

Erstellung und Auswertung des Sonnenspektrums mit Hilfe selbstgebauter Instrumente

von

Michael DENZLEIN und Matthias BARTELMANN, Bamberg

Inhalt

1. Einleitung

2. Zielformulierung

1. Aufnahme und Auswertung eines Sonnenspektrums
2. Einordnung der Sonne in die Harvard-Klassifikation
3. Bestimmung der Sonnentemperatur

3. Darstellung der Methoden und Geräte

1. Auswahl der Konstruktionsprinzipien
2. Aufbau und Ausführung des Spektrografen
3. Die Photometerschaltung
4. Der Analog/Digital-Wandler

4. Durchführung der Messungen

1. visuelle Beobachtungen
2. Fotografie der Spektren
3. Auswertung der Fotografien; Ergebnisse
4. elektronische Abtastung des Spektrums
5. Berechnung der Sonnentemperatur
6. Zusammenfassung der Resultate

5. Ausblicke

1. Erweiterungen am Spektrografen
2. Änderungen der elektronischen Geräte

6. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Die Kursphase der reformierten Oberstufe bringt für jeden Kollegiaten die Pflicht mit sich, ein eng umgrenztes Thema aus dem Fachgebiet eines seiner beiden Leistungskurse als sogenannte "Facharbeit" zu behandeln. Im Leistungskurs Physik 1982/84 am Dientzenhofer-Gymnasium Bamberg entstanden deshalb zwischen Juli 1983 und Februar 1984 zwei wechselseitig in Beziehung stehende Arbeiten, von denen sich die eine mit der Aufnahme von Spektren, die andere mit deren elektronischer Computerauswertung beschäftigte. Beide Themen wurden wegen ihres inhaltlichen Zusammenhangs zum folgenden Beitrag vereinigt.

Um bessere Lesbarkeit zu ermöglichen, wurden die mathematische Behandlung der Beugung am optischen Gitter, elektronische Grundlagenbetrachtungen und Auflistungen von Computerprogrammen aus dem Text entfernt.

2. Zielformulierung

2.1. Aufnahme und Auswertung eines Sonnenspektrums

Elektronensysteme, wie sie z.B. in Atomen, Ionen und Molekülen vorliegen, können Lichtquanten absorbieren, deren Energie für das entsprechende Elektronensystem charakteristisch ist. Zwischen der Wellenlänge und der Energie der Lichtquanten besteht eine direkte Proportionalität, weswegen aus der Wellenlänge absorbierter Strahlung auf die chemische Zusammensetzung des absorbierenden Mediums geschlossen werden kann. Betrachtet man eine Lichtquelle, deren Strahlung ein kontinuierliches, also nicht unterbrochenes Spektrum ergibt, durch eine absorbierende Substanz hindurch, beobachtet man feine dunkle Linien im Kontinuum, deren Lage und Intensität Rückschlüsse auf die chemischen Bestandteile des durchstrahlten Mediums erlaubt.

Eine entsprechende Situation liegt bei der Sonne oder allgemein bei selbstleuchtenden Himmelskörpern vor. Der Sonnenkern stellt eine Lichtquelle dar, die ihre äußeren Schichten durchstrahlt. Diese Außenbezirke absorbieren einen Teil der Sonnenstrahlung, wodurch aus dem ursprünglichen Kontinuum ein Absorptionsspektrum entsteht, dessen Linien als Grundlage einer qualitativen Analyse der Randzonen der Sonne dienen können. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein Sonnenspektrum

zu erzeugen, die Wellenlängen beobachteter Absorptionslinien zu bestimmen und daraus auf die wesentlichen chemischen Elemente in den Außenbereichen der Sonne zu schließen.

2.2. Einordnung der Sonne in die Harvard-Klassifikation

Die Spektralanalyse sollte auch die Einordnung der Sonne in das Schema der Harvard-Klassifikation ermöglichen. Darunter versteht man ein dimensionales System verschiedener Spektraltypen, die sich untereinander durch Zahl und Intensität verschiedener Absorptionslinien unterscheiden. Zur Bezeichnung der Hauptspektralklassen dienen die Buchstaben O,B,A,F,G,K und M, woraus ersichtlich ist, daß die ursprünglich alphabetische Reihenfolge durch mehrere Umstellungen abgeändert werden mußte. Als Ordnungskriterium genügt die Balmerreihe des Wasserstoffs in Verbindung mit den Linien H und K des ionisierten Calciums. Die zunächst rein phänomenologisch aufgestellte Sequenz erwies sich als eine von O nach M absteigende Temperaturfolge, so daß die Stellung eines Sterns innerhalb der Harvard-Klassifikation bereits als grobe Temperaturangabe dienen kann. Die Klassen B mit M werden zur feineren Gliederung jeweils von 0 bis 9 unterteilt; bei der Klasse O beginnt die Einteilung mit 05.

2.3. Bestimmung der Sonnentemperatur

Um diese beiden ersten Zielsetzungen zu realisieren, reichte ein entsprechend konstruierter Spektrograf aus. Zur Messung der Sonnentemperatur waren jedoch elektronische Geräte erforderlich, die nach dem Prinzip eines Belichtungsmessers arbeiten. Solchen Versuchen liegt die Tatsache zugrunde, daß thermische Spektren eine Intensitätsverteilung aufweisen, die für schwarze Körper vom Planck'schen Strahlungsgesetz beschrieben wird. Aus diesem geht das Wien'sche Verschiebungsgesetz hervor, das den Zusammenhang zwischen der Lage des Strahlungsmaximums und der Temperatur des strahlenden Körpers mathematisch beschreibt. Demnach reduziert sich die Messung der Sonnentemperatur auf die Feststellung der Lage des Intensitätsmaximums in ihrem Spektrum. Die dazu notwendigen Instrumente, ein Photometer und ein Analog/Digital-Wandler, werden ebenso wie der Spektrograf im Folgenden beschrieben.

3. Darstellung der Methoden und Geräte

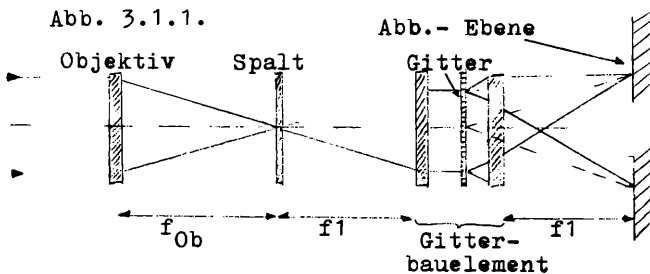
3.1. Auswahl der Konstruktionsprinzipien

a) Der Spektrograf

Aufgabe eines Spektrografen ist es, Mischlicht in seine farbigen Bestandteile aufzuspalten.

Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten, Licht zu zerlegen: 1. durch Prismen, 2. durch Gitter und 3. durch Interferometer, wobei letztere wegen der Schwierigkeiten bei Herstellung und Justierung ausscheidet. Aus den beiden verbleibenden Typen wählte ich wegen folgender Gründe den Gitterspektrografen aus:

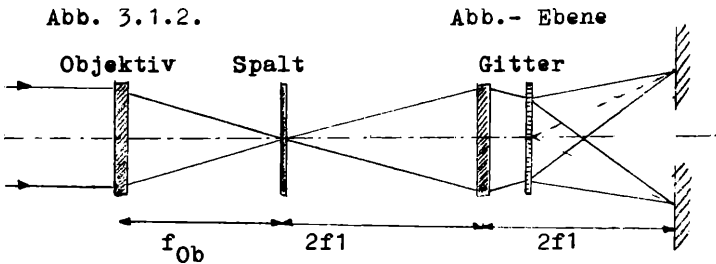
1. Ein Gitter mit hoher Auflösung stand zur Verfügung (Gitterkonstante $g = 1/570 \text{ mm}$); die damit mögliche Lineardispersion wäre mit den vorhandenen Prismen nicht erreichbar gewesen.
2. Wegen der Proportionalität zwischen dem Sinus des Ablenkwinkels und der Wellenlänge des abgelenkten Lichtes (vgl. 3.2.) ermöglicht das Gitter eine einfachere Bestimmung der Wellenlängen abgebildeter Linien als das Prisma (vgl. 4.3.).
3. Bei der Verwendung eines Gitters entsteht rechts und links der optischen Achse je ein Spektrum erster Ordnung, von denen das eine zur Fotografie, das andere u.U. gleichzeitig zur Beobachtung oder zur elektronischen Abtastung verwendet werden kann. Auch das wäre mit einem Prisma nicht zu erreichen.



Dem Spektrografen liegt das in Abb. 3.1.1. dargestellte Konstruktionsprinzip zugrunde. Eine Sammellinse fokussiert die vom Objekt kommenden,

parallel gedachten Lichtstrahlen auf einen Einfachspalt. Das divergente Licht, das den Spalt verläßt, wird von einer weiteren Sammellinse (Brennweite f_1) parallel ausgerichtet, so daß das entstehende Lichtbündel senkrecht auf die Gitterebene auftrifft. Nach der wellenlängenabhängigen Beugung des Lichtes durch das Gitter projiziert eine dritte Sammellinse die beiden Spektren 1. Ordnung auf (nach Bedarf) unterschiedliche Strahlungsempfänger (z.B. Fotoschicht, Mattscheibe, Reflexionsschirm, Fototransistor o.ä.).

Anmerkung: Ursprünglich war folgender Aufbau geplant (Abb. 3.1.2.):



Bei diesem Aufbau hätte eine Sammellinse außer dem Objektiv genügt, weil diese Linse ein Lichtbündel erzeugt hätte, das das Gitter konvergent getroffen hätte. Deshalb wäre zur Abbildung der Spektren keine weitere Konvexlinse unmittelbar hinter dem Gitter erforderlich gewesen. Die Baulänge des Spektrografen vom Spalt bis zur Abbildungsebene hätte dann allerdings die vierfache Brennweite dieser Sammellinse betragen, wozu noch ein "Vorbau" zur Befestigung des Objektivs gekommen wäre. Um eine kompaktere Bauweise zu erreichen, wurde in Anlehnung an [10] Abb. 8.5, S. 97 das Bauprinzip analog Abb. 3.1.1. gewählt.

b) Das Photometer

Bei einem Photometer handelt es sich um einen Wandler, der je nach einfallender Lichtintensität eine Meßgröße am Ausgang zur Verfügung stellt.

Da der später beschriebene A/D-Wandler nur Spannungen verarbeitet, lag es nahe, als Meßgröße eine Spannung auszugeben.

An optisch aktiven elektronischen Elementen existiert eine breite Palette auf dem Markt.

Für die Auswahl mußten demnach besondere Kriterien berücksichtigt werden:

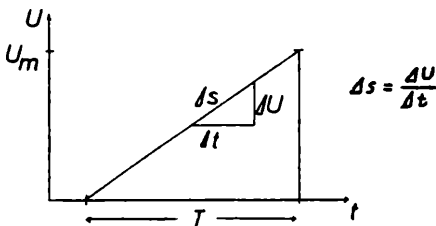
- a) Passivität: das Bauteil soll nicht bei Lichteinfall eine Spannung abgeben (z.B. Photoelemente), sondern nur seinen "inneren Widerstand" ändern,
- b) kleine aktive Fläche, um möglichst punktuell aus dem Spektrum messen zu können,
- c) reproduzierbarer, gebräuchlicher Typ,
- d) möglichst hohe Empfindlichkeit.

Von den Photo-Widerständen und -Elementen werden die Punkte a) und b) nicht erfüllt, so daß im Endeffekt nur ein Photo-Transistor oder eine Photo-Diode in Frage kamen. Um sich die Möglichkeit der Verstärkung offenzuhalten, und wegen Punkt c), wurde dann der Photo-Transistor BPY 62 III gewählt.

c) Der Analog/Digital-Wandler

Damit ein Computer eine analoge Meßgröße verarbeiten kann, muß man ein geeignetes Zwischenglied einschalten, das dafür sorgt, daß die zu messende Größe in einen proportionalen Zahlenwert umgewandelt wird. Bei den zur Ausgabe verwendeten Zahlensystemen handelt es sich meist entweder um BCD-Code (4 Bit bilden eine Stelle) oder um reinen Dual-Code (meist 8 Bit $\hat{=}$ 1 Byte $\hat{=}$ 256 Zuständen von 0 bis 255 dezimal).

Ein solches Zwischenglied heißt Analog/Digital-Wandler oder kurz A/D-Wandler. Für unsere Zwecke erschien uns das sogenannte "Sägezahnverfahren" am geeignetsten.



$$\Delta S = \frac{\Delta U}{\Delta t}$$

Eine Sägezahnspannung ist eine linear ansteigende Spannung, deren bestimmende Größen die Steigung ΔS und der Maximalwert U_m oder die Periodendauer T sind (siehe Abb. 3.1.3.).

A/D-Wandler, die nach dieser Methode arbeiten, setzen demnach die Meßspannung in

Abb. 3.1.3.: Prinzipskizze einer Sägezahnspannung

ein dazu direkt proportionales Zeitmaß um, das ausgezählt und als über einen konstanten Faktor K direkt abhängiger Wert für die angelegte Spannung ausgegeben werden kann.

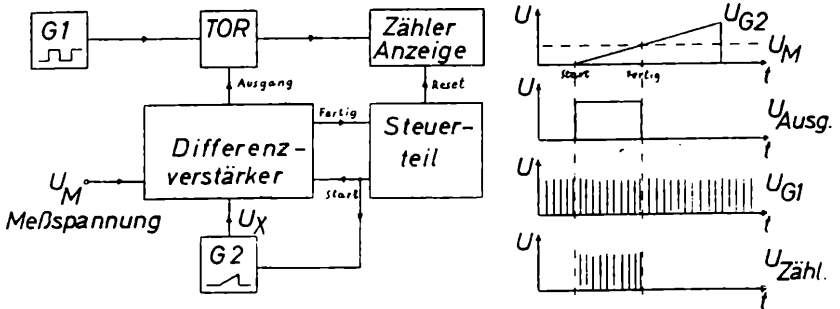


Abb. 3.1.4.: Blockschaltbild und Impulsdigramm

Die Schaltung aus Abb. 3.1.4. funktioniert dabei nach folgendem Prinzip:

Sobald der Steuerteil ein Startsignal auslöst, beginnt Generator 2 (G2) mit seiner ansteigenden Spannung und das Tor wird für die Zählimpulse von G1 geöffnet. Dieser Zustand bleibt so lange bestehen, bis $U_M < U_{G2}$ wird. In diesem Augenblick schließt der Differenzverstärker das Tor, der aktuelle Zählerstand wird angezeigt und der Steuerteil löscht den Zähler, um einen neuen Meßvorgang einleiten zu können.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in dem einfachen Aufbau und der, je nach Anwendung, recht brauchbaren Genauigkeit von kleiner 1 % des Meßbereiches. Es stellt allerdings hohe Anforderungen an die Konstanz der Sägezahnsteigung und der Frequenz von G1. Dadurch müssen Temperaturdrift- und Frequenzschwankungsfehler kompensiert werden.

3.2. Aufbau und Ausführung des Spektrografen

Als abbildendes Linsensystem verwendete ich ein Objektiv eines Feldstechers der Marke "Olympia 7 x 50", einen zweilinsigen Achromaten. Die Brennweite dieses Objektivs war der verkaufenden Firma Hertie, Bamberg, unbekannt, so daß ich zum Zweck der Brennweitenbestimmung Messungen mit Hilfe des Umschlagverfahrens durchführte. Das Objektiv wurde mit einer maßangefertigten Normalfassung an der Vorderseite des Spektrografen be-

festigt. In seiner Brennebene brachte ich eine Spaltfassung an; unmittelbar dahinter den ausgebauten Verschuß einer ehemaligen "Box"-Kamera. Das Gitterbauelement ist ebenso wie die Spaltfassung herausnehmbar. Es besteht aus insgesamt sieben Sperrholzquadraten (80 mm Kantenlänge) der Dicke 5 mm, die mit Ausnahme des mittleren, das einem oben offenen Rahmen gleicht, zentrisch kreisförmig ausgeschnitten sind. Die je zwei vorderen und hinteren Platten dienen als Linsenfassungen, die drei Platten in der Mitte stellen die Fassung für das Beugungsgitter dar. Die Linsen sind konkavkonvexe Brillengläser mit 62 mm Durchmesser, einem Krümmungsradienverhältnis von 1 : 6 und einer Brechzahl von + 4,5 dpt, die mir zu diesem Zweck von einem Angestellten der Firma Nusser, Bamberg, empfohlen worden sind. Diese Bauteile wurden auf einer Grundplatte aus 10 mm dicker, gesperrter Spanplatte angeordnet, deren Breite zum hinteren Teil des Gerätes hin zunimmt, um den Strahlengang des gebeugten Lichtes der beiden Maxima 1. Ordnung nicht zu behindern. Zur Fotografie des einen entstehenden Spektrums wurde eine Halterung zur Aufnahme von 6,5 cm x 9 cm Fotoplattenfassungen angebracht, die auch für Planfilme des entsprechenden Formats umrüstbar sind. Zur Beobachtung des anderen Spektrums 1. Ordnung wurde die Rückwand des Geräts durchbohrt und die Öffnung (Durchmesser $d = 43$ mm) mit Hilfe eines Schiebers verschlossen. Die Plattenhalterung ist zur Schärfeneinstellung verschiebbar angeordnet und kann mittels einer Stellschraube arretiert werden. Die Seitenwände des Spektrografen wurden mit 5 mm starkem Sperrholz verkleidet. Die Oberseite wurde mit zwei Klappen zur Herausnahme der Spaltfassung und des Gitterbauelements sowie mit drei Schlitzfenstern (zur Führung des Verschußschiebers und der Stellschraube der Plattenhalterung sowie zum Anschrauben eines Drahtauslösers an den Verschuß) versehen. Um Streulicht (v.a. das durch Reflexion am Gitter im Inneren des Geräts) möglichst vollständig zu absorbieren, wurde der Spektrograf innen geschwärzt. Dazu standen schwarzer Tuchstoff und handelsübliches "Scriptol" (Fa. Pelikan AG, Hannover) zur Verfügung. Der folgende Versuch verschaffte mir Klarheit darüber, welches dieser Materialien dafür geeigneter war.

Ich stellte zunächst zwei quadratische, gleich große Probestücke aus Stoff und aus mit "Scriptol" behandeltem Sperrholz her. Diese Proben be-

leuchtete ich aus 2,5 m Entfernung mit einer Natriumdampflampe. Die Intensität des reflektierten Lichtes maß ich im Abstand x zur Probe mit einem Foto - Belichtungsmesser der Firma Gossen. Ich erhielt folgende Meßtabellen (LW: "Lichtwert"):

1. Sperrholzprobe mit "Scriptol": 2. Stoffprobe:

x	25	50	100	200	mm	x	25	50	100	200	mm
LW	7,5	8,5	9,0	10,0		LW	6,5	7,5	8,5	9,5	

Da die angegebenen Lichtwerte der Intensität des gemessenen Lichtes direkt proportional sind, zeigen diese Tabellen, daß der Tuchstoff unter gleichen Bedingungen weniger Licht reflektiert als die Sperrholzprobe; er muß also ein höheres Absorptionsvermögen als diese haben. Deshalb verwendete ich bevorzugt Stoff zur Auskleidung des Spektrografen. Wo allerdings wegen der Form oder der Zugänglichkeit zu schwärzender Flächen eine Auskleidung mit Stoff zu umständlich gewesen wäre, wurde "Scriptol" verwendet. Spaltfassung und Gitterbauelement wurden nicht geschwärzt, um keine Formveränderungen des Holzes durch die Farbbehandlung zu riskieren. Fugen zwischen den geklebten Holzplatten wurden von innen mit Holzkitt (Fa. Zweihorn) abgedichtet, um störenden Lichteinfall zu vermeiden. Sämtliche Außenflächen des Spektrografen wurden mit farblosem Holzlack (Fa. Böldex) zweifach lackiert.

Die verwendeten Spalte stellte ich nach folgender Methode selbst her: Eine Rasierklinge wird der Länge nach halbiert. Eine Hälfte klebt man senkrecht zur längeren Seite der Öffnung in die eine Hälfte eines Diaphragmens. Den anderen Teil der Rasierklinge klebt man mit möglichst geringem Abstand zur anderen Hälfte daneben, wobei ein Streifen Papier als "Abstandhalter" zwischen den Hälften dient. Die verbleibenden Öffnungen rechts und links neben dem "Rasierklingspalt" schließt man am besten mit Alu-Folie. Zur Bestimmung der Spaltbreite legte ich so viele Schichten des Papiers, das ich als "Abstandhalter" verwendet hatte, aufeinander, bis eine Schicht von 1 mm Dicke entstanden war (gemessen mit einer Schublehre). Der Kehrwert der Zahl der Papierlagen in dieser Schicht war dann gleich der Spaltbreite in mm.

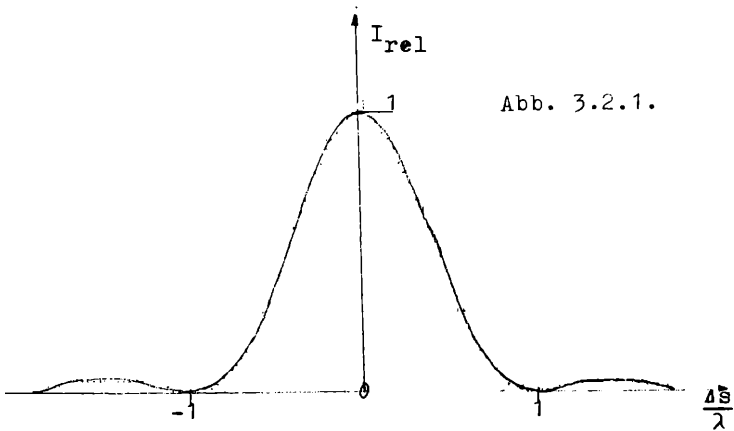
Wesentlichstes Bauelement des Spektrografen ist das optische Gitter,

dessen Wirkung auf der wellenlängenabhängigen Beugung des Lichtes an schmalen Spalten beruht. Trifft Licht auf einen Spalt, dessen Breite mit der Lichtwellenlänge vergleichbar ist, wird es aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt. Ist I die Intensität des einfallenden Lichts, I_{RES} die Intensität des gebeugten Lichts, λ die Lichtwellenlänge und Δs der Gangunterschied der Randstrahlen des in bestimmte Richtungen gebeugten Lichtbündels, so gilt folgender Zusammenhang:

$$I_{\text{RES}} = I \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \Delta s}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi \Delta s}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{G 1}) \quad (\Delta s \neq 0)$$

=====

(G 1) liefert den Kurvenverlauf von Abb. 3.2.1.



Intensitätsminima liegen bei:

$$\sin \frac{\pi \Delta s}{\lambda} = 0 \Rightarrow \frac{\pi \Delta s}{\lambda} = k\pi; \quad k \in \mathbb{Z}$$

$$\Leftrightarrow \Delta s = k\lambda \quad (\text{Minima}) \quad (\text{G 2})$$

Für $\Delta s \rightarrow 0$ ist

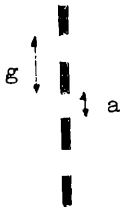
$$I_{\text{RES}} \lim_{\Delta s \rightarrow 0} I \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \Delta s}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi \Delta s}{\lambda}\right)^2} = I$$

Für Maxima wird angenommen, daß sie zwischen zwei aufeinanderfolgenden Minima liegen:

$$\Delta s_{\max} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k \in \mathbb{Z} \quad (G3)$$

Das Gitter kann aufgefaßt werden als eine Summe von Einzelspalten mit der Breite a und dem gegenseitigen Abstand g - a (vgl. Abb. 3.2.2.). g heißt Gitterkonstante und ist gleich dem Abstand entsprechender Punkte benachbarter Spalte. Einen Sonderfall stellt ein Gitter mit

Abb. 3.2.2.



$a \approx \lambda$ dar, dessen Einzelspalte als Elementarwellenzentren betrachtet werden können. Maxima treten dann auf, wenn benachbarte Strahlen einen Gangunterschied von $\Delta s = n\lambda$ ($n = 0; 1; \dots$) haben.

Ist α der Winkel, um den das Licht aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird, gilt:

$$\Delta s = g \cdot \sin \alpha \quad \text{oder} \quad \sin \alpha_{\max} = \frac{n}{g} \lambda \quad (n \in \mathbb{Z})$$

Entsprechend gilt für Minima:

$$\Delta s = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (n \in \mathbb{Z}) \quad \Rightarrow \quad \sin \alpha_{\min} = \frac{(2n + 1) \lambda}{2g} \quad (n \in \mathbb{Z}) ; \quad (G4)$$

Für den Fall $a \gg \lambda$ müssen die Intensitäten der Einzelspalte aufsummiert werden:

Als Endformel ergibt sich:

$$\Rightarrow I_{\text{RES}} = I \cdot \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi a \cdot \sin \alpha}{\lambda} \right)}{\left(\frac{\pi a \cdot \sin \alpha}{\lambda} \right)^2} \cdot \frac{\sin^2 \left(\frac{N \pi g \cdot \sin \alpha}{\lambda} \right)}{\sin^2 \left(\frac{\pi g \cdot \sin \alpha}{\lambda} \right)} \quad (G5)$$

Die beiden miteinander multiplizierten Bruchterme in (G5) haben folgende Funktion:

Der Nenner des zweiten Bruches liefert die Lage der Hauptmaxima, deren Intensität vom ersten Bruch bestimmt wird.

Für die Lage der Hauptmaxima erhält man also:

$$\sin \frac{\pi g \cdot \sin \alpha}{\lambda} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\pi g \cdot \sin \alpha}{\lambda} = k\pi \Leftrightarrow \sin \alpha_{\max} = \frac{k \lambda}{g}$$

Für ein Rowland-Gitter mit $g = 1/570 \text{ mm} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ erhält man für $k = 1$ und $\lambda = 500 \cdot 10^{-9} \text{ m}$:

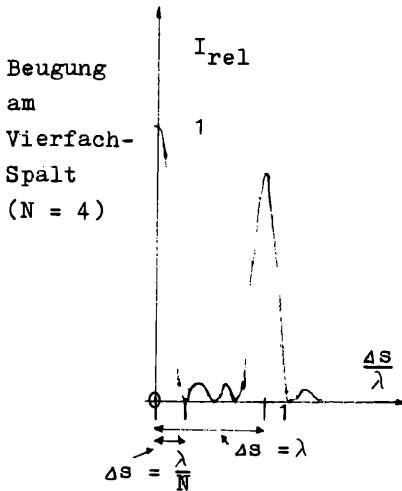


Abb. 3.2.3.

Eine eindeutige Trennung ist jedoch möglich, wenn:

$$\Delta s_2 < \Delta s_3 \Rightarrow \frac{\lambda}{\Delta \lambda} < kN$$

Wenn diese Bedingung zutrifft, sind beide Wellenlängen λ und $\lambda + \Delta \lambda$ einwandfrei zu trennen.

Nachteilig bei dieser Formel ist, daß die absolute Spaltzahl N des Gitters erforderlich ist. Um bei bekannter Gitterkonstante g auf N schließen zu können, wäre der Durchmesser d des gebeugten Lichtbündels am Ort des Gitters notwendig: $N = \frac{d}{g}$. Beim vorliegenden Spektrografen verwendete ich für d die kleinste Blende im Gitterbauelement des Geräts, die gleich der kleinsten Breite $b = 20$ mm des verwendeten Gitters ist. Zusammen mit $g = 1/570$ mm und $k = 1$ kommt man zu folgender Abschätzung des Auflösungsvermögens:

$$\frac{\lambda}{\Delta \lambda} < kN \quad k \frac{d}{g} \Rightarrow \frac{\lambda}{\Delta \lambda} < 20 \quad 570 \quad 11400$$

Damit wäre bei $\lambda = 500$ nm ein $\Delta \lambda$ von nur 0,04 nm gerade noch zu trennen. Diese theoretische Größe ist sicherlich nicht zu verwirklichen, denn bei einem Abstand Gitter - Filmebene von $y = 197$ mm lägen die Hauptmaxima der

obengenannten Wellenlängen nur $\Delta x = 5 \mu\text{m}$ auseinander. Durch Unschärfe, Körnigkeit des verwendeten Films oder allgemein die Oberflächenstruktur der verwendeten Strahlungsempfänger würden Linien mit derart geringem Abstand mit Sicherheit zu einer einzigen Linie verschmelzen. Nachprüfbar ist jedoch das folgende Versuchsergebnis: Bei der direkten Beobachtung des Emissionsspektrums einer Natriumdampflampe konnte das Natrium - $D_{1/2}$ - Dublett deutlich getrennt beobachtet werden. Mit den Wellenlängen $\lambda(D_2) = 589 \text{ nm}$ und $\Delta\lambda = 0,6 \text{ nm}$ erhält man als durchaus realistischen Wert für das Auflösungsvermögen $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 982$. Diese Auflösung kann auch in der Fotografie erreicht werden: Das Magnesium- $b_{1/2/3}$ -Triplet bei $\lambda_{1/2/3} (516,7; 517,3; 518,4) \text{ nm}$ ist auf den Negativen der Spektralaufnahmen getrennt zu erkennen. Die starke Abweichung des gesicherten vom theoretischen Wert des Auflösungsvermögens kann folgende Ursachen haben:

1. Unschärfe durch Beugung des einfallenden Lichtes am Rand des Objektivs;
2. mit Hilfe des verwendeten Spalts ist vollkommene Kohärenz des gebeugten Lichtes nicht zu erreichen, dadurch wird die Qualität der Abbildung beeinträchtigt;
3. Unschärfe durch Beugung des Lichtes an der kreisförmigen Verschlussöffnung;
4. Abbildungsfehler der Linsen im Gitterbauelement (unkorrigierte Konkavkonvexlinsen);
5. Unschärfe durch geringfügige Abweichung der Ebene des Strahlungsempfängers (z.B. Planfilm) von der Brennebene des Geräts;
6. evtl. nicht vollkommen exakte Lage der brechenden, beugenden oder empfangenden Bauelemente senkrecht zur optischen Achse des Spektrografen;

Unter Berücksichtigung dieser Umstände erscheint ein Auflösungsvermögen von $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 1000$ als realistisch.

Damit ergibt sich das Auflösungsvermögen des Spektrografen bei $\lambda = 500 \text{ nm}$ zu $\Delta\lambda = 0,5 \text{ nm}$.

3.3. Die Photometerschaltung

a) Elektrischer Teil:

Um den in 3.1. erwähnten Anforderungen zu genügen, wurde folgende einfache Schaltung gewählt:

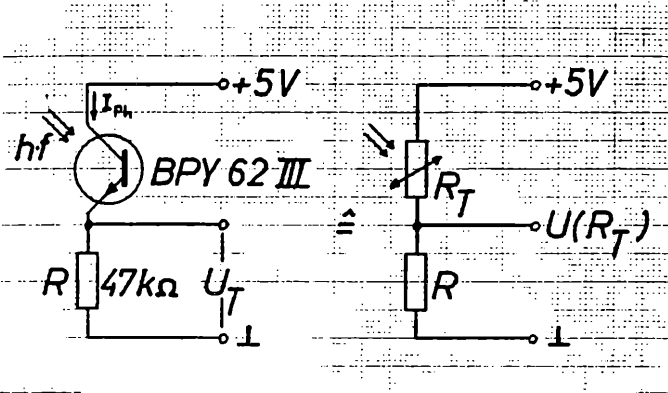


Abb. 3.3.1.: Schaltbild und Prinzipschaltbild
des Photometers

Bei dieser Kombination handelt es sich um eine Reihenschaltung eines Festwiderstandes R mit einem lichtabhängigen Bauteil, dem Phototransistor. R wurde dabei so gewählt, daß sich bei mittlerer Spektrums-helligkeit über R eine Spannung von ca. 2,5 V abgreifen läßt; d.h. R und R_T bilden einen Spannungsteiler, für den gilt:

$$R \approx R_T \quad \text{bei} \quad I_M \approx \frac{\sum_{i=0}^{n-1} I(\lambda_0 + \Delta\lambda)}{n} \quad (1)$$

wobei I_M die mittlere Intensität, $I(\lambda)$ die Intensität in Abhängig-keit von der Wellenlänge und n die Anzahl der Messungen bedeutet. Der Transistor wurde hier ohne Basisanschluß genutzt, da die Empfind-lichkeit für die Versuche ausreichte und die relative spektrale Em-pfindlichkeitskurve (siehe unten) sich auf einen offenen Basisanschluß bezog. Eine Beschaltung mittels Basisvorwiderstand und - Spannungs-teiler würde entweder die Ansprechzeit verkürzen oder die Photoempfind-lichkeit herabsetzen, was beides nicht nötig bzw. unbrauchbar wäre. Die Schaltung ist so aufgebaut, daß sich zwischen Basis und Kollektor eine Sperrschicht - d.h. eine an freien Ladungsträgern verarmte Zone - bildet. Treffen jetzt Photonen aus dem sichtbaren Bereich des Spektrums auf diese Grenzschicht, so können sie Elektronen aus dem Verband lösen und damit dem Photostrom zuführen.

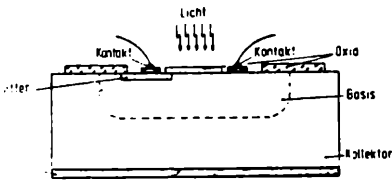


Abb. 3.3.2.:
Aufbau eines Silizium - Photo -
Transistors in Planartechnik aus
[13] S. 357 Bild 3 entnommen.

Um möglichst viele Lichtquanten zu absorbieren, ist der Photo - Transistor so aufgebaut, daß ein großer Teil der einfallenden Strahlung auf den p-n-Übergang zwischen Basis und Emitter fällt und somit zu dem Photostrom beiträgt (vgl. Abb. 3.3.2.).

Damit ergibt sich für die relative spektrale Empfindlichkeit folgende Kurve:

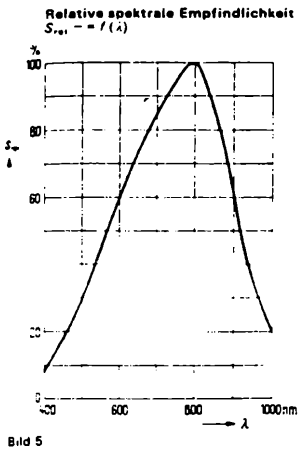


Abb. 3.3.3.:
relative spektrale Empfindlich-
keit des BPX 62 $\cong$ BPY 62
da dritter Buchstabe nur eine
professionelle Kennung z.b.V.
ist.

Diese Grafik wurde aus [13] S. 359 Bild 5 entnommen und gilt eigentlich für den Phototransistor BPX 62. Da die Kennzeichnung allerdings nicht ganz eindeutig ist, diese Kurve der eines anderen Transistors sehr ähnelt (BP 103 [13] S. 391 - 395), der dritte Buchstabe der Typenkennzeichnung nur ein Hinweis auf professionelle Veränderungen ist (hier: Einbau in Mikrokeramikgehäuse) und somit die Bezeichnung mit der des von mir verwendeten Phototransistors übereinstimmt, wurde deshalb diese Empfindlichkeitskurve übernommen und auch später in dem Auswertungspro-

gramm zur Korrektur der erhaltenen Meßreihen verwendet.

Für die Kurvenform konnte keine Begründung gefunden werden, deshalb kann für die folgende Betrachtung keine Gewähr übernommen werden.

Für die Kurve könnten demnach diese Kriterien gelten:

f_g : Die Grenzfrequenz begrenzt den Graphen zum Infraroten hin; wird in unserem Fall aber ständig überschritten und fällt demnach im Bereich unserer Messungen nicht ins Gewicht.

Sekundärelektronen: werden durch Stoßionisation energiereicher Photo-Elektronen ausgelöst und erhöhen den Photostrom, ohne direkt von Lichtquanten abhängig zu sein. Dieser Effekt verstärkt sich mit abnehmender Lichtwellenlänge und könnte, unter anderem, für den Anstieg der Kurve im Bereich von 1000 bis 800 nm verantwortlich sein.

äußerer Photoeffekt: $\Delta W_{\max}$ wird überschritten und somit Elektronen befähigt, das Halbleitermaterial zu verlassen, was ebenfalls mit kleinerem λ zunimmt, dem Sekundärelektroneneffekt aber entgegenläuft und an dem Abstieg der Kurve ab 800 nm teilhaben könnte.

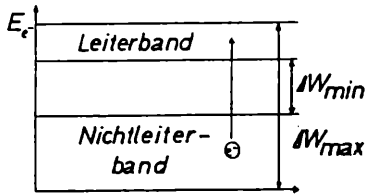


Abb. 3.3.4.:

Energiezustände eines Elektrons im Halbleiterkristall.

Unter diesen Voraussetzungen kann man für konstante Wellenlänge des einfallenden Lichts eine direkte Proportionalität zwischen der einfallenden Lichtintensität I_L und dem Photostrom I_{ph} annehmen:

$$I_L \sim I_{ph} \quad \text{aus } U_T \quad R_T \quad I_{ph} \quad \text{folgt dann:}$$

$$I_L \sim \frac{1}{R_T} \quad \text{und mit} \quad U(R_T) = \frac{R \cdot U}{R_T + R} \sim \frac{1}{R_T} \quad \text{folgt:}$$

$$U(R_T) \sim I_L$$

Damit gilt eine direkte Abhängigkeit der Meßspannung von der einstrahlenden Intensität des Lichts.

b) Mechanischer Teil

Wegen zwei Bauteilen wurde keine besondere Platine entwickelt und deshalb das Ganze frei verlötet. Die Anschlüsse bildeten drei Krokodilklemmen, die die Versorgungsspannung und am Ausgang die Meßgröße bereitstellten. Für die Leitungen wurde keine Abschirmung vorgesehen, da, wie aus der Brummspannungsbetrachtung ersichtlich, keine Veränderung eintrat.

Um den Kristall im Spektrum verschieben zu können, wurde eine Befestigung hergestellt, die in die Photoplattenhalterung des Spektrometers paßt und das indirekte Ablesen der Wellenlänge durch einen darauf befestigten Maßstab erlaubt.

Diese Befestigung besteht aus zwei Teilen; der Transistorführung, die in die Photoplattenhalterung geschoben wird, und eigentlich verschiebbarem Teil, der Transistorhalterung (siehe Abb. 3.3.5.)

Da der Phototransistor im ursprünglichen Zustand eine Linse besitzt, diese seine optisch aktive Fläche vergrößert, absorbierend wirkt und außerdem unkontrollierbare Brennpunktveränderungen mit sich bringt, wurde sie vorsichtig entfernt.

Als strahlungsempfindliche Fläche ergab sich somit:

$$A \approx 0,38 \times 0,38 \text{ mm}^2$$

Diese Maße wurden aus [13] S. 391 für den Silizium-Planar-Transistor BP 103 übernommen, da es sich bei dem BPY 62 ebenfalls um einen Silizium-Transistor in Planartechnik handelt.

3.4. Der Analog/Digital-Wandler

Wie man aus dem Schaltungsüberblick (Abb. 3.4.1.) erkennen kann, besteht der eigentliche Analog-Digital-Wandler aus vier Baugruppen:

- Oszillator
- Tor
- D/A-Wandler aus Zähler und Treppenspannungsgenerator
- Komparator mit Pegelwandler

Dazu kommen noch die Kanalauswahl, die es über den Computer erlaubt, bis zu 16 verschiedene Meßwerte hintereinander einzulesen, die Spannungsversorgung, die in den einzelnen Schaltplänen aus Vereinfachungsgründen

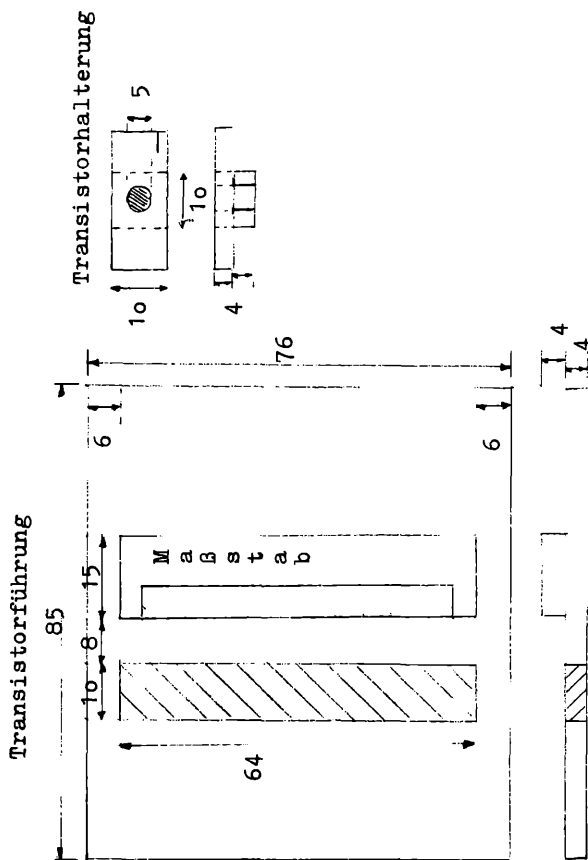


Abb. 3.3.5.: Rißzeichnung der Transistorführung und -Halterung jeweils von oben und von der Seite. Maßstab 1 : 1 (alle Angaben in mm).

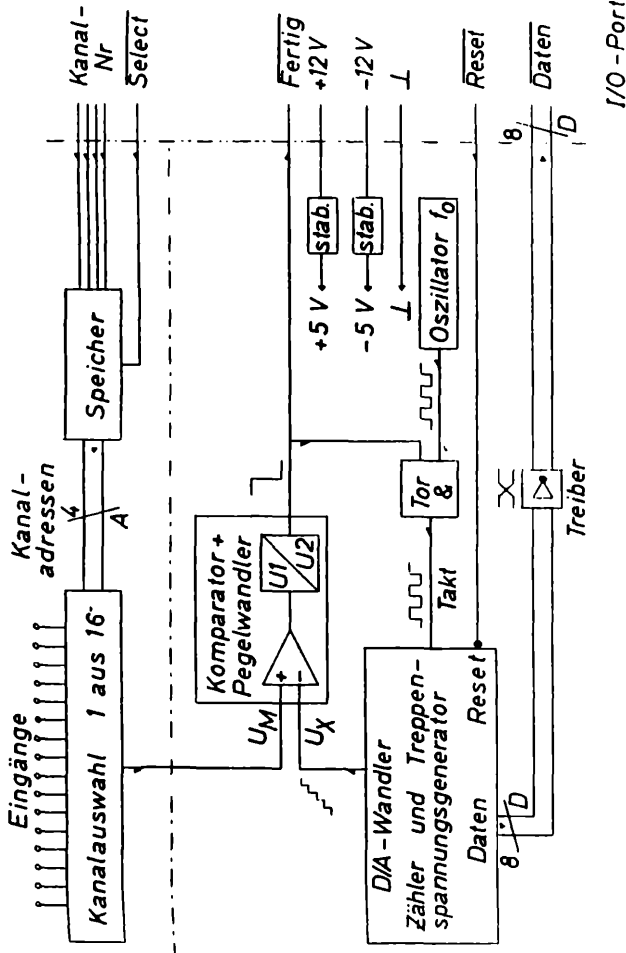


Abb. 3.4.1.: Blockschaltbild des A/D-Wandlers, der Kanalauswahl und der Kommunikationsleitungen mit dem Computer.

meist nicht mit eingezeichnet wird, und der I/O-Port (= In-Output-Port $\hat{=}$ Computeranschluß).

Bevor ich zur Beschreibung der einzelnen Komponenten übergehe, muß ich noch kurz auf die verwendete Terminologie eingehen, die auch in der Literatur und den CMOS-IC-Datenblättern verwendet wird, und auf die ich hiermit noch einmal hinweise.

In der gesamten Schaltung wird positive Logik verwendet; d.h. logisch High ($\hat{=}$ 1 Abk.: H) steht für positive Betriebsspannung und logisch Low ($\hat{=}$ 0 Abk.: L) für 0 V. In den Schaltplänen verkörpert U_B dabei die positive Betriebsspannung = 5 V. Wird eine Signalbezeichnung mit einem Querstrich darüber versehen (z.B. FERTIG), so bedeutet das, daß sein aktiver Zustand bei L eintritt; was soviel bedeutet wie: FERTIG ist mit 'wahr' zu bewerten, wenn die Leitung 0 Volt führt. Somit werden also quasi Negativ-Logik-Signale durch einen Balken gekennzeichnet,

Um besonders bei parallelen Daten und Adressen nicht alle Verbindungen zeichnen zu müssen, wird statt mehrerer Leitungen ein dickerer unausgefüllter Balken verwendet, den ein Schrägstrich kreuzt, an dem die Anzahl und die Art der Leitungen steht (z.B. $\frac{8}{D}$ für acht Datenbits). Bei zeichnerischen Signalplänen entspricht, falls durch Kennzeichnung nicht anders vereinbart, dem unteren Balkenniveau L und dem oberen H (z.B. $\overline{\text{L}}$). Auf eine x-Achse $\hat{=}$ t wird hier meist verzichtet, da alle Signale direkt von dem zugeführten Taktsignal abhängen und dieses als Anhaltspunkt stets vorgegeben ist.

Die laufende Numerierung der Bits wurde hier von 1 bis 8 vorgenommen, im Gegensatz zur Literatur, die meist von 0 bis 7 durchnummeriert. Dabei entspricht Bit 1 dem mit der niedrigsten Wertigkeit und Bit 8 dem mit der höchsten Signifikanz. Neben dieser deutschen Bezeichnung wird auch die aus dem amerikanischen Sprachschatz entlehnte Kennzeichnung 'highest' - und 'lowest' - Bit verwendet.

Bei dem Computer handelt es sich um einen 'COLOUR-Genie EG 2000' der Firma Eaca, Japan. Er ist mit 16 kByte DRAM und 16 kByte ROM ausgestattet (Grundversion) und besitzt einen Z 80 (Zilog) als Prozessor.

A. Der Oszillator:

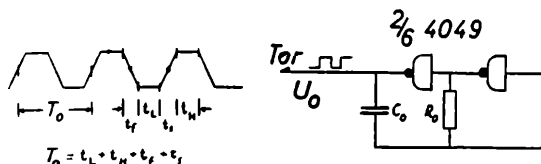


Abb. 3.4.2.: Schaltbild des Oszillators mit theoretischem Ausgangssignal.

Es handelt sich hier um zwei hintereinandergeschaltete Inverter des Bausteins 4049, der insgesamt sechs Stück davon besitzt, und einen Kondensator mit Widerstand, die die frequenzbestimmenden Bauteile darstellen. Für die Ausgangsfrequenz gilt dabei:

$$f \approx \frac{1}{2,2 \cdot R_0 \cdot C_0} \quad (5); \text{ wobei } R_0 = 47 \text{ k}\Omega \text{ und } C_0 = 340 \text{ pF}$$

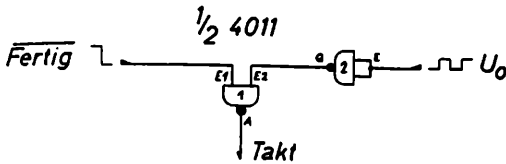
daraus ergibt sich dann eine Arbeitsfrequenz von ca. 30 kHz. Die Schaltung und die ursprünglichen Bauteilwerte (siehe 3.3.D) wurden aus [2] S. 7 übernommen, fanden sich dann aber auch (teilweise ausführlicher dargestellt) in [9] S. 4 - 16 bis 4 - 20 und im Unterricht des Elektronik-Grundkurses.

Zur Funktion der Schaltung ist nur zu sagen, daß durch ständige Umladung von C_0 durch die beiden Inverter am Ausgang eine rechteckförmige Spannung erscheint, deren Periode durch die obige Formel von R_0 und C_0 abhängt. Eine ausführliche Erklärung des Sachverhaltes ist in [9] (4 - 16 ff) zu finden und würde hier zu weit führen.

An die Schaltung werden nur wenige Anforderungen gestellt. Wichtig ist nur, daß die Zeiten für ansteigende ($\hat{= t_s}$) und abfallende Flanke ($\hat{= t_f}$) kleiner als $5 \mu s$ sind.

Aber selbst das ist nicht unbedingt nötig, da durch die nachfolgende Bearbeitung des Signals eine genügende Flankensteilheit gewährleistet wird. Auch das Verhältnis von t_H und t_L ist für die weitere Verwendung uninteressant, da es in der gesamten Schaltung nur auf die Steilheit der Flanken ankommt.

B. Das Tor:



Torschaltbild

E1	E2	A			E	Q		
L	L	H	} gesperrt	=: D1	L	H	$\bar{E} \rightarrow Q$	=: D2
L	H	H			H			
H	L	H	} geöffnet					
H	H	L			($\bar{E2} \rightarrow A$)			

Abb. 3.4.3.: Gatter-Logikdiagramme

Ein halber Baustein des Typs 4011 bestehend aus vier NAND-Gattern bildet die Schaltung des Tors. Gatter 2 ist als Inverter geschaltet und hat nur die Aufgabe, die Flankensteilheit des vom Oszillator kommenden Taktsignals zu gewährleisten, dabei ist eine Invertierung des Signals ohne Bedeutung für die weitere Funktion.

Gatter Nr. 2 bildet das eigentliche Tor. Wie aus dem Logikdiagramm D1 zu erkennen ist, kann man es als von E1 gesteuertes Durchlaßfilter für das Signal an E2 auffassen. Solange E1 auf L bleibt, ist der Ausgang unabhängig von E2 immer H. Erst wenn E1 durch den Komparator auf H gelegt wird, folgt der Ausgang invertiert dem Eingang ($\bar{E2} \rightarrow A$). Ebenso stoppt das Tor jede Weitergabe von Taktimpulsen, sobald E1 wieder auf L geht.

Das Tor wird dazu benötigt, um in der Zeit, in der der Computer das FERTIG-Signal erkennt und das Einlesen des Datenbytes befiehlt, keine weiteren Impulse an den Zähler gelangen zu lassen und dessen Ergebnis damit nicht zu verfälschen.

C. Der D/A-Wandler (siehe Abb. 3.4.4.)

Die beiden wichtigsten Teile sind hier der Dualzähler 4040 und das Widerstandsnetzwerk. Letzteres besteht aus einer aneinandergereihten

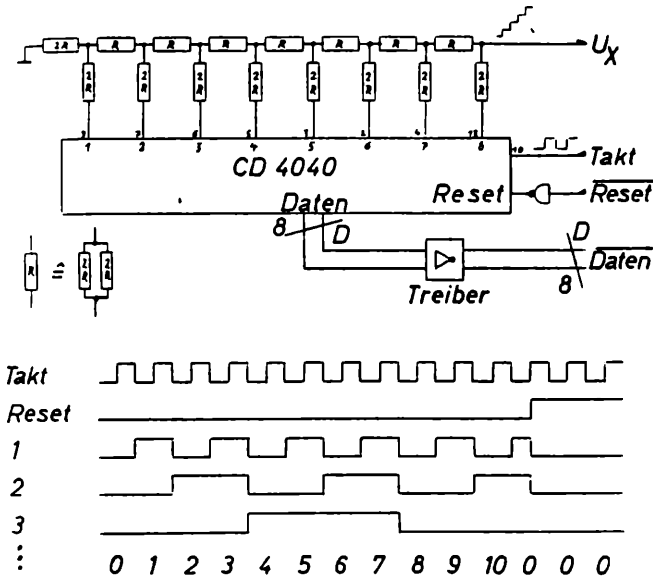


Abb. 3.4.4.: Schaltplan und Impulsdiagramm der wichtigsten Signale

T-Verknüpfung von acht R- und 2R-Widerständen; wobei R wiederum aus einer Parallelschaltung von zwei 2R-Widerständen zusammengesetzt ist. Unter Verwendung der Tatsache, daß diese Grundschialtung der Elektrotechnik in Abhängigkeit vom dualen Zählerstand, dessen Ausgänge jeweils nur H- oder L-Pegel aufweisen dürfen, eine treppenförmige Spannung liefert (eine Herleitung dieses Sachverhaltes ist mir aus Mangel an Quellen leider nicht möglich, wurde aber experimentell bestätigt), konnte mit dem Zähler ein einfacher D/A-Wandler aufgebaut werden. Dieser erlaubt es, taktabhängig ($\hat{=}$ zeitunkritischem Verhalten, da Takt jederzeit frei wählbar) eine dem Ausgang des dualen Zählers proportionale Spannung zu erzeugen. (richtiger: eine Zählerstand-Spannungsintervall-Zuordnung).

Diese kann dann vom Komparator weiterverarbeitet werden und stellt die Vergleichsspannung zu U_M dar. Dabei gilt für U_X :

$$U_X = \frac{5V}{2^8} \cdot \sum_{i=1}^8 x_i \cdot 2^{i-1} \quad ; \quad x_i \in \{0;1\} \quad (6)$$

U_X -Maximal ergibt sich somit für alle $x_i \in \{1\}$ zu:

$$U_{XM} = \frac{5V}{2^8} \cdot \sum_{i=1}^8 2^{i-1} = \frac{5V}{2^8} \cdot (2^8 - 1) = 5V - \frac{5V}{2^8} \approx 4,89 \text{ V} \quad (7)$$

und entspricht demnach der Betriebsspannung abzüglich einer Intervallbreite von 19,5 mV. Das bedeutet, daß der A/D-Wandler bei Spannungen über diesem Wert 'durchdreht', da U_X U_M nicht überschreiten und ein FERTIG-Signal auslösen kann.

Dieser Nachteil kann auf zwei verschiedene Arten behoben werden. Technisch könnte durch das ungenutzte 9. Bit des Zählers eine Überlaufmeldung realisiert werden, die über einen zusätzlichen Treiber und das ungenutzte Bit des I/O-Ports dem Computer eine Bereichsüberschreitung mitteilt. Da aber alle Treiberbausteine 4049 belegt sind, wurde deshalb die zweite Möglichkeit gewählt - eine Lösung mittels Software. Hier wird davon ausgegangen, daß sich für eine Spannung, die sich innerhalb des 'erlaubten' Bereichs von 0 bis ca. 4,89 V befindet, innerhalb eines gewissen Zeitraums ein FERTIG-Signal ergeben muß. Für $T_{\max}$ gilt dabei:

$$T_{\max} \approx 512 \cdot T_0 \quad (T_0 \hat{=} \text{Oszillatorschwingungsdauer}) \quad (8)$$

Innerhalb des Einleseprogramms (siehe unter 4.2.) kann jetzt eine Zählschleife erstellt werden, in der das FERTIG-Signal ständig abgefragt und der Schleifenzähler um eins erhöht wird, falls kein positives Resultat eintritt. Überschreitet jetzt die Zählvariable einen bestimmten Wert, wird davon ausgegangen, daß die Schaltung eine Meßspannung anliegen hat, die über der größtmöglichen von 4,89 V liegt. Um trotzdem wenigstens ein Näherungsergebnis zu erhalten, wird die Ergebnisvariable mit dem größtmöglichen Wert geladen und zu dem aufrufenden Programm zurückgekehrt. Gleichzeitig wird aber noch ein Überlauf-Flag gesetzt, welches das Hauptprogramm abfragen und weiterverarbeiten kann.

Die Funktion des Dual-Zählers 4040 läßt sich sehr einfach als Frequenzteilung darstellen, wobei der erste Ausgang die halbe Rechteckfrequenz

des Takt-Eingangs und Ausgang Nr. 2 f/2 von Nr. 1 zur Verfügung stellt. Dadurch erfolgen die Spannungsänderungen schnellstens mit $f_0/2$ d.h. der Oszillator schwingt ca. 512 mal, bis eine Meßspannung überschritten ist, die sich im letzten möglichen Intervall befindet. Der Zähler wird zu Beginn einer Messung durch ein H-Signal am RESET-Eingang gelöscht, so daß alle Ausgänge auf L zu liegen kommen und mit dem Eintreffen des Taktes die Vergleichsspannungserzeugung beginnen kann.

Noch ein Hinweis zu dem Widerstandsnetzwerk:

Wie aus [9] 5-33 Bild 5 - 24 zu erkennen ist und auch im Begleittext erwähnt, kommt es bei den Netzwerkwiderständen nur auf das Verhältnis von R und $2R$ an, das möglichst genau eingehalten werden sollte. Aus diesem Grund wurden bei der Schaltung zwei weitere Tricks verwendet. Zum ersten wurden die R-Widerstände aus zwei $2R$ -Resistoren gebildet und zum zweiten alle Widerstände von der Kette gekauft; d.h. sie kamen alle aus einem Fertigungsgang. Unter der Voraussetzung, daß die relative Toleranz der Widerstände einer Produktionsserie wesentlich geringer ist als ihr absoluter Fehler zu ihrem Nennwert, konnte dadurch auch der Toleranzfehler des Netzwerks wesentlich verringert werden.

Eine genaue Überprüfung dieses Sachverhaltes konnte leider nicht mehr vorgenommen werden, da die Netzwerkwiderstände zum Zeitpunkt der Fragestellung schon eingelötet waren. Durch indirekte Kontrolle des Schirmbilds eines Oszillographen wurde aber eine Bestätigung des Sachverhaltes erreicht, da die Stufen im Bereich der Ablesefehler am Schirm konstante Weiten aufwiesen.

D. Der Komparator mit Pegelwandler:

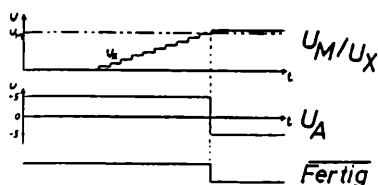
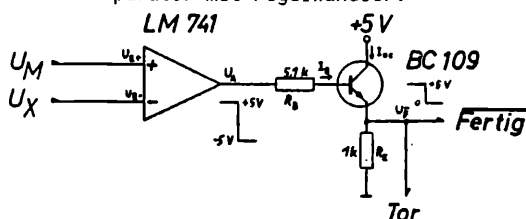


Abb. 3.4.5.:
Komparator LM 741,
Pegelwandler und
Signallaufplan

Herz des Analog-Digital-Wandlers ist der Operationsverstärker LM 741, der hier als Komparator von U_M und U_X eingesetzt wird. Für einen idealen OV mit dem Verstärkungsfaktor f gilt dabei:

$$\Delta U_E \quad U_{E+} - U_{E-} \quad \text{und damit:} \quad U_A = f \cdot \Delta U_E \quad (9)$$

Da in dieser Schaltung keine Rückkoppelung angewandt wird, hat der reale LM 741 eine Leerlaufverstärkung von mehreren Hunderttausend. Weil U_A aber durch die Betriebsspannung begrenzt ist, 'hängt' der OV immer am oberen oder unteren Ende derselben, da:

$$\Delta U_E > \frac{5V}{f} \approx 50 \mu V \quad \text{für } f = 10^5 \quad (10)$$

immer der Fall ist (siehe Brummspannungsbetrachtung in 3.5.). Somit kann man den OV als 'Signum-Generator' auffassen, wobei dann für U_A gilt:

$$U_A = 5V \cdot \text{SGN}(\Delta U_E)$$

Eine Messung läuft nun so ab, daß zu Beginn U_M einen Wert zwischen 0 und 5 V besitzt und $U_X = 0$ V. Nach (9) ist $U_A = H$ da $\Delta U_E > 0$. Steigt jetzt im Laufe eines Meßdurchgangs U_X und überschreitet U_M so wird $\Delta U_E < 0$ und $U_A = -5$ V.

Da die weiteren CMOS-IC's nur Spannungen von L bis H verarbeiten können, folgt dem OV ein Pegelwandler. Er besteht aus einem npn-Transistor (BC 109), der hier die Funktion eines Schalters übernimmt und alle negativen Spannungen sperrt. Liegt an der Basis H an, so leitet der Transistor und U_B fällt gänzlich an R_E ab, an dem es auch als FERTIG-Signal abgegriffen wird. Schaltet der Ausgang des OV aber auf -5 V, so sperrt der Transistor und über ihn fällt jetzt die volle Versorgungsspannung ab, womit bewirkt wird, daß U_F auf L geht. Das Ergebnis ist dann H als Ausgangssignal falls der OV sich noch in arbeitendem Zustand ($\hat{=} U_E > 0$) befindet und L als Signal, daß FERTIG wahr ist und U_X U_M überschritten hat.

Dieses Ergebnis wird dann an den Computer und an das Tor weitergeleitet, um das Einlesen des Ergebnisbytes und die Sperrung des Taktes zu bewirken.

Der LM 741 besitzt eine Flankensteilheit von $S_F = 0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$. Dadurch ergaben sich bei der ursprünglich recht hohen Taktfrequenz von ca. 400 kHz bei $R_O = 47 \text{ k}\Omega$ und $C_O = 10 \text{ pF}$ einige Schwierigkeiten, die auf die Schaltzeit zurückzuführen waren. Für U_F gilt aus:

$$I_{CE} = I_B \cdot \beta \quad U_F \quad I_{CE} R_E \quad I_B \quad \frac{U_A - 0,7V}{R_B + R_E}$$

$$U_F \quad R_E \cdot \beta \quad \frac{U_A - 0,7V}{R_B + R_E} \quad (\beta \hat{=} \text{Transistorverstärkung} \approx 150) \quad (11)$$

und damit:

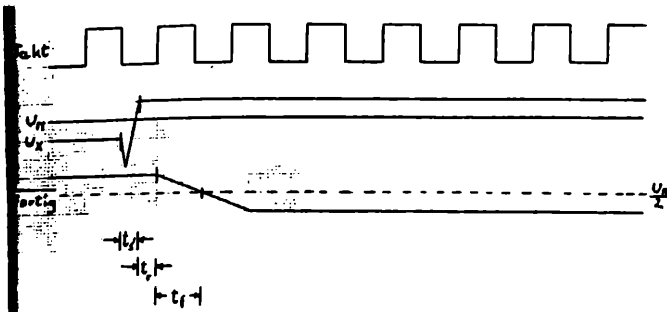
$$U_A \quad \frac{U_F (R_B + R_E)}{R_E} + 0,7V \quad (12)$$

Da bei CMOS-IC's der logische Pegel bei $\frac{1}{2} U_B$ wechselt, muß demnach nach (12) U_A mindestens 0,8 V betragen, damit U_F als H interpretiert wird. Dem entspricht wiederum mindestens eine Senkung auf diesen Betrag, um L zu erreichen. Als Schaltzeit gilt dann:

$$t_s = \frac{U_B - U_A}{S_F} \approx 8,4 \mu s \quad (13)$$

Um den Zähler zu stoppen bzw. das Tor zu schließen bevor ein weiterer Zählimpuls eintrifft, muß $\frac{T_0}{2} > t_s$ sein.

Mit dieser Beziehung wird die Taktrate auf einen maximalen Wert beschränkt, der sich folgendermaßen ergibt:



$$t_{s,1} = t_s + t_r + t_f$$

$$t_{s,1} \approx t_s \Rightarrow$$

$$f = \frac{2}{t_s} \approx 238 \text{ kHz} \quad (14)$$

($t_{s,1}$ = Gesamt-schaltzeit des Tors)

Abb. 3.4.6.: Signalverlauf des realen A/D-Wandlers mit entsprechenden Reaktions- und Schaltzeiten

(t_s = Stabilisierungszeit des 4040

t_r = Durchlauf- und Reaktionszeit des OV und des Pegelwandlers

t_f = Zeit bis der logische Pegel von FERTIG als Low interpretiert wird)

Dadurch dürften die Probleme, die sich bei dieser hohen Taktrate ergaben, verdeutlicht sein. Der Faktor 2 in (14) ergibt sich aus der Teilung des Oszillatorsignals durch den 4040.

Aus Abb. 3.4.6. läßt sich außerdem erkennen, wie bestimmte Schaltzeiten sich auf die maximale Taktfrequenz auswirken. Eine quantitative Bestimmung ist außer bei den vorgegebenen Daten sehr schwer und wurde deshalb als Null angenommen. Hier möchte ich noch folgendes einwerfen:

Bei den bisher behandelten Fehlerquellen handelt es sich um konstante Veränderungen des Ergebnisses, die eine Verfälschung in Richtung Erhöhung des Meßbytes ergeben. Kann man den Fehler rechnerisch und/oder praktisch bestimmen und eine Korrektur in der Auswertungssoftware einbringen, so erlaubt dies natürlich wesentlich höhere Taktraten als sie hier vorgestellt werden. Damit würde sich das Verwendungsspektrum des A/D-Wandlers wesentlich erhöhen und vielleicht sogar zur Eingabe von Sprache über ein Mikrofon eignen.

Aus Optimierungsgründen und aus oben angeführten Wünschen heraus, habe ich versuchsweise den pinkompatiblen (= gleiche Anschlußbelegung) CMOS-0V 3130 eingesetzt, dessen Flankensteilheit $10 \text{ V}/\mu\text{s}$ beträgt. Das wäre eine Verbesserung um den Faktor 20 zum LM 741 und würde eine entsprechend höhere Taktfrequenz erlauben. Diese würde allerdings schon an die Grenzen der Möglichkeiten stoßen, weil f_0 dann ca. 2,4 MHz betragen würde und der 4040 als maximale Taktrate nur 2 MHz zuläßt.

Trotz mehrerer Versuche gelang es mir nicht, diese Version funktions-tüchtig zu machen. Die Schwierigkeiten lagen hier vor allem bei dem neuen 0V, der sich so verhielt, als ob nur eine Spannungsversorgung von ca. 3 V angelegt gewesen war und erlaubte auch nur eine Komparation in diesem Bereich. Außerdem schien seine Ausgangsleistung für diese Schaltung zu gering zu sein, da er den Pegelwandler nur auf 2 V treiben konnte.

Hier liegen vor allem noch Möglichkeiten, die vorhandene Schaltung zu verbessern. Zu beachten wäre hier allerdings der nicht zu unterschätzende Zeitfaktor für die Software. Eine Erhöhung der Meßrate um den Faktor 20 o.ä. würde sich nur dann rentieren, wenn auch das Einleseprogramm eine entsprechende Schnelligkeit aufweisen würde. Hier wäre es sehr zu empfehlen, in Maschinensprache zu arbeiten.

Bei dem Speicher handelt es sich um einen 4042, der mit vier R/S-Flip-Flops ausgestattet ist, die in Abhängigkeit vom Pol-Eingang entweder bei positiver oder negativer Flanke am CS-Eingang (= Chip Select) die an D1 - 4 anliegenden Daten übernehmen und an den Ausgängen Q1 - 4 wieder erscheinen lassen. Dieser Zustand bleibt auch erhalten, wenn sich die Daten an D1 - 4 ändern, aber CS auf einem Pegel verbleibt und nicht die entsprechende Flanke durchläuft. Damit beim Umprogrammieren des I/O-Ports im Falle kurzer undefinierter Zustände des CS-Signals kein Flankendurchlauf stattfindet, wurde noch zusätzlich ein 1 M Ω -Widerstand eingefügt, der für definierte Pegel bei offener oder unkontrollierter CS-Leitung sorgt.

F. Die Spannungsversorgung

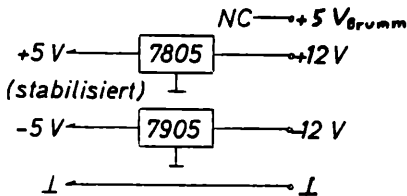


Abb. 3.4.8.:

Anschluß und Stabilisierungsbausteine

Ursprünglich wurden, außer den -5 V für die beiden 4051, alle benötigten Spannungen durch die Computer-Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Zur Erzeugung der -5 V wurde dabei ein Spannungsregler des Typs 7905 verwendet, der an seinem Ausgang stabilisiert die gewünschte Spannung bereitstellt. Als Eingangsspannung mußten aber mindestens -7,8 V anliegen, so daß hierfür die -12 V-Leitung der Schnittstelle verwendet wurde.

Im Laufe einiger Experimente in der Entwicklungsphase des A/D-Wandlers wurde mittels eines Oszilloskopes auf der +5 V-Leitung, wie sie aus dem Colour-Genie kommt, eine Brummspannung von ca. 200 mV_{SS} festgestellt, die auf die recht hohen Strombedürfnisse der TTL-IC's zurückzuführen ist. Dadurch wurde auch für die positive Betriebsspannung eine Stabilisierung nötig. Dafür wurde dann nachträglich auf der Platine ein +5 V-Festspannungsregler 7805 vorgesehen; der, mit +12 V am Eingang versorgt, stabilisierte +5 V am Ausgang bereitstellt. Diese Stabilisierung hat sich später als sehr nützlich erwiesen, da

einige Fehler einerseits verschwanden und andererseits ihren wahren Ursachen nähergebracht werden konnten.

4.1. Visuelle Beobachtungen

Zur direkten Beobachtung projizierte ich das Sonnenspektrum durch den geöffneten Schieberverschluss am hinteren Ende des Geräts auf ein Stück weißen Zeichenkartons. Dabei waren (trotz unzureichender Scharfeinstellung) bereits sechs Linien deutlich zu erkennen: zwei im blauen, eine im blaugrünen, eine im grünen, eine im rötlich-gelben und eine im roten Spektralbereich. Ein Vergleich mit einer einfachen Darstellung des Sonnenspektrums (in: Lit. Verz. Nr. 3, Tafel II, Teil A) ließ mich folgende Zuordnung vermuten: 1. Calcium H & K, 2. Eisen G, 3. H β , 4. Eisen E, 5. Natrium D und 6. H α (in der obigen Reihenfolge von blau nach rot). Über eine Vermutung hinausgehende Identifikationen waren damit noch nicht möglich.

4.2. Fotografie der Spektren

Bis zur ersten brauchbaren Aufnahme waren dabei noch einige Schwierigkeiten zu überwinden: Es mußte die passende Kombination aus Objektivblende, Spaltbreite, Belichtungszeit, Stellung der Plattenhalterung, Filmtyp, Entwickler und Entwicklungszeit ermittelt werden. Um die "eingebaute" Belichtungszeit des "Box"-Verschlusses verwenden zu können, blendete ich das Objektiv auf 25 mm Durchmesser ab. Dadurch wurde gleichzeitig das Kontinuum schwächer, so daß die Linien vom hellen Hintergrund nicht mehr überstrahlt wurden. Ein Problem war die Spaltbreite. Ich machte die Beobachtung, daß sowohl bei relativ großer (0,5 mm) als auch bei sehr kleiner (0,03 mm) Spaltbreite die in 4.1. beschriebenen Linien nur sehr schwach zu erkennen waren, während sie bei 0,09 mm Spaltbreite recht deutlich hervortraten. Ich führe das auf folgende Gründe zurück (Vermutungen):

1. Bei großer Spaltbreite könnten die Linien derart "verwaschen" und breit abgebildet worden sein, daß sie nur kaum merklich dunklere Stellen im Kontinuum darstellten, die nicht erkennbar waren.
2. Bei geringer Spaltbreite dürften die Linien so fein und das Kontinuum so lichtschwach gewesen sein, daß sie auch hier kaum zu sehen waren.

Mit dem schon erwähnten Spalt von 0,09 mm Breite führte ich dann sämtliche Beobachtungen und Fotografien durch. Als Filmmaterial verwendete ich zunächst panchromatisch sensibilisierten Planfilm der Fa. Agfa-Gevaert ("Agfapan 25") mit einer Empfindlichkeit von 25 ASA/15 DIN. Später setzte ich auf Empfehlung einer Angestellten der Fa. Foto-Wietzig, Bamberg, "Agfaortho 25" ein, der äußerst feinkörnig und deshalb noch auflösend, aber - nachteiligerweise - orthochromatisch, d.h. nicht rot-empfindlich ist.

Das geht auch aus folgender Grafik hervor:

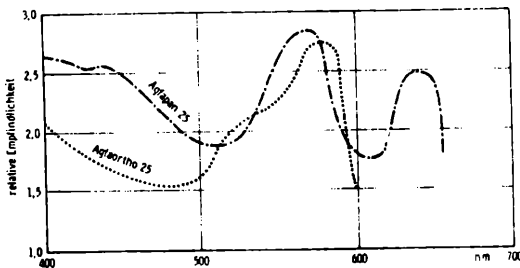
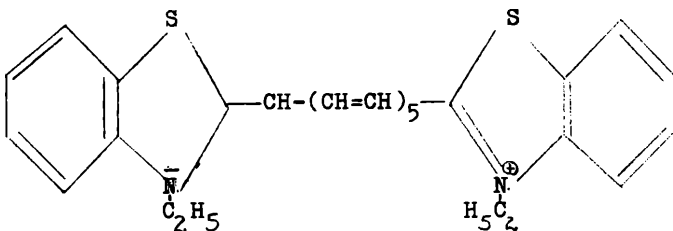


Bild 2.4. Spektrale Empfindlichkeiten von Agfapan 25 und Agfaortho 25

Abb. 4.2.1.

Die gepunktete Kurve gibt die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten "Agfaortho - 25" - Emulsion an, die bei $\lambda > 590$ nm stark zurückgeht. Diese spektrale Empfindlichkeit versuchte ich durch einen chemischen Sensibilisator (Neocyanin) in den roten und infraroten Spektralbereich hinein zu erweitern. Neocyanin ist ein organischer Polymethinfarbstoff folgender Struktur (Abb. 4.2.2.):



Seine Wirkungsweise beruht - stark vereinfacht - darauf, daß die Farbstoffmoleküle in die unsensibilisierte Filmemulsion eingelagert werden. Sie absorbieren mittel - bis langwelliges Licht und aktivieren dadurch die Silberhalogenid-Kristallite in der Emulsion, die im unsensibilisierten Zustand nur durch kurzwelliges Licht angeregt werden können. Infolgedessen reagieren mit Neocyanin versetzte Emulsionen auch auf orange-rotes bis rotes Licht (nach: [16], S. 73 f).

Zur Sensibilisierung folgte ich einem Rezept in [16], S. 73. Die entsprechend behandelten Planfilmstücke wurden bei in den Strahlengang eingefügtem Grünfilter belichtet, um eine Überlappung des roten Maximums 1. und des blauen Maximums 2. Ordnung durch Absorption des blauen Lichtes zu vermeiden.

Dieses Verfahren brachte lediglich eine vernachlässigbar kleine Verlängerung des abgebildeten Spektrums, so daß die unwesentlichen Ergebnisse dieser Versuche hier nicht berücksichtigt wurden.

Mittlerweile hatte ich die passende Stellung der Plattenhalterung ermittelt, so daß sich das Problem auf die Wahl der Entwicklungszeit und des Entwicklers selbst reduziert hatte. Zunächst verwendete ich als Entwickler "Ultrafin" der Fa. Tetenal, einen - nach Packungsaufschrift - "Super-Feinkorn-Entwickler", der mir zur Darstellung der Linien geeignet schien. Bei frischem Entwickler (Verdünnung 1 + 20 Konzentrat + Wasser) ergab sich als brauchbarste Entwicklungszeit 3 min bei 20°C. Später empfahl mir Herr G. Poppe, Laborant am Dientzenhofer-Gymnasium, den Positiv-Entwickler "Neutraltyp" von Tetenal, der bei einer Verdünnung von 1 + 9 bei Entwicklung "auf Sicht" ganz ausgezeichneten Kontrast bewirkte. Fixiert wurde 5 min, in Tetenal-Fixierbad, nach einer ca. 15-minütigen Wässerung bei ständig fließendem Wasser, wurde der Film mit Netzmittel ("Agepon" der Fa. Agfa) zur Vermeidung von Tropfenbildung behandelt und anschließend getrocknet.

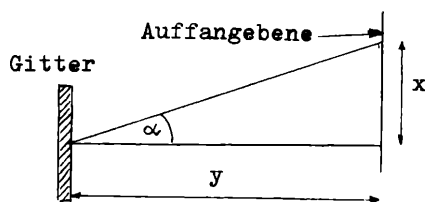
4.3. Auswertung der Fotografien; Ergebnisse

Die Auswertung der Spektren erfolgte nach zwei verschiedenen, unabhängig voneinander durchgeführten Methoden:

1. Von einem Negativ einer Spektralaufnahme wurden Vergrößerungen hergestellt, die anschließend vermessen wurden. Dazu ermittelte ich zu-

nächst aus dem Abstand entsprechender Linien auf Negativ und Positiv den Abbildungsmaßstab der Vergrößerung. Dafür wurden zwei Linien ausgewählt, die auf dem Positiv $\Delta_{\text{pos}} = (74 \pm 0,2)\text{mm}$, auf dem Negativ $\Delta_{\text{neg}} = (16,5 \pm 0,1)\text{mm}$ entfernt waren, so daß sich als Vergrößerungsmaßstab V ergab: $V = \frac{\Delta_{\text{pos}}}{\Delta_{\text{neg}}} = 4,5 \pm 0,04$.

Auf dem Positiv bestimmte ich anschließend eine Linie als "Fixpunkt", zu der die Relativabstände x der anderen Linien gemessen wurden. Da die als "Fixpunkt" verwendete Linie auf dem Negativ einen Abstand von $x_0 = (20 \pm 0,1)\text{mm}$ vom linken Rand des abgebildeten Spektrums hat, der seinerseits wieder $\Delta x = (36 \pm 1)\text{mm}$ von der optischen Achse des Spektrographen entfernt ist, berechnete ich für alle ausgewerteten Linien den Wert $x(L) = x_0 + \Delta x + \frac{x}{V}$, wobei $x(L)$ dann den Abstand einer Linie L auf dem Negativ von der optischen Achse des Geräts angibt. Mit Hilfe von $x(L)$ und dem Abstand der Film- von der Gitterebene $y = (197 \pm 1)\text{mm}$ kann dann die Wellenlänge der Linie L berechnet werden (vgl. Abb. 4.3.1.):



$$(I) \sin \alpha = \frac{k\lambda}{g}$$

vgl. 3.2.; $k = 1$

$$(II) \tan \alpha = \frac{x(L)}{y}$$

mit $\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}$
erhält man:

$$\frac{\lambda}{g} = \frac{x(L)}{y \sqrt{1 + \frac{x^2(L)}{y^2}}} \quad \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \lambda = \frac{g \cdot x(L)}{\sqrt{y^2 + x^2(L)}} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{g}{\sqrt{1 + \left[\frac{y}{x(L)}\right]^2}}$$

Damit konnten die Wellenlängen der abgebildeten Linien berechnet werden.

2. Die andere Methode baut auf einer direkten Auswertung der Negative auf. Dazu baute ich (in Anlehnung an [11], S. 99, Abb. 7) ein einfaches Auswertegerät. Ich bestimmte zunächst mit Hilfe eines Maßstabs mit $1/8 - \text{mm}$ - Teilung den Abstand der kurzwelligsten Linie vom linken Rand des abgebildeten Spektrums, anschließend die Abstände Δx_n benachbarter Linien L_n und L_{n+1} , so daß ich die Abstände x_n einzelner Linien L_n von der kurzwelligsten Linie L_0 durch eine Aufsummierung der Einzelabstände der Linien $L_0 \dots L_n$ erhielt:

$$x_n = \sum_{\nu=0}^n \Delta x_\nu$$

Die weitere Bearbeitung erfolgte analog 4.3.1.:

$x(L_n) = (x_0 + x_n) \cdot \frac{1}{8} + \Delta x$, wobei der Faktor $1/8$ wegen der $1/8$ - mm - Teilung des verwendeten Maßstabs nötig ist.

Dadurch erhielt ich die folgenden zwei voneinander unabhängigen Listen von Linienwellenlängen:

Tab. 4.3.1.: Auswertung anhand eines Positivs

Linie Nr.	x	$\frac{x}{V}$	x(L)	λ_R	$\Delta\lambda_R$	λ_0	$\Delta\lambda_0$	Identi- fikation
1	-72,5	-16,1	39,9	348		352		NI I
2	-69,5	-15,4	40,6	354	6	358	6	Fe I, Cr I
3	-68,0	-15,1	40,9	357	3	361	3	Cr I, Co I, Fe I
4	-63,0	-14,0	42,0	366	9			
5	-62,5	-13,9	42,1	367	1			
6	-61,7	-13,7	42,3	368	1			
7	-61,3	-13,6	42,4	369	1			
8	-60,5	-13,4	42,6	370	1	374		Fe I
9	-58,5	-13,0	43,0	374	4	377	3	H 11
10	-56,5	-12,6	43,4	378	4	383	6	Mg I, Fe I, H 9
11	-51,5	-11,4	44,6	387	9	393	10	Ca II
12	-49,5	-11,0	45,0	391	4	397	4	Ca II
13	-42,0	-09,3	46,7	404	13	410	3	H δ
14	-37,0	-08,2	47,8	413	9			
15	-31,0	-06,9	49,1	424	11	430		Fe I
16	-30,5	-06,8	49,2	425	1			
17	-29,5	-06,6	49,4	427	2	433		Fe I
18	-28,5	-06,3	49,7	429	2	434	1	H γ
19	-26,5	-05,9	50,1	432	3			
20	-18,5	-04,1	51,9	447	15			
21	-08,5	-01,9	54,1	465	18			
22	-05,5	-01,2	54,3	470	5			
23	$\pm 00,0$	$\pm 00,0$	56,0	480	10	486		H β
24	+12,5	+02,8	58,8	502	22			
25	17,5	03,9	59,9	510	8	517		Mg I
26	18,5	04,1	60,1	512	2	518	1	Mg I
27	23,0	05,1	61,1	520	8	527	9	Fe I, Ca I, Co I
28	26,5	05,9	61,9	526	6	532	5	Fe I, Fe II
29	29,0	06,4	62,4	530	4			
30	48,5	10,8	66,8	563	33			
31	51,5	11,4	67,4	568	5			

Tab. 4.3.2.: Auswertung anhand eines Negativs

Linie Nr.	$x_o + x_n$	$x(L)$	λ_R	$\Delta\lambda_R$	λ_o	$\Delta\lambda_o$	Identifikation
1	23,0	38,9	340		340		FeI, CoI, CrII
2	30,5	39,8	347	7	347	7	FeI, CoI, MnII
3	31,5	39,9	348	1	348	1	FeI, NiI, MnII
4	35,5	40,4	352	4	352	4	NiI
5	37,0	40,6	354	2	354	2	FeI
6	39,0	40,9	357	3	357	3	FeI
7	40,0	41,0	357	0	357	0	FeI, NiI
8	41,0	41,1	358	1	358	1	FeI, CrI
9	42,0	41,3	360	2	361	3	CrI, CrII, CoI, FeI, NiI
10	47,0	41,9	365	5	365	4	FeI, CoI
11	49,0	42,1	367	2	367	2	FeI, CoI
12	50,0	42,3	368	1	368	1	FeI
13	50,5	42,3	368	0	374	6	FeI
14	54,5	42,8	372	4	377	3	H11
15	57,5	43,2	376	4	383	6	MgI, FeI, H9
16	66,5	44,3	385	9	393	10	CaII
17	69,5	44,7	388	3	397	4	CaII
18	82,5	46,3	401	13	410	13	H δ
19	104,5	49,1	424	23	430	20	FeI
20	106,5	49,3	426	2	433	3	FeI
21	108,5	49,6	428	2	434	1	H γ
22	163,5	56,4	483	55	486	52	H β
23	167,5	56,9	487	4	489	3	FeI
24	170,5	57,3	490	3	492	3	FeI, CoI
25	172,5	57,6	492	2	493	1	FeI, BaII
26	174,5	57,8	494	2	496	3	FeI
27	177,5	58,2	497	3	498	2	FeI, NiI, NaI
28	182,5	58,8	502	5	504	6	FeI
29	196,5	60,6	516	14	517	13	MgI (Dublett)
30	197,5	60,7	517	1	518	1	MgI
31	202,5	61,3	521	4	522	4	FeI
32	206,5	61,8	525	4	527	5	FeI, CaI, CoI
33	212,5	62,6	531	6	532	5	FeI, FeII

Die Analyse des Sonnenspektrums lieferte also Hinweise auf folgende Elemente:

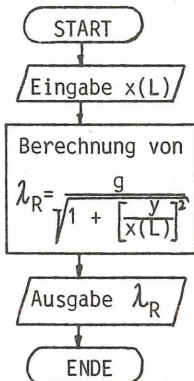
1. Wasserstoff (H), 2. Natrium (Na), 3. Magnesium (Mg),
4. Calcium (Ca), 5. Chrom (Cr), 6. Mangan (Mn),
7. Eisen (Fe), 8. Cobalt (Co), 9. Nickel (Ni),
10. Barium (Ba).

Erläuterungen zu den Linientabellen:

1. Die Spaltenüberschriften x , $\frac{x}{\lambda}$, $x(L)$ in Tab. 4.3.1. und $x_0 + x_n$ und $x(L)$ in Tab. 4.3.2. sind identisch mit den in 4.3. eingeführten Hilfsgrößen zur Berechnung der Wellenlängen der Absorptionslinien. λ_R sind die berechneten, λ_0 die damit identifizierten Linienwellenlängen. Die mit $\Delta\lambda_R$ und $\Delta\lambda_0$ bezeichneten Spalten geben die Differenz zwischen benachbarten Wellenlängenwerten an; sie sind bei den durch Meßfehler verschobenen Wellenlängenwerten der Spalte λ_R ein wertvolles Hilfsmittel bei der Identifikation.
2. Die Identifikation der Linien wurde mit Hilfe des Spektralatlas' "The solar spectrum 2935 Å to 8770 Å", erschienen 1966, durchgeführt, den ich Dank der freundlichen Unterstützung durch Herrn W. Strupat, Universität Erlangen, auf der Remeis-Sternwarte in Bamberg einsehen konnte. Ein großer Teil der Linien ist auf die Überlagerung sehr nahe beieinander liegender Linien einzelner Elemente zurückzuführen; deshalb wurden an einigen Stellen mehrere Elemente zur Identifikation einer Linie angegeben.
3. Dem direkt vom Negativ ausgewerteten Spektrum wurde gegenüber der Vergrößerung der Vorzug gegeben, weil 1. mit der Vergrößerung ein Kontrastverlust gegenüber dem Negativ und 2. das Risiko einer "Verwaschung" des Bildes durch geringfügig unscharfe Abbildung des Negativs verbunden ist. Deshalb wurde zunächst die Linienidentifikation mit Hilfe der Auswertung des Negativs durchgeführt und das Ergebnis dann nur insoweit auf die Resultate der anderen Methode übertragen, als sich eindeutige Übereinstimmungen zeigten.
4. Beide Methoden sind mit Meß- und Ablesefehlern behaftet: Die Auswertung des Negativs beruht auf der Auszählung von $1/8$ - mm - Teilstri-

chen eines Beugungsgitters, das als Maßstab verwendet wurde. Dabei können leicht Zählfehler unterlaufen, die sich allerdings, wie Tab. 4.3.2. zeigt, auch wieder gegenseitig aufheben können. Bei der Auswertung der Vergrößerung tritt als weitere Fehlerquelle zu möglichen Meßfehlern noch hinzu, daß wegen der unter 3. genannten Gründe oft nicht klar Linien voneinander getrennt oder vom Kontinuum unterschieden werden können.

5. Zur bequemen Umrechnung von $x(L)$ in λ_R einzelner Linien diene folgendes Programm für den programmierbaren Taschenrechner TI 59 der Fa. Texas Instruments.



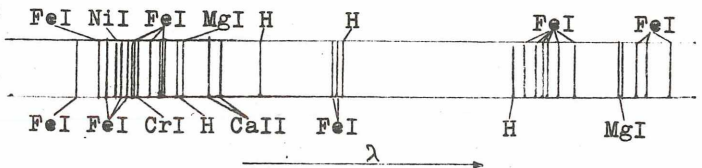
Dieses Programm lautet in dem vom Rechner verwendeten "Texas-Code":

```

000 76 11 55 01 09 07 95 33
008 35 85 01 95 34 35 65 93
016 05 07 35 65 01 00 00 00
024 95 92
  
```

Das Programm gibt λ_R in nm aus, wenn $x(L)$ in mm eingegeben wurde.

Abb. 4.3.2.: Zeichnung eines Spektrums nach der direkten Auswertung der Negative:



FeI Ca FeI λ H β MgI Fe

Vergrößerung einer Aufnahme des Sonnenspektrums

Die Spektren zeigen sehr deutlich die Linien H und K des Calciums (Ca^{2+}), die Linien $\text{H}\beta$, $\text{H}\gamma$ und $\text{H}\delta$ der Balmerreihe des Wasserstoffs, die Linien E und G des Eisens (Fe^+) und das $b_{1/2/3}$ Linientriplett des Magnesiums.

Im blauen und violetten Teil des Spektrums mit $340 \text{ nm} \leq \lambda \leq 380 \text{ nm}$ liegt eine große Anzahl von Linien, die zum Teil auf Fe^+ zurückzuführen sind. Auffallend ist, daß die Metalllinien (Ca^{2+} , Fe^+) merklich intensiver sind als die Balmerlinien des Wasserstoffs. Anhand dieser Merkmale kann die Einordnung der Sonne in das Schema der Harvard-Klassifikation erfolgen. Mit Hilfe von Beschreibungen der einzelnen Spektralklassen und durch Vergleich des hier gewonnenen Spektrums mit bestimmten Norm - Spektren in [12], S. 44 kommt man zu dem Ergebnis, daß die Sonne dem Spektraltyp G zuzuordnen ist und innerhalb der dezimalen Unterteilung desselben zwischen G0 und G5 liegt; eine genauere Festlegung scheitert an der relativ großen Intervallbreite der Vergleichsskalen.

4.4. Elektronische Abtastung des Spektrums

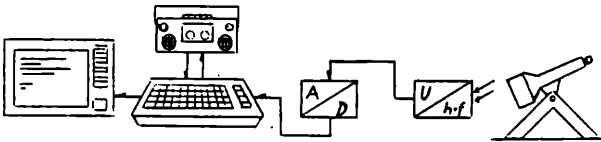


Abb. 4.4.1.: Schematischer Aufbau für die
Meßreihen und Datenfluß

An den Spektrographen wurden die Transistorführung und -Halterung befestigt und der Transistor selbst über drei Krokodilklemmen mit dem A/D-Wandler verbunden, der wiederum mit dem COLOUR-Genie über die Parallelschnittstelle kommunizierte. An den Computer waren außerdem noch ein Fernseher zur Darstellung und ein Kassettenrekorder zur Speicherung der Ergebnisse angeschlossen.

Zu Beginn einer Messung wurde zuerst der Spektrograph genau ausgerichtet, so daß für die Dauer des Versuchs der Photo-Transistor immer im Brennpunkt des Spektrums war und dieses durch die Erddrehung nicht auswan-

derte. Danach wurde eine Probemesseung über die Tastatur gestartet, um die Funktion und den Anschluß des A/D-Wandlers zu prüfen. Sobald diese positiv ausfiel, haben wir den Spektrographen noch einmal justiert und dann wurden in schneller Folge in jeweils 2 mm Abstand zum letzten Meßwert 10 Ergebnisse übernommen, davon der Mittelwert gebildet und in einem Speicherfeld abgelegt. Dies wurde solange wiederholt, bis man am Ende des Meßbereichs angekommen war. Das Speicherfeld stand dann zur Auswertung und/oder Abspeicherung zur Verfügung. In Tab. 4.4.1. sind die Wellenlängen λ , die Mittelwerte der dazugehörigen Spannungen

$(\overline{U_m} = \frac{U_0}{255} \cdot \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} s_i)$ und die errechneten relativen Intensitäten

$I_r = \frac{I}{I_{\max}}$ gegenübergestellt. Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß das relative Intensitätsmaximum bei $\lambda_{\max} = (617 \pm 4)$ nm liegt. Betrachtet man die Sonne als ideal schwarzen Körper und wendet das Wien'sche Verschiebungsgesetz an, so ergibt sich:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{4,97} \frac{hc}{kT} \quad (G.1), \text{ entnommen aus: 8, S. 268 oben}$$

$$\Leftrightarrow T = \frac{1}{4,97} \frac{hc}{k \lambda_{\max}} \Rightarrow T = (4,7 \cdot 10^3 \pm 30)K$$

Diesen Messungen zufolge läge die Sonnentemperatur T bei ca. 5000 K.

Tab. 4.4.1. (Intensitätsmessungen am Sonnenspektrum)

λ/nm	U_m/V	I_r	λ/nm	U_m/V	I_r	λ/nm	U_m/V	I_r
332	0.12	0.00	480	1.90	0.08	617	4.45	1.00
349	0.10	0.00	495	2.35	0.11	631	4.33	0.80
366	0.14	0.00	511	3.14	0.21	646	3.94	0.46
382	0.12	0.00	527	3.45	0.27	660	3.80	0.39
399	0.16	0.00	542	3.69	0.35	674	3.41	0.26
415	0.18	0.00	557	3.75	0.37	688	3.00	0.19
432	0.22	0.01	572	3.80	0.39	762	2.67	0.14
448	0.27	0.01	587	3.65	0.33	716	2.12	0.09
464	1.53	0.05	602	4.06	0.53			

Die Ergebnisse dieser Messungen werden von einigen Fehlerquellen beeinträchtigt. Zunächst ist die Sonne kein ideal schwarzer Körper, d.h.

das Planck'sche Strahlungsgesetz und das aus ihm abgeleitete Wien'sche Verschiebungsgesetz gelten nicht streng. Die Sonnenstrahlung durchläuft eine von der Sonnenhöhe über dem Horizont abhängige Luftmasse, die durch selektive Absorption und Rayleigh-Streuung den kurzwelligen Anteil des Sonnenlichtes stärker abschwächt als den langwelligen. Aus Angaben der optischen Fabrik Rupp & Hubrach, Bamberg, geht hervor, daß die beiden Konkavkonvexlinsen im Gitterbauelement im blauen und violetten Teil des Spektrums wesentlich stärker absorbieren als in den langwelligeren Bereichen. Ähnliche Effekte sind auch für das Objektiv des Spektrographen und die gläsernen Bestandteile des optischen Gitters zu erwarten. Sowohl die Erdatmosphäre als auch die durchlaufenen Gläser unterdrücken also kurzwellige Strahlung. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, daß das gemessene $\lambda_{\max}$ zu groß und dementsprechend die daraus mit (G.1) errechnete Temperatur zu klein sind.

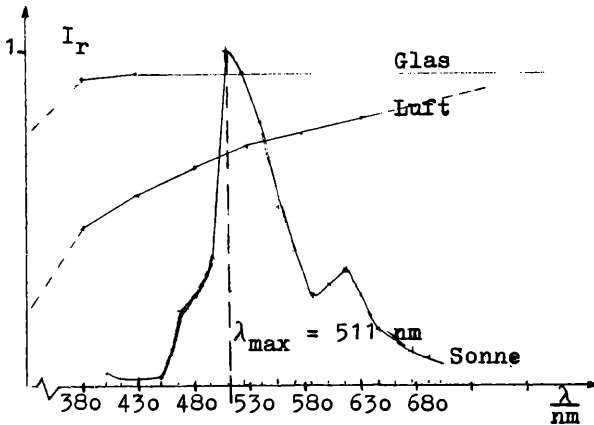
Den wesentlichsten Anteil hat jedoch der Fototransistor, wie aus Abb. 3.3.3. erkennbar ist. In dem gemessenen Wellenlängenintervall von 400 nm bis 716 nm kann seine spektrale Empfindlichkeit durch eine Gerade der Gleichung

$$E_{\text{rel}} = \frac{0.85}{350} (\lambda - 400) + 0.09 \quad \lambda \text{ in nm}$$

angenähert werden (E_{rel} = relative Empfindlichkeit des Fototransistors). Vernachlässigt man dagegen den Einfluß der Atmosphäre und der gläsernen Bauteile des Spektrographen, erhält man durch Korrektur des Einflusses des Transistors ein Intensitätsmaximum bei $\lambda = (511 \pm 4) \text{ nm}$, woraus sich eine Sonnentemperatur von $T = (5700 \pm 30) \text{ K}$ errechnet.

[12], S. 29 nennt unter Bezugnahme auf Meßergebnisse von Labs und Neckel für die Sonnentemperatur den Wert $T = 5800 \text{ K}$. Demnach wären die hier beschriebenen Messungen mit einem relativen Fehler von 2 % behaftet. Darüber hinaus tritt der in der Fehlerbetrachtung erwartete Effekt ein, wonach die gemessene Temperatur zu niedrig ist.

Abb. 4.4.2. gibt eine graphische Darstellung der Intensitätskurve des Sonnenspektrums und der Transmissionskurven der Gläser und der Atmosphäre wieder:



Zu Abb. 4.4.2.: Die Angaben zur Transmission der Luft entstammen: SCHAIFERS, K. und TRAVING, G., MEYERS Handbuch über das Weltall, Mannheim 1973, S. 183.

Die mit "Sonne" bezeichnete Kurve entsteht durch Zuordnung relativer Intensitäten $I_r = \frac{I}{I_{\max}}$ zu den entsprechenden Wellenlängen des Spektrums: $\lambda \mapsto I_r(\lambda)$.

Die Transmissionskurven von Luft und Glas geben den Quotienten aus durchgelassener und einfallender Intensität $Q = \frac{I}{I_0}$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge an: $\lambda \mapsto Q(\lambda)$. Da für Q und I_r gilt: $Q, I_r \in [0,1]$, kann die Ordinatenenteilung von 0 bis 1 allgemein verwendet werden.

4.6. Zusammenfassung der Resultate

Unsere Analysen und Messungen lieferten folgende Ergebnisse:

1. In der Sonne sind die Elemente Wasserstoff, Magnesium, Calcium, Chrom, Mangan, Eisen, Cobalt, Nickel und Barium enthalten (hier nach zunehmender Ordnungszahl sortiert). Die intensivsten Absorptionslinien werden von Calcium und Eisen verursacht; die Balmerlinien des Wasserstoffs sind relativ schwach.

2. Die Sonne kann dem Spektraltyp G der Harvard-Klassifikation zugeordnet werden.
3. Die aus dem Planck'schen Strahlungsgesetz abgeleitete Temperatur der Sonnenrandzone (der "Photosphäre") beträgt $T = (5700 \pm 30) \text{ K}$.

5. Ausblicke

5.1. Erweiterungen am Spektrografen

1. Das hohe Auflösungsvermögen des verwendeten optischen Gitters wird durch die unkorrigierten Brillengläser stark verringert. Bei Verwendung sphärisch und chromatisch verbesserter Linsensysteme könnte die Qualität der Abbildung sicher gehoben werden.
2. Die Verwendung von Planfilm zur Fotografie der Spektren ist unpraktisch für häufigeren Gebrauch. Nützlicher wäre der Spektrograf z.B. für Amateurastronomen, wenn handelsübliche Spiegelreflexkameras an ihn angeschlossen werden könnten. Dazu wäre jedoch eine Verringerung der Dispersion nötig, weil das Kleinbildformat zur vollständigen Abbildung der Spektren sonst nicht ausreichte. Die nach meiner Meinung komfortabelste Lösung wäre es jedoch, eine Abspulvorrichtung für Kleinbilddfilme in den Spektrografen einzubauen, so daß selbst der Anschluß eines Kameragehäuses als Filmträger überflüssig wäre.
3. Bei der Spektrografie von punktförmigen Objekten kann auf einen Kohärenzspalt verzichtet werden. Zweckdienlich wäre es deshalb, einen Spalt variabler Breite anstelle des "Rasierklingspalts" einzufügen.
4. Um bestimmte begrenzte Spektralbereiche untersuchen zu können, sollte eine Filterschublade eingebaut werden, in die handelsübliche Fotofilter eingesetzt werden können.
5. Anstelle des einfachen Klappenverschlusses aus einer "Box"-Kamera, der außer beliebig langer Belichtungszeit nur auf $1/30 \text{ sec}$ einstellbar ist, sollte ein Zentralverschluß verwendet werden, der eine größere Zahl definierter Belichtungszeiten einzustellen ermöglicht.

5.2. Änderungen der elektronischen Geräte

1. Die strahlungsempfindliche Fläche des im Photometer eingesetzten Transistors BPY 62 ist so groß, daß das Auflösungsvermögen der elektronischen Abtastung sicher schlechter als 1.7 nm ist, woran die elektronische Wahrnehmung von Spektrallinien scheitert. Dem könnte durch Verwendung von z.B. Photomultipliern mit kleinem Kathodendurchmesser abgeholfen werden, wodurch gleichzeitig auch die Empfindlichkeit gesteigert würde.
2. Zur Erhöhung der Taktfrequenz des Analog/Digital-Wandlers könnte anstelle des Operationsverstärkers OV LM 741 mit einer Flankensteilheit von $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ der CMOS- OV 3130 verwendet werden, dessen Flankensteilheit $10 \text{ V}/\mu\text{s}$ beträgt. Dadurch wäre eine Erhöhung der Taktfrequenz um den Faktor 20 und eine entsprechende Verringerung der Schaltzeit von 8.4 s auf 0.4 s möglich.
3. Eine nutzbringende Verwendung dieses "schnelleren" Operationsverstärkers erfordert allerdings auch den Einsatz von Maschinensprache anstelle des wesentlich langsameren BASIC-Codes bei der Software des Einleseprogramms.

6. Literaturverzeichnis

Auf Werke des Literaturverzeichnisses wird im Text durch in eckige Klammern stehenden Ziffern aufmerksam gemacht.

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Europa Fachbuchreihe: | Elektronik, 2. Teil: Industrieelektronik; Wuppertal 1978 |
| 2. FICHTNER, Richard | "Überlegungen zum radioaktiven Zerfall"; Akademie für Lehrerfortbildung, März 1983 |
| 3. HAFERKORN, H. | Grimsehl, Lehrbuch der Physik Bd. 3 (Optik); 17. Aufl., Leipzig 1978 |
| 4. HAMMER, Karl | Physik Mittelstufe; 3. Aufl., München 1969 |
| 5. HERRMANN, Joachim: | Großes Lexikon der Astronomie; München 1980 |
| 6. JUNG, Walter | (Hrsg.): Fischer-Kolleg Physik; 4. Aufl., Frankfurt/Main 1982 |

- | | |
|---|--|
| 7. KNAPP, W. / HAHN, H.M. | Astrofotografie als Hobby; 1. Aufl.
Herrsching 1980 |
| 8. KUCHLING, Horst | Taschenbuch der Physik; 3. Aufl.,
Frankfurt/Main 1981 |
| 9. LANCASTER, Don | Das CMOS-Kochbuch; 1. Aufl., Vater-
stetten 1980 |
| 10. POHL, Robert W. | Einführung in die Physik, Bd. 3, Optik
und Atomphysik; Heidelberg 1976 |
| 11. ROTH, Günter D. | Handbuch für Sternfreunde; 2. Aufl.,
Berlin 1967 |
| 12. SCHEFFLER, H./
ELSÄSSER, H. | Physik der Sterne und der Sonne;
1. Aufl., Zürich 1974 |
| 13. Siemens AG | Bauelemente - Technische Erläuterungen
und Kenndaten für Studierende; 2. Aufl.,
München 1977 |
| 14. Trommeschläger Computer
GmbH | Colour-BASIC leicht gelernt; 1983 |
| 15. Trommeschläger Computer
GmbH | Das technische Handbuch - Colour - Genie |
| 16. TREUTNER, H. / MERZ, R. /
KARKOSCHKA, E. | Astrofotografie-Geräte, Verfahren,
Objekte; 1. Aufl., Stuttgart 1980 |
| 17..ZILOG | Z 80 - Assembly Language Programming
Manual; USA 1977 |

Anschriften der Verfasser:

Michael DENZLEIN
Schlesienstraße 46

8608 Memmelsdorf/
Lichteneiche

Matthias BARTELMANN
Petrinistraße 6

8600 Bamberg

Wo jetzt nur, wie unsre Weisen sagen,
seelenlos ein Feuerball sich dreht,
lenkte damals seinen goldnen Wagen
Helios in stiller Majestät

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Bericht der Naturforschenden Gesellschaft Bamberg](#)

Jahr/Year: 1983

Band/Volume: [58](#)

Autor(en)/Author(s): Denzlein Michael, Bartelmann Matthias

Artikel/Article: [Erstellung und Auswertung des Sonnenspektrums mit Hilfe selbstgebauter Instrumente 151-198](#)