Intensität in logarithmischer Skala aufgetragen. Die Ordinate ist in die insgesamt 4096 Digitalisierungsstufen unterteilt. Bei der Wandlung wird ein Intensitätsbereich einer Digitalisierungsstufe zugeordnet.

Wenn wir das Transmissionssignal digitalisieren, stellen wir fest, daß 90% aller Digitalisierungsstufen im Transmissionsbereich von 1 bis 0.1 liegen, 9% fallen in den Bereich von 0.1 bis 0.01, 0.9% in den Bereich von 0.01 bis 0.001, usw. Diese Rechnung gilt unabhängig von der Auflösung des ADCs. Es wurde hier jedoch zur Vereinfachung ein reales Beispiel gewählt.

Ein Bild, dessen Informationen im Transmissionsbereich von 1 bis 0.1 liegt, wird also gut aufgelöst. Wenn dieses Bild mit einem Neutralfilter der Transmission 0.1 abgedeckt wird, verschiebt sich der obengenannte Transmissionsbereich des Bildes nach 0.1 bis 0.01. Das Bild wird jetzt nicht mehr gut aufgelöst werden, obwohl es nach wie vor die gleichen Informationen enthält.

Wenn wir jedoch das Transmissionssignal vor der Digitalisierung in Dichte verwandeln (logarithmieren), werden 20% der Digitalisierungsstufen auf jede Dekade verteilt, wenn eine Dynamik von 5 Dekaden erreicht werden soll. Damit verliert der Transmissionsbereich vom 1 bis 0.1 zwar deutlich an Auflösung, aber bereits im Transmissionsbereich von 0.1 bis 0.01 verdoppelt sich die Auflösung. Die Logarithmierung ist also vorteilhaft, wenn wir Objekte messen wollen, die eine insgesamt niedrige Transmission aufweisen oder einen großen Dynamikbereich überstreichen.

Das kommt in der astronomischen Praxis häufig vor, wenn moderne Emulsionen verwendet werden. Die Platten haben eine Dynamik, die bis zu 6 Dekaden überdecken kann. Bei einer Galaxie sollen die Informationen in den Kernen (Bereich hoher Dichte) genauso gut aufgelöst werden, wie die Informationen in den Spiralarmen (Bereich geringer Dichte). Ein anderes Beispiel wären starke Emissionslinien, denen Absorptionslinien überlagert sind, wie sie z.B. bei den Spektren des Sterns P Cygni auftreten.

2.3 Optische Grundlagen

Bei der Messung der Dichte/Transmission werden drei Typen unterschieden: die doppelt-diffuse Dichte/Transmission, die parallele Dichte/Transmission, die diffuse Dichte/Transmission (Altman 1977). Die Übertragungskurven unterscheiden sich im Idealfall nur um einen Faktor, den Callier-Faktor. Im realen Fall wird keines der drei Meßprinzipien exakt realisiert. Jede Meßmaschine hat ihre eigene Übertragungskurve bzw. Dichte-/Transmissionsskala. Da sich diese Skalen oft nur durch einen Faktor unterscheiden können sie von Maschine zu Maschine einfach ineinander umgerechnet werden. Damit die Maschinen international vergleichbar werden, können sie mit einem Inter Observatory Callibration Set (Sewell 1975) geeicht werden. Dabei handelt es sich um verschiedene Photoplatten, die in der Astronomie üblicher Weise benutzt werden und die als Standard gelten.

Bei der doppelt-diffusen Dichte wird das Meßobjekt von einer diffusen Lichtquelle beleuchtet. Der Öffnungswinkel der einfallenden Lichtstrahlen beträgt 180° . Die austretenden Lichtstrahlen werden ebenfalls im Winkel von 180° gesammelt und gemessen.

Bei der parallelen Dichte wird das Meßobjekt mit Lichtstrahlen beleuchtet, die im idealen Fall parallel sind (Halbwinkel 0°). Im Realfall liegt der Halbwinkel zwischen 5° und 10° . Der austretende Lichtstrahl ist diffuser, wird aber nur in dem gleichen Winkel gemessen, so daß gestreutes Licht verloren geht.

Die diffuse Dichte benutzt eine Mischung aus den beiden oben beschriebenen Meßverfahren. Das Objekt wird mit Lichtstrahlen beleuchtet, die im Idealfall parallel sind. Im Realfall werden kleine Öffnungswinkel benutzt. Die austretenden Lichtstrahlen werden in einem Öffnungswinkel von 180° gesammelt. Diese Methode wurde zum ANSI-Standard gemacht.

Die unterschiedlichen Dichte-/Transmissionsskalen (Callier-Effekt) kommen dadurch zustande, daß das Licht in der Schicht der Photoemulsion an den einzelnen Silberkörnern gestreut wird. Dadurch gelangt eine unterschiedlich große Lichtmenge zum Sensor. Photoemulsionen, bei denen die Silberkörner gegen Molekülfarbstoffe getauscht werden (chromogene Prozesse, z.B. alle Farbfilme) zeigen bei allen drei Meßverfahren keinen Unterschied in der Dichteskala. Bei den Mikrodensitometern, die heute im Gebrauch sind, werden in der Regel Öffnungswinkel benutzt, die zwischen den beiden Extremen, der parallelen Dichte und der doppelt-diffusen Dichte liegen. Durch die Einführung von Blenden in der Beleuchtungs- und in der Meßoptik wird dieser Winkel noch zusätzlich variiert.

2.4 Die Beleuchtungs- und Meßoptik der PDS 2020 GM

Bei dem PDS 2020 GM Mikrodensitometer der Firma Perkin Elmer handelt es sich um eine Doppelpaloptik mit einem eindimensionalen Empfänger. Die Beleuchtungsoptik und die Meßoptik sind nahezu spiegelbildlich aufgebaut. Unterschiede gibt es lediglich beim Einstrahlen des Lichtes

in die Optik (Lampe, Kondensator) und bei der Projektion des Lichtes auf den Sensor, der in diesem Fall eine Photo-Multiplier-Röhre ist. Abbildung 2.2 zeigt den schematischen Lichtweg eines PDS 2020 GM Mikrodensitometers. Dabei werden nur die wichtigsten Komponenten gezeigt, die übrigen, Umlenkspiegel, Beobachtungsoptik, Dichtefilter und Farbfilter, sind weggelassen.

Bei der Lampe handelt es sich um eine Halogenlampe (24V, 150W), die über eine stabilisierte Stromquelle betrieben wird. Die Konstanz der Beleuchtung während der Messung wird nicht überprüft. Die Messung (Tucholke 1983) ergab, daß nach einer Warmlaufzeit von etwa 4 Stunden das photometrische System und damit auch die Beleuchtungsstärke der Lampe während der üblichen Meßzeiten von bis zu 24 Stunden konstant bleibt.

Eine indirekte Messung der Konstanz der Beleuchtung wird am AIM gemacht, indem die Temperatur der Abluft der Lampe registriert wird. Starke Temperaturschwankungen deuten darauf hin, daß während des Scans größere Änderungen des Stroms und damit der Helligkeit stattgefunden haben. Das tritt in der Regel nur auf, wenn die Lampe stark gealtert ist. Normalerweise wird das durch den regelmäßigen Austausch der Lampe von vornherein vermieden. Wegen der Herstellungsschwankungen kann es aber vorkommen, daß eine Lampe vorzeitig altert oder ausfällt. In diesem Fall wird die Lampe ausgetauscht und der Scan wiederholt.

Das Licht wird über ein Kondensator-System auf eine Beleuchtungsblende (Vorspalt) projiziert. Die 8 zur Verfügung stehenden Vorspalte befinden sich auf einem drehbaren Spaltrad. Die Vorspalte sorgen dafür, daß bei der Messung nur die Fläche der Photoplatte beleuchtet wird, die gemessen werden soll. Dadurch wird verhindert, daß Streulicht aus Nachbargebieten mitgemessen wird. Die jeweilige Beleuchtungsblende liegt in der Abbildungsebene des Beleuchtungsmikroskops, das hier invers betrieben wird, d.h. das Objekt (die Beleuchtungsblende) ist vor dem Okular angebracht. Das Bild der Beleuchtungsblende wird mit dem Objektiv auf die Photoplatte in der Objektebene des Mikroskops projiziert. Der Okularauszug dieses Mikroskops ist auf Abbildung im Endlichen korrigiert. Das Mikroskop besteht aus einem Objektiv (1:10, NA=0.25) und vier Okularen mit einer Eigenvergrößerung von jeweils 5, 10, 15 und 20. Dadurch kann jeder Vorspalt in 4 verschiedenen Größen abgebildet werden.

Das von dem Meßobjekt durchgelassene Licht wird mit einer spiegelbildlichen Optik gemessen. Das Objekt des Meßmikroskops liegt jetzt in der Objektebene (Photoplatte) und ein Okular projiziert das Bild auf die Meßblende. Dieser Spalt blendet einen Teil des Streulichts aus und begrenzt den Winkel unter dem die einfallenden Lichtstrahlen betrachtet werden. Diese Art der Messung nähert sich also der parallelen Dichte/Transmission an. Die Winkel der projizierten Lichtstrahlen liegen bei der PDS 2020 GM zwischen $1^{\circ}8$ und $0^{\circ}022$, je nach Spalt und Vergrößerung.

Für die Praxis hat es sich bewährt, die Beleuchtungsblende etwas größer zu machen als der Meßblende. Zur Messung müssen beide Spalte so justiert werden, daß sie auf einer Achse liegen. Das ist schwierig auszuführen und häufig erforderlich, da schon eine kleine thermische oder mechanische Drift eine Verschiebung bewirken kann. Diese würde die effektive Spaltfläche verkleinern und eine Drift in der Dichte/Transmissionsmessung entstehen lassen. Deshalb wurden am AIM die Flächen der Vorspalte um 50% gegenüber den Meßspalten größer gewählt. Der zusätzliche Anteil von Streulicht ist gering und verändert die Übertragungskurve nur um einen konstanten Faktor (s. oben). Alle Größenangaben von Spalten in dieser Arbeit beziehen sich auf den Meßspalt, da dieser die gemessene Fläche repräsentiert.

Hinter der Meßblende befindet sich die Optik, die das Licht, das der Spalt durchläßt, auf den Sensor, die PMT, projiziert. In diesem Teil des Lichtweges sind auch die Neutraldichtefilter und die Farbfilter (in Abbildung 2.2 nicht eingezeichnet) untergebracht.

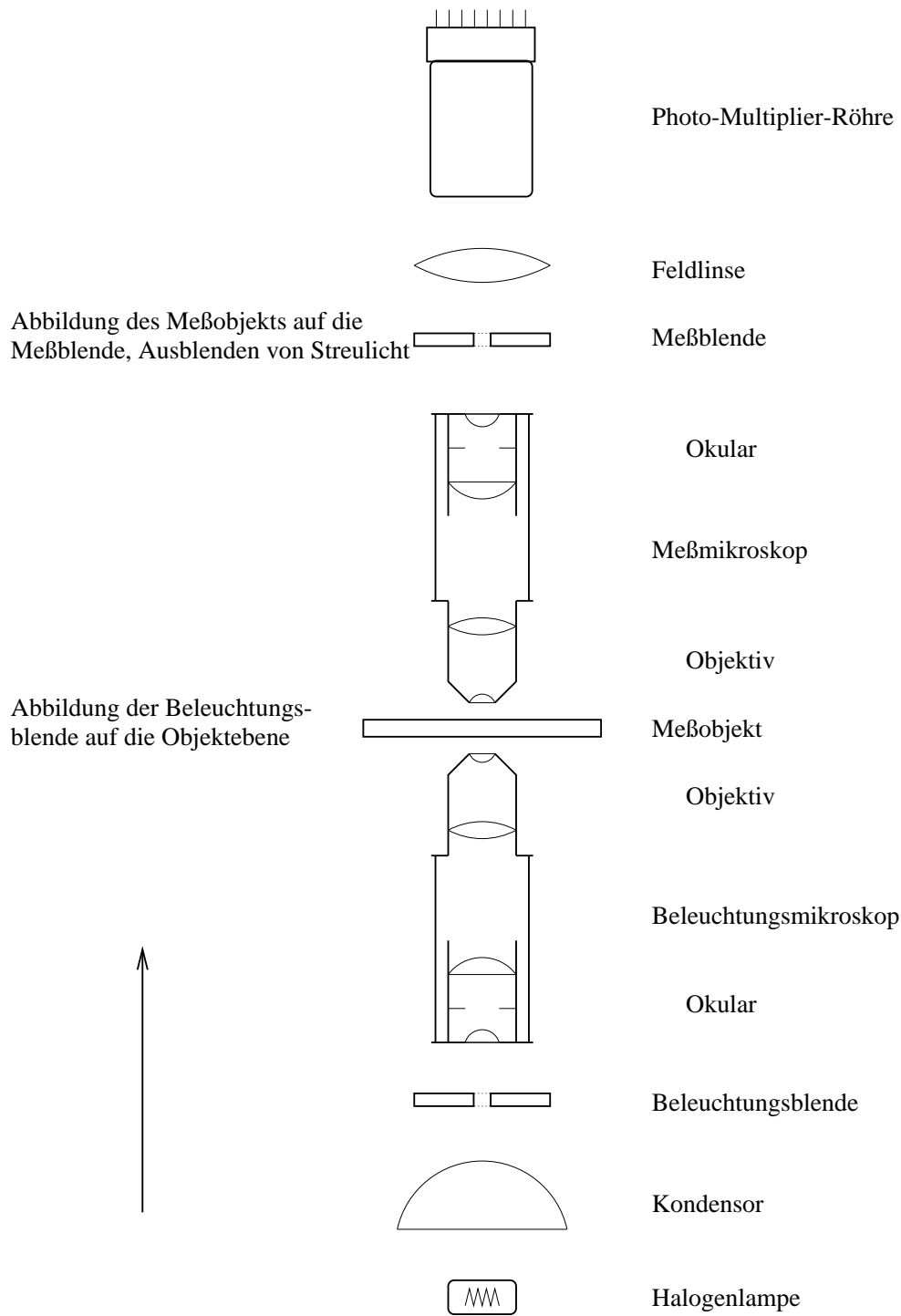


Abbildung 2.2: Vereinfachte, schematische Zeichnung der Beleuchtungs- und Meßoptik der PDS-Mikrodensitometer. Der Pfeil gibt die Richtung der Beschreibung im Text an.

Der ganze Lichtweg ist so aufgebaut, daß möglichst wenig Streulicht auf das Meßfeld projiziert wird. Da jedoch auch mattschwarze Farbe noch eine kleine Menge Licht reflektiert, wird nicht nur das Meßfeld mit dem Meßlicht beleuchtet, sondern auch das gesamte Feld, das mit dem Objektiv ausgeleuchtet wird. Dieses geringe Streulicht wird durch den Meßspalt nicht ausreichend beseitigt, so daß es bei der Messung hoher Dichten nachweisbar ist. Dies wird ausführlich beim sogenannten *Rasierklingentest* (s. Seite 18) diskutiert.

Die Vorteile dieser optischen Anordnung lassen sich nun klar erkennen. Die Meßfläche ist gleichmäßig ausgeleuchtet und sehr genau definiert. Der geringe Anteil von Streulicht ermöglicht Messungen auch bei hohen Dichten. Die optischen Eigenschaften der Mikrodensitometer sind dementsprechend ausgezeichnet. Durch eine bessere Abschirmung des Streulichts im Aufbau des Beleuchtungsbereichs könnte noch eine Verbesserung erreicht werden.

Der Nachteil dieses Meßverfahrens ist die geringe Geschwindigkeit. Mit dem eindimensionalen Empfänger kann zu einem Zeitpunkt nur ein Bildelement gemessen werden, so daß die Photoplatte mechanisch gegen die Mikroskope verfahren werden muß. Die Messung einer Photoplatte dauert also relativ lang gegenüber der anderer Maschinen, die wir später betrachten. Die Maschine im AIM benötigte für die Digitalisierung eines Bereichs von $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ einer Photoplatte (z.B. UK Schmidt-Teleskop) bei einer Schrittweite von $15\text{ }\mu\text{m}$ ursprünglich etwa 24 Stunden. Durch eine Verbesserung des Meßrechners und des Mikroprozessorsystems konnte die Meßzeit inzwischen auf etwa 12 Stunden reduziert werden.

2.5 Der optische Aufbau anderer Mikrodensitometer

Viele in der Astronomie benutzte Mikrodensitometer sind von Perkin Elmer gebaut. Sie unterscheiden sich durch die Größe und durch die Mechanik, jedoch nicht durch den optischen Aufbau. Zusätzlich sind auch Mikrodensitometer in Betrieb, die entweder Eigenkonstruktionen der entsprechenden astronomischen Institute oder umgebaute Mikrodensitometer der Firma Perkin Elmer sind. Einige der Konstruktionen werden in diesem Abschnitt kurz betrachtet.

Das Royal Observatory in Edinburgh betreibt die sogenannte COSMOS (Pratt 1977, MacGillivray 1984), einen Vertreter des *Flying-Spot-Verfahrens*. Die Photoplatte wird bei der COSMOS durch eine Kathodenstrahlröhre beleuchtet. Die Leuchtschicht ergibt ein grünes Licht, das über eine Optik auf die Photoplatte fokussiert wird. Der Elektronenstrahl wird elektrostatisch positioniert und erzeugt auf dem Leuchtschirm einen Leuchtpunkt (Spot), der die Integrationsfläche definiert. Mit Hilfe einer Optik wird das durchgelassene Licht auf den Sensor, eine PMT, abgebildet. Der Durchmesser des Spots kann $8\text{ }\mu\text{m}$, $16\text{ }\mu\text{m}$ oder $32\text{ }\mu\text{m}$ betragen. Eine Zeile umfaßt immer 128 Pixel, so daß die Zeilenlänge 1.024 mm , 2.048 mm oder 4.096 mm beträgt. Während der Messung wird die Photoplatte kontinuierlich entlang der y -Achse verschoben. Die gesamte Platte wird in diesen Blöcken abgetastet. Für eine Platte vom UK Schmidt-Teleskop ($300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$) benötigt die COSMOS bei einer Schrittweite von $16\text{ }\mu\text{m}$ etwa 4 Stunden.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Geschwindigkeit, mit der große Photoplatten digitalisiert werden können. Die elektrostatische Ablenkung kann sehr schnell erfolgen. Eine mechanische Verschiebung kann langsam erfolgen, ohne daß die Scangeschwindigkeit verlangsamt werden muß.

Der Nachteil dieser Maschine ergibt sich gerade aus diesem Beleuchtungsprinzip. Die Integrationsfläche ist ein runder Leuchtpunkt. Die Fläche des Leuchtpunktes ist nicht gleichmäßig ausgeleuchtet. Es ergibt sich ein Profil der Helligkeitsverteilung, bei dem das Maximum im Zentrum liegt. Eine genaue Begrenzung der Integrationsfläche ist nicht möglich. Hinzu kommt, daß in

den Randbereichen das Profil des Leuchtpunkts astigmatisch verzerrt ist. Deshalb wird eine einzelne Zeile auf 128 Pixel (maximal 4 mm Länge) begrenzt. Durch die fehlende Meßblende kann Streulicht zum Sensor gelangen. Streulicht entsteht zum Beispiel durch Nachleuchten des Leuchtschirms. Das Meßprinzip ähnelt eher dem der doppelt-diffusen Transmissionsmessung. Das Transmissionssignal wird mit einem 14 Bit Analog-Digital-Konverter digitalisiert. Daher ergibt sich eine Begrenzung der Dynamik auf etwa 2 Dichtestufen, wobei in den hohen Dichten der Abstand der Graustufen bereits sehr hoch ist.

Das Space Telescope Science Institute (STScI) besitzt zwei PDS2020 G Mikrodensitometer, die mit einer neuen Optik versehen wurden, die nach der Flying-Spot-Methode arbeitet (Lasker 1994). Sie wurden ursprünglich dazu benutzt, um den Guide Star Catalog für das Hubble Space Telescope (Lasker et al. 1990) zu erstellen. Dafür wurde das optische System im Originalzustand benutzt. Zukünftig sollen die Mikrodensitometer den 2. Palomar Sky Survey scannen. Dieser Atlas umfaßt etwa 3 300 Photoplaten vom Palomar Schmidt-Teleskop.

Für diese Aufgabe wurden die Mikrodensitometer so umkonstruiert, daß die Scanzeit einer Platte deutlich verkürzt werden konnte. Die Halogenlampe wurde gegen einen HeNe-Laser getauscht. Mit Hilfe einer elektromechanischen Ablenkeinheit wird der Laserstrahl über kleine Abschnitte der Photoplatte gelenkt, so daß die Anzahl der Pixel erhöht werden konnte, ohne die mechanische Bewegung zu beschleunigen. Dafür mußte jedoch genau wie bei dem oben erwähnten Mikrodensitometer das Konzept der Beleuchtungsblende und der Meßblende aufgegeben werden. Der Laserstrahl hat durch die Optik eine Begrenzung, die aber nur eine Blende annähert. Der effektive Durchmesser beträgt etwa 15 μm . Die Intensität ist gaussförmig verteilt. In den Flanken ist die Intensität zwar gering, aber immer noch größer als Null und die Flanken gehen weit über den effektiven Durchmesser hinaus. Das ergibt Probleme mit Streulicht, wenn über einen hellen Stern gescannt wird. Dann ist der zentrale Teil des Strahls soweit abgedunkelt, daß die Flanken signifikant zum Meßlicht beitragen und daher die zentrale Dichte des Sterns immer unterschätzt wird.

Ein weiteres Problem ist die Kohärenz des Laserlichts. Die Granularität der Photoplatte führt zu Beugungen. Das gebeugte Licht kann einen großen Winkel zur optischen Achse des Mikrodensitometers haben. Da es mit zum Meßlicht gehört, muß die Empfängeroptik so ausgelegt werden, daß das Licht über einen großen Winkel zur optischen Achse gesammelt und dem Empfänger zugeführt wird. Geschieht das nicht, kommt es zu Nichtlinearitäten in der Dichteskala (Swing 1976). Wie weit dieses Problem auch bei Halogenlampen auftreten kann, wird in Kapitel 4.3.4 untersucht.

Die neue Laseroptik und die Detektoroptik wurden so konstruiert, daß ein einfacher Austausch gegen die klassische Optik der Mikrodensitometer möglich ist. So können auch weiterhin Messungen, die eine hohe photometrische Genauigkeit erfordern, gemacht werden.

In Cambridge arbeitet ebenfalls ein Mikrodensitometer (das APM) nach dem Flying-Spot-Verfahren (Kibblewhite et al. 1984). Die Beleuchtung erfolgt hierbei auch durch einen HeNe-Laser. Der Laserstrahl wird von elektromechanisch bewegten Spiegeln über die Photoplatte bewegt. Die Halbwertsbreite des Hauptmaximums beträgt 8 μm . Das komplette System ist eine Eigenkonstruktion.

In vielen neueren Konstruktionen von Mikrodensitometern wird die Photoplatte von einer diffusen Lichtquelle beleuchtet. Das Bild wird mit Hilfe einer Projektionsoptik auf ein CCD-Array projiziert. Die Photoplatte wird mechanisch gegenüber der Optik verschoben.

Dabei unterscheidet man 2 Arten von CCD-Kameras. Die einen besitzen einen 2-dimensionalen Chip, die es zur Zeit bis zu einer Kantenlänge von 60 mm auf dem Markt gibt und in bis zu

4 096 × 4 096 Pixel unterteilt sind. Andere Kameras verwenden lineare CCD-Chips mit einer Größe von bis zu 5 000 Pixeln (Kroll & Neugebauer 1994). Mit Hilfe eines Motors wird die Zeile in der Bildebene verschoben und so die Zeilen nacheinander abgetastet. Diese Kameras liefern z.B. 7 200 Zeilen pro Scan. Die letzte Lösung ist billiger und liefert größere Felder pro Scan. Die Hersteller garantieren jedoch nicht, daß bei der Bewegung keine Lücke entsteht.

Die Digitalisierung der Transmission bei CCD-Kameras erfolgt in der Regel mit 12 Bit Tiefe. Die Chips werden nicht gekühlt und die Ausleseelektronik arbeitet weniger präzise als die Ausleseelektronik der CCD-Kameras an den Teleskopen. Die Dynamik ist daher relativ gering und der Dichteumfang der Fotoplatten kann nicht aufgelöst werden.

Durch die fehlende Meßblende kann Streulicht von Nachbarpixeln die Messung verfälschen. Die Projektionsoptik führt zu Verzerrungen und zur Vignettierung des Bildes. Eine gute Photometrie ist deshalb nicht möglich.

Diese Geräte werden bevorzugt zur Positionsmessung (Astrometrie) verwendet, denn bei dieser Anwendung fallen die Nachteile nicht ins Gewicht (de Vegt et al. 1994). Die Verzerrungen durch die Optik können leicht mit Hilfe von Anhaltsternen korrigiert werden.

Kapitel 3

Logarithmische Verstärker

Die Lichtempfänger moderner Mikrodensitometer arbeiten linear, d.h. der Ausgangsstrom oder die Ausgangsspannung ist proportional zur eingestrahnten Lichtintensität. Die Dynamik der Sensoren liegt zwischen 3 und 5 Dekaden. Mit diesem Dynamikbereich sind die zur Zeit verfügbaren Analog-Digital-Converter (ADC) mit 16 Bit Auflösung überfordert. Wenn wir in den Bereichen hoher Dichte noch eine ausreichende Auflösung fordern, müßten wir einen ADC mit 24 Bit Auflösung benutzen. Diese sind zur Zeit noch in der Entwicklung. Deshalb wurde bisher in der Regel das Ausgangssignal zuerst analog logarithmiert und dann digitalisiert. Bei gleich guter Kontrastauflösung im Bereich hoher Dichte kommt man mit einem ADC mit 12 Bit Auflösung aus.

Die analoge Logarithmierung ist aus physikalischen Gründen zu langsam. Am AIM wurde deshalb ein neuer Verstärker/Konverter (MD 3.X) gebaut, der nach einem adaptiven Verfahren arbeitet und so das Eingangssignal dem optimalen Auflösungsbereich des ADCs anpaßt.

3.1 Analoge Logarithmierung

Zur analogen Logarithmierung wird eine Diode im Rückkopplungsweig eines Rechenverstärkers eingesetzt (Abbildung 3.1). Die Kennlinie einer in Durchlaßrichtung geschalteten Diode verläuft exponentiell. Vereinfacht gilt also für kleine Ströme $I \propto \exp(U_{AK})$, wobei U_{AK} die Spannung zwischen der Anode und der Kathode der Diode ist. Wenn die Diode in die Rückkopplung eines Rechenverstärkers eingesetzt wird, ist die Ausgangsspannung proportional dem Logarithmus des Eingangsstroms, also $U_a \propto \ln I_e$. Hierbei werden der Sperrstrom und die Temperaturabhängigkeit des Durchlaßstroms nicht berücksichtigt.

Die oben dargestellten Verhältnisse gelten nur im quasi-statischen Fall. In der realen Diode wird eine endliche Zeit benötigt, um die Sperrschicht abzubauen und die Diffusionsschicht aufzubauen. Bei sich schnell ändernden Signalen ist die Proportionalität nicht mehr gegeben. Die Ausgangsspannung folgt einer Veränderung des Eingangsstroms nur mit einer Verzögerung. Diese Zeitkonstanten können durch Kapazitäten dargestellt werden. Abbildung 3.2 zeigt das Ersatzschaltbild einer realen Diode (Lindner et al. 1989). R_B ist der Bahnwiderstand der p- und der n-Schicht und R_R ist der Sperrwiderstand des pn-Überganges. Beim Übergang vom Sperr- in den Durchlaßzustand muß erst die Sperrschicht abgebaut und von Ladungsträgern durchsetzt werden. Das entspricht der Entladung von C_S . Beim Übergang vom Durchlaß- in den Sperrzustand müssen die Ladungsträger aus der Sperrschicht abfließen. Das entspricht dem Entladen von C_D .

Die Sperrschichtkapazität C_S und die Diffusionskapazität C_D können durch den Herstellungsprozeß klein gemacht werden, sie können aber nie ganz vermieden werden.

Verantwortlich für dieses Problem ist die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger im pn-Übergang. Die Driftgeschwindigkeit hängt von der Art der Ladungsträger und von der Feldstärke ab. Ändert sich das Feld, dann ändert sich die Leitfähigkeit der Sperrschicht erst, wenn die Ladungsträger ihre neue Lage eingenommen haben. Bei kleinen Strömen, wie sie bei hohen Dichten vorkommen, ist die Feldstärke und damit die Driftgeschwindigkeit klein. Das zeitliche Verhalten dieser Logarithmiererschaltung ist deshalb vom Wert des Eingangsstroms abhängig. Bei der PDS 2020 GM des AIM überstreicht der Eingangsstrom einen Bereich von 1 bis 100 000.

Die Schaltung aus Abbildung 3.2 wirkt wie ein Tiefpaß, dessen Zeitkonstante vom Eingangsstrom abhängt. Die Messung wird dadurch auf zwei Arten beeinflusst. Einmal werden steile Gradienten in der Dichte geschwindigkeits- und dichteabhängig verzerrt. Weiter unten sehen wir die Auswirkungen auf den Extremfall eines Gradienten, eine Messung über eine scharfe Kante wie z.B. eine Rasierklinge. In der Astronomie kommen besonders steile Gradienten z.B. bei der Messung von Emissionsspektren vor. Der zweite Effekt ist die dichteabhängige Filterung von Rauschkomponenten. Auch dazu ist weiter unten ein Beispiel zu sehen. Als Rauschkomponenten kommen zum einen das Photonenrauschen (s. Kapitel 4.2.2.1) in Frage und zum anderen das Rauschen der Silberkörner einer Emulsion (s. Kapitel 6.2). Aus der Sicht des Verstärker/Konverters gehören beide Rauschquellen zum Signal. Sie sollten also auch von der Elektronik registriert werden.

In der praktischen Schaltung bevorzugt man Transistoren. Während bei Dioden der exponentielle Verlauf oft nur über 2 bis 3 Dekaden genügend genau ist, verläuft der Kollektorstrom der Transistoren über bis zu 9 Dekaden exponentiell. Die Probleme mit dem Zeitverhalten bleiben jedoch erhalten. Durch geeignete Schaltungen erhält man heute eine gute Temperaturstabilität und hohe Genauigkeit. Analoge Logarithmierer werden als komplette Fertigbausteine (meist in Hybridtechnik) angeboten.

In die PDS 2020 GM ist von der Firma PE ein FMI 531 Baustein eingesetzt worden, der innerhalb dieser Arbeit als PE-Device bezeichnet wird. Zur Messung des Geschwindigkeitsverhaltens dieses Bausteins wurden zwei Zeilen über eine scharfe Kante (Rasierklinge) digitalisiert (Budell 1992). Die erste Zeile wurde von hell nach dunkel ($h \rightarrow d$) gerastert, während die zweite Zeile von dunkel nach hell ($d \rightarrow h$) gemessen wurde. Die Spaltbreite betrug $50 \mu\text{m}$, die Spalthöhe war $400 \mu\text{m}$, für die Schrittweite wurde $1 \mu\text{m}$ gewählt. Bei den Untersuchungen wurde der Nullpunkt auf die Stelle festgelegt, bei der die Kante der Klinge und die Kante der Meßblende übereinander liegen. Diese Wahl des Nullpunktes läßt sich im Meßmikroskop am besten reproduzieren.

Das theoretisch zu erwartende Ergebnis mit diesen Parametern ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die maximale Dichte ergibt sich aus der höchsten darstellbaren Dichte des ADCs. Die Form dieser Kurve muß unabhängig von der Fahrtrichtung sein. Das Photonenrauschen (s. Kapitel 4.2.2.1) wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Nach diesen Überlegungen wäre ein Rauschen zu erwarten, das mit steigender Dichte anwächst.

Die Berechnung der theoretischen Kurve geht davon aus, daß die Optik ideal ist, und nur Licht vom Beleuchtungsspalt in das Meßmikroskop einstrahlt. Der reale optische Aufbau der PDS 2020 GM Mikrodensitometer erfüllt aber diese Bedingung nicht. Neben dem Licht vom Beleuchtungsspalt strahlt auch Streulicht in geringer Intensität in das Meßmikroskop. Dieses Streulicht wird auch durch den Meßspalt nicht vollständig zurückgehalten, so daß eine kleine Menge auf den Sensor fallen kann. Dieses Streulicht wird erst gemessen, wenn das Bild vom Beleuchtungsspalt bereits vollständig abgedeckt ist. Der Dunkelwert kann deshalb erst erreicht werden, wenn der gesamte Öffnungswinkel des Objektivs mit der Klinge abgedeckt ist.

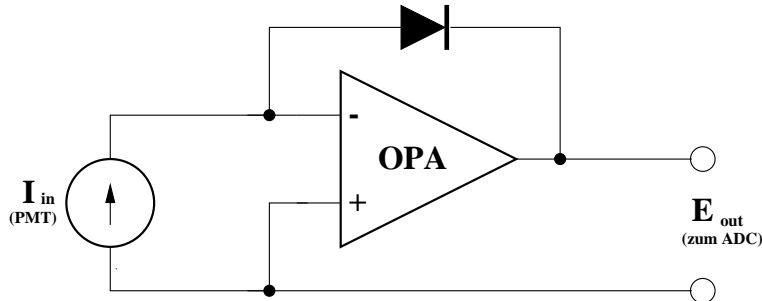


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau eines analogen Logarithmierers mit einer Diode.

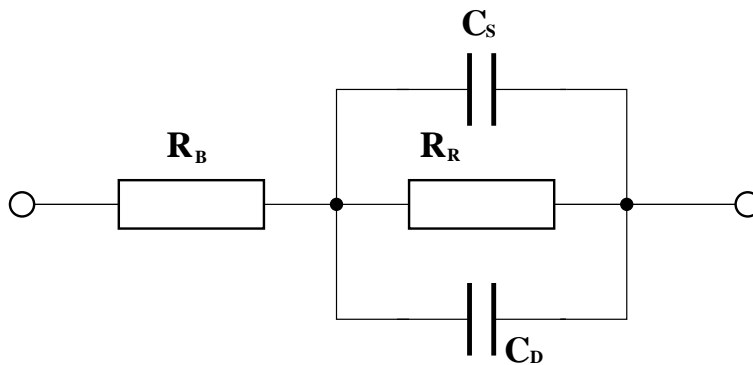


Abbildung 3.2: Ersatzschaltbild einer realen Halbleiterdiode. C_S Sperrschichtkapazität, C_D Diffusionskapazität, R_B Bahnwiderstand, R_R Sperrwiderstand (nach Lindner et al. 1989).

In Abbildung 3.4 ist das Meßergebnis einer quasi-statischen Messung wiedergegeben (Fountain et al. 1984). Dabei wurde die Rasierklinge manuell um jeweils $1\ \mu\text{m}$ gefahren. Die Werte wurden am Display erst abgelesen, nachdem die Elektronik genügend Zeit (mehrere Sekunden) hatte, sich einzustellen. Die Geschwindigkeit ist für diese Messung ohne Bedeutung. Diese Messung wurde mit dem PE-Device gemacht. Der Gradient wird bei dieser Messung korrekt wiedergegeben. Das zu erwartende Photonenrauschen wird hier aber durch den dichteabhängigen Tiefpaß weggefiltert. Diese Kurve dient in Bezug auf den Gradienten als Referenz für die weiteren Messungen.

Die Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen reale Messungen mit dem PE-Device bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Die höchste dargestellte Geschwindigkeit (Abb. 3.5: $25\ \text{mm/s}$) beträgt etwa $1/8$ der maximalen mechanischen Geschwindigkeit der PDS 2020 GM. Bei der Schrittweite von $1\ \mu\text{m}$ ist das aber die maximal mögliche Meßgeschwindigkeit. Der Mikroprozessor des Mikrodensitometers ist in diesem Fall das beschränkende Objekt. Seine maximale Samplingrate liegt bei $25\ 000\ \text{Pixel/s}$. Selbst bei dieser relativ kleinen Fahrgeschwindigkeit ist der Effekt bereits deutlich zu sehen.

Wenn der Scan von hell nach dunkel gefahren wird, weicht die Kurve bereits nach dem Erreichen der Dichte 2 von der Referenzkurve ab. Die Sättigungsdichte ($D = 5.0$) wird auf der gesamten Strecke nicht erreicht. Wenn der Scan von dunkel nach hell gefahren wird, folgt die Kurve ebenfalls zeitverzögert dem Ausgangsstrom des PMT. Der Gradient der Kurve entspricht zwar dem

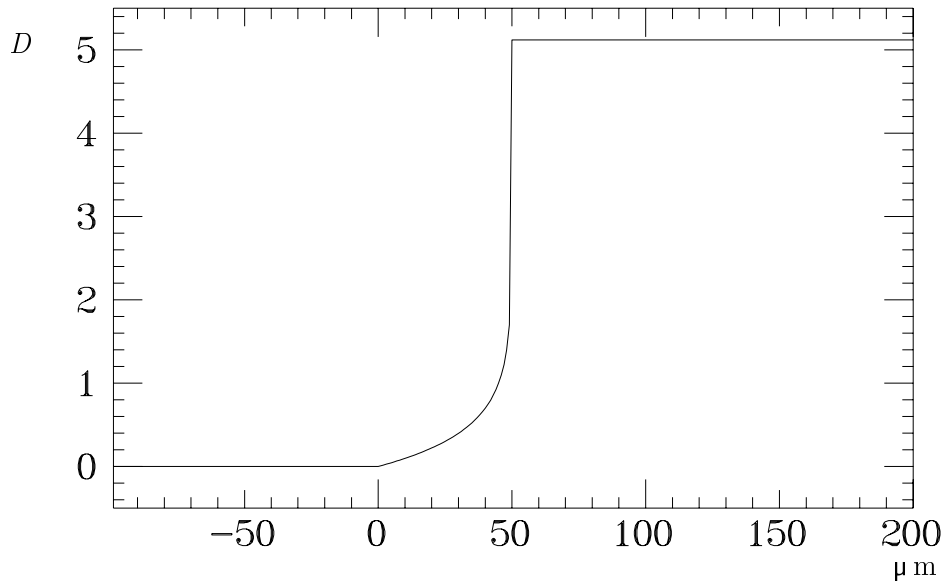


Abbildung 3.3: Theoretischer Verlauf der Digitalisierung einer scharfen Kante mit einem $50\ \mu\text{m}$ breiten Spalt. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

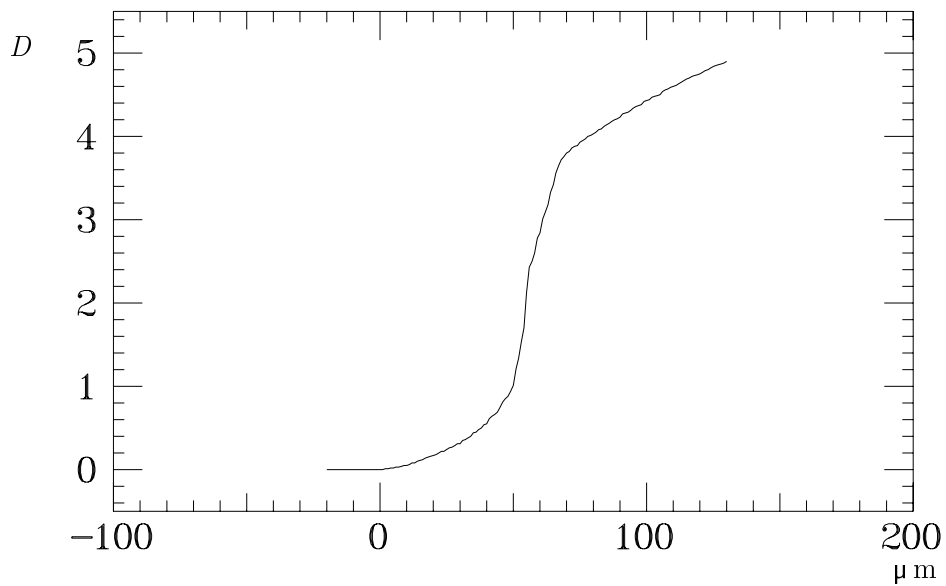


Abbildung 3.4: Der Verlauf der quasi-statischen Digitalisierung einer scharfen Kante mit einem $50\ \mu\text{m}$ Spalt. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

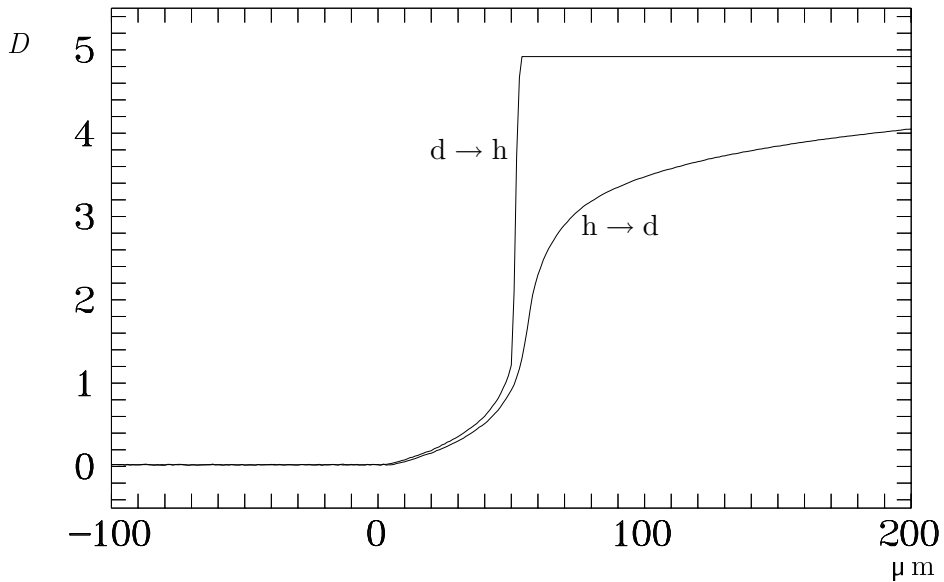


Abbildung 3.5: Digitalisierung einer scharfen Kante mit dem PE-Device bei einer Geschwindigkeit von 25 mm/s. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

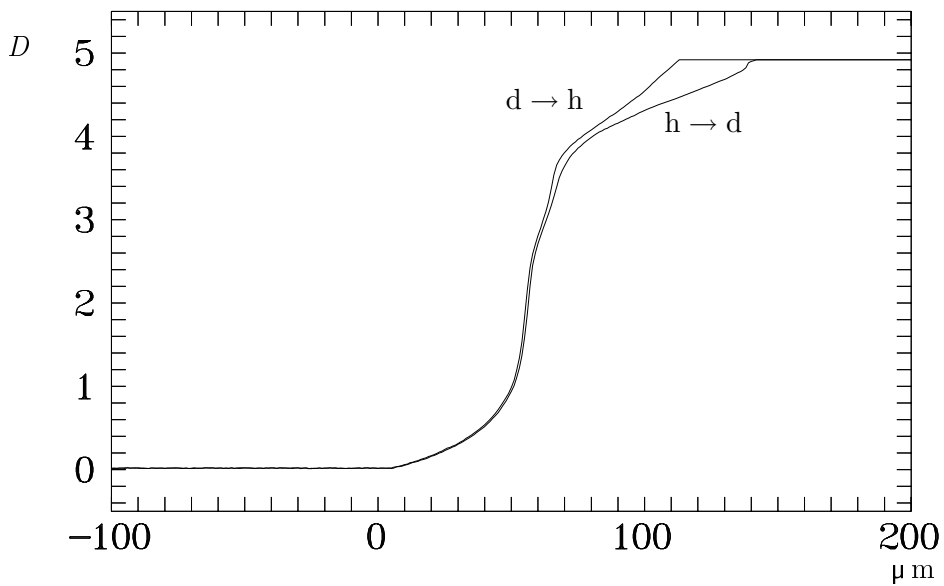


Abbildung 3.6: Digitalisierung einer scharfen Kante mit dem PE-Device bei einer Geschwindigkeit von 3.2 mm/s. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

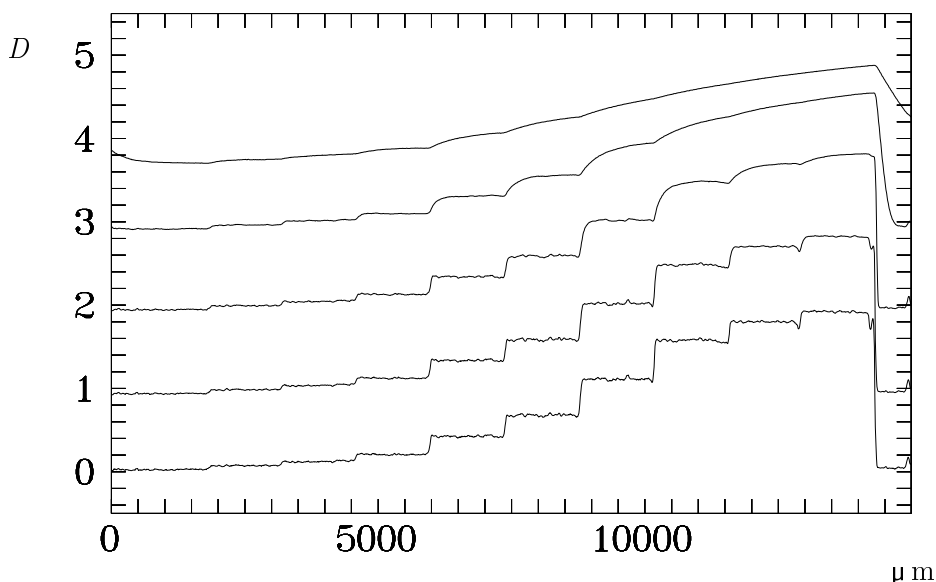


Abbildung 3.7: Gezeigt wird jeweils dieselbe Zeile eines Graukeils, gemessen mit dem PE-Device bei einer Geschwindigkeit von 200 mm/s. Mit Hilfe der neutralen Dichtefilter wurde die Grunddichte verschoben.

Gradienten der Kurve aus Abbildung 3.3, aber das ist nur eine zufällige Übereinstimmung, denn eigentlich wird der Gradient aus der Kurve der Abbildung 3.4 erwartet. Der gezeigte Effekt ergibt sich aus der Entladung der Sperrschichtkapazität und hat nichts mit dem Signal an der PMT zu tun. Die Messung von dunkel nach hell ist aber deutlich weniger verzerrt, als die Messung von hell nach dunkel. Außerdem fehlt auch hier das zu erwartende Photonenrauschen bei der hohen Dichte.

Abbildung 3.6 zeigt einen Scan mit den gleichen Parametern, jedoch mit einer mechanischen Geschwindigkeit von 3.2 mm/s. Das ist die kleinste mögliche Fahrgeschwindigkeit der PDS 2020 GM. Selbst bei dieser Geschwindigkeit ist noch eine Abhängigkeit von der Richtung zu erkennen. Es fällt auch hier auf, daß im hohen Dichtebereich kein Rauschen zu sehen ist.

In Abbildung 3.7 wird demonstriert, wie sich die Verzögerung auf Bilder auswirkt. Es wurde ein Graustufenkeil gerastert, der einen Dichteumfang von etwa 1.8 Dichtestufen hat. Der Graukeil wurde auf einen Film aufbelichtet. In den einzelnen Stufen wird also Kornrauschen erwartet. Es wurde immer nur von geringer Dichte zur hohen Dichte gefahren. Mit Hilfe von neutralen Dichtefiltern wurde die Grunddichte jeweils um etwa eine Dichtestufe angehoben. Bis zum Erreichen der Sättigungsdichte sollten die einzelnen Scans deckungsgleich sein. Außerdem müßte mit ansteigender Grunddichte das Photonenrauschen dazu kommen. Bei der Grunddichte $D = 3.8$ wäre das Photonenrauschen deutlich größer als das Kornrauschen. Stattdessen wird das Bild mit zunehmender Grunddichte immer stärker gefiltert und auch die Gradienten verzerrt. Die Sättigung wird nicht erreicht, obwohl die Dichte des Graukeils und die Dichte des 7. Filters ($D=3.8$) zusammen eine Dichte von $D=5.6$ ergeben. Für diese Messung wurde ein $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ Spalt benutzt. Die Schrittweite betrug $20\ \mu\text{m}$, die Geschwindigkeit 200 mm/s.

3.2 Konzepte zur Verbesserung der Logarithmierung bei anderen Arbeitsgruppen

Bereits vor dieser Arbeit wurden viele Möglichkeiten in Betracht gezogen, die Geschwindigkeit der Logarithmierschaltung zu erhöhen. Anderson et al. (1983) tauschten bei einer PDS 1010 den logarithmischen Verstärker gegen einen schnelleren Baustein von Analog Device (AD 757) aus. Da dieser Verstärker jedoch nach dem gleichen physikalischen Prinzip funktioniert, ist die Verbesserung nicht überzeugend. Die maximale mechanische Geschwindigkeit der PDS 1010 beträgt mit 40 mm/s nur etwa $\frac{1}{5}$ der Geschwindigkeit der PDS 2020 GM. Die Verzerrungen sind zwar deutlich reduziert, aber immer noch vorhanden. Für die Zwecke am AIM sind diese Maßnahmen unzureichend, da wir verzerrungsfreie Bilder von großen Photoplaten (300 mm \times 300 mm) bei einer Geschwindigkeit von 200 mm/s brauchen (Horstmann 1992).

Von van Altena & Lee (1984) wurde eine andere Lösung vorgeschlagen, die auf dem logarithmischen Analog-Digital-Wandler AN 8020L von Analogic (1979) basiert. Dieser Baustein wandelt nach der Methode der sukzessiven Approximation. Dabei wird der Wert durch Setzen eines Bits erraten. Das Bitmuster wird anschließend mit Hilfe eines Digital-Analog-Konverters (DAC) wieder in einen analogen Wert zurückgewandelt und mit der analogen Eingangsspannung verglichen. Ist der DAC-Wert kleiner als die Eingangsspannung, war das gesetzte Bit richtig. Ist die DAC-Spannung höher als die Eingangsspannung, war das Bit falsch gesetzt und es wird wieder gelöscht. Danach probiert der Wandler das nächste, weniger signifikante Bit nach dem gleichen Muster. Der digitale Wert gleicht sich immer mehr der analogen Eingangsspannung an.

Bei diesem Baustein ist der DAC so gebaut, daß das Bitmuster dem Logarithmus der zurückgewandelten Spannung entspricht. Damit höhere Geschwindigkeiten möglich sind, wird hier keine echte analoge Logarithmierung benutzt. Vielmehr wird der Logarithmus in eine Reihe entwickelt, in der nur Multiplikationen und Additionen vorkommen. Eine analoge Multiplikation läßt sich mit schnellen Bausteinen realisieren. Das Ergebnis ist jedoch abhängig von der Temperatur. Diese Temperaturschwankungen lassen sich nicht oder nur unzureichend kompensieren.

Die Zeit für eine Konversion beträgt 31 μ s. Der Ausgabewert hat 15 Bit Auflösung. An einem PDS-Mikrodensitometer eingebaut, ergibt sich eine Kontrastauflösung von 12 287 Dichtestufen über einen Dynamikbereich von Dichte 0 bis 4.65. Die Nachteile dieses Bausteins sind der sehr hohe Preis und die Tatsache, daß er nur schwer lieferbar ist. Inzwischen wird er nicht mehr hergestellt.

3.3 Der Verstärker von C.C. Volkmer

Der erste Versuch, ein neues Konzept am AIM zu realisieren, wurde von Volkmer (1984) gemacht. Hierbei wurde auf eine integrierte Schaltung zurückgegriffen, die hauptsächlich in der Radartechnik Verwendung findet (Plessey Semiconductors 1983). Dabei handelt es sich um einen logarithmischen Verstärker und Begrenzer. Die Verstärkung eines ICs beträgt 12 dB (Faktor 4). An einem Ausgang steht das linear verstärkte Signal zur Verfügung. Ein weiterer Ausgang stellt den Strom zur Verfügung, der dem Logarithmus der Amplitude des Signals entspricht. Mehrere Bausteine können hintereinander geschaltet werden. Das lineare Ausgangssignal eines Verstärkerbausteins wird dem Eingang des nachfolgenden Verstärkers zugeführt. Jeder Baustein überstreicht etwa eine halbe Dekade. Insgesamt wurden 10 Verstärker in Reihe geschaltet. Die logarithmischen

Stromausgänge können gemäß der Knotenregel einfach addiert werden. Der Gesamtstrom entspricht dem Logarithmus der Amplitude des Eingangssignals. Ein nachfolgender linearer Verstärker führt eine Skalierung zum dekadischen Logarithmus durch. Wichtig dabei ist die Begrenzung durch den Verstärkerbaustein: Damit wird eine definierte Sättigung eingeführt. Bei einem hohen Eingangssignal von der PMT befinden sich die Bausteine mit der hohen Gesamtverstärkung im Bereich der Begrenzung.

Das große Problem dieser Bausteine ist die Arbeitsfrequenz. Der übliche Arbeitsbereich liegt zwischen 10 MHz und 100 MHz. Der Ausgangsstrom der PMT hat jedoch Frequenzen vom Gleichstrom bis zu einigen kHz. Deshalb muß zunächst der Ausgangsstrom der PMT in eine Spannung konvertiert werden. Diese Spannung muß anschließend mit Hochfrequenz amplitudenmoduliert werden. Das wird technisch so realisiert, daß die Amplitude der Trägerfrequenz mit dem Spannungssignal der PMT multipliziert wird. Die Trägerfrequenz wurde für den Verstärker des AIM auf 10 MHz festgelegt. Eine analoge Multiplikation mit Hilfe von Rechenverstärkern kam 1983 nicht in Frage, da entsprechenden Verstärker nicht mit so hohen Frequenzen arbeiten konnten. Deshalb wurde für die Modulation ein Ringmischer eingesetzt. Ringmischer arbeiten mit Transformatoren und einer Diodenmatrix. Die Transformatoren haben einen Ferritkern. Dieser Kern beschränkt jedoch den Arbeitsbereich. Die verwendeten Ringmischer arbeiten nur in einem Bereich, der $2^{1/2}$ Dekaden Dichtumfang am Mikrodensitometer entspricht. Der gesamte Bereich von 5 Dekaden mußte deshalb in zwei Meßzweige aufgeteilt werden. Der erste Ringmischer bekommt das Eingangssignal mit der Verstärkung 1 zugeführt. Für den zweiten Ringmischer wird das Signal zuerst um den Faktor 250 verstärkt. Dieser Faktor entspricht genau den $2^{1/2}$ Dekaden des ersten Ringmischer. Nach der Logarithmierung werden alle Ausgangsströme addiert und in eine Spannung gewandelt. Ist das Eingangssignal von der PMT groß, wird mit dem ersten Meßzweig gearbeitet. Der zweite Meßzweig befindet sich in der Sättigung und gibt ein konstantes Signal ab. Bei kleinen Eingangssignalen von der PMT ist nur der zweite Meßzweig aktiv, während der erste Meßzweig den Wert 0 zum Ergebnis beiträgt.

Die Tests ergaben eine verzerrungsfreie Logarithmierung bis zu einer Frequenz des Eingangssignals von 200 kHz. Der nutzbare Dynamikbereich umfaßte etwa 4.8 Dichtestufen.

Schwierigkeiten gab es jedoch mit der Linearität der Dichteskala. Die Verstärkung der einzelnen Bausteine schwankt um den Wert von 12 dB, so daß die Responsefunktion leicht wellig ist. Die Kurve ist jedoch stets monoton steigend. Das Problem stört so lange nicht, wie die Transformation der gemessenen Dichte in Intensität mit Hilfe einer ebenfalls gemessenen Schwärzungskurve (s. Kapitel 5.4) erfolgt. Bei der Messung der ESO/SERC-Kopien wurde das in der Regel nicht gemacht (Horstmann 1992). Es wurde mit einer einfachen, linearen Schwärzungskurve gerechnet.

Ein weiteres Problem war die Beschaffung der integrierten Schaltkreise. Die Bausteine wurden in den USA hergestellt und unterstanden für eine Weile einem absoluten Exportverbot. Andere, ähnlich arbeitende Bausteine waren nicht genau genug.

3.4 Der MD 3.2 Verstärker/Konverter

Bei dem MD 3.X-Projekt stand die oben beschriebene Idee von Volkmer Pate. Der wesentliche Unterschied ist jedoch, daß das Signal nicht mehr mit Hochfrequenz moduliert werden muß. Die Verstärkerkette besteht aus 5 Rechenverstärkern, die sehr genau auf eine Verstärkung von 10 eingestellt werden können. Die Logarithmierung findet nicht mehr in den verstärkenden Bausteinen, sondern erst am Ende mit Hilfe einer vorprogrammierten Tabelle statt. Dieses Konzept wurde bereits in Triest (Pucillo & Sedmak 1984) versucht, konnte aber nicht erfolgreich zu Ende

geführt werden. Vermutlich waren die damals zur Verfügung stehenden Rechenverstärker ungeeignet. Das Konzept aus Münster basiert auf einer Familie von 1986 und später entwickelten Rechenverstärkern, deren wichtigstes Merkmal eine sehr niedrige Offsetdrift ist. Zusätzlich wurde das Rauschen dieser Bausteine fast bis zur physikalisch möglichen Untergrenze reduziert. Die Gesamtverstärkung der Kette liegt bei 100 000.

In Abbildung 3.8 sehen wir den stark vereinfachten Aufbau des MD 3.X Verstärker/Konverters. Die Schaltung wurde hier in Funktionsblöcke zusammengefaßt. Die einzelnen Blöcke werden im nachfolgenden Text genauer beschrieben. Als Leitungen sind wichtige Signalverbindungen eingezeichnet. Die ganzen Schaltungen zur Steuerung der Elektronik wurden weggelassen, wenn sie nicht unbedingt zum Verständnis der Funktion des Verstärker/Konverters notwendig sind.

Das Prinzip beruht auf der adaptiven Verstärkung, wobei die Verstärkung in festen Stufen eingestellt wird. Die Verstärkung wird jeweils um den Faktor 10 erhöht oder erniedrigt. Insgesamt sind mit dem Strom/Spannungs-Konverter (I/U-Konverter) 5 Stufen vorhanden, so daß eine fünfstufige diskrete Logarithmierung stattfindet. Die einzelnen Stufen arbeiten ausschließlich in linearer Beschaltung. Dadurch gibt es keine Probleme mit der Geschwindigkeit der Verstärkerkette. Die Geschwindigkeit ist unabhängig von der Amplitude des Eingangssignals immer gleich groß. Der Verstärker, dessen Ausgangsspannung dem optimalen Eingangsspannungsbereich des ADCs entspricht, wird zum ADC durchgeschaltet. Der ADC kann also immer im optimalen Auflösungsbereich arbeiten, während sich die Verstärker mit höherer Verstärkung in der Sättigung befinden und die Verstärker mit kleinerer Verstärkung ein zu kleines Signal liefern. Die eingestellte Verstärkung ergibt zusammen mit dem digitalisierten Wert eine Adresse, unter der in einer festprogrammierten Tabelle der eigentliche logarithmische Wert steht, der eine Länge von 12 Bit hat. Der Eingangsbereich liegt zwischen $100\ \mu\text{A}$ ($D = 0.0$) und $0.76\ \text{nA}$ ($D = 5.12$). Damit ist der ganze Arbeitsbereich der Photo-Multiplier-Röhre abgedeckt.

Die Realisierung des Konzepts umfaßt insgesamt 5 Baugruppen, das Verstärker/Konverter-Modul, die Anzeigeeinheit, das Daten-Interface, das Schaltpult-Interface und das Netzteil. Diese Baugruppen werden jetzt einzeln besprochen. Die Grundlagen zur Schaltungsentwicklung lieferten die jeweiligen Datenblätter der Integrierten Schaltungen. Es wurde auch eine Reihe von Lehrbüchern benutzt, von denen ich hier einige als Beispiele anführen möchte: Tietze & Schenk (1976), Seifart (1988a), Seifart (1988b), Kühn (1988).

Das größte Problem beim Aufbau des Verstärker/Konverters ist die Vermeidung von Brummschleifen. Die Vielzahl der Komponenten und die hohe Gesamtverstärkung im analogen Teil erfordert bei der Verlegung der Masseleitungen höchste Sorgfalt. Bei der Beschreibung der einzelnen Baugruppen wird jeweils gesondert auf die notwendigen Maßnahmen in diesem Bereich hingewiesen.

3.4.1 Das Verstärker/Konverter-Modul

Das Verstärker/Konverter-Modul enthält die vollständige Elektronik, die den Strom von der PMT übernimmt, verstärkt, digitalisiert und schließlich logarithmiert. Darüber hinaus befindet sich dort auch eine Schutzschaltung, die die PMT vor einem möglichen Überstrom schützen soll. Dieses Modul ist in drei Funktionsbereiche unterteilt: die Verstärkerschaltung, die analoge Elektronik und die digitale Steuerung mit Logarithmierung.

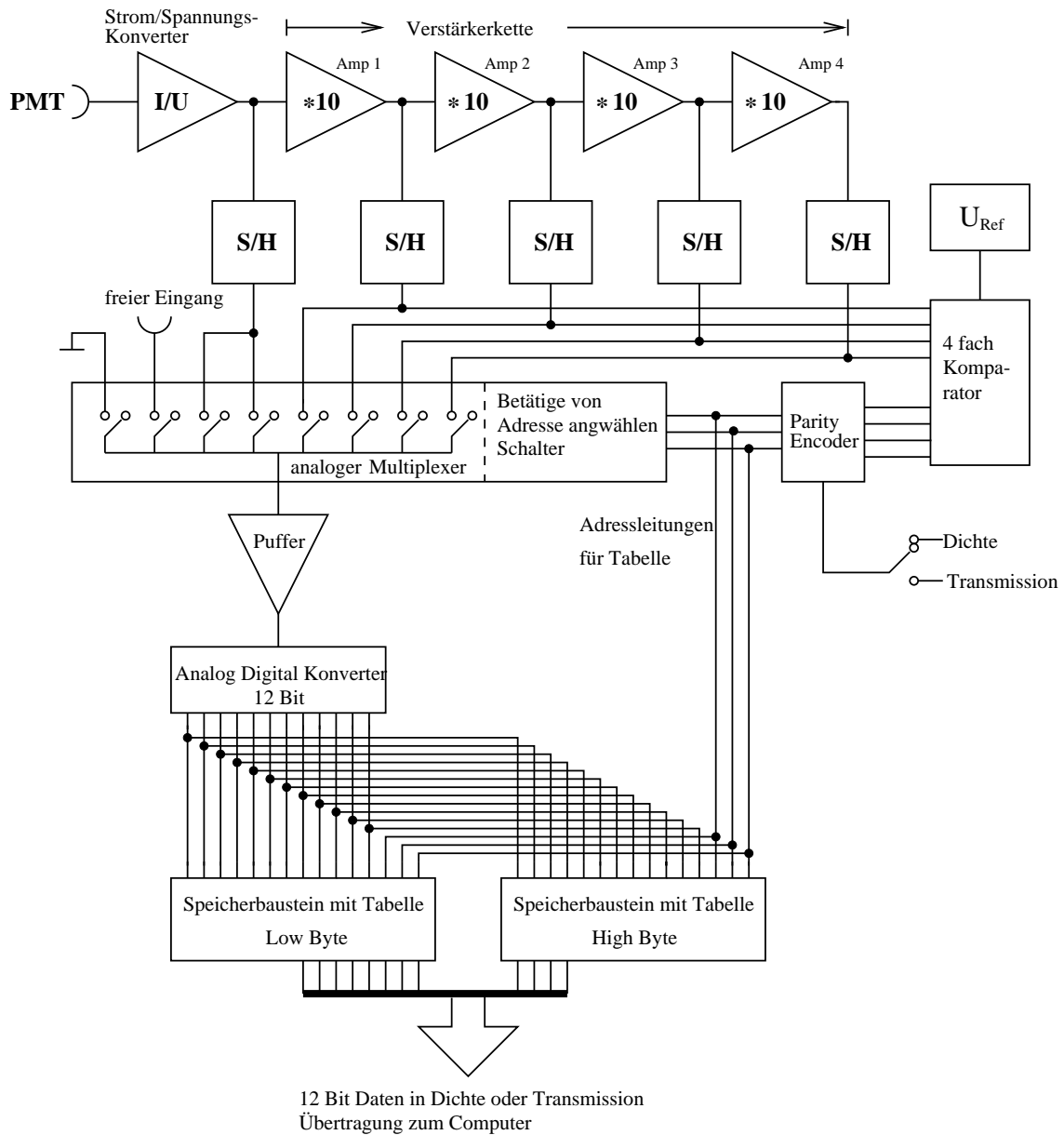


Abbildung 3.8: Diese Graphik zeigt den schematischen Aufbau des neuen Verstärker/Konverters (MD 3.2). Die einzelnen Baugruppen und die Verbindungen werden im Text ausführlich erklärt.

3.4.1.1 Die Verstärkerschaltung

Die Verstärkerschaltung ist in einem eigenen, geschlossenen Gehäuse untergebracht. Sie besteht aus dem Strom-/Spannungs-Konverter (I/U-Konverter) und vier folgenden Verstärkerstufen jeweils mit der Verstärkung 10. Sie ist in Abbildung 3.8 in der oberen Zeile eingezeichnet. Der I/U-Konverter und die Verstärker sind als Dreiecke dargestellt.

Der Strom von der PMT wird in den Eingang des I/U-Konverters eingespeist. Dieser ist entsprechend der Standardschaltung mit einem Rechenverstärker aufgebaut. Die Schaltung ist so ausgelegt, daß ein Strom von $100\ \mu\text{A}$ einer Spannung von $9.765\ \text{V}$ entspricht. Der nachfolgende 12 Bit-ADC begründet diesen Wert. Der ADC hat eine interne $10\ \text{V}$ Referenzspannung; daraus ergibt sich die kleinste auflösbare Spannungsänderung von $2.441\ \text{mV}$. Die Spannung von $9.765\ \text{V}$ entspricht genau 4000 Digitalisierungsstufen. Die verbleibenden 95 Stufen entsprechen „negative Dichten“ und werden dazu benutzt, den Dichtewert $D = 0$ besser einzustellen.

Da der Strom der PMT bei hohen Dichten wegen der geringen Photonenstatistik rauscht, wird mit Hilfe eines Kondensators integriert. Die Integrationszeit beträgt $10\ \mu\text{s}$. Bei dem Rechenverstärker handelt es sich um einen D-FET Verstärker (OP 602 CM), der sich durch sehr niedrigen Eingangsstrom, sehr geringe Rauschspannung sowie niedrige Offsetdrift auszeichnet. Trotzdem ist die Anstiegsgeschwindigkeit des Bausteins mit $35\ \text{V}/\mu\text{s}$ ausreichend groß, um auch steilen Gradienten der Meßobjekte folgen zu können. Diese Stufe muß besonders sorgfältig gebaut werden, da alle Fehler dieser Stufe anschließend bis zu 10000 fach verstärkt werden.

Die Verstärkerkette besteht aus 4 nicht invertierenden Verstärkern, die ebenfalls mit je einem Rechenverstärker aufgebaut sind. Dabei handelt es sich um bipolare Schaltkreise (OPA 37), die sich ebenfalls durch besondere Rauschmutter und sehr geringe Offsetdrift auszeichnen. Die Schaltung wurde so ausgelegt, daß die Offsetspannung möglichst minimiert wird und sich die Verstärkung sehr präzise einstellen läßt.

Alle 5 Stufen sind einzeln über eine passive Siebung mit der Stromversorgung verbunden. Das ist wichtig, da sonst über den endlichen Widerstand der Stromversorgungsleitung eine Kopplung der einzelnen Verstärker stattfinden würde. Alle Masseleitungen werden einzeln zum zentralen Massepunkt geführt und erst dort miteinander verbunden. Dabei wird noch zwischen Signal- und Versorgungsmasse unterschieden.

3.4.1.2 Die analoge logarithmische Einheit (analog logarithmic unit; ALU)

Das Ausgangssignal jedes Verstärkers der Verstärkerkette wird einem getrennten Sample-and-Hold-Baustein (S/H) zugeführt. Das ist unbedingt notwendig, da der Multiplexer, der die aktuelle Verstärkung zum ADC durchschaltet, eine lange Einschwingzeit ($12\ \mu\text{s}$ für 12 Bit Genauigkeit) hat und deshalb ein konstantes Eingangssignal benötigt. Bei dem S/H (SHC 5320) wurde auf eine kurze Fensterzeit geachtet. Ansonsten enthält dieser Abschnitt keine Besonderheiten.

Die Ausgänge der 5 S/Hs werden den Eingängen des analogen Multiplexers zugeführt. Dieser ist in dem Abbildung 3.8 als eine Einheit mit insgesamt 8 Schaltern eingezeichnet. Es kann immer nur ein Schalter geschlossen sein und das Signal zum Ausgang durchschalten. Welcher Schalter geschlossen ist, wird mit der Adresse festgelegt, die als 3 Bit Wort in den Multiplexer (an der rechten Seite eingezeichnet) eingespeist wird. Die Schalter werden hier nur zur bildlichen Darstellung benutzt. In Wirklichkeit handelt es sich um Halbleiterschaltungen, die wie Schalter funktionieren.

Bei dem Multiplexer (HI 508-5) handelt es sich um einen 8-zu-1 Multiplexer. Fünf Kanäle werden von je einer Verstärkerstufe der Verstärkerkette belegt, einschließlich des I/U-Konverters. Sie dienen zur Messung der Dichte. Die Adresse für den Kanal wird auch gleichzeitig als Basisadresse für die Tabelle in den Speicherbausteinen benutzt. Deshalb wird für die Messung in Transmission ein eigener Kanal im Multiplexer benutzt, obwohl das Signal vom I/U-Konverter für die Messung in Dichte und in Transmission identisch ist. Es ist technisch gesehen praktischer. Die Umschaltung zwischen Dichte und Transmission kann dadurch mit Hilfe eines einfachen Schalters am Parity Encoder (s. Abbildung 3.8) erfolgen.

Von den 2 noch zur Verfügung stehenden Kanälen wurde einer für Erweiterungszwecke reserviert und liegt bei Nichtbenutzung auf Masse. Er ist in der Graphik 3.8 als freier Eingang bezeichnet. Ein weiterer Kanal wurde fest auf Masse gelegt und dient bei der Justierung zur Nullpunkt-einstellung. Das ist wichtig, da so der Spannungsabfall am Bahnwiderstand der Halbleiterschalter mitberücksichtigt wird.

Zwischen dem analogen Multiplexer und dem ADC wurde noch ein Pufferverstärker eingeführt. Für den relativ niederohmigen Eingang des ADC ist der Ausgang des Multiplexers zu hochohmig. Daher würde es ohne Pufferstufe zu Verfälschungen kommen. Die Pufferstufe ist aus einem nicht invertierenden Rechenverstärker (AD 845) aufgebaut. Es handelt sich um einen Rechenverstärker mit einem J-FET-Eingang. Es wurde auf eine besonders kurze Einschwingzeit (0.01% nach 350 ns) und niedrige Offsetdrift geachtet.

Der Analog-Digital-Konverter (HI 774K) ist ein 12 Bit-Wandler, der nach der sukzessiven Approximation arbeitet. Die gesamte Konversionszeit beträgt 8 μ s. Das Signal muß erst 4.8 μ s nach dem Start der Konversion konstant sein; vorher wird nur eine Genauigkeit von $\pm 0.76\%$ benötigt. Dadurch kann die Konversion schon gestartet werden, während der Multiplexer noch einschwingt. Die digitalen Ausgänge des ADC werden der Digitalen Logarithmischen Einheit (digital logarithmic unit; DLU) zugeführt, auf der sich die vorprogrammierte Tabelle befindet.

Für die Auswahl der optimalen Verstärkung wird ein Vierfach-Komparator (HA 4905-5) benutzt. Die analogen Eingänge der Komparatoren sind mit den Ausgängen der vier Verstärker verbunden. Die Vergleichsspannung U_{ref} wird durch einen einstellbaren Spannungsteiler aus der analogen Versorgungsspannung gewonnen und durch ein RC-Glied stabilisiert. Die vier Komparatoren vergleichen jeweils die Spannung von den Verstärkern mit der Referenzspannung. Je nach Ergebnis dieses Vergleichs werden die digitalen Ausgänge der Komparatoren auf logisch LOW oder HIGH gesetzt. Der Umschaltzeitpunkt wurde so gewählt, daß zwischen beiden möglichen Verstärkungen ein Überlappbereich besteht. Deshalb sind weder der genaue Wert noch die Konstanz der Referenzspannung von großer Bedeutung. Die digitalen Ausgänge werden an die DLU weitergeleitet. Dort wird mit Hilfe eines Parity Encoders (74 HC 148) die Adresse gewonnen, die zum einen den analogen Multiplexer umschaltet und zum anderen die entsprechende Tabelle selektiert.

Die aktuelle Verstärkung ist immer die größte Verstärkung, die eine Ausgangsspannung unterhalb der Referenzspannung liefert. Alle nachfolgenden Verstärker befinden sich in der Sättigung und liefern eine Ausgangsspannung, die oberhalb der Referenzspannung liegt. Falls alle Verstärker unterhalb der Referenzspannung liegen, wird die höchste Verstärkung gewählt. Falls alle Verstärker oberhalb der Referenzspannung arbeiten, wird die I/U-Stufe selektiert. Diese Stufe kann unter den üblichen Betriebsbedingungen nie in die Sättigung gelangen.

Für die Messung in Transmission wird die automatische Umschaltung der Verstärkung ausgeschaltet. Unabhängig von der Höhe des Signals wird die I/U-Stufe selektiert, die das Transmissionssignal liefert. Der restliche Signalweg ist identisch mit der Dichtemessung. Lediglich die Tabelle ist hier linear.

Bei der Stromversorgung aller Komponenten wurde auf strikte Trennung der Versorgung für die analogen und für die digitalen Schaltkreise geachtet. Alle Bausteine, die Verbindungen zur digitalen Steuerung haben, besitzen getrennte Leitungen für die analoge und die digitale Masse. Die Stromversorgung für die analogen Schaltkreise wird zweimal aktiv stabilisiert, siehe auch Kapitel 3.4.5. Das Prinzip der Kaskadierung der Siebung ergibt eine deutlich größere Brummunterdrückung der Versorgungsspannung als es bei einer Einfachsiebung möglich ist. Zur Stabilisierung werden dreibeinige Spannungsregler (LM317, LM337) benutzt, die in der Lage sind, höherfrequente Spannungseinbrüche auszuregeln. Die schnellen Bausteine haben einen großen Stromverbrauch, der besonders beim Ein- bzw. Umschalten die Stromversorgung stark belastet. Eine schlecht ausgelegte Stromversorgung führt zu Kopplungen über die Versorgungsleitungen und damit zu möglichen Schwingungen.

3.4.1.3 Die digitale logarithmische Einheit (digital logarithmic unit; DLU)

Die DLU besteht aus insgesamt vier Baugruppen: der Zeitsteuerung, der Adresskodierung, der Tabelle und der Schutzschaltung für die PMT. In Abbildung 3.8 ist lediglich ein Teil der Adresskodierung eingezeichnet. Die anderen Komponenten der DLU wurden der Einfachheit halber weggelassen.

Die Zeitsteuerung steuert den gesamten zeitlichen Ablauf der digitalen und der analogen Baugruppen des Verstärker/Konverters. Von außen bekommt sie das Start-Of-Conversion-Signal (SOC) zugeführt, das vom Mikrodensitometer geliefert wird. Als Ausgangssignal liefert sie das End-Of-Conversion (EOC) Signal, das dem Mikrodensitometer mitteilt, daß ein gültiger Wert vorliegt.

Nach dem Empfangen des SOC wird ein Zeitgeber gestartet, der den S/Hs und dem Multiplexer $6\ \mu\text{s}$ Zeit gibt, sich einzuschwingen. Dann wird der ADC gestartet. Die Konversion dauert etwa $8\ \mu\text{s}$. Das Ergebnis der Konversion wird der vorprogrammierten Tabelle zugeführt. Diese braucht zum Auslesen des Wertes etwa $250\ \text{ns}$. Diese Zeit wird durch einen zweiten Zeitgeber gesteuert. Erst nach Ablauf dieser 3 Zeiten ist der Wert gültig und das EOC wird gesetzt.

Die Adresskodierung wurde vereinfacht bereits oben beschrieben. Es sind jedoch noch einige Einzelheiten der Schaltung wichtig. Zwischen dem Vierfach-Komparator und dem Parity-Encoder wurde ein Latch/Multiplexer-Baustein eingefügt, der beim Start der Konversion den Zustand konstant hält und so ein Umschalten der Kanäle während der Messung verhindert. Mit Hilfe des Multiplexers in diesem Baustein ist es möglich zwischen 2 Adressblöcken zu je 4 Eingängen umzuschalten. Dem ersten Adressblock werden die Ausgangssignale der 4 Komparatoren auf der ALU zugeführt. Mit diesen Signalen wird automatisch der aktive Verstärker selektiert. Der zweite Adressblock wird von einem Handschalter angesteuert. Damit können zu Test- und Justierzwecken der selektierte Verstärker und die Tabelle unabhängig vom Meßsignal fest vorgegeben werden.

Die Tabelle befindet sich in zwei EPROMs von je $32\ \text{kByte}$ Größe. Das sind Speicherbausteine, in denen eine Information geschrieben werden kann, die dann auch nach dem Abschalten des Stroms erhalten bleibt und beliebig oft ausgelesen werden kann. Es kann nur der gesamte Speicher mit Hilfe von UV-Licht gelöscht werden. Ein EPROM enthält die 4 hochwertigen Bits, während das zweite EPROM die 8 niedrigwertigen Bits enthält. Die Adresse für beide EPROMs ist identisch und setzt sich zusammen aus der $12\ \text{Bit}$ langen Basisadresse, die der ADC liefert und der $3\ \text{Bit}$ langen Adresse (Tabellenadresse), die den Verstärkungsfaktor enthält. Jedes EPROM ist in 8 Tabellen zu je $4\ \text{kByte}$ aufgeteilt. 5 Tabellen sind für die Dichtemessung (4 Verstärker und

I/U-Konverter) vorgesehen. Hier werden die Ausgabewerte des ADC in logarithmische Werte übersetzt. Die Werte wurden vorab theoretisch berechnet. Die analoge Elektronik muß also auf diese Tabellen geeicht werden. Die sechste Tabelle enthält die Werte für die Transmissionsmessung. Hierzu werden die Werte des ADC eins zu eins in der Tabelle abgebildet. Die 7. und die 8. Tabelle werden zur Zeit nicht benutzt und sind deshalb mit dem Hexadezimalwert FF aufgefüllt.

In der Aufbau- und Testphase ist es notwendig, die logarithmische Wandlung der Werte abzuschalten. Das kann hier relativ einfach erfolgen, indem die Tabelle nicht mehr automatisch dem selektierten Verstärker zugeordnet wird, sondern die lineare Tabelle (Transmission) fest vorgegeben wird. Dazu wurde ein 2-zu-1-Multiplexer (74HC258) eingefügt. Während die ersten Eingänge des Multiplexers die aktuelle Tabelle adressieren, liegen die zweiten Eingänge festverdrahtet auf der Adresse für die lineare Tabelle. Mit Hilfe eines Schalters kann der Multiplexer zwischen beiden Adressierungsarten umschalten.

Die Datenausgänge der EPROMs werden über Leitungstreiber (74HC245) an das Buskabel angeschlossen, das die Daten zum Daten-Interface (DI) weiterreicht. Die Leitungstreiber sind wichtig, da die Ausgänge der EPROMs nicht direkt an lange Leitungen angeschlossen werden können.

Eine Schutzschaltung schützt die PMT vor Überlastung durch zu hohe Ströme. Der maximale Strom, den die PMT ohne Schaden liefern kann, beträgt $150\ \mu\text{A}$. Der Strom der PMT hängt von der eingestrahlen Intensität und von der eingestellten Hochspannung ab. Gerade beim Justieren der Hochspannung kommt es häufig zu Bedienungsfehlern, die noch dadurch begünstigt werden, da das Display des MD3.2 keine Dichten < 0 anzeigen kann.

Die Schutzschaltung besteht aus einem Fensterdiskriminator (TCA965). Sie ist eine Mischung aus analoger und digitaler Elektronik. Da dieser Schaltkreis von der digitalen Stromversorgung gespeist wird, kann die interne Referenz nicht benutzt werden. Deshalb wird die Referenzspannung mit einer roten Leuchtdiode stabilisiert. Durch Spannungsteiler werden daraus die Spannungen gewonnen, die die Umschaltunkte festlegen. Das Signal wird vom Ausgang des I/U-Konverters über einen Puffer (1/2 TL083) ausgekoppelt. Die Signalspannung wird ebenfalls über einen Teiler geführt, der zusätzlich noch einen passiven Tiefpaß enthält, so daß kurzzeitige Impulse herausgefiltert werden. Zwei Ausgänge des Fensterdiskriminators bilden die beiden Alarmstufen. Ist der Strom größer als $110\ \mu\text{A}$, beginnt die Warnung. Die Anzeige blinkt und ein unterbrochener Warnton ist zu hören. Falls der Strom über $130\ \mu\text{A}$ steigt, wird die Hochspannung ausgeschaltet. In der DLU werden lediglich die Signale zum Alarm gesetzt. Die Anzeige bzw. die Abschaltung erfolgt jeweils in anderen Einheiten.

3.4.2 Die Anzeige-Einheit (display unit; DU)

Die übliche Anzeige für Dichte/Transmission der PDS-Mikrodensitometer besteht aus einem Digitalvoltmeter, das entsprechend geeicht ist. Mit dem MD3.X Verstärker/Konverter kann das Digitalvoltmeter nicht mehr benutzt werden, da keine analoge logarithmierte Spannung zur Verfügung steht. Daher wurde nach einer Lösung gesucht, bei der die digitalen Werte des Verstärker/Konverters direkt angezeigt werden können. Damit sind die Werte, die abgelesen werden und die, die der Computer liest, identisch.

Die Konvertierung des 12 Bit Ganzzahlwertes in physikalische Werte erfolgt bei der DU mit Hilfe einer vorprogrammierten Tabelle. In diese Tabelle werden die Muster der Ziffern, sie angezeigt werden sollen, gespeichert. Jeder physikalische Wert wird mit 4 Ziffern angezeigt. Da Speicherplatz in der heutigen Zeit sehr billig ist, ist es am einfachsten, wenn jeder Ganzzahl ein eigener

Bereich mit der Beschreibung der Ziffern zugeordnet wird. Die Ganzzahl kann direkt als Adresse zu dem Speicherbereich dienen. Diese Adresse muß nur noch mit der Tabellenadresse erweitert werden. Es gibt eine Tabelle mit 4096 Werten für die Dichte und weitere 4096 Werte für die Transmission. Für die Tests in der Aufbauphase und bei der Justierung der Elektronik ist es hilfreich, wenn nicht die physikalischen Werte, sondern die Ganzzahlen angezeigt werden. Deshalb gibt es noch einmal je eine Tabelle für Dichte und für Transmission, in der die Zifferndarstellung der Ganzzahlen gespeichert sind.

Die Anzeige der Ziffern erfolgt mit vier 7-Segmentanzeigen. Jede Ziffer kann also aus 7 Strichen und einem Dezimalpunkt aufgebaut werden. Diese 8 Merkmale einer Ziffer ergeben genau ein Byte. Vier Bytes enthalten daher das Anzeigemuster einer physikalischen Zahl. Für die Speicherung wird ein EPROM benutzt. Aus einem EPROM kann bei jedem Lesevorgang nur ein Byte ausgelesen werden. Um eine Zahl anzuzeigen, muß das EPROM viermal hintereinander ausgelesen werden. Deshalb wird das Anzeigemuster einer Zahl in vier hintereinander folgenden Bytes abgelegt. So müssen nur die letzten beiden Stellen (binär gesehen) von der Adresse durchgezählt werden. Im gleichen Rhythmus werden die Ziffernanzeigen weiter geschaltet. Das Weiterschalten geht so schnell, daß das Auge eine stehende Zahl wahrnimmt.

Die DU übernimmt 6 Werte pro Sekunde aus dem Buskabel und zeigt diese an, unabhängig davon, wieviele Daten wirklich gewonnen werden. Wenn das Mikrodensitometer automatisch arbeitet, wird der Takt zur Datengewinnung vom Haidenhain-Lineal vorgegeben. Damit auch im manuellen Betrieb Werte angezeigt werden können, wird ein Takt auf der DU erzeugt und damit die Wandlung eines Wertes gestartet. Auf diese Weise können auch im Stillstand des Mikrodensitometers ständig Werte angezeigt werden. Das ist wichtig, damit vor dem Beginn einer Messung die Einstellung erfolgen kann.

3.4.3 Das Dateninterface (Data Interface; DI)

Das DI hat die Aufgabe, die Meßwerte des Verstärker/Konverters an einen Computer weiterzugeben, damit sie dort gespeichert werden können. In umgekehrter Richtung empfängt das DI den SOC-Impuls und gibt es an die DLU weiter. Mit Hilfe des EOC-Signals wird dem Computer angezeigt, wann ein gültiger Datenwert vorliegt. Zur Vermeidung von Brummschleifen besitzt das DI zwei Stromkreise, die voneinander getrennt sind. Der eine Stromkreis gehört zum Verstärker/Konverter und der andere gehört zum Mikrodensitometer und Scan-Computer. Zwischen den Stromkreisen werden die Signale optisch übertragen. Dazu werden schnelle Optokoppler (hp-cl2630) benutzt. Wichtig ist, daß der SOC-Impuls mit nur wenig Zeitverzögerung weitergeleitet wird.

Auf der Seite des Verstärker/Konverters werden die Signale mit Hilfe von Transceiver-Bausteinen (74HC245) aus dem Datenbuskabel ausgekoppelt. Die Bausteine aus der HC-MOS Serie, bzw. HCT-MOS Serie, bilden einen guten Abschluß bei dieser Länge der Leitung. Andere Bausteine sollten nicht verwendet werden. Der direkte Anschluß an die Leuchtdioden der Optokoppler verbietet sich ebenfalls, weil die Dioden einen nichtlinearen Abschluß bilden würden und es daher zu erheblichen Übertragungsfehlern käme.

Die Empfänger der Optokoppler sind bereits fertige integrierte Schaltungen mit einem digitalen Ausgang. Das vereinfacht die Schaltung des DI erheblich. Die Ausgänge können direkt mit den Mikroprozessorsystemen der Mikrodensitometer verbunden werden. Falls jedoch eine längere Leitung angeschlossen wird, empfiehlt es sich auch hier, Leitungstreiber zwischenschalten.

Für Test- und Justierzwecke wurde noch ein Anschluß an einen Computer vorgesehen. Da zur Zeit der Entwicklung der Schaltung nur ein Atari Mega ST zur Verfügung stand, wurde der

Anschluß so gestaltet, daß eine Verbindung zum ROM-Port (Jankowski et al. 1990) hergestellt werden konnte. In diesem Fall konnte der SOC-Impuls auch vom Computer geliefert werden.

Die Ausführung des DIs hängt von dem System ab, in das der Verstärker/Konverter eingebunden werden soll. Im Falle der Mikrodensitometer des AIM wurde bis zum Jahr 1996 das DI als Aufsatzplatine für das Analog-Board des Mikroprozessorsystems hergestellt. Das DI wurde in den Stecksockel anstelle des ADCs eingesetzt. Aus der Sicht des Mikrodensitometers ist der Verstärker/Konverter also nur ein neuer ADC, der die Daten nach dem gleichen Schema liefert, wie der alte ADC. Die Daten wurden vom Mikroprozessorsystem zwischengespeichert und dann über ein 16 Bit Parallelboard an den Scan-Computer übertragen.

Als Scan-Computer wurde zuerst ein PE 3220 Minicomputer der Firma Perkin Elmer eingesetzt. Als dieser Computer aus Altersgründen abgeschaltet wurde, ersetzte ihn ein Atari Mega ST, der mit Hilfe einer Ethernetverbindung mit dem neuen Unix-System kommunizierte. Das zweite Mikrodensitometer wurde sofort nach der Installation im AIM über einen Atari ST angesteuert. Bei dieser Lösung wurden die Daten nach wie vor vom Parallelboard der Mikroprozessorsysteme beider Mikrodensitometer ausgelesen. Ein großes Problem war, daß die Atari-Computer nicht weiterentwickelt wurden, sondern die Produktion eingestellt wurde. Deshalb entschloß man sich, diese Rechner durch moderne PCs zu ersetzen. Bei dieser Gelegenheit wurden auch einige Fehler des Parallelboards des Mikroprozessorsystems umgangen.

Das neue Konzept benutzt je einen PC pro Mikrodensitometer. Diese PCs laufen unter dem Betriebssystem Linux, einem Unix-Derivat. Das DI wurde so erweitert, daß eine direkte Übernahme der Daten vom DI in den Scan-Computer erfolgen kann. Damit wurde das DI ein eigenständiges Board im Mikroprozessorsystem der Mikrodensitometer. Die Schaltung, wie sie oben beschrieben wurde, blieb ohne Veränderung erhalten. Sie wurde lediglich um einen FIFO-Speicher (First In, First Out) erweitert. In diesem Speicher werden die Daten abgelegt, bis der Computer sie auslesen kann. Die Daten werden über eine IEEE-Schnittstelle in den PC eingelesen. Das FIFO ist notwendig, da ein PC unter Linux nicht unter Echtzeitbedingungen arbeiten kann. Dieser Umbau war sehr komplex, da die ganze Software zum Scannen erneuert werden mußte. Sie wurde in Zusammenarbeit mit mehreren Mitgliedern des AIM ausgeführt und im Jahr 1996 in Betrieb genommen. Beteiligt waren Budell, Hiesgen, Sand, Schimpke, Ungruhe.

3.4.4 Das Schaltpult-Interface (panel interface; PI)

Das PI stellt die Verbindung zwischen dem Bedienungsschaltpult des Mikrodensitometers und der DU her. Die Schalter Density/Transmission, Manual/Auto und Display ON/OFF (s. Anleitung zum Betrieb der PDS 2020 GM Mikrodensitometer) müssen abgefragt werden. Dazu wird die Stellung der Schalter jeweils hochohmig abgenommen und mit einem Transistor verstärkt. Die Ausgänge steuern Optokoppler an, die sich auf der DU befinden und die Umschaltung im MD 3.2 bewirken. Durch die Optokoppler wird eine strikte Trennung zwischen der Stromversorgung des Mikrodensitometers und des MD 3.2 erreicht. Dadurch werden Probleme mit Brummschleifen vermieden.

Außerdem befindet sich auf dem PI das Relais zur Abschaltung der Hochspannung, die im Fehlerfall automatisch ausgelöst wird. Damit wird das Potentiometer für die Hochspannungseinstellung überbrückt und die Hochspannung auf null Volt heruntergefahren.

Als Hilfe zur Einstellung der Hochspannung befindet sich auf dem PI noch ein Komparator, der kurz vor dem unteren Anschlag des Potentiometers für die Hochspannung eine Leuchtdiode einschaltet. Damit soll verhindert werden, daß das Potentiometer überdreht wird.

Das PI wird aus der Stromversorgung des Schaltpultes des Mikrodensitometers versorgt. Wie oben bereits erwähnt wurde, müssen die Stromkreise strikt getrennt bleiben.

3.4.5 Das Netzteil (power supply unit; PSU)

Die sorgfältige Auslegung des Netzteils ist von entscheidender Bedeutung für die Funktion des Verstärker/Konverters. Bedingt durch die geringen Meßströme und die damit verbundene hohe Verstärkung muß die Gleichspannung sehr stabil sein und darf nur eine geringe Brummspannung besitzen. Die Störspannungen, die von robusten Baugruppen produziert werden, sollen nicht zu den empfindlichen Baugruppen gelangen können. Die Masseleitungen müssen so verlegt werden, daß keine Brummschleifen entstehen können.

Dazu wurde die Stromversorgung auf drei Einheiten verteilt. Die analogen Komponenten werden mit $\pm 19\text{ V}$ versorgt. (Auf dem ALU-Board wird die Versorgungsspannung noch einmal gesiebt und auf $\pm 15\text{ V}$ stabilisiert.) Für die digitalen Komponenten stehen zweimal 5 V zur Verfügung. Die erste digitale Versorgung speist die DLU und das DI. Die DLU hat direkte Verbindungen mit analogen Komponenten. Deshalb muß diese Versorgungsspannung so sauber wie möglich sein. Auf der DLU wurden durchgängig TTL-Gatter aus der HC-MOS-Familie verwendet. Diese zeichnen sich durch einen besonders geringen Stromverbrauch bei großem Störabstand aus. Die Störungen, die die DLU und das DI auf der ALU verursacht, liegen alle innerhalb der Einschwingzeit der analogen Komponenten, d.h. sie sind bis zur Messung abgeklungen. Die Anzeigeeinheit hat einen hohen Stromverbrauch, der zum Teil asynchron zum Takt der Konvertierung ist. Hauptausschlaggebend ist der Treiber für die Leuchtdiodenanzeige, die nach einem Multiplexverfahren mit etwa 400 Hz Takt arbeitet. Daher steht eine weitere 5 V -Stromquelle zur Verfügung.

Aufgrund des geforderten Störabstandes kommen nur linear geregelte Netzteile in Frage. Da die Strombelastung in allen Fällen unter 1 A liegt, gibt es keine Probleme mit der Abwärme. Als Regler wurden sogenannte Dreibeineinregler eingesetzt. Dadurch reduziert sich der Schaltungsaufwand erheblich. Die eingesetzten ICs LM 317 und LM 337 zeichnen sich durch eine besonders hohe Brummunterdrückung (80 dB) aus. Außerdem sind diese Regler in der Lage, Belastungen bis zu Frequenzen von 30 kHz bzw. 100 kHz auszuregeln.

3.4.6 Die Zusammenschaltung aller Komponenten

Besonders bei der Zusammenschaltung aller Komponenten und bei den Verbindungen zum Mikrodensitometer muß sorgfältig darauf geachtet werden, Brummschleifen zu vermeiden. Deshalb wird hier im Zusammenhang noch einmal auf kritische Verbindungen eingegangen und Lösungen vorgeschlagen.

Das Mikrodensitometer ist über die Masse der PMT mit der Erde verbunden. Die Verbindung von der PMT zum Verstärker/Konverter-Modul verbindet die gesamte Elektronik mit der Erde. Alle anderen Verbindungen mit dem Mikrodensitometer müssen erdfrei (Relais oder Optokoppler) ausgeführt werden. Das Gehäuse des Netzteils ist über den Netzanschluß mit der Erde verbunden. Die Massepunkte der geregelten Gleichspannungen werden erdfrei gehalten. Innerhalb des Verstärker/Konverter-Moduls sind alle Masseverbindungen sternförmig mit dem zentralen Massepunkt verbunden. Und nur dieser Massepunkt ist dann über das Mikrodensitometer mit Erde verbunden.

Eine weitere kritische Verbindung ist die Leitung für den digitalen Wert. Sie ist 12 Bit breit ausgeführt und verbindet das Verstärker/Konverter-Modul mit dem Daten-Interface und mit

der Anzeigeeinheit. Durch die Größe des Mikrodensitometers hat diese Leitung eine Länge von 4 m. Durch die schnellen Schaltvorgänge bedingt kommt es auf dieser Leitung zu hochfrequenten Schwingungen, die an den Leitungsenden reflektiert werden. Außerdem kann es zum Übersprechen zwischen den einzelnen Leitungen kommen. Es hat sich herausgestellt, daß diese Leitung am störungsfreiesten arbeitet, wenn Leitungstreiber/Empfänger in HC-MOS-Technologie benutzt werden. Die interne Schaltung dieser Bausteine erzeugt einen guten Leitungsabschluß. Für diese Verbindung wird ein 40-poliges Flachbandkabel benutzt. Zwischen jeder Leitung befindet sich eine Masseleitung, die ausschließlich zur Abschirmung benutzt wird und nur einseitig mit der Masse verbunden ist. Da insgesamt nicht genügend Leitungen zur Verfügung stehen, werden einige quasistatische Leitungen zur Abschirmung mitbenutzt. Die Start-Of-Conversion Leitung wurde als Koaxkabel ausgeführt. Auf diese Weise ist die Leitung optimal abgeschirmt. Die Abschirmung ist ebenfalls nur einseitig mit Masse verbunden.

3.4.7 Justierung des Verstärker/Konverter-Moduls

Die Meßgenauigkeit des Verstärker/Konverters ist höher als die der zur Verfügung stehenden Meßgeräte. Deshalb muß eine indirekte Justierung durchgeführt werden. Benötigt wird dazu eine einstellbare Spannungs- und Konstantstromquelle, ein 6-stelliges Digitalvoltmeter und ein Computer, der am DI angeschlossen werden kann. Damit werden die einzelnen Stufen der analogen Schaltung abgeglichen.

Die Verstärkerkette muß möglichst exakt auf eine Verstärkung von 10 eingestellt werden. Zur Justierung der Verstärkung werden Trimpotentiometer benutzt, die sich mit 20 Umdrehungen auf einen Widerstandswert einstellen lassen. Der Einstellbereich der Potentiometer beträgt weniger als 1% des benötigten Widerstandswertes für die Verstärkung 10. Die Auflösung der Potentiometer ist so gut, daß ein 6-stelliges Digitalvoltmeter zur Einstellung der Verstärkung benutzt werden sollte.

Im nächsten Schritt wird der Offset der Stufen eingestellt. Die Rechenverstärker der Verstärkerkette besitzen keine Offsettingstellung, da der Einstellbereich der nachfolgenden S/H-Stufen ausreicht, um den Offsetfehler der Verstärker mit auszugleichen. Da ab der dritten Stufe das Rauschen der Verstärker deutlich zu messen ist, kann hier das Digitalvoltmeter nicht mehr eingesetzt werden. Die Offsettingstellung muß mit statistischen Methoden erfolgen. Dazu werden Spannungswerte mit Hilfe eines Computers gesammelt und ausgewertet. Es wurde eine Reihe von Programmen entwickelt, mit deren Hilfe auch ein Offset bei stark verrauschten Daten erkannt wird.

Im letzten Schritt wird der I/U-Konverter eingestellt. Dazu wird der Eingang mit einem Strom von $100\ \mu\text{A}$ gespeist und das Potentiometer so eingestellt, daß der Ausgang des ADCs den Wert 4000 anzeigt. Dieser Wert ist als Dichte 0, bzw. Transmission 1 definiert.

Die genaue Prozedur der Justierung ist im Anhang beschrieben. Sie sollte erst durchgeführt werden, wenn der Verstärker/Konverter mehrere Wochen in Betrieb war und die Elektronik altern konnte. Dazu muß der Verstärker/Konverter nicht mit dem Mikrodensitometer verbunden sein.

Kapitel 4

Testmessungen mit dem Mikrodensitometer

Die Genauigkeit des Verstärker/Konverters wurde anhand einer Reihe von Testmessungen überprüft. Dabei ergaben sich auch neue Aspekte zur Anwendung der Mikrodensitometer. Zum Teil sind Messungen, die bereits im Zusammenhang mit der Diplomarbeit von H.-J. Tucholke (1983) gemacht wurden, wiederholt.

4.1 Die Reaktionsgeschwindigkeit des Verstärker/Konverters

Eine überzeugende Art die Geschwindigkeit des Verstärker/Konverters zu messen, ist die Benutzung einer scharfen Kante, z.B. einer Rasierklinge, über die abgetastet wird. Diese Messungen wurden bereits in Kapitel 3.1 (PE-Device) besprochen. Sie wurden für den neuen Verstärker/Konverter (MD 3.2) wiederholt. Zum Vergleich werden im Folgenden die Messungen mit dem PE-Device gezeigt.

Abbildung 4.1 zeigt die quasi-statische Digitalisierung einer scharfen Kante, gemessen mit dem PE-Device (s. S. 18). Abbildung 4.2 zeigt die Messung mit dem MD 3.2 bei einer Geschwindigkeit von 25 mm/s. Die Größe der Meßblende betrug $50\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$, die Schrittweite $1\ \mu\text{m}$. Auch hier wurde jeweils ein Scan in jede Richtung gefahren und in der Abbildung übereinander dargestellt. Beim Vergleich mit Abbildung 4.1 fällt auf, daß das Rauschen in den höheren Dichten deutlich größer wird, jedoch die Form des Signals keine Verzerrungen zeigt. Außerdem zeigt sich, daß die Signale, mit Ausnahme des Rauschens, unabhängig von der Digitalisierungsrichtung sind. Das niedrige Rauschen bei hohen Dichten in der Referenzkurve wird durch die starke Filterung des PE-Devices bewirkt. In Bild 4.3 sehen wir die Messung bei der Geschwindigkeit von 25 mm/s mit dem PE-Device.

Die Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigen einen Scan über eine scharfe Kante bei der maximalen mechanischen Geschwindigkeit des Gerätes von 200 mm/s. Hierbei muß eine Schrittweite von $10\ \mu\text{m}$ eingestellt werden, da sonst die Datenrate zu hoch für den Mikrocontroller des Mikrodensitometers ist. Es wurde ein $50\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ Meßspalt benutzt. Auch bei dieser Geschwindigkeit fallen die beiden Kurven (hell nach dunkel und dunkel nach hell) gut zusammen. Lediglich bei den hohen Dichten ist ein kleiner Unterschied zu erkennen, wenn man von hell nach dunkel fährt. Die Ursache ist in der Photo-Multiplier-Röhre (PMT) zu suchen. Einige freie Elektronen werden gestreut und driften länger, bis sie zur Anode gelangen. Dieser Effekt läßt sich vermeiden, wenn

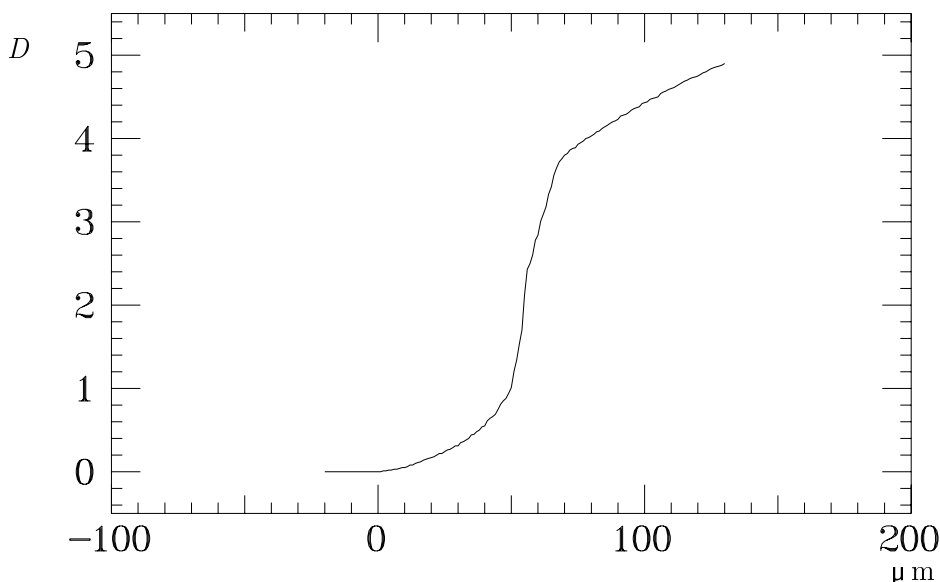


Abbildung 4.1: Der Verlauf der quasi-statischen Digitalisierung an einer scharfen Kante mit einem $50\ \mu\text{m}$ Meßblende. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

man die Dynamik reduziert. Mit Hilfe eines Neutralfilters kann man eine Grunddichte von 1 hinzufügen. Der daraus resultierende Strom ist nur $1/10$ so groß wie der Strom bei Dichte 0. Der anschließende Scan über eine scharfe Kante zeigt keine Unterschiede zwischen den Fahrtrichtungen, auch nicht in den hohen Dichten.

Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen die Darstellung eines Scans von Emissionslinien eines Ne-Fe-Spektrums. Es wurde ein $5\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ Spalt benutzt. Die Schrittweite betrug $2\ \mu\text{m}$, die Geschwindigkeit $40\ \text{mm/s}$. Damit wurde in beide Richtungen gefahren und die Kurven übereinander gelegt. Bild 4.6 zeigt die Messung mit dem MD 3.2, während Abbildung 4.7 zum Vergleich die Messung mit dem PE-Device zeigt. Bei der Messung mit dem PE-Device wird die Maximumsdichte nicht erreicht. Außerdem ist eine Abhängigkeit von der Scanrichtung deutlich zu erkennen. Bei dem MD 3.2 unterscheiden sich beide Kurven nur durch das Photonenrauschen bei hohen Dichten.

In den Abbildungen 4.8 und 4.9 sieht man die Isodensitendarstellung eines Sterns auf einer Kodak IIa-O-Platte. Die Isodensiten sind von außen nach innen auf die Dichten 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4 gelegt. Die Scanrichtung jeder zweiten Zeile ist entgegengesetzt zur vorhergehenden. Dieser Modus wird in der Praxis gerne benutzt, weil man das Zurückfahren der Photoplatte vermeidet. Dadurch spart man Zeit und die Mechanik wird nicht so stark belastet. Es wurde ein $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ Spalt benutzt. Die Schrittweite betrug $10\ \mu\text{m}$, die Geschwindigkeit $200\ \text{mm/s}$. Bild 4.9 zeigt die Messung mit dem PE-Device, während Bild 4.8 zum Vergleich die Messung mit dem MD 3.2 darstellt. Bei dem PE-Device zeigen sich von der Dichte 3 an richtungsabhängige Verzerrungen. Die Dichte 4 wird nicht erreicht. Mit dem MD 3.2 wird sie gemessen.

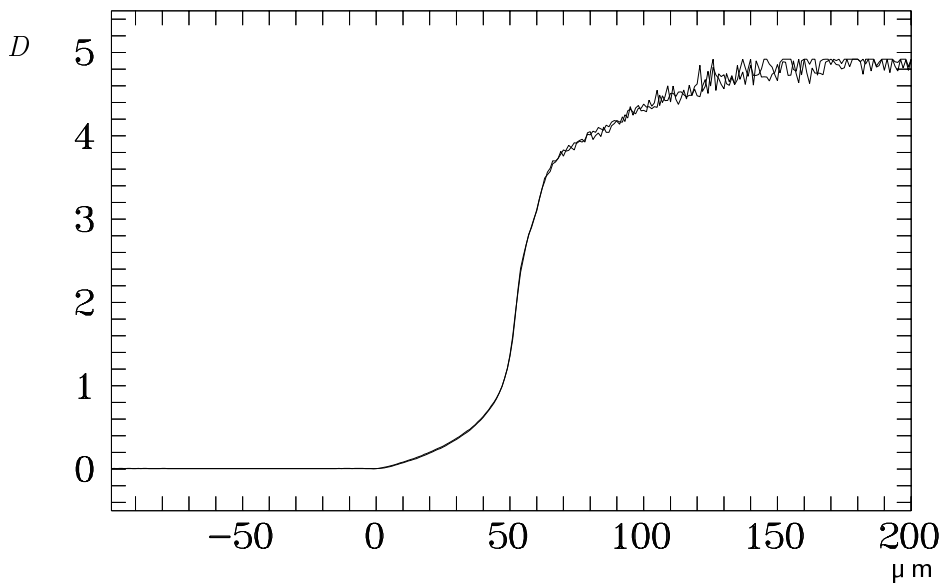


Abbildung 4.2: Scan über eine scharfe Kante mit dem MD 3.2 bei der Geschwindigkeit von 25 mm/s mit einer 50 μm Meßblende. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

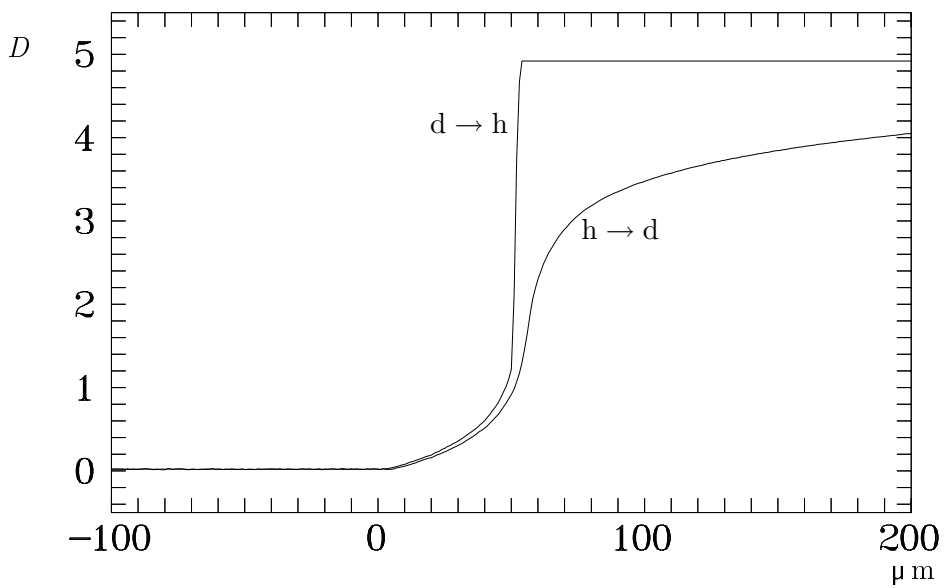


Abbildung 4.3: Scan über eine scharfe Kante mit dem PE-Device bei der Geschwindigkeit von 25 mm/s mit einer 50 μm Meßblende (s. Bild 3.5 d=dunkel, h=hell).

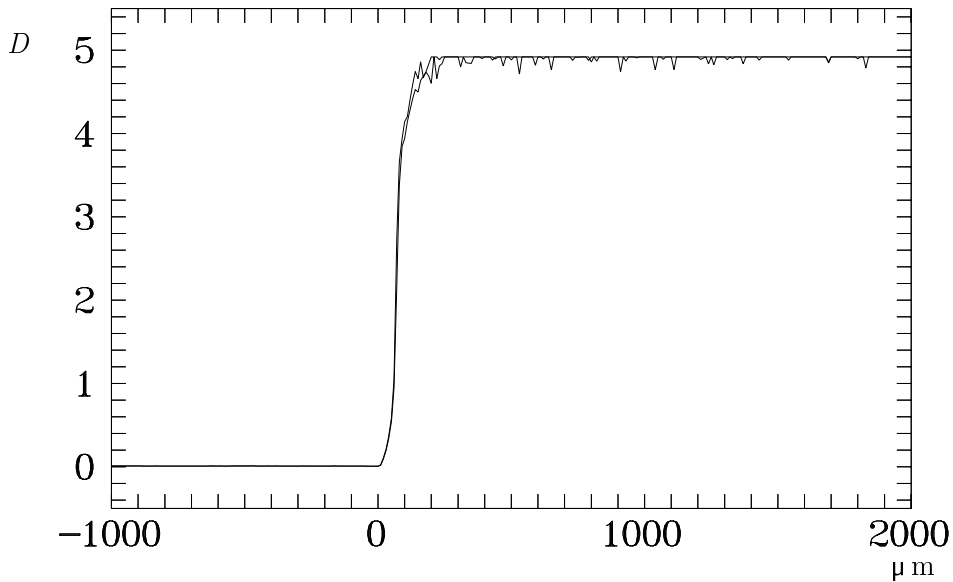


Abbildung 4.4: Scan über eine scharfe Kante mit dem MD 3.2 bei der Geschwindigkeit 200 mm/s mit einer 50 μm Meßblende. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

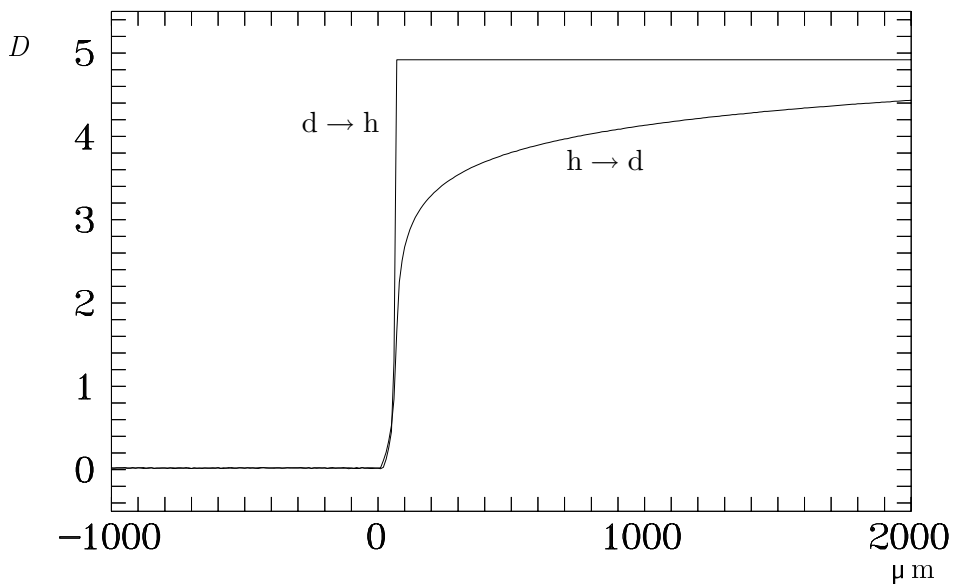


Abbildung 4.5: Scan über eine scharfe Kante mit dem PE-Device bei der Geschwindigkeit 200 mm/s mit einer 50 μm Meßblende. Der Nullpunkt ist auf die Stelle festgelegt, an der die Kante der Klinge mit der Kante der Meßblende zusammenfällt.

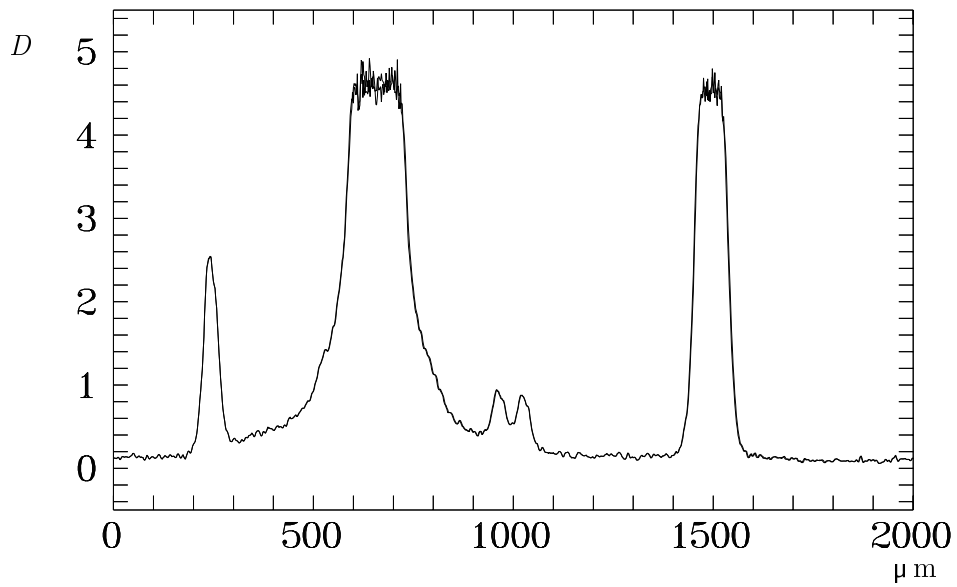


Abbildung 4.6: Scan von Emissionslinien eines Ne-Fe-Spektrums mit dem MD 3.2 bei einer Geschwindigkeit von 40 mm/s.

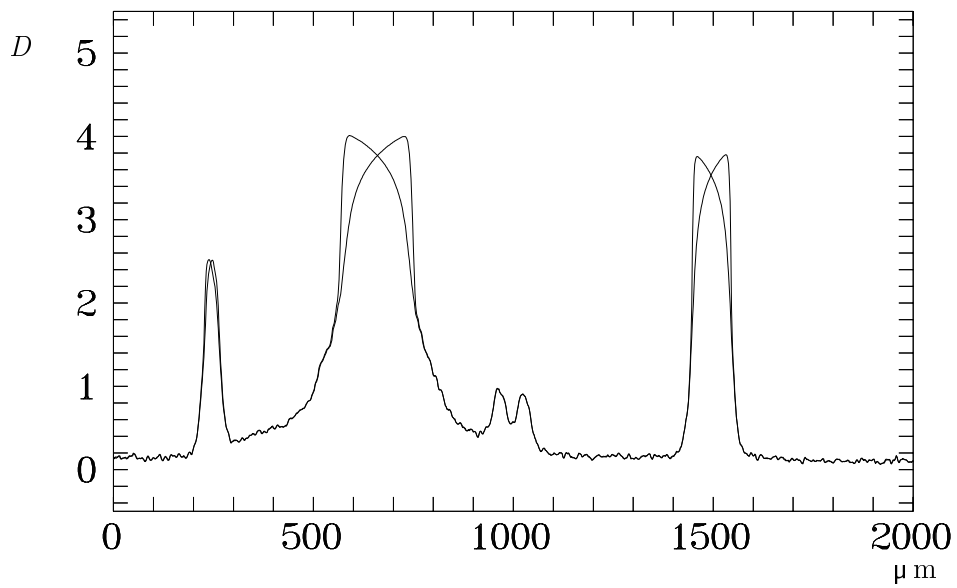


Abbildung 4.7: Scan eines Ne-Fe-Spektrums mit dem PE-Device bei einer Geschwindigkeit von 40 mm/s.

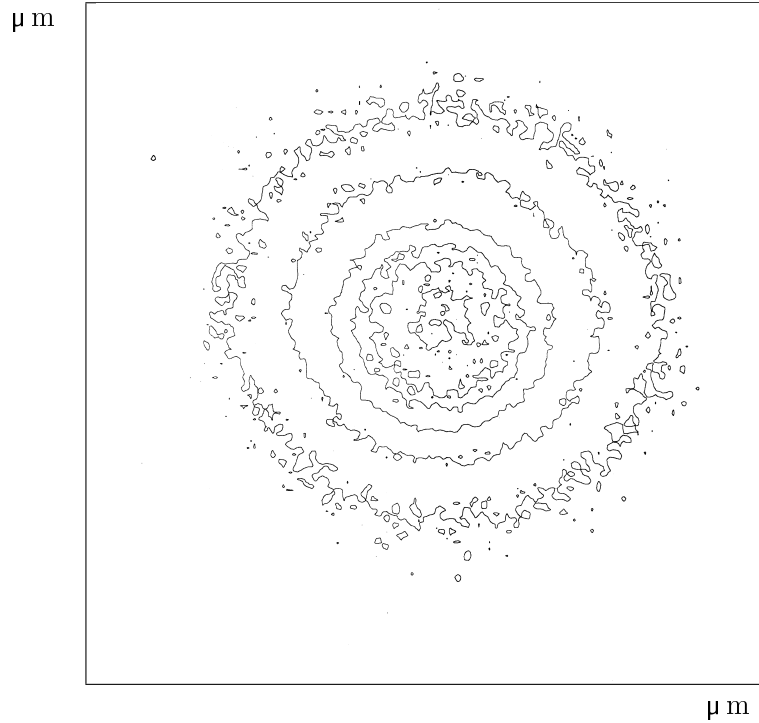


Abbildung 4.8: Isodensiten eines Scans von einem Stern mit dem MD 3.2 bei einer Geschwindigkeit von 200 mm/s.

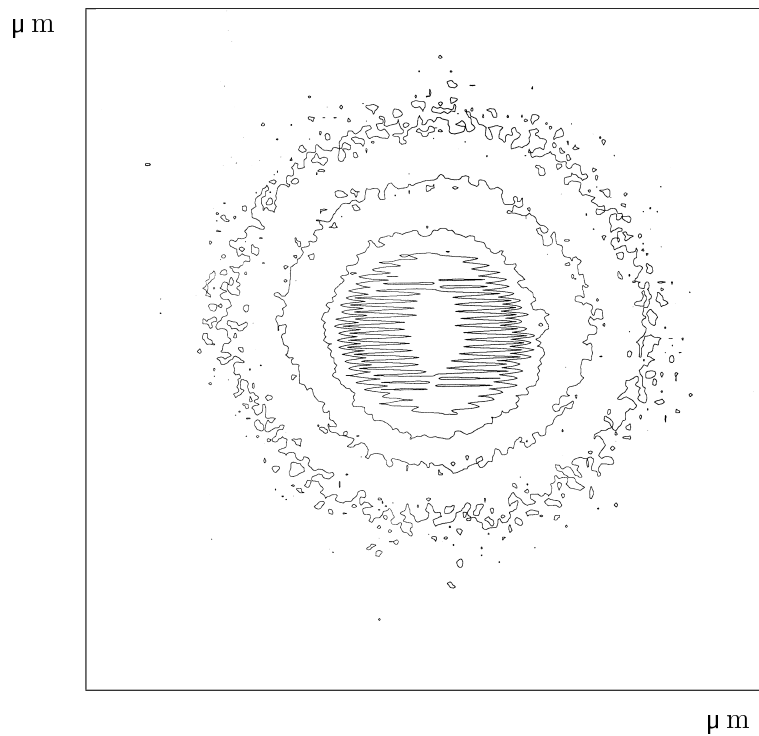


Abbildung 4.9: Isodensiten eines Scans von einem Stern mit dem PE-Device bei einer Geschwindigkeit von 200 mm/s.

4.2 Das Rauschen

Beim Messen mit Mikrodensitometern haben folgende Rauschquellen einen Einfluß auf die Genauigkeit der Messung: Instabilität der Lampe und der Stromversorgung, Rauschen im Positionsmesssystem, Ungenauigkeiten in der Glasplatte, die als Unterlage der Photoplaten bzw. Filme dient. Hinzu kommen das Rauschen der Photo-Multiplier-Röhre, das Elektronikrauschen im Verstärker/Konverter und das Photonenrauschen.

Das Photonenrauschen hat hier eine Sonderstellung. Da es vor dem Empfänger (die PMT) erzeugt wird, gehört es aus der Sicht des Verstärker/Konverters zum Signal. Verantwortlich dafür ist jedoch die Beleuchtungseinrichtung der Maschine. Aus der Sicht des messenden Astronoms ist das Photonenrauschen ein Effekt, der nicht zum untersuchenden Objekt gehört. Deshalb wird er im Zusammenhang mit dieser Arbeit ebenfalls untersucht.

Tucholke (1983) hat bereits eine Untersuchung von statistischen Fehlern des photometrischen Systems durchgeführt. Die Ergebnisse sind in seiner Arbeit angeführt, jedoch nicht interpretiert worden. Die Untersuchung wurde mit dem PE-Device durchgeführt. Wie wir bereits im vorhergehenden Kapitel gesehen haben, ist die Bandbreite des analogen logarithmischen Bausteins vom Eingangsstrom abhängig. Mit ansteigender Dichte (kleiner Eingangsstrom) werden die höheren Frequenzen zunehmend unterdrückt, da die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger abnimmt. Daher wird das Photonenrauschen in Abhängigkeit von der mittleren Dichte gefiltert. Das ist z.B. beim Vergleich der Abbildungen 4.6 und 4.7 deutlich zu erkennen.

4.2.1 Rauschen der Photo-Multiplier-Röhre

Das Rauschen der Photo-Multiplier-Röhre (PMT) zeigt sich hauptsächlich als Dunkelstrom. Der Dunkelstrom legt die untere Grenze der Dynamik fest, je nach Bedingungen zwischen 0.1 nA und 1 nA. Ein signifikanter Anteil zum Rauschen ist nur bei hohen Dichten zu messen.

Die größte Komponente des Dunkelstroms ist die thermische Emission der Elektronen an der Photokathode. Die Austrittsenergie der Elektronen soll so klein wie möglich sein, damit der Wirkungsgrad der PMT hoch ist. Aus dem gleichen Grund wird die Photokathode so groß wie möglich gemacht. Beides erhöht gleichzeitig auch die Wahrscheinlichkeit der thermischen Emission.

An den Dynoden findet ebenfalls thermische Emission statt. Diese trägt weniger zum Gesamtstrom bei, da die Verstärkung von Dynode zu Dynode immer geringer wird. Die thermische Emission könnte durch Kühlen der PMT deutlich verringert werden. Dazu wären jedoch große Umbauten der Mikrodensitometer notwendig.

Feldemission tritt bei hohen Potentialdifferenzen zwischen den Dynoden auf. Dieser Anteil wächst also mit der eingestellten Hochspannung. Eine hohe Verstärkung ist bei kleinen Meßblenden notwendig. Die Feldemission führt zu einem konstanten Strom, der sich zur thermischen Emission addiert und den Dunkelstrom erhöht. Die Hochspannung sollte also nur so hoch wie nötig eingestellt werden. Dabei ist jedoch auch die Untergrenze für die Hochspannung zu beachten, unterhalb der die PMT nicht mehr linear verstärkt.

In der PMT vorhandene Restgase werden ionisiert und können an der Photokathode oder an den Dynoden Elektronenlawinen auslösen. Da die kinetische Energie der Ionen sehr groß ist verglichen mit der Energie der Elektronen, haben die Stromimpulse eine große Amplitude. Eine Aussage über den Anteil am Dunkelstrom läßt sich allgemein nicht machen.

4.2.2 Photonenrauschen

4.2.2.1 Empfängerrauschen

Bei niedrigen Dichten ist die Intensität des Lichtes an der PMT so hoch, daß man es als einen kontinuierlichen Fluß von Photonen ansehen kann. Bei den hohen Dichten ist die Intensität um bis zu 5 Größenordnungen kleiner. Die Photonen können von der PMT einzeln registriert werden. Die Menge der Photonen, die innerhalb der Integrationszeit auf die Kathode der PMT auftreffen gehorchen der Poisson-Statistik. Daraus ergibt sich für das Rauschen $\sigma_n = \sqrt{n}$, wobei n die Anzahl der Photonen bedeutet. Die Anzahl der Photonen ist proportional zur Intensität I . Das n_0 ist die Anzahl der Photonen die bei einer klaren Platte auf die Kathode der PMT treffen. Dieser Wert untersteht zwar auch der Poisson-Statistik und hat daher einen Fehler, der aber wegen der großen Anzahl der Photonen in dieser Rechnung vernachlässigt werden kann. Daher wird n_0 als Konstante angenommen.

$$\text{Es gilt für die Dichte: } D = \log\left(\frac{n_0}{n}\right).$$

$$\text{Nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung folgt daraus: } \sigma_D = \frac{\sigma_n}{n \ln 10}.$$

$$\text{Mit: } n = \frac{\tau I_A}{e V(U_B)} \quad \text{und} \quad n_0 = \frac{\tau I_{A_0}}{e V(U_B)}$$

$$\text{ergibt sich: } D = \log\left(\frac{I_{A_0}}{I_A}\right) \quad \text{und} \quad \sigma_D = 6.957 \cdot 10^{-20} \frac{V(U_B)}{\tau I_A} \sigma_n.$$

Dabei ist:

$$\begin{aligned} e &= 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ V &= \text{Verstärkung} \\ U_B &= \text{Hochspannung der PMT} \\ \tau &= \text{Integrationszeit} \\ I_A &= \text{Anodenstrom} \\ I_{A_0} &= 100 \mu\text{A für das System des AIM.} \end{aligned}$$

Aus dem Ergebnis läßt sich ablesen, daß das Photonenrauschen mit sinkendem Kathodenstrom $I_K = \frac{I_A}{V(U_B)}$ (entsprechend höherer Dichte) ansteigt. Eine größere Verstärkung erhöht das Rauschen. Dies Problem läßt sich bei kleinen Meßblenden nicht umgehen. Eine mögliche Änderung, die das Problem umgeht, wäre die Optimierung der Integrationszeit pro Pixel. Die Zeitkonstante muß dann auf die Geschwindigkeit abgestimmt werden, da es sonst zu Verzerrungen kommt. Mit modernen Bausteinen kann die Integrationszeit individuell an die Geschwindigkeit angepaßt werden. Nur wenn die Meßzeit keine Rolle spielt, wie z.B. bei Spektren, kann das Photonenrauschen gut damit unterdrückt werden.

Wenn man die Integrationszeit und die Verstärkung zur Konstanten k zusammenfaßt und in die Formel für die Dichte einsetzt, erhält man:

$$\sigma_D = k 10^D \sigma_n.$$

Wenn man in einem Diagramm den Logarithmus des Rauschens gegen die Dichte aufträgt, sollte sich eine Gerade ergeben. Jede Abweichung von der Geraden zeigt das Vorhandensein zusätzlicher, signifikanter Rauschquellen an.

Die Messung wurde so durchgeführt, daß der X-Wagen nicht bewegt werden mußte. Die Konversion wurde mit Hilfe eines Taktgenerators gestartet. Die Taktfrequenz wurde auf 2 kHz eingestellt. Je 8192 Pixel wurden zu einer Zeile zusammengefaßt. Damit ergab sich beim Powerspektrum eine Frequenzauflösung von $\delta f \approx 0.25$ Hz. Pro Messung wurden 90 Zeilen registriert. Die Daten wurden direkt vom Daten-Interface abgenommen und mit einem Computer registriert. Insgesamt wurden 7 solcher Messungen durchgeführt, wobei bei jeder Messung die Grunddichte mit den Dichtefiltern des Mikrodensitometers erhöht wurde.

Zur Auswertung wurde über alle Pixel einer Messung gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Symbole zeigen die Werte der Messung an. Die dargestellte Kurve ist die beste Anpassung an die Meßpunkte. Zur Anpassung wurde eine Exponentialfunktion benutzt, da dies nach den obigen Überlegungen zu erwarten ist. Die Meßpunkte liegen sehr gut auf der entsprechenden Linie. Daraus kann geschlossen werden, daß die einzige signifikante Rauschquelle des photometrischen Systems das Photonenrauschen ist. In Abbildung 4.11 werden die Leistungsspektren der Messungen bei Dichte 0.24 und bei Dichte 3.80 gezeigt. Da der Bereich bis 100 Hz besonders interessant ist, wurde die Frequenzachse entsprechend gedehnt. (Die Spitze in der Abbildung 4.11 ist durch den Meßaufbau erzeugt worden, da im Gegensatz zum üblichen Meßbetrieb in dieser Untersuchung noch ein Frequenzgenerator zur Erzeugung der Start-Pulse und ein zusätzlicher Computer zum Sammeln der Daten angeschlossen waren. Die Leitungen waren zum Teil nicht sauber abgeschirmt und zum Teil waren Brummschleifen möglich.)

4.2.2.2 Rauschen, das im Lichtweg erzeugt wird

Bei einer weiteren Messung wurde der X-Wagen bewegt, jedoch kein Objekt aufgelegt. Die Messung sollte zeigen, wieviel Störung durch die Glasplatte eingeführt wird. Um Zusatzstörungen durch einzelne Staubkörner zu vermeiden, wurde der Fokus oberhalb der Glasplatte in die Luft verlegt. Die Schrittweite der Messung betrug $8 \mu\text{m}$ und die Geschwindigkeit 32 mm/s . Es wurden 8192 Pixel pro Zeile und 100 Zeilen gemessen. Daraus ergibt sich im Leistungsspektrum eine Frequenzauflösung von $\delta f \approx 0.5$ Hz. Die Messung wurde mit allen sieben Dichtefiltern wiederholt. Die Auswertung erfolgte wie oben beschrieben. Abbildung 4.12 zeigt das Ergebnis. Signifikante Abweichungen von der Geraden ergeben sich in den Bereichen der niedrigen Dichte, also dort wo das Photonenrauschen klein ist. In Abbildung 4.13 erkennt man die Ursachen für die Abweichungen. Die gemittelte Zeile zeigt eine deutliche Welligkeit, die mit wachsender Dichte immer stärker vom Photonenrauschen überlagert wird. Auch das Leistungsspektrum der Fouriertransformierten bestätigt diese Beobachtung. In Abbildung 4.14 sieht man einen Anteil der niedrigen Frequenzen im sonst weißen Rauschen.

Daraus läßt sich schließen, daß die Mechanik und die Glasplatte bei einer Messung ein niederfrequentes Signal erzeugen. Alle signifikanten Frequenzen liegen unter 10 Hz.

4.2.3 Verstärkerrauschen

Zum Rauschen des Verstärker/Konverters trägt hauptsächlich die Verstärkerkette bei. Je höher die Dichte wird, umso kleiner wird der Eingangsstrom. Deshalb muß die notwendige Verstärkung erhöht werden, damit der ADC immer im optimalen Arbeitsbereich angesteuert wird. Durch die Erhöhung der Verstärkung wächst jedoch auch das Rauschen der Verstärker an. Die Haupttrauschquelle in der Verstärkerkette ist der I/U-Konverter. Die Schaltung erfordert einen Rechenverstärker mit sehr hohem Eingangswiderstand. Die dazu erforderliche Technologie hat

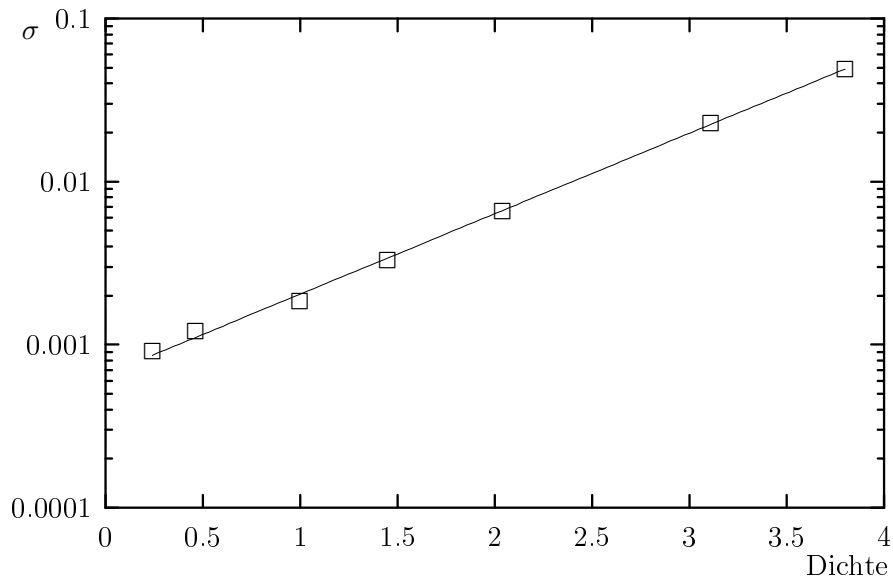


Abbildung 4.10: Standardabweichung gegen mittlere Dichte ohne Bewegung des X-Wagens.

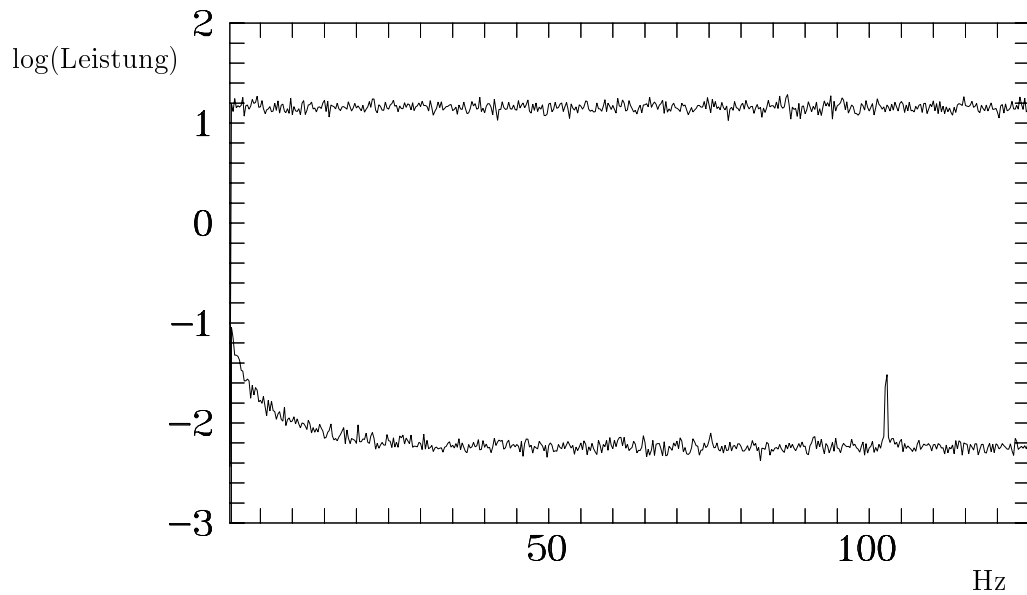


Abbildung 4.11: Leistungsspektren von Scans bei den mittleren Dichte 0.24 (unten) und 3.8 (oben) ohne Bewegung des Wagens. Die Spitze bei etwa 100 Hz wurde durch den speziellen Meßaufbau erzeugt.

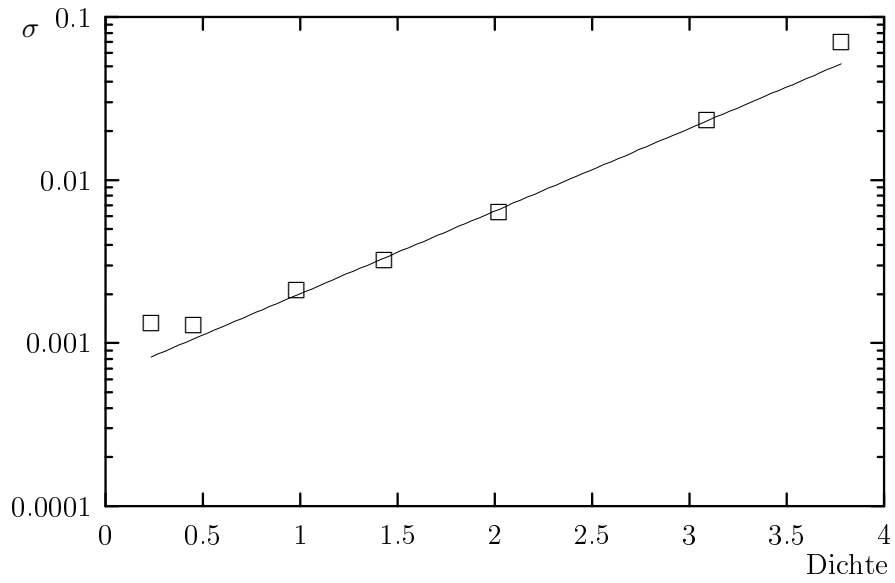


Abbildung 4.12: Standardabweichung gegen mittlere Dichte mit Bewegung des X-Wagens.

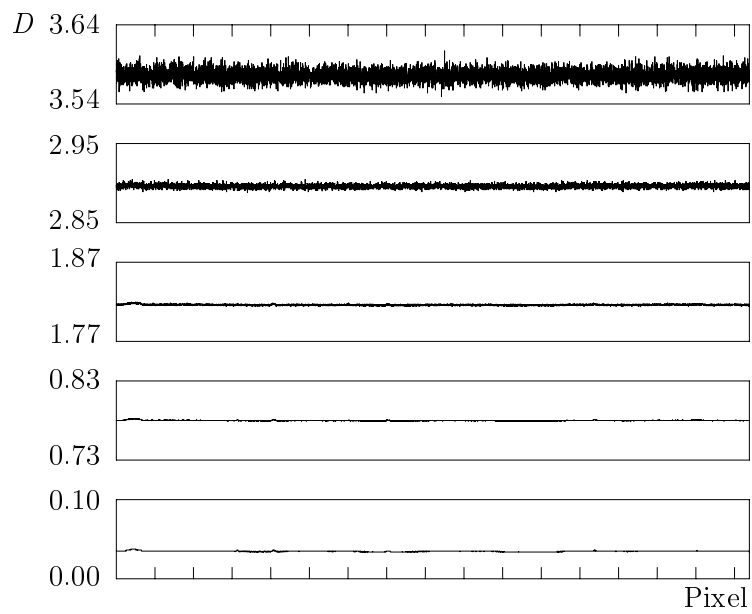


Abbildung 4.13: Darstellung des Dichteverlaufs bei 5 verschiedenen mittleren Dichten mit Bewegung des X-Wagens.

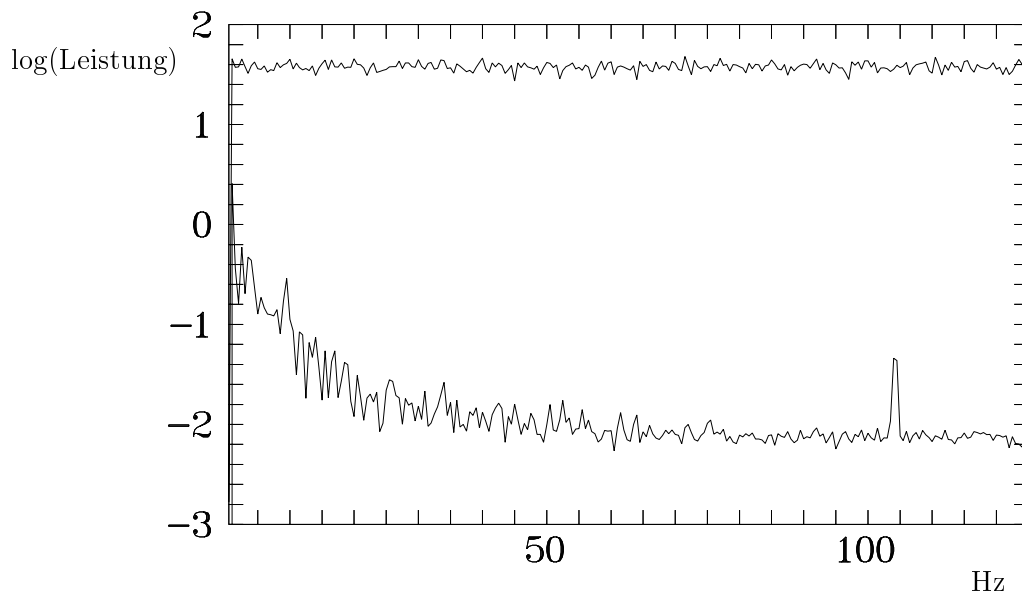


Abbildung 4.14: Leistungsspektren eines Scans bei der mittleren Dichte 0.24 (unten) und 3.8 (oben) mit Bewegung des X-Wagens. Die Spitze bei etwa 100 Hz wurde durch den speziellen Meßaufbau erzeugt.

den Nachteil, daß die Eingangsrauschspannung relativ groß wird. Diese Rauschspannung wird anschließend bis zu bis zu 10 000 fach verstärkt.

Die Rauschspannung für den I/U-Konverter und die 1. und 2. Verstärkerstufe liegen unterhalb der Auflösung des ADCs und brauchen somit nicht weiter beachtet werden. Zur Messung der Rauschspannung der Verstärkerstufen 3 und 4 wurde die Festspeichertabelle auf lineare Auslesung umgeschaltet und die Offsetspannung so weit in den positiven Bereich verschoben, daß alle Rauschspitzen gemessen werden konnten; die Daten wurden mit einem Computer registriert.

Der Meßaufbau erzeugte in der Registrierung eine 50 Hz-Brummspannung, die nicht zur eigentlichen Rauschspannung zu rechnen ist. Diese Frequenz wurde deshalb vor der Auswertung vom Meßsignal abgezogen. Dazu wurde eine Sinusfunktion an die Daten angepaßt und anschließend abgezogen. Dabei wurde auch die Offsetspannung wieder subtrahiert.

Für die Verstärkerstufe 3 ergibt sich eine maximale Rauschspannung von etwa 12 mV, gemessen von Spitze zu Spitze. Für die Verstärkerstufe 4 beträgt die Amplitude der Rauschspannung etwa 120 mV. Daraus ergibt sich im schlimmsten Fall ein Fehler von $\pm 6\%$ bei der Dichte 5.

4.3 Nichtlinearitäten in der Dichteskala

Das Konzept des Verstärker/Konverters kann bei nachlässiger Auslegung der Elektronik zu Sprüngen führen. Die Messung der Nichtlinearitäten ist nicht einfach und ist mit anderen Quellen von Nichtlinearitäten des Mikrodensitometers verknüpft. In den folgenden Abschnitten werden einige Nichtlinearitäten, die in der Dichteskala auftreten, genauer untersucht.

4.3.1 Digitalisierungsfehler in der Festspeichertabelle

Bei der Erstellung der Tabelle zur Transformation vom Meßsignal in Dichte wurde für jedem Transmissionswert der Dichtewert berechnet. Da die Herstellerelektronik nur eine Genauigkeit von 12 Bit zuläßt, muß entsprechend gerundet werden. Dadurch kommt es zwangsläufig zu Digitalisierungsfehlern.

Für die 4 000 Transmissionswerten pro Verstärkerstufe wurden 800 unterschiedliche Dichtewerte berechnet. Es kann also für mehrere Transmissionswerte ein einziger Dichtewert existieren. Die Häufigkeit eines Dichtewerts hängt von Rundungsfehlern bei der Erstellung der Tabelle ab. Bild 4.15 zeigt das Histogramm mit der Häufigkeit der entsprechenden Dichtewerte. Daraus ergibt sich, daß nicht alle Dichtewerte bei einer Messung gleich wahrscheinlich sind.

Abbildung 4.16 zeigt die Auswirkung bei einem Scan. Hier wurde ein Himmelsbereich von $2048 \text{ Pixeln} \times 2048 \text{ Pixeln}$ auf einer original ESO-Schmidtplatte gemessen und aus den Daten das Histogramm erstellt. Wenn aus den Histogrammen von Scans, die mit dem MD 3.X Verstärker/Konverter gemacht wurden, Schlüsse gezogen werden, muß man diesen Effekt bei Analysen berücksichtigen.

Der Effekt läßt sich nach dem bisher beschriebenen Konzept prinzipiell nicht vermeiden. Dagegen ließe sich die Benutzung der Tabelle verhindern. Dazu müßten die 15 Bit, die als Adresse für die Tabelle benutzt werden, auf den Scan Computer übertragen werden. Dieser berechnet dann die Dichtewerte als 32 Bit Fließkommazahlen. Eine andere Möglichkeit wäre die Benutzung eines Mikrorechners, der anstelle der vorprogrammierten Tabelle eingesetzt wird. Anschließend müßte eine 32 bit Fließkommazahl übertragen werden. Beide Optionen waren zur Zeit der Konstruktion des MD 3.X nicht möglich, da nur eine Datenübertragung in 12-Bit Breite möglich war. Der Verstärker/Konverter ist jedoch auf beide Alternativen vorbereitet.

4.3.2 Nichtlinearitäten in der Verstärkerschaltung

Idealerweise arbeiten Rechenverstärker streng linear. Im realen Fall ist das streng nicht immer gegeben. Durch eine geeignete Auswahl der Bausteine können die Abweichungen von der Linearität jedoch minimiert werden. Alle im Zusammenhang mit den Meßmaschinen benutzten Rechenverstärker wurden nach niedriger Offsetdrift ausgesucht. Dadurch wird verhindert, daß die zu erwartenden Temperaturänderungen zu deutlichen Verschiebungen der Offsetschaltung führen. Andernfalls können bei der Umschaltung der Verstärkung Sprünge auftreten.

Die Messung der Linearität gestaltet sich schwierig. Notwendig wäre eine einstellbare Konstantstromquelle für den Bereich von $100 \mu\text{A}$ bis 0.1 nA gewesen. Eine solche Stromquelle stand jedoch nicht zur Verfügung. Daher wurde eine indirekte Meßmethode benutzt. Für die Messungen stand ein kontinuierlicher Graukeil mit einer Dynamik von Dichte 0 bis 1.8 zur Verfügung. Dabei handelte es sich um ein keilförmig geschliffenes Grauglas. Zur Stabilisierung wurde ein ebenfalls keilförmig geschliffenes Klarglas dagegen gekittet. Da die zwei Gläser unterschiedliche Brechungsindizes haben, ist der Fokus und damit die gemessene Dichte vom Ort auf dem Graukeil abhängig. Dabei überlagern sich zwei Effekte: die Nichtlinearität der Dichteskala durch Defokussierung (Hiesgen 1988) und die mögliche Nichtlinearität des Verstärker/Konverters. Hinzu kommt eine Nichtlinearität durch die PMT (Tucholke 1983), die im Kapitel 4.3.3 genauer betrachtet wird.

Zur Messung der Nichtlinearitäten des Verstärker/Konverters wurde eine Hochspannungseinstellung gewählt, bei der die Nichtlinearitäten durch die Hochspannung minimal sind. Die Fehler

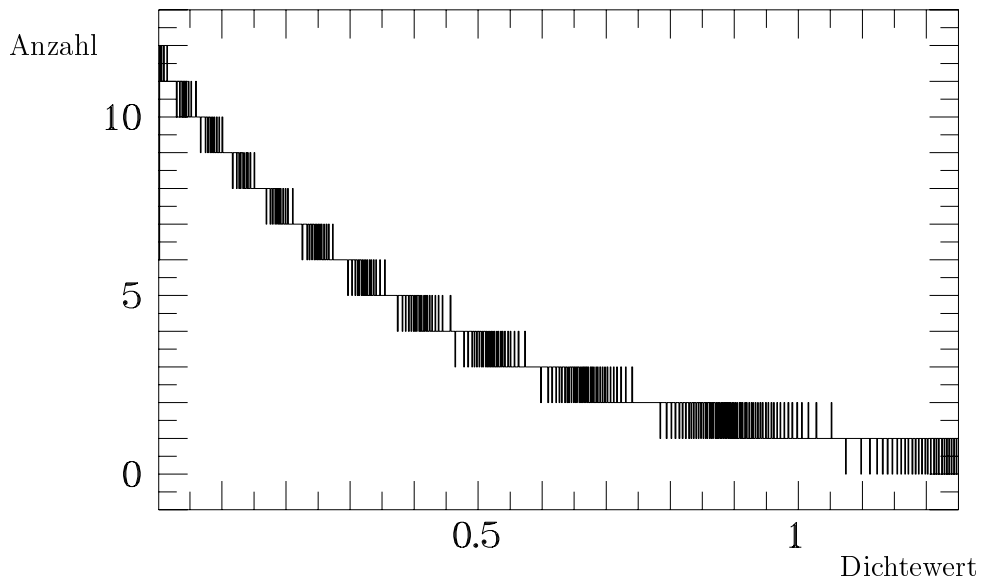


Abbildung 4.15: Häufigkeit der Dichtewerte in der Tabelle zur Logarithmierung.

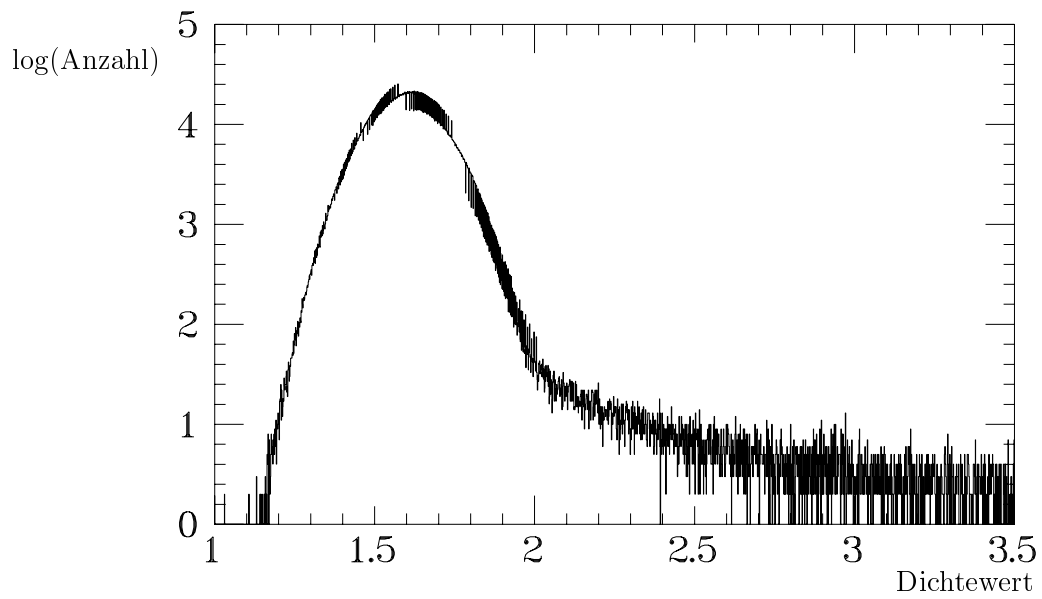


Abbildung 4.16: Histogramm des Scans einer original IIIa-F-Platte.

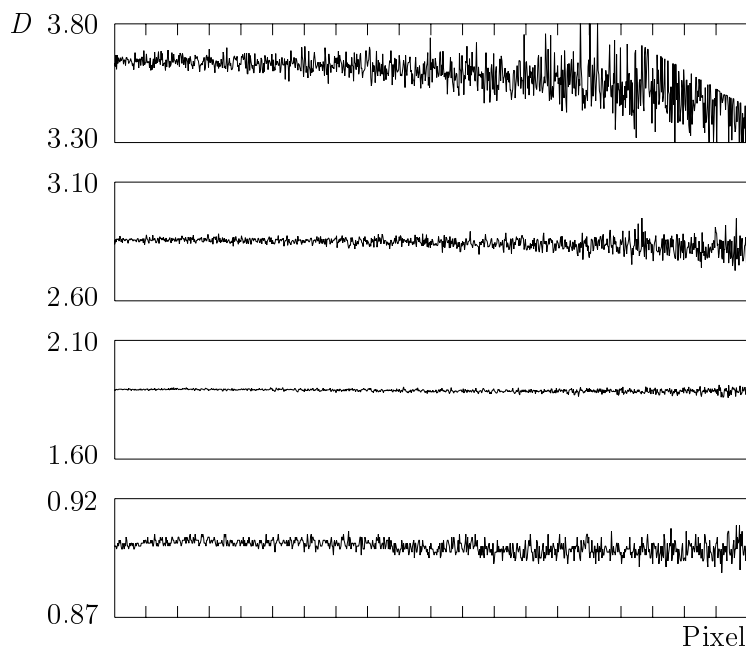


Abbildung 4.17: Dichtedifferenzen der Messungen am Graukeil. Von unten nach oben sind die Profile für $D=1$, $D=2$, $D=3$, $D=3.8$ relativ zur Grunddichte $D=0$ dargestellt.

des Graukeils einschließlich der Defokussierung lassen sich durch Differenzbildung zweier Abtastungen eliminieren, wenn die optischen Parameter des Mikrodensotometers nicht verändert werden. Bei der zweiten Abtastung wurde der Dichtebereich mit Hilfe eines Neutralfilters konstant verschoben wurde. Damit werden auch eventuelle Nichtlinearitäten des Verstärker/Konverters verschoben. Nach der Bildung der Differenz sollte sich eine Konstante ergeben mit der Dichte des Neutralfilters. Alle Abweichungen von der Konstanten deuten auf Nichtlinearitäten des Verstärker/Konverters hin.

Das Ergebnis ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Es wurde jeweils die Differenz der Messung mit den Grunddichte $D=1$, $D=2$, $D=3$ und $D=3.8$ relativ zur Messung bei der Grunddichte $D=0$ gebildet. Es sind keine Sprünge oder Abweichungen von der Linearität zu beobachten. In der Grafik mit der Grunddichte $D=3.8$ erkennt man den Übergang des Rauschens in die Sättigung.

4.3.3 Nichtlinearität der Photo-Multiplier-Röhre

Die Verstärkung des Stroms innerhalb einer PMT ist abhängig von der Potentialdifferenz zwischen den jeweiligen Dynoden, vom Material der Dynoden und von der Anzahl der Dynoden.

Bei der PDS 2020 GM wird die Verstärkung der PMT so an die benutzten Blenden angepaßt, daß der Ausgangsstrom für Dichte 0 immer bei $100 \mu\text{A}$ liegt. Die Hochspannungsversorgung der PMT

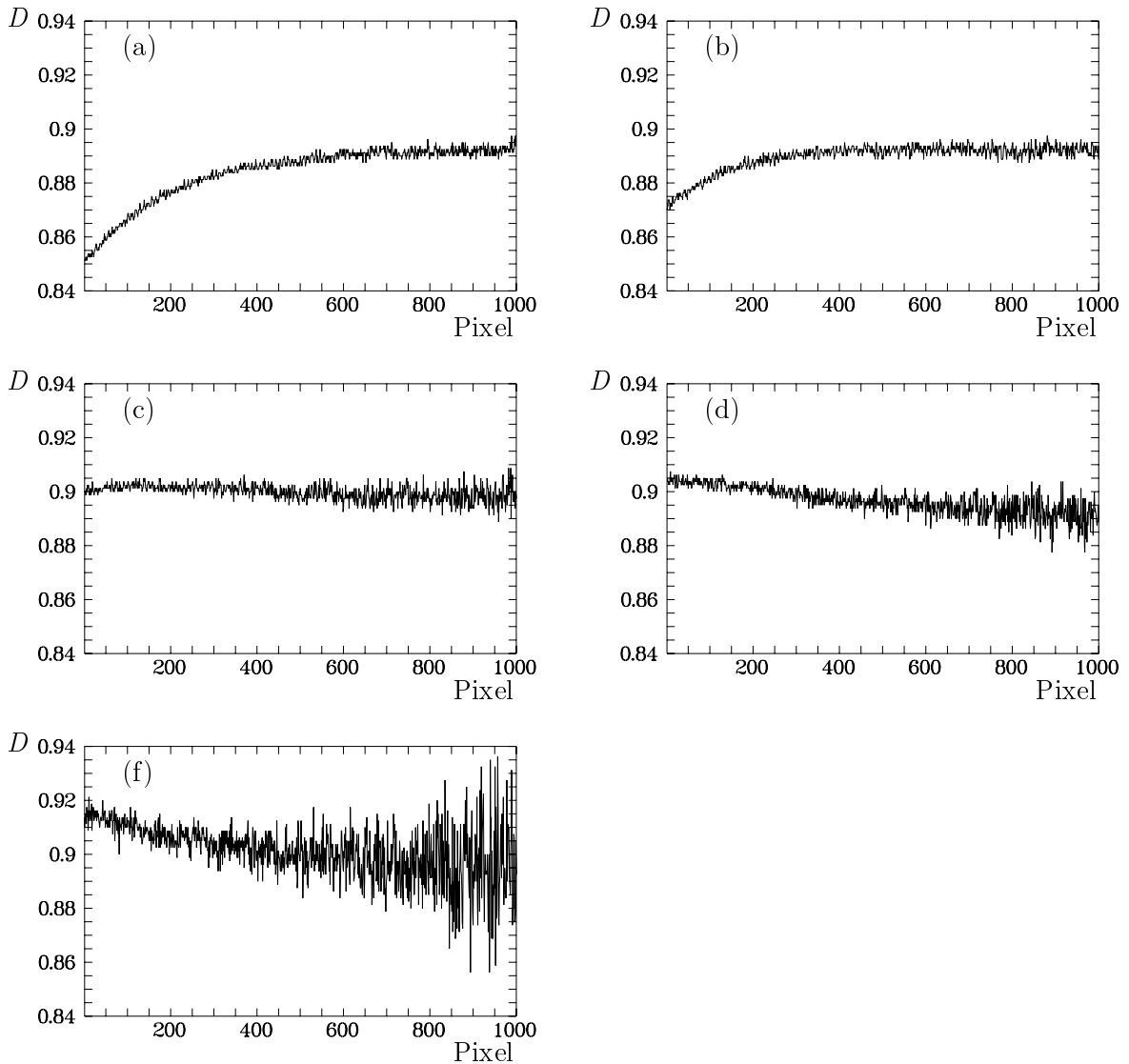


Abbildung 4.18: Differenz der Grunddichten $D=1$ und $D=0$ bei einer Hochspannung der Skaleneinheiten: (a)225 (b)250 (c)295 (d)360 (e)475.

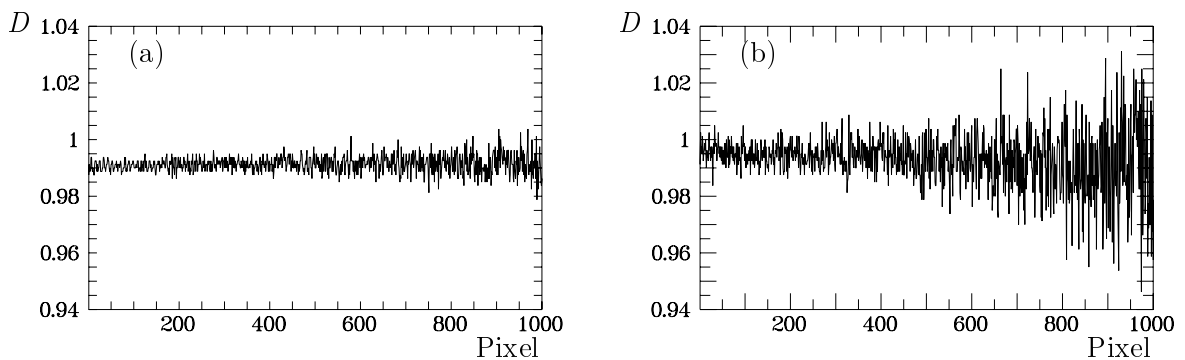


Abbildung 4.19: Differenz der Grunddichten $D=2$ und $D=1$ bei einer Hochspannung der Skaleneinheiten: (a)225 (b)360.

kann entsprechend justiert werden. Im allgemeinen geht man davon aus, daß die Spannung an den Dynoden während einer Messung konstant bleibt. Das ist jedoch nicht der Fall. Üblicherweise werden die Spannungen für die Dynoden aus einer Spannungsteilerkette gewonnen. Dabei ist es für die Konstanz der Spannung wichtig, daß der Strom durch die Spannungsteilerkette wesentlich größer ist als der Strom, der durch die Dynoden fließt. Im praktischen Gebrauch hat sich herausgestellt, daß der Strom im Spannungsteiler mindestens zehnmal so groß sein muß, wie der Strom durch die Dynoden. Nach dem Ohmschen Gesetz sinkt der Strom mit abnehmender Spannung. Wenn kleine Dichten gemessen werden, fließt ein großer Strom durch die Dynoden. Dadurch kommt es zu Spannungseinbrüchen an den Dynoden und die Verstärkung sinkt ab. Der Anodenstrom ist nicht mehr proportional zur eingestrahnten Lichtintensität.

Die Messung erfolgt ähnlich wie in Abschnitt 4.3.2. Ein kontinuierlicher Graukeil wird abgetastet. Für die verschiedenen Scans wurde die Grunddicke mit Hilfe der Neutralfilter verschoben. Bei diesem Test (im Gegensatz zu Kapitel 4.3.2) wurde aber die Hochspannung variiert. Dabei mußte für jede Hochspannung eine andere Meßblende gewählt und damit auch der Fokus eingestellt werden. Die optischen Parameter blieben innerhalb einer Meßreihe konstant. Durch das Einfügen der Neutralfilter wird die PMT mit verschiedenen Strömen bei gleicher Spannung betrieben. Durch die Differenzbildung zweier Messungen eliminieren sich die Nichtlinearitäten durch den Graukeil und durch die Defokussierung. Die Differenz müßte für alle Pixel eine Konstante ergeben. Falls es Änderungen in der Verstärkung der PMT während eines Scans gibt, so ist das als Abweichung von der Konstanten zu sehen.

Da die größten Abweichungen von der Linearität im Bereich der niedrigen Dichten (= hoher Strom der Dynoden) zu erwarten sind, wurde jeweils die Differenz der Messung mit einer Grunddicke von $D=1$ zu $D=0$ gebildet. Die angegebene Hochspannung entspricht jeweils der Skala des Drehpotentiometers am Schaltpult des Mikrodensitometers. Die Ergebnisse ist in Abbildung 4.18 zu sehen. Das Optimum liegt etwa bei einer Hochspannung von 300. Bei größeren Hochspannungen gibt es wieder deutliche Abweichungen von der Linearität, die zur Zeit nicht erklärt werden können.

In Abbildung 4.19 ist die Differenz von der Grunddicke $D=2$ relativ zu $D=1$ für die Hochspannung (a) 225 Skaleneinheiten und (b) 360 Skaleneinheiten dargestellt. Im Gegensatz zur vorherigen Abbildung fließt hier ein Strom durch die Dynoden, der nur $1/10$ des Stroms der anderen Messungen entspricht. In diesem Falle ist die Konstanz der Spannungen an den Dynoden deutlich besser, obwohl die eingestellten Hochspannungen bei den Messungen aus Abbildung 4.18 (a) und (d) deutliche Fehler zeigt.

4.3.4 Nichtlinearitäten durch den optischen Aufbau

Da wir es bei den Mikrodensitometern mit sehr kleinen Blenden zu tun haben, können wir den optischen Aufbau nicht mehr rein geometrisch betrachten. Die Beleuchtung des Meßobjekts durch eine Halogenlampe führt zu teilweise kohärentem Licht, so daß es zu Beugungen kommt. Das gebeugte Licht kann unter Umständen außerhalb der Meßblende liegen, so daß die gemessene Intensität nicht mehr proportional zur eingestrahnten Intensität ist. Diesen Umstand kann man vermeiden, wenn die Meßblende sehr viel größer ist als die Beleuchtungsblende. Die Theorie dazu ist vielfach beschrieben, man kann sie z.B. bei Swing (1972), Kinzly (1972) und Reynolds & Smith (1973) nachlesen.

Bei den Mikrodensitometern des AIM ist die Meßblende kleiner als die Beleuchtungsblende (50% der Fläche). Damit sind die Kriterien einer linearen Intensitätsübertragung nicht mehr gegeben.

Tabelle 4.1: Maße der Beleuchtungs- und Meßblenden.

Nr.	Bezeichnung	Beleuchtungsblende	Meßblende
1	B1	25 μm \times 25 μm	20 μm \times 20 μm
2	B2	12.5 μm \times 12.5 μm	10 μm \times 10 μm
3	B3	8.2 μm \times 8.2 μm	6.7 μm \times 6.7 μm
4	B4	6.1 μm \times 6.1 μm	5 μm \times 5 μm
5	B5	6.1 μm \times 6.1 μm	50 μm \times 50 μm

Eine Reihe von Experimenten wurden durchgeführt, die klären sollten, ob in der Praxis eine signifikante Verfälschung des Meßsignals vorliegt.

Eines der Experimente sollte klären, ob die Dichteskala bei der Verwendung verschiedener Blenden unterschiedliche Ergebnisse zeigt. Als Testobjekt wurde ein Film mit 5 verschiedenen Graustufen belichtet benutzt. Der Film wurde mit 5 unterschiedlich großen Blendenkombinationen gemessen. Die Größen der Blendenkombinationen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Bei vier Messungen wurde, wie im Meßbetrieb üblich, für jede Meßblende eine Beleuchtungsblende benutzt, deren Fläche um 50% größer war. Bei der 5. Messung wurde die Meßblende wesentlich größer gewählt als die Beleuchtungsblende.

Üblicher weise wird vor einer Messung die Verstärkung der PMT mit Hilfe der Hochspannung so eingestellt, daß mit der gewählten Blende die Dynamik des PTMs maximal ausgenutzt werden kann.

Bei diesen Messungen wurde jedoch die Hochspannung konstant gehalten, damit Nichtlinearitäten durch die Hochspannung ausgeschlossen werden können. Die Hochspannung wurde für die Blende B4 justiert, da es die kleinste Blende ist und daher die höchste Verstärkung in dieser Meßreihe benötigt. Bei den anderen Blenden ist die Intensität des Lichts größer und deshalb muß jeweils ein Neutralfilter eingeschaltet werden, um bei gleicher Einstellung die PMT nicht zu überlasten. Lediglich die Blendenkombination B5 hatte eine abweichende Hochspannungseinstellung, da sie ursprünglich zu einer anderen Meßreihe gehörte. Da sich aber bei der Auswertung keine signifikante Abweichung von den anderen Messungen zeigte, kann davon ausgegangen werden, daß dieser Unterschied nichts ausmacht.

Auf jeder Graustufe des Films wurden in 5 Meßgängen jeweils 20 000 Pixel gemessen, über die das arithmetische Mittel gebildet wurde. Dieser Meßgang wurde 5 mal gemacht. Von den Dichten der einzelnen Meßgänge wurde jeweils die Dichte der klaren Emulsion abgezogen. Dadurch bekommen alle Messungen einen einheitlichen Nullpunkt, der unabhängig von der individuellen Justierung ist.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.20 zu sehen. Für jede der 5 Graustufen wurde die mittlere Dichte aus den Messungen der Blenden B1, B2, B3 und B5 der Mittelwert bestimmt. Die Blende B4 wurde nicht dazugerechnet, weil die Abweichungen von den anderen Werten sehr groß sind. Aufgetragen wurde für alle Spaltkombinationen die Differenz zu dem Mittelwert der entsprechenden Graustufe.

Fast alle Spaltkombinationen zeigen nur wenig Abweichung von der Durchschnittsdichte. Lediglich die Blende B4 zeigt große Abweichungen. Diese Blenden sind bereits so klein, daß Beugungsmaxima ausgeblendet werden können. Die Beugungen entstehen einmal an der Beleuchtungsblende und zum anderen an den Körnern des Films. Die gemessenen Dichten mit der Blende B4 sind alle größer, als die Dichten von den anderen Blenden.

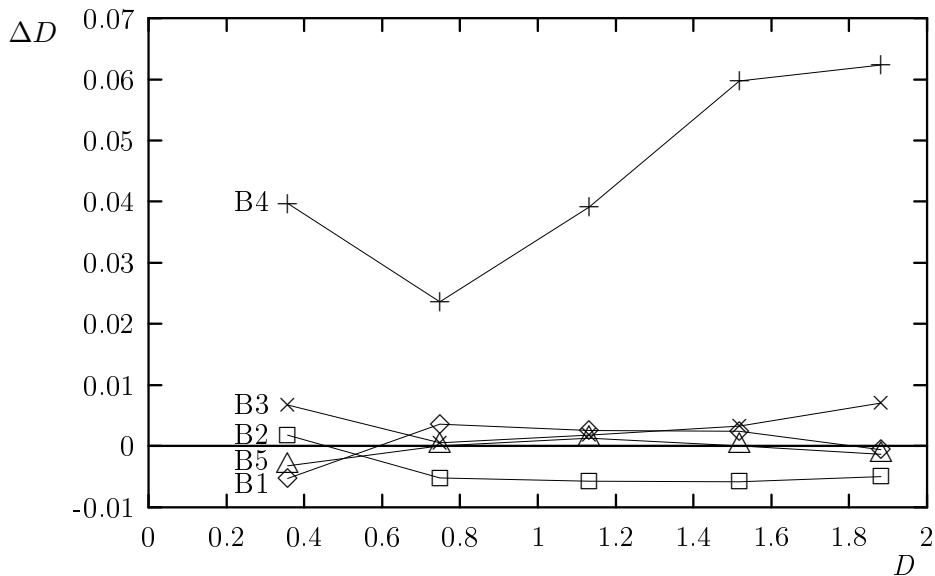


Abbildung 4.20: Abweichung der Dichte bei einzelnen Spaltkombinationen von der mittleren Dichte bei der entsprechenden Graustufe.

Interessant ist das Ergebnis der Blendenkombination B5. Diese Messung nähert sich am besten von allen den Mittelwertdichten an. Durch die wesentlich größere Meßblende werden viele Beugungsmaxima gesammelt, so daß trotz des kleinen Beleuchtungsspalt die Beugungen das Meßergebnis nicht beeinflussen. Das entspricht auch den theoretischen Ergebnissen aus den oben zitierten Arbeiten. Die Meßoptik hat keinen Einfluß auf die Dichteskala, solange der Winkel, mit dem das Licht gesammelt, wird sehr viel größer ist als der Winkel, mit dem beleuchtet wird. Weitere Untersuchungen sollten an dieser Stelle erfolgen.

Für den praktischen Meßbetrieb bedeutet dieses Ergebnis, daß es besser ist, wenn die Meßfläche durch die Beleuchtungsblende definiert wird und die Meßblende deutlich größer gewählt wird. Dann kann das Problem der Drift der Blenden ohne einen Verlust an Genauigkeit beseitigt werden. Der Nachteil ist, daß die Messung anfälliger gegen Streulicht wäre. Wenn aber die Raumbeleuchtung ausgeschaltet wird, ist der Einfluß nicht meßbar, wie im Folgenden gezeigt wird.

4.4 Einfluß der Raumbeleuchtung auf die Messung

Im Folgenden soll die Frage beantwortet werden, wieviel Einfluß Lichtquellen im Meßraum auf die Messung haben. Als Meßobjekt wurde eine Standard IIIa-J-Platte gewählt, die wie üblich auf dem Glastisch befestigt war. Auf der Photoplatte wurden jeweils ein Feld mit klarer Emulsion und ein Feld hoher Dichte gemessen. Da Dichten über 5.12 mit der PDS 2020 GM nicht mehr direkt gemessen werden können, wurde ein Neutralfilter der Dichte 3.72 in den Strahlengang eingeführt. Dadurch wurde es möglich, die Hochspannung soweit zu erhöhen, daß die klare Emulsion auf den Wert $D=0.2$ eingestellt werden konnte. Nach dem Ausschalten des Dichtefilters ergibt sich die reale Dichte aus dem Meßwert plus der Dichte des Graufilters minus der Grunddichte. (Die klare Emulsion darf jetzt nicht mehr bei eingeschalteter Meßlampe gemessen werden, da die PMT sonst überlastet wird.)

Zur Messung des Streulichts wurde die Meßlampe ausgeschaltet und die Deckenbeleuchtung eingeschaltet. Das Streulicht ergab an der Stelle der klaren Emulsion einen Wert von $D=6.42$ und an einer Stelle mit dichter Emulsion $D = 6.72$. Die Menge des Streulichts ist also nahezu unabhängig von der Dichte der Photoplatte. Vergleicht man das mit den realen Dichten ($D=0.0$ bzw. $D=5.22$) ergibt sich daraus das Verhältnis der Intensitäten $\frac{I_{\text{Streu}}}{I_{\text{Meß}}}$ an der Stelle der klaren Emulsion von 0.38×10^{-6} und an der Stelle der dichten Emulsion von 0.032 . Bei voller Deckenbeleuchtung wird also an sehr dichten Stellen einer Photoplatte etwa 3% Streulicht mitgemessen. Wenn statt der Deckenbeleuchtung eine Schreibtischlampe benutzt wird, die nur das Bedienungsfeld beleuchtet, ist der Anteil des Streulichts nicht mehr meßbar.

Eine weitere Möglichkeit, einer Messung Streulicht zu überlagern, ist die Mattscheibe, auf die das Bild des Meßmikroskops scharf eingestellt wird. Das Licht, das durch diese Mattscheibe eingestreuert wird, fällt direkt auf die Photokathode der PMT. Die gemessenen Dichten reichen von $D=5.8$ bei einem Spalt von $50 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$ bis zur Dichte von $D=7.6$ bei einem Spalt von $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$. Ähnliches gilt auch für Licht, das durch das Justierfernrohr in den Meßweg eindringt. Diese Beiträge sind zum Teil bei der Messung hoher Dichten nicht zu vernachlässigen. Allerdings können diese Lichtöffnungen einfach abgedeckt werden, so daß das Problem nicht mehr besteht.

Kapitel 5

Astrophotographie

In diesem Kapitel wird der photographische Prozeß besprochen, damit man Hinweise dafür bekommt, wie ein digitalisiertes Photo interpretiert werden kann. Daher ist es notwendig, daß alle Prozesse, die das fertige Bild beeinflussen, kurz besprochen werden. Dazu gehört: die Herstellung des photographischen Materials, die Hypersensibilisierung, die Belichtung, die Entwicklung, die Fixierung, die Wässerung und die Trocknung. Durch den photographischen Prozeß wird ein Bild erzeugt, das sich in seiner Struktur von der ursprünglichen Lichtinformation des Objekts unterscheidet. Es ist wichtig, die auftretenden Veränderungen zu kennen, da nur so Rückschlüsse auf das wirkliche Objekt möglich sind. An Hand von Bildern, die mit einem Rasterelektronenmikroskop und mit einem optischen Mikroskop gemacht wurden, wird gezeigt, wie die verschiedenen Parameter des Prozesses das Ergebnis beeinflussen können.

Die Untersuchungen wurden an einfachen Bildern durchgeführt. In der Regel handelt es sich dabei um eine gleichmäßig belichtete Fläche. Ob ein Korn belichtet wurde oder nicht, ist in diesem Fall ein rein statistischer Vorgang.

In den folgenden Abschnitten wird jeweils der Bezug zur künstlerischen Photographie und zur Photographie astronomischer Objekte hergestellt. Unter künstlerischer Photographie verstehe ich in diesem Zusammenhang die Abbildung unserer Umgebung auf schwarzweißem Filmmaterial. (Farbmaterialien werden in dieser Arbeit nicht betrachtet, da sie in der astronomischen Photographie nur selten benutzt werden.) Diese Bilder sind alle subjektiv beeinflusst. Der Photograph hat dazu viele Möglichkeiten; darunter sind auch die Wahl des Filmmaterials und des Entwicklers. Die Anforderungen an die wissenschaftliche Photographie sind anders als die Anforderungen an die bildliche Photographie. In der künstlerischen Photographie soll hauptsächlich ein Gefühl vermittelt werden. Mit Hilfe der wissenschaftlichen Photographie möchte man möglichst exakte Eigenschaften des Objekts erkennen.

Der Begriff Emulsion wird in der Photographie eigentlich im falschen Sinne benutzt. Eine Emulsion ist die feine Verteilung einer Flüssigkeit in einer anderen. In der Photographie benutzt man jedoch kleine Festkörper, die Körner, die in einer Flüssigphase schwimmen. Das ist eigentlich eine Suspension. Auch nach dem Erstarren der Flüssigkeit spricht man immer noch von einer Emulsion und bezeichnet damit oft die gesamte lichtempfindliche Schicht auf photographischen Materialien. Selbst bei gelatinearmen Filmen, wie sie für die Photographie im fernen UV-Licht benutzt werden, spricht man noch von einer Emulsion. In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Emulsion in dieser erweiterten Bedeutung benutzt.

Zu den Entwicklern wird jeweils ihre Verdünnung angegeben, da dadurch die Eigenschaften variiert werden können. Angegeben wird jeweils das Mischungsverhältnis von Entwicklerkonzentrat/Wasser.

Die Übersicht zum photographischen Prozeß wurde aus verschiedenen Büchern und Veröffentlichungen zusammengestellt. Die wichtigsten Bücher sind: James (1977), Walther (1983), Kodak (1987). Eine weitere Einführung in die Astrophotographie findet sich bei Seitter & Budell (1984).

5.1 Silberhalogenidkristalle

Die Photographie arbeitet seit ihrer Erfindung fast ausschließlich mit Silberhalogeniden. Von den 5 Halogeniden sind aber nur 3 für die Photographie brauchbar. Silberfluorid zeigt keine Reaktion auf Lichteinfall und von dem Halogen Astatin gibt es keine stabilen Isotope. Die anderen 3 Silberhalogenide: Silberchlorid, Silberbromid und Silberjodid sind lichtempfindlich und werden einzeln oder gemischt für Emulsionen eingesetzt. Wenn im folgenden allgemein von *Silberhalogeniden* gesprochen wird, sind damit immer eine der oben genannten Verbindungen gemeint. Silberjodid ist sehr unempfindlich verglichen mit Silberchlorid und Silberbromid. Es wird deshalb nicht in reiner Form in der Photographie benutzt.

Die Silberhalogenide sind für das sichtbare blaue Licht empfindlich. Bei Silberbromid beträgt der Energieabstand zwischen dem Valenzband (VB) und Leitungsband (LB) 2.8 eV (entsprechend $\lambda_{\max} = 440$ nm) und bei Silberchlorid 3.2 eV (entsprechend $\lambda_{\max} = 390$ nm) (Granzer & Moisar 1981a). Photonen mit den entsprechenden Energien reichen aus, um Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband zu heben. Dies ist ein indirekter Übergang, der nur mit Hilfe eines Phonons stattfinden kann. Das Elektron kann sich im Leitungsband des Kristalls bewegen. Im Valenzband bleibt ein Defektelektron zurück, das sich ebenfalls frei bewegen kann. Trifft ein Elektron und ein Defektelektron zusammen, kommt es zu einer Rekombination und die Energie wird wieder in Form von Licht abgegeben. Deshalb werden die Kristalle so gezüchtet, daß die Anzahl der Rekombinationen mit Defektelektronen minimiert wird.

Bei Silberhalogenidkristallen können Elektronen nur durch Photonen freigesetzt werden, deren Energien größer sind, als der Bandabstand im Kristall, ΔE_K . Es muß daher die Energie $h\nu \geq \Delta E_K = E_{LB} - E_{VB}$ sein. Damit die Photoemulsionen auch für die anderen Farben des Lichtes empfindlich werden, bringt man auf die Oberfläche der Kristalle Farbstoffmoleküle auf, bei denen der Abstand zwischen dem Grundzustand E_M (M=Molekül) und dem niedrigsten angeregten Zustand E_M^* , also $\Delta E_M = E_M^* - E_M$, kleiner als der Bandabstand im Kristall ΔE_K ist. Dadurch können Photonen kleinerer Energie absorbiert werden. Die angeregten Elektronen tunneln in das Leitungsband des Kristalls. Mit verschiedenen Farbstoffen kann eine Sensibilisierung bis hin zum nahen Infrarotbereich durchgeführt werden.

Die Ionen von Silberbromid und Silberchlorid sind in einem Kristallgitter angeordnet, das vom Steinsalz-Typ ist. Trotzdem bilden sich, wie wir später sehen werden, nur selten kubische Kristalle aus. Das liegt daran, daß wir bei diesen Silbersalzen neben der Ionenbindung auch einen Anteil von kovalenter Bindung finden. Silberjodid bildet unterschiedliche Kristallstrukturen, die jeweils vom Druck und von der Temperatur abhängen. Bei Zimmertemperatur bilden sich hexagonale Gitter vom Wurtzit-Typ oder kubisch flächenzentrierte Kristalle vom Zinkblende-Typ (Pou-radier et al. 1977). Manchmal werden Silberbromid- und Silberchloridkristalle mit Silberjodid dotiert. Damit kann das Kristallwachstum in eine vorbestimmte Richtung gelenkt werden.

Im Gitter der Silberhalogenide treten Frenkel-Fehlstellen auf (Baetzhold & Berry 1977). Dabei verläßt ein Silberion seine Position im Gitter und geht ins Zwischengitter über. Die Anzahl der Frenkel-Fehlstellen ist temperaturabhängig. Die Silberionen im Zwischengitter können sich frei bewegen. Die Anzahl der Zwischengitterionen kann durch strukturelle Fehlanordnungen und durch gezielte Dotierung erhöht werden.

Die freien Elektronen rekombinieren mit den Zwischengitterionen zu neutralen Silberatomen, die sich bevorzugt an der Oberfläche des Kristalls anlagern. Diese Rekombination ist erwünscht und wird dadurch gefördert, daß bei der Herstellung darauf geachtet wird, die Anzahl der Zwischengitterionen so groß wie möglich zu machen. Drei bis vier solcher Silberatome bilden ein Aggregat, das den Entwicklungskeim darstellt. Warum sich die Atome bevorzugt an einem Ort treffen, ist noch nicht ganz geklärt. Wichtig dafür scheinen aber Defekte im Kristallgitter zu sein. Die Gesamtheit aller Entwicklungskeime enthält die photographische Information des Bildes. Da es aber nach der Belichtung noch nicht sichtbar ist, spricht man in diesem Fall vom Latentbild.

5.2 Herstellung einer Silberhalogenid-Emulsionen

Silberhalogenide sind in Wasser nur schwer löslich. Das macht man sich bei der Herstellung der Emulsionen zunutze. Die Silberhalogenide werden in einer Fällreaktion erzeugt. Bei einer Fällreaktion, werden zwei oder mehrere leichtlösliche Salzlösungen miteinander gemischt. Das Reaktionsprodukt dieser Reaktion ist schwer löslich und fällt als Kristall aus.

Zur Herstellung von Photoemulsionen werden Alkalihalogenide mit Silbernitrat gemischt. Bei der Reaktion fällt das schwerlösliche Silberhalogenid aus. Damit die Kristalle nicht zusammenballen, erfolgt die Fällung in einem Gemisch aus Gelatine und Wasser. Die Gelatine dient hierbei als Schutzkolloid. Später wird die Gelatine verdickt und dient als Medium, in dem die Silberhalogenide auf den Träger aufgebracht werden.

Aufgrund von Fehlstellen im Kristallgitter wachsen häufig trigonale und hexagonale flächige Kristalle heran. Bei den früheren Herstellungen von Emulsionen überwogen diese Kristallformen. Erst in der letzten Zeit ist es den Herstellern gelungen, die Fällreaktion so zu steuern, daß fast ausschließlich eine gewünschte Kristallform entsteht. Zu den entsprechenden Emulsionen gehören auch die astronomischen Emulsionen IIIa-J und IIIa-F, die bis vor kurzem allgemein erhältlich waren.

Bei der nachfolgenden physikalischen Reifung wachsen die Kristalle auf ihre endgültige Größe heran. Dabei lösen sich kleine Kristalle zu Gunsten der großen Kristalle auf. Auch dieser Teil der Herstellung läßt sich steuern.

Zum Abschluß erfolgt die chemische Reifung. Der Emulsion werden jetzt empfindlichkeitssteigernde Substanzen beigemischt. Diese Mischung wird auf eine hohe Temperatur gebracht, damit sich die Reaktionen beschleunigen, bzw. überhaupt stattfinden können.

5.3 Gebräuchliche Emulsionstypen

In der Astronomie ist es wichtig, daß die Emulsionen für einen genau definierten Farbbereich empfindlich ist. Diese speziell farbsensibilisierten Photoplatten werden spektroskopische Platten genannt. In der letzten Zeit wurden sie nur noch von Kodak hergestellt. Unter den alten Platten finden sich Produkte von Ilford und Agfa. In östlichen und einigen westlichen Observatorien waren Platten der Firma ORWO (ehemals DDR) gebräuchlich. Zur Zeit gibt es noch einen russischen Hersteller für Photoplatten (Birulya et al. 1993). Die Qualität dieser Emulsionen soll jedoch eher ungenügend sein.

Die Photoplatten, die in dieser Arbeit verwendet werden, sind entsprechend der Bezeichnung durch den Hersteller benannt.

Die Photoplatte wird in der Astronomie zunehmend durch elektronische Bildempfänger abgelöst. Ein Bedarf an Photoplaten besteht nur noch bei Weitwinkelteleskopen. Daher wurde die gesamte Produktion an spektroskopischen Platten bei Kodak eingestellt, ausgenommen große Mengen für Himmelsatlanten (Malin 1994). Für Schmidt-Teleskop-Aufnahmen benutzen die Astronomen ersatzweise häufig die Technical Pan Emulsion von Kodak (Parker et al. 1994). Diese Emulsion ist ursprünglich für die technische Photographie entwickelt worden; daher gibt es nur eine Farbensensibilisierung, die vom Blau- (250 nm) bis zum Rotbereich (670 nm) reicht. Einzelne Farben müssen jetzt mit Hilfe von Farbfiltern beobachtet werden.

5.4 Die Schwärzungskurve

Die Schwärzungskurve (auch: charakteristische Kurve) zeigt die Beziehung zwischen Belichtung und resultierender Schwärzung entsprechend der Menge des entwickelten Silbers pro Flächeneinheit auf der Photoplatte (Dichte). Die Belichtung E (Exposure) ist als $E = It$ definiert, also dem Produkt aus der eingestrahnten Lichtintensität I und der Zeit t . Die resultierende Schwärzung wird durch die Art der Photoemulsion, den Entwickler, den Fixierer, die Wässerung und den Trocknungsvorgang beeinflusst.

Neben der bereits beschriebenen Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit gehören zu den wichtigen, erwähnenswerten Emulsionseigenschaften die Reziprozitätsfehler, von denen der wichtigste der Schwarzschildeffekt ist (Schwarzschild 1900).

Bei Belichtungszeiten von $t > 10$ s sind die Dichten bei gleicher Belichtung E , aber unterschiedlichen Belichtungszeiten verschieden. Die Belichtung ist $E = It^p$, wobei p der sogenannte Schwarzschildexponent ist, dessen Wert immer ≤ 1 und für verschiedene Emulsionen unterschiedlich ist. In der Astronomie ist es üblich, den Schwarzschildexponent durch verschiedene Arten der Hypersensibilisierung möglichst nahe 1 zu machen.

Bild 5.1 zeigt das Schema einer Schwärzungskurve. Sie besteht aus 5 Teilen: dem Schleier, der Schwelle, dem linearen Teil, der Schulter und der Sättigung.

Der Schleier setzt sich zusammen aus dem Trägermaterial und der Gelatine. Hinzu kommt der Anteil von entwickelten Silberkörnern, die ohne Lichteinwirkung entstanden sind. Der Schleier kann durch chemische Einflüsse bei der Herstellung, durch thermische Einflüsse bei der Lagerung und durch den Entwickler hervorgerufen werden. Liegt die Belichtung unterhalb eines Schwellenwertes, bleibt die Dichte konstant. Im linearen Teil ist die Dichte *proportional* zum Logarithmus der eingestrahnten Lichtmenge. Im Bereich der Sättigung ist der gesamte Vorrat an Silberhalogenid belichtet und bei der Entwicklung zu Silber reduziert worden (s. Kapitel 5.6). Eine stärkere Belichtung kann keinen weiteren Zuwachs in der Dichte bringen. Die Schwelle und die Schulter bilden jeweils die Übergangszonen.

Die Dichten der Schwelle und der Sättigung können durch die Art der Herstellung und durch die Entwicklung beeinflusst werden. Bei der Digitalisierung mit einem PDS-Mikrodensitometer darf die Sättigung mehr als 5 Dichtestufen oberhalb der Schwelle liegen. In diesem Fall bekommt man einen großen Linearbereichbereich, in dem eine gute Photometrie möglich ist.¹

¹Dagegen versucht man bei Filmen für die künstlerische Photographie die Schwelle und die Schulter so weit auszudehnen, daß der Proportionalteil oft nur noch einen Punkt (Wendepunkt) darstellt. Hier kommt es darauf an, einen möglichst großen Intensitätsbereich zu überstreichen und dabei die Sättigung nicht zu hoch ($D_{\max} \leq 2$) zu legen, weil sich das Photopapier für die Kopien bei der Herstellung an diesem Wert orientiert.

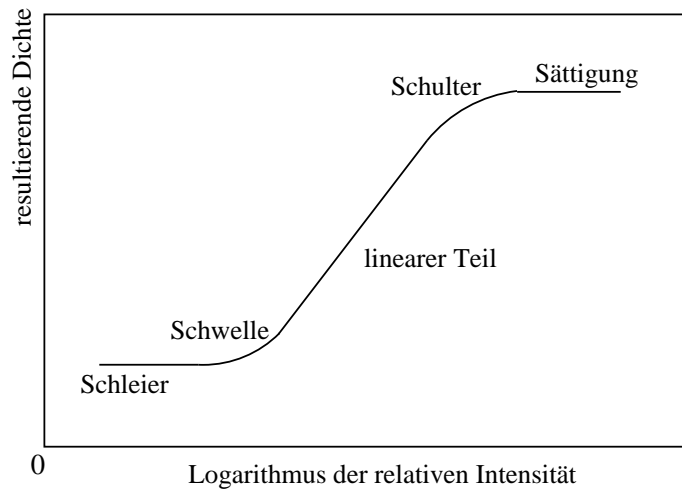


Abbildung 5.1: Schema einer Schwärzungskurve von Photoplatten

Die Schwärzungskurve wird am besten durch die Honeycutt–Chaldu–Formel (1970) in der Darstellung von Tsubaki & Engvold (1975) beschrieben.

$$\log E = A_1 D + A_2 \ln(e^{BD^{C_1}} - 1) + A_3 e^{BD^{C_2}} + A_4 \quad (5.1)$$

Dabei ist E die Belichtung und D die photographische Dichte oberhalb des Plattenschleiers. $A_1, A_2, A_3, A_4, B, C_1, C_2$ sind sieben Parameter, die optimiert werden müssen. In der Praxis hat sich herausgestellt, daß $C_1 = 1$ für die meisten Fälle ausreicht. Wird $C_2 = 0$ gesetzt, erfolgt die Optimierung der anderen Parameter ohne die Berücksichtigung der Sättigung. Mit $C_2 = 1$ wird eine (milde) Sättigung in der Schwärzungskurve berücksichtigt. Setzt man $C_2 = 3$ kann ein (scharfer) Cut–Off durch die Meßmaschine mitberücksichtigt werden. Das kann bei der IIIa–J und der IIIa–F–Emulsion vorkommen, da deren Dichten größer als die Werte der 5 Dekaden sein können, die an den Mikrodensitometern des AIM zur Verfügung stehen. Die Honeycutt–Chaldu–Funktion ist sehr stark nicht linear. Daher ist die Anpassung ziemlich instabil und mißglückt häufig. Wenn eine Sättigung berücksichtigt werden soll, müssen 7 Parameter angepaßt werden. Dazu werden mindestens 8 Meßpunkte benötigt. Bei einer Anpassung ohne Berücksichtigung einer Sättigung braucht man mit mindestens 5 Meßwerte. Für eine stabile Anpassung sind jedoch 16 bis 20 Meßwerte mindestens notwendig. Viele Kalibrationsplatten verschiedener Observatorien ermöglichen nicht die hohe Anzahl an Meßpunkten. Alle Schwärzungskurven in dieser Arbeit sind durch eine Anpassung an die Honeycutt–Chaldu–Funktion bestimmt worden (Becker 1979, Duemmler 1984).

Die Steilheit des linearen Teils (Gradient) gibt Auskunft über das Kontrastverhalten der Photoplatte. Sie ist definiert als $\gamma = \tan \theta$, wobei θ den Winkel des linearen Teils der Schwärzungskurve zur Achse der relativen Intensität (s. Abb. 5.1) darstellt. In manchen Fällen ist der lineare Teil nur schwer oder gar nicht zu bestimmen. In diesem Fall wird ein mittlerer Gradient angenommen.

Je größer das γ einer Emulsion ist, umso kleiner wird der Belichtungsumfang, also die Anzahl der $\log E$ –Werte, die man auf dem linearen Teil unterbringen kann. Dieser Effekt kann teilweise dadurch aufgehoben werden, daß der Dichteumfang ($D_{\max} - D_{\min}$) so groß wie möglich gemacht wird.

5.5 Die Hypersensibilisierung

Wenn die Photoplatten das Herstellerwerk verlassen, haben sie noch nicht die größte Empfindlichkeit. Damit ergibt sich eine vergleichsweise lange Lagerfähigkeit. Es gibt noch Möglichkeiten, die Empfindlichkeit zu steigern. Diese müssen während der Belichtung oder kurz vorher angewendet werden, weil die Platte nach der Hypersensibilisierung nur noch einige Stunden lagerfähig bleibt. Das Ziel der Hypersensibilisierung ist es, den Verlust an Photoelektronen im Kristall möglichst gering zu halten. Hauptsächlich wird der Schwarzschildeffekt (s. Seite 58) vermindert.

Photoelektronen können z.B. bei einer Reaktion mit Sauerstoff verloren gehen. Dabei nimmt das Sauerstoffmolekül das Elektron auf und es entsteht O_2^- (James 1977a). Ähnliche Reaktionen können auch mit anderen Stoffen in der Emulsion passieren. Photoelektronen gehen auch verloren, wenn sie nicht mit einem Silberion sondern mit einem anderen positiven Ion rekombinieren, das im Kristall oder in der Gelatine vorhanden ist. Ein einzelnes Silberatom scheint nicht stabil zu sein (Ganzer & Moisar 1981b) und hat deshalb nur eine begrenzte Lebensdauer. Erst wenn 2 Silberatome zusammentreffen, bilden sie einen stabilen Silberkeim, an dem sich später weitere Silberatome anlagern können. Defektelektronen aus dem Valenzband können einen stabilen Silberkeim wieder wegoxidieren.

Eine der Methoden für die Hypersensibilisierung ist die Kühlung der Emulsion. Dadurch wird hauptsächlich die Rekombination von Photoelektronen mit Defektelektronen vermindert. Für jede Emulsion gibt es eine optimale Temperatur. Wenn die Temperatur weiter abgesenkt wird, verliert die Emulsion wieder an Empfindlichkeit, da die Fähigkeit der Kristalle Photonen zu absorbieren mit sinkender Temperatur abnimmt (Kellogg 1977). Das Kühlen wird heute kaum noch angewendet, da es bei geringem Effekt technisch kompliziert ist. Es muß auf jeden Fall verhindert werden, daß sich auf der Photoplatte Wassereis niederschlägt.

Eine häufig angewendete Methode ist das Backen der Photoplatten. Das Ziel dieser Methode ist, den Sauerstoff der Emulsion auszugasen. Das Backen wird in einer sauerstofffreien Gasatmosphäre bei einer Temperatur von 55° bis 65° durchgeführt. Die Zeitdauer hängt stark vom Emulsionstyp, von der Temperatur, vom Druck und vom benutzten Gas ab. Beim Backen in Stickstoffgas diffundiert hauptsächlich Sauerstoff aus der Emulsion. Beim Backen mit Wasserstoff werden zusätzlich Silberionen zu Atomen reduziert, dabei wird der Wasserstoff oxidiert (James 1977a); mindestens zwei Silberatome bilden ein Silberaggregate, das bei der anschließenden Belichtung als Falle für die Defektelektronen und zum Andocken der photolytisch erzeugten Silberatome dient.

Die Bildung der Silberatome ist jedoch ein rein statistischer Vorgang, so daß die Anzahl der Silberatome in einem Aggregat variieren kann. Es können auch Entwicklungskeime entstehen, die dann den Schleier erhöhen. Je nach Emulsion ist mit dem Backen eine Empfindlichkeitsteigerung um den Faktor 10 möglich.

Da Wasserstoff hochexplosiv ist, wird er nur ungern in reiner Form benutzt. Meist wird ein Gasgemisch von 2% bis 5% Wasserstoff in Stickstoff genommen. Dieses Gemisch nennt man Formiergas. Es ist nicht brennbar. Die Zeitdauer des Backens muß jedoch gegenüber dem Backen mit reinem Wasserstoff erhöht werden.

Die gebackenen Platten sollten nach Möglichkeit sofort belichtet werden. Wenn das nicht möglich ist, können sie wenige Tage in einem Kühlschrank aufbewahrt werden. Dabei muß der Behälter aber mit trockenem Stickstoffgas gefüllt sein.

Ein großes Problem der gebackenen Platten ist die Desensibilisierung während der Belichtung. Sobald die Photoplatte aus der Formiergasatmosphäre genommen wird, beginnt die Desensibi-

lisierung durch die Umgebungsluft (Malin 1983). Bei Platten für das Schmidt–Teleskop ist die Desensibilisierung ungleichmäßig und tritt verstärkt am Rand auf. Die Ursache dafür ist der unterschiedliche Abstand der gebogenen Platte in der Cassette zum planen Farbfilter, das sich über der Photoplatte befindet. In den Ecken ist der Abstand zum Filter am größten. Deshalb findet dort die größte Desensibilisierung statt.

Diesen Effekt demonstriert Horstmann (1992) in seiner Dissertation ausführlich an 16 untersuchten Blauplatten des ESO/SERC–Atlases. Der Abfall der Hintergrunddichte ist auf jeder Platte anders. Dadurch wird die photometrische Auswertung dieser Platten erschwert. Horstmann hat eine Korrektur an Hand von Objektzählungen durchgeführt. Galaxien und Sterne wurden dabei getrennt korrigiert. Es ergaben sich Korrekturen der Helligkeit um durchschnittlich $0^m.5$ Helligkeitsstufen. Eine Untersuchung und Korrektur dieses Effekts finden sich bei Cunow (1993a, 1993b).

Eine weitere Methode der Hypersensibilisierung ist Baden in einer Lösung aus Ammoniak und Silbernitrat (z.B. Jenkins & Farnel 1978, Scott et al. 1985). Die Konzentration und die Badedauer müssen auch hier auf den Plattentyp abgestimmt werden. Anschließend werden die Platten wieder getrocknet und sollten dann sofort gebraucht werden. Diese Methode wird hauptsächlich bei Photoemulsionen für den nahen Infrarotbereich angewandt. Die Gewinne an Empfindlichkeit sind bei diesen Platten wesentlich größer als beim Backen mit Formiergas. Bei den blauempfindlichen Platten ergibt das Backen größere Empfindlichkeitsgewinne.

5.6 Entwicklung

Bei der Entwicklung der Photoplaten (oder Filmen) wird das Latentbild in ein sichtbares Bild verwandelt. Der Entwicklungsvorgang verstärkt dabei das Latentbild um den Faktor 10^{10} (Ganzer & Moisar 1981a).

Man unterscheidet zwei Prozesse, die chemische und die physikalische Entwicklung. Bei der chemischen Entwicklung dockt ein Entwicklermolekül am Entwicklungskeim an und gibt ein Elektron an den Kristall ab. Dabei wird das Entwicklermolekül oxidiert und ein Silberion reduziert. Diese Reaktion findet solange statt, bis alle Silberionen eines Kristalls reduziert sind. Bei der chemischen Entwicklung können nur diejenigen Silberhalogenidkristalle reduziert werden, deren Entwicklungskeim sich auf der Oberfläche des Kristalls befinden. In diesem Fall spricht man von einem Oberflächenentwickler. Die entstehenden Silberkörner haben eher amorphe Struktur; sie absorbieren das sichtbare Licht und erscheinen schwarz. (Der Begriff Oberflächenentwickler wird in der bildlichen Photographie auch anders benutzt. Dort handelt es sich um einen Entwickler, der hauptsächlich an der Oberfläche der Gelatine aktiv ist (z.B. Weidner 1994). Da die wissenschaftliche Photographie, insbesondere in der Astronomie, jedes belichtete Korn entwickeln muß, sind diese Entwickler nicht relevant.)

Bei der physikalischen Entwicklung werden die in der Entwicklerflüssigkeit gelösten Silberionen reduziert und an einen Entwicklungskeim angelagert. Die Silberionen werden entweder direkt in den Entwickler eingebracht, oder es werden Entwicklersubstanzen beigegeben, die die Silberhalogenidkristalle lösen können. Bei der zweiten Möglichkeit können auch Entwicklungskeime erreicht werden, die unter der Oberfläche der Kristalle liegen. Damit wird die Quantenausbeute größer.

Bei der reinen physikalischen Entwicklung wird die Photoplatte zuerst fixiert. Damit wird das gesamte Silberhalogenid aus der Emulsion entfernt (s. Kapitel 5.7). Zurück bleiben nur noch die Entwicklungskeime. Bei der anschließenden Entwicklung des Bildes muß neben dem Entwickler

auch gelöstes Silber vorhanden sein (z.B. durch Silbernitrat). Die Entwicklung kann jetzt im Hellen durchgeführt werden. Sie dauert aber wesentlich länger als die chemische Entwicklung. Das entstehende Silber hat eine deutlich kristalline Struktur. Sie reflektiert das sichtbare Licht und erscheint deshalb im Auflicht weiß. Diese Art der Entwicklung ist für die bildhafte Photographie unbrauchbar. Für die wissenschaftliche Photographie hat sich dieses Verfahren nicht durchgesetzt, weil es sehr zeitaufwendig ist und weil es im Handel keine fertigen Entwicklerlösungen gibt. Bild 5.2 zeigt die Aufnahme einer physikalisch entwickelten IIIa–J–Emulsion unter einem optischen Mikroskop im Durchlicht. Die physikalische Entwicklung erfolgte nach Lumière/Seyewetz (Bast 1980). Dabei entstehen Körner mit fast gleichen Größen. Die Form der Körner ist in meist kugelförmig. Die Größe der Körner läßt sich durch die Entwicklungszeit steuern. Die Entwicklungszeit in diesem Beispiel betrug etwa 18 Stunden.

In Abbildung 5.3 sehen wir die gleiche Emulsion mit einem konventionellen chemischen Entwickler (Rodinal 1 zu 25) 5 Minuten entwickelt. Das Bild hat die gleiche Vergrößerung wie Abbildung 5.2. Bei der chemisch entwickelten Emulsion sind Form und Größe der Körner sehr verschieden und unregelmäßig. Die Parameter lassen sich bei der chemischen Entwicklung nicht steuern und hängen deshalb nur von den ursprünglichen Silberhalogenidkristallen ab.

Die heute üblichen Entwickler arbeiten mit einer Mischung der beiden Verfahren, wobei je nach Zusammensetzung die chemische oder die physikalische Entwicklung überwiegen kann. Die schnellen Entwickler arbeiten überwiegend mit der chemischen Entwicklung. Die Schwärzungskurve erhält einen großen linearen Teil. Entwickler mit überwiegend physikalischer Entwicklung haben oft relativ lange Entwicklungszeiten. Mit ihnen läßt sich das Kontrastverhalten besser steuern. Der lineare Teil der Schwärzungskurve wird stark reduziert. Die Schärfe und das Auflösungsvermögen der Emulsionen, die damit entwickelt werden, ist geringer als bei den vorwiegend chemischen Entwicklern. In Abschnitt 5.9 werde einige Beispiele von entwickelten Körnern, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskops (REM), gezeigt.

Die folgenden Substanzen können im Entwickler vorhanden sein (Brandenburger & Sende 1983):

Reduktionsmittel: Die häufigsten Reduktionsmittel sind Benzolderivate. Dabei stehen die funktionellen Gruppen entweder in ortho– oder in para–Stellung zu einander. Substanzen, mit funktionellen Gruppen in meta–Stellung, sind als Entwickler nicht geeignet. Als funktionelle Gruppen werden meist die Hydroxylgruppe (OH) oder die Aminogruppe (NH₂) benutzt. Die funktionellen Gruppen und weitere Substitutionen beeinflussen die Eigenschaften der Reduktionsmittel vielfach, wobei es keine Möglichkeit gibt, die Wirksamkeit vorauszuberechnen. Bei einigen Verfahren werden auch Metallsalze zur Reduktion eingesetzt. Ebenso ist eine Entwicklung mit Hilfe von Ascorbinsäure (Vitamin C) möglich. Ascorbinsäure ist jedoch nur in Verbindung mit anderen organischen Reduktionsmitteln (Phenidon und Derivate) aktiv genug zum Entwickeln.

Alkalien: Der pH–Wert der Entwicklerlösung entscheidet über die Aktivität und damit über die Entwicklungsgeschwindigkeit. Wichtig dabei ist, daß der pH–Wert während der ganzen Entwicklung möglichst konstant bleibt. Je nach gewünschtem pH–Wert nimmt man Natrium- oder Kaliumhydroxid, Natrium- oder Kaliumkarbonat, Natrium- oder Kaliumsulfid, Natriumtetraborat oder Natriummetaborat.

Schutzsubstanzen: Diese Substanzen verhindern eine vorzeitige Oxidation der Entwicklersubstanzen durch Luftsauerstoff. Dazu werden z.Zt. ausschließlich Sulfite eingesetzt. Natriumsulfid und Kaliumsulfid lösen außerdem die Silberhalogenidkristalle, so daß auch eine physikalische Entwicklung stattfindet.

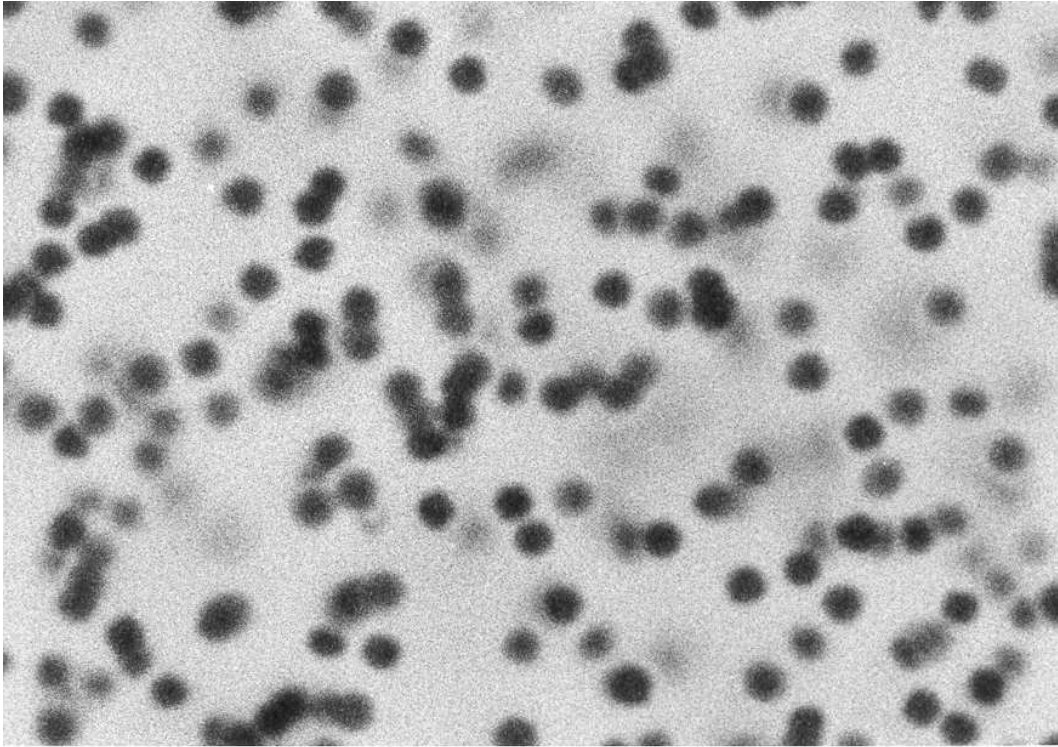


Abbildung 5.2: Die vergrößerte Aufnahme einer physikalisch entwickelten Emulsion mit einem optischen Mikroskop bei Durchlicht. Die physikalische Entwicklung erfolgte nach Lumière/Seyewetz. Die Vergrößerung ist etwa 3 800-fach.

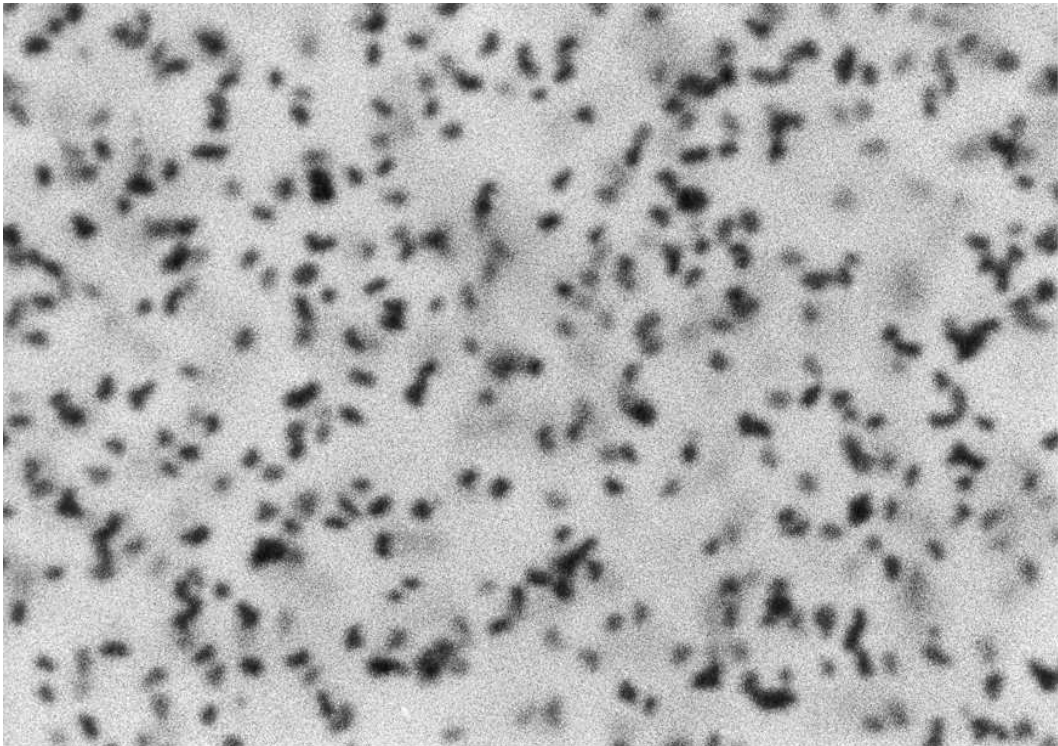


Abbildung 5.3: Das Bild hat die gleiche Vergrößerung wie 5.2. Es zeigt die gleiche Emulsion. Die Platte wurde jedoch mit Rodinal chemisch entwickelt.

Kaliumbromid: Es wird fast jedem Entwickler beigemischt. Damit wird die Selektivität der Entwickler erhöht: Kaliumbromid verzögert die Entwicklung von nicht belichteten Körnern und verhindert so eine Schleierbildung. Die belichteten Bildpartien werden kaum beeinträchtigt.

Organische Klarhalter: Es gibt verschiedene organische Verbindungen, die die Schleierbildung verringern. Sie wirken oft schon in geringen Konzentrationen. Ein wichtiger Vertreter dieser Gruppe ist Benzotriazol. Es wird für den Entwickler MWP2 (Difley 1968) benötigt. Dieser Entwickler wurde vom Mount Wilson Observatory speziell für die Entwicklung astronomischer Photoplatten zusammengestellt.

Neben der chemischen Zusammensetzung beeinflussen auch physikalische Parameter den Entwicklungsvorgang. Die Aktivität eines Entwicklers ist von der Konzentration und der Temperatur abhängig. Beim Schwarzweißprozeß, der in der wissenschaftlichen Photographie fast ausschließlich benutzt wird, gilt eine Temperatur von 20°C als optimal. Auf diese Temperatur wird die Zusammensetzung der Entwickler abgestimmt. Ist die Temperatur höher, muß bei gleicher Konzentration die Entwicklungszeit verringert werden, bei einer niedrigeren Temperatur wird die Zeit entsprechend erhöht. Den kommerziellen Entwicklern wird häufig ein Temperatur-Zeit-Diagramm beigegeben. Die Zeitdauer der Entwicklung beeinflußt im wesentlichen den Kontrastumfang der Photoplatte. Je länger entwickelt wird, um so höher liegt die Sättigungsdichte. Gleichzeitig wächst auch die Dichte des Schleiers. Je nach Entwickler wachsen beide Bereiche unterschiedlich schnell. Die Konzentration des Entwicklers beeinflußt vor allem die Schärfe der Bilder. Eine geringere Konzentration liefert größere Schärfe. Der Kontrastumfang bleibt dabei gleich. Daher wird bei einigen Entwicklern eine stärkere Verdünnung bei verlängerter Entwicklungszeit empfohlen. Die Erhöhung der Schärfe beruht dabei auf dem Kanteneffekt (auch Eberhard-Effekt; Kriss 1977).

Stoßen zwei unterschiedlich belichtete Flächen aneinander, so wird die weniger stark belichtete Fläche an der Kante weniger stark entwickelt, als der Rest der Fläche und die stärker belichtete Fläche an der Kante stärker entwickelt, als der Rest der Fläche. Der Kontrast wird damit an der Kante überhöht und erzeugt so für das Auge den Eindruck von Schärfe. Für die astronomische Photographie ist dieser Effekt unerwünscht. So ist z.B. in der Spektroskopie wichtig, daß Linien möglichst unverfälscht wiedergegeben werden. Emissionslinien haben im Negativ eine Schwärzung auf hellem Untergrund. Absorptionslinien kommen in den Sternspektren vor und haben oft breite Flügel, so daß ein Kanteneffekt nicht sichtbar auftreten kann. Objekte mit Absorptionslinien und Emissionslinien nebeneinander können einen Kanteneffekt enthalten. Wichtig ist in jedem Fall, daß die Messung der Linienposition durch den Nachbarschaftseffekt nicht gestört wird.

Großen Einfluß auf das Ergebnis hat die Bewegung der Entwicklerlösung während des Entwicklungsvorgangs. Je stärker der Entwickler bewegt wird, umso kürzer ist die Entwicklungszeit bei gleichem Kontrastumfang, da so der von den belichteten Körnern verbrauchte Entwickler schneller gegen frischen Entwickler ersetzt wird. Bei Kleinbild- oder Rollfilmen ist ein einminütiger Kippzyklus der Entwicklerdose üblich, da die kleinen Flächen damit problemlos gleichmäßig entwickelt werden. Bei größeren Planfilmen reicht das nicht aus. Die müssen in einer Schale ständig bewegt werden, oder in einer Trommel entwickelt werden, die ständig rotiert. Bei den großen Glasplatten, die in der Astronomie üblich sind, kommt nur die Schalenentwicklung in Frage. Dabei sollte die Schale so bewegt werden, daß sich keine stehenden Wellen bilden können. Diese Bewegung kann z.B. mit einem Gerät erreicht werden, das unter dem Namen Tray-Rocker bekannt ist und einen Tisch bezeichnet, auf dem die Schale mit der Photoplatte über zwei unabhängige Achsen unregelmäßig bewegt wird. Beim Tray-Rocker wird der Entwickler am Rand

schneller bewegt, als in der Mitte. Daher kommt es dabei zu einer verstärkten Entwicklung am Rand. Das ist bei Platten, die photometrisch vermessen werden sollen, ein Problem.

Bei ESO wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, das Grid Processing (Dumoulin et al. 1988, Quebatte & Dumoulin 1992). Dabei wird mit Hilfe eines Edelmetallgitters der Entwickler gegenüber einer feststehenden Schale bewegt. Das Gitter befindet sich in geringem Abstand (1.9 mm) oberhalb der Photoplatte. Das Gitter wird mit einem Motor ständig in Bewegung gehalten. Das Zentrum dieser Bewegung wird mit einem weiteren Motor während der Entwicklungszeit immer wieder verschoben. Zudem wird die Photoplatte langsam in der Schale bewegt. Alle Bewegungen sind so aufeinander abgestimmt, daß sich keine stehenden Wellen bilden können. Mit diesem Verfahren werden die Photoplaten gleichmäßig entwickelt und die erreichte Dichte liegt höher als bei der Entwicklung mit dem Tray-Rocker.

In den Abbildungen 5.4 und 5.5 finden sich die Schwärzungskurven zweier Photoplaten, einer IIA-O- und einer IIIA-J-Emulsion, die jeweils in 3 Entwicklertypen entwickelt wurden. Als Entwickler werden: Dokumol 1 zu 10, Rodinal 1 zu 20, Ultrafin 1 zu 20 eingesetzt. Die gleichen Entwickler werden bei den optischen und elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Platten verwendet (s. S. 70). Alle IIA-O-Platten wurden 1.5 s, die IIIA-J-Platten 4.5 s lang belichtet. Die Belichtung erfolgte durch eine Maske, in der 8 verschiedene Graufilter eingearbeitet sind. Die Intensität für das erste Feld war so schwach, daß der Schwellwert nicht überschritten wurde. Die Entwicklungszeit betrug in allen Fällen 7 Minuten. Die Messung der Schwärzung wurde mit dem Mikrodensitometer durchgeführt. Alle Dichten $D > 5.12$ wurden indirekt gemessen. Für die Justierung wurden Graufilter in den Strahlengang eingeschoben. Die klare Platte erhielt jeweils den Wert $D = 0$. Zur Messung der Dichte wurde das Graufilter entfernt, wenn das zu messende Feld sich im Strahlengang befand. Die wahre Dichte in diesem Feld ergibt sich aus der Summe des abgelesenen Werts und der Dichte des Graufilters.

Abbildung 5.4 zeigt die Schwärzungskurven der IIA-O-Emulsion entwickelt mit den 3 Entwicklertypen. Die durchgezogenen Linien sind angepaßte Honeycutt-Chaldu-Funktionen. Abbildung 5.5 zeigt die entsprechenden Schwärzungskurven der IIIA-J-Emulsion. Die IIIA-J-Emulsion hat wesentlich steilere Kurven und höhere Sättigungen als die IIA-O-Emulsion. Wichtig ist auch, daß demnach der Linearitätsbereich bei der IIIA-J-Emulsion wesentlich größer ist als bei der IIA-O-Emulsion. Dadurch ist die IIIA-J-Emulsion besser photometrisch zu kalibrieren. Es darf hier aber nicht vergessen werden, daß hier die IIIA-J-Emulsion Fall dreimal so lange belichtet wurde, wie die IIA-O-Emulsion. Bei astronomischen Beobachtungen ist eine dreifache Belichtungszeit nicht immer möglich. Die hohe Dynamik der IIIA-J-Emulsion ist nur für die Auswertung mit Mikrodensitometern sinnvoll. Weder das menschliche Auge noch irgendein Photopapier können diesen Dichteumfang sehen oder darstellen.

Bei den verschiedenen Entwicklern ist der Trend gut zu erkennen. Mit Dokumol erreicht man eine hoch liegende Sättigung und eine gute Steilheit der Kurve. Das ist für die photometrische Auswertung von Bildern von Vorteil. Deshalb wird dieser Entwickler und verwandte Typen wie D19 von Kodak oder MWP2 (Difley 1968) in der Astronomie bevorzugt benutzt. Der Vorteil läßt sich jedoch nur nutzen, wenn zur Auswertung ein Mikrodensitometer mit einer hohen Dynamik, wie z.B. PDS 2020 GM benutzt wird. Die Kornstruktur, die bei diesen Entwicklern entsteht, werden im Kapitel 5.9 gezeigt und interpretiert.

Bei Rodinal und Ultrafin liegen die Sättigungen deutlich niedriger, als bei Dokumol. Diese Entwickler werden bevorzugt in der künstlerischen Photographie eingesetzt, da sich eine flachere Schwärzungskurve besser auf Papier kopieren läßt. Für die Auswertung mit einem PDS-Mikrodensitometer sind diese Entwickler eher ungeeignet, da nicht der volle Meßumfang ausgenutzt werden kann. Im Falle der IIA-O-Platte wird die Sättigung auch noch nicht erreicht. Diese

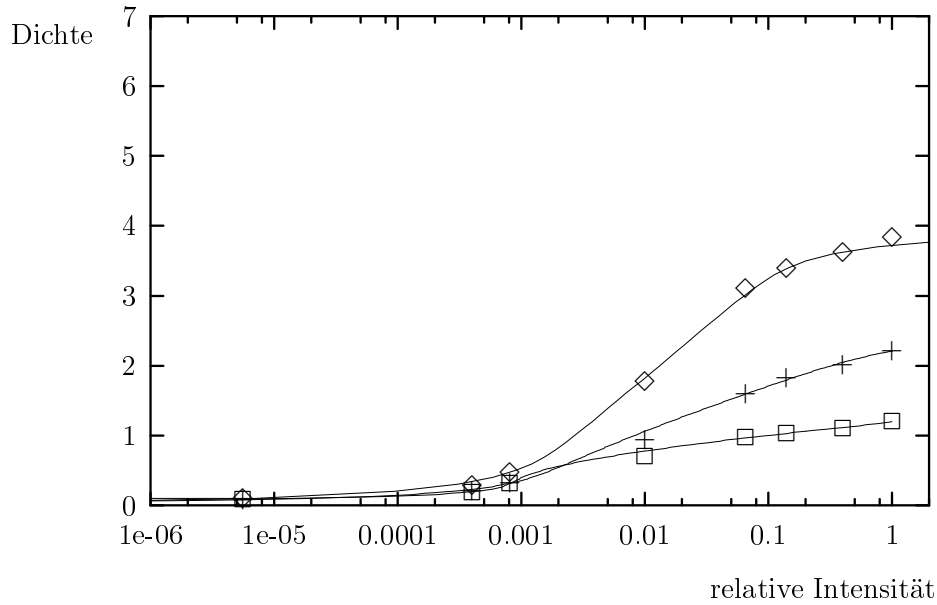


Abbildung 5.4: Schwärzungskurven der Ila-O-Emulsion bei verschiedenen Entwicklern: (a) Dokumol \diamond (b) Rodinal + (c) Ultrafin \square

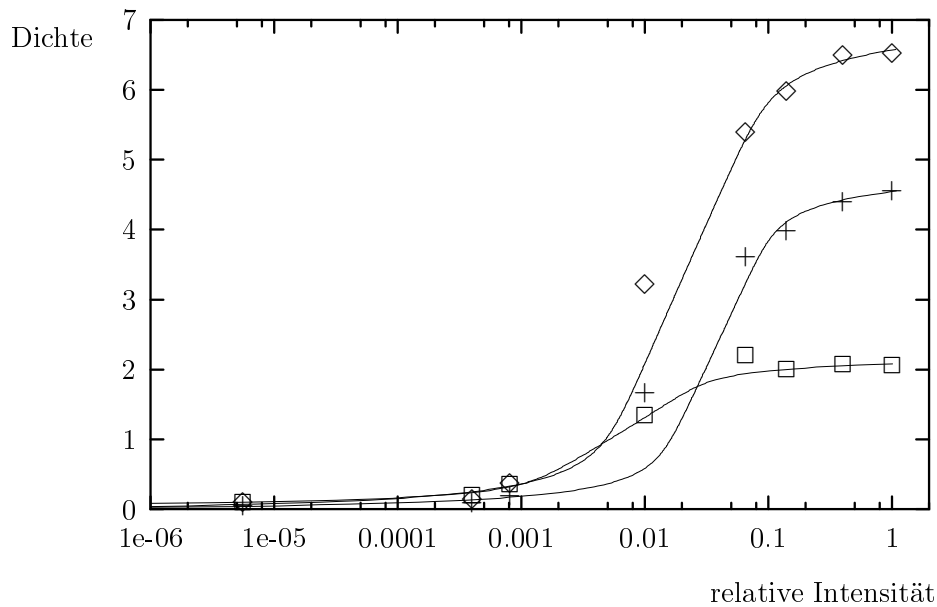


Abbildung 5.5: Schwärzungskurven der IIIa-J-Emulsion bei verschiedenen Entwicklern: (a) Dokumol \diamond (b) Rodinal + (c) Ultrafin \square

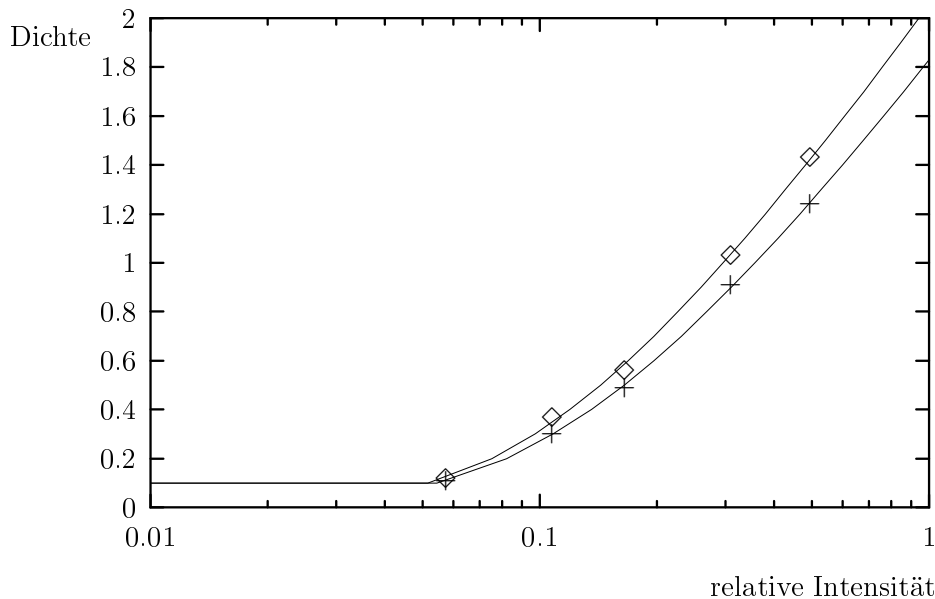


Abbildung 5.6: Schwärzungskurven zweier 103a-O Platten, die in Dokumol entwickelt wurden. Eine der Platten (◇) wurde mit einem natriumthiosulfathaltigen Fixierer fixiert, während die andere (+) mit Hypam, einem Expressfixierer, fixiert wurde.

Emulsion sollte länger entwickelt werden. Das gilt besonders für Ultrafin. Da es hauptsächlich physikalisch entwickelt, ist die Entwicklungszeit von 7 Minuten knapp bemessen gewesen. In der Praxis sollte die Entwicklungszeit bei etwa 20 Minuten liegen.

5.7 Fixierung

Bei der Fixierung werden die nicht entwickelten Silberhalogenidkristalle gelöst. Silberhalogenide sind jedoch beinahe wasserunlöslich. Deshalb setzt man Komplexbildner ein. Dabei handelt es sich um Salze, die mit den Silberionen einen Komplex bilden, der leicht in Wasser löslich ist. In der Regel ist es ein Thiosulfat, meist Natriumthiosulfat oder Ammoniumthiosulfat.

Bei der Benutzung eines Thiosulfats entstehen in der ersten Stufe unlösliche und in der zweiten Stufe schwer löslicher Komplexe (Levenson 1977). Nur wenn Thiosulfat im Überschuß in der Lösung vorhanden ist, bilden sich in den nächsten Stufen die leichtlöslichen Komplexe, die ausgewaschen werden können. Deshalb ist es notwendig, ständig den Ausnutzungsgrad des Fixierbads zu überprüfen. Die schwer löslichen Komplexe sind durchsichtig, so daß die Emulsion bereits fixiert aussieht, obwohl sich noch viele Silberkomplexe in der Emulsion befinden. Bei Natriumthiosulfat beträgt die Fixierzeit je nach Schichtdicke einige Minuten bis zu einer halben Stunde. Um die Fixierzeit zu verkürzen kann man entweder Ammoniumchlorid hinzugeben oder das Fixierbad mit Ammoniumthiosulfat ansetzen. Das geht aber auf Kosten der Dichte.

In Abbildung 5.6 zeigt sich die Auswirkung des Fixierers auf die Schwärzungskurve. In diesem Fall wurde eine 103a-O-Emulsion verwendet, die in Dokumol 1 zu 10 entwickelt wurde. Kurve (◇) zeigt die Emulsion nach der Fixierung mit einem natriumthiosulfat-haltigen Fixierer. Kurve (+) zeigt die gleiche Emulsion nach der Fixierung mit *Hypam* von Ilford. Dieser Fixierer enthält Ammoniumthiosulfat und gehört damit zu den Expressfixierern. Die Dichte des fertigen Bildes

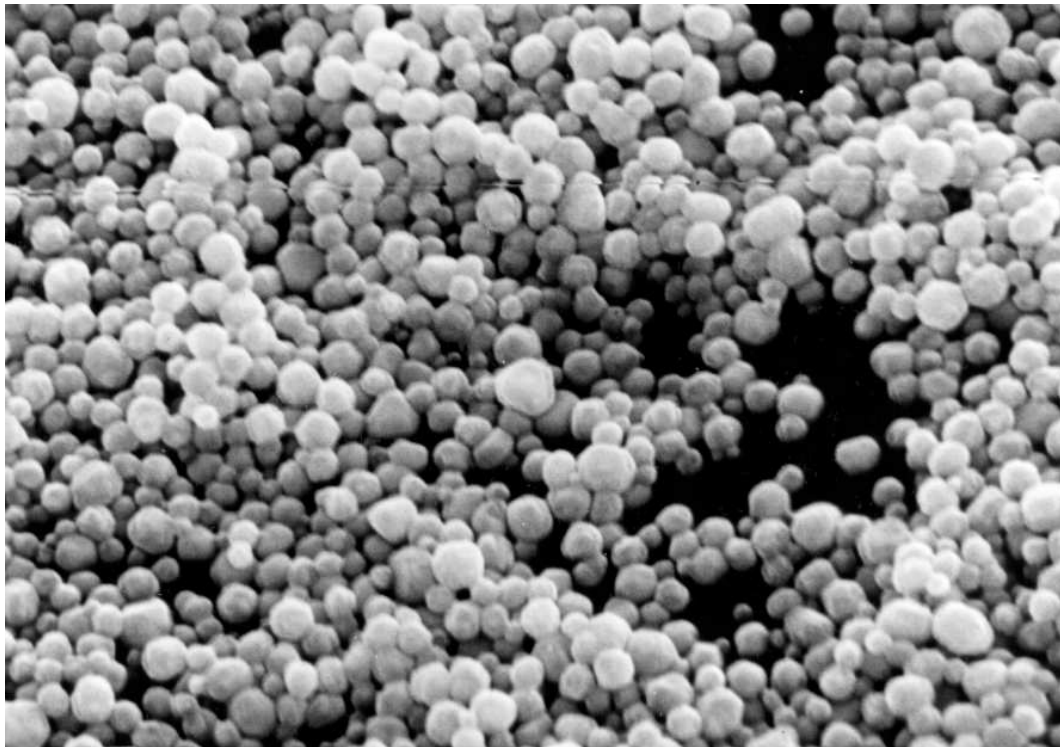


Abbildung 5.7: Die Körner einer Kodak 101-01-Emulsion, betrachtet im REM. Die Vergrößerung ist 7 600-fach.

ist jedoch deutlich geringer als bei den natriumthiosulfat-haltigen Fixierer. Die Expressfixierer scheinen neben dem Silberhalogenid auch in geringer Menge metallisches Silber zu lösen.

In der Regel sind Fixierbäder sauer, damit jeder noch vorhandene Entwicklungsvorgang abgebrochen wird. Es empfiehlt sich, zwischen der Entwicklung und dem Fixieren, ein saures Unterbrecherbad einzufügen. Dazu reicht eine 4% Essig- oder Zitronensäurelösung aus. Das schont das Fixierbad, weil nicht mehr so viel von der Entwicklerlösung verschleppt wird.

5.8 Wässerung

Bei der anschließenden Wässerung werden das Thiosulfat und die Reste der Silberkomplexe ausgewaschen. Wird das nicht sorgfältig gemacht, kann es zum Zersetzen des Thiosulfats kommen und der Schwefel kann sich mit dem metallischen Silber zu Silbersulfid verbinden. Da das nicht gleichmäßig auf der ganzen Platte erfolgt, ändert sich die Lichtabsorption des Silbers partiell — da entstehen gelbe und braune Flecken — und die photometrische Auswertung der Platte ist nicht mehr möglich. Die Auswässerung erfolgt schneller, wenn das Wasser alkalisch ist. Deshalb ist zwischen dem sauren Fixierbad und der Wässerung ein Bad mit Soda anzuraten.

5.9 Untersuchung der Körnerstruktur mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM)

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unentwickelte und entwickelte Körner einiger Photoemulsionen mit einem REM und mit einem optischen Mikroskop untersucht. Erste Ergebnisse wurden bereits gezeigt (Budell 1988).

Da die Proben in der Regel nicht leitend sind, kommt es während der Abtastung durch den Elektronenstrahl zu Aufladungen. Die Aufladungen verhindern nach kurzer Zeit eine weitere Abtastung. Deshalb wurden die Proben vor der Untersuchung im REM mit einer dünnen Schicht aus Gold bedampft. Die Schichtdicke beträgt etwa 30 nm bis 50 nm.

Alle Abbildungen, die mit einem Rasterelektronenmikroskop gewonnen wurden, haben in diesem Kapitel die gleiche Vergrößerung 7600-fach. Die Abbildungen zeigen also ein Feld von der Größe $20\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$ des Präparats. $1\ \mu\text{m}$ auf dem Präparat entspricht 7.6 mm auf den Bildern. Verglichen mit der Größe der Meßblenden des Mikrodensitometers ist das ein kleiner Bereich. In der Regel werden diese Strukturen beim Digitalisieren nicht mehr aufgelöst. Sie erzeugen aber Kornrauschen (s. auch Kapitel 6.2).

Alle Bilder die mit dem Lichtmikroskop vergrößert wurden, haben eine 3800-fache Vergrößerung. Sie sind also nur halb so stark vergrößert, wie die Bilder des REM; $1\ \mu\text{m}$ auf dem Präparat entspricht 3.8 mm auf den Bildern. Die gleiche Vergrößerung, wie bei den REM-Bildern war technisch nicht machbar. Die Bilder des optischen Mikroskop sollten jedoch nicht wesentlich kleiner sein, damit sie besser mit den Bildern vom REM vergleichbar sind. Die benutzte Vergrößerung liegt daher deutlich oberhalb der förderlichen Vergrößerung von etwa 900. Die Grenze des Auflösungsvermögens des verwendeten Objektivs liegt bei $0.68\ \mu\text{m}$. Das entspricht auf den Abbildungen ungefähr 2.5 mm.

Außerdem ist zu beachten, daß die Betrachtungsebene vom REM eine Neigung zur Oberfläche des Präparats hat, die kleiner als 90° ist, um den räumliche Eindruck zu verstärken. Bei den Bildern des optischen Mikroskops ist die Betrachtungsebene immer senkrecht zur Oberfläche des Präparats.

5.9.1 Die Kodak 101-01-Emulsion

Die einfachste Art, die Körner der Photoemulsionen zu untersuchen, bieten die gelatinearmen Emulsionen, die für Aufnahmen im fernen UV-Licht eingesetzt werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde die 101-01-Emulsion von Kodak eingesetzt. Diese Emulsion wird für Beobachtungen in der Hochatmosphäre oder im Weltraum benutzt.

Silberhalogenide sind bis zu einer Wellenlänge von etwa 15 nm sensitiv. Die Gelatine absorbiert jedoch Licht mit Wellenlängen kürzer als 250 nm. Da es keinen gleichwertigen Ersatz für die Gelatine gibt, werden speziell für diesen Bereich wenigstens gelatinearme Emulsionen hergestellt. Dies ist z.B. bei der Kodak-Emulsion 101-01 der Fall. Die Fällreaktion findet, wie immer in der Gelatine statt. Schließlich wird die Gelatine weitgehend ausgewaschen und die Körner haften mit einer dünnen Restgelatinehaut auf dem Filmträger. Die Schichtdicke der Körner kann jedoch nicht sehr hoch sein. Sie beträgt im Durchschnitt etwa 2 Kornlagen; die Schicht ist mechanisch sehr anfällig.

Durch die fehlende Gelatine kann man die Entstehung des Silbers bei der Entwicklung gut verfolgen. Die Bilder der entwickelten Körner der 101-01-Emulsion sind jedoch nur bedingt mit den

entwickelten Körnern einer gelatinehaltigen Emulsion zu vergleichen, da bei dieser das reduzierte Silber durch die Gelatine eingeschlossen wird, während es sich bei der 101-01-Emulsion über einen großen Bereich verteilen kann. Die chemische Wirkung des Entwicklers ist in beiden Fällen gleich.

Abbildung 5.7 zeigt die Oberfläche der unentwickelten Kodak 101-01-Emulsion. Bei dieser sind die Silberhalogenidkristalle nahezu rund. Die schwarzen Flächen zeigen den Filmträger, der hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffverbindungen besteht und nur wenige Sekundärelektronen liefert.

Die Wechselwirkungen zwischen dem Entwickler und der Emulsion sind sehr vielfältig. Das Redoxpotential der Reduktionsmittel ist sehr unterschiedlich. Die Aktivität des Entwicklers läßt sich mit Hilfe des pH-Wertes einstellen. Wenn der Entwickler mit der Emulsion in Kontakt kommt, gibt es eine Initialisierungsphase. Nach dieser Phase bestimmen zusätzlich noch die Oxidationsprodukte des Entwicklers und die entstehenden Halogenid-Ionen die Aktivität. Die Oxidationsprodukte können durch ihre Anwesenheit die Entwicklung behindern. Außerdem wandelt die Umkehrreaktion der Oxidationsprodukte Silber wieder in Silberhalogenid. Dabei können auch Latentbildkeime verloren gehen. Durch verschiedene Mechanismen kann es zu einer infektiösen Entwicklung kommen, bei der Silberhalogenidkristalle reduziert werden, obwohl sie nicht belichtet waren. Eine ausführliche Darstellung dieser Vorgänge findet man z.B. in James (1977b), James (1977c), Lee & Brown (1977) und in Kriss (1977).

Aufgrund der komplexen Vorgänge bei der Entwicklung kann das entstehende Silberkorn sehr unterschiedlich ausfallen. In den folgenden Abschnitten wird der Einfluß von 3 verschiedenen Entwicklern auf das Silberkorn gezeigt. Die Abbildungen 5.8, 5.10 und 5.12 zeigen die unterschiedlich entwickelten Körner der Kodak 101-01-Emulsion aufgenommen mit dem REM. Jede Probe war wie gewohnt fixiert und gewaschen.

Im Vergleich dazu werden in den Abbildungen 5.9, 5.11 und 5.13 die entsprechenden Körner mit dem optischen Mikroskop im Durchlicht gezeigt. Es ist aber zu beachten, daß das Auflösungsvermögen des optischen Mikroskops geringer ist, als das des REM.

In den Abbildungen 5.8 und 5.9 wird das Korn gezeigt, das mit Ultrafin-liquid entwickelt wurde. Dieser Entwickler zählt zu den Ultrafeinkornentwicklern. Die Entwicklung verläuft nur langsam und zum großen Teil physikalisch. Das Korn wird in vielen Fällen noch in seiner ursprünglichen Form erhalten. Dort, wo das nicht der Fall ist, wird das Silber nur wenig über die Umgebung verteilt. Die Bilder bieten eine gute Auflösung. Für die Abbildung wurde ein Bereich gewählt, der so gering belichtet war, daß keine großen Überlappungen bei den Körnern stattfinden. Das gilt auch für die vier nachfolgenden Abbildungen.

In den Abbildungen 5.10 und 5.11 sehen wir den gleichen Film entwickelt mit Rodinal. Er zählt zu den Feinkornentwicklern und bildet relativ dünne Silberfäden. Die Entwicklung mit Rodinal verläuft schneller als mit Ultrafin. Hauptsächlich findet eine chemische Entwicklung und nur wenig physikalische Entwicklung statt. Das Silber bleibt an seinem ursprünglichen Ort, verliert aber größtenteils die ursprüngliche Form des Silberhalogenidkristalls.

Für Abbildungen 5.12 und 5.13 wurde Dokumol verwendet. Dieser Entwickler ist so zusammengesetzt, daß das Bild einen hohen Kontrast bekommt. Daher werden die Körner sehr groß. Dieser Entwickler arbeitet hauptsächlich mit der chemischen Entwicklung. Die Fäden wachsen schnell und dick aus dem belichteten Korn heraus. Die ursprüngliche Form des Silberhalogenidkristalls bleibt nur in ganz seltenen Fällen erhalten. Das Silber ist großräumig in der Umgebung verteilt und läßt nur ungenaue Rückschlüsse, auf den Einfallsort des belichtenden Photons. Auflösung und Schärfe sind gering.

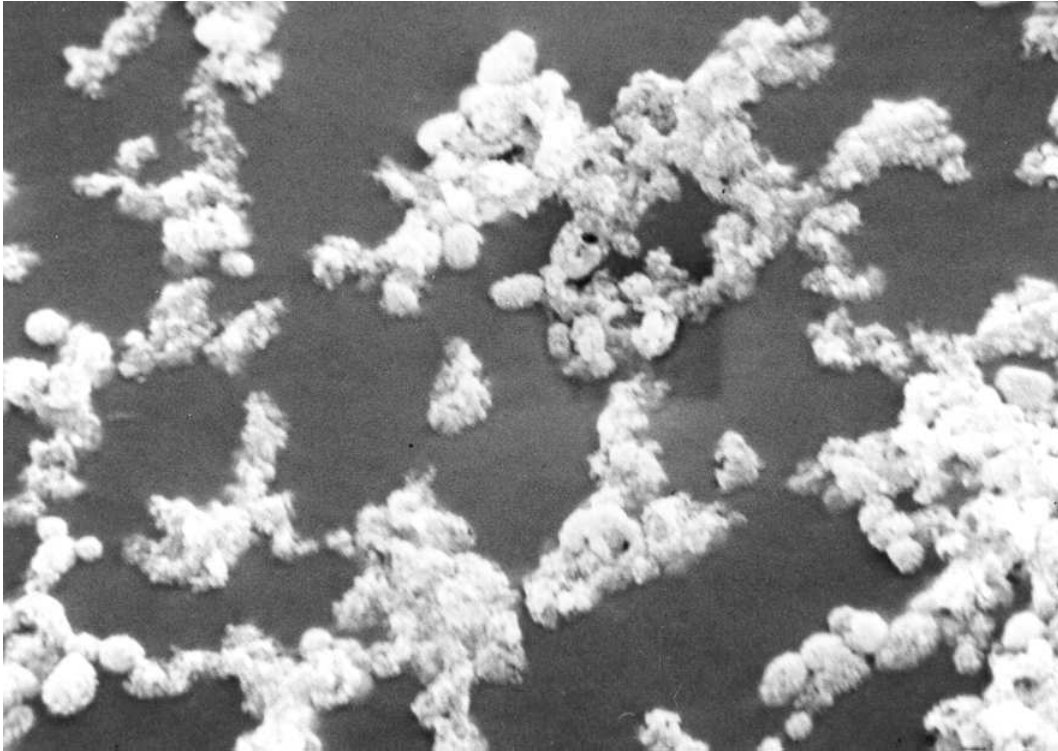


Abbildung 5.8: Dies sind in Ultrafin entwickelte Körner einer 101-01-Emulsion mit einem REM betrachtet. Die Vergrößerung ist 7600-fach.

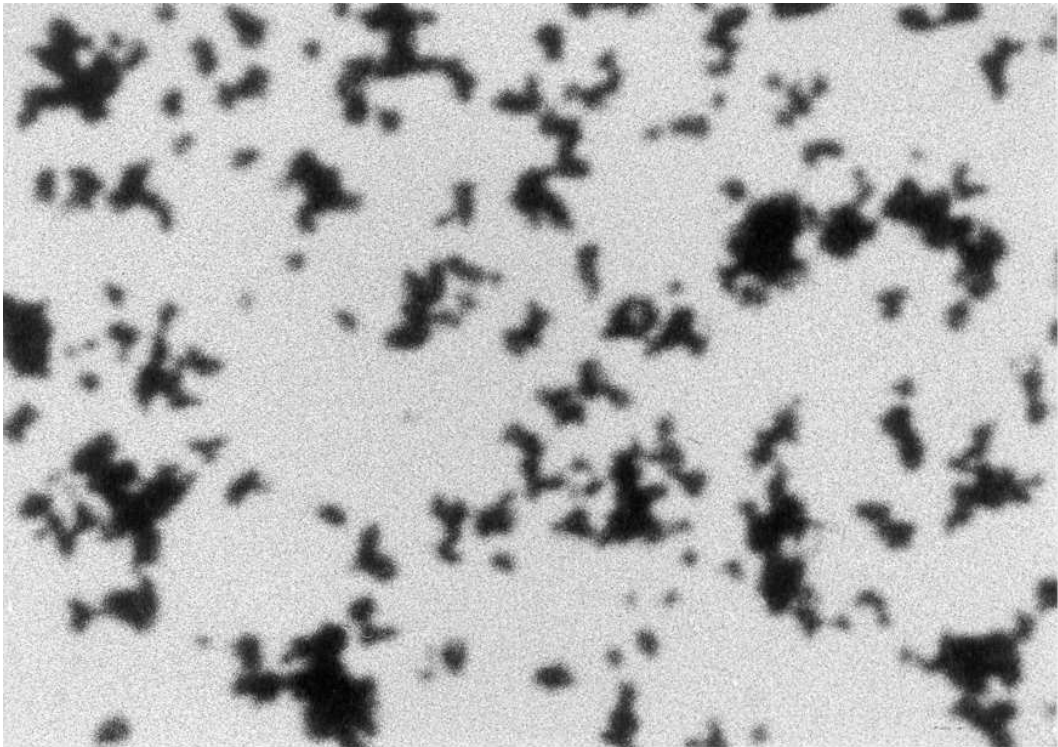


Abbildung 5.9: Hierbei handelt es sich um die Abbildung der mit Ultrafin entwickelten Körner einer 101-01-Emulsion mit dem optischen Mikroskop im Durchlicht betrachtet. Die Vergrößerung ist 3800-fach.

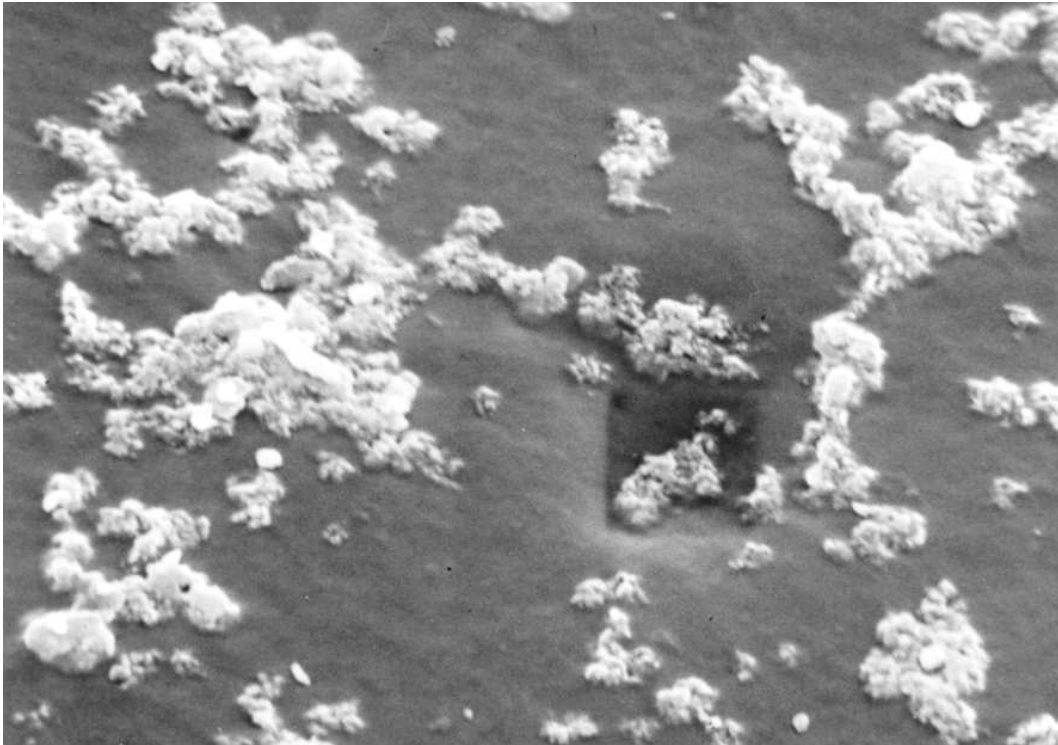


Abbildung 5.10: Dies ist sind in Rodinal entwickelte Körner einer 101-01-Emulsion mit einem REM betrachtet. Die Vergrößerung ist 7 600-fach.

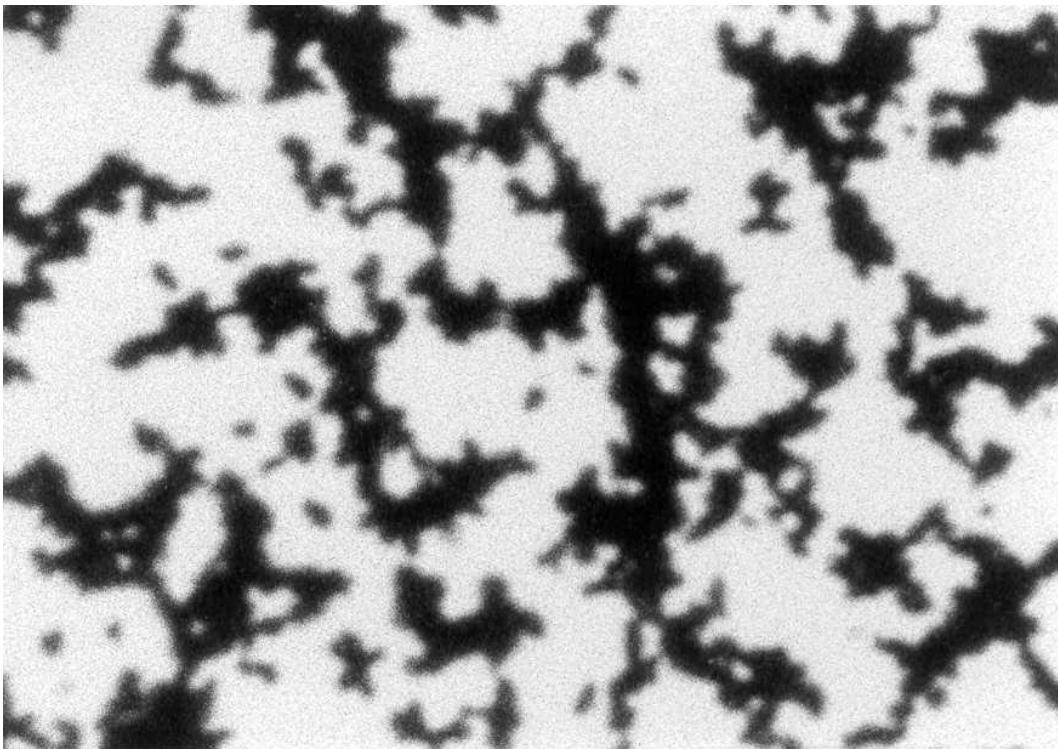


Abbildung 5.11: Hierbei handelt es sich um die Abbildung der mit Rodinal entwickelten Körner einer 101-01-Emulsion mit dem optischen Mikroskop im Durchlicht betrachtet. Die Vergrößerung ist 3 800-fach.

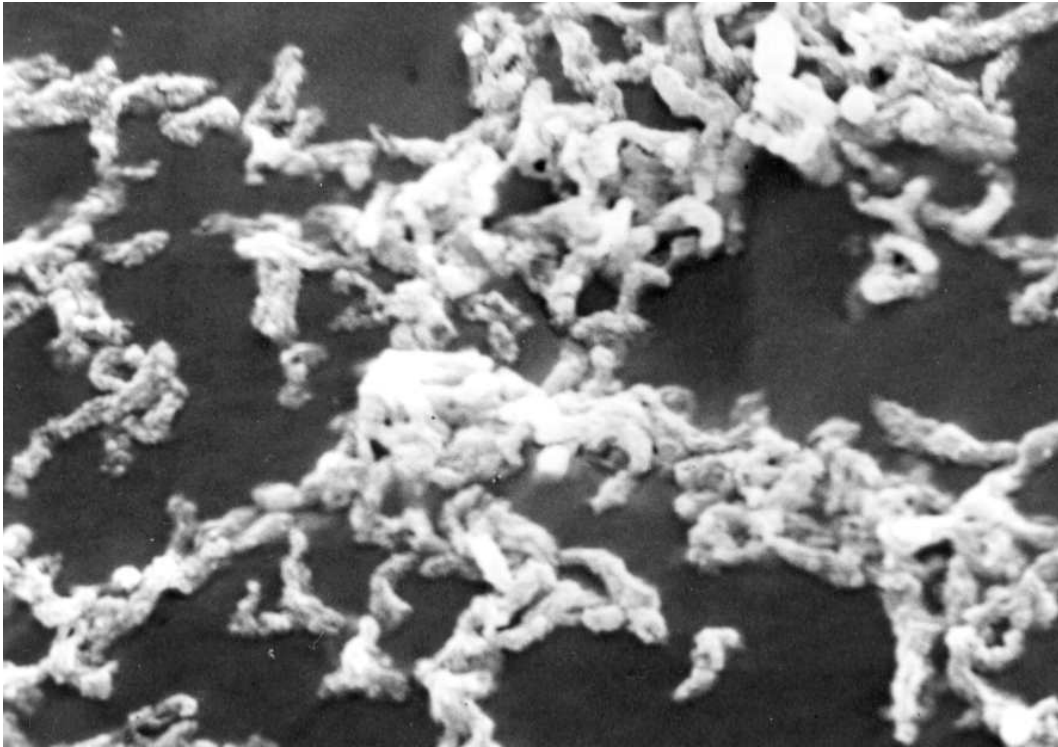


Abbildung 5.12: Dies sind in Dokumol entwickelte Körner einer 101-01-Emulsion mit einem REM betrachtet. Die Vergrößerung ist 7 600-fach.

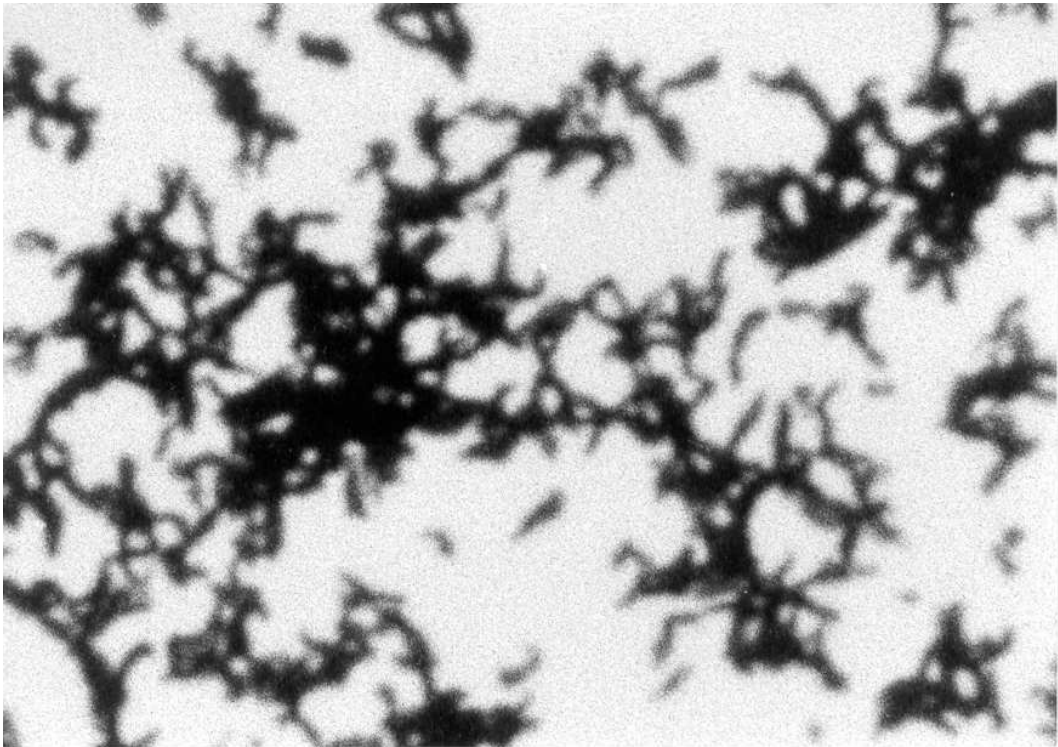


Abbildung 5.13: Hierbei handelt es sich um die Abbildung der mit Dokumol entwickelten Körner einer 101-01-Emulsion mit dem optischen Mikroskop im Durchlicht betrachtet. Die Vergrößerung ist 3 800-fach.

Die Abbildungen der unentwickelten Kristalle und der entwickelten Körner (Abb. 5.7, 5.8, 5.10 und 5.12) haben den gleichen Maßstab. Vergleicht man das Bild der unentwickelten Kristallen mit den Abbildungen der entwickelten Körner, fällt auf, daß letztere Strukturen bilden, die allgemein größer sind, als die ursprünglichen Kristalle. Selbst wenn man mit dem REM noch die einzelnen Körner erkennen kann, wie das bei dem Ultrafin-Entwickler der Fall ist, bilden die Körner eine Einheit, die im Lichtmikroskop nicht mehr aufgelöst wird. Diese Struktur erscheint auf den Kopien und bei der Digitalisierung als ein großes Korn. Das wird später bei den gelatinehaltigen Emulsionen noch deutlicher.

In der Nähe eines belichteten Kornes scheinen viele Körner mitentwickelt zu werden, während es zwischen den Strukturen große Lücken gibt. Das kann ein Effekt der infektiösen Entwicklung (James 1977c) sein. In der Nähe eines belichteten Kornes werden viele umliegende nichtbelichtete Körner mitentwickelt. Das kann durch die Oxidationsprodukte des Entwicklers eingeleitet werden. Die Ausgelöste Entwicklung ist lawinenartig und kommt erst zur Ruhe wenn eine oder mehrere Substanzen verbraucht sind und nicht mehr schnell genug durch Diffusion ersetzt werden können. An Stellen mit vielen belichteten Kristallen bricht die Lawine schneller ab, als an weniger stark belichteten Stellen. Daher ist die Dichte nicht proportional zur Intensität des eingefallenen Lichts. Sie gleicht eher einer logarithmischen Funktion (s. Kapitel 5.4). Wie wir später sehen werden, tritt dieser Effekt auch bei den gelatinehaltigen Emulsionen auf.

5.9.2 Die Kodak IIA-O-Emulsion

In den folgenden Kapiteln werden Untersuchungen an Emulsionen, die mit Gelatine auf den Träger aufgebracht sind, gezeigt. Dabei werden Platten mit zwei in der Astronomie gängige Emulsionen mit der IIA-O und der IIIA-J (s. Kapitel 5.9.3) gezeigt. Für die lichtmikroskopischen Untersuchungen eignet sich die IIA-O-Emulsion, da das entwickelte Korn so groß ist, daß es noch gut von der Optik aufgelöst wird.

Abbildung 5.14 zeigt die Oberfläche einer unentwickelten IIA-O Platte. Die Körner sind gut zu sehen, wenn sie an der Oberfläche oder wenige Mikrometer darunter liegen. Die Oberfläche wird durch die Sekundärelektronen abgebildet. Sekundärelektronen entstehen durch Stöße der Primärelektronen mit den Elektronen in der Atomhülle der Elemente der Probe. Sie können nur direkt an der Oberfläche entstehen. Die tiefer liegenden Bereiche werden durch Rückstreu-elektronen abgebildet. Das sind Primärelektronen, die in die Probe eindringen, aber nur wenig Energie verlieren. Dabei jedoch so umgelenkt werden, daß sie die Probe wieder verlassen und vom Rückstredetektor registriert werden. Die Rückstreuelektronen sind nicht so ortstreu wie die Sekundärelektronen. Daher sind die Rückstreubilder weniger scharf.

Um die Geometrie der Körner zu erkennen, muß die Gelatine aufgelöst werden. Dabei geht die ursprüngliche Lage und Orientierung der Körner verloren. Die Form der Kristalle bleibt erhalten. Die Auflösung der Gelatine erfolgte mit Hilfe des Verdauungsenzyms Trypsin (Bast et al. 1983), das in destilliertem Wasser gelöst wurde. Die Unterbrechung der Auflösung erfolgte durch Abspülen mit Leitungswasser.

Abbildung 5.15 zeigt die unentwickelten Körner einer IIA-O-Emulsion. Diese Kristalle entstehen ohne die Züchtung spezieller Kristallformen, man erkennt verschiedene Kristalltypen in unterschiedlichen Größen. Aus Untersuchungen der Kristallstruktur weiß man, daß Silberchlorid und Silberbromid genau wie Kochsalz ein kubisch flächenzentriertes Gitter haben. Dennoch entstehen kaum kubische Strukturen. Die meisten Kristalle sind trigonal oder hexagonal und flach (tafelförmig). Das wird mit Hilfe von Fehlstellen in den Kristallen erklärt (Baetzhöld & Berry

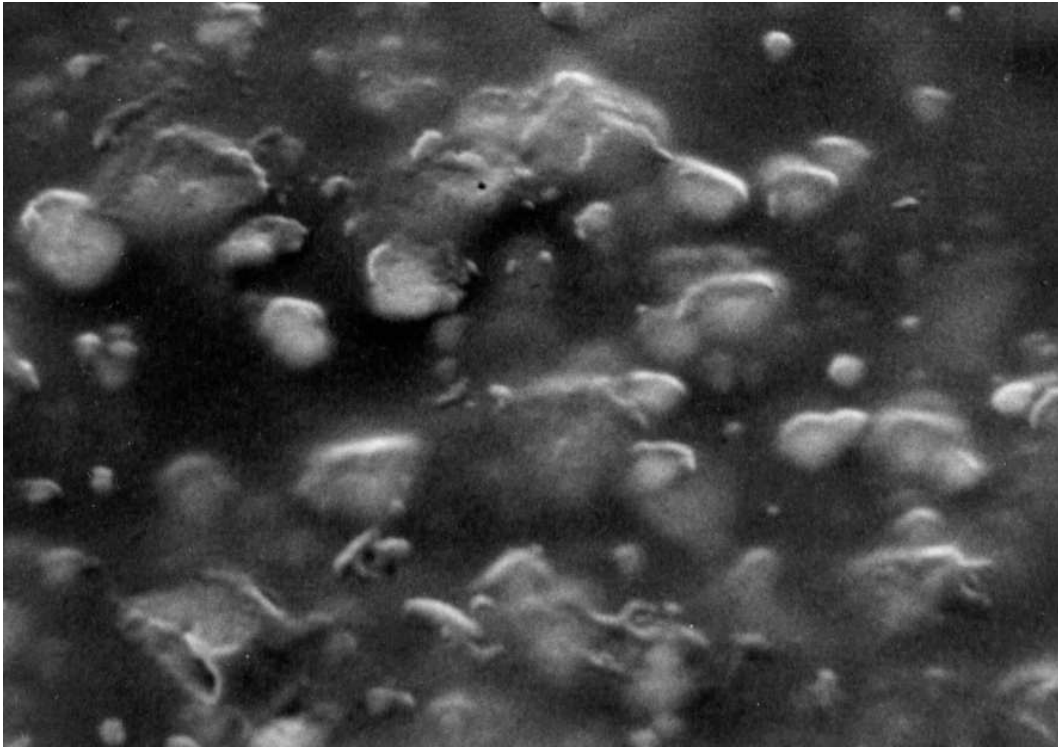


Abbildung 5.14: Die Oberfläche einer unentwickelten Ila-O-Emulsion im REM. Die Vergrößerung ist 7 600-fach.

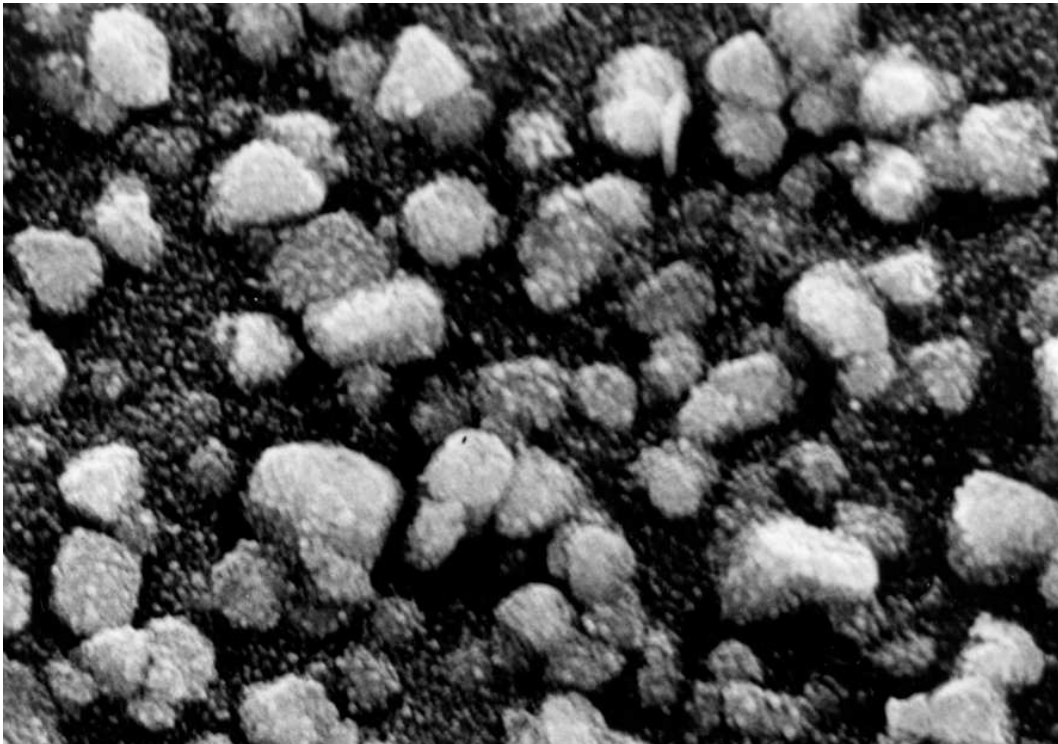


Abbildung 5.15: Hier sieht man die unentwickelten Silberhalogenidkörner einer Ila-O-Emulsion. Die feine Körnung in dieser Abbildung stammt von einer Bedampfung mit Kohlenstoff. Die Vergrößerung ist 7 600-fach.

1977). Diese Fehlstellen sind für die Bildung des Latentbildes notwendig. Heute sind die Parameter, die das Kristallwachstum beeinflussen, so gut bekannt, daß man spezielle Formen züchten kann. Die 101-01-Emulsion zeigt das sehr deutlich. Die Kristalle der IIa-O-Emulsion sind groß verglichen mit den Kristallen der 101-01-Emulsion und, wie wir noch später sehen, verglichen mit den Kristallen der IIIa-J-Emulsion (s. Abb. 5.20). Daher zeigt die IIa-O-Emulsion hohe Lichtempfindlichkeit, jedoch ein geringes Auflösungsvermögen.

Die chemisch entwickelten Körner sind nur eine lose Zusammenballung von Silberfäden, die aufgrund des schnellen Waschtums keine feste kristalline Struktur bilden können (Bast 1980). Bei der Auflösung der Gelatine zerbröckeln die entwickelten Körner und damit geht ihre Form verloren.

Bei den entwickelten Emulsionen wird die Gelatine nur teilweise entfernt. Das entspricht etwa einem Schnitt parallel zur Oberfläche der Emulsion. Ein Teil der entwickelten Körner schaut aus der Oberfläche heraus und wird als Sekundärelektronenbild dargestellt. Die Teile des Kornes, die unterhalb der Gelatineoberfläche liegen, sind als Rückstreubild zu sehen. Da die Gelatine hauptsächlich aus leichten Elementen (H, C, N, O) besteht, erzeugt sie weniger Rückstreuerelektronen als die entwickelten und unentwickelten Körner, und damit entsteht ein guter Kontrast zu den Körnern. Die Bilder sind zwar unschärfer, als die Bilder, die mit vollständig gelöster Gelatine gewonnen werden, dafür bleiben die Lage und die Orientierung der Körner erhalten.

Abbildung 5.16 zeigt die teilweise abgetragene Oberfläche einer IIa-O-Platte im Rasterelektronenmikroskop. Die Platte wurde in Dokumol 1 zu 10 für 5 Minuten entwickelt, aber nicht fixiert, so daß sowohl die unentwickelten als auch die entwickelten Körner zu sehen sind. Die unentwickelten Kristalle erkennt man an ihren glatten Oberflächen und ihre meist einfachen geometrischen Formen. Die entwickelten Körner haben rauhe Oberflächen und besitzen keine klaren geometrischen Abgrenzungen.

Abbildung 5.17 zeigt die gleiche Emulsion unter dem Lichtmikroskop. Die Platte wurde jedoch vorher fixiert. Mit Hilfe dieses Bildes kann man einen Eindruck bekommen, wie die entwickelten Kornstrukturen bei Rasterung mit dem Mikrodensitometer abgebildet werden. Auch hier ist deutlich zu sehen, daß die entwickelten Körner eine sehr unregelmäßige Form und Größe besitzen. Sie haben jedoch eine andere Form als die bei der Kodak 101-01-Emulsion (Abbildung 5.12). Das Korn kann sich hier nur in den Raum entwickeln, der in der Gelatine zur Verfügung steht. Dadurch wird das Silber stärker zusammengehalten. Dennoch ist auch hier das entwickelte Korn deutlich größer als das unentwickelte. Offenbar findet auch bei gelatinehaltigen Emulsionen eine infektiöse Entwicklung statt. Die Abbildungen 5.18 und 5.19 zeigen die IIa-O-Emulsion mit Rodinal und mit Ultrafin entwickelt.

Für alle drei Bilder mit dem optischen Mikroskop wurden Regionen gewählt, die nur schwach belichtet sind. Die Dichte ist bei allen drei Entwicklern etwa gleich. Im Gegensatz zu den Bildern der 101-01-Emulsion, 5.9, 5.11 und 5.13, zeigen hier die Körner bei allen 3 Entwicklern etwa die gleiche Größe. Lediglich die Anzahl der Körner bei der Emulsion, die mit Dokumol entwickelt wurde, ist ein wenig höher. Das stützt die Annahme, daß das entwickelte Silber durch die Gelatine zusammengehalten wird.

Für die Auswertung mit einem Mikrodensitometer ist die Form des entwickelten Silberkorns nicht entscheidend, da sie wesentlich kleiner sind, als die Optik auflösen kann. Die entwickelten Strukturen, die aus einer Zusammenballung einzelner Silberkörner bestehen sind in der Größe und in der Form vom verwendeten Entwickler weitgehend unabhängig. Lediglich die Ränder der Strukturen unterscheiden sich je nach Form eines einzelnen Silberkorns. Eine Struktur mit scharfen Rändern, wie es bei Dokumol vorkommt, erscheint größer und deutlicher, als eine Struktur mit Rändern aus diffusen Silberfäden, wie sie bei der Entwicklung mit Rodinal entsteht. Hier

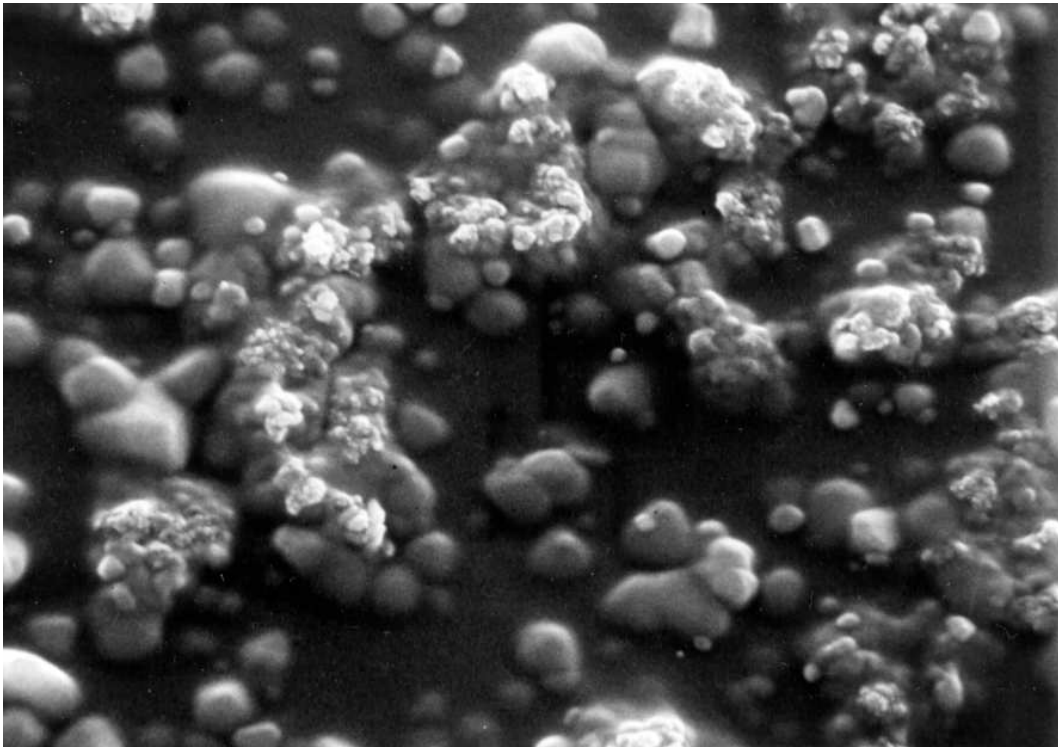


Abbildung 5.16: Bild mit dem REM von der IIa-O-Emulsion in Dokumol entwickelt. Die Vergrößerung ist 7 600-fach.

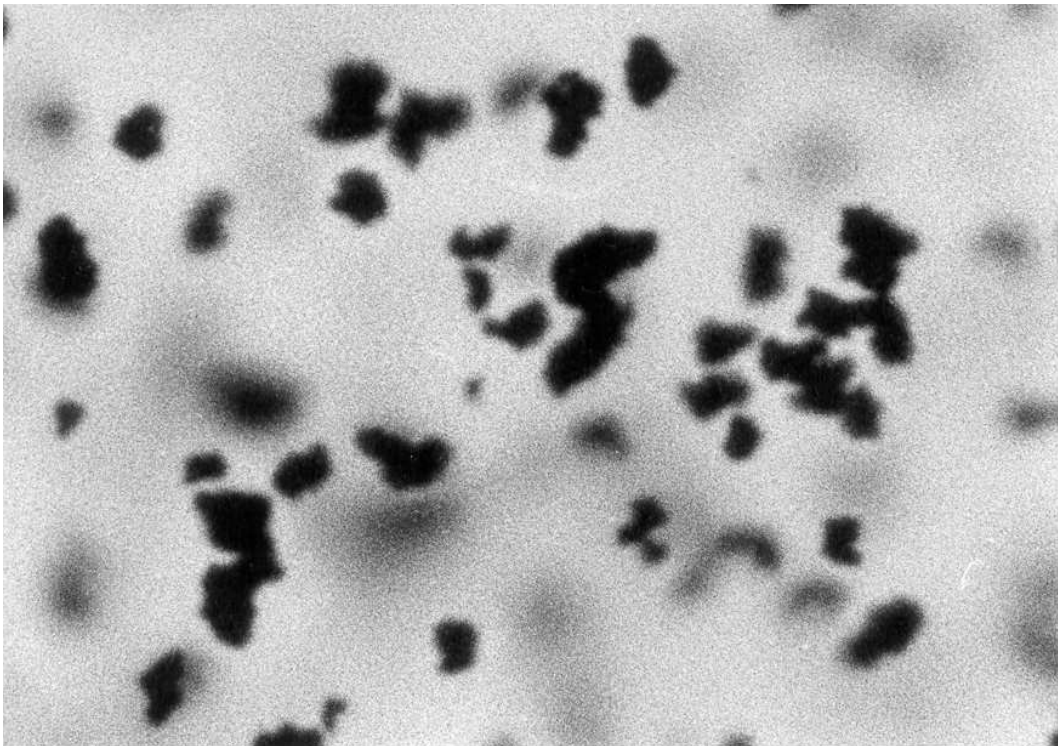


Abbildung 5.17: Bild von der IIa-O-Emulsion entwickelt in Dokumol mit einem optischen Mikroskop. Die Vergrößerung ist 3 800-fach.

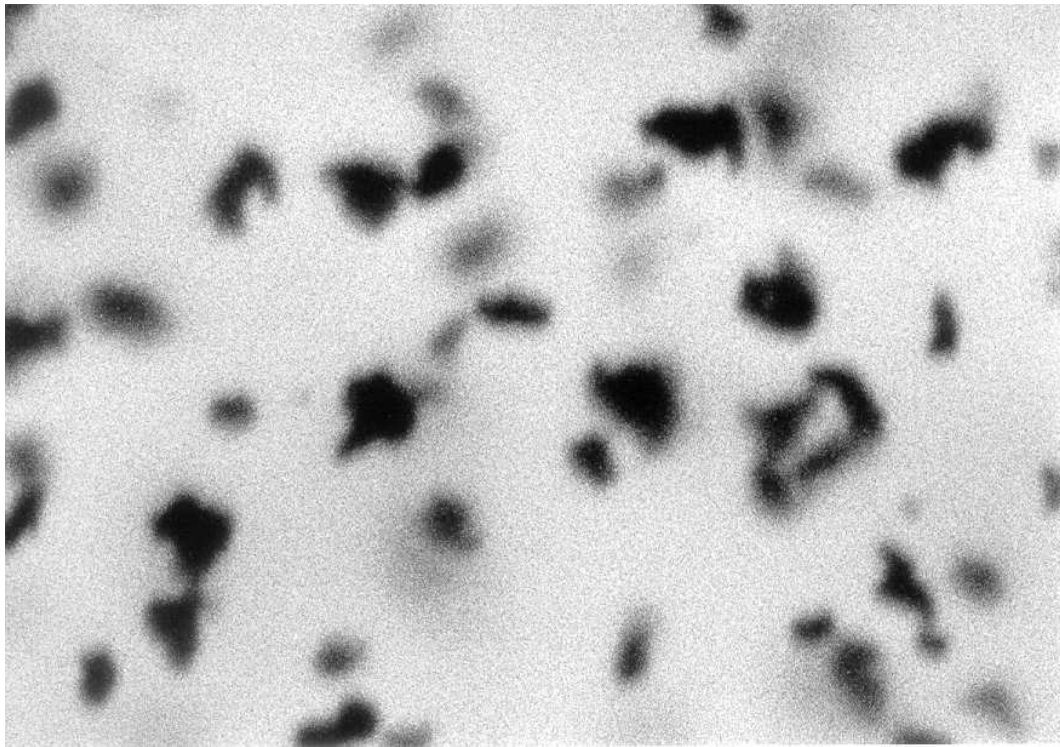


Abbildung 5.18: Bild der IIa-O-Emulsion entwickelt in Rodinal mit dem optischen Mikroskop. Die Vergrößerung ist 3 800-fach.

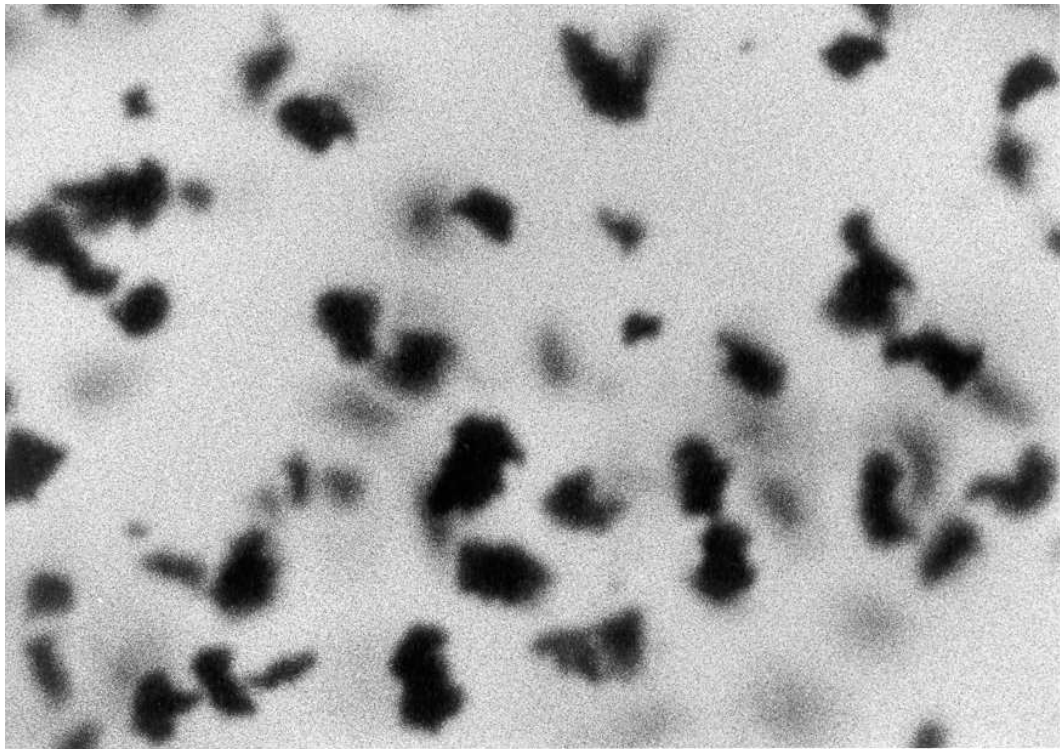


Abbildung 5.19: Bild der IIa-O-Emulsion entwickelt in Ultrafin mit dem optischen Mikroskop. Die Vergrößerung ist 3 800-fach.

wird das Licht anders gebeugt, als bei scharfen Kanten und das Korn erscheint geringfügig kleiner. Die Größe der entwickelten Strukturen läßt sich nur wenig von der Zusammensetzung der Entwickler beeinflussen, die resultierende Schwärzungskurve variiert dagegen sehr stark (s. Kapitel 5.4).

5.9.3 Die Kodak IIIa–J–Emulsion

In Bild 5.20 sind die unentwickelten Körner einer IIIa–J–Emulsion zu sehen. Diese Kristalle werden nach einem besonderen Verfahren gezüchtet. Sie sind größtenteils würfelförmig und haben nahezu alle die gleiche Größe von ca. $0.8\ \mu\text{m}$ Kantenlänge.

Abbildung 5.21 zeigt eine Probe der IIIa–J–Emulsion im REM, die mit Dokumol entwickelt, aber nicht fixiert wurde. Abbildung 5.22 zeigt die gleiche Emulsion, jedoch in Rodinal entwickelt. In beiden Fällen wurde die Oberfläche der Emulsion nur teilweise abgetragen. Es fällt auf, daß die einzelnen entwickelten Silberkörner eine ähnliche Form haben, wie wir es bereits von den Körnern der 101–01–Emulsion kennen. Die Abbildungen 5.23, 5.24 und 5.25 zeigen die entwickelten Strukturen mit dem Lichtmikroskop.

Von der Form der entwickelten Silberkörner, die in Aufnahmen mit dem REM deutlich zu sehen sind, ist im optischen Bild nichts mehr zu erkennen. Auch hier sehen wir nur Strukturen, die aus vielen einzelnen Silberkörnern bestehen. Sie sind etwa gleich groß und vom Entwickler nahezu unabhängig, wie schon bei der IIa–O–Emulsion. Die entwickelten Strukturen der IIIa–J–Emulsion durchweg kleiner, als die Strukturen der IIa–O–Emulsion (s. Abb. 5.17, 5.18, 5.19). Hauptausschlaggebend für die Größe der entwickelten Strukturen sind demnach die Größen der ursprünglichen Silberhalogenidkristalle.

Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu Veröffentlichungen in Büchern über die Photographie und in Zeitschriften. Herstellerfirmen werben häufig mit der „Feinkörnigkeit“ ihrer Entwickler. Es scheint, daß diese Behauptungen ohne Kritik immer weiter gegeben wurden und sich so zu einem Mythos entwickelt haben. Man kann den Eindruck der Feinkörnigkeit durch optische Täuschungen hervorrufen. Das geht aber nur auf Kosten des Auflösungsvermögens. Für die wissenschaftliche Photographie kommt jedoch auf Auflösungsvermögen und Schärfe an. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Entwicklern findet man in den Schwärzungskurven. Diese Eigenschaften müssen bei der Wahl des Entwicklers im Vordergrund stehen.

5.10 Alterungserscheinungen bei der Archivierung

Alle genannten Prozesse, wie auch das anschließende Trocknen, haben großen Einfluß auf die Qualität des entwickelten Bildes und auf die Archivfestigkeit.

Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen zeigten sogar Photoplatten im Archiv des Royal Observatory Edinburgh (ROE) nach einigen Jahren Lagerung Fehlstellen, die als Mikrospots oder als Goldspots bezeichnet werden (Good & Gourley 1984, Sim 1984). Dabei entstehen Flecken, die sich im Durchlicht, d.h. beim Digitalisieren, wenig von schwachen Sternen unterscheiden. Im Gegensatz zum entwickelten Silber zeigen sie im Auflicht eine goldgelbe Farbe. Bilder von Objekten in der Region der *Goldspots* werden dabei zum Teil unwiderruflich zerstört. Goldspots zeigen sich hauptsächlich auf IIIa–J und IIIa–F–Platten. Andere Platten haben bisher weniger Anfälligkeit gezeigt. Ebenso wurden an anderen Observatorien bisher nur wenige oder keine Platten der am ROE anfälligen Emulsionen von den Mikrospots befallen.

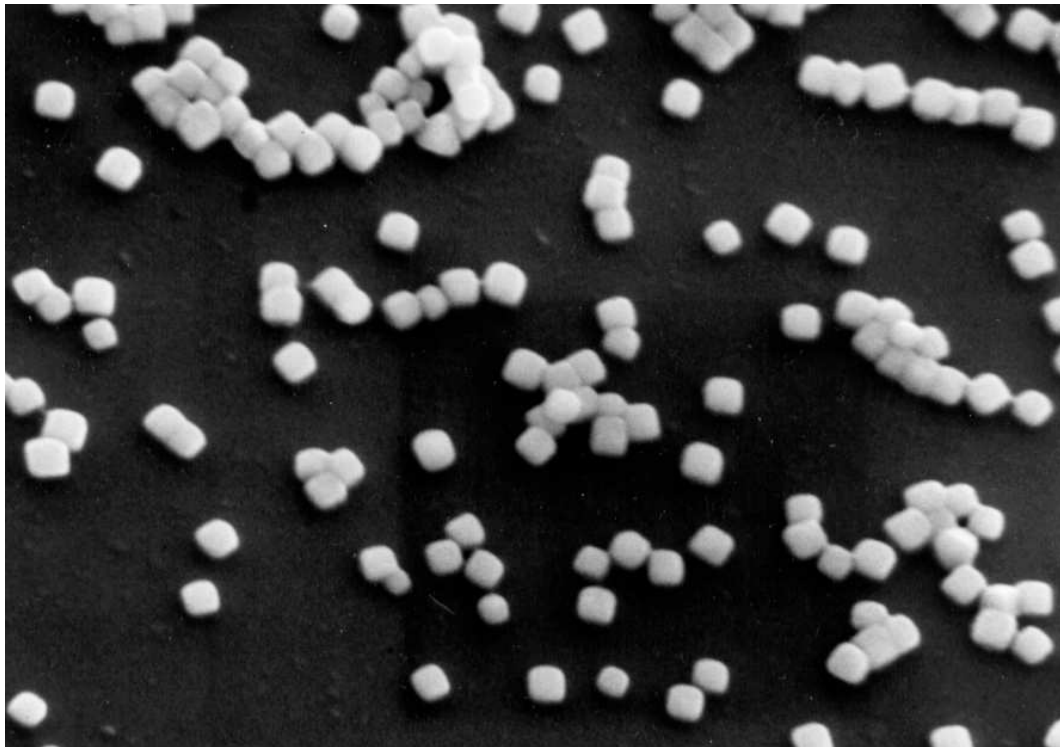


Abbildung 5.20: Unentwickelten Körner einer IIIa-J-Emulsion. Die Kristalle sind mit Hilfe spezieller Verfahren kubisch gezüchtet worden. Alle Kristalle haben fast die gleiche Größe. Die Vergrößerung ist 7600-fach.

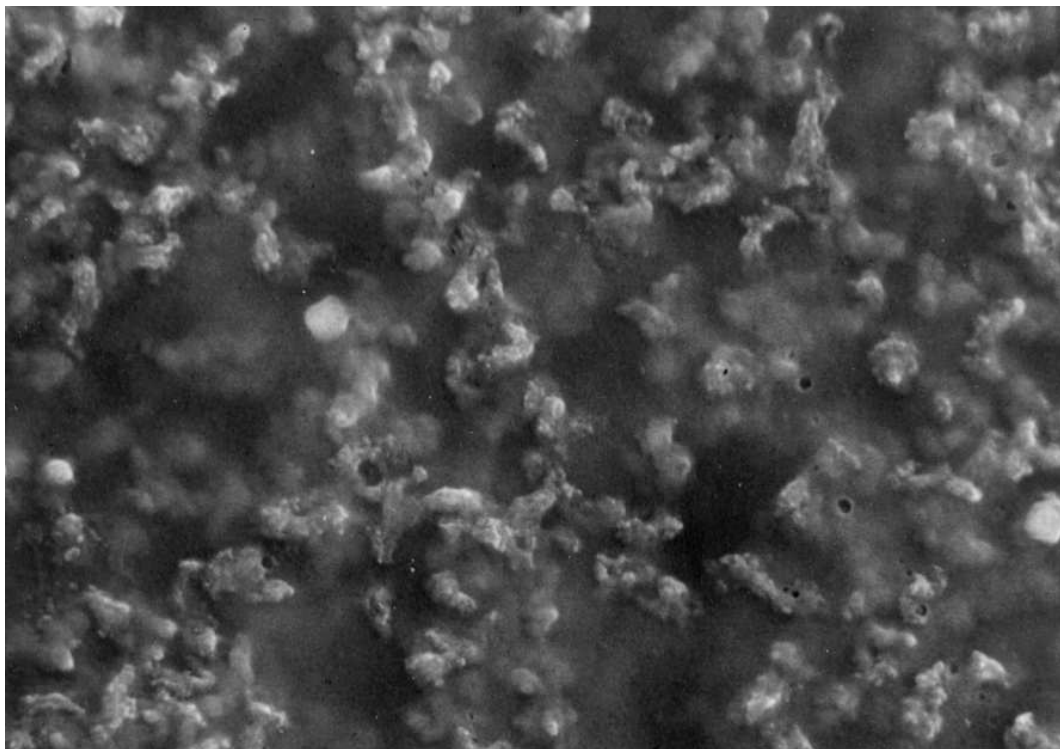


Abbildung 5.21: REM-Bild der IIIa-J-Emulsion, entwickelt in Dokumol, aber nicht fixiert. Die Vergrößerung ist 7600-fach.

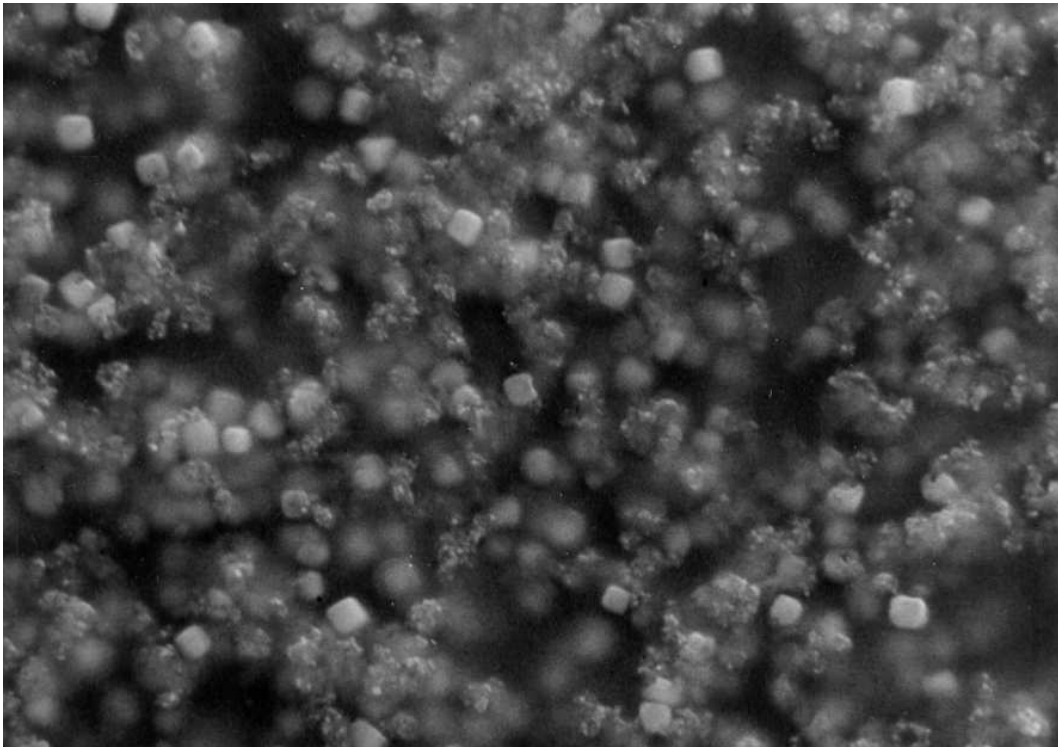


Abbildung 5.22: REM-Bild der IIIa-J-Emulsion, entwickelt in Rodinal, aber nicht fixiert. Die Vergrößerung ist 7600-fach.

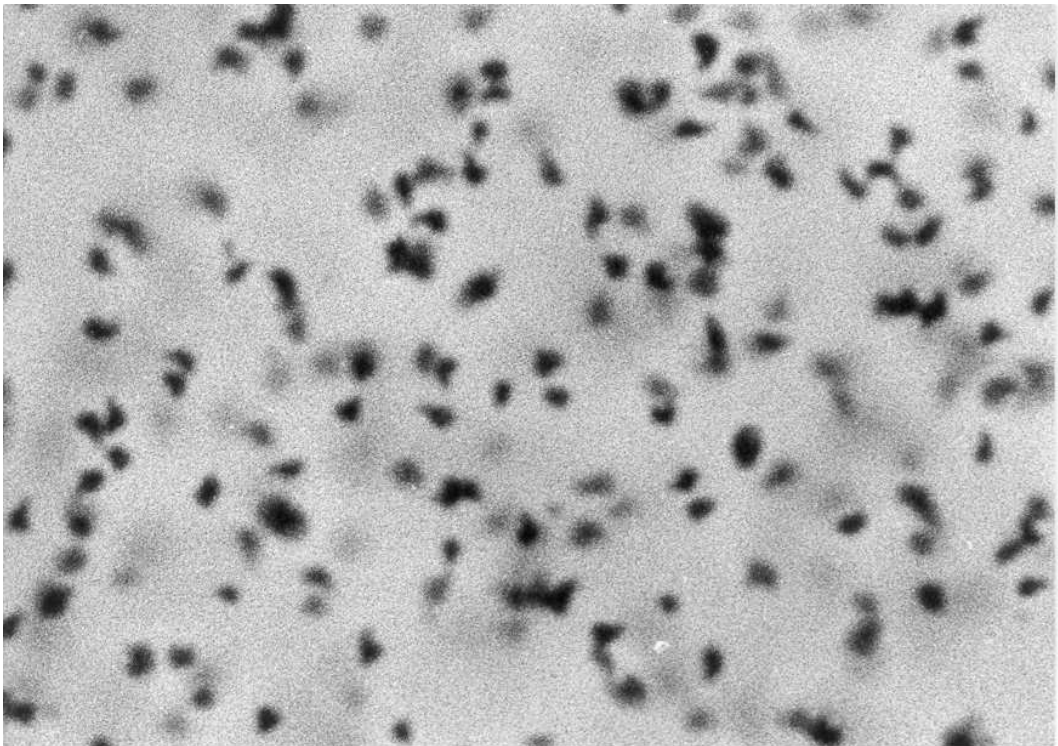


Abbildung 5.23: Bild von der IIIa-J-Emulsion entwickelt mit Dokumol mit einem optischen Mikroskop. Die Vergrößerung ist 3800-fach.

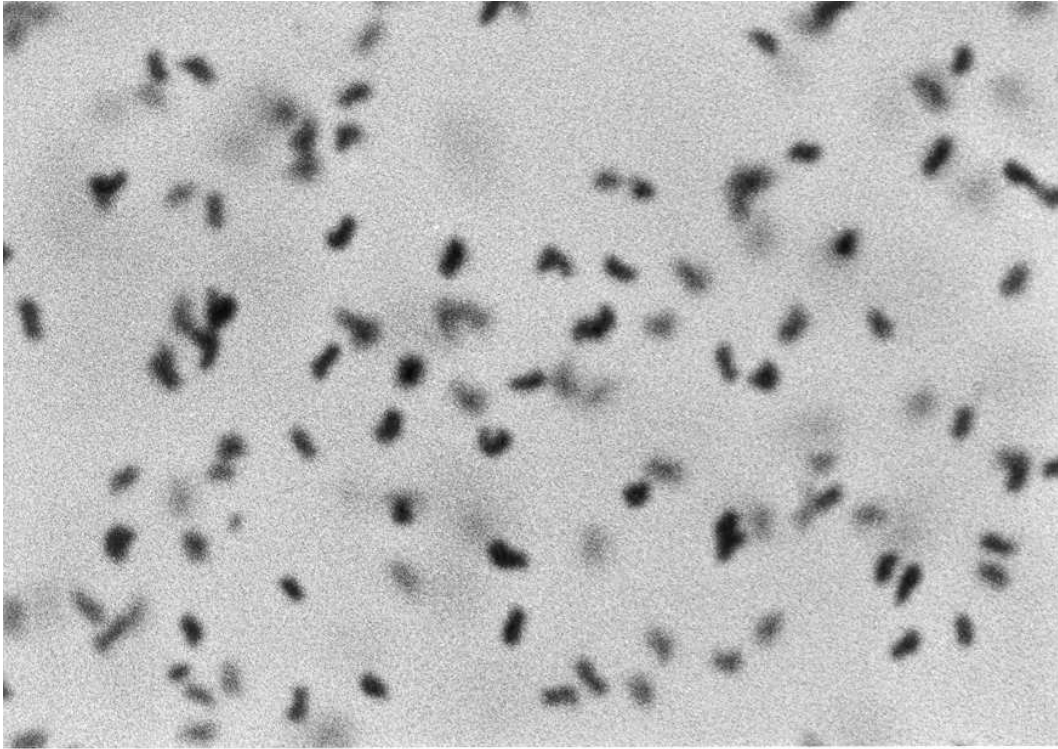


Abbildung 5.24: Bild von der IIIa-J-Emulsion entwickelt mit Rodinal mit einem optischen Mikroskop. Die Vergrößerung ist 3800-fach.

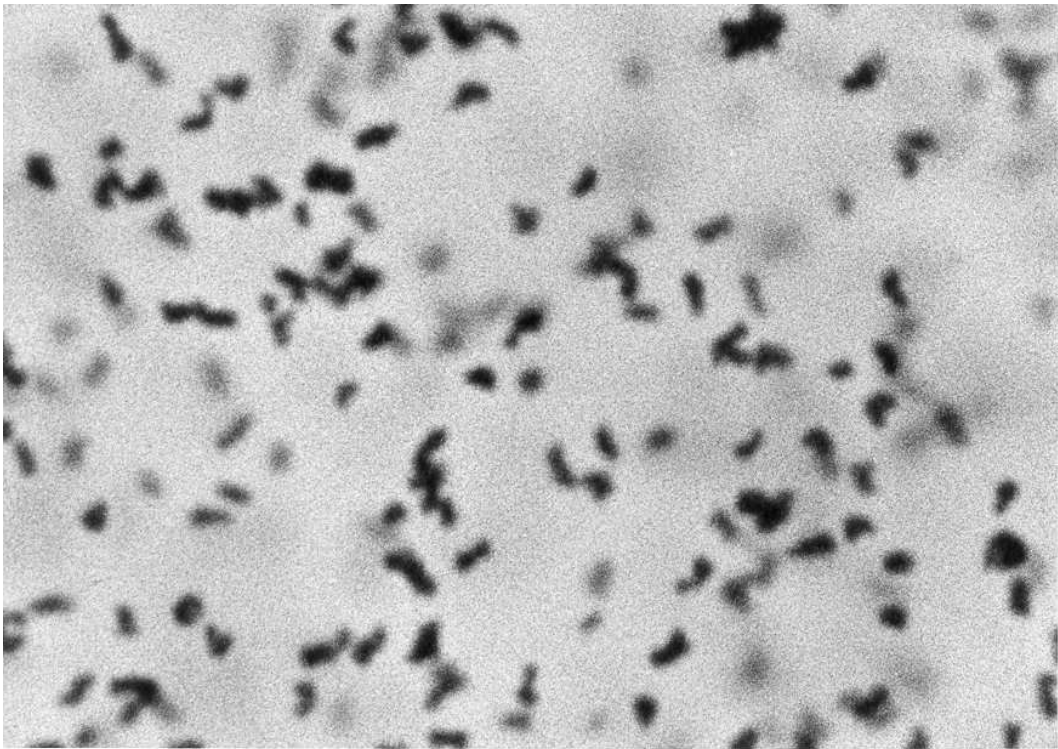


Abbildung 5.25: Bild von der IIIa-J-Emulsion entwickelt mit Ultrafin mit einem optischen Mikroskop. Die Vergrößerung ist 3800-fach.

Die Firma Kodak als Hersteller der Platten schlägt ein Verfahren vor, mit dem die Alterung der Photoplatten im Labor simuliert werden kann (Lee et al. 1984). Dabei werden die entwickelten Photoplatten einer Atmosphäre mit relativer Luftfeuchtigkeit 80% ausgesetzt. Mit Hilfe von Wasserstoffsuperoxid (H_2O_2) wird die Alterung beschleunigt. Das zweite Sauerstoffatom kann leicht abgegeben werden. Es führt zur Oxidation verschiedener Elemente (auch Silber). Zurück bleibt Wasser und das Oxid. Bisher wurde noch keine Methode gefunden, die Goldspots zu vermeiden. Als guter Schutz gegen den Befall der Platten mit Goldspots hat sich die Selen-Tonung herausgestellt. Dabei wird die Oberfläche des entwickelten Silbers mit Selen überzogen (Lee et al. 1984). Das verändert natürlich die photometrischen Parameter dieser Platten. Deshalb ist es wichtig, daß sich auf der Platte Kalibrationsflecken befinden, die in der gleichen Weise behandelt werden. Nach der Selentonung ist die Wahrscheinlichkeit für den Befall einer Photoplatte mit Goldspots deutlich geringer. Er kann aber bisher nicht sicher vermieden werden.

Im Rahmen meiner Arbeit mit Photoplatten wurden auch Experimente mit künstlicher Alterung von Photoplatten gemacht. Erste Ergebnisse sind bereits bei Budell (1984) zu finden. Es wurde festgestellt, daß jede Emulsion unter diesen Bedingungen eine Veränderung bzw. Zerstörung der Bildinformationen zeigt, wenn die Konzentration des Wasserstoffsuperoxids hoch genug ist. Wenn eine Platte nur kurz gewässert wird, ist die Wahrscheinlichkeit, daß sie zerstört wird, sehr groß. Im Gegensatz dazu zeigten Photoplatten, die sonst sehr anfällig für Mikrospots sind, keine Veränderung, wenn sie unüblich lange fixiert und gewässert wurden.²

Die folgenden Abbildungen zeigen einige extreme Zerstörungen der Bildinformationen, die während der hier beschriebenen Experimente entstanden sind. Sie wurden mit Hilfe eines optischen Mikroskops im Durchlicht und im Auflicht gewonnen. Bei diesen Experimenten wurden zum Teil Photoplatten mit Bildern von Sternen benutzt. Abbildung 5.26 zeigt den Beginn einer Zerstörung im Durchlicht. In der Mitte der beiden Kreise ist jeweils das Bild eines Sternes. Um die Sterne hat sich ein ausgeprägter Hof gebildet. Die Größen der Höfe sind proportional zur Helligkeit der Sterne (hier allerdings nicht zu sehen). Vermutlich wurde Silber aus dem Sternbild abgebaut und in die Umgebung transportiert. Abbildung 5.27 zeigt den gleichen Bereich im Auflicht. Die Kreise bestehen aus einem Niederschlag von kolloidalem Silber, das im Durchlicht gelb erscheint.

Abbildung 5.28 zeigt ein umgekehrtes Verhalten. Dieser Goldspot entstand in mitten einer einheitlich geschwärzten Fläche. Im Zentrum war offensichtlich ein Kristallisationskeim. Das Silber in der Umgebung wurde abgebaut und zum Zentrum hin transportiert. Die Formen der Veränderung erscheinen nicht vorhersehbar zu sein.

Das wird auch auf Abbildung 5.29 deutlich. Hier sehen wir eine Struktur im Auflicht, die sich an einer einheitlich geschwärzten Stelle gebildet hat. Der gesamte Bereich hat sich bereits mit einem Silberniederschlag überzogen, der jedoch an dieser Stelle noch einmal modifiziert wurde.

In Bild 5.30 sehen wir das Bild einer stark fortgeschrittenen Zerstörung der Photoplatte. (Der schwarze Streifen in dem Bild ist eine aufgebrachte Struktur.) Die übrige belichtete Region zeigt keine Abbildungen. Daneben befindet sich eine schwach belichtete Region ohne Struktur, in der erscheint ein großer Flecken mit einer konzentrischen, komplexen Struktur. In Bild 5.31 ist die

²Stattdessen zeigte sich bei diesen Platten nach der künstlichen Alterung der Farbstoff Fluorescein in der Gelatine. Dieser Farbstoff ist bereits in geringsten Spuren sichtbar. Die Formel von Fluorescein ist ähnlich der des Farbstoffs Eosin. Eosin entsteht durch Bromierung von Fluorescein. Bei der Reaktion werden vier Wasserstoffatome gegen vier Bromatome getauscht. Eosin kann in der Photographie zur Sensibilisierung von Emulsionen für den gelb-grünen Bereich verwendet werden. Es scheint also eine kleine Menge des Sensibilisierungsfarbstoffs in der Gelatine zurück zu bleiben. Wie weit dieser Farbstoff an der Bildung der Goldspots beteiligt ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

gleiche Region im Auflichthellfeld zu sehen. An der Oberfläche erscheint ein Niederschlag aus fein verteiltem, metallischem Silber. Das hier gezeigte Phänomen ist bisher nicht erklärt.

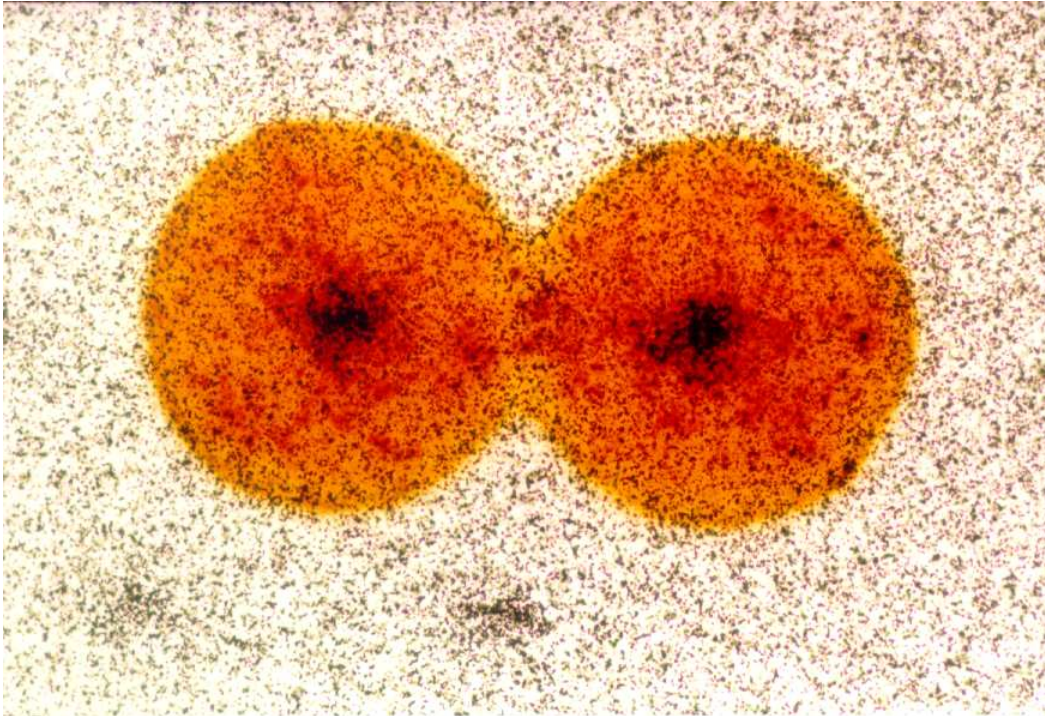


Abbildung 5.26: Durchlichtbild der beginnenden Zerstörung von Sternbildern. Das Silber wandert vermutlich vom Zentrum in den Hof und bildet einen „Goldspot“. Die Vergrößerung ist 208-fach.

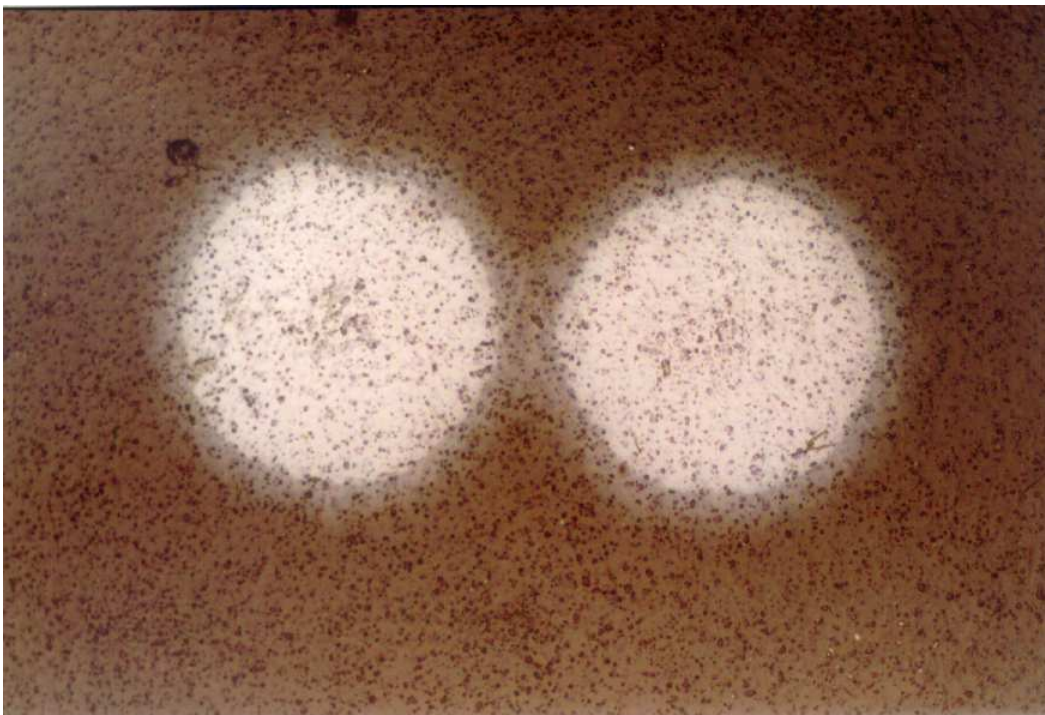


Abbildung 5.27: Auflichtbild des Feldes von 5.26. Die Kreise sind mit kolloidalem Silber belegt, das in Durchlicht gelb erscheint. Die Vergrößerung ist 208-fach.

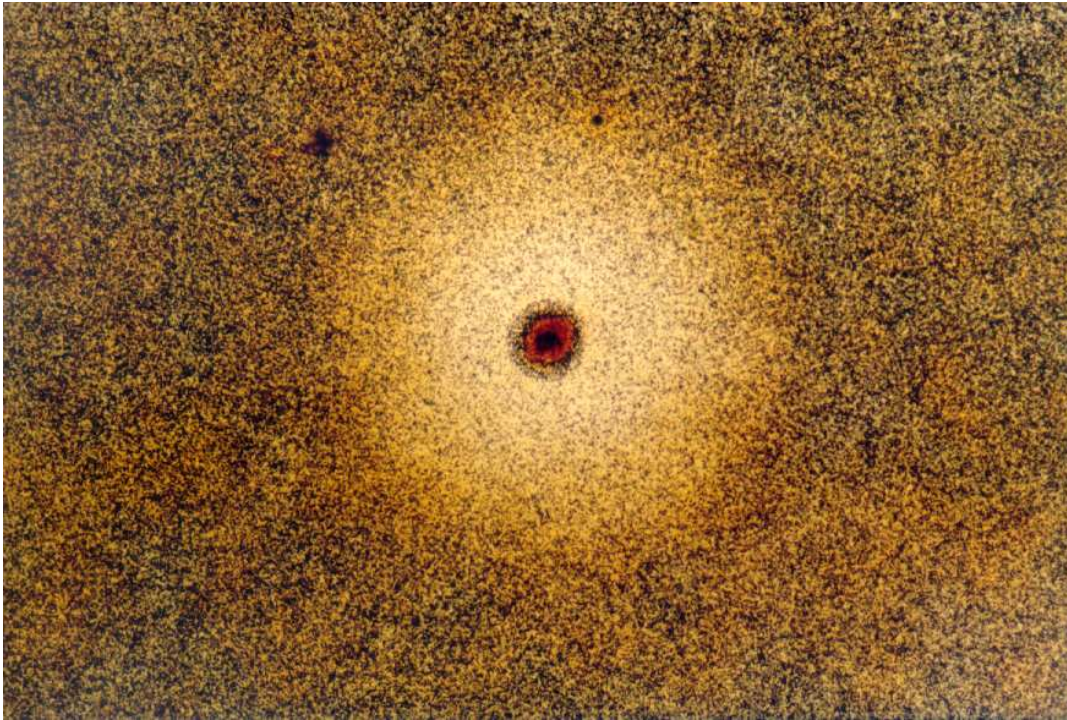


Abbildung 5.28: Durchlichtbild der Zerstörung eines Silberbildes. In diesem Fall scheint das Silber aus der Region ins Zentrum zu wandern. Im Zentrum befand sich wahrscheinlich eine Störung, die als Kondensationskeim wirkte. Diese Struktur hat sich in einer einheitlich geschwärzten Region gebildet. Die Vergrößerung ist 208-fach.

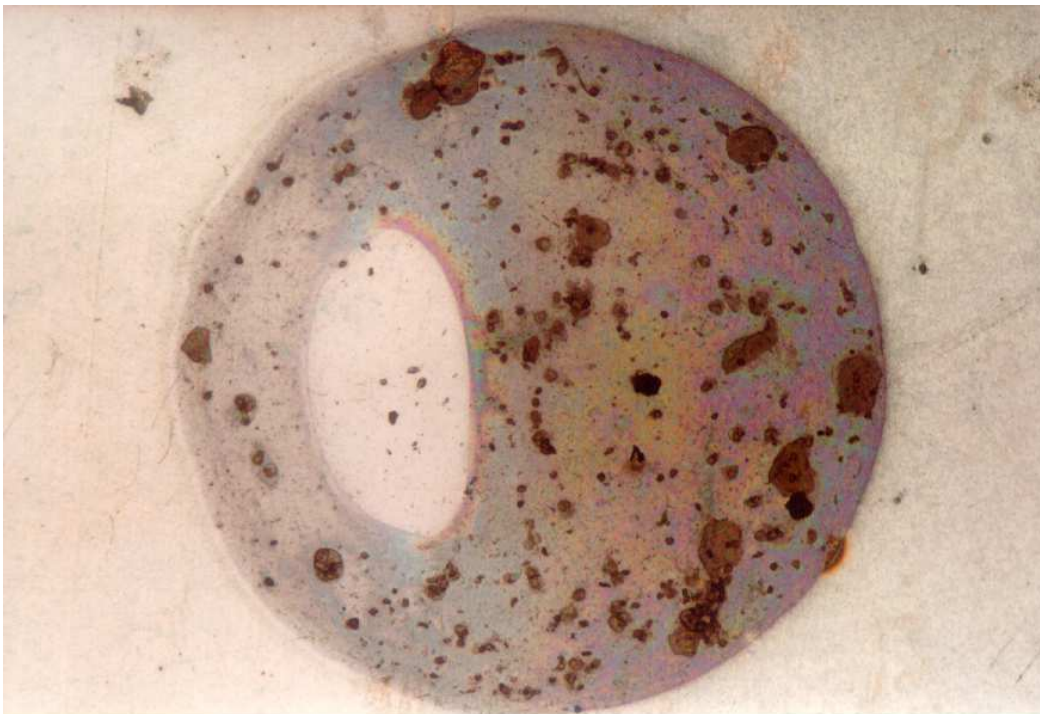


Abbildung 5.29: Auflichtbild einer Struktur, die sich auf einer einheitlich geschwärzten Region gebildet hat. Die Umgebung ist bereits mit einem Silberniederschlag überzogen. Die Bildung dieser Struktur ist bisher nicht erklärt. Die Vergrößerung ist 104-fach.

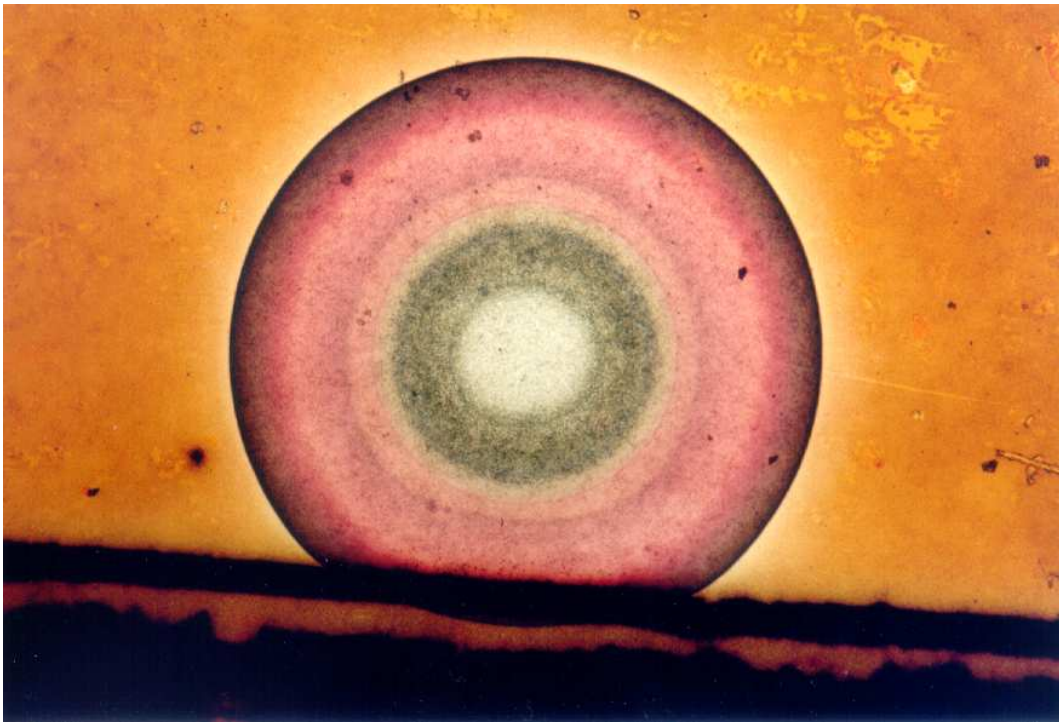


Abbildung 5.30: Dieses Bild zeigt die weit fortgeschrittene Zerstörung eines Silberbildes im Durchlicht. Sie entstand in einer gering belichteten Region ohne Struktur. Die schwarze Linie gehört zum entwickelten Bild. Die Vergrößerung ist 52-fach.

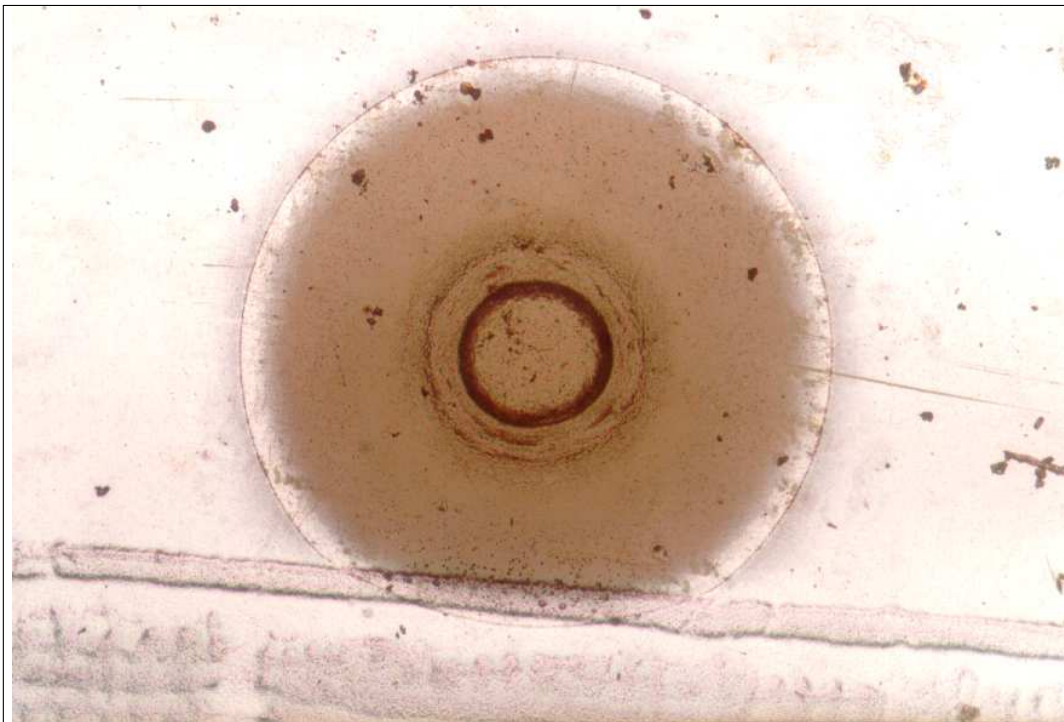


Abbildung 5.31: Dies Bild zeigt die gleiche Region wie Bild 5.30, jedoch im Auflichthellfeld. Die Oberfläche ist bereits mit einem Niederschlag aus metallischem Silber versehen. Die Vergrößerung ist 52-fach.

Kapitel 6

Untersuchungen zur Qualität von Folienkopien des ESO/SERC-ATLAS

6.1 Einleitung

Bereits in den frühen Kulturen wurde der Himmel systematisch beobachtet, Kataloge und Bilder wurden angelegt. So konnte man Veränderungen am Himmel entdecken. Das war meist eine staatliche Aufgabe, da man an einen Zusammenhang zwischen den Ereignissen am Himmel und den Ereignissen auf der Erde vermutete. Heute werden Kataloge und Atlanten erstellt, um Objekte leichter finden zu können und um statistische Untersuchungen in großen Bereichen des Himmels zu machen.

Mit der Einführung der Photographie in die Astronomie im 19. Jahrhundert wurde es möglich, viele Sterne gleichzeitig aufzuzeichnen. Die entwickelten Photoplatten konnten als Himmelskarten benutzt werden, an hand derer man Objektparameter wie Position, Helligkeit und Objektklasse messen konnte.

In der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts entstanden umfangreiche Himmelsatlanten. Einer davon ist der Palomar Observatory Sky Survey (POSS), mit 879 Feldern des Nordhimmels. Von jedem Feld gibt es eine Blau- und eine Rotaufnahme. Dieser Atlas wurde in Form von Kontaktkopien auf Photopapier verbreitet. Zur Zeit ist eine Neuauflage dieses Atlas (POSS-2) in Arbeit. Dabei werden von jedem Feld 4 Aufnahmen in verschiedenen Farbbereichen gemacht (Zusammenarbeit von Palomar Observatory, ESO, STScI). Dieser Atlas soll als Folienkopie und als Glaskopie verbreitet werden. Die Aufnahmen sind bereits weitgehend vorhanden.

Die Originalplatten des ESO/SERC-Atlas wurden in zwei Farben aufgenommen. Die IIIa-J-Platten (blaugrüner Farbbereich) wurden mit dem Anglo-Australian Schmidt-Teleskop aufgenommen. Das Plattenmaterial war hypersensibilisiert und wurde durch ein GG 395 Filter belichtet. Daraus ergab sich ein Empfindlichkeitsbereich von $\lambda = 395 \text{ nm}$ bis $\lambda = 540 \text{ nm}$ (Morgan & Tritton 1988). Die Rotplatten wurden mit dem ESO-Schmidt-Spiegel auf La Silla aufgenommen. Man benutzte die hypersensibilisierte IIIa-F-Emulsion und ein RG 630-Filter. Daraus ergibt sich ein Wellenlängenbereich von $\lambda = 630 \text{ nm}$ bis $\lambda = 700 \text{ nm}$. Von den Originalplatten wurden bei ESO, Garching, Kopien gemacht und kommerziell vertrieben. Der gesamte Atlas ist als Glaskopie und als Filmkopie erhältlich.

Am AIM wurden in den vergangenen Jahren die Filmkopien vom galaktischen Südpol bis 20 Grad galaktischer Breite und ergänzende Objektiv-Prismen-Spektern digitalisiert und für das MRSP benutzt (Seitter et al. 1994).

6.2 Vergleich von Originalplatten und Folienkopie

Für eine vergleichende Untersuchung standen dem AIM eine Originalplatte des Feldes 413 und jeweils 4 Glas- und Folienkopien zur Verfügung. Die IIIa-F-Platte war für das Atlasprojekt belichtet, wegen eines im vorliegenden Fall nicht störenden Kratzers auf der Emulsion jedoch aussortiert worden. Je eine Kopie wurde von ESO, Garching, nach dem gleichen Verfahren bearbeitet, mit dem alle Glas- und Folienkopien für den Atlas hergestellt sind. Bei den anderen Kopien wurden verschiedene Parameter verändert.

Ein erster Vergleich der Kopien wurde von Sommer (1993) durchgeführt. Dabei wurde keine eindeutige Überlegenheit der Glaskopie gegenüber der Folienkopie festgestellt. Beide Kopien zeigten bei einigen Meßvorgängen gute Übereinstimmungen mit dem Original und bei anderen schlechtere. Die Abweichungen vom Original waren jedoch auf der Glaskopie anders als auf der Folienkopie. Keine der beiden Kopien erreichte die Qualität der Originalplatte. Die beste Kopie dieser Untersuchung war eine Folienkopie, die vom Zwischenpositiv mit anderen Parametern gemacht worden war. Je eine Kopie auf Glas und auf Folie war mit den Parametern gemacht worden, die van Haarlem et al. (1992) als High-Fidelity Kopie beschreibt. Auch diese Kopien konnten jedoch in einigen Punkten die Qualität des Originals nicht wiedergeben.

In der folgenden Untersuchung wird die Folienkopie untersucht, die mit den gleichen Parametern hergestellt war, die denen des ESO/SERC-Atlas entsprechen.

Von der Originalplatte und der Folienkopie wurden 2 Felder mit je 2048×2048 Pixel mit einem $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ Spalt digitalisiert. Die Schrittweiten in X und in Y betragen jeweils $5\ \mu\text{m}$. Ein Feld enthält Sterne und Hintergrund, im zweiten Feld ist außerdem die Galaxie MCG-04-05-044 zu sehen. Die Hochspannung der PMT wurde so justiert, daß klare Emulsion auf die Dichte Null gesetzt wurde. Die Himmeldichten sind die Dichten oberhalb des Schleiers (klare Emulsion). Damit haben beide Platten bei einem photometrischen Vergleich den gleichen Referenzpunkt.

Abbildung 6.1 zeigt das Histogramm des Feldes der Originalplatte ohne Galaxie. Die geringste Dichte liegt bei etwa 1.1. Die Belichtungszeit wurde bei der Original-Aufnahme so gewählt, daß die mittlere Dichte des Himmels etwa 1 erreichte. Dadurch liegen fast alle Dichten im linearen Teil der Schwärzungskurve, nur die Zentren einiger heller Sterne können die Sättigung erreichen.

Abbildung 6.2 zeigt das Histogramm des gleichen Feldes auf der Folienkopie. Die Dichte des Himmels beginnt hier bereits bei 0.3 oberhalb der klaren Emulsion. Die Sättigung liegt bei Dichte 3.8. An dieser Stelle kann jedoch nicht unterschieden werden, ob es sich um die Sättigung des Kopierfilms handelt oder um die mitkopierte Sättigung der Originalplatte. Aus dem Bericht von Zodet (1988) kann man jedoch ablesen, daß es die Sättigung des Kopierfilms ist.

In den Abbildungen 6.3 und 6.4 sehen wir jeweils einen Querschnitt durch die Galaxie, einmal von der Originalplatte (Abb. 6.3) und einmal von der Folienkopie (Abb. 6.4). Bei der Originalplatte ist der Kern der Galaxie gerade so stark geschwärzt, daß er die Sättigung des Mikrodensitometers erreicht. Die Folienkopie erreicht im Kern die Dichte 4. Es ist deutlich zu erkennen, daß das Profil des Kerns der Galaxie auf der Folienkopie verzerrt ist gegenüber dem Profil der Galaxie auf der Originalplatte. Außerdem sieht man, wie in den Flügeln feine Details verwischt sind.

Eine weitere Untersuchung soll zeigen, in welchem Maß Objektstrukturen beim Kopierprozess verloren gehen. Dazu wurden das Feld mit und das Feld ohne Galaxie sowohl von der Originalplatte als auch von der Folienkopie ausgewertet:

Zunächst wurde die Dichte in Intensität gewandelt. Das wurde mit Hilfe einer vereinfachten Schwärzungskurve vorgenommen, wie es bei der Reduktion der MRSP-Daten üblich ist. Die

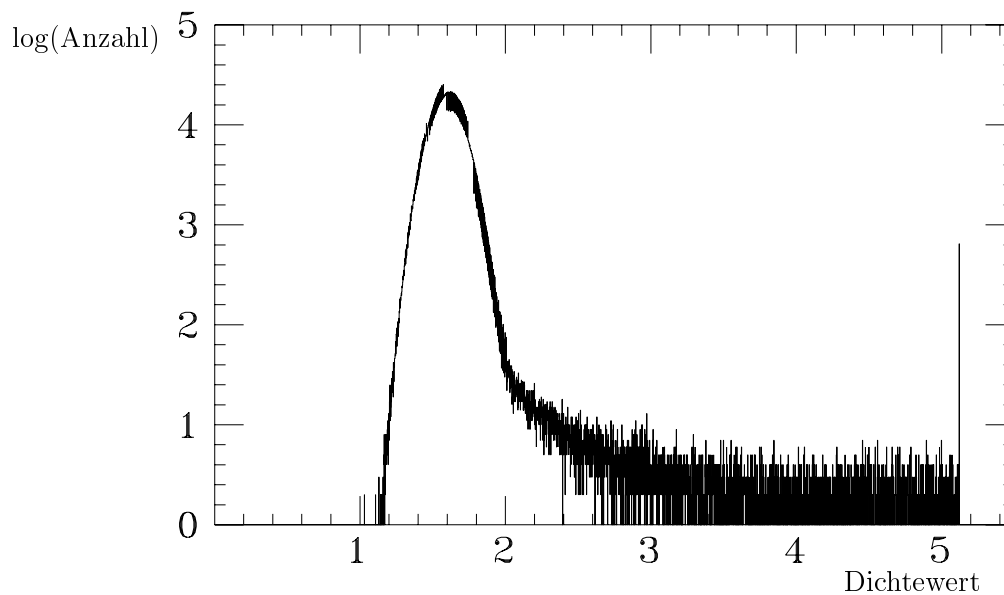


Abbildung 6.1: Histogramm eines Himmelfelds mit Sternen ohne Galaxie von einer IIIa-F-Originalplatte, aufgenommen mit dem ESO Schmidt-Teleskop. Die Stufen werden durch den Verstärker/Konverter erzeugt (s. Kapitel 4.3.1) Die Spitze bei dem Dichtewert 5.12 entsteht durch die Sättigung des Verstärker/Konverters.

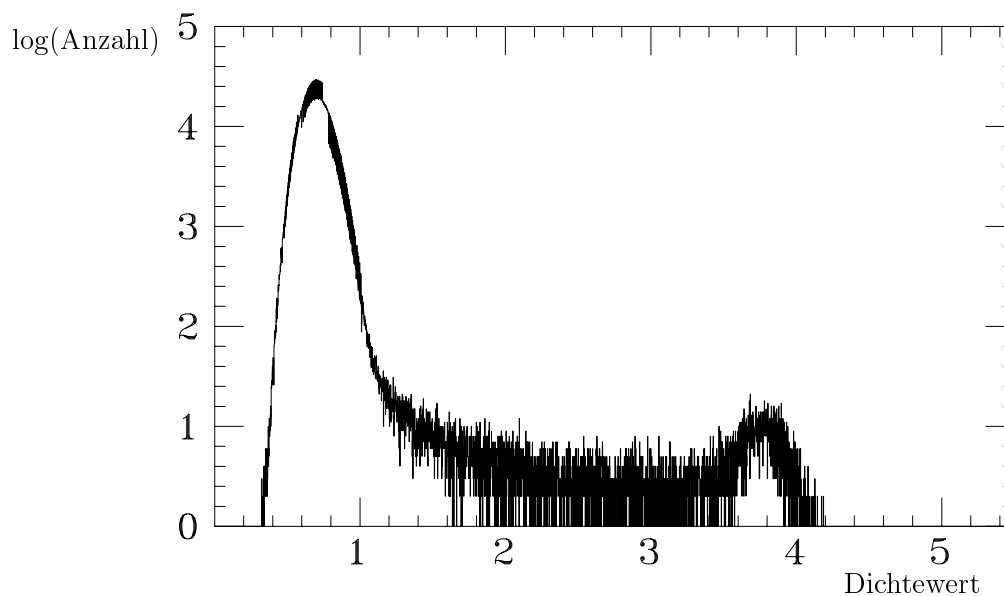


Abbildung 6.2: Histogramm des gleichen Himmelfelds wie in Abb. 6.1, jedoch von der Standardfolienkopie der Atlas-Originalplatte. Die Stufen werden durch den Verstärker/Konverter erzeugt (s. Kapitel 4.3.1).

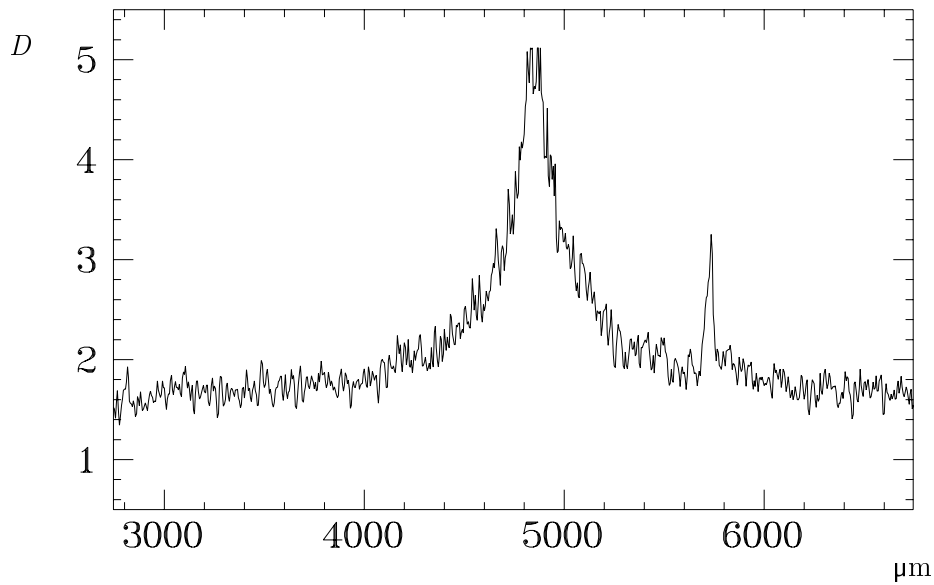


Abbildung 6.3: Dichteprofil durch das Zentrum der Galaxie MCG-04-05-044 von der Originalplatte. Der Kern der Galaxie befindet sich gerade an der Sättigung durch das Mikrodensitometer.

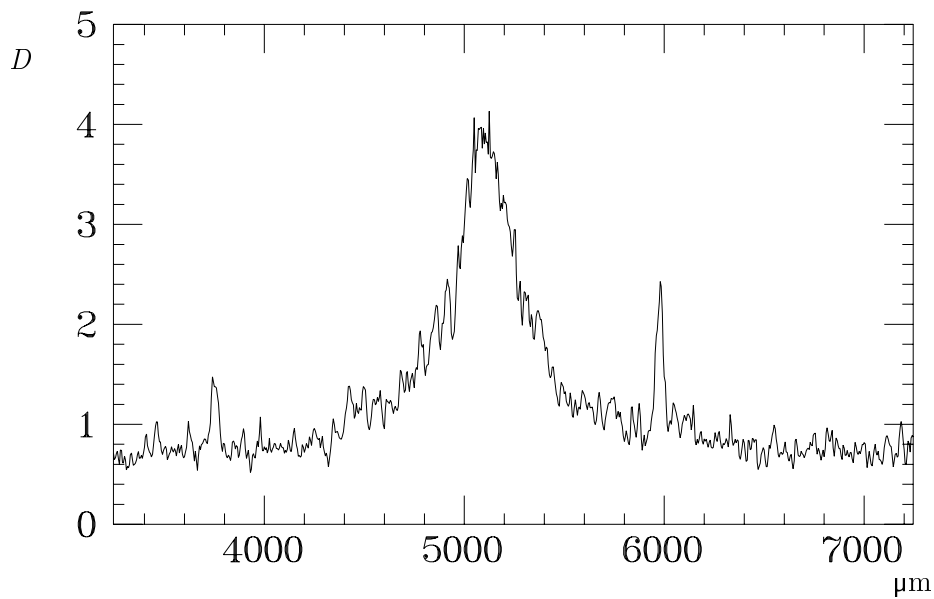


Abbildung 6.4: Das Dichteprofil der gleichen Galaxie wie in 6.3, jedoch von der Folienkopie digitalisiert. Das Profil ist gegenüber Abb. 6.3 breiter und zeigt weniger von den feinen Strukturen.

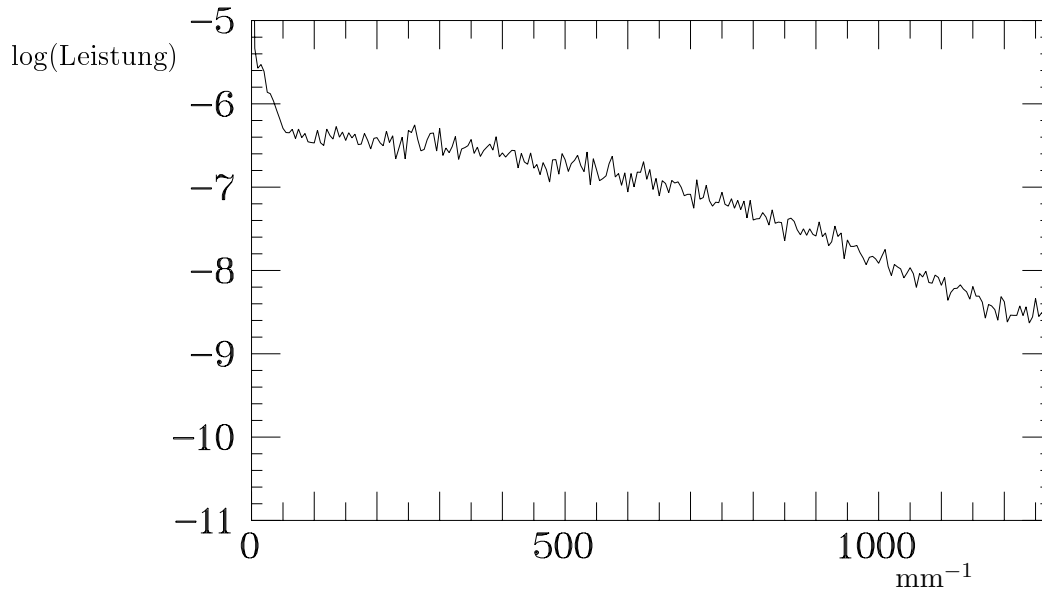


Abbildung 6.5: Leistungsspektrum eines der Kalibrationsflecken auf der Originalplatte in logarithmischer Darstellung. Das Feld war 512×512 Pixel groß. Das entspricht $2.56 \text{ mm} \times 2.56 \text{ mm}$ auf der Platte. Die mittlere Dichte dieses Flecken beträgt etwa 1.72 und liegt damit oberhalb der Dichte des mittleren Himmels.

Dichte des Himmels liegt auch bei den Folienkopien oberhalb der Schwelle. Das gilt ebenso für das Zwischenpositiv, von dem die Kopie gemacht wurde, bei der die Dichte des Himmels unter die Schulter gelegt wurde (s. Abb. 5.1). Es kann bei der Originalplatte und auch bei der Folienkopie davon ausgegangen werden, daß fast alle Dichten oberhalb des Himmelshintergrundes im linearen Teil der Schwärzungskurve liegen; lediglich ein kleiner Teil der Dichten befindet sich in der Sättigung oder in der Schulter der Schwärzungskurve. Dabei handelt es sich um die Zentren von Sternen und um die Kerne heller Galaxien. Für das MRSP-Projekt kann das vernachlässigt werden, da 99.4% aller untersuchten Galaxien so lichtschwach sind, daß der Kern nicht in der Sättigung liegt (Cunow 1993a,b).

Das gilt allerdings nicht für die Galaxie MCG-04-05-044, die hier in die Untersuchung einbezogen wurde, und auch nicht für einige Sterne. Da aber keine Photometrie mit den Daten gemacht werden mußte, wurde die Intensitätstransformation hier formal mit einer linearen Schwärzungskurve gerechnet. Eine genauere Schwärzungskurve ist nicht möglich, da die Felder der Kalibrationsspot mit der größten Dichte nur etwa die Dichte des Himmles erreichen. Das gilt sowohl für das Original wie auch für die Kopien. Im Gegensatz zur photometrischen Reduktion beim MRSP wurde hier die Intensität des Himmels nicht abgezogen.

Mit Hilfe der Fouriertransformation kann die Amplitude der verschiedenen Ortsfrequenzen untersucht werden. Vorher wird der niederfrequente Teil unterdrückt, da er für diese Untersuchung uninteressant ist und nur die Ungenauigkeit der Fast Fourier Transformation (FFT) erhöhen würde. Das wurde mit einem Blockfilter der Größe 31×31 Pixel mit Hochpaßfunktion durchgeführt. Dadurch wird der großräumige Dichteverlauf durch die Sterne und durch die Galaxie unterdrückt.

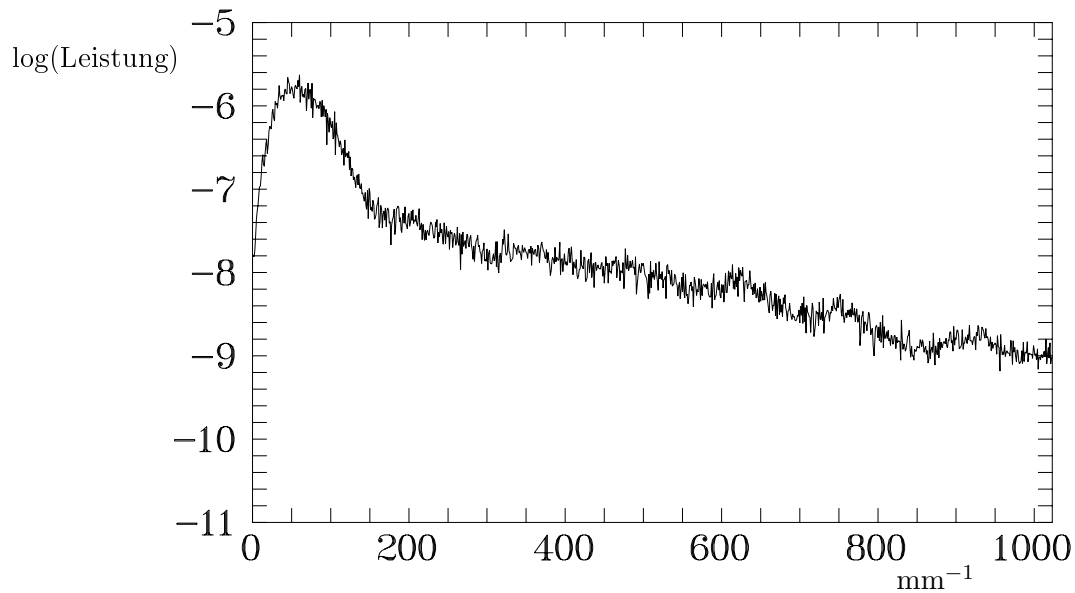


Abbildung 6.6: Leistungsspektrum eines Feldes der Originalplatte mit der Galaxie MCG-04-05-044 in logarithmischer Darstellung. Der Abfall zu den niedrigen Frequenzen wird durch die Beseitigung der großen Strukturen mit einem Hochpaßfilter erzeugt.

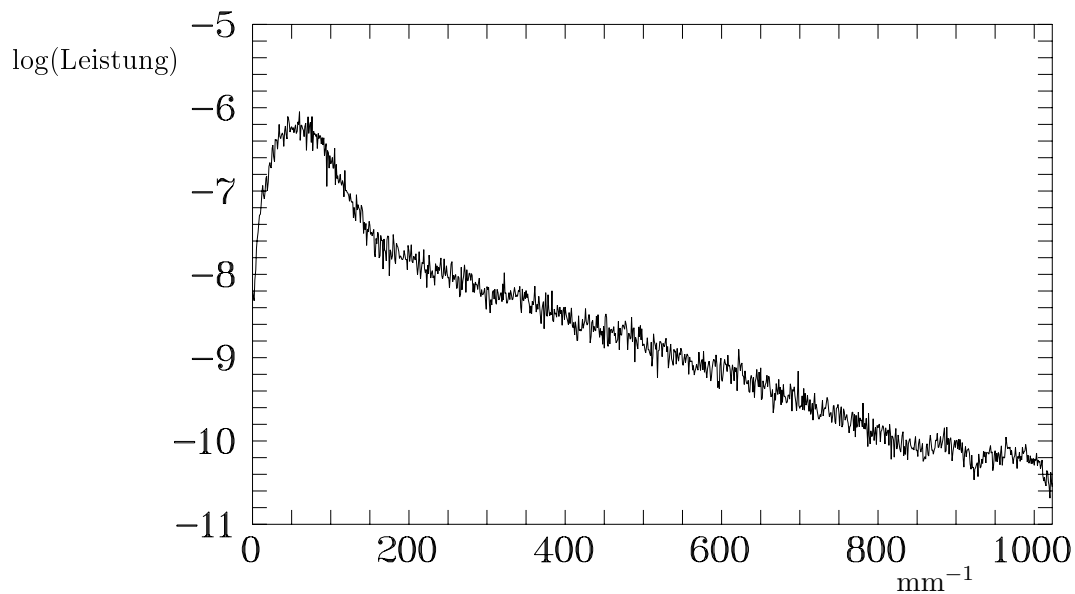


Abbildung 6.7: Leistungsspektrum vom gleichen Feld wie Abb. 6.6, jedoch von der Folienkopie gemessen. Die Leistungen liegen durchweg niedriger und fallen zum hochfrequenten Ende hin steiler ab, als der entsprechende Bereich auf der Originalplatte.

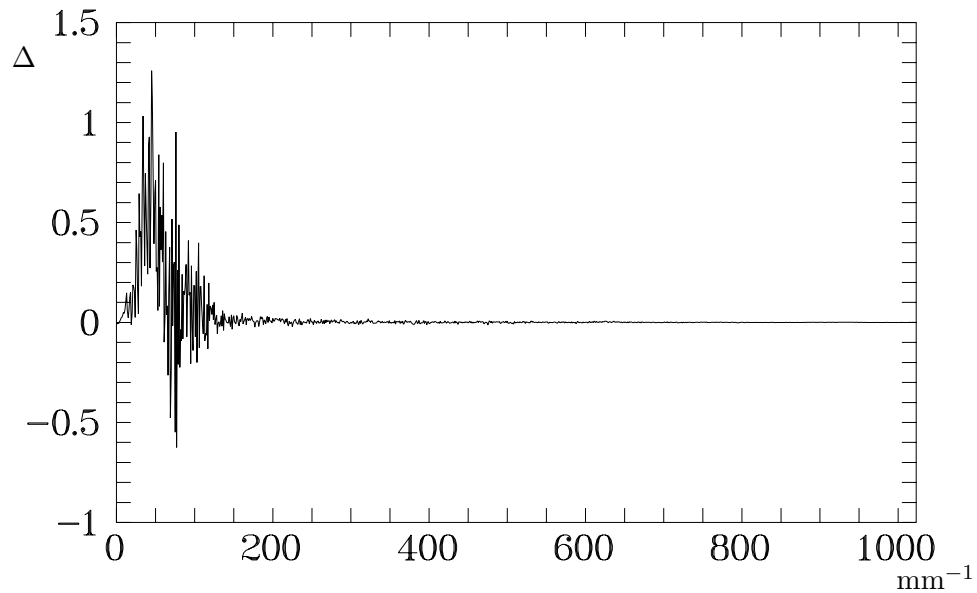


Abbildung 6.8: Differenz des Leistungsspektrums mit Galaxie und dem Leistungsspektrum ohne Galaxie, berechnet für die Originalplatte. Die Bildung der Differenz erfolgte mit den linearen Leistungsspektren. Die Differenz zeigt die Leistungen der Feinstruktur der Galaxie.

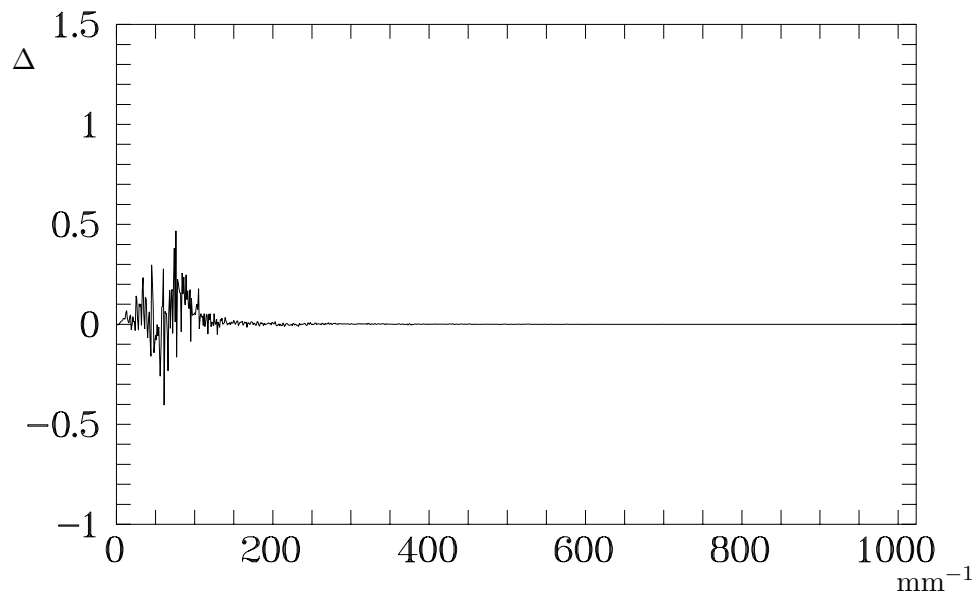


Abbildung 6.9: Differenz des Leistungsspektrums mit Galaxie und dem Leistungsspektrum ohne Galaxie, berechnet für die Folienkopie. Die Bildung der Differenz erfolgte mit den linearen Leistungsspektren. Die Feinstruktur der Galaxie geht beim Kopierprozess weitgehend verloren.

Die FFT wird zweidimensional berechnet, die Leistungsspektren¹ werden als Ergebnis abgespeichert. Daraus kann die Leistung der verschiedenen Ortsfrequenzen abgelesen werden. Da das Leistungsspektrum stark rauscht, wird über 10 aufeinanderfolgende Zeilen gemittelt. Das ist eine Vereinfachung, weil das Leistungsspektrum radialsymmetrisch ist. Da aber ein Quadrant des Leistungsspektrums 1024×1024 Pixel groß ist, ist der Fehler vernachlässigbar. (Die anderen Quadranten sind jeweils gespiegelt zueinander und enthalten daher keine neuen Daten.)

Die kleinste auflösbare Struktur ist nach dem Samplingtheorem und den oben angegebenen Scanparametern $10 \mu\text{m}$ groß. Das ist immer noch größer als die durchschnittliche Korngröße der IIIa-F-Emulsion, die wie bei der IIIa-J-Emulsion bei $3 \mu\text{m}$ bis $5 \mu\text{m}$ liegt. Da die Emulsion für die Kopien nicht stark lichtempfindlich sein müssen, werden hier sehr feinkörnige Materialien verwendet, so daß das Korn der Kopieremulsion wesentlich kleiner ist als das Korn der Originalplatte. Daher kann davon ausgegangen werden, daß das Korn der Kopieremulsion nicht mehr signifikant zum Leistungsspektrum beiträgt. Das Korn der Originalplatte ist aber für niederfrequente Strukturen mitverantwortlich, etwa durch Zusammenballungen und Zusammenwachsen mehrerer Körner (s. Kapitel 5.9).

Dabei wachsen die Leistungen sogar zu größeren Strukturen hin an. In Abbildung 6.5 sehen wir das Leistungsspektrum des Kornrauschens auf einer Fläche ohne ein Objekt bei der Dichte 1.72. Es handelt sich dabei um einen der Kalibrationsflecken, der von der Originalplatte digitalisiert wurde. In diesem Fall war das Feld aber nur 512×512 Pixel groß. Bei niedrigeren Dichten sieht die Frequenzverteilung ähnlich aus, nur die Leistungen sind deutlich geringer.

Bei den Leistungsspektren der Himmelsbereiche (Abb. 6.6 und 6.7) sehen wir 2 Bereiche. Ein Bereich besteht aus den Leistungen des Kornrauschens, die eher im hochfrequenten Teil zu finden sind. Der andere Bereich wird durch die niederen Frequenzen bestimmt, zu denen die Galaxie und die Sterne beitragen. Die kleinsten Himmelsobjekte haben einen Durchmesser von etwa $3''$. Das entspricht einer Frequenz von 22.2 mm^{-1} . Die meisten Objekte haben aber einen größeren Durchmesser als $5''$, das entspricht einer Frequenz von etwa 13.3 mm^{-1} ; sie finden sich daher im niederfrequenten Teil des Leistungsspektrums.

Beim Vergleich der beiden Leistungsspektren fällt auf, daß die Leistungen der Folienkopie generell kleiner sind als die Leistungen der Originalplatte. Zu den hohen Frequenzen hin fallen die Leistungen der Folienkopie zudem stärker ab als die der Originalplatte. Das bedeutet, daß die feineren Strukturen schlechter kopiert werden als die größeren Strukturen. Dies wird durch eine Unschärfe erzeugt, die zwangsläufig durch Streulicht beim Kopierprozess entsteht.

In den Abbildungen 6.8 und 6.9 wurde jeweils für die Originalplatte und für die Folienkopie das Leistungsspektrum des Feldes vom Leistungsspektrum der Galaxie abgezogen. Die Leistungen des Kornrauschens heben sich weitgehend auf. Die Leistungen durch die Sterne heben sich nur zum Teil auf, da in beiden Feldern eine unterschiedliche Anzahl von Sternen und eine unterschiedliche Größenverteilung besteht. Der Hauptanteil der Differenz besteht aber aus den Leistungen der Feinstruktur der Galaxie. Da es eine Spiralgalaxie ist, erwartet man durch die Staubscheibe und die Spiralarme, in denen viele helle Sterne zu finden sind, Strukturen bis an die Grenze der Auflösung der Platte. Das Seeing dieser Platte wurde mit $3''$ angegeben. Die Differenz zwischen dem Kornrauschen und den Strukturen der Galaxie ist auf der Folienkopie nur gering, verglichen mit der Differenz auf der Originalplatte. Dies zeigt ebenfalls, daß beim Kopierprozess kleinere Strukturen verlorengehen.

¹Bei einem Leistungsspektrum handelt es sich um das Betragsquadrat der komplexen Fouriertransformation. Dabei geht die Phaseninformation der Fourierwellen verloren.

Diese Beobachtung erklärt auch einige Ergebnisse von Sommer (1993). Nach seinen Untersuchungen weicht die Anzahl der gefundenen Objekte bei der Folienkopie stark von der Anzahl der gefundenen Objekte bei der Originalplatte ab. Auch die photometrischen Untersuchungen zeigen hier deutliche Abweichungen von den Ergebnissen von der Originalplatte. Bei den astrometrischen Auswertungen gab es dagegen keine Probleme gegenüber dem Original.

Kapitel 7

Zusammenfassung

CCDs sind besser als Photoplatten, aber die alten Daten und das Wissen über den photographischen Prozess und die Meßmaschinen werden noch für eine Weile benötigt. Das gilt insbesondere für astrometrische Untersuchungen, die jeweils große Basislinien voraussetzen. Auch langperiodische Veränderliche können noch weitgehend auf der Photoplatte gefunden werden.

Mikrodensitometer dienen zum Digitalisieren von Photoplatten. Sie vermessen die photographische Dichte als Funktion der Position. Damit können Computeranalysen von Photoplatten gemacht werden. Am Astronomischen Institut Münster (AIM) gibt es zwei PDS 2020 GM Mikrodensitometer. Sie werden im ersten Kapitel kurz beschrieben. Die Mechanik ist auf einer Granitbasis gebaut. Der gesamte Meßvorgang wird von einem Mikroprozessor gesteuert. Die Ortsauflösung ist besser als $1\ \mu\text{m}$, die Dichte kann mit hoher Dynamik (5 Dichtestufen) gemessen werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer Verbesserung des PDS 2020 GM Mikrodensitometers. Die mechanische Fahrgeschwindigkeit kann bis zu $200\ \text{mm/s}$ betragen. Der von der Herstellerfirma eingebaute logarithmische Verstärker produziert jedoch bei dieser Geschwindigkeit deutlich sichtbare, geschwindigkeits- und richtungsabhängige Verzerrungen der Dichteprofile, die mathematisch nicht mehr rückgängig gemacht werden können. Selbst bei der kleinsten möglichen Geschwindigkeit von $3.2\ \text{mm/s}$ sind noch Verzerrungen nachzuweisen. Die Beleuchtung der Mikrodensitometer und die Temperatur im Raum sind nicht über viele Tage konstant genug, so daß die Meßzeit so kurz wie möglich sein sollte. Das erfordert bei großflächigen Photoplatten eine hohe Meßgeschwindigkeit.

Aus diesem Grund wurde ein neues Konzept zur schnellen Logarithmierung der Daten gesucht. Diese Arbeit beschreibt das Konzept und die technische Realisierung in Form des MD3.X-Verstärker/Konverters.

Mit diesem Verstärker/Konverter konnte am AIM eine Reihe von statistischen Untersuchungen an großen Himmelsarealen gemacht werden. Dazu wurden Photoplatten von Schmidt-Teleskopen vermessen, die eine Größe von bis zu $500\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$ haben können. Für eine Platte von $300\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$, die mit $15\ \mu\text{m}$ Schrittweite in beiden Dimensionen gerastert werden soll, braucht das Mikrodensitometer bei optimaler mechanischer Geschwindigkeit etwa 13 Stunden.

Von 1982 bis zum Jahr 1994 wurden zahlreiche astronomische Fragestellungen von inn- und ausländischen Kollegen mit den beiden PDS 2020 GM Mikrodensitometer bearbeitet. Am AIM wurden 234 Felder des ESO/SERC-Atlas und 36 Felder mit Objektivprismenspektren gescannt. Damit wurde ein Katalog mit 7 000 000 Galaxien, 20 000 000 Sternen und nahezu 3 000 Qasar-kandidaten erstellt. Von fast 1 Million Galaxien konnte die Rotverschiebung bestimmt werden.

Diese Kataloge benutzten Mitarbeiter des AIM in zahlreichen Arbeiten insbesondere über kosmologische Fragen (Seitter et al. 1994).

Im zweiten Kapitel der vorliegenden Arbeit werden die Grundlagen der Mikrodensitometrie beschrieben. Dabei wird die Motivation zur Messung im logarithmischen Maßstab (Dichte) gezeigt. Die Dichte ist als inverser Logarithmus der Transmission (Durchsichtigkeit eines Objekts) definiert.

In den folgenden Unterkapiteln wird das optische System der PDS 2020 GM Mikrodensitometer beschrieben und mit anderen Mikrodensitometern verglichen. Die PDS-Mikrodensitometer benutzen eindimensionale Sensoren (Photo Multiplier Tubes; PMT). Daher kann die Beleuchtung mit einer Blende auf das zu messende Feld beschränkt werden. Eine Meßblende verhindert, daß Streulicht mitgemessen wird. Damit kann das Mikrodensitometer die Dichte sehr genau und mit hoher Auflösung messen. Viele andere Mikrodensitometer arbeiten mit dem Flying Spot-Verfahren oder mit mehrdimensionalen Sensoren (CCDs). In diesem Fall können keine Blenden benutzt werden. Die Messung wird dadurch schneller, aber weniger genau.

Das dritte Kapitel beschäftigt sich mit logarithmischen Verstärkern. Dabei wird zuerst das Prinzip der analogen Logarithmierung mit Hilfe von Halbleiterübergängen gezeigt und die physikalischen Grenzen, die eine Begrenzung der Meßgeschwindigkeit erzwingen, werden diskutiert. Bei den analogen Logarithmieren ist die Anstiegsgeschwindigkeit abhängig vom absoluten Wert des Eingangssignals. Anhand von Scans über eine scharfe Kante wird gezeigt, wie sich die Verzerrungen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Richtung auswirken.

Anschließend werden verschiedene Konzepte diskutiert, die von anderen Instituten zur Erhöhung der Meßgeschwindigkeit entwickelt wurden. In vielen Fällen wurden schnellere analoge Logarithmierer verwendet. Das löst aber nicht das prinzipielle Problem. Die Verzerrungen treten nur weniger stark auf. Bei den meisten Mikrodensitometern handelt es sich um PDS 1010 Geräte. Diese haben geringere Meßgeschwindigkeiten, so daß bei maximaler Geschwindigkeit (40 mm/s) die Verzerrungen nicht so deutlich ausfallen. Ein erstes neues Konzept, das am AIM realisiert wurde, arbeitete sehr erfolgreich. Es erforderte jedoch eine Reihe von speziellen Bausteinen, deren Lieferbeschränkungen den Bau einer verbesserten Version des Experimentiermodells unmöglich machten.

In der Folge wird das Prinzip des MD3.X-Verstärker/Konverters und dessen Realisation ausführlich beschrieben. Das Eingangssignal, die Transmission, wird in zwei Schritten logarithmiert. Der Strom der PMT wird in Spannung konvertiert und anschließend linear viermal um den Faktor 10 verstärkt. Dabei wird die Dekade ermittelt, in der das Transmissionssignal liegt. Wenn die Verstärkung zu hoch ist, befindet sich diese Stufe in der Sättigung. Bei einer zu kleinen Verstärkung bleibt der Ausgang unterhalb eines vorgegebenen Schwellwerts. Die Stufe mit der optimalen Verstärkung zeigt die richtige Dekade. Die Ausgangsspannung dieser Stufe wird digitalisiert. Der logarithmische Wert kann jetzt von einer elektronisch gespeicherten Tabelle ausgelesen werden. Es gibt pro Dekade eine Tabelle, also insgesamt 5 Tabellen. Der logarithmische Wert wird in binärer 12-Bit-Darstellung an den Meßcomputer weitergegeben.

Alle analogen Bausteine arbeiten bei diesem Konzept im linearen Modus. Dadurch ist die Anstiegsgeschwindigkeit unabhängig vom Absolutwert des Eingangssignals. Die modernen Bausteine erlauben eine hohe Anstiegsgeschwindigkeit bei gleichzeitig niedrigem Rauschen. Einem Sprung des Eingangssignals über 5 Dekaden folgt die Elektronik in 8 μ s. Die Konversionszeit eines Wertes beträgt weniger als 16 μ s. Das PDS 2020 GM Mikrodensitometer hat eine Zykluszeit von 30 μ s pro Pixel. Mit Hilfe des MD3.X-Verstärker/Konverters kann also mit maximaler Geschwindigkeit gerastert werden, ohne daß geschwindigkeits- und richtungsabhängige Verzerrungen auftreten. Das wird durch Testmessungen belegt.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die technische Realisierung des Konzepts. Die Schaltpläne, die Layouts und eine detaillierte Beschreibung der Schaltung befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

Die Verwendung des Verstärker/Konverters muß sich nicht auf die Anwendung bei Mikrodensitometern zu beschränken. Das Konzept kann überall eingesetzt werden, wenn ein Signal mit hoher Dynamik digitalisiert werden soll und die Auflösung eines linearen Analog-Digital-Konverters für die vorgegebene Dynamik nicht ausreicht.

Im vierten Kapitel werden Testmessungen mit dem MD3.X-Verstärker/Konverter beschrieben. Der erste Teil beschäftigt sich mit den Geschwindigkeitstests. Die Messungen mit dem bisherigen logarithmischen Verstärker werden den neuen Messungen gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, daß mit dem MD3.X keine Verzerrungen mehr durch die Bewegung auftreten. Das gilt selbst bei maximaler Fahrgeschwindigkeit. Die Verbesserung bei astronomischen Messungen wird anhand von Scans eines Sterns und von Emissionslinien gezeigt.

Ein Unterkapitel beschäftigt sich mit verschiedenen Rauschquellen. Als dominante Rauschquelle stellt sich das Photonenrauschen heraus. Das Photonenrauschen gehört zum Signal und wurde bei dem bisherigen logarithmischen Verstärker weggefiltert. Das Rauschen des MD3.X trägt nur unwesentlich zum Gesamtuschen bei.

Die folgende Diskussion beschreibt die Nichtlinearitäten der Dichteskala. Durch die Digitalisierung der Logarithmusfunktion entsteht eine ungleichmäßige Häufigkeitsverteilung der einzelnen Dichtestufen. Dieser Fehler kann in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Nichtlinearitäten durch die Verstärkerschaltung können nicht nachgewiesen werden.

Die restlichen Messungen beschäftigen sich mit Problemen des Mikrodensitometers, die nicht auf die logarithmische Verstärkung zurückzuführen sind. Bei der Suche nach den Nichtlinearitäten der Dichteskala stellte sich heraus, daß der Photomultiplier die Hauptquelle für vorhandene Nichtlinearitäten ist. Die Linearität der PMT ist abhängig von der eingestellten Hochspannung und damit von der Verstärkung. In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie man diese Nichtlinearität minimieren kann.

Eine weitere Messung beschäftigt sich mit möglichen Nichtlinearitäten durch den optischen Aufbau. Wegen der Beleuchtung durch eine Halogenlampe ist es möglich, teilkohärentes Licht zu haben, das durch Beugung an den Spalten zu falschen Dichten führen kann. Unter realen Bedingungen wurde nur bei extrem kleinen Spalten eine signifikante Abweichung vom Mittelwert aller Messungen gefunden.

Die letzte Messung sollte den Einfluß der Raumbelichtung auf die gemessene Dichte klären. Dabei stellte sich heraus, daß die eingeschaltete Deckenbeleuchtung bei hohen Dichten und großen Meßblenden zur Verfälschung der Dichtewerte beitragen kann.

Die bereits vorhandene mechanische und thermische Stabilität der PDS 2020 GM Mikrodensitometer ergibt zusammen mit den hier vorgestellten photometrischen Verbesserungen ein Meßgerät, daß mit höchster Genauigkeit photographische Platten in akzeptabler Zeit digitalisieren kann. Zwei dieser Geräte stehen am AIM zur Verfügung. Vier MD3.X-Verstärker/Konverter wurden in anderen astronomischen Instituten bzw. in der Firma Agfa-Gevaert in Mortsel bei Antwerpen an unterschiedlichen Versionen der PDS 1010 Mikrodensitometer installiert.

Im fünften Kapitel wird der photographische Prozeß diskutiert und mit Hilfe von einem Rasterelektronenmikroskop und einem optischen Mikroskop der Einfluß verschiedener Parameter auf das fertige Bild untersucht. Besonders ausführlich wurde die Veränderung der Körner der Photoplatte beim Entwicklungsprozeß gezeigt. Die verschiedenen Entwickler haben einen großen

Einfluß auf die Form der Silberkörner. Die Größen der entwickelten Strukturen, die aus vielen Silberkörnern bestehen, werden bei gelatinehaltigen Emulsionen jedoch kaum beeinflusst. Die Schwärzungskurven der verschiedenen Entwickler können sehr unterschiedlich ausfallen. Deshalb sollte in erster Linie bei der Wahl des Entwicklers auf diesen Parameter geachtet werden.

Das sechste Kapitel zeigt einen Vergleich von Originalplatten eines Atlas und einer Folienkopie. Mit Hilfe des Leistungsspektrums wird gezeigt, daß viele feine Strukturen bei der Kopie verloren gehen. Das fällt besonders im Bereich der Spiralarme einer Galaxie auf. In diesem Bereich werden durch die Staubscheibe, die Gaswolken und durch helle Sterne Strukturen abgebildet, die bis an die Grenze des Seeings dieser Platte gehen. Gerade dieser Bereich ist auf der Kopie stark unterdrückt. Die Folienkopie eignet sich nicht für Detailuntersuchungen an ausgedehnten Objekten. Wie jedoch in anderen Arbeiten bereits gezeigt wurde, ist mit der Folienkopie eine gute Sternphotometrie und Astrometrie möglich.

Mit den hier aufgezeigten Grundlagen und Verbesserungen der Mikrodensitometer konnten eine Reihe von Projekten durchgeführt werden, die ohne diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Gerade die statistische Untersuchung großer Himmelsbereiche erfordert schnelle und genaue Meßmaschinen. Die Erkenntnisse aus der Photographie zeigt die Möglichkeiten und die Grenzen des Datenspeichers Photoplatte auf. Ein umfassendes Projekt des AIM, das MRSP, ist bei Seitter et al. (1994) beschrieben.

Anhang A

Bedienung des MD 3.X Verstärker/Konverter

A.1 Anzeigeeinheit

Die Anzeige für den neuen Verstärker befindet sich in dem Zusatzkasten, der auf dem Panel steht. Die Anzeige zeigt auf 4 Stellen genau die Dichte- oder Transmissionswerte an, die von der PDS gemessen und an den Rechner übermittelt werden. Es werden ca. 6 Werte pro Sekunde angezeigt. Die aktuellen Werte werden nur angezeigt, wenn der Umschalter AUTO/MAN auf MAN geschaltet ist oder das Mikrodensitometer gerade abtastet. Ein führendes 'E' signalisiert einen Überlauf (Transmission >1 oder Dichte < 0). In Falle von Dichte wird dann eine 0 an den Rechner Übermittelt. Im Falle von Transmission werden Werte > 1 übermittelt. Die Helligkeit der Anzeige kann mit dem ILLUM-Knopf stufenlos geregelt werden. Eine Überlastung des Photomultipliers wird durch Blinken der Anzeige und durch ein akustisches Signal angezeigt. Gegebenenfalls muß die Warnung mit dem RESET-Knopf gelöscht werden (s.u.).

A.2 Einstellungen

Am Panel sind folgende Einstellarbeiten durchzuführen:

1. AUTO/MAN auf MAN schalten.
2. DENS/TRANS auf die gewünschte Meßart schalten.
3. Die Optik auf klare Platte oder klare Emulsion fahren.
4. P.M.T. VOLTAGE COARSE (HV) langsam aufdrehen und die Anzeige beachten. Im Falle von DENS auf den Wert 0.200 einstellen. Im Falle von TRANS auf einen Wert unter 1.000 einstellen.
5. Falls HV um weniger als 290 Skalenteile gedreht wurde, sollte ein zusätzliches Dichtefilter eingeschaltet werden, da der Photomultiplier (PMT) sonst nichtlinear (!) arbeitet.
6. AUTO/MAN auf AUTO schalten. Die Anzeige bleibt dann auf einen Wert stehen.

7. Die Messung vom Rechner aus starten. Es werden jetzt asynchron zur Messung 6 Werte pro Sekunde angezeigt. Dabei könnten unter seltenen Bedingungen auch undefinierte Werte angezeigt werden.
8. Nach der Messung AUTO/MAN auf MAN schalten. Danach werden wieder aktuelle Werte angezeigt.
9. HV langsam auf 0 herunterdrehen.
10. Die Glasplatte mit Alkohol reinigen.

A.3 Die Fehlerschutzschaltung

Mit dem neuen Verstärker/Konverter wird der Strom der PMT überwacht und notfalls die HV ausgeschaltet. Die Schutzschaltung ist auch während eines Scans aktiv. Falls die Schutzschaltung anspricht, handelt es sich in der Regel um einen Einstellfehler der HV. Meist erfolgte die Justierung nicht an der klarsten Stelle der Photoplatte.

Überlauf "E": Sobald der Strom den definierten Bereich verläßt ($D < 0$ oder $T > 1$) erscheint auf der Anzeige ein führendes "E".

Vorwarnstufe Wenn trotz des 'E' der Strom der PMT weiter erhöht wird beginnt die Ziffernanzeige und die LED des RESET-Schalters zu blinken, und es ertönt ein unterbrochener Warnston. Diese Warnung erlischt automatisch, sobald der Strom wieder im erlaubten Bereich liegt. Die Hochspannung bleibt eingeschaltet. Die an den Rechner übermittelten Werte sind die jeweils höchsten darstellbaren Meßwerte des Verstärkers (Sättigung!).

Abschaltstufe Falls der Strom mehr als ca. 20% über dem Grenzwert liegt, ertönt ein Dauerton und die LED des RESET leuchtet ständig. Die Anzeige blinkt weiter. Dabei ist die Hochspannung ausgeschaltet. Das kann auch während eines Scans erfolgen. Die HV sollte also in Zukunft sehr genau eingestellt werden. In diesem Falle HV herunterdrehen, RESET (auf der Displaybox) drücken und neu justieren (s.o.). Falls die HV nicht reagiert, COARSE an den rechten Anschlag drehen, P.M.T. VOLTAGE aus- und wieder einschalten und erneut justieren.

ACHTUNG!

Die Schutzschaltung verhindert nur Beschädigung durch elektrische Überlast. Eine Beeinträchtigung der PMT durch hohe Lichtintensität wird nicht abgefangen.

A.4 Aufzeichnung der Daten

Die Daten (IVAL) werden vom Rechner gemäß der FITS-Konvention im 16-Bit Binärformat aufgezeichnet. Die FITS-Konvention wurde von Wells et al. (1981) eingeführt und von Greisen & Harten 1981 erweitert. Eine Zusammenfassung über die Implementierung am AIM befindet sich in Budell (1985). Die Rekonstruktion der realen Werte (REAL) muß nach folgender Formel erfolgen:

$$\text{REAL} = \text{IVAL} * \text{BSCALE} + \text{BZERO}$$

Dabei gelten folgende Umrechnungskonstanten, die zum Teil durch die Einstellung des Verstärker/Konverters festliegen und in den FITS-Header eingetragen werden.

Dichte: BSCALE = 0.00125 BZERO 0.20
Transmission: BSCALE = 0.00025 BZERO 0.00

Die Werte für BZERO hängen von der HV-Einstellung ab und entsprechen jeweils dem Wert, der bei klarer Platte eingestellt wurde. Falls andere Werte eingestellt werden, muß BZERO im Header von Hand korrigiert werden.

Anhang B

Technische Beschreibung des MD3.X

Für die Richtigkeit und die Vollständigkeit der technischen Beschreibung des MD 3.X–Verstärker/Konverters wird vom Autor dieser Arbeit keine Gewähr übernommen.

B.1 Funktionsbeschreibung der analogen Einheiten: AAU2.3 und ALU2.4

Die analoge Einheit besteht aus zwei Teilen, der Analog Amplifier Unit (AAU) und der Analog Logarithmic Unit (ALU).

Die AAU bildet die Eingangsstufe. Sie konvertiert den Strom von der Photo-Multiplier-Röhre (PMT) in eine Spannung und verstärkt diese in vier Stufen bis zu 10 000-fach.

Die ALU enthält fünf Sample/Hold-Stufen (S/H), den Multiplexer und den Analog-Digital-Converter (ADC). Ein Vierfach-Komparator nimmt die Selektion der Verstärkung vor. Die ALU hat eine eigene aktive Stabilisierung für die Stromversorgung.

Der Schaltplan der analogen Einheit befindet sich auf Seite 112. Im Anschluß daran finden sich die Layouts der Platinen und die Bestückungspläne.

B.1.1 Die Funktion der AAU

Die AAU ist aus zwei Platinen aufgebaut, die in einem abgeschirmten Metallgehäuse untergebracht sind. Die Einstellpotentiometer können durch kleine Löcher im Metallgehäuse erreicht werden. Der Deckel des Gehäuses kann nach dem Lösen von zwei Schrauben abgenommen werden. Für die Funktion ist die Verbindung des Gehäuses mit dem zentralen Massepunkt sehr wichtig. Alle anderen Verbindungen — auch alle Masseverbindungen — werden über Teflon-durchführungen herausgeführt.

Die Eingangsstufe der AAU bildet der Strom-Spannungs-Konverter IC1 (OPA 602 CM). Er ist so ausgelegt, daß ein Strom von 100 μ A in eine Spannung von 9.765 V gewandelt wird. Die Ausgangsspannung kann mit P11 eingestellt werden. Der Offset wird mit P12 justiert. Die positive Stromversorgung wird über R15, C11, C12 und die negative Stromversorgung über R16, C13, C14 passiv stabilisiert. Der Elektrolytkondensator arbeitet bevorzugt im unteren Frequenzbereich, während der Vielschichtkondensator die mittleren und hohen Frequenzen siebt. Diese Stufe ist der empfindlichste Teil der ganzen Schaltung. Deshalb sind die Masseleitungen aufgetrennt in

Signal-Masse (Ground Signal) und Masse für Stromversorgung (Ground Power). Es wurden höchste Qualitätsanforderungen an die elektrische und thermische Abschirmung gestellt.

Die folgenden Stufen IC2 bis IC5 sind vier nicht invertierende Verstärker mit jeweils 10-facher Verstärkung. Zum Einsatz kommen hier Operationsverstärker vom Typ OPA 37EJ. Sie sind alle identisch beschaltet. Lediglich die erste Verstärkerstufe hat eine zusätzliche Einstellung für den Offset (P22). Die Verstärkung wird jeweils mit P21, P31, P41, P51 eingestellt. Der Rückkopplungszweig wurde auf minimale Offsetdrift abgestimmt. Die Kondensatoren C25, C35, C45, C55 begrenzen die Verstärkung für hohe Frequenzen. Für jede Stufe ist die Stromversorgung einzeln über eine RC-Kombination passiv stabilisiert.

B.1.2 Die Funktion der ALU

Die fünf Ausgänge der AAU werden über die Widerstände R17, R27, R37, R47, R57 ausgekoppelt und je einer Sample/Hold-Stufen (S/H) zugeführt. Bei den S/Hs werden komplett integrierte Bausteine benutzt (SHA 5320), die mit der Verstärkung 1 beschaltet sind. Die Speicherkondensatoren sind bei diesen Bausteinen bereits mit integriert. Es kann zusätzlich noch ein externer Kondensator verwendet werden. Diese Möglichkeit wurde bereits im Layout berücksichtigt. Die Kondensatoren wurden aber nicht bestückt. Eine Vergrößerung der Kapazität führt zu einer Verlängerung der Fensterzeit. Mit P61, P71, P81, P91, P101 wird jeweils der Offset der entsprechenden Stufe eingestellt. Der Offsetfehler der verwendeten Operationsverstärker in der Verstärkerkette ist so gering, daß der Einstellbereich der S/Hs völlig ausreicht.

Die Ausgänge der 5 S/Hs werden zum 8-Kanal-Multiplexer (HI 508) geführt. Der Multiplexer schaltet einen der Kanäle durch zum Analog-Digital-Konverter (ADC). Da der Kanalwiderstand des Multiplexers zu hochohmig ist für den Analogeingang des ADCs, wurde ein Pufferverstärker (AD 845, LM 356 oder OP 37) zwischengeschaltet. Bei der Verwendung des AD 845 müssen C135 und R132 entfernt werden. Bei der Verwendung des LM 356 sind C135 und R132 nicht unbedingt nötig, schaden aber nicht. Bei der Verwendung des OP 37 sind C135 und R132 unbedingt notwendig. Die Verwendung dieses Bausteins ist aber nicht zu empfehlen, da seine Neigung zu Schwingungen bei der Verstärkung 1 sehr groß ist. Die möglichen Fehler des Puffers (Offset und Verstärkung) sind so klein, daß sie mit den Einstellelementen am ADC ausgeglichen werden können. Der ADC (HI 774) digitalisiert das Signal mit 12 Bit Genauigkeit. Die 12 Bit werden parallel an das Digital-Board weitergegeben. Der Offset des ADCs wird mit P141 und die Verstärkung mit P142 eingestellt. Das Eingangssignal des ADC wird zusätzlich über R152 ausgekoppelt und mit Hilfe eines Puffers (1/2 TL 083) zu Testzwecken an der BNC-Buchse TEST zur Verfügung gestellt. Dieses Signal dient nur zur Orientierung und ist nicht offsetkompensiert.

Die Selektion der Verstärkung erfolgt mit Hilfe des Vierfach-Komparators (HA 4905). Der Ausgang jeder der vier Verstärkerstufen wird in je einem Komparator mit einer Referenzspannung verglichen. Die digitalen Ausgänge der Komparatoren springen von HIGH nach LOW, wenn die analoge Eingangsspannung größer ist als die Referenzspannung, d.h. wenn die entsprechende Verstärkerstufe in der Sättigung ist. Der genaue Wert der Referenzspannung ist unkritisch, da ein genügend großer Überlappbereich vorliegt. Deshalb reicht eine passive Stabilisierung mit RC-Komponenten aus. Der Wert wird mit P121 eingestellt. Die digitalen Ausgänge der Komparatoren werden mit einem Priority Encoder (74 HC 148) ausgewertet. Dieser Baustein erzeugt eine Adresse, die dem Multiplexer zugeführt wird. Es ergibt sich folgende Aufteilung der Kanäle:

Kanal	Anschluß	Funktion
1	GND	Einstellung des Offsets am ADC
2	J4/1 (GND)	Anschluß einer Erweiterung
3	I/U Conv.	Transmission
4	I/U Conv.	Dichtestufe 0 – 1
5	Ampl. 1	Dichtestufe 1 – 2
6	Ampl. 2	Dichtestufe 2 – 3
7	Ampl. 3	Dichtestufe 3 – 4
8	Ampl. 4	Dichtestufe 4 – 5

Die automatische Kanalumschaltung des Multiplexers kann zu Test- und Justierzwecken ausgeschaltet werden. Mit Hilfe eines Stufenschalters kann der ADC auf je eine der Verstärkerstufen, den I/U-Konverter oder auf Masse gelegt werden. Dazu wurde zwischen dem Vierfach-Komparator und dem Priority Encoder ein Multiplexer/Latch (74 HC 298) eingefügt. Dieser Baustein hat außerdem die Aufgabe, den Zustand der Komparatorausgänge während einer Konversion zu speichern.

Der Ausgang des I/U-Konverters wird zusätzlich über einen Puffer (1/2 TL083) ausgekoppelt. Damit wird der Strom der PMT überwacht. Falls der Strom deutlich über die zulässigen $100\ \mu\text{A}$ hinausgeht, wird die Hochspannungsversorgung der PMT abgeschaltet. Die genaue Funktion der Schutzschaltung wird bei der Beschreibung des digitalen Boards erfolgen.

B.1.3 Konzept der Stromversorgung

Als letzte Einheit befindetet sich auf der ALU noch eine Stabilisierungsschaltung für die analoge Spannungsversorgung der ICs. Es hat sich gezeigt, daß eine einfache Stabilisierung der Versorgungsspannung nicht ausreicht. Deshalb wurde das Konzept der kaskadierten Stabilisierung verwendet. Die analogen Versorgungsspannungen werden in der Netzteilereinheit (PSU) gesiebt, stabilisiert und auf $\pm 19\text{V}$ eingestellt. Auf der ALU befindet sich die zweite Stabilisierungsschaltung, die mit den Längsreglern LM 317 und LM 337 auf $\pm 15\text{V}$ geregelt wird. Auf diese Weise verdoppelt sich die Unterdrückung des Brummens. Der Thyristor und die Zenerdiode sollen verhindern, daß die Schaltung bei einem Defekt der Längsregler mit zu hoher Spannung betrieben wird.

Insgesamt sind auf der ALU 15 integrierte Schaltungen aktiv. Fast alle sind auf hohe Geschwindigkeit optimiert. Zur Vermeidung von Kopplungen über die Stromversorgung muß jedes IC sehr sorgfältig gepuffert werden. Dazu hat sich eine Kombination aus einem Elektrolytkondensator ($10\ \mu\text{F}$ bis $100\ \mu\text{F}$) und einem Vielschichtkondensator ($0.1\ \mu\text{F}$) gut bewährt. Die Schaltung entspricht der Schaltung von PSU19 (s. Kapitel B.7)

B.1.4 Belegung der Steckverbinder

B.1.4.1 J 2: Verbindung des ADC (auf ALU) mit der DLU

Mit dieser Leitung werden alle Steuer- und Datenleitungen des ADCs auf der ALU mit der DLU verbunden. Alle Anschlüsse mit geraden Zahlen liegen einseitig auf Masse. Es handelt sich dabei um einen 40-poligen Pfostenverbinder und eine Steckerleiste nach DIN 41 651.

Pin 1	nc (= no connection)	Pin 21	D 9
Pin 3	nc	Pin 23	D 8
Pin 5	CE, Chip Enable	Pin 25	D 7
Pin 7	$\overline{R/\overline{C}}$, Read/ $\overline{\text{Convert}}$	Pin 27	D 6
Pin 9	A_0 , Byte Address	Pin 29	D 5
Pin 11	$\overline{\text{CS}}$, Chip Select	Pin 31	D 4
Pin 13	$12/\overline{8}$, Data Mode select	Pin 33	D 3
Pin 15	STS, Status	Pin 35	D 2
Pin 17	D 11, MSB	Pin 37	D 1
Pin 19	D 10	Pin 39	D 0, LSB

B.1.4.2 J3: Steuerung der ALU von der DLU aus

Über diese Verbindung gehen alle Steuerbefehle, die von der DLU kommen und die analogen Schaltkreise der ALU entsprechend schalten. Diverse Ausgänge der analogen Schaltkreise werden über diese Verbindung mit der DLU verbunden. Es handelt sich dabei um einen 40-poligen Pfostenverbinder und eine Steckerleiste nach DIN 41651. Alle nicht aufgeführten Anschlüsse sind nicht belegt und stehen für Erweiterungen zur Verfügung.

Pin 1	S/H von Amp 4	Pin 21	nc (= no connection)
Pin 3	S/H von Amp 3	Pin 23	Komparator Amp 1
Pin 5	S/H von Amp 2	Pin 25	Komparator Amp 2
Pin 7	S/H von Amp 1	Pin 27	Komparator Amp 3
Pin 9	S/H I/U-Konverter	Pin 29	Komparator Amp 4
Pin 11	S/H Erweiterung	Pin 31	nc
Pin 13	Masse	Pin 33	Multiplexer Enable
Pin 15	I/U-Konverter overflow	Pin 35	Multiplexer A0
Pin 17	nc	Pin 37	Multiplexer A1
Pin 19	nc	Pin 39	Multiplexer A2

B.1.4.3 J4: Der Erweiterungsanschluß

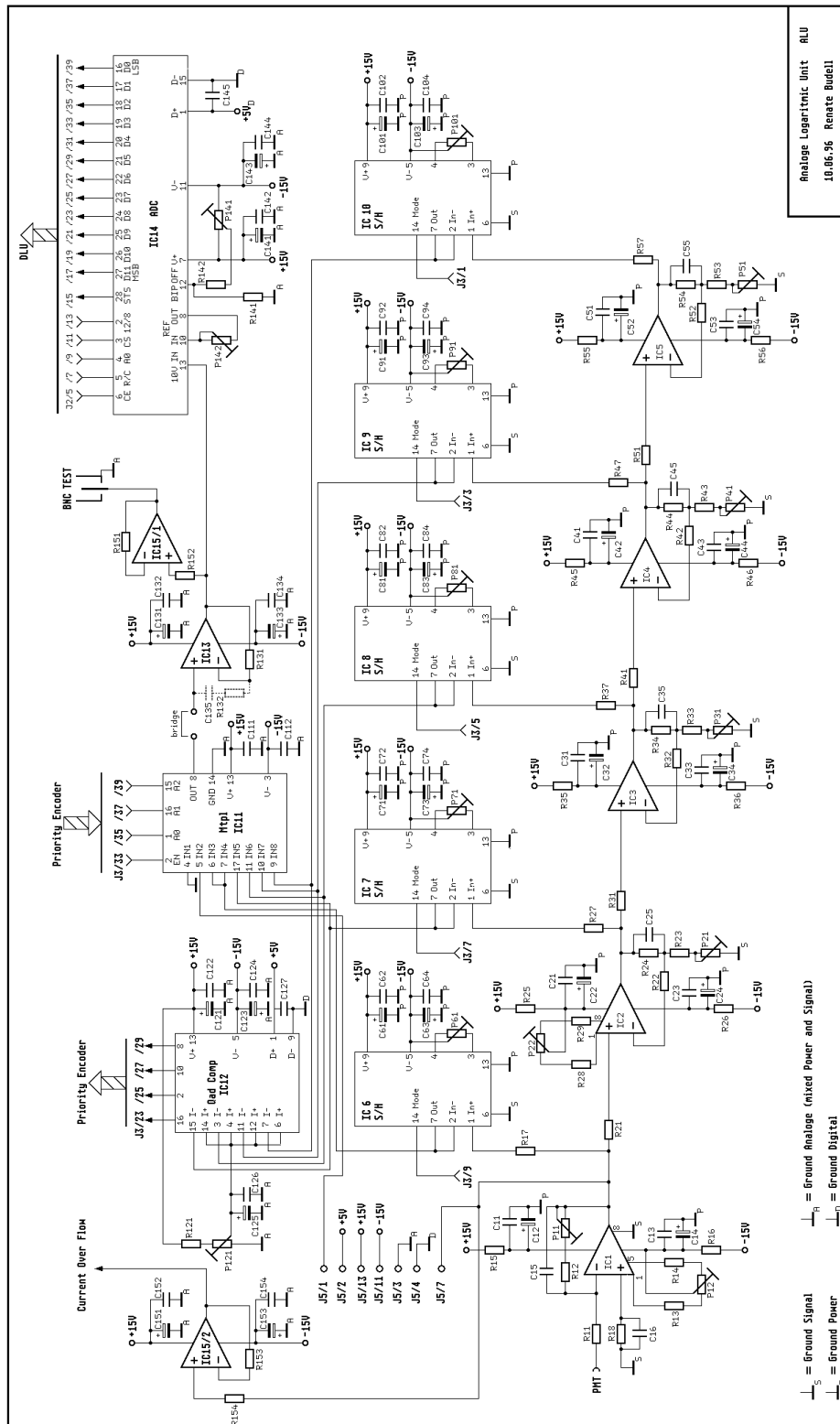
Ein Kanal des analogen Multiplexers ist für Erweiterungen vorgesehen. Möglich wäre zum Beispiel eine frei kalibrierbare Funktionseinheit für Transmissionsmessung. Dafür wurde auf der ALU ein 13-poliger Steckverbinder nach DIN 41617 eingebaut. Alle freien Kontakte können beliebig vergeben werden.

Pin 1	Kanal 7 des Multiplexers
Pin 2	+5 V digital
Pin 3	GND analog
Pin 4	GND digital
Pin 11	-15 V analog
Pin 13	+15 V analog

B.1.5 J 5: Stromversorgung

Die Betriebsspannung für die ALU wird über eine 9 polige Sub-D-Verbindung zugeführt. Pro Anschluß werden 3 Verbindungen benutzt, damit der Anschluß möglichst niederohmig ist. Es gilt folgende Belegung:

Pin 1, 2, 6	-19 V
Pin 3, 7, 8	GND analog
Pin 4, 5, 9	+19 V



Analogic Logarithmic Unit ALU
10.06.96 Renate Budel

Abbildung B.1: Schaltplan des Analogteils, AAU und ALU

AAU, ALU, Bauteilliste

IC1	OPA 602 CM	Strom-Spannungskonverter	
IC2	OPA 37 EJ	1. Verstärkerstufe	
IC3	OPA 37 EJ	2. Verstärkerstufe	
IC4	OPA 37 EJ	3. Verstärkerstufe	
IC5	OPA 37 EJ	4. Verstärkerstufe	
IC6	HA1-5320-5	Sample/Hold 1.Dekade	
IC7	HA1-5320-5	Sample/Hold 2.Dekade	
IC8	HA1-5320-5	Sample/Hold 3.Dekade	
IC9	HA1-5320-5	Sample/Hold 4.Dekade	
IC10	HA1-5320-5	Sample/Hold 5.Dekade	
IC11	HI3-508-5	8 fach Multiplexer	
IC12	HA1-4905-5	4 fach Comparator	
IC13	LF 356	Op-Amp; auch TDB 0156	
IC14	HI1-774K-5	12-Bit ADC	
IC15	TL 082 CP	2 fach Op-Amp	
IC16	LM 317	V+	
IC17	LM 337	V-	
D1-7	1N4007		
D8-9	ZPD 15	auf THY1/2 abstimmen	
THY1-2	TIC 116D	auch TIC 106 möglich, dann D8,D9 ZPD 20	
R11	1k	Metall	
R12	90.9k	Metall	$U = (R12+P11) \times I$
R13	39.2k	Metall	$R13 + R14 + P12 \approx 100k$
R14	39.2k	Metall	
R15	100k	Metall	invert. Eingang -> Masse
R16	100Ω	Metall	
R17	100Ω	Metall	
R21	18k	Metall	$R21 = R22 + (R23 \parallel R24)$
R22	9.09k	Metall	
R23	10k	Metall	$(R24 / R23) + 1 \approx 10$
R24	90.9k	Metall	
R25	4.7k	Metall	$R25 + R26 + P22 \approx 10k$
R26	4.7k	Metall	
R27	100Ω	Metall	V+
R28	100Ω	Metall	V-
R31	18k	Metall	s. R21
R32	9.09k	Metall	
R33	10k	Metall	s. R23
R34	90.9k	Metall	

R35	100Ω	Metall	V+				
R36	100Ω	Metall	V-				
R41	18k	Metall	s. R21	P121	100k	Cermet	Referenz IC 12
R42	9.09k	Metall		P141	100k	Cermet	Offset ADC
R43	10k	Metall	s. R23	P142	100Ω	Cermet	Gain ADC
R44	90.9k	Metall		P161	5k	Cermet	adj. V+
R45	100Ω	Metall	V+	P171	5k	Cermet	adj. V-
R46	100Ω	Metall	V-	C1	100μ	Elko	Power 5V digital
R51	18k	Metall	s. R21	C11	100μ	Elko	V+ (≥ 100μ!!!)
R52	9.09k	Metall		C12	0.1μ	Viel	V+
R53	10k	Metall	s. R23	C13	100μ	Elko	V- (≥ 100μ!!!)
R54	90.9k	Metall		C14	0.1μ	Viel	V-
R55	100Ω	Metall	V+	C15	100p	FKP	Integration (FKP !!!)
R56	100Ω	Metall	V-	C16	0.1μ	Viel	invert. Eingang -> Masse
R61	1k	Metall		C21	100μ	Elko	V+
R71	1k	Metall		C22	0.1μ	Viel	V+
R81	1k	Metall		C23	100μ	Elko	V-
R91	1k	Metall		C24	0.1μ	Viel	V-
R101	1k	Metall		C25	3.9p	Keramik	muß !!!
R121	39.2	Metall	Wert nicht kritisch	C31	100μ	Elko	V+
R131	1k	Metall		C32	0.1μ	Viel	V+
R132	243Ω	Metall		C33	100μ	Elko	V-
R133	100k	Metall	auf Lötseite montieren	C34	0.1μ	Viel	V-
R141	100Ω	Metall		C35	3.9p	Keramik	muß !!!
R142	100k	Metall		C41	100μ	Elko	V+
R151	1k	Metall		C42	0.1μ	Viel	V+
R152	1k	Metall		C43	100μ	Elko	V-
R153	100k	Metall		C44	0.1μ	Viel	V-
R161	200Ω	Metall		C45	3.9p	Keramik	muß !!!
R171	200Ω	Metall		C51	100μ	Elko	V+
P11	20k	Cermet	Abgleich I->U	C52	0.1μ	Viel	V+
P12	20k	Cermet	Offset	C53	100μ	Elko	V-
P21	200Ω	Cermet	Abgleich R23	C54	0.1μ	Viel	V-
P22	1k	Cermet	Offset IC 2	C55	3.9p	Keramik	muß !!!
P31	200Ω	Cermet	Abgleich R33	C61	47μ	Elko	V+
P41	200Ω	Cermet	Abgleich R43	C62	0.1μ	Viel	V+
P51	200Ω	Cermet	Abgleich R53	C63	47μ	Elko	V-
P61	10k	Cer. o	Offset 1.Dekade	C64	0.1μ	Viel	V-
P71	10k	Cer. o	Offset 2.Dekade	C65	—	FKP	100...1000 pF n.b.
P81	10k	Cer. o	Offset 3.Dekade	C66	—	Keramik	C66 = (1/10)C65
P91	10k	Cer. o	Offset 4.Dekade	C71	47μ	Elko	V+
P101	10k	Cer. o	Offset 5.Dekade				

C72	0.1μ	Viel	V+
C73	47μ	Elko	V-
C74	0.1μ	Viel	V-
C75	—	FKP	100...1000 pF n.b.
C76	—	Keramik	C76 = (1/10)C75
C81	47μ	Elko	V+
C82	0.1μ	Viel	V+
C83	47μ	Elko	V-
C84	0.1μ	Viel	V-
C85	—	FKP	100...1000 pF n.b.
C86	—	Keramik	C86 = (1/10)C85
C91	47μ	Elko	V+
C92	0.1μ	Viel	V+
C93	47μ	Elko	V-
C94	0.1μ	Viel	V-
C95	—	FKP	100...1000 pF n.b.
C96	—	Keramik	C96 = (1/10)C95
C101	47μ	Elko	V+
C102	0.1μ	Viel	V+
C103	47μ	Elko	V-
C104	0.1μ	Viel	V-
C105	—	FKP	100...1000 pF n.b.
C106	—	Keramik	C106 = (1/10)C105
C111	0.1μ	Viel	V+
C112	0.1μ	Viel	V-
C121	0.1μ	Viel	V+
C122	0.1μ	Viel	V-
C123	0.1μ	Viel	D+
C124	10μ	Elko	stab. Referenz IC 12
C125	0.1μ	Viel	stab. Referenz IC 13
C131	10μ	Elko	V+
C132	0.1μ	Viel	V+
C133	10μ	Elko	V-
C134	0.1μ	Viel	V-
C135	470p	Viel	
C141	10μ	Elko	V+
C142	0.1μ	Viel	V+
C143	10μ	Elko	V-
C144	0.1μ	Viel	V-
C145	0.1μ	Viel	D+

C151	10μ	Elko	V+
C152	0.1μ	Viel	V+
C153	10μ	Elko	V-
C154	0.1μ	Viel	V-
C161	470μ	Elko	Power V+
C162	0.1μ	Viel	Power V+
C163	10μ	Elko	
C164	0.1μ	Viel	
C165	10μ	Elko	
C166	100μ	Elko	
C167	0.1μ	Viel	
C171	470μ	Elko	Power V+
C172	0.1μ	Viel	Power V+
C173	10μ	Elko	
C174	0.1μ	Viel	
C175	10μ	Elko	
C176	100μ	Elko	
C177	0.1μ	Viel	

- 1 IC-Fas. 28-pol präz. Gold
- 2 IC-Fas. 16-pol präz. Gold
- 5 IC-Fas. 14-pol präz. Gold
- 2 IC-Fas. 8-pol präz. Gold
- 2 40-pol Stiftwanne 90° print J2, J3
- 2 40-pol Stiftstecker Verb. zur DLU
- 28 PTFE Durchführungen
- 1 Abschirmgehäuse für AAU
- 1 Sub-D 9-pol 90° print J5
- 1 Sub-D 9-pol J5
- 1 Buchsenleiste Print 13-pol J4
- 1 Print-Steckverb. 13-pol J4
- 2 Sicherungshalter print Si1, Si2
- 2 Sicherungen 630mA träge
- Lötnägel 1mm
- Isolierschlauch für 0.8mm

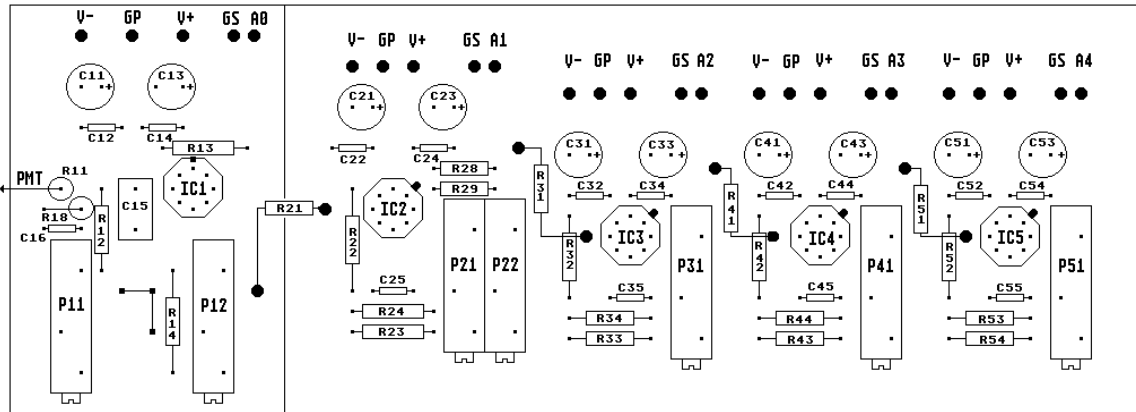


Abbildung B.2: Bestückungsplan der AAU

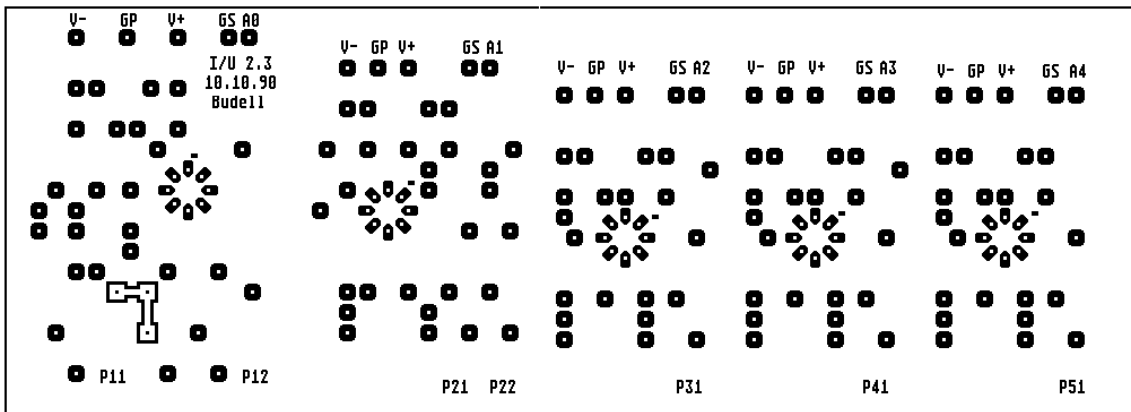


Abbildung B.3: Bestückungsseite der AAU in Negativdarstellung. Der Hauptteil der Kupferfläche dient zur Abschirmung.

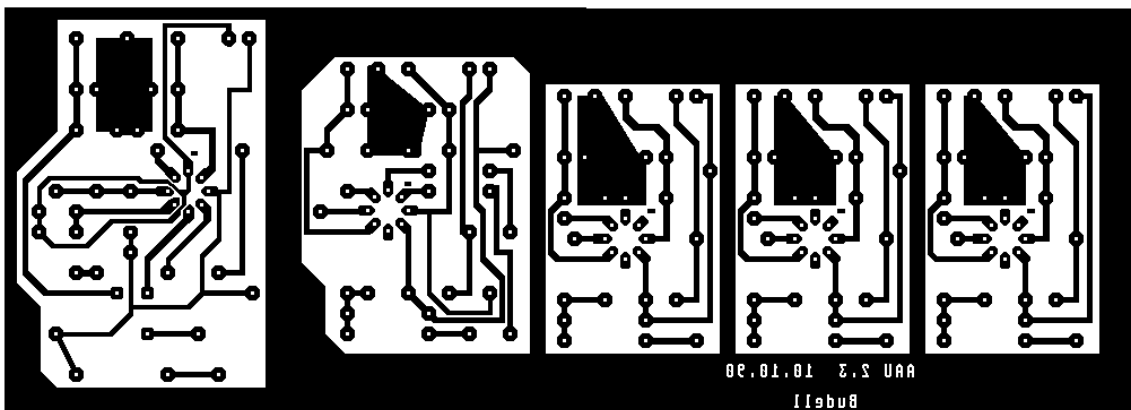


Abbildung B.4: Lötseite der AAU

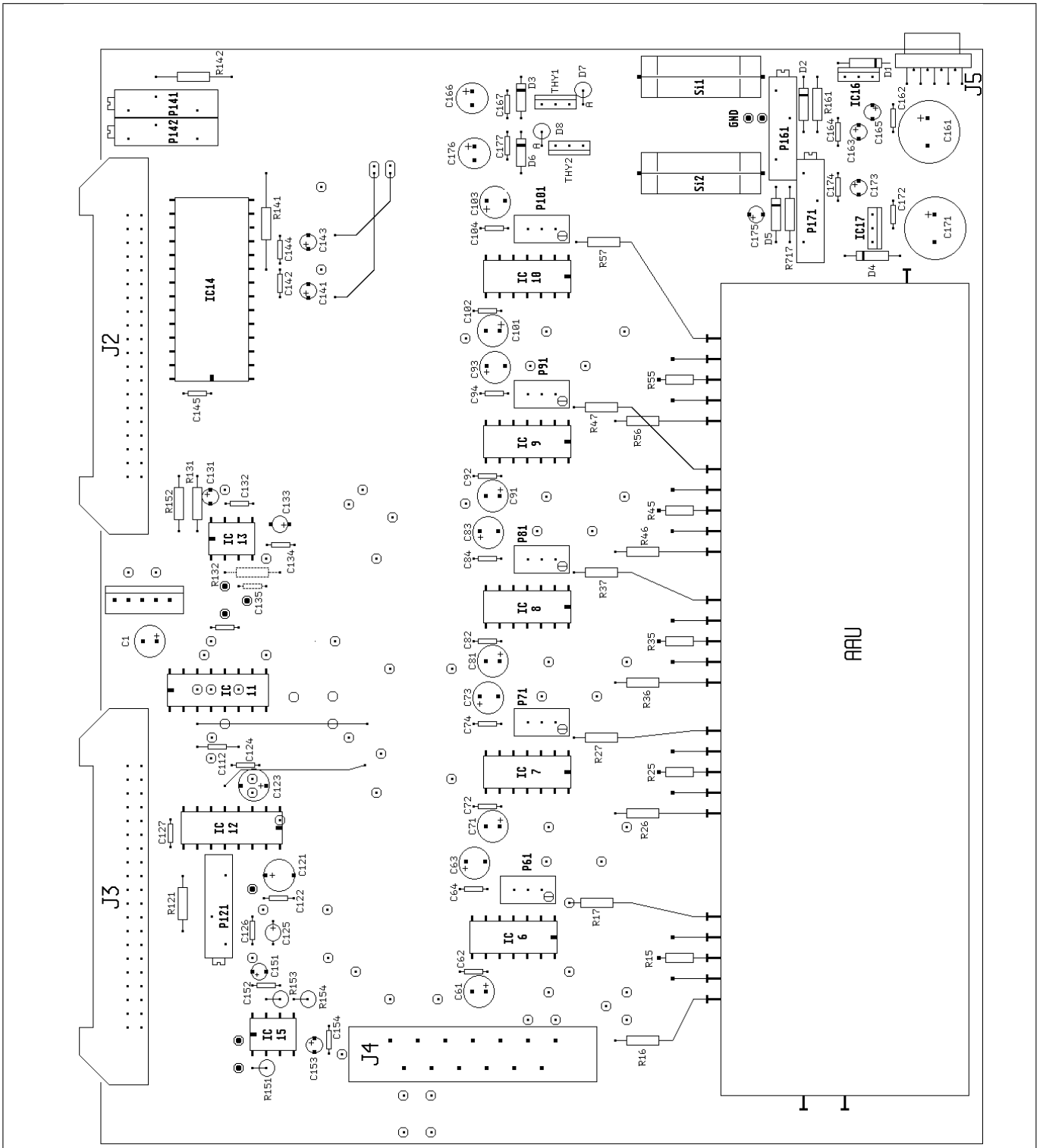


Abbildung B.5: Bestückungsplan der ALU, verkleinert dargestellt

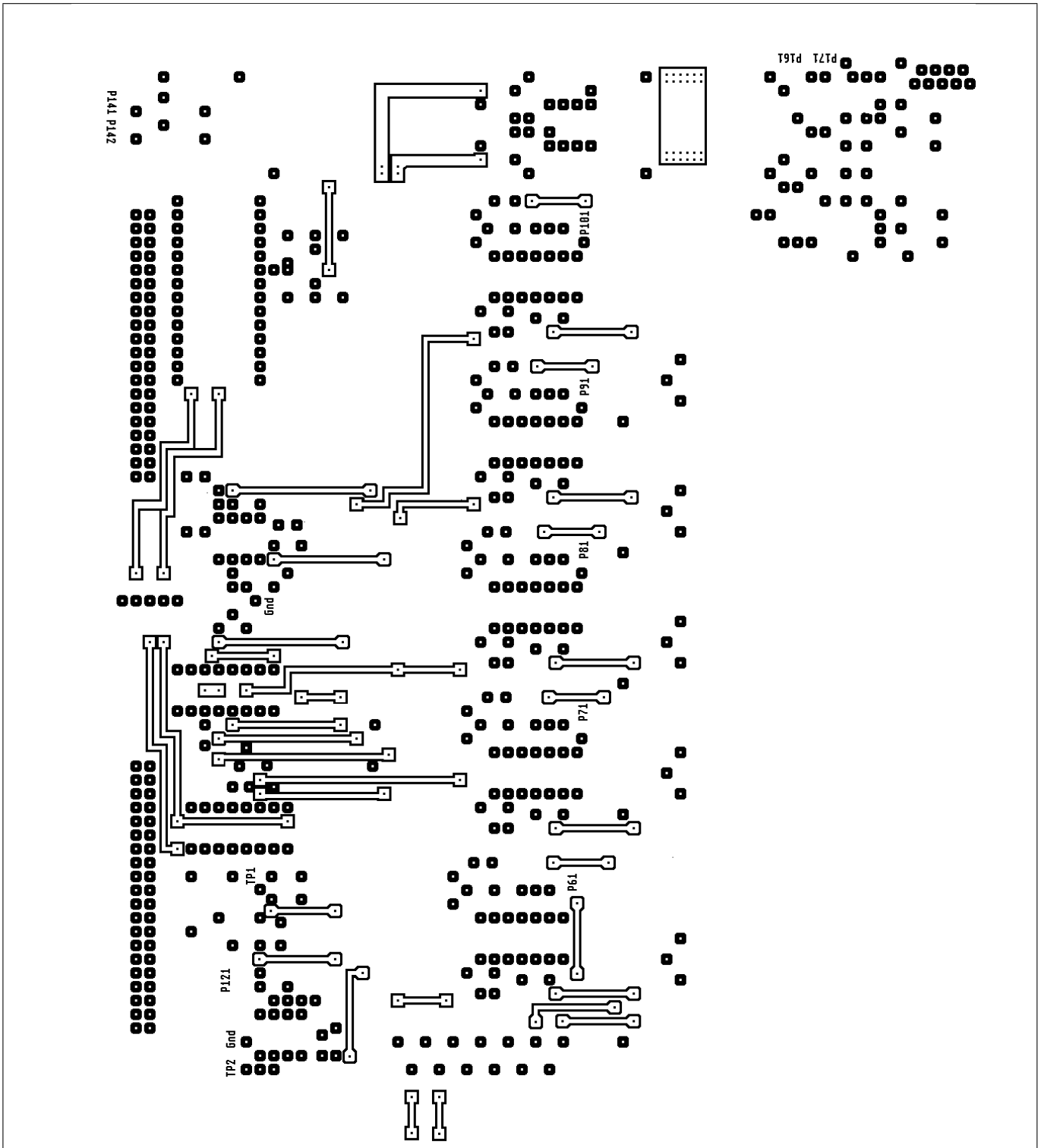


Abbildung B.6: Bestückungsseite der ALU verkleinert in Negativdarstellung. Der Hauptteil der Kupferfläche dient zur Abschirmung.

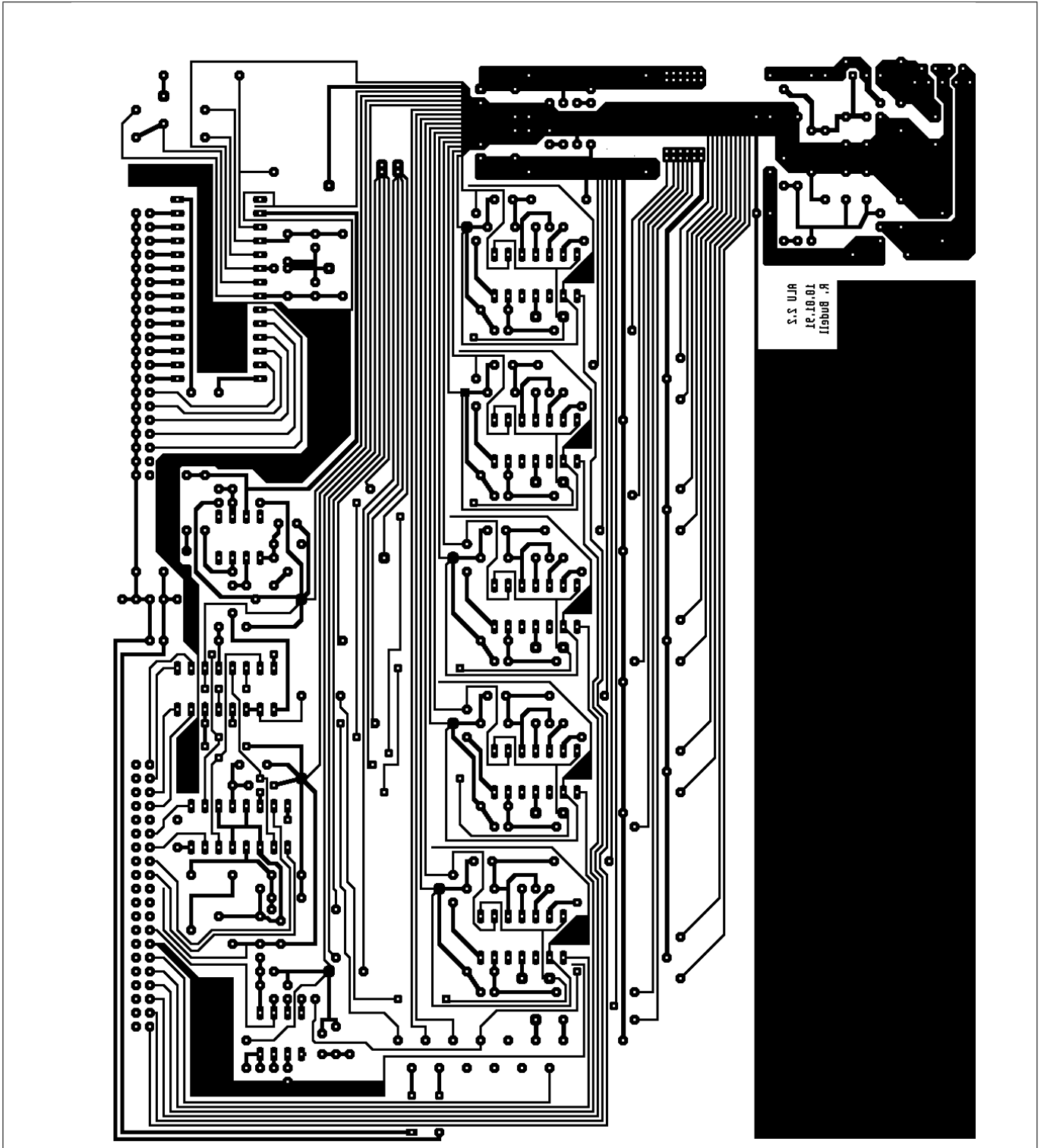


Abbildung B.7: Lötseite der ALU, verkleinert dargestellt

B.2 Schaltung der Digitalen Logarithmischen Einheit (DLU)

Die DLU hat insgesamt vier Aufgaben. Sie soll erstens den zeitlichen Ablauf der Messung und Konvertierung der Daten steuern. In diesem Teil wird das Start-Of-Conversion Signal (SOC) empfangen und damit die Messung gestartet. Nach dem Ablauf des Meßvorgangs wird das End-Of-Conversion Signal (EOC) gesetzt, das anzeigt, daß die Daten gültig sind. Die zweite Aufgabe der DLU besteht in der Selektierung der Verstärkung. Hier werden die Signale des Komparators in eine Adresse umgewandelt, die den Multiplexer und die EPROM-Tabelle umschaltet. Die dritte Einheit empfängt die digitalisierten Werte vom ADC und verwandelt sie mit Hilfe einer Festspeichertabelle in logarithmierte Werte. Mit Hilfe der Schutzschaltung für die PMT wird der Anodenstrom überwacht. Wenn der Strom den zulässigen Wert überschreitet, wird die PMT automatisch ausgeschaltet.

B.2.1 Die Ablaufsteuerung

Die Konversion kann von zwei Eingängen aus gestartet werden, BNC 3 und J 1/1. Über BNC 3 wird das SOC-Signal vom Daten Interface (DI) eingespeist. Dieses wird vom Mikrodensitometer erzeugt und gibt an, daß die Mechanik sich an dem Punkt befindet, der gemessen werden soll. Der zweite Eingang, J 1/1, wird von der Display Einheit (DU) benutzt. Hier wird eine Konversion gestartet, wenn das Mikrodensitometer nicht automatisch fährt. Damit können die Dichte und die Transmission vor dem Scannen kalibriert werden.

Beide Signale werden über ein ODER-Gatter (1/4 74HC 32) gepuffert und verknüpft. Eine positive Flanke startet den Monoflop-1 (1/2 74HC 221). Die Zeit ist auf 6 µs eingestellt. Diese Zeitkonstante wird benötigt, damit sich die S/Hs und der Multiplexer einschwingen können. Mit dem Start dieser Zeitkonstante wird über dem Ausgang \bar{Q} vom Monoflop-1 der Ausgang Q vom Flipflop-2 auf HIGH gesetzt. Dadurch werden die S/Hs in den Hold-Zustand versetzt und die EOC-Leitung auf HIGH gesetzt. Damit wird dem Mikrodensitometer signalisiert, daß gerade ein Wert konvertiert wird. Über den Ausgang \bar{Q} des Flipflops-2 wird der Zustand der Ausgangssignale des 4-fach Komparators in dem Multiplexer/Latch (74HC 298) eingefroren. Nach dem Ablauf der Zeit von Monoflop-1 schaltet die ansteigende Flanke von Ausgang \bar{Q} das Flipflop-2 um, so daß der Ausgang Q von HIGH nach LOW umschaltet. Damit wird eine Konversion des ADCs gestartet.

Die Rückmeldung vom ADC (Status, STS) gelangt über einen Puffer zum Monoflops-2. Die Zeitkonstante ist auf etwa 500 ns eingestellt. Diese Zeitkonstante gibt die Zeit vor, in der die EPROM-Tabelle ausgelesen wird. Mit dem Beginn des Zeitablaufs setzt der Ausgang \bar{Q} von Monoflop-2 das Flipflop-1 zurück. Dadurch schaltet der Ausgang Q von Flipflop-1 auf HIGH. Der gewandelte Wert kann jetzt aus dem ADC ausgelesen werden. Über den Ausgang Q von Monoflop-2 wird der Enable-Eingang von den Latches (74HC 373) auf die Übernahme des Wertes geschaltet. Nach dem Ablauf der Zeit werden die Latches wieder auf Speichern geschaltet. Die positive Flanke des invertierten Ausgangs \bar{Q} von Monoflop-2 setzt das Flipflop-2 zurück und schaltet damit die S/Hs wieder in den Sample-Zustand. Über die EOC-Leitung wird jetzt dem Mikrodensitometer mitgeteilt, daß ein gültiger Wert vorliegt.

B.2.2 Die Adressdekodierung

Die ersten 4 Eingänge des Multiplexer/Latches (74HC 298) werden von den 4 Ausgängen des Komparators belegt. Die zweiten 4 Eingänge des Multiplexer/Latches werden mit Hilfe eines

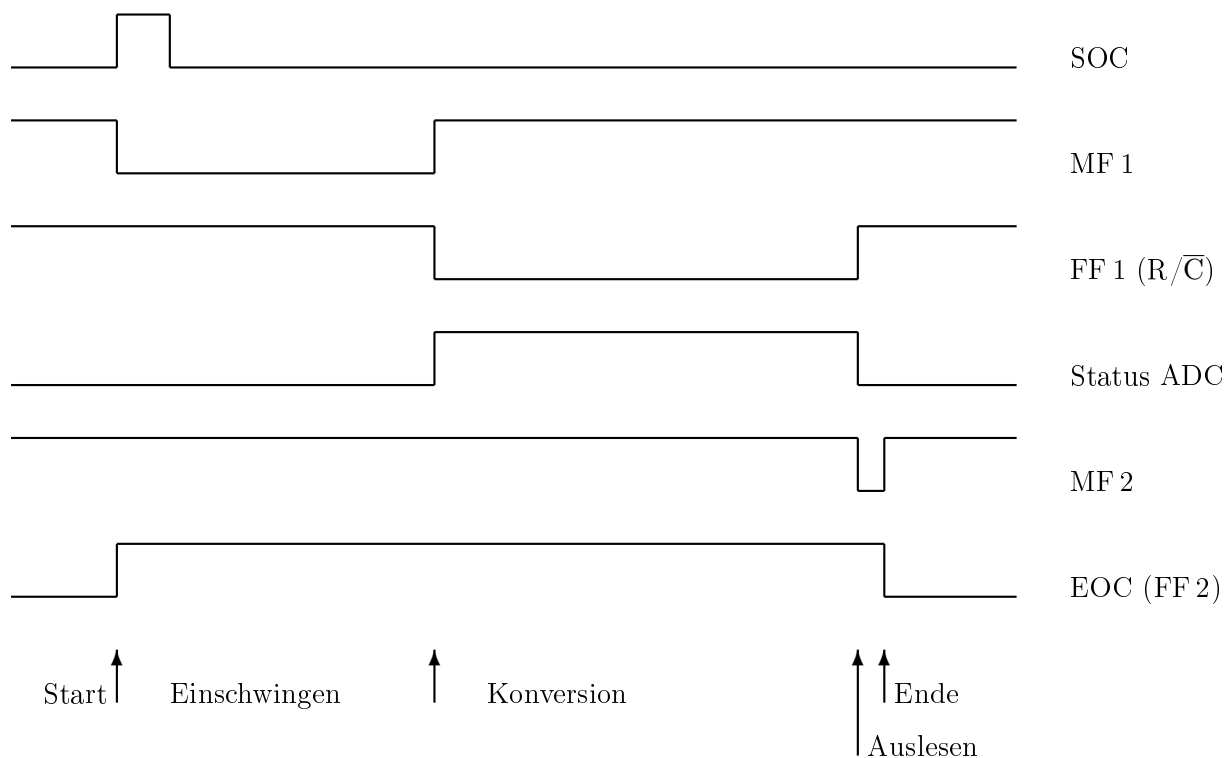


Abbildung B.8: Logikdiagramm der Zeitsteuerung

Drehschalters im Gehäuse des Verstärker/Konverters angesteuert. Über einen Kippschalter kann zwischen beiden Eingangsblöcken hin und her geschaltet werden.

ACHTUNG! Der Kippschalter ist arretiert, so daß eine versehentliche Umschaltung nicht möglich ist. Zum Betätigen des Schalters muß zuerst der Hebel gezogen werden.

Die vier Ausgänge des Multiplexer/Latches werden auf die Eingänge I_1 bis I_4 des Priority Encoders (74 HC 148) geführt. Der Eingang I_0 liegt immer auf Masse. Falls also kein anderer Eingang angesteuert wird, ist immer die Adresse 0 eingeschaltet und damit die Stufe der höchsten Verstärkung selektiert. Der Eingang I_5 selektiert die Adresse für die Transmissionsmessung. Er wird über das Schaltpult-Interface (Panel Interface, PI) angesteuert. Der Eingang I_6 schaltet die Adresse auf den Erweiterungskanal. Der Eingang ist standardmäßig über einen Pull-Up-Widerstand auf HIGH gelegt. Falls er gebraucht werden soll, kann er über IN 1 auf der DU-Platine erreicht werden. Der Eingang I_7 selektiert den Kanal, der zu Abgleichzwecken auf Masse gelegt wurde. Er wird über den Drehschalter im Verstärker/Konverter Gehäuse eingeschaltet.

Die vom Priority Encoder erzeugte Adresse von 3 Bit Länge wird über je einen Inverter/Puffer (74 HC 14) zum Analogmultiplexer auf dem ALU-Board geführt. Zusätzlich gelangt die Adresse an die ersten 4 Eingänge eines invertierenden Digitalmultiplexers (74 HC 258). Dabei wurde der 4. Eingang fest auf Masse gelegt. Die zweiten 4 Eingänge des Multiplexers wurden auf eine fest verdrahtete Adresse gelegt. Die Ausgänge des Multiplexers gelangen über die Latches (74 HC 373) an die Adressleitungen A13 bis A15 der zwei 256 kBit EPROMs. Damit wird eine der 8 Auslesetabellen der EPROMs adressiert. Mit Hilfe eines Kippschalters im Gehäuse des Verstärker/Konverters kann die Logarithmierung zu Testzwecken ausgeschaltet werden. Dieser

Schalter ist mit dem Select-Eingang des Multiplexers verbunden und schaltet auf die feste Adresse um.

ACHTUNG! Dieser Schalter ist arretiert, so daß er nicht versehentlich umgeschaltet werden kann. Der Hebel muß vor dem Umschalten gezogen werden.

B.2.3 Die Logarithmierung

Die Logarithmierung erfolgt mit Hilfe von zwei 256 kBit EPROMs. Beide EPROMs werden mit der gleichen Adresse angesteuert. Das eine EPROM enthält das Low-Byte des Ausgabewertes, während im anderen EPROM das High-Byte abgespeichert ist. Es können also bis zu 16 Bit parallel ausgegeben werden. Sinnvoll sind jedoch nur die unteren 12 Bit, da der ADC nicht genügend Auflösung bietet. Die unteren 12 Bit der Adresse werden vom ADC geliefert. Es können also insgesamt 4 kByte vom ADC her adressiert werden. Dadurch teilt sich das ganze EPROM in 8 Tabellen zu je 4 kByte auf. Zu jedem Kanal des Analogmultiplexers kann eine Tabelle abgespeichert werden. Die Kanalnummer steuert die oberen 3 Bit der Adresse der EPROMs an.

Die komplette Adresse wird in zwei Latches (74 HC 373) zwischengespeichert. Vom Ausgang des Monoflops-2 wird der Enable-Eingang angesteuert. Wenn der ADC einen gültigen Wert meldet, geht der Ausgang auf HIGH und öffnet damit die Latches für eine kurze Zeit. Während der Zeit sind die Ausgänge der EPROMs über den Output Enable gesperrt. Die Ausgänge der EPROMs gehen alle an je einen Puffer (74 HC 245). Danach werden die Daten über ein 40-poliges Flachbandkabel zur DU und zum DI geleitet. Bei dieser Leitung ist es wichtig, daß alle Leitungen durch ein Massekabel voneinander abgeschirmt sind. Dadurch wird Übersprechen verhindert und alle Leitungen bekommen einen definierten Wellenwiderstand. Wichtig ist ebenfalls, daß nur Bausteine der HC- oder HCT-Technologie als Leitungsempfänger eingesetzt werden, da nur diese einen guten Leitungsabschluß bilden und Reflexionen verhindert werden.

B.2.4 Die Stromversorgung

Alle Bausteine werden aus einer 5 V-Quelle gespeist, an der die DLU und das DI angeschlossen sind. Da die DLU und die ALU mit der Masse verbunden sein müssen, muß darauf geachtet werden, daß die Stromversorgung möglichst wenig Störungen durch die digitalen Bausteine auf den Analogteil überträgt. Da die ALU und die DLU synchron arbeiten, kann es so eingerichtet werden, daß die digitale Elektronik nur dann Störungen erzeugt, wenn die analoge Elektronik dafür unempfindlich ist. Alle asynchron arbeitenden digitalen Bausteine, also die DU und das PI sind an eine getrennte 5 V Versorgung angeschlossen. Die einzige Masseverbindung der beiden Netzteile befindet sich in der PSU.

Die Stromversorgung wird mit einem Elektrolytkondensator gepuffert. Eine in Sperrichtung geschaltete Diode schließt die Versorgung kurz, falls es zur Verpolung der Anschlüsse kommt. Jedes IC ist über einen Vielschichtkondensator (0.1 µF) gepuffert, der jeweils in dem IC-Sockel eingelötet ist.

B.2.5 Die EPROM-Tabelle

Die fünf Dichte-Tabellen enthalten zu jedem der 4096 Werte, die der ADC liefern kann, den entsprechenden Dichtewert. Da es sich um eine 12 Bit lange Ganzzahl handelt, müssen die logarithmierten Werte gerundet werden. Durch die Rundung ist jedoch die Häufigkeit der einzelnen

Ganzzahlwerte nicht stetig abnehmend, sondern variiert um 1. Dies ist als Rauschen im Histogramm zu sehen. Wenn die Häufigkeit der Ganzzahlwerte unter 1 sinkt, wird die Verstärkung umgeschaltet, so daß eine andere Tabelle benutzt wird.

Die Transmissionstabelle bildet die Werte des ADC ohne Veränderung ab. Sie ist nur eingeführt worden, damit der Schaltungsaufwand verringert werden kann.

Die Tabellen sind so gerechnet, daß sie die Werte entsprechend dem eingebauten ADC der PDS 2020 GM (ADC 85 oder ADC-HZ 12 BGC) liefert. Dieser ADC hat eine inverse Logik, d.h. LOW=1. Somit ist es möglich, die Daten direkt in den Sockel des ADCs auf dem Analogboard der PDS einzuspeisen. Falls ein Mikrodensitometer mit normaler Logik arbeitet, kann auf dem Daten-Interface eine Invertierung eingestellt werden.

Die Tabellen können mit dem folgenden Programm berechnet werden:

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

#define ERRFLAG 0x8000
#define FILL 0xffff

void main()
{
    short int intlog[4096];
    short int table[8][4096];
    char eprom1[8][4096];
    char eprom2[8][4096];

    double density;
    int i, k;
    int cnst;
    short itrans;
    short intlg;

    FILE *epr1;
    FILE *epr2;
    FILE *etab;

    /* Berechner der logarithmischen Tabelle */
    intlog[0] = 4095;
    for (i=1; i<4096; i++) {
        density = log10( 4000.0 / i );
        intlog[i] = floor( (density * 800.0) + 0.5 );
    }

    /* Erzeugen der logarithmischen EPROM Tabelle */
    for (k=0; k<5; k++) {
        cnst = 800 * k;
```

```

    for (i=0; i<4096; i++) {
        intlg = cnst + intlog[i];
        if ((intlg <= 0) && (i > 4000))    intlg = ERRFLAG;
        if (intlg > 4095)    intlg = 4095;
        table[4-k][i] = intlg;
        intlg = ~intlg;
        eprom1[4-k][i] = intlg;
        eprom2[4-k][i] = intlg >> 8;
    }
}

/* Erzeugen der Transmissionstabelle */
for (i=0; i<4096; i++) {
    itrans = i;
    if (itrans > 4000)    itrans += ERRFLAG;
    table[5][i] = itrans;
    itrans = ~itrans;
    eprom1[5][i] = itrans;
    eprom2[5][i] = itrans >> 8;
}

/* Auff"ullen der EPROMs mit 0xffff */
for (k=6; k<8; k++) {
    for (i=0; i<4096; i++) {
        table[k][i] = FILL;
        eprom1[k][i] = FILL;
        eprom2[k][i] = FILL;
    }
}

/* Schreiben der Tabellen im Bin"arformat */
epr1 = fopen( "eprom1.bin", "w");
epr2 = fopen( "eprom2.bin", "w");
etab = fopen( "table.bin", "w");

fwrite( &eprom1[0][0], 1, 32768, epr1);
fwrite( &eprom2[0][0], 1, 32768, epr2);
fwrite( &table[0][0], 2, 32768, etab);

fclose (epr1);
fclose (epr2);
fclose (etab);
}

```

B.2.6 Die Schutzschaltung für die PMT

Zur Überwachung des Anodenstroms der PMT wird ein Fensterdiskriminator (TCA 965) benutzt. Die Schaltung befindet sich ebenfalls auf dem DLU-Board und wird aus der digitalen

Versorgung (5 V) gespeist. Diese Spannung ist aber zu gering für die Funktion der internen Referenzspannungsquelle des ICs, die erst ab einer Versorgungsspannung von 9 V arbeiten kann. Deshalb wird eine externe Referenzquelle aufgebaut. Die Referenzspannung wird mit einer roten Leuchtdiode gewonnen und stabilisiert. Der Spannungsabfall über eine rote Leuchtdiode, die in Durchlaßrichtung geschaltet ist, beträgt etwa 1.8 V. Mit Hilfe eines Trimpotentiometers (P1) wird die Spannung auf genau 1.5 V eingestellt. Nachfolgend wird diese Spannung mit einem Elektrolytkondensator von 1 μ F in Kombination mit einem 0.1 μ F Vielschichtkondensator gepuffert.

Aus der Referenzspannung wird mit Hilfe von Spannungsteilern die Fenstermitte (R24/R25) und die halbe Fensterbreite (R26/R27) festgelegt. Die Meßspannung wird an dem Ausgang des I/U-Konverters abgenommen und über einen Rechenverstärker (1/2 TL 082), der als Emitterfolger geschaltet ist, ausgekoppelt. Über einen Spannungsteiler (R21/R22) wird die Ausgangsspannung durch 10 geteilt. Dadurch entspricht ein Anodenstrom der PMT von 100 μ A einer Spannung von 1.0 V am Eingang des Fensterdiskriminators. Ein Tiefpaßfilter aus R23 und C22 filtert kurzzeitige Spannungsspitzen aus. Dadurch ist ein kurzzeitiges Übertreten der Grenzen möglich, ohne daß Alarm ausgelöst wird. Es werden 2 Ausgänge des Fensterdiskriminators ausgewertet. Ausgang Pin 13 — die Meßspannung liegt innerhalb des Fensters, $1.01 \text{ V} < U_E < 1.25 \text{ V}$ — ergibt die erste Alarmstufe. Der Benutzer wird darauf hingewiesen, daß er den normalen Meßbereich verlassen hat. Ausgang Pin 2 — die Meßspannung liegt oberhalb des Fensters, $U_E > 1.25 \text{ V}$ — schaltet die Hochspannungsversorgung für die PMT aus, da eine Gefahr durch Stromüberlastung besteht. Die Anzeige der Alarmzustände erfolgt in der DU.

In der älteren Schaltung der Schutzschaltung für die PMT wurde noch nicht der Einsteller P1 benutzt. Die Referenzspannung wurde direkt an der Leuchtdiode abgenommen. Die Referenzspannung beträgt in diesem Fall etwa 1.8 V. Die Spannungsteiler hatten deshalb geringfügig andere Werte. Da die Leuchtdioden aber zu große Streuungen aufwiesen, wurde eine Einstellmöglichkeit der Referenzspannung eingeführt.

B.2.7 Pinbelegung der Verbindungsstecker

B.2.7.1 Verbindung zwischen DLU, DI und DU; J 1

Diese Leitung verbindet die DLU mit der DU und dem DI. Die Leitung darf bis zu 4 m lang sein. Es handelt sich dabei um 40-polige Pfostenverbinder/Steckerleisten nach DIN 41 651. Alle nicht aufgeführten Anschlüsse mit geraden Zahlen sind zur Abschirmung einseitig mit Masse verbunden. Diese Leitungen dürfen nicht als Rückleitung gebraucht werden.

Pin 1	CMM, Convert Manual Mode	Pin 19	D 7
Pin 2	Overflow Flag	Pin 21	D 6
Pin 3	D/T, Dichte, Transmission	Pin 23	D 5
Pin 4	Alarm 1	Pin 25	D 4
Pin 5	EOC; End Of Conversion	Pin 27	D 3
Pin 6	Alarm 2	Pin 29	D 2
Pin 7	D 11, MSB	Pin 31	D 1
Pin 9	D 10	Pin 33	D 0, LSB
Pin 11	D 9	Pin 35	Exponent 2
Pin 13	D 8	Pin 37	Exponent 1
Pin 15	Man/Auto (M=H, A=L)	Pin 39	Exponent 0
Pin 17	nc		

B.2.7.2 Verbindung des ADC (auf der ALU) mit der DLU; J 2

Mit dieser Leitung werden alle Steuer- und Datenleitungen des ADCs auf der ALU mit der DLU verbunden. Alle Anschlüsse mit geraden Zahlen liegen einseitig auf Masse. Es handelt sich dabei um einen 40-poligen Pfostenverbinder mit Steckerleiste nach DIN 41 651.

Pin 1	nc	Pin 21	D 9
Pin 3	nc	Pin 23	D 8
Pin 5	CE, Chip Enable	Pin 25	D 7
Pin 7	$\overline{R/C}$, Read/ $\overline{Convert}$	Pin 27	D 6
Pin 9	A ₀ , Byte Address	Pin 29	D 5
Pin 11	\overline{CS} , Chip Select	Pin 31	D 4
Pin 13	12/ $\overline{8}$, Data Mode Select	Pin 33	D 3
Pin 15	STS, Status	Pin 35	D 2
Pin 17	D 11, MSB	Pin 37	D 1
Pin 19	D 10	Pin 39	D 0, LSB

B.2.7.3 Steuerung der ALU von der DLU aus; J 3

Über diese Verbindung gehen alle Steuerbefehle, die von der DLU kommen und die analogen Schaltkreise der ALU entsprechend schalten. Diverse Ausgänge der analogen Schaltkreise werden über diese Verbindung mit der DLU verbunden. Es handelt sich dabei um einen 40-poligen Pfostenverbinder mit Steckerleiste nach DIN 41 651. Alle nicht aufgeführten Anschlüsse haben keine Belegung und stehen für Erweiterungen zur Verfügung.

Pin 1	S/H von Amp 4	Pin 21	nc
Pin 3	S/H von Amp 3	Pin 23	Komparator Amp 1
Pin 5	S/H von Amp 2	Pin 25	Komparator Amp 2
Pin 7	S/H von Amp 1	Pin 27	Komparator Amp 3
Pin 9	S/H I/U-Konverter	Pin 29	Komparator Amp 4
Pin 11	S/H Erweiterung	Pin 31	nc
Pin 13	Masse	Pin 33	Multiplexer Enable
Pin 15	I/U-Konverter overflow	Pin 35	Multiplexer A0
Pin 17	nc (no connection)	Pin 37	Multiplexer A1
Pin 19	nc	Pin 39	Multiplexer A2

B.2.7.4 Anschluß der Testeinheit; J 7

Über diese Verbindung können verschiedene Testmodi eingeschaltet werden. Bei den bisherigen Versionen wird die Umschaltung manuell vorgenommen. Man könnte auch alle Anschlüsse mit einer digitalen Steuerung verknüpfen. Damit wäre ein automatischer Test mit einem Mikrocontroller möglich.

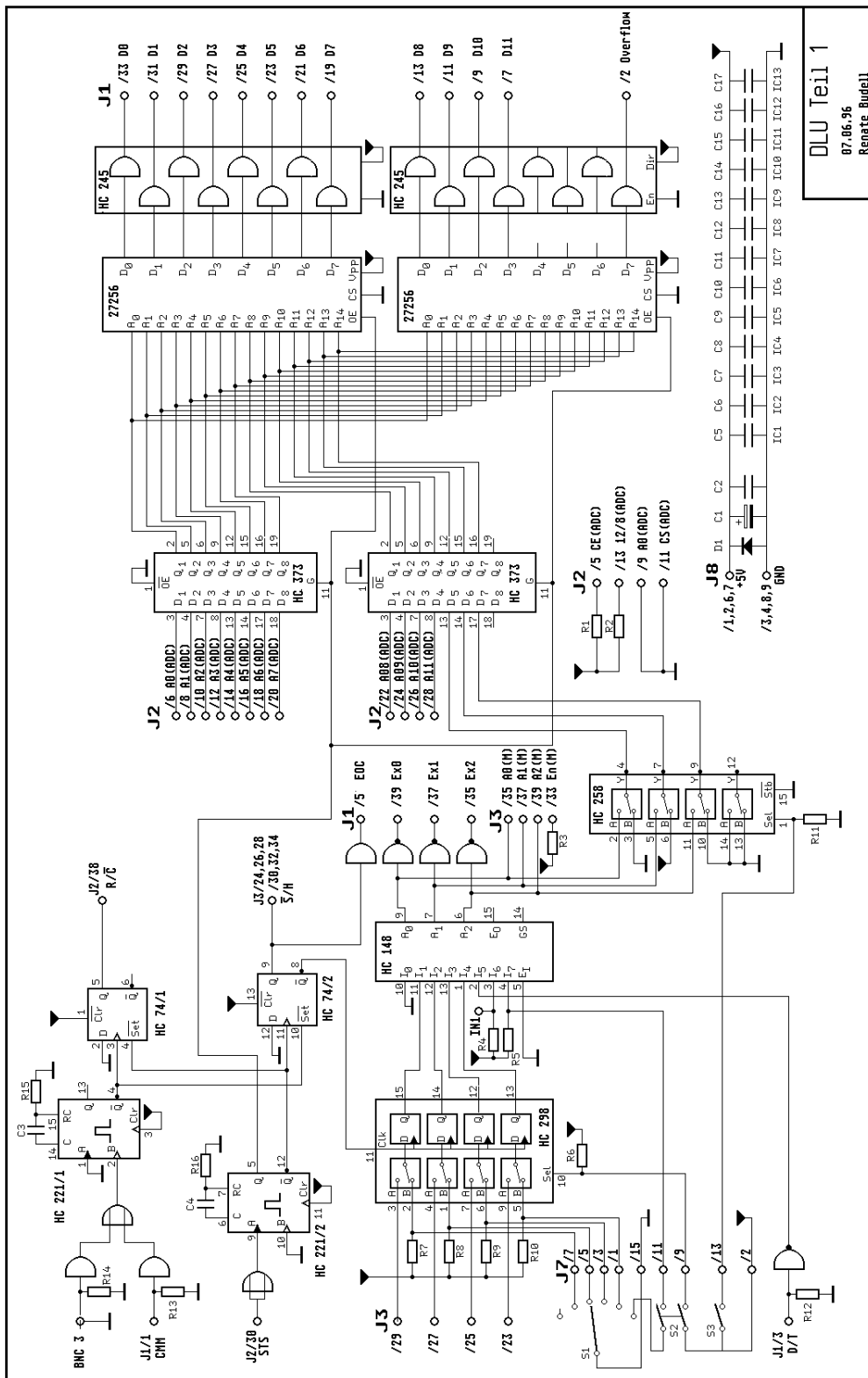
Bei der Verbindung handelt sich um eine 16-polige Steckerleiste mit Pfostenverbinder nach DIN 41 651. Alle nicht aufgeführten Anschlüsse haben keine Belegung und stehen für Erweiterungen zur Verfügung.

Pin 1	I/U-Kanal ein
Pin 2	+5V
Pin 3	Amp1-Kanal ein
Pin 5	Amp2-Kanal ein
Pin 7	Amp3-Kanal ein
Pin 9	$\overline{\text{Auto}}/\text{SelectManual}$
Pin 11	GND-Kanal ein
Pin 13	$\text{Lin}/\overline{\text{Log}}$
Pin 15	GND

B.2.7.5 Anschluß der Stromversorgung; J 8

Die Stromversorgung wird mit Hilfe eines 9-poligen Sub-D-Steckers mit der DLU verbunden.

Pin 1, 2, 6, 7	+5 V
Pin 3, 4, 8, 9	GND digital
Pin 5	nc



DLU Teil 1
07.06.96
Renate Budeil

Abbildung B.9: Schaltplan der DLU, Teil 1.

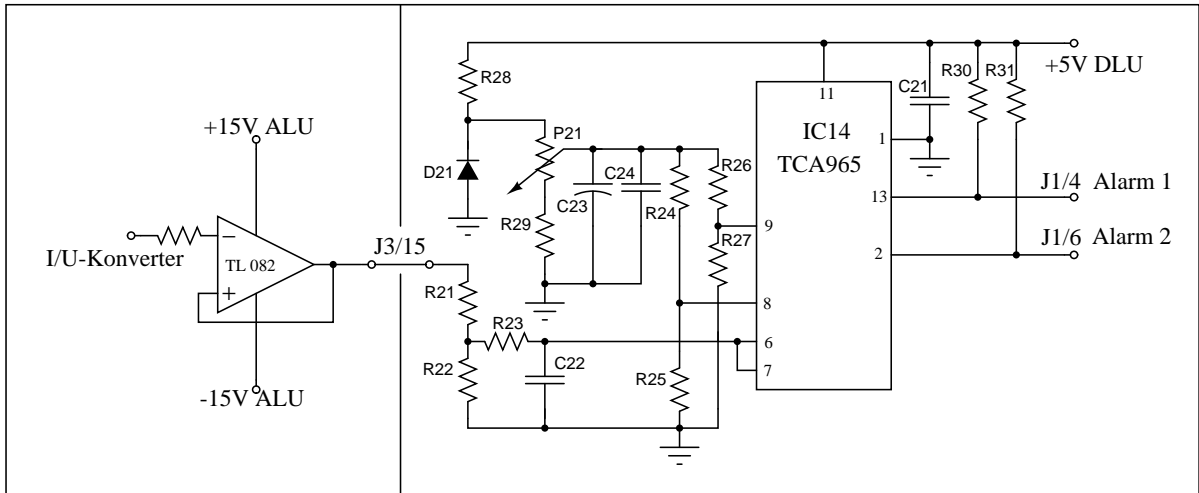


Abbildung B.10: Schaltplan der DLU, Teil 2: Die Schutzschaltung der PMT.

Bauteilliste der Digital-Logarithmic-Unit (DLU)

IC1	74 HC 245	8 fach Tranc. DLU<->DI<->DU
IC2	74 HC 245	8 fach Tranc. DLU<->DI<->DU
IC3	27 256	32 kByte Eprom Log-Tabelle-2 MSB
IC4	27 256	32 kByte Eprom Log-Tabelle-1 LSB
IC5	74 HC 298	2x4 lines multiplexer/latch
IC6	74 HC 148	8 to 3 priority encoder
IC7	74 HC 74	Dual D-Flip-Flop; R/C, EOC
IC8	74 HC 32	4-fach OR
IC9	74 HC 221	2 Monoflops
IC10	74 HC 14	6-fach Inverter
IC11	74 HC 373	8 Latch; IN from ADC
IC12	74 HC 373	8 Latch; IN from ADC
IC13	74 HC 258	4-Bit-Multiplexer; Tabelle Lin/Log
IC14	TCA 965	Fensterdiskriminator; Schutz für PMT
D1	1N4007	Verpolungsschutz für 5V
D2	LED rot	Referenzspannung für IC 14

R1–R14	10 k	Kohle	Pull Up
R15	4.7 k	Kohle	Zeitkonstante MF1
R16	4.7 k	Kohle	Zeitkonstante MF2
R21	1.8 k	Metall	$R21 = 9 \times R22$
R22	200 Ω	Metall	
R23	100 k	Metall	
R24	3.3 k	Metall	$R24 = 0.33 \times R25$
R25	10 k	Metall	
R26	11.5 k	Metall	$R26 = 11.5 \times R27$
R27	1 k	Metall	
R28	680 Ω	Metall	
R29	2.2 k	Metall	
R30	1 k	Kohle	Kollektorwiderstand für Ausgang IC14
R31	1 k	Kohle	Kollektorwiderstand für Ausgang IC14
P21	1 k	Cermet	Einstellen der Referenzspannung
C1	470 μ F	Elko	5V Power
C2	0.1 μ F	Viel.	5V Power
C3	1.5 nF		Zeitkonstante MF1
C4	68 pF		Zeitkonstante MF2
C5..C17	0.1 μ F	Viel.	Blockkond. pro IC an Beinchen gelötet oder in IC-Fassung eingebaut
C21	0.1 μ F	Viel.	Blockk. für IC 14
C22	330 nF	Folie	Lowpass Input IC 14
C23	10 μ	Elko	Stab. für Referenzspannung IC14
C24	0.1 μ F	Viel.	Stab. für Referenzspannung IC14
J1	40 pol	Stiftwanne 90°	DLU<->DI<->DU
J2	40 pol	Stiftwanne 180°	DLU<->ADC
J3	40 pol	Stiftwanne 90°	DLU<->ALU
J7	16 pol	Stiftwanne 180°	Anschluß der Testschalter
J8	Sub-D	9-pol	Zuleitung 5V
2	IC-Fassungen	28 pol mit Block-Kondensator	
4	IC-Fassungen	20 pol mit Block-Kondensator	
4	IC-Fassungen	16 pol mit Block-Kondensator	
3	IC-Fassungen	14 pol mit Block-Kondensator	
1	IC-Fassung	14 pol präz.	
4	Lötnägel		5V -> ALU
1	BNC-Buchse	isoliert	DI->SOC (auf Gehäuse)
S1	Drehschalter	6 Stellungen 1 Ebene	
S2	Schalter	2 UM arretierbar	
S3	Schalter	1 UM arretierbar	
1	Stiftstecker	16 pol	

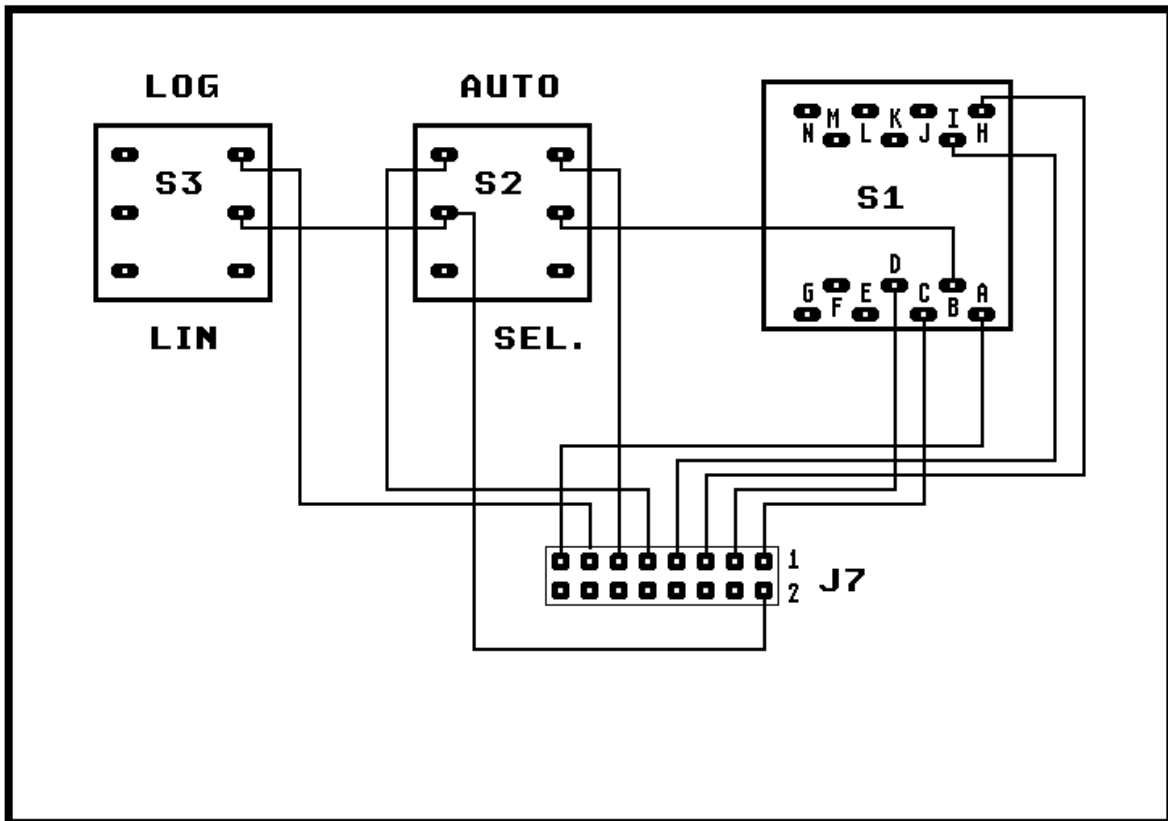


Abbildung B.11: Verdrahtung der Testeinheit der DLU

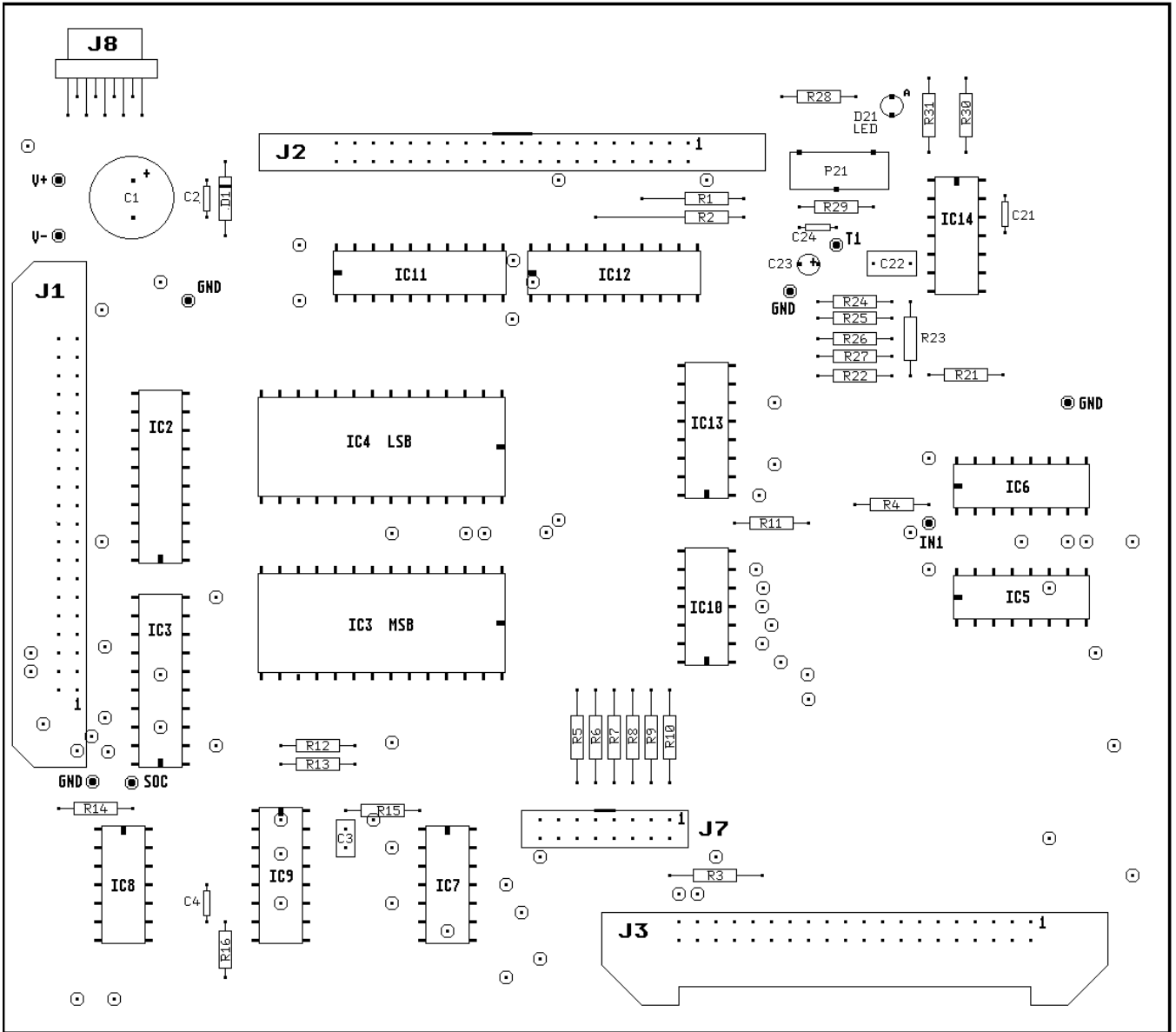


Abbildung B.12: Bestückungsplan der DLU.

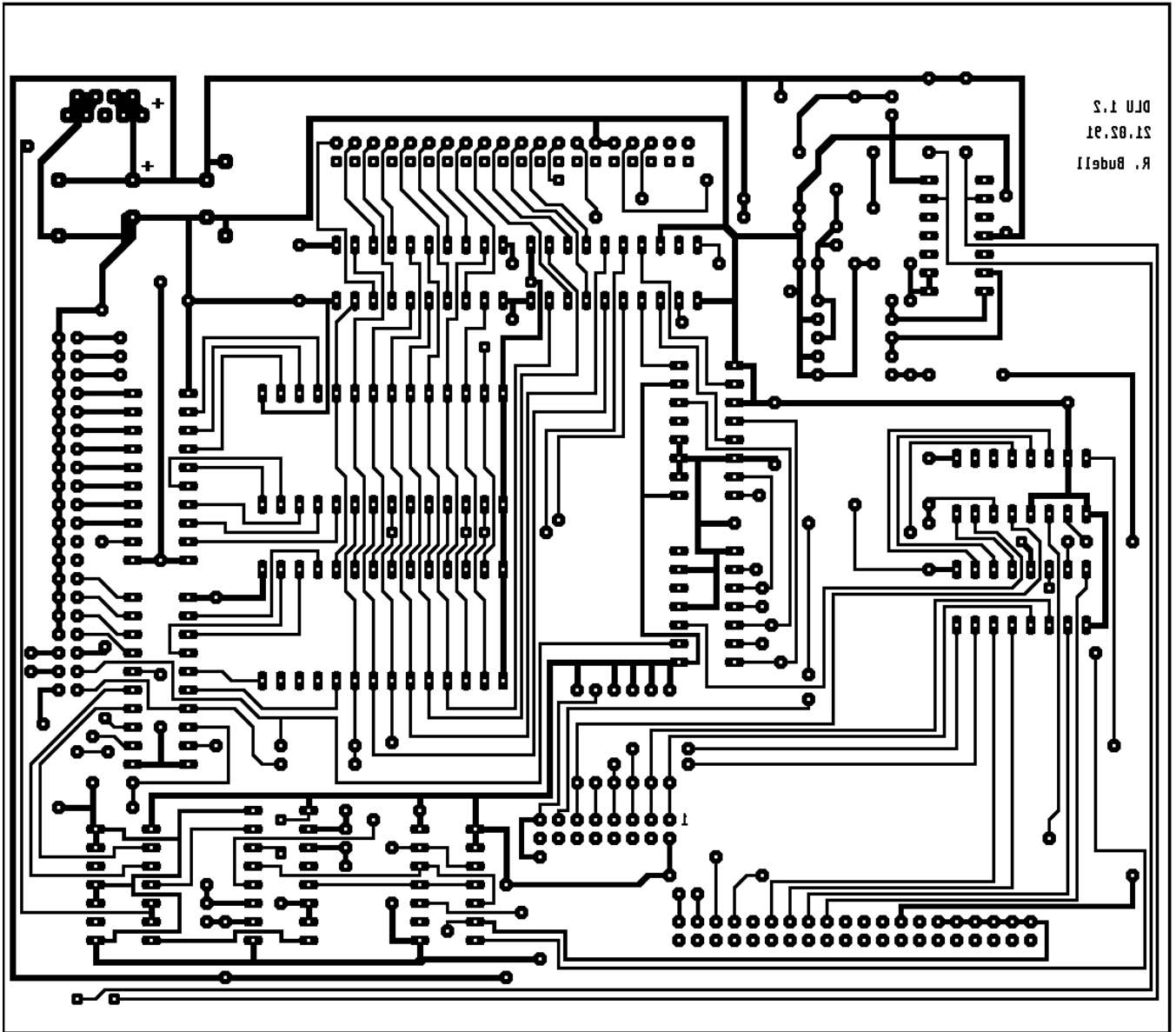


Abbildung B.13: Layout der DLU, Lötseite

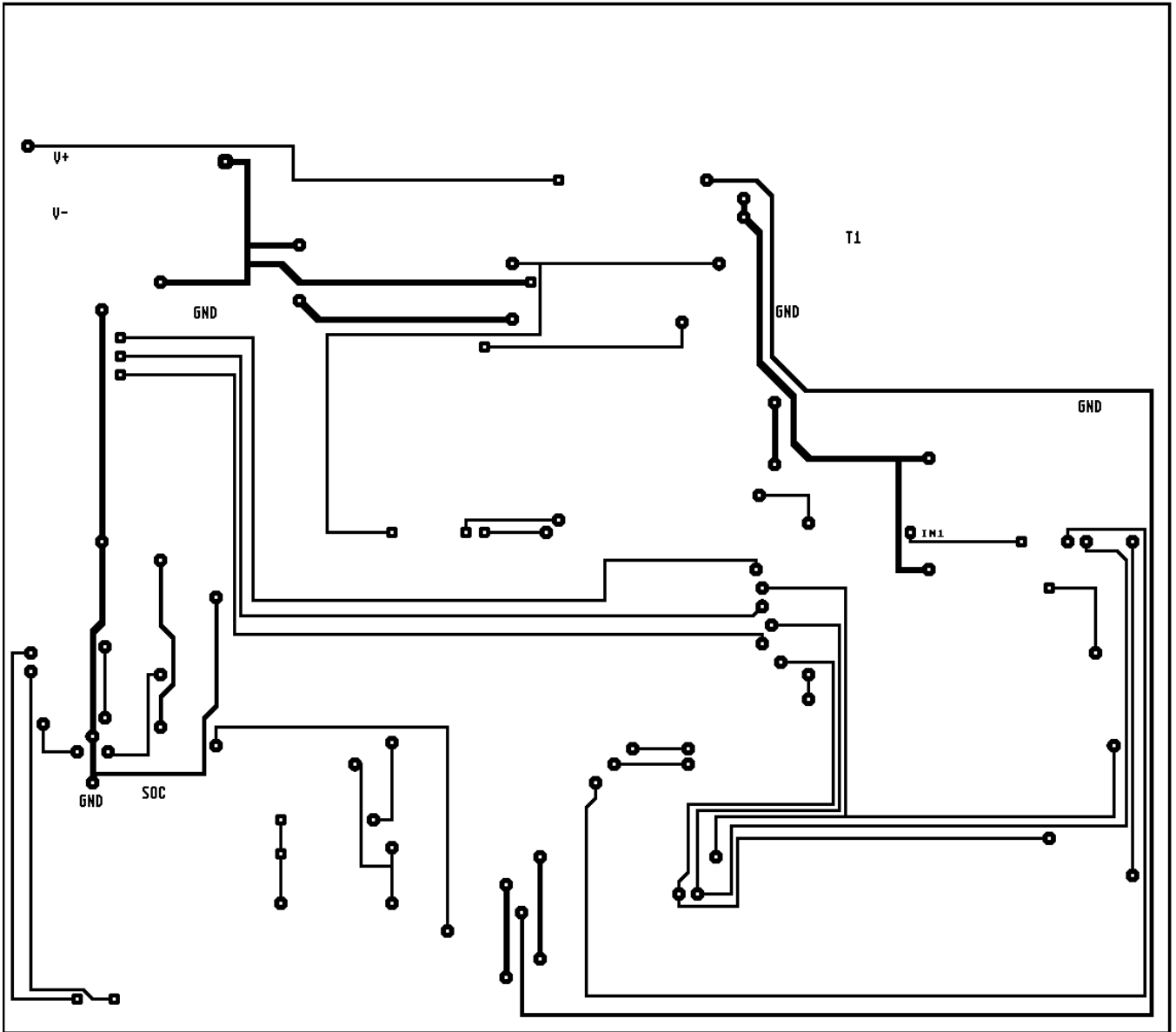


Abbildung B.14: Layout der DLU, Bestückungsseite

B.3 Demontage der ALU und der DLU zu Reparaturzwecken

Bevor man das Gehäuse öffnet, sollte man es sich gut überlegen, ob das absolut notwendig sind. In diesem Gehäuse befinden sich die empfindlichsten Teile der Elektronik. Nach Arbeiten an diesen Platinen kann es zu Störungen kommen, deren Ursachen schwer zu finden sind.

An den beiden Stirnseiten des Gehäuses befinden sich jeweils 4 Schrauben. Es empfiehlt sich zuerst nur die oberen 2 Schrauben auf jeder Seite zu lösen. Dann kann man den Deckel mit den Führungsschienen abheben. Danach können auch die beiden Seitenteile entfernt werden. In der Mitte des Gehäuses sieht man ein Paket aus insgesamt 3 Platinen. Zur Vorderseite hin befinden sich alle Kabelanschlüsse und an der Rückseite sieht man die Schalter für verschiedene Testmodi.

Die obere Platine ist die ALU. Alle Trimpotentiometer sind leicht zugänglich, ohne daß weitere Montagen nötig sind. In dem Metallkasten am Rande der ALU befindet sich der I/U-Konverter und die AAU. Auch hier sind alle Trimpotentiometer von außen einstellbar. Zur Einstellung der Verstärkung jeder Stufe muß jedoch der Deckel geöffnet werden, da die Widerstände, die die einzelnen Stufen verbinden, abgelötet werden müssen.

Die untere Platine ist die DLU. Die Bestückungsseite zeigt nach unten. Die DLU und die ALU ist mit 2 Flachbandkabeln verbunden.

Die Platine zwischen den beiden Einheiten dient zur Abschirmung und als Montageplatte. Die ALU und die DLU sind jeweils mit Abstandröhrchen auf die Montageplatte aufgeschraubt. Diese Schrauben müssen nur gelöst werden, wenn auf einer der Platine gelötet werden soll. Das kommt jedoch hoffentlich selten vor. Alle ICs sind steckbar angebracht und können leicht ausgetauscht werden. Zuerst muß die ALU demontiert werden, da sonst die Schrauben der DLU nicht zugänglich sind. Bei der Montage sollte die Reihenfolge umgekehrt sein. Zuerst wird die DLU und dann die ALU montiert.

Die Montageplatte ist mit 4 Schrauben mit dem Boden des Gehäuses verbunden. Die Muttern sind frei zugänglich und müssen abgeschraubt werden, wenn man an der DLU etwas austauschen will. Bevor man den ganzen Block von den Schrauben abhebt, sollte die Frontplatte des Gehäuses gelöst werden. Die meisten Anschlüsse sind sehr kurz gehalten und bieten nicht viel Spielraum für Bewegungen. Jetzt kann man vorsichtig den ganzen Block abheben und sollte dabei darauf achten, daß die Frontplatte nicht verkantet. Die DLU ist noch mit einem Flachbandkabel mit den Testschaltern verbunden. Dieses Kabel ist gesteckt und kann gelöst werden, falls es notwendig ist. Dazu muß zuerst die Metallklammer gelöst werden, die den Stecker arretiert. Das lange Flachbandkabel, das die Verbindung zur DU und zum DI herstellt ist ebenfalls gesteckt und kann mit den Auswurfhebeln entfernt werden.

Der Zusammenbau der Verstärker/Konverter-Elektronik sollte in der umgekehrten Reihenfolge gemacht werden. Wichtig dabei ist, daß die Muttern immer gegen die Platinen isoliert sind. Andernfalls kann es zum Brummen kommen.

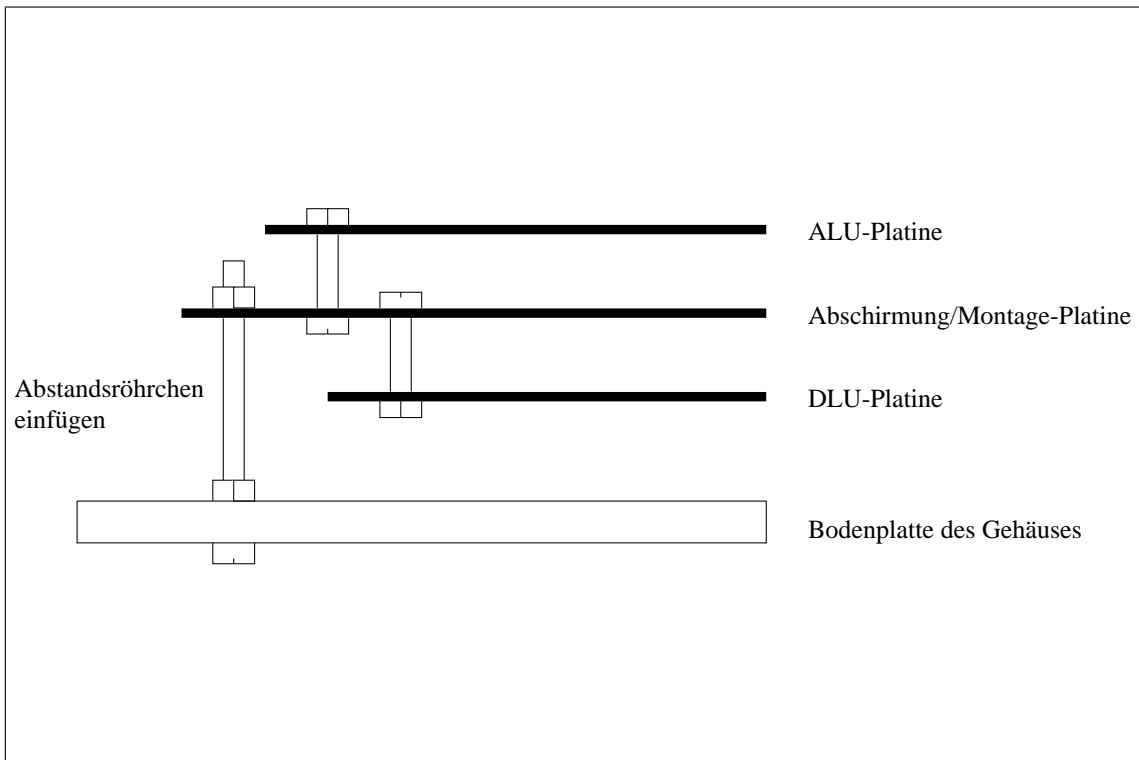


Abbildung B.15: Befestigung der ALU und der DLU im Verstärker/Konverter-Gehäuse

B.4 Schaltung der Anzeige Einheit (Display Unit, DU)

Die Anzeigeeinheit konvertiert die binären Werte in Realzahlen und zeigt diese auf einem Display an. Die Helligkeit des Displays ist regelbar. Auf dem DU-Board wird der Takt erzeugt, der die Konversion startet, wenn das Mikrodensitometer keine SOC-Impulse liefert. Damit ist das Einstellen der Hochspannung der PMT möglich. Die Ausgänge der Überstromschutzschaltung werden hier ausgewertet und zur Anzeige bzw. zum Abschalten der Hochspannung des PMT benutzt. In der DU werden die Schalterstellungen vom Bedienpult des Mikrodensitometers in Steuersignale umgewandelt. Die DU wird mit +5 V aus der Netzteileneinheit des Verstärker/Konverters versorgt. Alle Verbindungen zum Mikrodensitometer sind mit Hilfe von Optokopplern oder Relais galvanisch getrennt. Bei einigen Geräten wurde eine analoge Anzeige für die Hochspannung eingebaut.

B.4.1 Funktion der Anzeige der Daten

Die Anzeigemuster der Realzahlen sind in einem 64 kByte großen EPROM abgespeichert. Ein Byte steuert eine Ziffer der 7-Segmentanzeige an (7 Segmente plus Dezimalpunkt). Es werden 4 Ziffern angezeigt, die vier nacheinanderfolgende Bytes im EPROM belegen. Insgesamt können 4096 Realzahlen für Dichte und 4096 Realzahlen für Transmission vorkommen. Jede Tabelle muß also 16 kByte groß sein. Für die Wartung und die Justierung hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, wenn nicht die Realzahl, sondern die Ganzzahl angezeigt wird. Deshalb wurde jeweils für Dichte und für Transmission eine weitere Tabelle angelegt, die die Anzeigemuster der Ganzzahlen enthalten. Die Adressierung erfolgt insgesamt über 16 Adressleitungen. Mit den zwei höchstwertigen Adressen wird zwischen den 4 Tabellen umgeschaltet. Die Umschaltung erfolgt statisch durch Handschalter. Die nächsten 12 Adressleitungen wählen den Bereich für die zugehörige Realzahl an. (Dieser Teil der Adresse verändert sich mit dem 6 Hz Takt.) Die beiden niedrigwertigen Adressleitungen werden durch den Multiplexertakt bedient. Dabei handelt es sich um einen 400 Hz Takt, so daß jede Ziffer 100 mal pro Sekunde aufleuchtet. Die Adresse wird aus dem Takt mit einem Binärzähler erzeugt.

Die Daten gelangen als binäre Ganzzahlen über ein 40-poliges Flachkabel (J1) in die Anzeigeeinheit. Als Empfängerbausteine dienen zwei Latches (74 HC 373). Die Enable-Eingänge der Latches sind mit einem Taktgenerator verbunden, der 6 Hz erzeugt, und daher werden 6 Werte pro Sekunde angezeigt, egal wieviele Werte der Verstärker/Konverter wirklich liefert. Die angezeigten Zahlen können gut verfolgt werden.

Die Ausgänge der Latches steuern die Adressleitungen A2 bis A13 des EPROMs an. Die 8 Datenleitungen des EPROMs gelangen auf einen 8-fach Leitungstreiber (74 LS 645). Dieser Leitungstreiber schaltet die 8 Kathoden der vLeuchtdioden einer 7-Segmentanzeige entsprechend dem Anzeigemuster auf Masse. Alle Kathoden der vier 7-Segmentanzeigen sind parallel geschaltet. Die gemeinsamen Anoden werden gemultiplext, so daß immer nur die Leuchtdioden einer Anzeige gleichzeitig aufleuchten.

Der Takt zum Multiplexen wird mit einem Timerbaustein (NE 7555) erzeugt. Der Timer ist als astabiler Multivibrator mit einer Frequenz von 400 Hz geschaltet. Darüber hinaus kann das Tastenverhältnis dieser Rechteckschwingung im Bereich von 2% bis 98% variiert werden. Das Tastenverhältnis kann unabhängig von der Frequenz mit Hilfe eines Potentiometers eingestellt werden. Mit Hilfe des variablen Tastenverhältnis wird die Helligkeit des Displays gesteuert.

Der Takt gelangt vom Ausgang des Timers auf den Clock-Eingang eines Binärzählers (1/2 74HC 393). Die Ausgänge Q0 und Q1 des Zählers zählen binär immer von 0 bis 3. Die anderen Ausgänge werden nicht ausgewertet.

Die Ausgänge des Zählers gelangen an einen 3 zu 8 Demultiplexer (74LS 138). In diesem Baustein wird ein binäres Muster von 3 Bit je einer Leitung zugeordnet und durchgeschaltet. Das höchstwertige Bit der Eingänge ist fest auf Masse gelegt. Dadurch werden nur 4 Leitungen entsprechend dem Zählerstand durchgeschaltet. Die entsprechenden Ausgänge führen über je einen Transistor (BC 560 C) zu den gemeinsamen Anoden der vier 7-Segmentanzeigen.

Die drei Enable-Eingänge des Demultiplexers werden zur Steuerung der Helligkeit des Displays und zur Anzeige der Alarmzustände genutzt. Die Ausgänge sind nur aktiv, wenn G1 auf HIGH und G2 auf LOW gesetzt sind. G2 setzt sich wiederum aus zwei Eingängen, G2A und G2B, zusammen, die mit einem ODER-Gatter verknüpft sind. G2A wird mit dem pulsbreitenmodulierten 400 Hz-Signal gespeist. Damit läßt sich die Einschaltzeit der Ziffern während eines Multiplexertakts steuern und damit also die Helligkeit. G2B ist mit dem *Display ON/OFF-Schalter* am Panel des Mikrodensitometers verbunden. Mit diesem Schalter können alle Displays zentral ein- oder ausgeschaltet werden. Der Eingang G1 wird von der Alarmschaltung angesteuert und kann die Anzeige zum Blinken bringen, wenn ein unerlaubter Zustand besteht. In der folgenden Tabelle sind alle möglichen Zustände zusammengefaßt. Dabei bedeutet L=LOW, H=HIGH, X=beliebig; der logische Zustand an diesem Eingang beeinflusst das Ergebnis der Verknüpfung nicht.

G2A	G2B	G1	Ziffern
L	L	H	EIN
L	L	L	AUS
L	H	X	AUS
H	L	X	AUS
H	H	X	AUS

B.4.2 Anzeige von unerlaubten Betriebszuständen

Das Konzept der Anzeige läßt es nicht zu, daß Anodenströme der PMT, die größer als $100\ \mu\text{A}$ sind, als Zahl angezeigt werden. (entspricht $D < 0$ oder $T > 1$). Da bei der Justierung der Hochspannung Einstellungen möglich sind, die auch höhere Ströme zulassen, besteht eine Gefahr für die PMT. Ströme, die größer als $150\ \mu\text{A}$ sind, können zu Schäden oder zur Zerstörung der PMT führen. Deshalb muß ein Überschreiten des zulässigen Stroms angezeigt werden können.

Das Überschreiten des Stroms wird auf der DLU erfaßt und über drei Leitungen (J1/2, J1/4, J1/6) an die DU übermittelt. Die Leitung J1/2 zeigt an, wenn $D = 0$ unterschritten wird. Mit der gewählten 12 Bit Darstellung sind keine negativen Zahlen möglich. Da jedoch eine Dekade nur 4000 Digitalisierungsstufen des ADC belegt, sind noch 95 Stufen frei, die $D < 0$ wandeln können. Diese Werte dürfen aber nur intern benutzt werden. (Bei Meßcomputern mit 16 Bit Interface könnten auch negative Zahlen dargestellt werden. Dann könnte diese Leitung als Vorzeichen benutzt werden. Dann müssen jedoch die EPROMs entsprechend umprogrammiert werden.) Für das Setzen dieser Leitung wird das 8. Datenbit des Tabellen-EPROMs mit dem hochwertigen Byte auf der DLU benutzt. Die unteren 12 Bit, die an den Meßcomputer übermittelt werden, sind auf LOW gesetzt. Die Leitung wird auf der DU von einem Latch empfangen. Der Ausgang des Latch führt an einen Schalttransistor (BC 516), der die 7-Segmentanzeige 7-SEG 5 einschaltet, die ein festverdrahtetes E (für Error) anzeigt.

Für die Transmission ist das nicht nötig, da $T > 1$ mit 12 Bit dargestellt werden kann. Die Werte werden auf dem Display angezeigt und an den Meßcomputer übermittelt, auch wenn sie physikalisch unsinnig sind.

Die Leitung J1/4 wird von der DLU gesetzt, wenn der zulässige Strom um mehr als 10% überschritten wird. Diese Werte liegen außerhalb des Wandlungsbereichs des ADCs und können daher auch nicht mehr als Zahl auf dem Display angezeigt werden. Das Display bleibt deshalb auf der höchsten darstellbaren Zahl stehen und beginnt zu blinken. Dazu ertönt im gleichen Takt ein akustisches Warnsignal. Dieser Takt wird aus dem 6 Hz Takt durch Teilung durch 2 (1/2 74 HC 393) gewonnen. Die Teilung macht den Takt symmetrisch. Der Warbzustand bleibt so lange eingeschaltet, bis der Strom wieder im erlaubten Bereich ist.

Die Überschreitung des zulässigen Anodenstroms um mehr als 25% wird durch die dritte Leitung J1/6 signalisiert. Wenn dieser Fall, eintritt wird die Hochspannung abgeschaltet. Die Anzeige blinkt weiter und der Warnton geht in ein Dauerton über. Dieser Zustand kann nur durch ein Reset gelöscht werden, selbst wenn der Strom wieder im erlaubten Bereich ist. Aus zwei NAND-Gattern (1/2 74 LS 00) wird ein RS-Flipflop gebildet, das von dem Alarmsignal gesetzt wird. Das Zurücksetzen kann nur durch die Betätigung eines Drucktasters (Reset) auf der Anzeigeneinheit erfolgen. Wenn das Flipflop auf Alarm gesetzt ist, schaltet es über einen Schalttransistor (BC 550) ein Reedrelais ein, das im Schaltpult des Mikrodensitometers die Hochspannung zurückfährt. Das Relais befindet sich auf dem PI (s. Kapitel B.6. Der inverse Ausgang der RS-Flipflop wird über ein NAND-Gatter (1/4 74 LS 00) mit dem 10%-Alarm verknüpft. Der Ausgang dieses Gatters ist wiederum mit dem 3 Hz-Takt über ein NAND-Gatter (1/4 74 LS 00) verknüpft. Der Takt wird nur durchgeschaltet, wenn eine der beiden Alarmleitungen gesetzt ist. Der Ausgang dieser Verknüpfung steuert über den Eingang G1 des Demultiplexers das Blinken der Anzeige und über einen Schalttransistor (BC 516) den Akustikgeber. Die Basis dieses Transistors ist mit einem Widerstand zusätzlich direkt mit dem inversen Ausgang des Flipflops verbunden. Damit wird der 3 Hz-Takt überfahren und beim 25%-Alarm auf Dauerton umgeschaltet.

B.4.3 Umschaltung verschiedener Betriebszustände

Für den Betrieb des Verstärker/Konverters ist der Zustand von 3 Schaltern im Schaltpult wichtig. Mit einem Schalter wird zwischen Dichte- und Transmissionsmessung umgeschaltet. Ein weiterer Schalter unterscheidet zwischen den Manual- (Einstellmodus) und Automatikmodus (automatischer Meßbetrieb). Mit einem dritten Schalter können alle Anzeigen des Mikrodensitometers dunkelgeschaltet werden. Da alle Schalter sich in einem anderen Stromkreis befinden, muß mit Hilfe von Optokopplern eine galvanische Trennung eingeführt werden, weil es sonst zu Brummschleifen kommen kann. Die Abtastung der Schalter erfolgt über das PI (siehe unten). Die galvanische Trennung erfolgt auf der DU-Platine.

Als Optokoppler wird der HPCL 2630 verwendet. Das ist ein Zweifachoptokoppler, der am Ausgang ein TTL-kompatibles Signal zur Verfügung stellt. Der Optokoppler zur Abschaltung der Anzeige geht direkt an den Eingang G2B des Demultiplexers. Ein weiterer Optokoppler schaltet die Leitung D/T entsprechend der Schalterstellung am Bedienpult um. Der Zustand dieser Leitung wird von der DU, DLU und ALU ausgewertet. Der Zustand des Auto/Man-Schalters ist nur für die DU wichtig. Er wird jedoch in neueren Geräten auf die Verbindungsleitung J1/15 gegeben und kann somit auch von anderen Geräten ausgewertet werden. Hiermit wird der manuelle Konversionstakt ein- oder ausgeschaltet. Es gibt 2 Versionen diesen Takt ein- oder auszuschalten.

Das ursprüngliche Design wird in Schaltbild B.17 gezeigt. Es benutzt ein Relais zur Umschaltung. In diesem Fall wird der Takt über einen Transistor (BC 550) invertiert, so daß HIGH-Impulse von

etwa $20\ \mu\text{s}$ Dauer entstehen. Dieser Takt gelangt zu einem Umschaltkontakt am Relais. Der andere Kontakt liegt permanent auf Masse. Das Relais schaltet zwischen beiden Eingängen um. Der Ausgang wird direkt auf die Leitung zur DLU gegeben. Der Schaltstrom für das Relais wird aus dem Schaltpult gewonnen. Wenn das Relais stromlos ist, ist der Auto-Modus eingeschaltet. Da das Relais sich mit der Zeit mechanisch abnutzt, wurde es nicht auf der Platine festgelötet, sondern befindet sich in einem IC-Sockel und kann leicht ausgetauscht werden.

In der verbesserten Version wird ein Optokoppler (1/2 HPCL 2630) zur Trennung der Stromkreise benutzt. Die Umschaltung erfolgt hier elektronisch mit TTL-Gattern. Die Leuchtdiode des Optokopplers wird vom Schaltpult-Interface angesteuert. Der TTL-Ausgang des Optokopplers ist HIGH, wenn die Leuchtdiode des Optokopplers stromlos ist, also der Auto-Modus eingeschaltet. Der 6 Hz-Takt wird über ein NOR-Gatter (1/4 74HC 02) mit dem Ausgang des Optokopplers verknüpft. Dabei wird der Takt invertiert. Der Ausgang des Gatters wird auf die Leitung zur DLU gegeben. Ein weiteres NOR-Gatter (1/4 74HC 02) invertiert den 6 Hz-Takt und stellt ihn für den internen Gebrauch in der DU zur Verfügung. (Dafür entfällt Transistor T8, R29 und R30.) Der Ausgang des Optokopplers wird ebenfalls invertiert (1/4 74HC 02) und anschließend auf der Verbindungsleitung J1/15 für andere Geräte zur Verfügung gestellt. LOW bedeutet, daß der Auto-Modus eingeschaltet ist, während die Leitung im Manual-Modus HIGH ist.

Bisher wurden einige Geräte mit der verbesserten Umschaltung nachgerüstet. Beim Layout der Platine wurde die neue Version noch nicht berücksichtigt, da seit der Änderung kein neues Gerät gebaut wurde. Der Optokoppler und das Gatter, ein 74HC 02, finden auf einer Zusatzplatine Platz, die anstelle den Relais in die Fassung eingesetzt wird. Auf der Hauptplatine müssen entsprechende Veränderungen gemacht werden, da der Sockel nicht alle notwendigen Anschlüsse zur Verfügung stellt.

B.4.4 Ansteuerung der 7-Segmentanzeige

Als 7-Segmentanzeige wurde eine Version mit der Bezeichnung HP 7610 gewählt. Diese Anzeige besitzt eine gemeinsame Anode. Der Dezimalpunkt kann links von der angezeigten Ziffer gesetzt werden. Das EPROM ist entsprechend der Anordnung der 8 Elemente programmiert. Falls Anzeigen mit einer anderen Pin-Belegung benutzt werden, muß das EPROM entsprechend umprogrammiert werden. Am Ende dieses Kapitels ist das Programm zur Erzeugung der Tabelle abgedruckt. Die Darstellung der Ziffern ist in Hexadezimaldarstellung in dem Data-Statement programmiert. Dabei bedeutet L, daß das entsprechende Segment leuchtet und H, daß das Segment ausgeschaltet ist. Der Dezimalpunkt ist in der Hexadezimaldarstellung immer ausgeschaltet. Er wird bei Bedarf dazugeschaltet. Die Definition der Elemente der 7-Segmentanzeige und die daraus resultierende Programmierung ist in dem folgenden Bild und in der Tabelle dargestellt.


```

WRITE( DISP, '(I6)' ) IDENS
IF (I .LE. 21) WRITE(6,*)'DENS=', DENS,' DISP >', DISP, '<'
DO 110 K = 1, 4
C WRITE(6,*)' DISP(',K,') >',DISP(K:K), '<'
IX = INDEX( ZIFFER, DISP(K:K) )
IF (IX .LE. 0) PAUSE 'ERROR IN PROG'
CREG( K:K ) = SEGMENT( IX )
110 CONTINUE
CALL BCLR( IREG, 15 )
EPROM( I,1 ) = IREG
DENS = DENS + 125
100 CONTINUE
C
C Table of transmission values
C
TRANS = 0.0
DO 200 I = 4096, 1, -1
ITRANS = TRANS + 5
WRITE( DISP, '(I6)' ) ITRANS
X WRITE(6,*)'TRANS=', TRANS,' DISP >', DISP, '<'
IF (ITRANS .LT. 100000) THEN
C Darstellung ist .1234
DO 220 K = 2, 5
C Fuehrende Nullen werden nicht dargestellt.
IX = INDEX( ZIFFER, DISP(K:K) )
IF (IX .LE. 0) PAUSE 'ERROR IN PROG'
CREG( K-1:K-1 ) = SEGMENT( IX )
220 CONTINUE
CALL BCLR( IREG, 7 )
ELSE
C Darstellung ist 1.234
DO 230 K = 1, 4
IX = INDEX( ZIFFER, DISP(K:K) )
IF (IX .LE. 0) PAUSE 'ERROR IN PROG'
CREG( K:K ) = SEGMENT( IX )
230 CONTINUE
CALL BCLR( IREG, 15 )
C setze Dezimalpunkt
END IF
EPROM( I,2 ) = IREG
TRANS = TRANS + 25
200 CONTINUE
C
C Table for test modus (0...4095)
C
DO 300 I = 4096, 1, -1
WRITE( DISP(1:4), '(I4)' ) I - 1
DO 330 K = 1, 4

```

```

        IX = INDEX( ZIFFER, DISP(K:K) )
        IF (IX .LE. 0) PAUSE 'UNDEFIND ASCII'
        CREG( K:K ) = SEGMENT( IX )
330    CONTINUE
        EPROM( I, 3 ) = IREG
        EPROM( I, 4 ) = IREG
300    CONTINUE
C
C    Write files to disk
C
        OPEN (1, FILE='DUEPR.DAT', RECL=80, STATUS='RENEW')
        WRITE(1,'(20A4)') EPROM
C
C
        END

```

B.4.5 Pinbelegung der Steckverbindungen

B.4.5.1 J1

Diese Leitung verbindet die DLU mit der DU und dem DI. Die Leitung darf bis zu 4 m lang sein. Es handelt sich dabei um eine 40-polige Pfostenverbinder/Steckerleisten nach DIN 41 651. Nicht alle Signalleitungen werden von der DU ausgewertet. Alle nicht aufgeführten Anschlüsse mit geraden Zahlen sind zur Abschirmung einseitig mit Masse verbunden. Diese Leitungen dürfen nicht als Rückleitung gebraucht werden.

Pin 1	CMM, Convert Manual Mode	Pin 19	D 7
Pin 2	Overflow Flag	Pin 21	D 6
Pin 3	D/T, Dichte, Transmission	Pin 23	D 5
Pin 4	Alarm 1	Pin 25	D 4
Pin 5	EOC; End Of Conversion	Pin 27	D 3
Pin 6	Alarm 2	Pin 29	D 2
Pin 7	D 11, MSB	Pin 31	D 1
Pin 9	D 10	Pin 33	D 0, LSB
Pin 11	D 9	Pin 35	Exponent 2
Pin 13	D 8	Pin 37	Exponent 1
Pin 15	Man/ $\overline{\text{Auto}}$ (M=H, A=L)	Pin 39	Exponent 0
Pin 17	nc (no connection)		

B.4.5.2 J9

Dieser Stecker verbindet die DU mit dem PI. Es handelt sich dabei um eine 25-polige Sub-D-Steckerverbindung. Es gilt folgende Pinbelegung:

Pin 1	Umschaltung der Dichte/Transmission
Pin 2	Rückleitung zu Pin 1
Pin 3	Umschaltung Display ON/OFF
Pin 4	Rückleitung zu Pin 3
Pin 14	Umschaltung von Auto/Man
Pin 15	Rückleitung von Pin 14
Pin 6 u. 7	+5V Versorgung vom Netzteil des Verstärker/Konverters
Pin 9 u. 10	Masseverbindung zum Netzteil des Verstärker/Konverters
Pin 24	Anschluß für die analoge Anzeige der Hochspannung (+)
Pin 25	Anschluß für die analoge Anzeige der Hochspannung (-)

Alle unbenannten Anschlüsse sind nicht belegt und sind frei verfügbar.

B.4.5.3 J10

Dieser Stecker verbindet die Platine der DU mit den Bedienelementen des Gehäuses der DU. Es handelt sich dabei um eine 9-polige Sub-D-Steckverbindung. Es gilt folgende Pinbelegung:

Pin 1	Verbindung zur analogen Hochspannungsanzeige (-)
Pin 2	Verbindung zur analogen Hochspannungsanzeige (+)
Pin 3, 4, 5	Verbindung zum Helligkeitseinsteller des Displays (Pin 4 = Schleifer)
Pin 6	Verbindung zum akustischen Signalgeber (und LED des Resets)
Pin 7	Masseverbindung zu Pin 6
Pin 8	Verbindung zum Resetschalter
Pin 9	Masseverbindung zum Resetschalter

B.4.5.4 J11

Mit J11 wird die DU mit der Display-Platine verbunden. Es handelt sich dabei um eine 16-polige IC-Seckerverbindung mit Flachbandkabel. Es gilt die folgende Pinbelegung:

Pin 1	nc
Pin 2	nc
Pin 3	Anode E
Pin 4	Kathode E
Pin 5	Anode Ziffer links
Pin 6	Anode Ziffer mitte links
Pin 7	Anode Ziffer mitte rechts
Pin 8	Anode Ziffer rechts
Pin 9	Kathode Segment 8
Pin 10	Kathode Segment 7
Pin 11	Kathode Segment 6
Pin 12	Kathode Segment 5
Pin 13	Kathode Segment 4
Pin 14	Kathode Segment 3
Pin 15	Kathode Segment 2
Pin 16	Kathode Segment 1; Dezimalpunkt

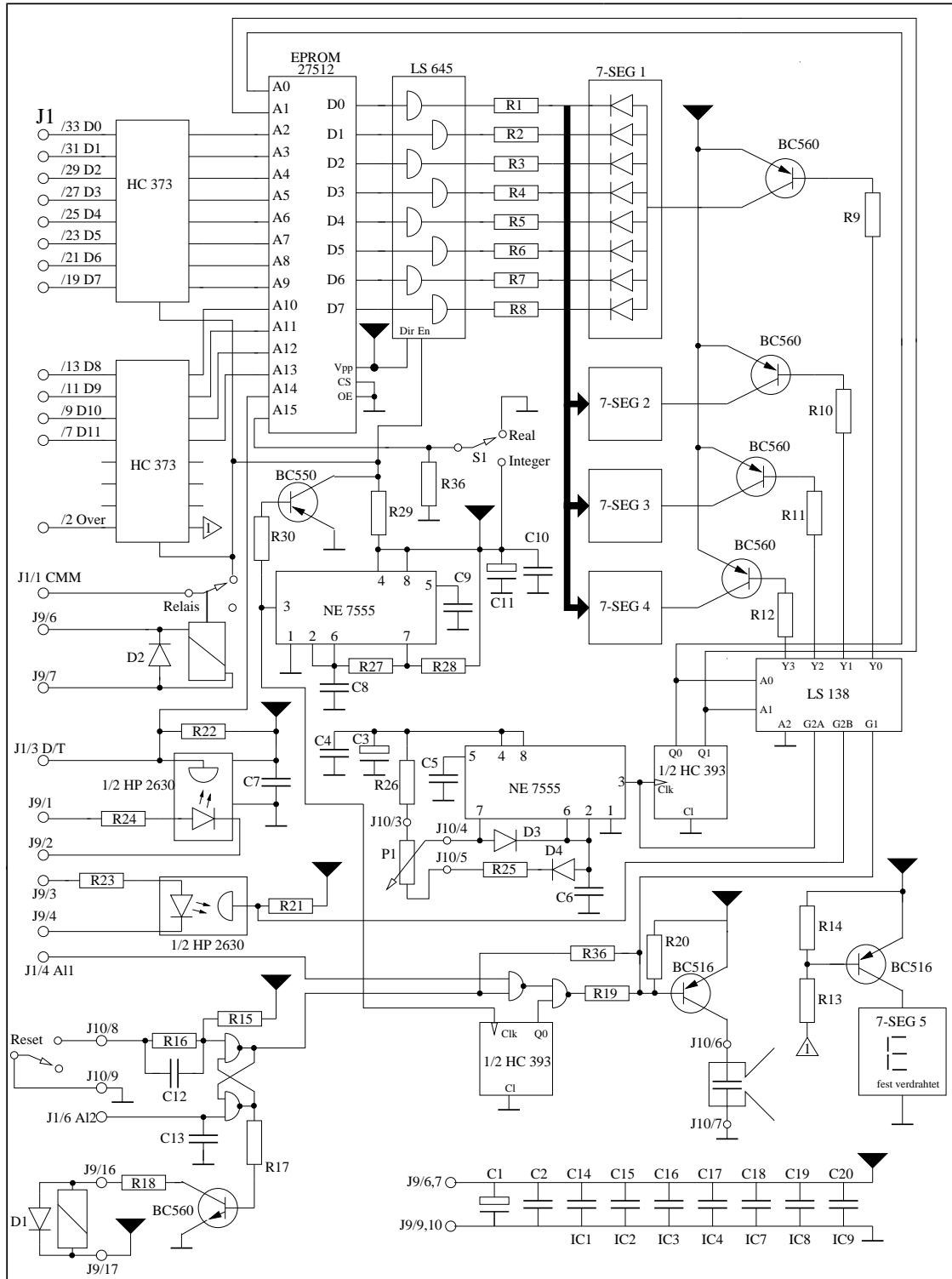


Abbildung B.17: Schaltplan der Display-Unit (DU). Version 1 mit Umschaltung Auto/Man per Relais.

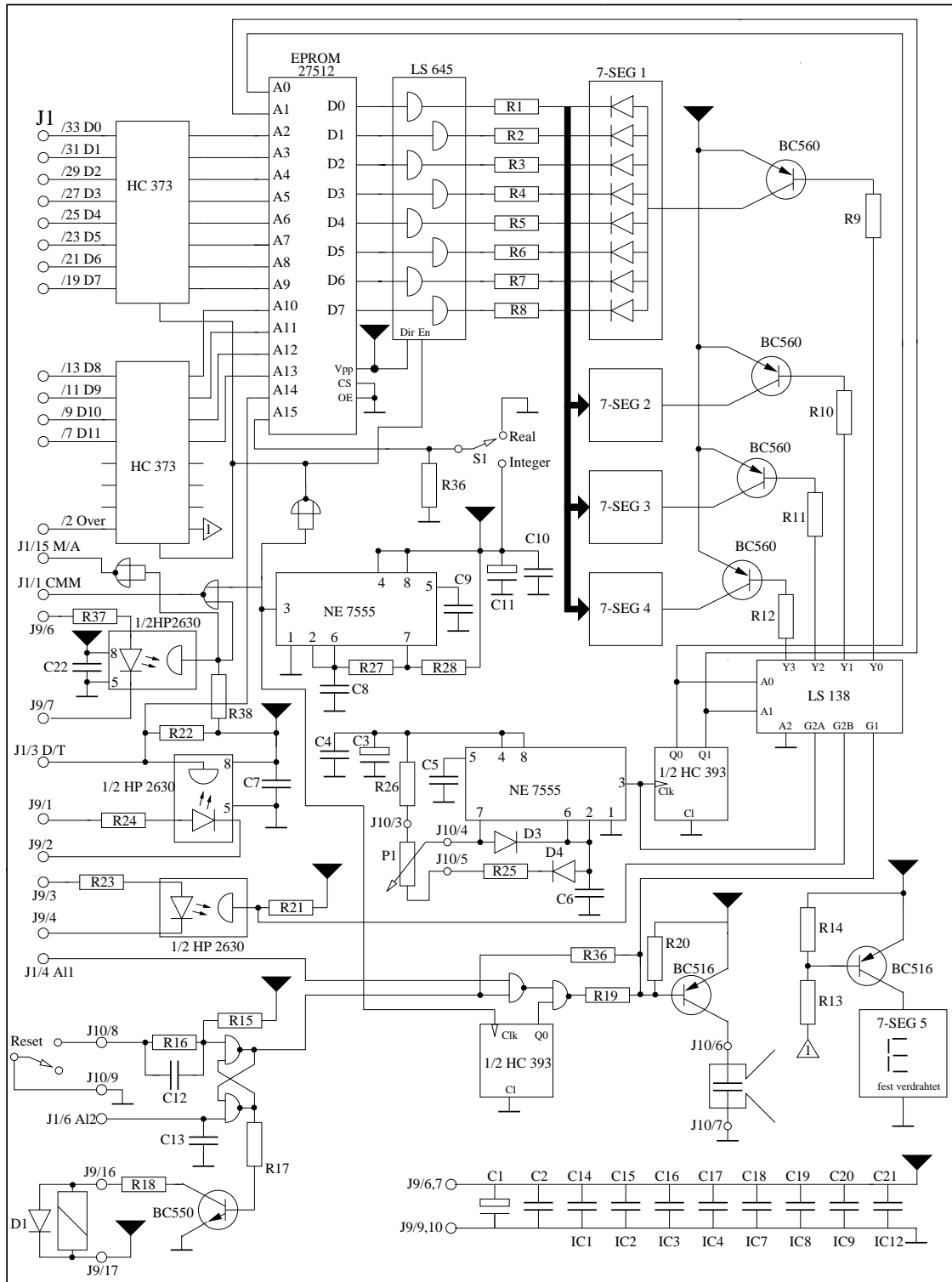


Abbildung B.18: Schaltplan der Display-Unit (DU). Version 2 mit Umschaltung Auto/Man per Optokoppler

Bauteilliste der Display Unit

IC1	HC 373	Eingangs Latches
IC2	HC 373	
IC3	27512	Epromtabelle für Anzeige
IC4	LS 645	Treiber für 7-Segment (Kathode)
IC5	NE 7555	Takt für manuelle Konversion
IC6	NE 7555	Takt für Anzeigenmultiplexer
IC7	HC 393	Zähler Multiplexer/Errorblinken
IC8	LS 138	Multiplexer Anzeige
IC9	HC 00	4 fach NAND
IC10	HP 2630	2-fach Optokoppler (D/T; Display ON/OFF)
IC11	HP 2630	2-fach Optokoppler (Auto/Man); Nur in Version 2!
IC12	HC 02	4-fach NOR; Nur in Version 2!
T1-4	BC 560	Treiber für 7-Segment (Anode)
T5	BC 550	Treiber für HV-Relais
T6	BC 516	Treiber für Overfl. 'E'
T7	BC 516	Treiber für Ak. Signal
T8	BC 550	Inverter für manuelle SOC; nur in Version 1!
D1	1N400n	Schutzdiode Relais; Nur in älteren Geräten vorhanden
D2	1N400n	Schutzdiode Relais; Nur in Version 1!
D3	1N4148	
D4	1N4148	
7-SEG 1-5	HP 7610 o.ä.	7-Segmentanzeige rot

S1	Schalter 1 × UM	Darstellung in Real oder Integer
3	IC-Fas. 20 Pol präz.	
1	IC-Fas. 28 Pol präz.	
3	IC-Fas. 8 Pol präz.	
2	IC-Fas. 14 Pol präz.	
1	IC-Fas. 16 Pol präz.	
1	IC-Fas. 16 Pol einfach	Steckverbinder zum Display
1	Relais	Umschaltung Auto/Man; Nur in Version 1!
1	Relais	Abschaltung der PMT; In neuen Geräten auf dem PI
1	Akkustikgeber	
1	Stiftwanne mit Auswurfhelbel gerade	
1	SUB-D-Stiftleiste f. Platine winkel 25 pol	
1	SUB-D-Buchse f. Platine winkel 9 pol	
1	SUB-D-Stiftleiste f. Kabel 9 pol	
1	SUB-D-Buchse f. Kabel 25 pol	
2	IC-Steckverbinder 16 Pol.	
	16 pol Flachbandkabel	
	9 pol Rundkabel	

R1–8	100 Ω	Kohle	
R9–12	1 k	Kohle	
R13	100 k	Kohle	
R14	100 k	Kohle	
R15	100 k	Kohle	
R16	100 k	Kohle	
R17	10 k	Kohle	
R18	39 Ω	Kohle	
R19	10 k	Kohle	
R20	10 k	Kohle	
R21	1 k	Kohle	
R22	1 k	Kohle	
R23	680 Ω	Kohle	
R24	680 Ω	Kohle	
R25	2.2 k	Kohle	
R26	2.2 k	Kohle	
R27	27 Ω	Kohle	
R28	470 k	Kohle	
R29	1 k	Kohle	Nur in Version 1!
R30	1 k	Kohle	Nur in Version 1!
R31–35	150 Ω	Kohle	befinden sich auf Display-Platine
R36	10 k	Kohle	
R37	680 Ω	Kohle	Strombegrenzung für LED von Opto; Nur Version 2!
R38	1 k	Kohle	Kollektorwiderstand IC11; Nur Version 2!
P1	47 k	Kohle	reguliert Helligkeit der Anzeige
C1	470 μ	Elko	Power 5V
C2	0.1 μ	Viel.	
C3	10 μ	Elko	V+ IC 6
C4	0.1 μ	Viel.	V+ IC 6
C5	0.1 μ	Viel.	
C6	47 n	MKC	Zeitkonstante IC 6
C7	0.1 μ	Viel.	V+ Optokoppler IC 10
C8	0.68 μ	MKC	Zeitkonstante IC 5
C9	0.1 μ	Viel.	
C10	0.1 μ	Viel	V+ IC 5
C11	10 μ	Elko	V+ IC 5
C12	0.1 μ	Viel	
C13	0.1 μ	Viel	
C14–C20	0.1 μ	Viel	Block-Kondensator, jeweils im IC-Sockel eingebaut
C21	0.1 μ	Viel	Block für IC12; Nur in Version 2!
C22	0.1 μ	Viel	Block für IC11; Nur in Version 2!

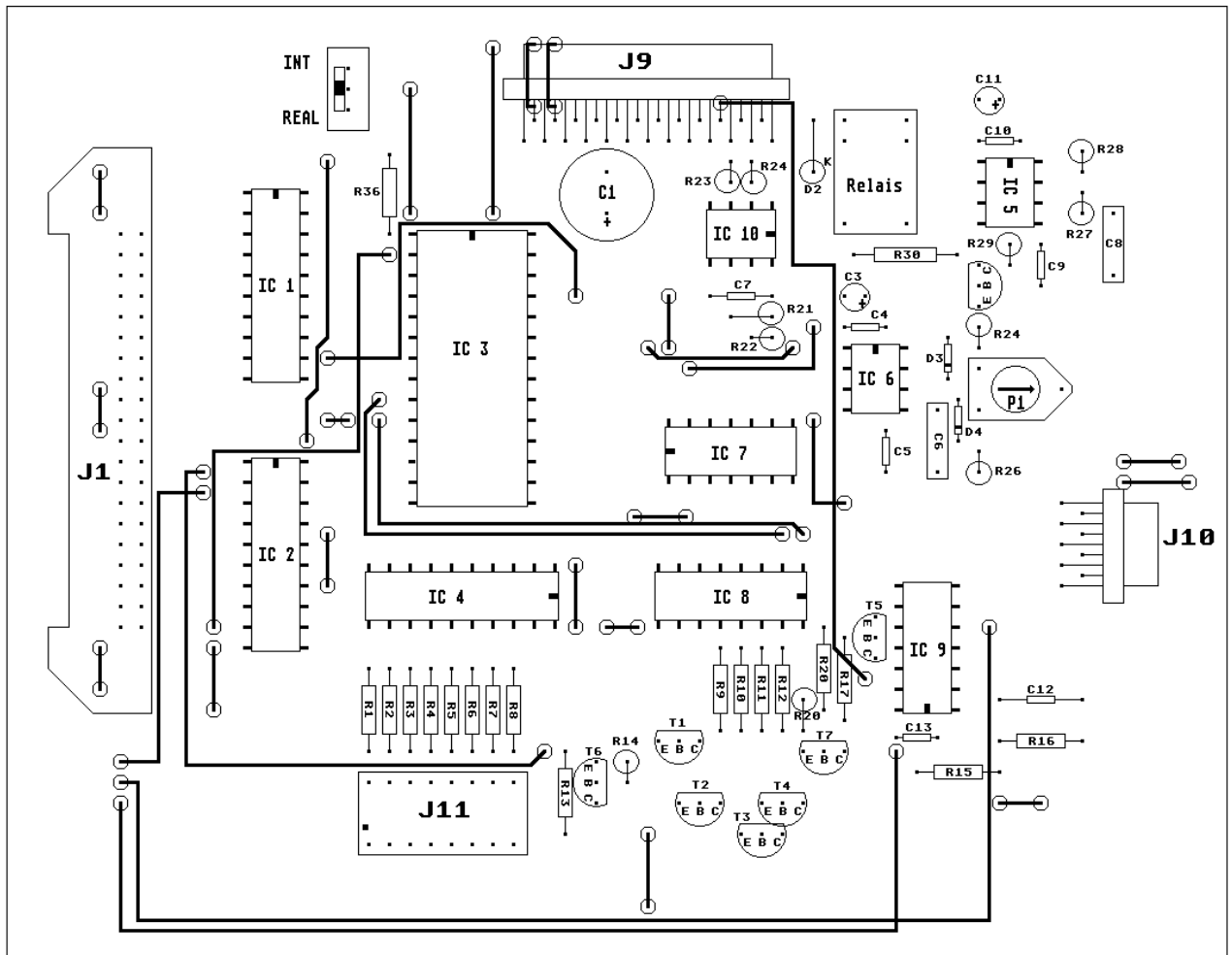


Abbildung B.19: Bestückungsplan der DU

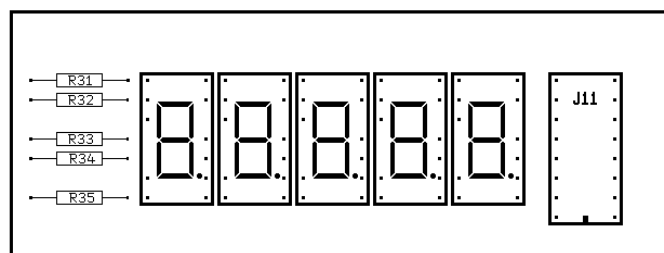


Abbildung B.20: Bestückungsplan der Display-Platine

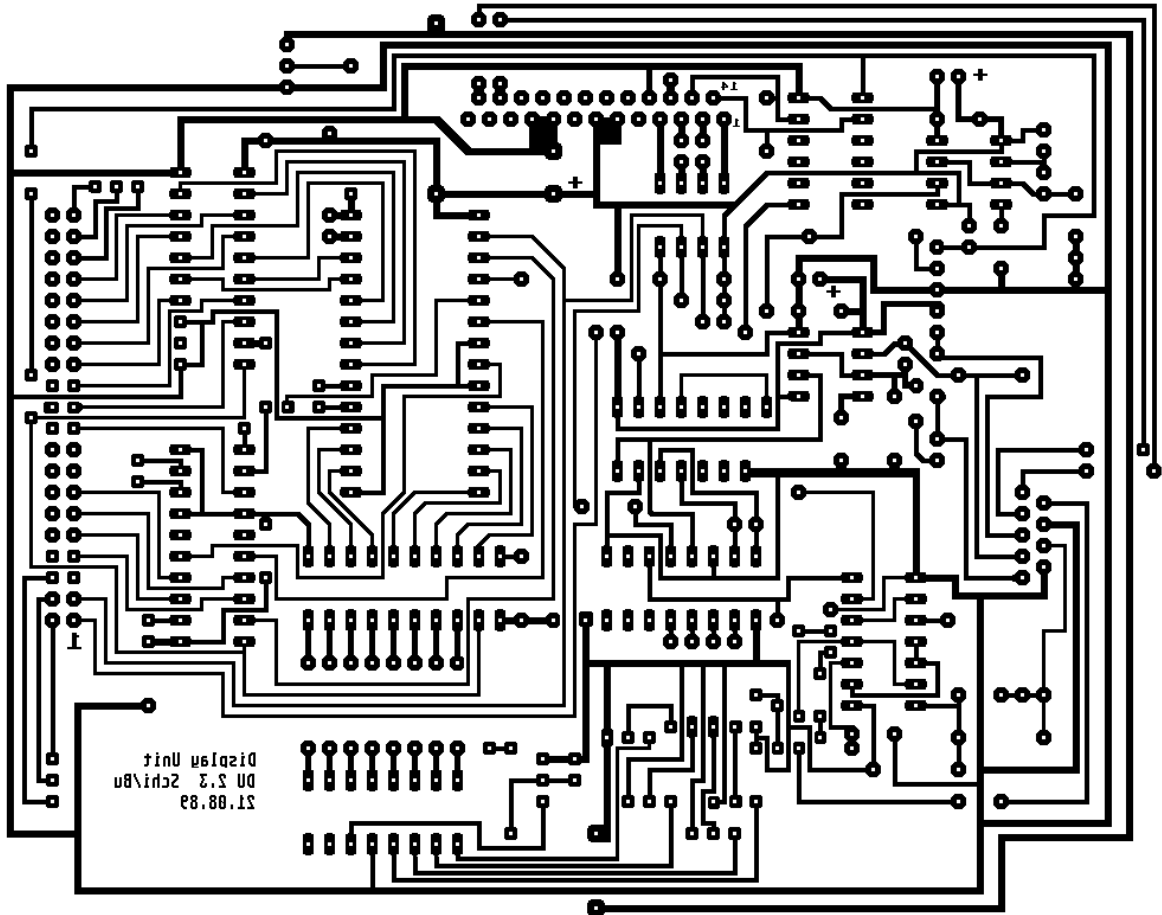


Abbildung B.21: Layout der DU, Lötseite

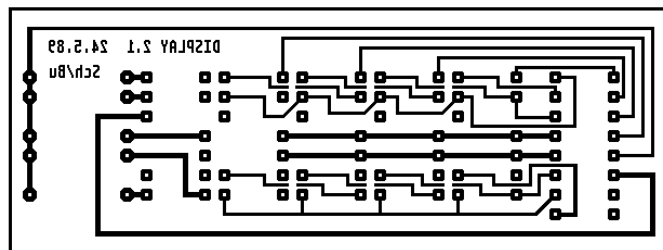


Abbildung B.22: Layout der Siebensegmentanzeige

B.5 Das Daten Interface DI 2.3

Das DI hat die Aufgabe, die Daten vom Konverter entgegenzunehmen und an den Scan-Computer weiterzuleiten.

Zur Vermeidung von Erdschleifen sind die Stromkreise zwischen dem Konverter und dem Computer getrennt. Die einzige Verbindung zur Masse der PDS erfolgt über den Photomultiplier. Die digitalen Signale und die Steuerleitungen sind alle optisch gekoppelt.

Die Kommunikation des DI ist so einfach wie möglich gehalten worden. Das DI kann in den meisten Fällen anstelle eines 12 Bit ADCs angeschlossen werden. Das Start-Of-Conversion-Signal löst die Konversion aus. Das End-Of-Conversion-Signal zeigt an, wann gültige Daten vorliegen. Alle 12 Datenbits werden parallel übertragen. Eine Konversion dauert ca. 16 μ s.

Das DI kann direkt in den Sockel des ADCs einer PDS mit Mikroprozessorsteuerung eingesteckt werden oder aber über ein Flachbandkabel mit einem Computer verbunden werden.

Die Länge der Verbindung zwischen dem Konverter und dem DI sollte ca. 5 m nicht überschreiten. Für wesentlich längere Verbindungen muß eine andere Lösung gesucht werden (z.B. differenzielle Leitung).

B.5.1 Funktion des Daten Interface

Der Schaltplan des DI2.3 ist am Ende dieses Kapitels Beschreibung angefügt. Dort ist auch der Layoutplan des DI2.3 abgedruckt.

Das DI empfängt die 12 Datenleitungen und das EOC-Signal mit den Transceivern IC1 und IC2 (74HC245). Dadurch bekommt man einen sauberen Leitungsabschluß. Mit Bausteinen aus anderen TTL-Familien kann keine Funktionssicherheit garantiert werden. Ebenso sind die Leuchtdioden der Optokoppler ungeeignet, da sie einen nicht linearen Abschluß bilden. Wenn die Datenbits invertiert werden sollen, können auch invertierende Transceiver (74HC640) eingesetzt werden. Dann muß jedoch das SOC-Signal nochmals invertiert werden.

Die Ausgänge der Treiber steuern die Eingänge der Optokoppler an. Die Widerstände R1 bis R14 begrenzen den Diodenstrom auf 5 mA. Als Optokoppler werden HCPL2630 von Hewlett Packard verwendet. Die Optokoppler haben eine maximale Datenübertragungsrate von 10 MBit pro Sekunde. Die Geschwindigkeit ist für das SOC-Signal von großer Wichtigkeit. Je zwei Optokoppler befinden sich in einem Gehäuse. Die Ausgänge der Optokoppler sind TTL kompatibel und haben offene Kollektoren. R15 bis R28 bilden die Kollektorwiderstände. Alle Optokoppler sind jeweils über einen 0.1 μ F Vielschichtkondensator (C6 bis C12) in der Nähe der Gehäuse abgeblockt. Die Ausgänge der Datensignale gehen direkt zum PDS-Stecker und zum Rechneranschluß. Jeder Optokoppler gilt logisch gesehen als ein nicht invertierender Treiber.

Das SOC-Signal kann sowohl vom PDS-Stecker als auch vom Rechneranschluß her eingespeist werden. Beide Signalwege werden über ein NAND-Gatter (1/4 74HC00) zusammengeführt. Von der PDS wird eine Konversion getriggert, wenn SOC von LOW auf HIGH springt. Beim ROM-Port von Atari Computern, die bei der Entwicklung eingesetzt wurden, ist die benutzte Leitung (ROM-Select 3) aktiv LOW. Es braucht deshalb nicht invertiert zu werden.

Das SOC-Signal wird vom Ausgang des Optokopplers noch auf einen Leitungstreiber von IC2 (1/8 74HC245) gegeben. Der Ausgang eines HC-Bausteins kann eine lange Koaxleitung sauberer betreiben, als es der direkte Ausgang eines Optokoppler kann. Der Ausgang des Leitungstreibers wird auf eine BNC-Buchse geführt. Die Verbindung zum Konverter erfolgt über ein BNC-Kabel. Dadurch wird Übersprechen zwischen den Datenleitungen und dem SOC vermieden.

B.5.2 Mechanischer Aufbau

Das DI ist in erster Linie so konstruiert, daß es direkt gegen den ADC einer PDS mit Mikroprozessorsteuerung ausgetauscht werden kann. Die Steckkontakte sind kompatibel zum Anschlußschema des ADC-HZ 12 BGC und des ADC 85.

Die Lage der Anschlüsse geht aus dem Bestückungsplan hervor. Die Platine hat eine Größe von 150 mm × 100 mm × 30 mm.

B.5.2.1 Verbindung zwischen DLU, DU und DI; J 1

Diese Leitung verbindet die DLU mit der DU und dem DI. Die Leitung darf bis zu 4 m lang sein. Es handelt sich dabei um 40-polige Pfostenverbinder/Steckerleisten nach DIN 41 651. Alle nicht aufgeführten Anschlüsse mit geraden Zahlen sind zur Abschirmung einseitig mit Masse verbunden. Diese Leitungen dürfen nicht als Rückleitung gebraucht werden.

Pin 1	CMM, Convert Manual Mode	Pin 19	D 7
Pin 2	Overflow Flag	Pin 21	D 6
Pin 3	D/T, Dichte, Transmission	Pin 23	D 5
Pin 4	Alarm 1	Pin 25	D 4
Pin 5	EOC; End Of Conversion	Pin 27	D 3
Pin 6	Alarm 2	Pin 29	D 2
Pin 7	D 11, MSB	Pin 31	D 1
Pin 9	D 10	Pin 33	D 0, LSB
Pin 11	D 9	Pin 35	Exponent 2
Pin 13	D 8	Pin 37	Exponent 1
Pin 15	Man/Auto (M=H, A=L)	Pin 39	Exponent 0
Pin 17	nc		

B.5.3 Der PDS-Anschluß; J 12

Der PDS-Anschluß ist mechanisch und elektronisch kompatibel zu den ADCs ADC-HZ 12 BGC und ADC 85, die von Perkin Elmer auf dem ADC-Board eingesetzt werden. Es gilt folgende Anschlußbelegung:

Pin 1	D0	LSB	Pin 9	D8	
Pin 2	D1		Pin 10	D9	
Pin 3	D2		Pin 11	D10	
Pin 4	D3		Pin 12	D11	MSB
Pin 5	D4		Pin 15	dig. Masse	
Pin 6	D5		Pin 16	dig. +5V	
Pin 7	D6		Pin 20	EOC	
Pin 8	D7		Pin 21	SOC	

Alle Anschlüsse, die hier nicht aufgeführt sind, haben keine Verbindung. Im Datenblatt des ADC 85 werden die Datenleitungen umgekehrt gezählt. D11 ist also das LSB und D0 ist das MSB.

B.5.4 Der Rechneranschluß; J 13

Dabei handelt es sich um den speziellen Anschluß zum ROM-Port-Buffer (Meyer 1987) für einen Atari Computer. Der ROM-Port-Buffer ist eine kleine Platine mit Treiberbausteinen, die in den Atari-Rom-Port eingesteckt wird. Als Entwicklungsrechner dient ein Atari ST. Die Anschlußbelegung ist so ausgeführt, das ein Flachbandkabel direkt in einen ROM-Port-Buffer paßt. Dieser Anschluß ist nur zu Test- und Justierzwecke angelegt worden. Da die Verbindung in der Praxis sehr störanfällig ist, kann sie nicht für den normalen Meßbetrieb benutzt werden.

Die Verknüpfung der SOC-Signale vom PDS-Anschluß und vom Rechneranschluß erfolgt über die NAND-Gatter. Die Konversion wird über die ROM-Select-3 Leitung gestartet. Diese Leitung springt von HIGH nach LOW, wenn eine Adresse aus dem Bereich FB0000 bis FBFFFF angesprochen wird. Es gilt folgende Anschlußbelegung für die Verbindung:

Pin 1, 2	+5V	Stromversorgung Atari
Pin 3	EOC	D15 auf ROM-Port
Pin 7	D11	MSB
Pin 8	D10	
Pin 9	D9	
Pin 10	D8	
Pin 11	D7	
Pin 12	D6	
Pin 13	D5	
Pin 14	D4	
Pin 15	D3	
Pin 16	D2	
Pin 17	D1	
Pin 18	D0	LSB
Pin 32	SOC	ROM-Select 3 beim ROM-Port
Pin 39, 40	GND	

Alle anderen Pins müssen unbeschaltet bleiben oder aber nach dem Anschlußplan des ROM-Port-Buffer beschaltet werden. Es ist zu beachten, daß bei der Numerierung der Anschlüsse beim Atari-ROM-Port und beim ROM-Port-Buffer die geraden und die ungeraden Zahlen vertauscht wurden. Die hier benutzte Pinbelegung entspricht dem Stecker auf dem ROM-Port-Buffer.

B.5.5 Stromversorgung; J 14 und J 15

Das DI hat zwei getrennte Stromkreise, die Konverter-Seite und die PDS-Seite.

Die Konverter-Seite wird mit 5V aus dem Netzteil des Konverters versorgt. Der Anschluß erfolgt über eine Cynch-Buchse (vergoldet!). Das Anschlußschema des Steckers geht aus Abbildung B.23 hervor.

Die Stromversorgung der Rechnerseite (= PDS-Seite) kann entweder direkt über den IC-Stecker zum PDS-Board, über eine 3.5 mm Klinkbuchse, oder über den ROM-Port-Anschluß erfolgen. Das Anschlußschema der Klinkbuchse geht aus Abbildung B.24 hervor.

Es ist darauf zu achten, daß nur eine von drei möglichen Stromversorgungen angeschlossen ist. Falls das DI im PDS-Board eingesteckt ist und gleichzeitig der ROM-Port angeschlossen ist, muß die Stromversorgung vom Atari aus an der Lötbrücke B1 (zwei Lötstifte) unterbrochen werden.

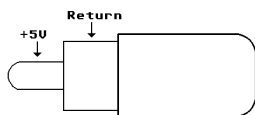


Abbildung B.23: Anschlußschema des Cynch-Steckers, J 14.

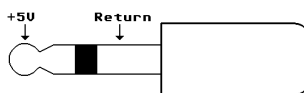


Abbildung B.24: Anschlußplan des Klink-Steckers, J 15.

B.5.6 Vorherige Daten-Interfaces

Alle Typen von Daten-Interfaces sind in der Grundfunktion gleich und genügen voll und ganz für die Geräte, auf denen sie eingesetzt werden. Bei den neueren Versionen wurde lediglich der Funktionsbereich erweitert.

B.5.6.1 DI 2.1

Diese Version besitzt keinen Anschluß zum ROM-Port des Ataris. Dem entsprechend entfällt auch IC11 und J 13. Die Grundfunktion und die Schaltung sind jedoch ansonsten mit der Version 2.4 identisch.

DI 2.3 10.08.96
Renate Budell (AIM)

Converter-Kreis +5V-C +5V-P PDS-/Computer-Kreis

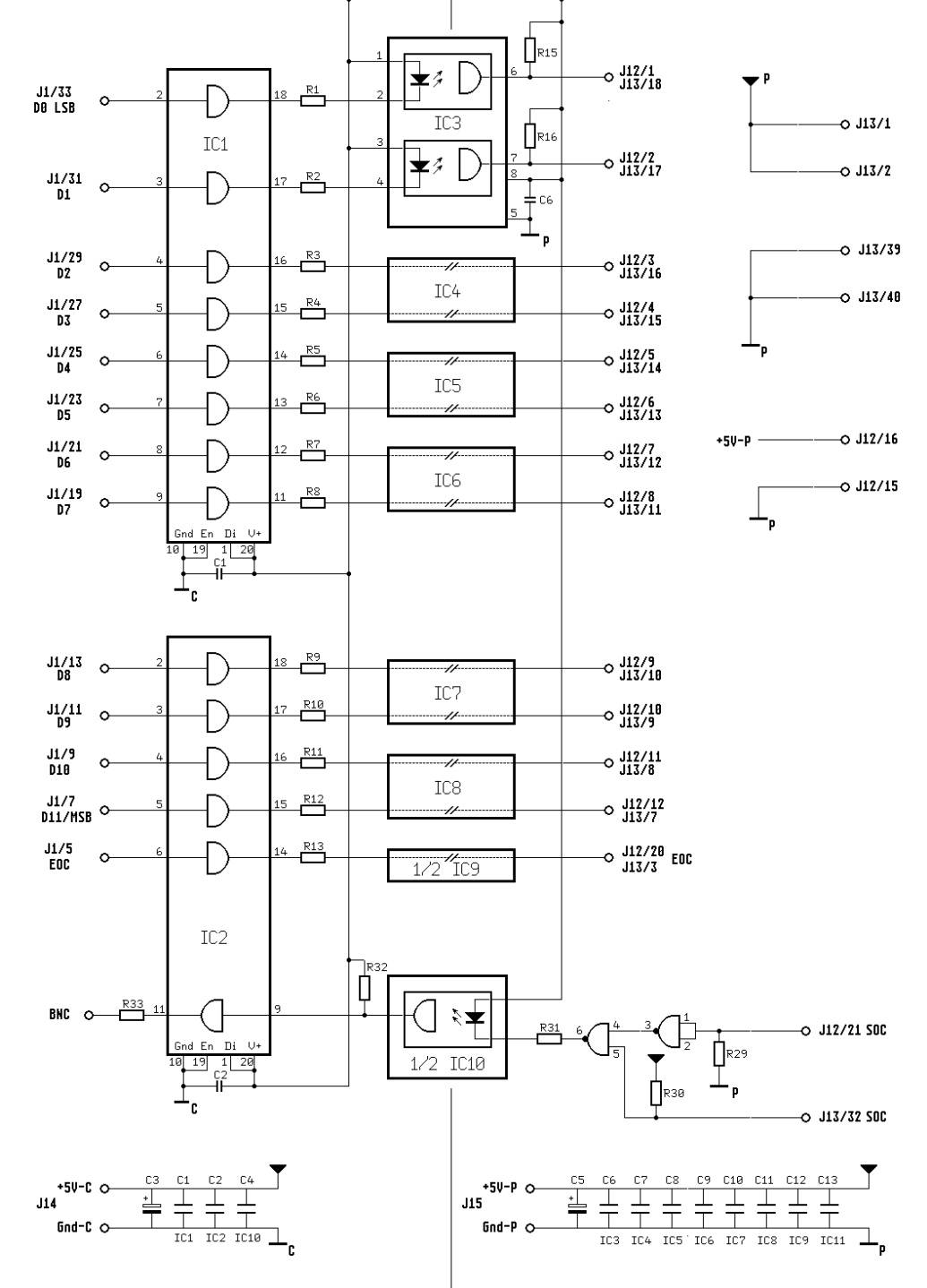


Abbildung B.25: Schaltplan des DI

Bauteilliste des Daten-Interface (DI)

IC1, IC2	74 HC 245	8-fach Leitungstreiber
IC3-IC10	HCPL2630	Optokoppler 10 MHz
IC11	74 HC 00	

R1-R14	680 Ω	Kohle	
R15-R28	1 k	Kohle	
R29	10 k	Kohle	
R30	10 k	Kohle	
R31	680 Ω	Kohle	
R32	1 k	Kohle	
R33	33 Ω	Kohle	
C1, C2	0.1 μ	Vielschicht	Blockkond. für IC1, IC2
C3	100 μ	Elko	Blockkond. $V+_{Amp}$
C4	0.1 μ	Vielschicht	für IC10
C5	100 μ	Elko	Blockkond. $V+_{PDS}$
C6-C13	0.1 μ	Vielschicht	Blockkond. für IC3-IC10
C14	0.1 μ	Vielschicht	für IC11

1	BNC-Buchse	Convert PDS -> Amp
1	BNC-Winkelstecker	
2	40-Pol Stiftwanne (gerade)	Anschluß vom Konverter und zum Atari-Rom-Port
2	IC-Fassungen 20-pol präz. mit Kond.	
1	IC-Fassung 16-pol präz. mit Kond.	
8	IC-Fassung 8-pol präz. ohne Kond.	
2	Doppelkegelstiftleisten 16-pol präz. gold	Verbindung von DI mit IC- Fassung des ADCs
1	Cynch-Buchse gold	Anschluß der Versorgung auf
1	Cynch-Stecker gold	der Verstärkerseite

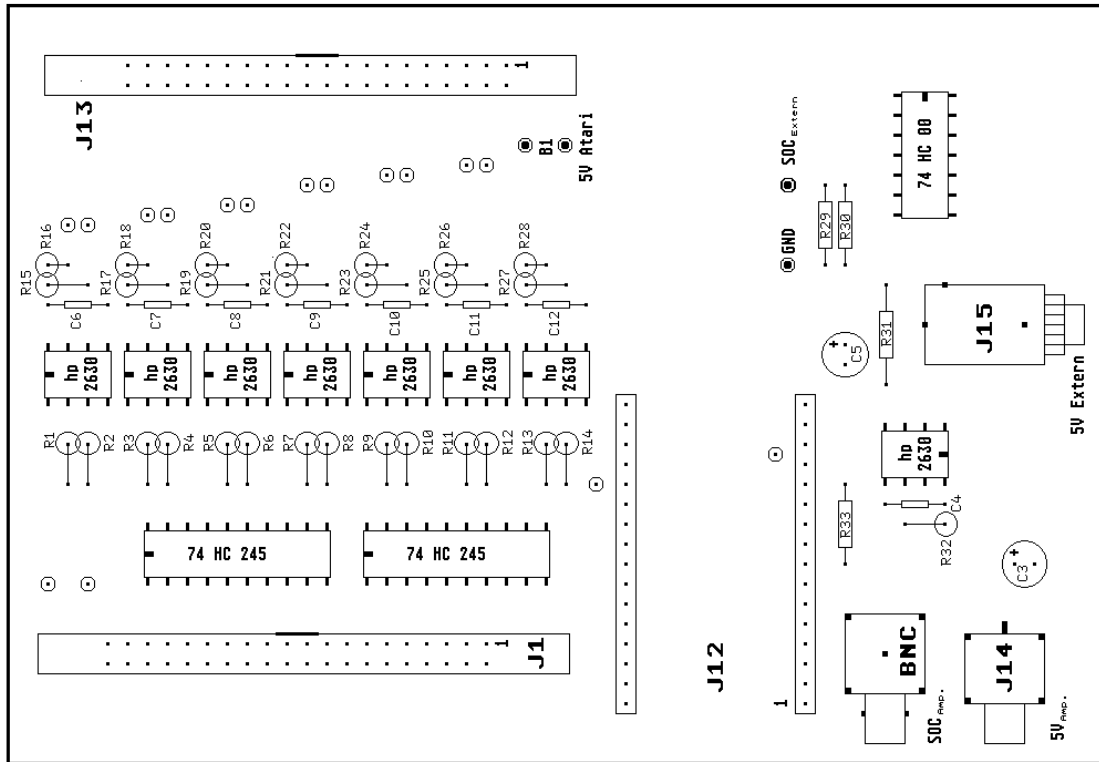


Abbildung B.26: Bestückungsplan des DI

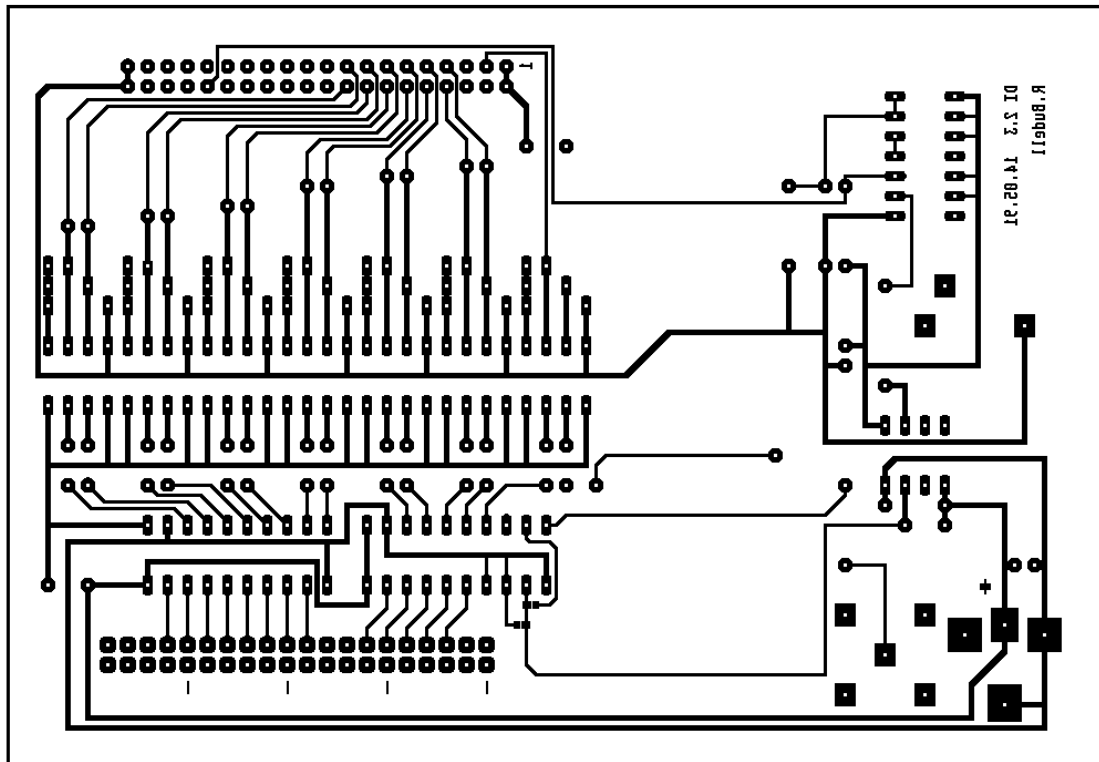


Abbildung B.27: Layout des DI, Lötseite

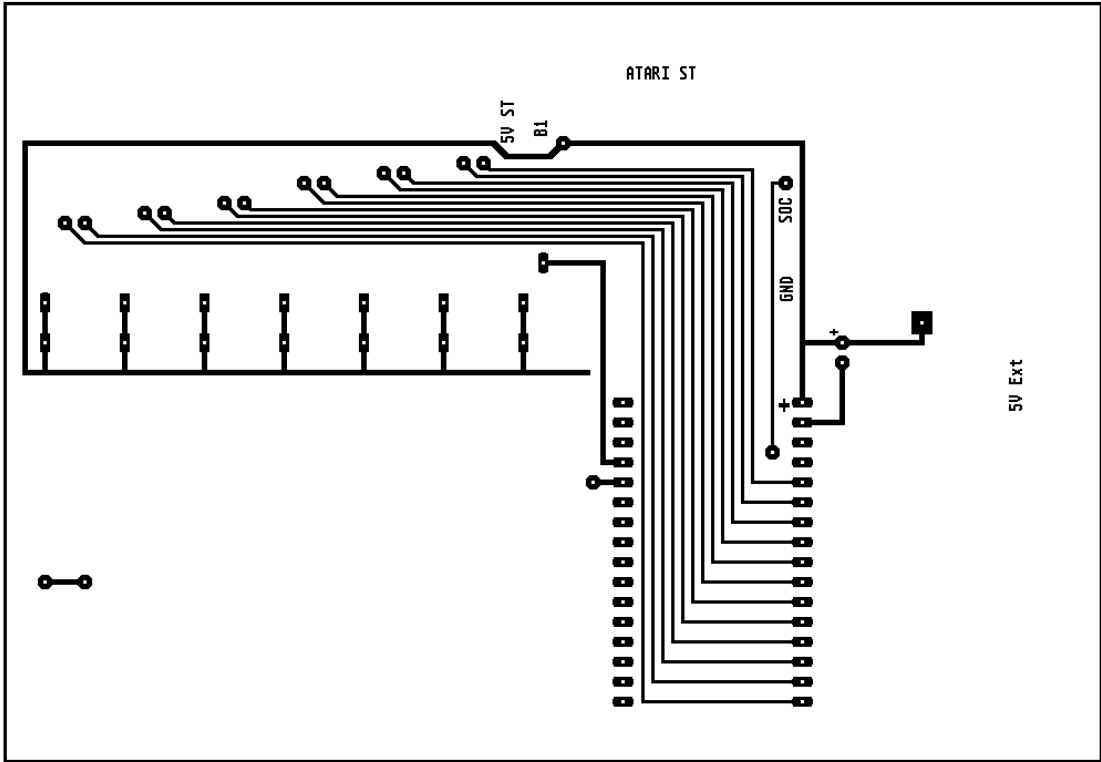


Abbildung B.28: Layout der DI, Bestückungsseite

B.6 Das Schaltpult–Interface (Panel Interface; PI)

B.6.1 Beschreibung

Das PI ist eine Zusatzplatine, die im Schaltpult des Mikrodensitometers eingebaut wird und die Zustände von den Schaltern erfaßt, die für den Betrieb des MD 3.2 Verstärker/Konverters notwendig sind. Darüber hinaus ermöglicht das PI den Schutz des Photomultipliers gegen gefährlichen Überstrom und optional die Anzeige der eingestellten Hochspannung. Eine ebenfalls optionale Schaltung zeigt den Anschlag des Potentiometers für die Hochspannungseinstellung (PMT) bei 0.00 an. Diese Schaltung ist sinnvoll, wenn gefühllose Kraftprotze die PDS bedienen.

B.6.2 Funktion

Die Schalterstellungen werden hochohmig abgegriffen und über Schalttransistoren verstärkt. Das garantiert einerseits eine weitgehende Unabhängigkeit von der Lampenspannung, die regelbar ist, und schließt andererseits eine Belastung und Störung der PDS–Elektronik aus. Das PI wird aus dem Netzteil im PDS–Schaltpult versorgt. Die Trennung dieses Stromkreis gegen den den Kreis des Verstärker/Konverters erfolgt vorwiegend in der Display–Unit (DU 2.4).

B.6.3 Aufbau

Die Platine hat die Größe einer halben Europaplatine (80 mm×100 mm). Ein 25 poliger Sub–D–Stecker stellt die Verbindung zum Display her. Über die 25 polige Sub–D–Buchse werden die Verbindungen zu den Schaltern und dem Netzteil im Panel hergestellt. Die Platine kann irgendwo im Schaltpult eingebaut werden.

B.6.4 Überwachung der Hochspannung

Auf dem PI befindet sich das Reed–Relais, das die Hochspannung im Falle eines Überstroms des Photomultipliers abschaltet. Dabei wird mit Hilfe des Relais das Potentiometer für die Hochspannungseinstellung überbrückt. Das Relais ist so angeschlossen, das im stromlosen Fall die Kontakte geöffnet sind. Die Anzeige der Überlastzustände ist in der Bedienungsanleitung A.3 beschrieben. Mit Hilfe eines Amperimeters mit 100 μ A Vollausschlag kann die aktuell eingestellte Hochspannung abgelesen werden. Es sind die Leitungen so vorgesehen, daß das Amperimeter im Gehäuse der DU eingebaut werden kann.

Beim AIM haben wir die Erfahrung gemacht, daß es Menschen gibt, die einen Anschlag des Potentiometer für die Hochspannung nicht erfüllen können und es deshalb überdrehen und zerstören. Zum Schutz dieses (teuren) Potentiometers ist auf dem PI eine Schaltung vorgesehen, die kurz vor dem Erreichen des Nullanschlages eine Leuchtdiode einschalten. Diese Schaltung ist optional.

B.6.5 Anschluß an die Schalter im Schaltpult

Für den Betrieb des Verstärker/Konverters und des Displays müssen die Zustände der Schalter “Auto/Man“, “Display ON/OFF“ und “Dens/Trans“ abgetastet werden. Eine weitere Verbindung zum Schaltpult schaltet die Hochspannung im Störfall aus.

Alle Änderungen sind so geplant, daß bei nicht angeschlossenem MD 3.2 die Messung im alten PE-Mode erfolgen kann. Bei den Anschlüssen wurde viel Wert darauf gelegt, daß die Stromkreise des Mikrodensitometers und des Displays völlig getrennt sind. Die Verbindung erfolgt über Optokoppler und Relais.

Alle folgenden Bezeichnungen von Bauteilen beziehen sich auf die Schaltpläne 170E003 und 170E135 des PDS-Mikrodensitometers.

Display ON/OFF Die Information über den Zustand der Beleuchtung des Schaltpults wird an der Lampe des Schalters S6 (Auto/Man) abgenommen. Der gemeinsame Anschluß S6/7 ist entweder AN (1–9V) oder AUS(<0.6V).

Auto/Man Die Umschaltung erfolgt durch die Lampenspannung der Man-Lampe S6/2. Bei S6 ist ein Anschluß für PDS-Masse vorhanden.

Dens/Trans Der Abgriff erfolgt an einer Stelle von S17, die im PE-System die elektronische Umschaltung ausführt. Die Anschlüsse dazu sind in jedem System etwas anders belegt und stimmen zum Teil nicht mit der vorhandenen Dokumentation von Perkin Elmer überein. Es muß also gesucht werden. Der Schaltzustand wird über einen Widerstand (100 k Ω) abgegriffen und mit einem Transistor verstärkt.

B.6.6 Pinbelegung der Steckverbindungen

B.6.6.1 J9

Dieser Stecker verbindet das PI mit der DU. Es handelt sich dabei um eine 25-polige Sub-D-Steckerverbindung. Es gilt folgende Pinbelegung:

Pin 1	Umschaltung der Dichte/Transmission
Pin 2	Rückleitung zu Pin 1
Pin 3	Umschaltung Display ON/OFF
Pin 4	Rückleitung zu Pin 3
Pin 14	Umschaltung von Auto/Man
Pin 15	Rückleitung von Pin 14
Pin 6 u. 7	+5V Versorgung vom Netzteil des Verstärker/Konverters
Pin 9 u. 10	Masseverbindung zum Netzteil des Verstärker/Konverters
Pin 24	Anschluß für die analoge Anzeige der Hochspannung (+)
Pin 25	Anschluß für die analoge Anzeige der Hochspannung (-)

Alle unbenannten Anschlüsse sind nicht belegt und sind frei verfügbar.

B.6.6.2 J16

Mit diesem Stecker wird die Verbindung zwischen dem Schaltpult des Mikrodensitometers und PI hergestellt. Es handelt sich dabei um eine 25-polige Sub-D-Steckerverbindung. Es gilt folgende Pinbelegung:

Pin 1	HV-Poti, Anschluß cw
Pin 2	HV-Poti, Anschluß ccw
Pin 3	Schalter Auto/Man, Lampe für Auto
Pin 4	nc
Pin 5	Illum ON/OFF
Pin 6	LED-HV-Poti, Anode
PIN 7	LED-HV-Poti, Kathode
Pin 8	nc
Pin 9	Ground PDS
Pin 10	-15 V Versorgung, PDS
Pin 11	+15 V versorgung, PDS
Pin 12	Spannungsmonitor der HV-Versorgung
Pin 13	Spannungsmonitor der HV-Versorgung

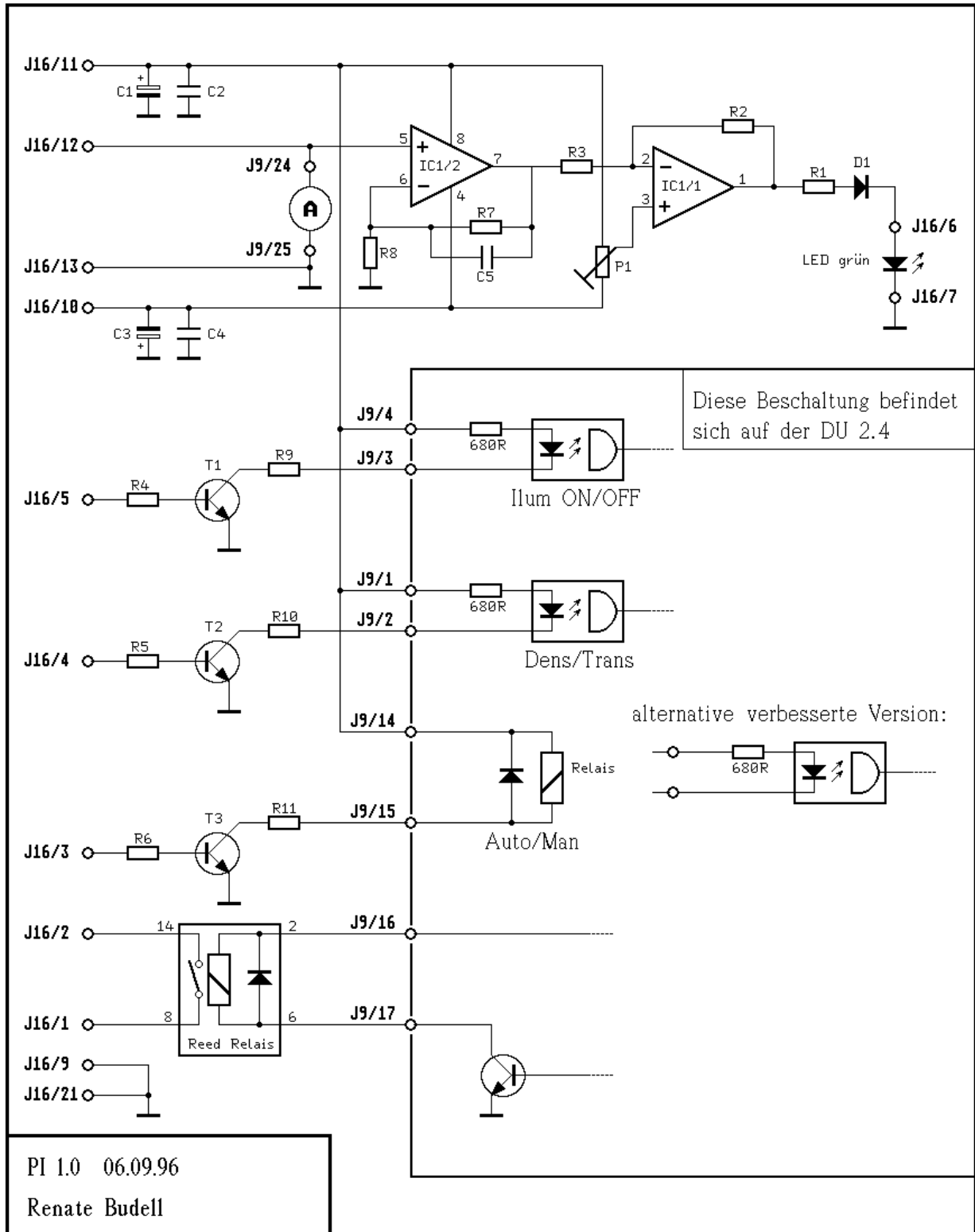


Abbildung B.29: Schaltplan des PI

Schaltpult-Interface (PI1.0), Bauteilliste

C1, C3	100 μ F	Elko	
C2, C4	0.1 μ F	Vielschicht	
C5	1.0 μ F	FKC o.ä.	
R1, R3, R8	1 k	Kohle	
R2	1 M	Kohle	
R4, R6	22 k	Kohle	
R5, R7	100 k	Kohle	
R9, R10	2.2 k	Kohle	
R11	220 Ω	Kohle 1 W	bei der Auto/Man-Umschaltung mit Relais
	2.2 k	Kohle	bei der Auto/Man-Umschaltung mit Optokoppler
P1	10 k	Cermet 10-Gang	
0	0 Ω		Null-Ohm-Widerstand (Drahtbrücke)
T1, T2, T3	BC 549 B, C		
IC1	TL 083		
D1	1N4148		
LED	grün		
Rel	Hamelin HE 721A 0510	Reed Relais mit eingebauter Diode	
J9	Sub-D-Stecker	25-pol	
J16	Sub-D-Buchse	25-pol	

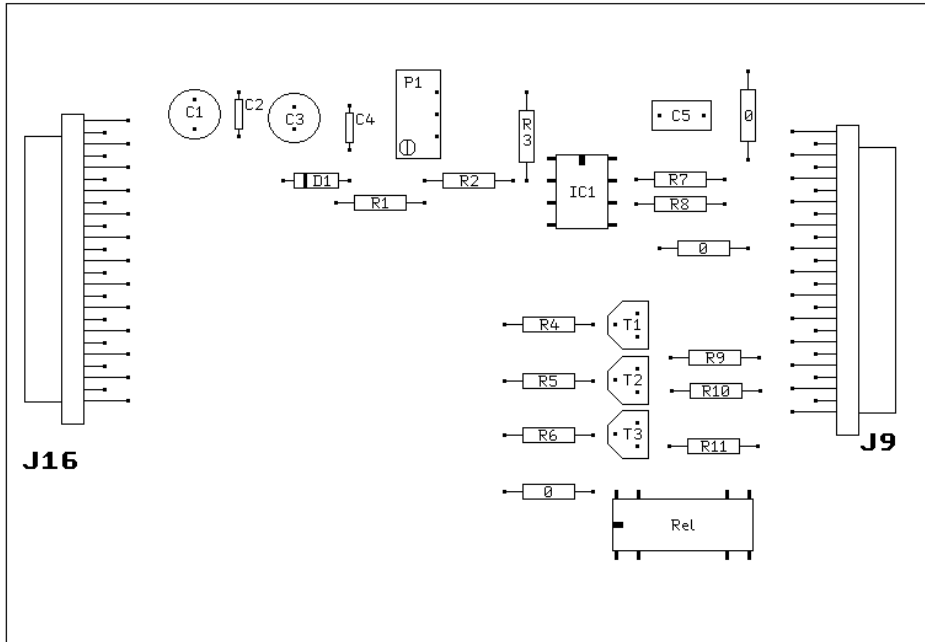


Abbildung B.30: Bestückungsplan des PI

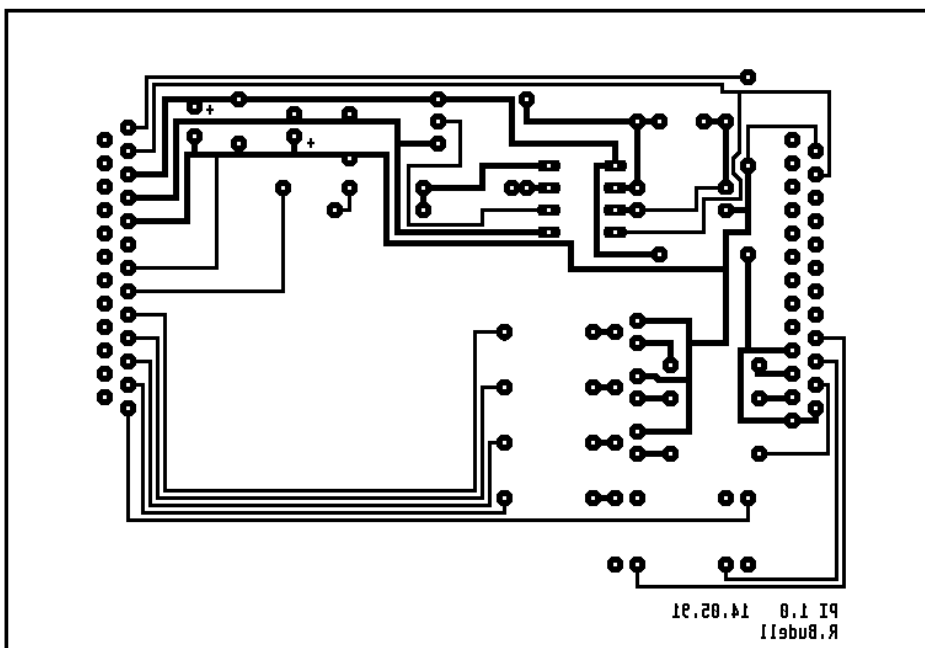


Abbildung B.31: Layout des PI, Lötseite

B.7 Schaltung und Funktion des Netzteils

Für die Funktion des Verstärker/Konverters ist ein sorgfältig aufgebautes und stabiles Netzteil von großer Bedeutung. Durch die hohe Verstärkung bei hohen Dichten sind selbst kleinste Instabilitäten bei der Versorgung deutlich nachzuweisen. Wegen der hohen Geschwindigkeiten der analogen Bausteine kommt es immer wieder zu kleinen Spannungseinbrüchen auf den Zuleitungen, die effektiv ausgegletzt werden müssen. Alle Bauteile wurden deshalb überdimensioniert und die Anzahl der Kondensatoren erscheint geradezu verschwenderisch. Die geringen Kosten der Vielschichtkondensatoren rechtfertigt jedoch dieses Vorgehen. Nachträgliche Nachbesserungen sind erheblich aufwendiger.

Das Netzteil ist aus zwei Baugruppen aufgebaut. PSU 19 erzeugt eine symmetrische Gleichspannung von $\pm 19\text{ V}$. Damit werden die analogen Baugruppen versorgt. Auf der ALU wird die Versorgungsspannung noch einmal nach dem gleichen Schema gesiebt, so daß entgültig eine Spannung von $\pm 15\text{ V}$ zur Verfügung steht. PSU 55 erzeugt zwei unabhängige 5 V -Gleichspannungen, die die digitalen Baugruppen versorgen. Dabei wird unterschieden zwischen den digitalen Schaltungen, die synchron mit dem Takt der Digitalisierung arbeiten (DLU, DI) und der digitalen Komponente, die asynchron zum Takt der Digitalisierung ist (DU).

Die Funktion jedes Spannungsreglers wird am Gehäuse durch eine eigene rote Leuchtdiode angezeigt.

B.7.1 Beschreibung der Schaltung von PSU 19

Die wichtigsten Details der Schaltung sind die beiden integrierten Spannungsregler, LM 317 und LM 337. Dabei handelt es sich um Dreibeinregler. Durch die entsprechende Beschaltung kann eine Brummunterdrückung von 80 dB erreicht werden. Diese Bausteine zeichnen sich ebenfalls durch eine niedrige Ausgangsimpedanz bei einer Last mit hohen Frequenzen aus. Nur dadurch wird vermieden, daß über die Versorgungsleitung eine Mitkopplung bei den analogen Baugruppen stattfindet. Beide Spannungsregler wurden mit einem eigenen großen Kühlkörper versehen. Mit Hilfe des Reglers P1, P2 kann die Ausgangsspannung eingestellt werden. Alternativ kann auch ein Festwiderstand eingesetzt werden. Die notwendigen Lötkontakte sind bereits vorhanden.

Die beiden Dioden an jedem Spannungsregler sorgen dafür, daß die Spannungsdifferenz nie unerlaubte Werte annehmen kann. Falls durch einen Fehler die Ausgangsspannung der Spannungsregler höher werden sollte als die Eingangsspannung, wird die Diode leitend und schützt so das IC vor der Zerstörung. Eine weitere Sicherheitsmaßnahme wird mit den Thyristoren THY 1 und THY 2 erreicht. Das Gate der Thyristoren wird über eine Zenerdiode angesteuert. Wenn die Ausgangsspannung höher wird als die Zenerspannung, wird der Thyristor leitend und schließt die Versorgungsspannung kurz. Dadurch brennt die nachfolgende Sicherung durch und unterbricht den Versorgungsstrom. Je nach verwendetem Thyristor muß R13 und R23 wertemäßig angepaßt werden.

B.7.2 Beschreibung der Schaltung von PSU 55

Beide 5 V -Versorgungseinheiten sind identisch und auf einer Platine aufgebaut. Sie sind aber nicht untereinander verbunden. Beide Schaltungen funktionieren ähnlich zu der Schaltung der $+19\text{ V}$ -Versorgung. Lediglich die verwendeten Bauteile sind zum Teil anders dimensioniert.

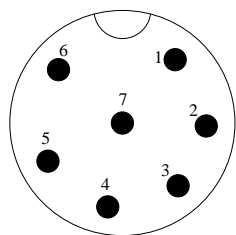
B.7.3 Verdrahtung der Niedervoltspannungen

Wie bei allen Komponenten wurde auch hier auf eine konsequente sternförmige Zusammenführung der Masseleitungen zurückgegriffen. Alle Masseleitungen werden auf der Platine von PSU 19 zusammengeführt. Die Masseleitungen sind **nicht** mit der Erde verbunden.

Die Verbindung der PSU mit den Geräten wird über zwei Funkmikrofonbuchsen/-stecker hergestellt. Diese Stecker bieten eine hohe mechanische Sicherheit und sind problemlos mit hohen Strömen belastbar. Die Stecker haben die folgende Belegung:

B.7.3.1 J 17: Versorgung für AAU, ALU, DLU

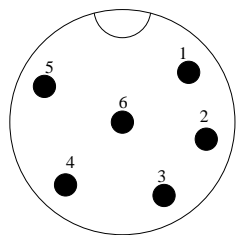
Dabei handelt es sich um eine 7-polige Funkmikrofonbuchse/-stecker. Die Belegung ist von der Lötseite der Buchse her definiert.



Pin 1	+19 V
Pin 2	Return 19 V
Pin 3	-19 V
Pin 4	nc
Pin 5	Return 5 V _{DLU}
Pin 6	+5 V _{DLU}
Pin 7	nc

B.7.3.2 J 18: Versorgung für DU, DI, PI

Dabei handelt es sich um eine 6-polige Funkmikrofonbuchse/-Stecker. Die Belegung ist von der Lötseite der Buchse her definiert.



Pin 1	+5 V für Daten Interface
Pin 2	Return 5 V _{DI}
Pin 3	nc
Pin 4	Return 5 V _{DU}
Pin 5	+5 V für Display Unit
Pin 6	nc

B.7.4 Verdrahtung der Netzleitungen

Der Netzanschluß erfolgt über einen Kaltgeräteanschluß. In diesem Anschluß ist bereits ein Netzfilter eingebaut. In älteren Versionen ist der Netzfilter als eigenständiges Bauteil im Gehäuse der PSU eingebaut.

Über den Kaltgerätestecker ist das Gehäuse der PSU mit der Erde verbunden. Es ist darauf zu achten, daß keine Masseverbindung mit dem Gehäuse oder mit der Erde verbunden sein darf.

Jeder Transformator ist getrennt durch eine Schmelzsicherung abgesichert. Die Sicherung befindet sich an der Frontplatte des PSU-Gehäuses. Dort wurde auch der Ein/Aus-Schalter angebracht.

Die Verdrahtung der Netzversorgung wird über eine Lötleiste geführt, die in der Mitte des Gehäuses angebracht ist.

Das Gerät läßt sich von 220 V auf 110 V umstellen, indem zwei Drahtbrücken umgelötet werden.

220 V: Drahtbrücke zwischen lila und weißer Zuleitung zum Ringkerntransformator.

110 V: Drahtbrücke zwischen blauer und weißer Zuleitung und zwischen weißer und brauner Zuleitung.

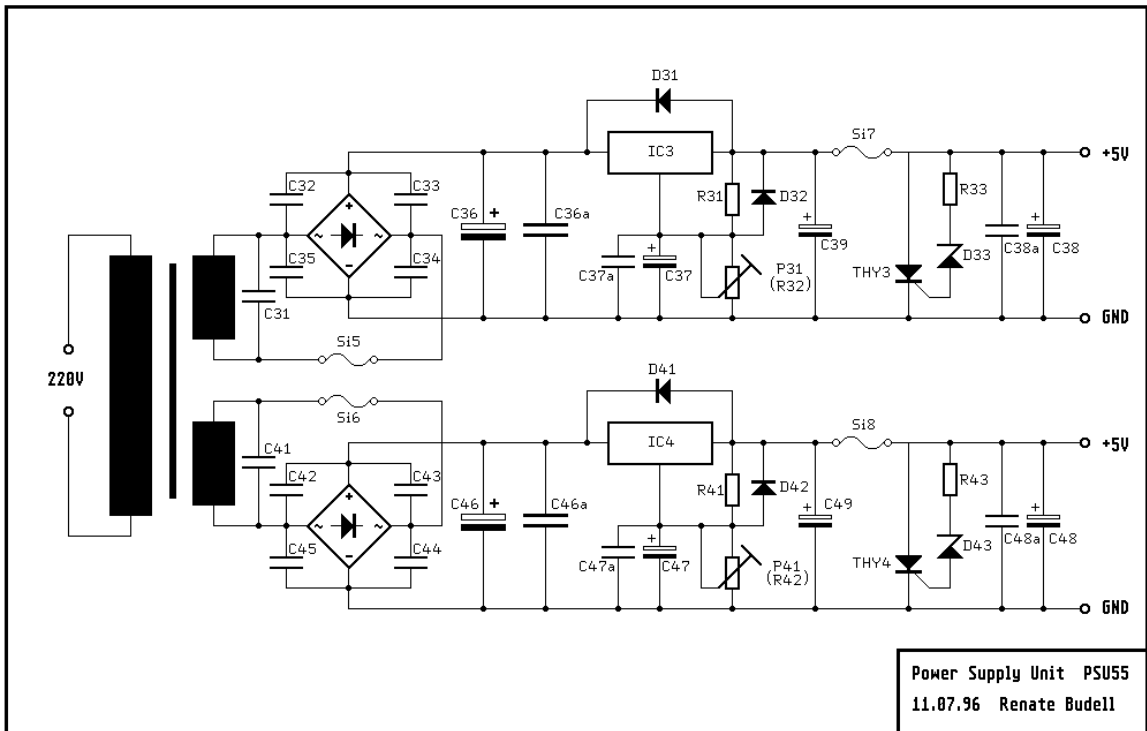
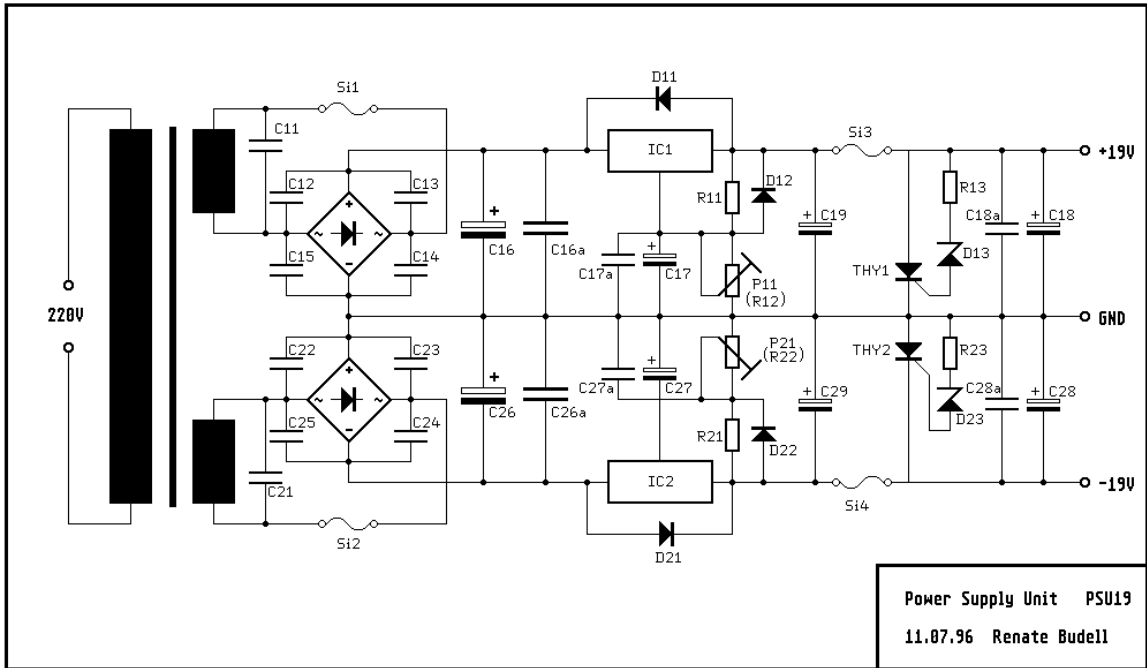


Abbildung B.32: Schaltplan der beiden Netzteile PSU19 und PSU55

Power Supply Unit, PSU, Bauteilliste

IC1	LM 317	
IC2	LM 337	
IC3	LM 317	
IC4	LM 317	
D11,12	1N4007	
D21,22	1N4007	
D31,32	1N4007	
D41,42	1N4007	
D13,23	ZD 15	auf THY abstimmen
D33,43	ZD 5.1	auf THY abstimmen
THY1-4	TIC 116D	auch TIC 106D möglich, dann D13, D14: ZD 20
LED1-4	LED rot	Anzeige an Frontplatte
GL1-4	B80C1500	Rundgehäuse

R11,R21,R31,R41	243 Ω	Metall	
R12,R22	3.45 k	Metall	für 19 V optional Poti
R32,R42	715 Ω	Metall	für 5 V (706 Ω) optional Poti
R13,R23,R33,R43	1 k	Metall	entfällt je nach THY
R14,R24	1.2 k	Kohle	für LED
R34,R44	220 Ω	Kohle	für LED
P11,P21	5 k	Cermet (stehend)	optional für R12,R22
P31,P41	1 k	Cermet (stehend)	optional für R32,R42
C11,C12,C13,C14,C15	0.1 μ F	Viel	
C21,C22,C23,C24,C25	0.1 μ F	Viel	
C31,C32,C33,C34,C35	0.1 μ F	Viel	
C41,C42,C43,C44,C45	0.1 μ F	Viel	
C16,C26	4700 μ F	Elko 50V	stehend
C36,C46	4700 μ F	Elko 16V	stehend
C16a,C26a,C36a,C46a	0.1 μ F	Viel	
C17,C27,C37,C47	10 μ F	Elko	stehend
C17a,C27a,C37a,C47a	0.1 μ F	Viel	
C18,C28,C38,C48	100 μ F	Elko 35V	stehend
C18a,C28a,C38a,C48a	0.1 μ F	Viel	

TR1	Ringkerntransformator $2 \times 18 \text{ V } 0.6 \text{ A}$
TR2	Ringkerntransformator $2 \times 6 \text{ V } 1.2 \text{ A}$
Si1, Si2	Sicherung 630 mA träge
Si3, Si4	Sicherung 1.0 A träge
Si5, Si6	Sicherung 250 mA träge
Si7, Si8	Sicherung 500 mA träge
4	Kühlbleche
4	Sicherungshalter print
1	Netsfilter
1	Netzschalter
1	Sicherungshalter für Gehäuse
1	Einbaubuchse 7 pol
1	Stecker 7 pol
1	Einbaubuchse 4(6) pol
1	Stecker 4(6) pol
1	Netzkabel

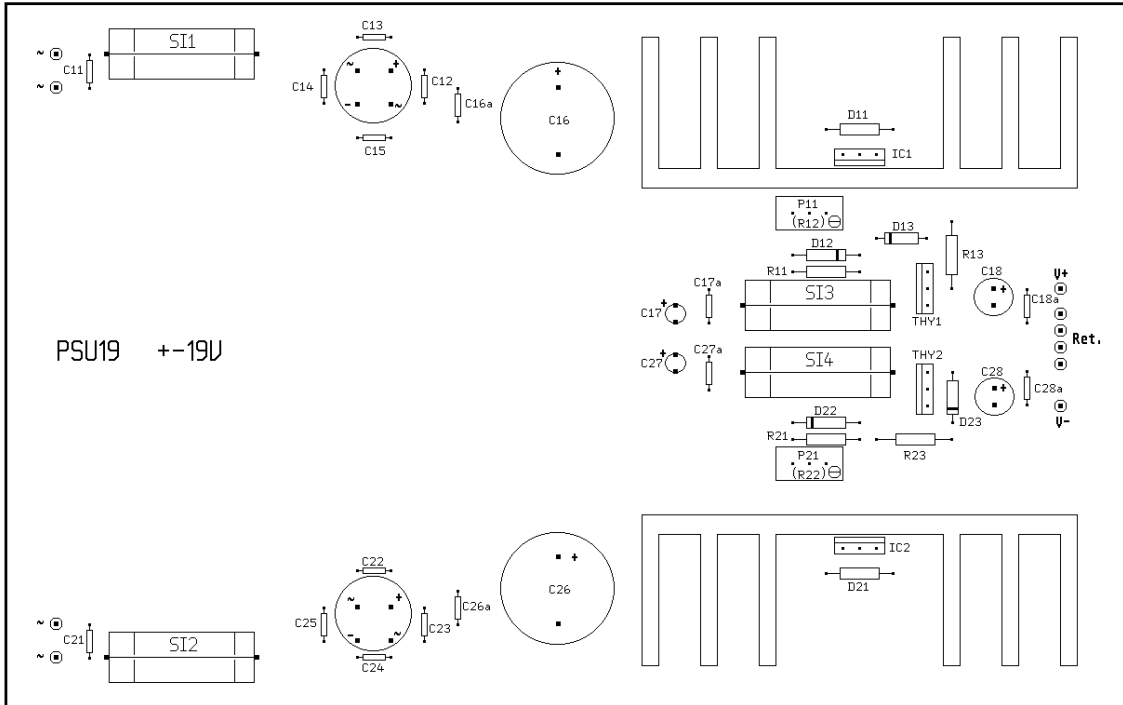


Abbildung B.33: Bestückungsplan von PSU 19

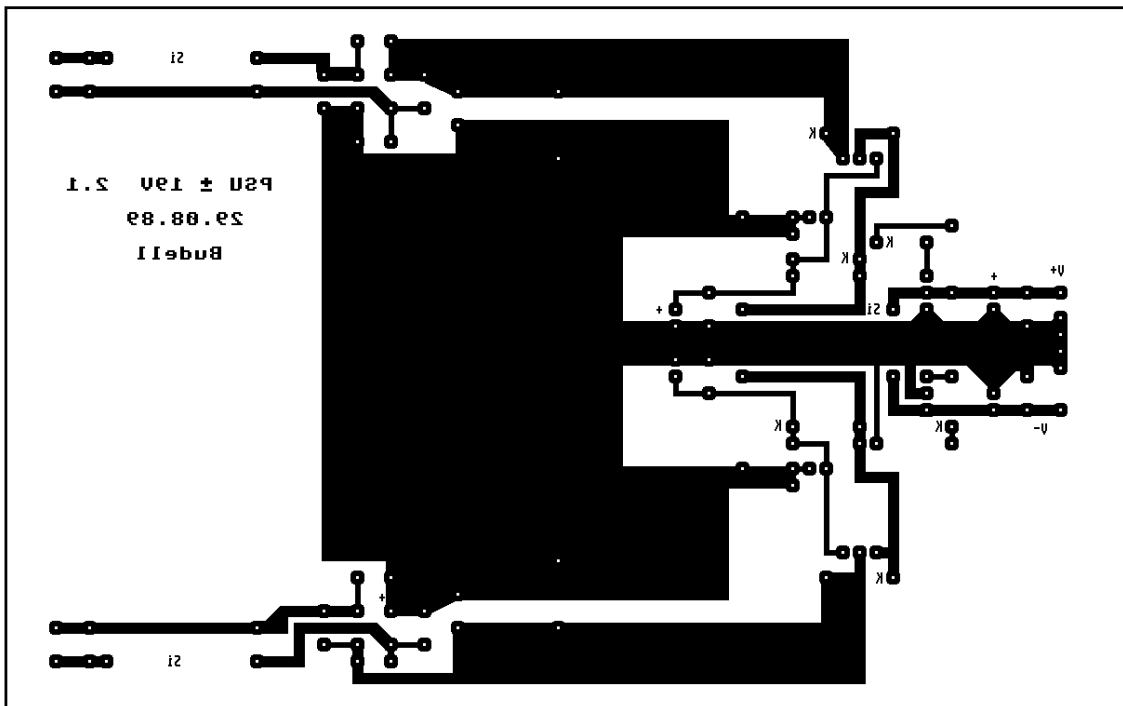


Abbildung B.34: Layout von PSU 19

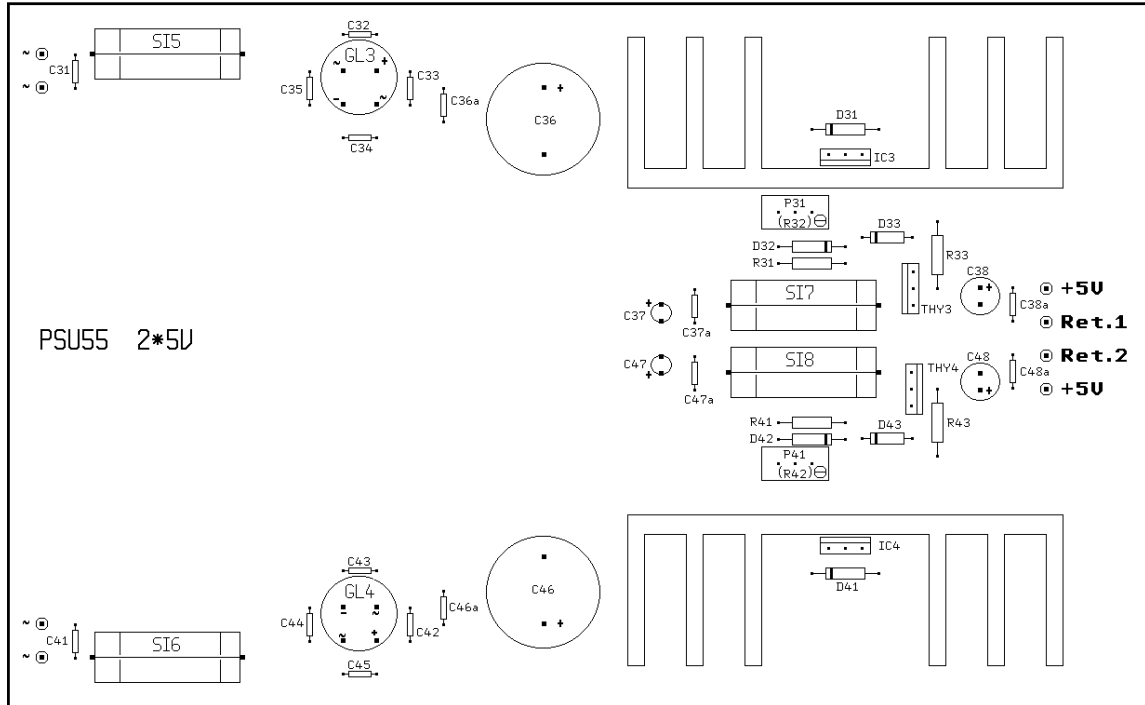


Abbildung B.35: Bestückungsplan von PSU 55

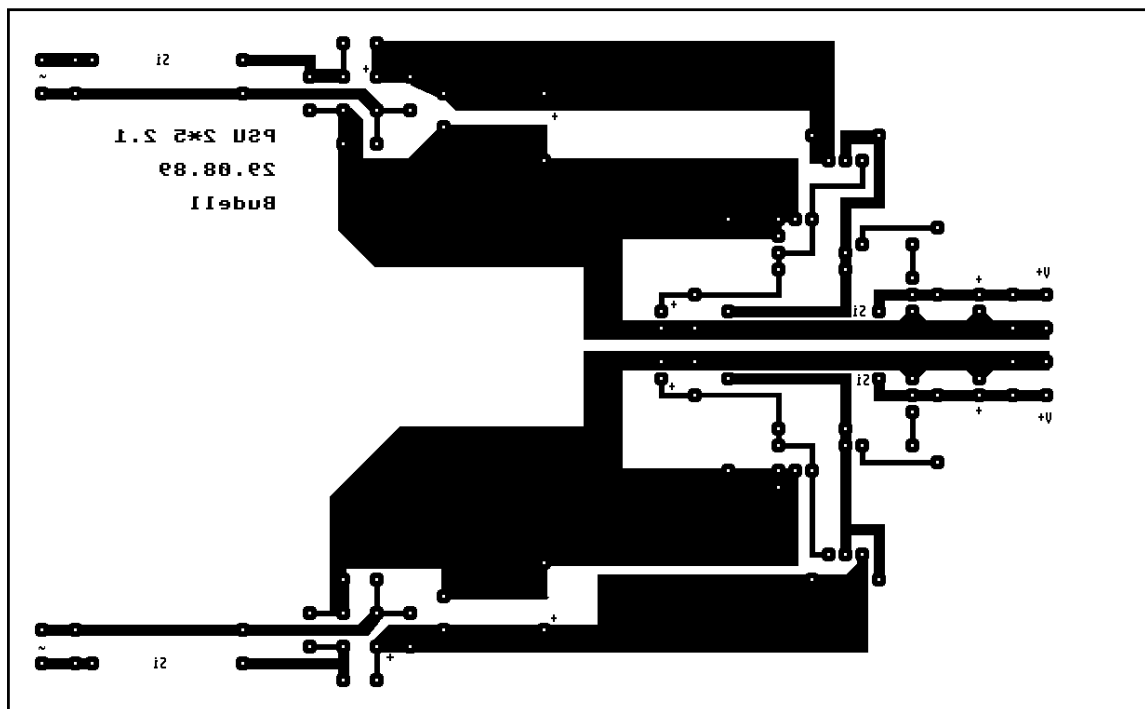


Abbildung B.36: Layout von PSU 55

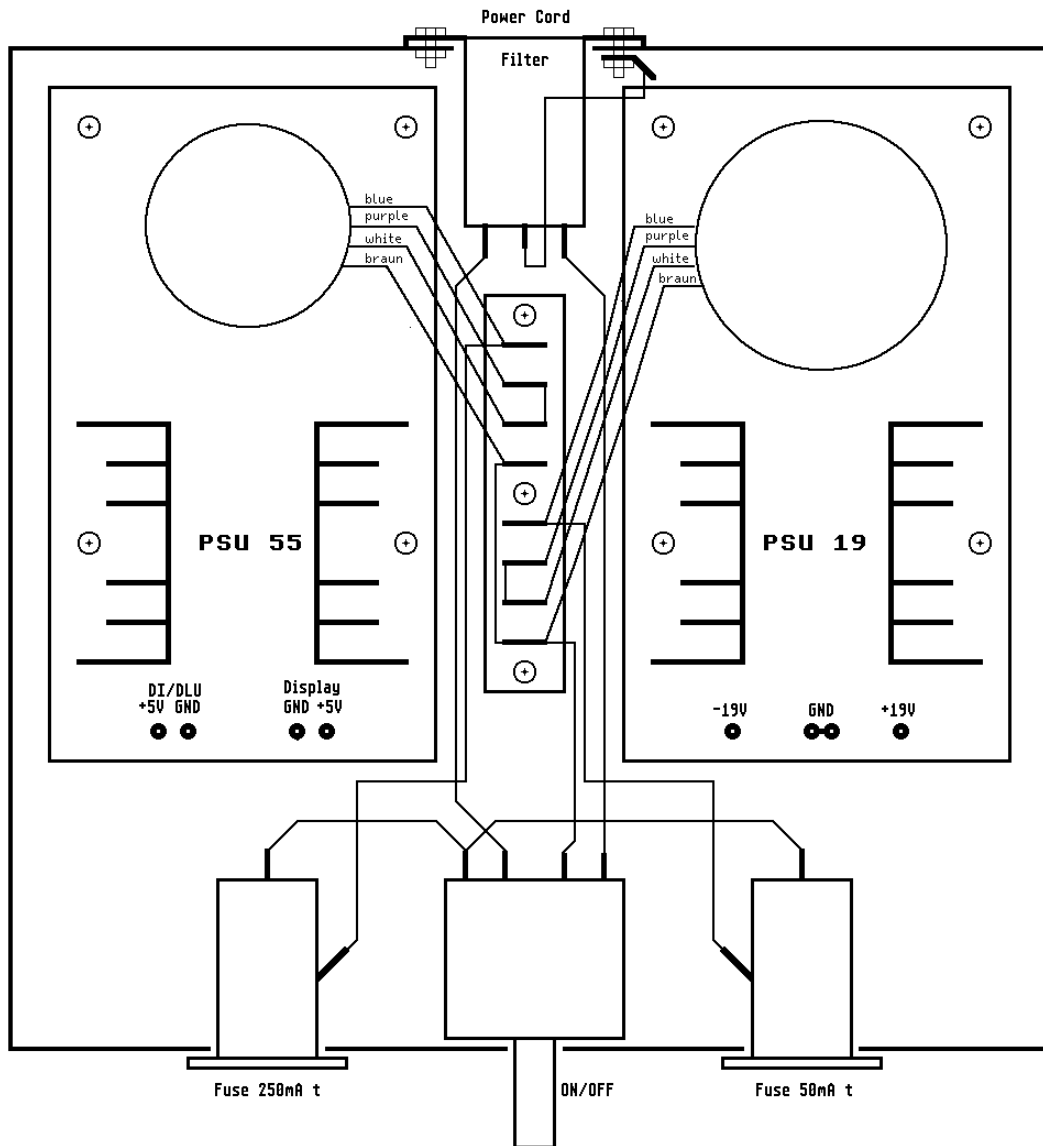


Abbildung B.37: Verdrahtung der Netzleitungen

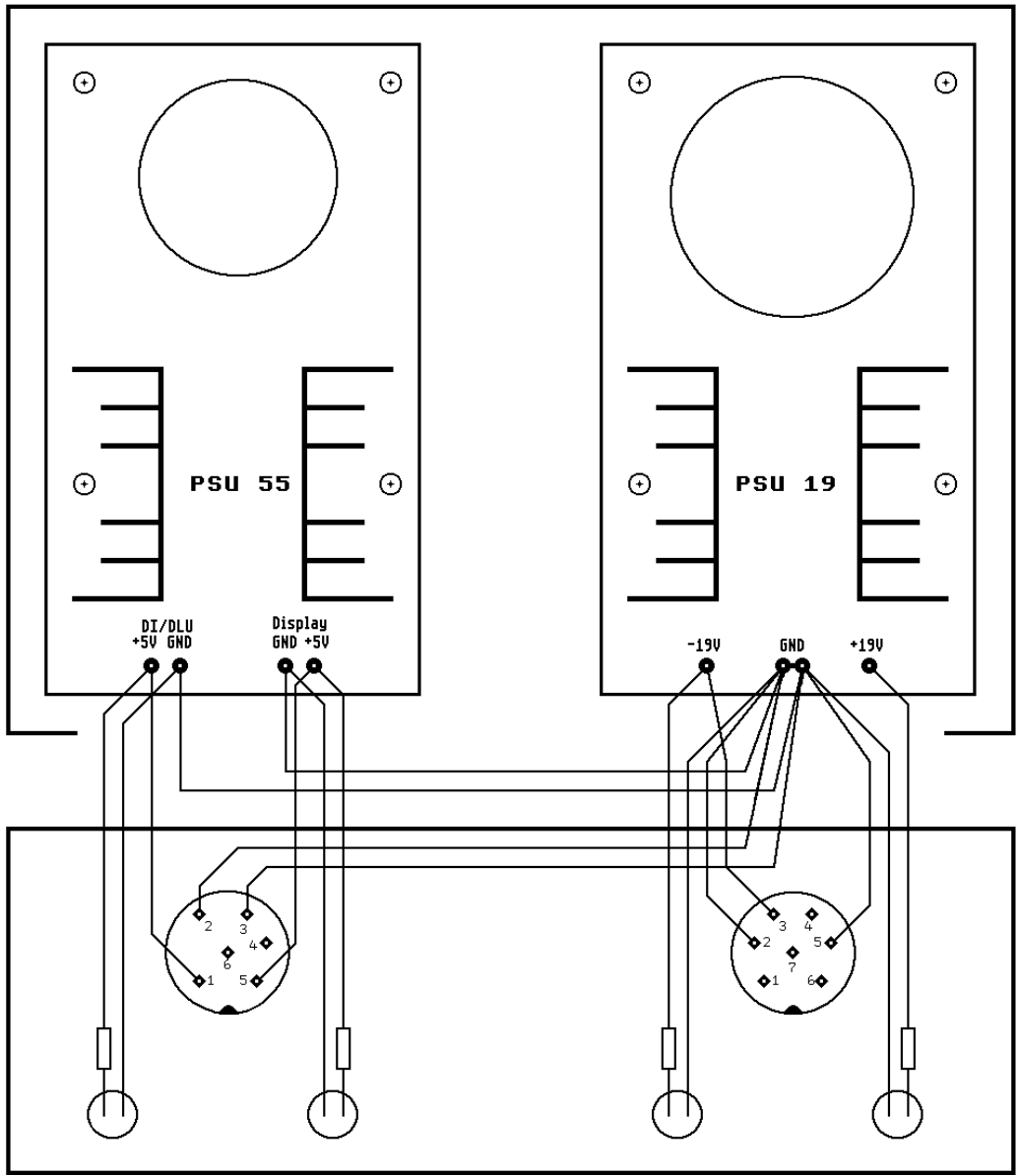


Abbildung B.38: Verdrahtung der Niedervoltspannung im Netzteil.

B.8 Justierung des Verstärker/Konverters

Die Meßgenauigkeit des Verstärker/Konverters ist insgesamt gesehen höher als die der zur Verfügung stehenden Meßgeräte. Deshalb ist nur eine indirekte Justierung möglich.

Zuerst wird die Verstärkung jeder einzelnen Stufe der Verstärkerkette auf den Faktor 10 eingestellt. Dazu wird der Eingang jeder Stufe mit einer konstanten Eingangsspannung im Bereich von 1V gespeist. Der absolute Wert der Eingangsspannung ist nicht interessant. Sie muß nur über einen längeren Zeitraum konstant sein und sollte so wenig wie möglich rauschen. Es wird jedoch ein Wert vom ca. 1V empfohlen, da so die Auflösung des Digitalvoltmeters optimal ausgenutzt werden kann. Alle Eingänge sind leicht zu erreichen, da die Eingangswiderstände als eine Lötbrücke ausgeführt sind. Mit einem 6-stelligen Digitalvoltmeter werden abwechselnd die Offsetspannung bei kurzgeschlossenem Eingang, die Eingangsspannung und die Ausgangsspannung gemessen, ohne dabei den Meßbereich umzuschalten.

Als nächstes wird der AD-Konverter eingestellt. Dabei soll gleichzeitig der Einfluß des Puffers (IC13) berücksichtigt werden. Dazu wird eine konstante Spannung von 1.22 mV über die geöffnete Brücke B6 eingespeist. Die Auslesetabelle wird in den linearen Modus geschaltet und die Anzeigeeinheit wird auf Ganzzahlen umgeschaltet. Der Offseinsteller P141 wird so justiert, daß die Anzeige zwischen 0 und 1 hin und her springt. Anschließend wird die Spannung auf 9.9963 V eingestellt. Jetzt wird die Verstärkung des ADCs mit dem Spindeltrimmer P142 so eingestellt, daß die Anzeige zwischen 4094 und 4095 hin und her springt. Dieser Vorgang wird am besten noch ein oder zwei Mal wiederholt.

Im nächsten Schritt muß der Offset der einzelnen Stufen abgeglichen werden. Hierbei bekommt man in den Stufen mit der hohen Verstärkung Probleme mit dem Rauschen der Elektronik. Bei der höchsten Verstärkung beträgt die Rauschamplitude ± 50 mV. Die üblichen Digital-Voltmeter können dafür nicht mehr benutzt werden, da man über eine lange Zeit den Mittelwert messen muß. Die Justierung kann am besten mit Hilfe eines Rechners erfolgen. Deshalb justiert man in zwei Schritten. Zuerst verbindet man die geschlossene Lötbrücke zwischen Multiplexer und Pufferverstärker mit einem Digital-Voltmeter und gleicht so gut wie möglich den Offset aller Stufen ab. Die einzelnen Stufen können mit einem Handschalter selektiert werden. Es sind insgesamt sieben Spindeltrimmer dafür vorgesehen. Einer befindet sich in der Eingangsstufe (I/U-Konverter), einer in der ersten Verstärkerstufe und je einer neben den S/H-Schaltungen. Die beiden Trimmer in der Verstärkereinheit (AAU) werden so eingestellt, daß mit den restlichen Trimmern ein Feinabgleich möglich ist. Dazu muß besonders das Ausgangssignal der letzten Verstärkerstufe betrachtet werden.

Im zweiten Schritt erfolgt der endgültige Offset-Abgleich mit Hilfe eines Rechners. Dazu wird das DI mit dem Rechner-Interface verbunden. Das Programm löst eine Konversion aus und liest anschließend den Wert ein. Je nach Amplitude des Rauschens wird über mehr oder weniger viele Werte gemittelt. Diese Methode hat auch den Vorteil, daß alle Einflüsse der Elektronik bei dem Abgleich berücksichtigt werden können, da alle Komponenten an dem Abgleich beteiligt sind. Wenn der Vorabgleich erfolgreich war, brauchen die Trimmer der AAU nicht mehr verstellt zu werden.

Ein großes Problem beim Offset-Abgleich ist die unsymmetrische Wandlung des ADCs. Alle Spannungen, die kleiner als 0 V sind, können nicht angezeigt werden. Deshalb kann die Mittelung nur mit indirekten Methoden erfolgen. Ein Trick zur Umgehung dieses Problems besteht darin, die Offset-Einstellung des ADCs (P141) in den positiven Bereich zu verdrehen. Dazu wird der Multiplexer per Drehschalter auf GND eingestellt. Die Auslesetabelle muß auf lineare Auslesung

geschaltet sein. Jetzt wird der Offset des ADCs so weit wie möglich verstellt. Meistens ist eine Verstellung um 3 bis 4 Digits möglich. Der Offset der Verstärkerstufen wird dann auf diesen Wert eingestellt. Anschließend wird der Offset des ADCs wieder auf Null abgeglichen.

Für die Feineinstellung wird der digitalisierte Wert direkt am Computer ausgelesen. Bei den ersten beiden Dekaden gibt es keine Schwierigkeiten. Der Computer zeigt die Werte graphisch an. Das Rauschen ist so gering, daß in der Graphik eine durchgezogene Linie entsteht. Erst wird der untere Umschaltpunkt gesucht, dann der obere Umschaltpunkt. Das Potentiometer wird anschließend in die Mittelstellung gebracht. Bei der dritten Stufe ist ein Rauschen von ± 1.5 Digits zu sehen. Hier wird das Potentiometer so weit verstellt, bis der häufigste Wert dem oben ermittelten Offset-Wert entspricht. Auch hierbei empfiehlt es sich die Werte als Punkte graphisch anzeigen zu lassen.

Bei der vierten Stufe ist das Rauschen bereits so stark, daß man besser auf eine statistische Methode zurückgreift, denn der größte Anteil der negativen Rauschamplituden kann nicht mehr gewandelt werden und ergibt so den Wert 0.

Da es sich um weißes Rauschen handelt, ergibt ein Histogramm eine gaußförmige Verteilung. Das Histogramm wird von allen Werten, die nicht 0, sind erzeugt und angezeigt. Für jedes Histogramm werden 10 000 Punkte gesammelt. Mit dem Potentiometer wird die Lage des Histogramms soweit verschoben, daß das Maximum mit dem Offset-Wert, der oben ermittelt wurde, übereinstimmt. Diese Methode ist für die 5. Stufe unbrauchbar, weil das Histogramm so breite Flügel hat, daß ein Maximum nur schwer zu erkennen ist.

Eine andere Methode geht ebenfalls von einer Gleichverteilung aus. Es werden 400 Datenpunkte ermittelt. Davon liegen im Idealfall 200 Punkte oberhalb des eingestellten Offset-Wertes und 200 unterhalb. Die Daten, die genau dem Offset-Wert entsprechen, werden zur Hälfte mitgezählt. Als Ergebnis wird graphisch die Anzahl der Daten oberhalb des Offset-Wertes angezeigt. Insgesamt werden 400 dieser Messungen auf dem Bildschirm angezeigt, wobei immer die älteste Messung gelöscht und durch eine neue ersetzt wird. Der Spindeltrimmer wird so eingestellt, daß die Punktwolke sich symmetrisch um die Ideallinie mit der Zählrate 200 verteilt.

Zum Abschluß wird der Offset des ADCs erneut eingestellt, wie oben angegeben. Damit ist der Abgleich des Offsets beendet.

Die Einstellung der Referenzspannung für die Umschaltung der Verstärkung ist unkritisch, da die Tabellen einen großen Überlappbereich haben. Die Spannung am Testpunkt TP1 der ALU sollte etwa 9.40 V betragen.

Zur Einstellung des I/U-Konverters wird das Digitalvoltmeter an den Ausgang des I/U-Konverters angeschlossen. An den Eingang wird ein Stromquelle mit möglichst genau 100 μA angeschlossen. Die Ausgangsspannung des I/U-Konverters wird auf 9.765 V eingestellt. Dieser Wert ergibt digitalisiert den Wert 4 000 und ist als Dichte 0 definiert. Diese Justierung wird später noch einmal wiederholt.

Der Abgleich sollte erst nach einer längeren Warmlaufphase erfolgen und so lange in kürzeren Abständen wiederholt werden, bis die Einstellungen stabil bleiben.

Zur Einstellung der Überstromschutzschaltung für den PMT wird ein Voltmeter an den Testpunkt TP1 der DLU angeschlossen. Mit Hilfe von P1 der DLU wird die Spannung auf 1.50 V abgeglichen.

Literaturverzeichnis

- Altman, J.H., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1977, S. 481
- Analogic 1979: AN 8020L Logarithmic A/D Converter
- Andersson, C.M., Slovak, M.H., Michalski, D.E., 1983: *PASP* 95, 792
- Baetzhold, R.C., Berry, C.R., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1977, S. 12
- Bast, G., 1980: *Untersuchungen photographischer Emulsionen mit dem REM*, Diplomarbeit, Institut für Wissenschaftliche Photographie der Technischen Universität, München
- Bast, G., Haase, G., Zörgiebel, F., 1983: *Scanning* 5, 84
- Becker, H.-J., 1979: *Untersuchungen zur Radialgeschwindigkeitsmessung bei Sternen mit Hilfe eines automatischen Mikrodensitometers*, Diplomarbeit, Sternwarte der Universität Bonn
- Becquerel, E.A., 1842: *Bibliothèque universelle de Genève*, Vol. 40
- Birulya, T.A., Mikheilov, D.K., Sheglov, P.V., 1993: *The Messenger* 71, 57
- Bond, G.P., 1858: *Astron. Nachr.* 47, 1
- Brandenburger, H., Sende, W.-D., 1983: *Fotografische Verfahren mit Silberhalogeniden*, ed. W. Walther, VEB Fotokinoverlag, Leipzig, S. 148
- Budell, R., 1984: *Mitt. Astron. Ges.* 62, 170
- Budell, R., 1985: *Arbeitsmaterialien für die Untersuchung digitaler Bilder in der Astronomie*, Diplomarbeit, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Budell, R., 1988: in: *Astrophotography*, ed. S. Marx, Springer-Verlag, Berlin, S. 22
- Budell, R., 1992: in: *Astronomical Photography 1990*, ed. J.-L. Heudier, Université de Nice-Sophia-Antipolis, S. 23
- Cunow, B., 1993a: *Untersuchung der photometrischen Eigenschaften von Galaxien als Beitrag zur beobachtenden Kosmologie*, Dissertation, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Cunow, B., 1993b: *A&A* 268, 491
- De Vegt, C., Winter, L., Zacharias, N., 1994: in: *Astronomy from Wide-Field Imaging*, IAU Symposium 161, eds. H.T. MacGillivray, E.B. Thomson, B.M. Lasker, I.M. Reid, D.F. Malin, R.M. West, H. Lorenz, Kluwer, Dordrecht, S. 173
- Difley, J.A., 1968: *AJ* 73, 762
- Draper, H., 1877: *Phil. Mag.*, 3, 238
- Dueummler, R., 1984: *P Cygni: Vollautomatische Analyse komplexer Linienprofile und Versuch einer Deutung*, Diplomarbeit, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster

- Dumoulin, B., Québatte, J., West, R.M., 1988: in: *Astrophotography*, ed. S. Marx, Springer Verlag, Berlin, S. 34
- Fountain, W.F., Gary, G.A., Oda, H., 1984: in: *Astronomical Microdensitometry Conference*, NASA Conf. Publ. NASA CP-2317, 1984, ed. D. A. Klinglesmith, S. 71
- Fraunhofer, J., 1817: *Denkschriften der Königl. Akad. d. Wiss. zu München*, 5, 193
- Good, A.R., Gourlay, G., 1984: in: *Astronomical Photography 1984*, ed. E. Sim, K. Ishida, Royal Observatory, Edinburgh, S. 93
- Granzer, F., Moisar, E., 1981a: *Physik in unserer Zeit*, 1, 22
- Granzer, F., Moisar, E., 1981b: *Physik in unserer Zeit*, 2, 36
- Greisen, E.W., Harten, R.H., 1981: *A&AS* 44, 371
- Hiesgen, M., 1988: *Entwicklung und Test eines automatischen Fokussiersystems für die PDS 2020 GM*, Diplomarbeit Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Hiesgen, M., 1995: *Die Eigenbewegung der Sculptor und Fornax Zwerggalaxien*, Dissertation, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Honeycutt, R.K., Chaldu, R.S., 1970: *AAS Photo-Bulletin* 2, 14
- Horstmann, H., 1992: *Untersuchung der Verteilung schwacher Galaxien im Gebiet des galaktischen Südpols*, Dissertation, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Huggins, W., Miller, W.A., 1864: *Phil. Trans.*, 154, 413
- James, T.H., 1977: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York
- James, T.H., 1977a: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 161
- James, T.H., 1977b: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 373
- James, T.H., 1977c: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 404
- Jankowski, H.-D., Rabich, D., Reschke, J.F., 1990: *Atari ST Profibuch*, Sybex-Verlag, Düsseldorf
- Jenkins, R.L., Farnell, G.C., 1978: *AAS Photo-Bulletin* 17, 3
- Kellogg, L.M., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 145
- Kibblewhite, E.J., Bridgeland, M.T., Bunclark, P., Irwin, M.J., 1984: in: *Astronomical Microdensitometry Conference NASA Conf. Publ.*, NASA CP-2317, 1984, ed. D. A. Klinglesmith, S. 277
- King, H.C., 1955: *The History of the Telescope*, Charles Griffin & Company Limited, London
- Kinzly, R.E., 1972: *J. Opt. Soc. Am.* 62, 386
- Kodak 1987: *Scientific Imaging with Kodak Films and Plates*, Eastman Kodak Company, Rochester
- Kriss, M.A., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 592

- Kroll, P., Neugebauer, P., 1994: in: *Astronomy from Wide-Field Imaging*, IAU Symposium 161, eds. H.T. MacGillivray, E.B. Thomson, B.M. Lasker, I.M. Reid, D.F. Malin, R.M. West, H. Lorenz, Kluwer, Dordrecht, S. 183
- Kühn, E., 1988: *Handbuch der TTL- und CMOS-Schaltkreise*, Hüthig Verlag, Heidelberg
- Lasker, B.M., Sturch, C.R., McLean, B.J., Russel, J.L., Jenker, H., Shara, M., 1990: *AJ* 99, 2019
- Lasker, B.M., 1994: in: *Astronomy from Wide-Field Imaging*, IAU Symposium 161, eds. H.T. MacGillivray, E.B. Thomson, B.M. Lasker, I.M. Reid, D.F. Malin, R.M. West, H. Lorenz, Kluwer, Dordrecht, S. 167
- Lee, W.E., Brown, E.R., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 291
- Lee, W.E., Drago, F.J., Ram, A.T., 1984: *Journal of Imaging Technology* 10, 22
- Levenson, G.I.P., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 437
- Lindner, H., Brauer, H., Lehmann, C., 1989: *Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik*, Verlag Harri Deutsch, Thun, S. 277
- MacGillivray, H.T., 1984: in: *Astronomical Photography 1984*, ed. M.E. Sim, K. Ishida, Royal Observatory, Edinburgh, S. 237
- Maeder, A., 1987: in: *ESO Workshop on the SN1987A*, ed. I. J. Danziger, S. 251
- Malin, D.F., 1983: in: *Astronomy with Schmidt-Type Telescopes*, ed. M. Capaccioli, Reidel, Dordrecht, S. 57
- Malin, D.F., 1994: in: *Astronomy from Wide-Field Imaging*, IAU Symposium 161, eds. H. T. MacGillivray, E. B. Thomson, B. M. Lasker, I. M. Reid, D.F. Malin, R. M. West, H. Lorenz, Kluwer, Dordrecht S. 127
- Meyer, E., 1987: *c't*, Sept. 1987, S. 50
- Morgan, D.H., Tritton, S.B., 1988: in: *Mapping the Sky*, IAU Symposium 133, eds. S. Debarat, J.A. Eddy, H.H. Eichhorn, A.P. Upgren, Kluwer, Dordrecht, S. 349
- Québatte, J., Dumoulin, B., 1992: in: *Astronomical Photography 1990*, ed. J-L. Heudier, Université de Nice-Sophia-Antipolis, S. 45
- Parker, Q.A., Phillipps, S., Morgan, D.H., Malin, D.F., Russel, K.S., Hartley, M., Savage, A., 1994: in: *Astronomy from Wide-Field Imaging*, IAU Symposium 161, eds. H.T. MacGillivray, E.B. Thomson, B.M. Lasker, I.M. Reid, D.F. Malin, R.M. West, H. Lorenz, Kluwer, Dordrecht, S. 129
- Plessey Semiconductors, 1983: SL 521 in: *Linear Integrated Circuit Handbook*, The Plessey Company plc, S. 63
- Pouradier, J., Pailliotet, A., Berry, C.R., 1977: in: *The Theory of the Photographic Process*, 4th edition, ed. T. H. James, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, S. 1
- Pratt, N.M., 1977: *Vis. Astron.* 21, 1
- Pucillo, M., Sedmak, G., 1984: in: *Astronomical Microdensitometry Conference*, NASA Conf. Publ., NASA CP-2317, 1984, ed. D. A. Klinglesmith, S. 175
- Reynolds, G.O., Smith, A.E., 1973: *Applied Optics* 12, 1259

- Scheuer, H.-G., 1983: Quantitative morphologische Klassifikation von ellipsoidischen Galaxien mit Hilfe automatischer Reduktionsmethoden, Diplomarbeit, Dissertation, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Scheiner, J., 1897: Die Photographie der Gestirne, Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig
- Schwarzschild, K. 1900: ApJ 11, 89
- Scott, R.L., Smith, A.G., Webb, J.R., 1985: AAS Photo-Bulletin 40, 3
- Seifart, M., 1988a: Analoge Schaltungen, Hüthig Verlag, Heidelberg
- Seifart, M., 1988b: Digitale Schaltungen, Hüthig Verlag, Heidelberg
- Seitter, W.C., Budell, R., 1984: Mitt. Astron. Ges. 62, 162
- Seitter, W.C., Schuecker, P., Duemmler, R., et al. 1994: The Muenster Redshift Project MRSP, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Sewell, M.H., 1975: AAS Photo-Bulletin 8, 13
- Sim, M.E., 1984: in: Astronomy with Schmidt-Type Telescopes, ed. M. Capaccioli, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, S. 143
- Sommer, M., 1993: Ein photo- und astrometrischer Vergleich zwischen einer Originalplatte und ihren Kopien, Semesterarbeit, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Swing, R.E., 1972: Journal of the Optical Society of America 62, 199
- Swing, R.E., 1976: Optical Engineering, 15, 559
- Tietze, U., Schenk, C., 1976: Halbleiter-Schaltungstechnik, Springer-Verlag, Berlin
- Tsubaki, T., Engvold, O., 1975: AAS Photo-Bulletin 9, 17
- Tsvetkov, M.K., Stavrev, K.Y., Tsvetkova, K.P., Iliev, M.S., 1994: in: Astronomy from Wide-Field Imaging, IAU Symposium 161, eds. H.T. MacGillivray, E.B. Thomson, B.M. Lasker, I.M. Reid, D.F. Malin, R.M. West, H. Lorenz, Kluwer, Dordrecht 1994, S. 359
- Tucholke, H.-J., 1983: Das PDS 2020 GM Mikrodensitometer in Münster und seine Meßgenauigkeit, Diplomarbeit, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- Tucholke, H.-J., 1989: Eigenbewegungsuntersuchung der Kugelhaufen NGC 362 und 47 Tucanae, Dissertation, Astron. Inst. Westf. Wilhelms-Universität, Münster
- van Altena, W., Lee, J.-F., 1984: AAS Photo-Bulletin 35, 11
- van Genderen, A.M., Gautschy, A., 1995: A&A 249, 453
- van Haarlem, M.P., Le Poole, R.S., Katgert, P., Tritton, S., 1992: in: Astronomical Photography 1990, ed. J.-L. Heudier, Université de Nice-Sophia-Antipolis, S. 65
- Vogel, H.C., 1889: Astron. Nachr., 121, 241
- Volkmer, C.C., 1984: Mitt. Astron. Ges. 62, 368
- Walther, W., 1983: Fotografische Verfahren mit Silberhalogeniden, VEB Fotokinoverlag, Leipzig
- Weidner, A., 1994: Workshop, Verlag Photographie, Schaffhausen, S. 125
- Wells, D.C., Greisen, E.W., Harten, R.H., 1981: A&AS 44, 363
- West, R.M., 1992: in: Astronomical Photography 1990, ed. J.-L. Heudier, Université de Nice-Sophia-Antipolis, S. 175
- White, G.L., Malin, D., 1987: in: ESO Workshop on the SN1987A, ed. I.J. Danzinger, ESO, Garching, S. 11

Whitford, A.E., 1932: ApJ 76, 213

Winkelkötter, H., 1992: private Mitteilungen

Zodet, H., 1988: in: Astrophotography, ed. S. Marx, Springer Verlag, Berlin, S. 105

Danksagungen

Frau Professor Dr. W. C. Seitter danke ich, daß sie mir die Möglichkeit gab, diese Arbeit zu machen und schriftlich niederzulegen. Ich danke ihr besonders für das Vertrauen, Untersuchungen zu unterstützen, deren Erfolg nicht vorhersehbar war.

Herrn Dr. H. W. Dürbeck danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Herrn Dr. Rudolf Dümmler (Rolf) danke ich für die Betreuung und für die schier endlose Hilfe bei dieser Arbeit. Trotz der großen räumlichen Entfernung von Münster bis Oulu (ca. 3 000 km) gab es während der ganzen Zeit eine Diskussion über die Arbeit. Hunderte von Briefe und viele Besuche zeugen davon. Ohne seine großzügige und geduldige Hilfe hätte ich diese Arbeit nie fertig stellen können.

Meinen Eltern — insbesondere meiner Mutter — danke ich für den Beistand in den Stunden, in denen die Probleme unüberwindlich erschienen. Sie gab mir die Kraft, trotzdem weiter zu machen.

Ich danke dem Institut für Planetologie dafür, mir eine Umgebung zu bieten, in der ich die Arbeit vollenden konnte, während im Astronomischen Institut die Infrastruktur durch die Auflösung zusammenbrach. Insbesondere möchte ich der Arbeitsgruppe Planeten Physik dafür danken, daß sie mir immer wieder mit Hardware und mit Software ausgeholfen hat. Das reibungslos funktionierende Rechnersystem dieser Gruppe trug maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit bei. Es gab nie ein Problem, das nicht innerhalb von 5 Minuten zu lösen war.

Der Arbeitsgruppe Analytische Planetologie danke ich für die Möglichkeit, mit den optischen Mikroskopen zu arbeiten und die vielen Photos zu machen.

Dem Institut für Medizinische Physik und dem Geologisch–Paläontologischen Institut danke ich, daß ich die Rasterelektronenmikroskope für die Untersuchung der Emulsionen nutzen durfte.

Herrn C. C. Volkmer danke ich für die grundlegende Idee, die zum Bau des Verstärker/Konverters führte und für die Diskussion der Probleme in der ersten Phase der Realisierung des Konzepts.

Ich danke allen Personen, die sich auf verschiedene Weise dafür eingesetzt haben, daß diese Arbeit trotz immer neuer Probleme zu Ende geführt werden konnte.

Zum Schluß danke ich meinen Freundinnen, deren persönliche Unterstützung an vielen schwarzen Tagen sehr hilfreich war. Sie sind ein Teil der Kraftquellen, an denen ich immer wieder auftanken konnte.

Lebenslauf

Name: Renate Budell
geboren: 19.03.1959
Geburtsort: Bottrop
Familienstand: ledig, keine Kinder
Vater: Rudolf Budell
Mutter: Ingrid Budell, geb. Hellmich

Schulbildung: Grundschule: 22.04.65 bis 10.07.69
Realschule: 25.08.69 bis 05.07.75
gymnasiale Oberstufe: 01.08.75 bis 16.06.78, Gesamtschule Friedensschule Münster
Abitur: am 16.06.78 in Münster

Studium: Physik, Westfälischen Wilhelms-Universität in Münster vom 11.08.78 bis 13.03.87

Prüfungen: Diplom im Fach Physik am 31.08.85, Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

Thema: Arbeitsmaterialien für die Untersuchung digitaler Bilder in der Astronomie, angefertigt am Astronomischen Institut Münster.

Tätigkeiten: 01.01.82 bis 31.08.85 war ich als studentische Hilfskraft am Astronomischen Institut Münster eingestellt.
01.09.85 bis 30.06.86 war ich am Astronomischen Institut Münster als wissenschaftliche Hilfskraft tätig.
01.07.86 bis 31.10.96 arbeitete ich als Fotolaborantin/Technikerin am Astronomischen Institut Münster. In dieser Position habe ich wissenschaftliche und technische Arbeiten ausgeführt.
seit dem 01.11.96 bin ich als technische Assistentin am Institut für Planetologie in der Arbeitsgruppe Analytische Planetologie tätig. In dieser Position betreue ich ein Flugzeitmassenspektrometer der Firma ION-TOF.

Beginn der Dissertation: März 1994 am Astronomischen Institut Münster, Betreuer: Professor Dr. W. C. Seitter