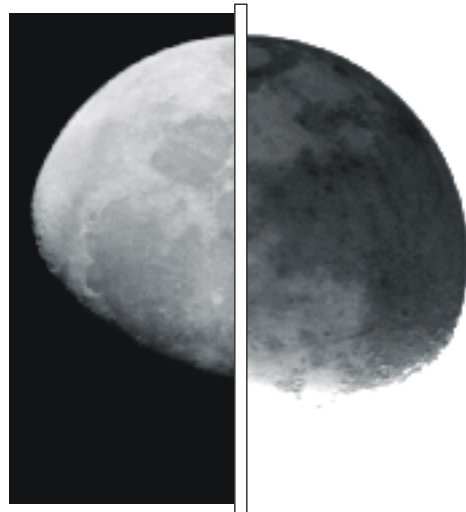


Astrophotographie mit einem Single-Line-CCD-Sensor



Wettbewerb "Jugend Forscht" 2004

Sebastian Hellberg (15 Jahre)

Daniel Markx (14 Jahre)

**Arbeitsgemeinschaft "Jugend Forscht"
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg
Leitung: StD Thomas Biedermann**

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Strahlengang in einem Teleskop	3
2.1	Aufbau eines Teleskops nach Kepler	3
2.2	Strahlengang für ein reelles Bild	4
2.3	Allgemeines zur Bilderfassung	6
2.4	Digitale Erfassung von Bildern	6
3	Von der optischen Abbildung zum Digitalbild auf dem PC	6
3.1	Grundsätzlicher Aufbau von CCD-Sensoren	6
3.2	Bauformen von CCD's	7
3.3	Zeitliche Abläufe im CCD	8
3.3.1	Ladungstransport von der Photodiode in den Kondensator:	8
3.3.2	Ladungstransport in der Eimerkette	8
3.4	Prinzip herkömmlicher Digitalkameras	9
3.5	Prinzip eines Hand- oder Flachbett-Scanners	9
4.	Vom Scanner zur astronomischen Kamera	10
4.1	Möglichkeiten zur zeilenweise Abtastung	10
4.1.1	Bewegen des CCD	10
4.1.2	Bewegen des Objektes	10
4.1.3	Bewegen des Bildes	10
4.2	Abbilden von Himmelskörpern	11
5	Konstruktionsbeschreibung	11
5.1	Anbau an ein Teleskop	11
5.2	Anordnung der Sensorelektronik	11
5.3	Anschluss der Sensorelektronik	11
5.3.1	Erforderliche Ergänzungen an der Elektronik des Handscanners	11
5.4	Systemtest	12
5.4.1	Abbilden eines feststehenden Objektes	12
5.4.2	Abbilden eines sich bewegenden Objektes	13
5.5	Ausblick: Eigene Sensorschaltungen	13
6	Quellenangaben	14
7	Danksagung	14

1. Einleitung

Wir sind auf die Idee dieses Projektes gekommen, indem wir einen alten Handscanner geschenkt bekommen haben und dachten uns, dass man dieses Gerät sicherlich auch anderweitig benutzen könnte, als nur Dokumente einzuscannen. Es gab auch in unserer AG außer uns noch zwei andere Jugend-Forscht Projekte, die sich mit dem Thema Teleskop/Himmelskörperbeobachtung beschäftigen: der Bau eines Spiegelteleskops und der Bau einer mechanischen Teleskopnachführung dazu. Diese Projekte brachten uns auf die Idee, unseren CCD-Sensor mit seiner kompletten Schaltung zu einer Teleskopkamera umzufunktionieren.

2. Strahlengang in einem Teleskop

2.1 Aufbau eines Teleskops nach Kepler

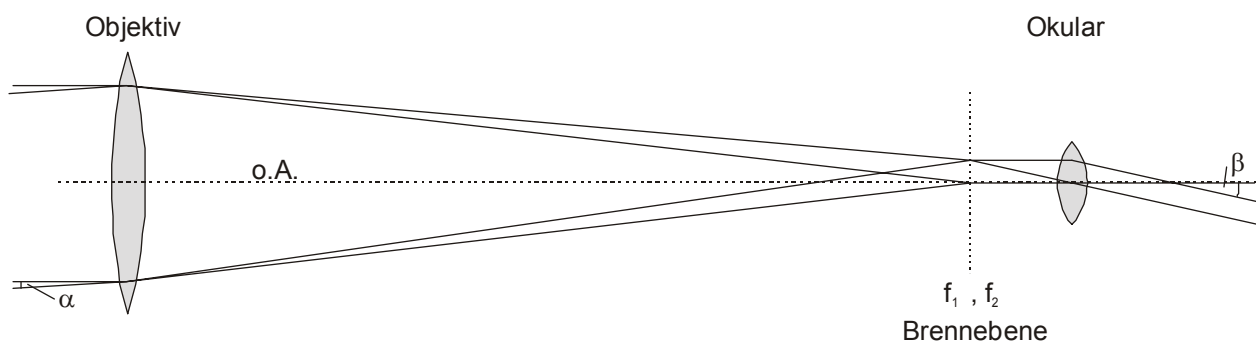


Abb. 1: Strahlengang in einem Keplerschen Teleskop

Das Keplersche Teleskop [2] besteht im Prinzip aus einer langbrennweitigen Sammellinse als Objektiv und einer weiteren kurzbrennweitigen Sammellinse als Okular. Das Objektiv wirft ein reelles Bild eines weit entfernten Körpers (z.B. Mond) auf die Brennebene. Dieses wird mit dem als Lupe wirkendem Okular betrachtet, wobei die Brennweiten beider Linsen zusammenfallen. Da sich der zu betrachtende Gegenstand außerhalb der doppelten Brennweite befindet, ist das Zwischenbild, anders als beim Mikroskop, kleiner als der Gegenstand selbst. Das Keplersche Teleskop erzeugt im Gegensatz zum Galileischen ein auf dem Kopf stehendes Bild. Die Vergrößerung ergibt sich daraus, dass der Winkel, unter dem das Objekt zu sehen ist, vergrößert wird. Mit unbewaffnetem Auge fallen die Lichtstrahlen von einem ausgedehnten Objekt unter dem Winkel α ins Auge. Das Teleskop vergrößert diesen auf den Winkel β , deswegen erscheint das Objekt vergrößert. Die Vergrößerung erhält man aus dem Quotienten von Objektiv- und Okularbrennweite, es gilt

$$V = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1) \quad [1]$$

dabei ist f_1 die Brennweite der Objektivlinse und f_2 die Brennweite der Okularlinse. Diese Formel gilt, wenn man mit dem Auge durch das Okular blickt. Bei dem uns zur Verfügung stehenden Teleskop ist

die Brennweite der Objektivlinse angegeben mit $f_1 = 700 \text{ mm}$. Mit einem Okular von $f_2 = 12 \text{ mm}$ Brennweite erhält man damit die Vergrößerung

$$V = \frac{700\text{mm}}{12\text{mm}} = 58(-\text{fach})$$

So erscheint einem Beobachter also z.B. der Mond 58 mal so groß wie mit unbewaffnetem Auge.

Ein Gerät zur Aufnahme von Bildern von Himmelskörpern sollte ein recht hochauflösendes Bild liefern und universell einsetzbar sein. Die oben beschriebenen Überlegungen gehen jedoch von einem virtuellen Bild aus, also muss die Optik so verändert werden, dass ein reelles Bild entsteht, das man dann photographieren kann.

Da wir uns zum Ziel gesetzt haben, ein Gerät zu konstruieren, welches an jedes beliebige Teleskop angesetzt werden kann und ein hochauflösendes Digitalbild an einen PC sendet, muss also ein reelles Bild erzeugt werden.

2.2 Strahlengang für ein reelles Bild

Um ein reelles Bild zu erhalten, wird der Abstand zwischen Okular- und Objektiv-Linse etwas vergrößert, die beiden Brennweiten fallen nun nicht mehr zusammen. Das Zwischenbild liegt nun etwas außerhalb der einfachen Brennweite des Okulars. Dadurch verändert sich der Strahlengang ab dem Zwischenbild: durch die Mitte des Okulars gehende Strahlen werden nicht gebrochen, parallel einfallende Strahlen verlaufen durch den gegenüberliegenden Brennpunkt. Dort, wo sich die beiden Strahlen treffen, findet man nun ein vergrößertes reelles Bild, das man z.B. auf einem Film oder mit einem CCD-Sensor festhalten kann. Der Strahlengang ist in Abb. 2 wiedergegeben.

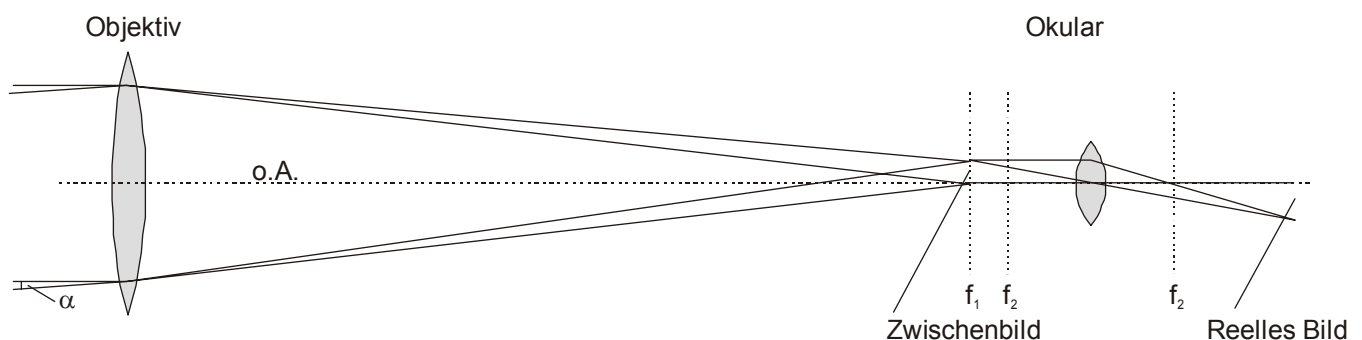


Abb. 2: Reelles Bild durch Verschieben der Okularlinse

Für die Abbildung des Objektivs gilt die Gleichung

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (2a)$$

daraus erhält man für die Bildgröße

$$B = G \cdot \frac{b}{g} \quad (2b)$$

Mit den Maßen $G = 3518$ km (Durchmesser des Mondes [5]), $g = 384\,000$ km (Abstand des Mondes) und $g \approx f = 700$ mm (Brennweite des Objektivs) erhält man daraus eine Bildgröße von $B = 6,336$ mm. Bildweite und Brennweite dürfen hier gleichgesetzt werden, da sich das Bild wegen der großen Entfernung des Mondes praktisch genau in der Brennebene befindet.

Um zu berechnen, in welchem Abstand vom Okular das reelle Bild der gewünschten Größe entsteht, benötigt man die Brennweite f' des Okulars und die gewünschte Bildgröße B' . Die Gegenstandsgröße G' ist gleich der Bildgröße B des vom Objektiv erzeugten Bildes. Entsprechend Gleichung 2a gilt hier

$$\frac{B'}{G'} = \frac{b'}{g'} \quad (2c)$$

Allerdings kennt man hier weder die Bildweite b' noch die Gegenstandsweite g' . Für Linsenabbildungen gilt aber ein weiteres Gesetz:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{b'} + \frac{1}{g'} \quad (3a)$$

Stellt man diese Gleichung um, so erhält man

$$\frac{1}{g'} = \frac{1}{f'} - \frac{1}{b'} \quad (3b)$$

Setzt man den Ausdruck rechts vom Gleichheitszeichen in Glg. 2c ein, so ergibt sich

$$\frac{B'}{G'} = b' \frac{1}{g'} = b' \left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{b'} \right) \quad (4a)$$

Ausmultiplizieren liefert

$$\frac{B'}{G'} = \frac{b'}{f'} - 1 \quad (4b)$$

Nach Addition von 1 und Multiplikation mit f' erhält man daraus

$$\left(\frac{B'}{G'} + 1 \right) \cdot f' = b' \quad (5)$$

Die Bildweite für eine bestimmte Bildgröße wird also bestimmt durch die Brennweite des Okulars und die Bildgröße des Objektivs.

Setzt man die Zahlenwerte für unsere Optik ein, so erhält man für eine gewünschte Bildgröße (bestimmt durch die Größe unseres Sensors) $B' = 1'' = 25,4$ mm und für ein Okular mit der Brennweite $f' = 12,5$ mm

$$b' = \left(\frac{25,4 \text{ mm}}{6,336 \text{ mm}} + 1 \right) \cdot 12,5 \text{ mm} = 62,5 \text{ mm}$$

Unser Sensor muss also in einem Abstand von 62,5 mm vom Okular (wegen des Linsensystems nicht von seiner Vorderseite, sondern der Mitte aus zu messen) platziert werden.

2.3 Allgemeines zur Bilderfassung

Das von einer Linse erzeugte Bild ist zumindest theoretisch „beliebig scharf“. Wenn man ein solches Bild speichern möchte, muss man es entweder auf einen Film ablichten oder digitalisieren. Selbst bei einem photographischen Film geht dabei Bildschärfe verloren, weil die Filmemulsion eine bestimmte Korngröße hat. Ein digitalisiertes Bild, welches also z.B. von einer Digitalkamera aufgenommen wird, besteht aus Zeilen, wobei jede Zeile eine bestimmte Anzahl an Bildpunkten enthält. Diese Bildpunkte nennt man Pixel, ihre Größe kann man vergleichen mit der Korngröße des Films, also geht auch hier Schärfe verloren. Dieser Schärfeverlust ist umso größer, je größer die Pixel sind. Die Auflösung eines digitalisierten Bildes wird damit durch die Anzahl der Pixel pro Zeile und die Anzahl der Zeilen bestimmt. So liefert z.B. eine Digitalkamera mit 8 Megapixeln eine Bildgröße von 3400 x 2350 Pixeln eine Bildqualität, die mit der einer Filmkamera vergleichbar ist.

2.4 Digitale Erfassung von Bildern

Solche hochauflösenden CCD's sind leider sehr teuer. Dies gilt jedoch nicht für Single-Line-CCD's, wie sie in Hand- oder Flachbettscannern verwendet werden. Auch diese CCD's haben eine Auflösung zwischen 1600 und 4800 Pixeln pro Zeile. Da man hier nahezu beliebig viele Zeilen einlesen kann, erreicht man eine mit Profikameras vergleichbare Auflösung. Für diese Methode der Bilderfassung haben wir uns entschieden.

3 Von der optischen Abbildung zum Digitalbild auf dem PC

3.1 Grundsätzlicher Aufbau von CCD-Sensoren

CCD ist die Abkürzung von Charge Coupled Device („Ladungsgekoppeltes Bauteil“). Es besteht aus Photodioden als lichtensitive Elemente und Speicherzellen in Form von Kondensatoren. Fällt Licht auf eine solche Photodiode, so werden Ladungen freigesetzt, die in dem Kondensator gespeichert werden. Diese Zellen werden auf einem Silizium-Chip in MOS-Technik angelegt. Durch eine geeignete Anordnung der Elektroden wechseln sich Ladungssenken und Ladungsbarrieren ab. In dieser Elektrodenstruktur werden die durch den photoelektrischen Effekt in der Photodiode erzeugten Elektronen durch die Ladungsbarrieren zunächst in den Ladungssenken festgehalten. Je mehr oder je länger Licht auf die einzelnen Zellen eingewirkt hat, desto größer ist die Anzahl der Elektronen, also die Ladungsmenge. Durch Ändern der Spannung an den Elektroden können die Ladungsbarrieren verschoben werden, dabei werden die zwischen ihnen eingeschlossenen Ladungen in den Ladungssenken mitgeführt. Am Ende dieser „Eimerkette“ können die Ladungen der letzten Zelle über einen Widerstand abfließen. Dabei entsteht eine Spannung, die proportional zu der Ladungsmenge und damit zu der Lichtmenge der zugehörigen Zelle ist. Diese kann über einen Verstärker verstärkt und anschließend weiterverarbeitet werden. [3]

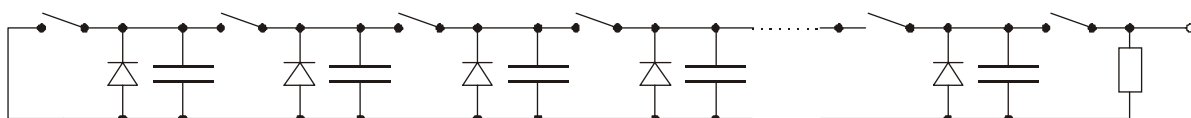


Abb. 3: Prinzipaufbau einer „Eimerkette“, wie sie in CCD's verwendet wird

3.2 Bauformen von CCD's

In der einfachsten Variante hat man eine Reihe von Speicherkondensatoren. Die Ladungen der zugehörigen Photodiode werden direkt in dem zugehörigen Kondensator gespeichert. Um die Ladungen verschieben zu können, ohne dass weitere Ladungen von den Photodioden nachgeliefert werden, muss das CCD abgedunkelt werden. Ihre Vorteile sind die Einfachheit in der Herstellung und die günstigen Herstellungskosten. Der gravierende Nachteil ist allerdings, dass die Belichtung nicht elektronisch im CCD, sondern über die Öffnungszeit eines externen Verschluss erfolgt, da sonst die Ladungsmenge während des Ladungstransportes verfälscht werden würde.

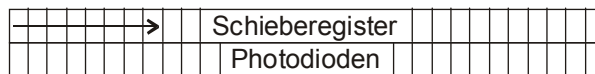


Abb. 4: Einfachste Version eines Line-CCD's

Um diesem Nachteil aus dem Weg zu gehen, wurde eine andere Variante von CCD's entwickelt, bei der neben der eigentlichen photosensitiven Zeile (Photodioden) ein Schieberegister angeordnet ist, welches aus MOS-Kondensatoren besteht, in das alle Elektronenwolken der photosensitiven Zeile gleichzeitig herüberschoben werden. Die MOS-Kondensatoren werden dann nach dem „Eimerkettenprinzip“ ausgelesen. Das hat den Vorteil, dass kein externer Verschluss benötigt wird, da die Belichtungszeit im Inneren des CCD gesteuert werden kann. Außerdem kann bei diesem Typ die Abtastrate erhöht werden, da während des Transportes der Ladungen durch das Schieberegister schon die nächste Belichtung stattfinden kann.

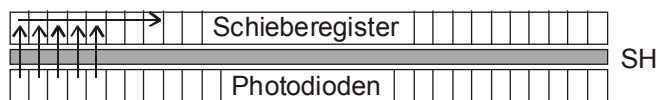


Abb. 5: Line-CCD mit einem Schieberegister

Eine weitere Variante enthält zwei Schieberegister auf beiden Seiten der photosensitiven Zeile, bei der beispielsweise die ungeraden Pixel in das eine und die geraden Pixel in das andere Register verschoben werden. Das hat zusätzlich zu der oben genannten Variante mit nur einem Schieberegister den Vorteil, dass die Packungsdichte der photosensitiven Zellen erhöht werden kann, da sie „dicht an dicht“ gepackt werden können, ohne Rücksicht auf die größeren MOS-Kondensatoren des Schieberegisters nehmen zu müssen.

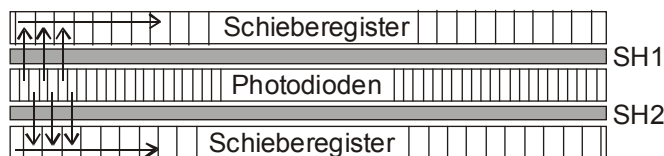


Abb. 6: Line-CCD mit zwei Schieberegistern

Eine weitere Variante enthält zwei Schieberegister auf beiden Seiten der photosensitiven Zeile, bei der beispielsweise die ungeraden Pixel

in das eine und die geraden

Pixel in das andere Register verschoben werden. Das hat zusätzlich zu der oben genannten Variante mit nur einem Schieberegister den Vorteil, dass die Packungsdichte der photosensitiven Zellen erhöht werden kann, da sie „dicht an dicht“ gepackt werden können, ohne Rücksicht auf die größeren MOS-Kondensatoren des Schieberegisters nehmen zu müssen.

Flächensensoren funktionieren vom Prinzip her genauso wie Single-Line-Sensoren. Bei Flächensensoren liegen mehrere photosensitive Zeilen mit Schieberegistern nebeneinander. Die Enden der Schieberegister der einzelnen Zeilen sind an ein dazu quer liegendes Register angeschlossen. Wenn das CCD belichtet ist, wird die Ladung je eines Pixels aus den einzelnen Zeilen in das querliegende Register

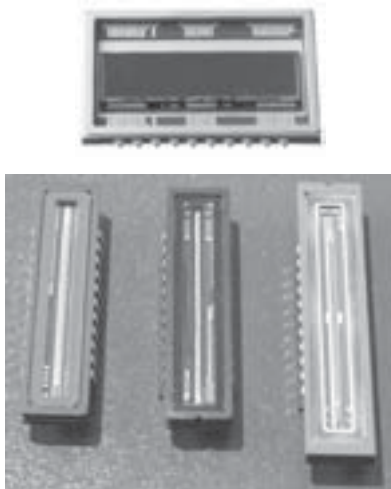


Abb. 7: Varianten verschiedener CCD's, oben ein Flächensensor; darunter drei Single-Line-CCD's, davon ganz rechts ein Farb-CCD

geschoben. Dieses wird dann wieder nach dem „Eimerkettenprinzip“ ausgelesen. Dann wird wieder die Ladung je eines Pixels der Zeile in das Schieberegister geschoben und das Register ausgelesen. Dies passiert so oft, bis alle Bildpunkte der Zeilen ausgelesen sind.

3.3 Zeitliche Abläufe im CCD

Zur Steuerung der Abläufe in einem CCD muss ein streng geregeltes Zeitraster eingehalten werden. Dieses organisiert die Belichtung der einzelnen Pixels, den Ladungstransport durch Verschieben der Ladungsbarrieren sowie das Löschen der bereits ausgelesenen Zellen. Der Zeittakt dieses Rasters bestimmt auch die Lichtempfindlichkeit der Zellen - dadurch kann die Belichtungszeit in weiten Grenzen gewählt werden, was sich aber auch auf die Bildqualität auswirkt, da bei längeren Belichtungszeiten ein Bildrauschen entsteht, das durch Ladungen verursacht wird, die nicht allein aus der Belichtung stammen, sondern durch thermische Effekte entstehen. Deshalb steigt die Bildqualität, wenn die CCD's mit niedriger Temperatur betrieben werden können. Im Folgenden sollen lediglich die beiden wichtigsten Zeitabläufe genauer dargestellt werden.

3.3.1 Ladungstransport von der Photodiode in den Kondensator:

In Abbildung 8 (nach [3]) ist der Ladungstransport von der Photodiode in den zugehörigen Kondensator der Speicherkette zu sehen.

Im Zeitraum $t_0 - t_1$ wird die Photodiode belichtet, dadurch werden in der Sperrschicht Elektronen freigesetzt.

Im Zeitraum t_2 wird eine Spannung an das Shift-Gate (SH) angelegt und somit die Elektronenbarriere geöffnet. Jetzt können die freigesetzten Elektronen aus der Sperrschicht in den Kondensator fließen.

Im Zeitraum t_3 wird die Spannung an SH wieder abgenommen. Es entsteht wieder eine Ladungsbarriere. Der Transfervorgang ist nun abgeschlossen. Man sieht, dass nicht alle Elektronen in den Kondensator abgeflossen sind. Das liegt daran, dass beim Anlegen einer Spannung an SH zwei Kondensatoren parallelgeschaltet werden. Es findet also nur ein Ladungsausgleich statt. Die so übertragenen Ladungen können nun in der Eimerkette verschoben werden.

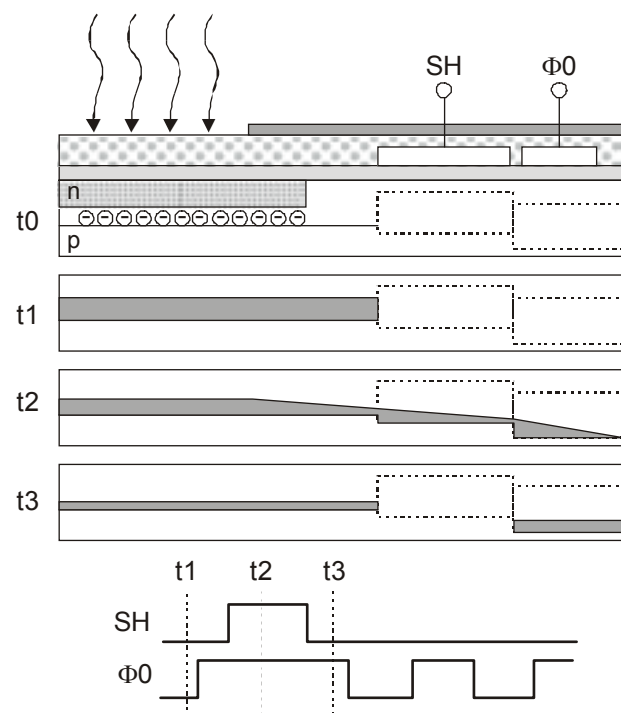


Abb. 8: Belichtung eines Pixels und anschließender Ladungstransport in die Eimerkette, unten ist das zugehörige Zeitdiagramm angegeben

3.3.2 Ladungstransport in der Eimerkette

In Abbildung 9 ist der Ladungstransport von Kondensator zu Kondensator zu sehen.

Im Zeitraum t_0 liegt nur an der Elektrode Φ_1 eine Spannung an, somit ist unter der Elektrode eine

Ladungssenke. Unter den Elektroden $\Phi 2$ und $\Phi 3$ befindet sich eine Ladungsbarriere, da keine Spannung an ihnen anliegt,

Im Zeitraum t_1 wird an Elektrode $\Phi 2$ eine Spannung angelegt, somit entsteht unter ihr eine Ladungssenke. Die Elektronen verteilen sich in den Ladungssenken unter $\Phi 1$ und $\Phi 2$.

Im Zeitraum t_2 wird die Spannung an Elektrode $\Phi 1$ langsam weggenommen, es entsteht eine Ladungsbarriere. Die Elektronen fließen in die Ladungssenke unter $\Phi 2$.

Im Zeitraum t_3 ist die Spannung an Elektrode $\Phi 1$ ganz weggenommen. Es befindet sich nur noch unter $\Phi 2$ eine Ladungssenke, in der sich jetzt alle Elektronen befinden, die sich vorher unter $\Phi 1$ befanden. Der Ladungstransport in die nächste Zelle ist nun vollständig.

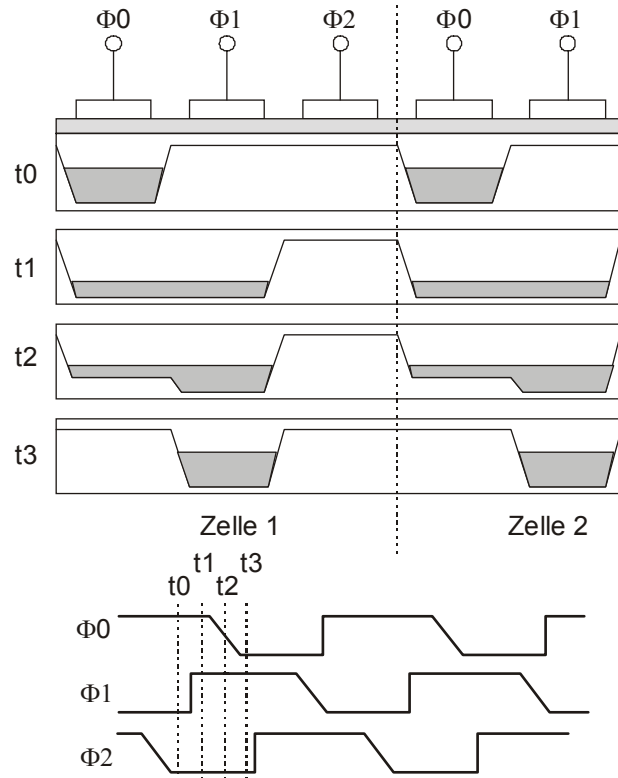


Abb. 9: Zeitlicher Ablauf des Ladungstransportes in der Eimerkette bei Verwendung eines 3-Phasentaktes

3.4 Prinzip herkömmlicher Digitalkameras

Die üblichen Digitalkameras besitzen einen Flächen-CCD-Sensor. Dieser wird dann über ein Objektiv belichtet und - wie in 3.2 und 3.3 beschrieben - ausgelesen. Dabei entstehen nur analoge Spannungen, keine diskreten Werte. Diese analogen Spannungen werden durch einen Analog/Digital-Wandler in digitale Werte umgewandelt. Ein Mikroprozessor speichert diese Daten auf einer Speicherkarte. Die graphische Auflösung wird dadurch bestimmt, wie viele Pixel das CCD besitzt, die Anzahl der unterscheidbaren Helligkeitsstufen durch die Bit-Auflösung des A/D-Wandlers - so kann z.B. ein 8-Bit-Wandler 256, ein 12-Bit-Wandler bereits 4096 Helligkeitsstufen unterscheiden. Der Vorteil dieser Kamera ist, dass der Sensor nur einmal belichtet werden muss und dann sofort ausgelesen werden kann. Das heißt, dass man sehr schnell ein fertiges Bild hat. Der Nachteil ist allerdings, dass die maximale Auflösung vorgegeben ist, sie kann nicht erhöht werden.

3.5 Prinzip eines Hand- oder Flachbett-Scanners

Diese Scanner besitzen im Gegensatz zu Digitalkameras ein sogenanntes Single-Line-CCD. Dieses verfügt - wie der Name schon sagt - nur über eine Zeile mit etwa 1600 - 10400 lichtsensitiven Elementen (Pixeln). Dieses CCD „sieht“ über eine Optik das einzulesende Dokument. Dieses CCD mit Optik wird über das Dokument bewegt und nach einem Stückchen wird immer eine Zeile eingelesen. Die analogen Spannungswerte der einzelnen Zeilenpixel, die das CCD liefert, werden von einem A/D-Wandler digitalisiert. Dieses digitale Signal wird dann an einen PC weitergeleitet. Der PC setzt dann die einzelnen Pixel zu Zeilen und die einzelnen Zeilen zu einem Bild zusammen. Da ein von Hand

bewegter Handscanner nie ganz gleichmäßig über das einzuscannende Dokument gefahren werden kann, besitzt er eine Rolle, die das Dokument berührt. Diese Rolle dreht dann über ein Getriebe eine gelochte Scheibe, die sich in einer Lichtschranke dreht. Die Lichtschranke gibt dann jedesmal ein Signal, wenn sich ein Loch der Scheibe vor dem Empfänger befindet. Dieses veranlasst die Scanner-elektronik, eine Zeile einzulesen. Bei einem Flachbettscanner wird diese Bewegung durch einen Schrittmotor ausgeführt, nach jedem seiner Schritte wird automatisch die entsprechende Zeile eingelesen.

4. Vom Scanner zur astronomischen Kamera

Bei der Bilderfassung mit einem Single-Line Sensor gibt es ein Problem: der Sensor tastet im Gegensatz zu einem Flächensensor nur eine Zeile ab. Man muss entweder das Bild über den Sensor fahren oder den Sensor über das Bild. Wenn man sich für die Variante mit dem Bild entscheidet, muss man zwei weitere Unterschiede beachten: bewegt sich das Bild selbst (z.B. Mond) oder man muss diese Drehung optisch mit Hilfe eines Spiegels durchführen?

4.1 Möglichkeiten zur zeilenweise Abtastung

Für die Erfassung von Bildern mit unserer Versuchsschaltung gibt es drei Möglichkeiten:

4.1.1 Bewegen des CCD

Ein sich nicht bewegendes Bild wird auf den Sensor projiziert. Nun muss man das CCD Zeile für Zeile so verschieben, dass das Bild zeilenweise abgetastet wird, wobei folgende Arbeitsschritte ablaufen:

- Zeile scannen
- Daten an den PC ausgeben
- Sensor weiterschieben

Dabei ergibt sich das Problem, dass für die Nachführung des Sensors eine sehr präzise Mechanik notwendig ist, die es erlaubt, den Sensor um jeweils genau eine Zeilenbreite zu verschieben. Der Bau einer solchen Mechanik ist sehr schwierig.

4.1.2 Bewegen des Objektes

Ein sich bewegendes Bild wird auf den ruhenden Sensor projiziert. Durch die Bewegung des Objektes verschiebt sich nun das Bild über den Sensor. Wenn es sich um eine Zeilenbreite verschoben hat, wird die nächste Zeile gescannt und an den PC gesendet. Damit das Bild nicht verzerrt aufgenommen wird, muss der Sensor genau senkrecht zur Bewegungsrichtung des Objektes angeordnet werden, außerdem ist ein genauer Zeittakt erforderlich, der immer dann eine neue Zeile einliest, wenn sich das Bild um eine Zeilenbreite verschoben hat.

4.1.3 Bewegen des Bildes

Ein unbewegtes Bild wird auf den feststehenden Sensor projiziert. In den Strahlengang wird ein drehbarer Oberflächenspiegel eingebaut, der das Bild über den Sensor führt. Die Probleme sind hier die gleichen wie beim Bewegen des Sensors, nur dass der Spiegel kleiner und leichter ist. Diese Drehung könnte z.B. mit einem Zeigerdrehspulinstrument realisiert werden, ist aber erschütterungsempfindlich.

4.2 Abbilden von Himmelskörpern

Bei nahezu allen Himmelsobjekten ist es so, dass sie sich aufgrund der Erdrotation von selbst bewegen. Damit bietet sich eine Lösung nach 4.1.2 an, denn so muss nur das Teleskop mit der Kamera auf das Objekt ausgerichtet und in regelmäßigen Abständen eine Zeile ausgelesen werden.

Nach diesem Prinzip arbeitet unsere Kamera.

5 Konstruktionsbeschreibung

5.1 Anbau an ein Teleskop

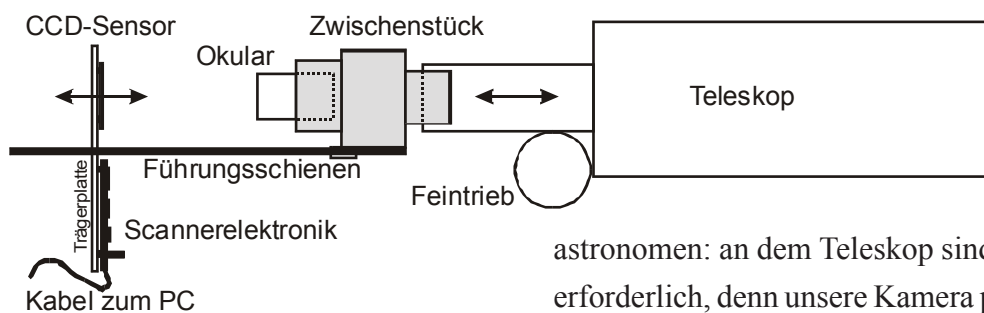


Abbildung 10 zeigt, wie die Kamera an das Teleskop angebaut wird. Zur Beruhigung aller Hobby-

astronomen: an dem Teleskop sind selbst keine Umbauten erforderlich, denn unsere Kamera passt mit dem Zwischenstück, das einen passend gedrehten Flansch hat, an alle Teleskope mit einer Standardaufnahme für die Okulare.

Abb. 10: Anbau der Kamera an das Teleskop

5.2 Anordnung der Sensorelektronik

Der Sensor wird samt Elektronik über einen Adapter an den Tubus angeschlossen, wobei die Feineinstellung des Tubus weiterhin voll funktionsfähig bleibt. Da die üblichen Teleskop-Okulare eine sehr kurze Brennweite haben, ist es sehr schwierig, die Bildschärfe richtig einzustellen. Deshalb verwenden wir statt dessen ein längerbrennweitiges Okular aus einem Mikroskop, das in die entsprechende Aufnahme des Adapters passt und dort mit einer kleinen Schraube arretiert werden kann. In den Adapter sind zwei Führungsschienen eingelassen, auf denen die Sensorelektronik verschoben werden kann, um die Bildweite für ein scharfes Bild auf dem CCD einstellen zu können.

5.3 Anschluss der Sensorelektronik

Die aus einem Handscanner stammende Sensorelektronik wird mit einem Spezialstecker und einer dazu passenden PC-Karte an einen Computer angeschlossen. Mit dem dazugehörigem Programm können zahlreiche Einstellungen getroffen und anschließend der Scanvorgang gestartet werden.

5.3.1 Erforderliche Ergänzungen an der Elektronik des Handscanners

Da aber in unserem Falle nicht der Sensor, sondern ein unerreichbar weit entferntes Objekt bewegt wird, wird eine elektronische Schaltung benötigt, die nach einer bestimmten Zeit dem Scanner ein Signal liefert, dass er eine Zeile einlesen soll.

Um ein seitengetreues Bild zu erhalten, soll hier am Beispiel des Mondes berechnet werden, wie schnell unser Scanner jeweils eine Zeile lesen müsste. Wir haben unseren Scanner so positioniert, dass

der Mond die gesamte Sensorfläche von 25,4 mm entsprechend 1600 Pixeln füllt. Der Mond hat einen Sehwinkel von ungefähr $0,5^\circ$. Er benötigt aufgrund der Erdrotation 1 Stunde um 15° zurückzulegen. Nach 2 min - entsprechend 120 s - hat er seinen eigenen Durchmesser von $0,5^\circ$ zurückgelegt. Unser Sensor muss daher in der Lage

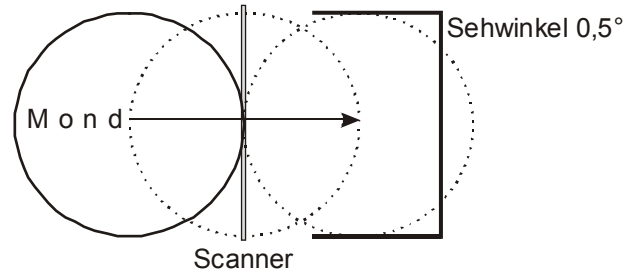


Abb. 11: Bewegung des Mondbildes über den Scanner

sein, 1600 Zeilen in 120 s zu lesen und an den PC zu senden. Für eine Zeile wäre dann eine Zeit von 0,075 s nötig, folglich muss der Sensor 13,3 Zeilen in einer Sekunde erfassen.

Zur Erzeugung dieses Taktes verwenden wir eine einfache NE555-Multivibrator-Schaltung nach [4]. An den Ausgang des Multivibrators ist ein Transistor T1 angeschlossen, der zum Phototransistor der ursprünglichen Lichtschranke des Scanners parallelgeschaltet ist. Die Lichtschranke selbst muss unbedingt abgedunkelt sein, da sonst der Phototransistor dauerhaft leitet. Bei dieser Schaltung ist der erzeugte Takt außerdem stufenlos einstellbar, sodass die Kamera universell einsetzbar ist und auch mit anderen Okularen verwendet werden kann.

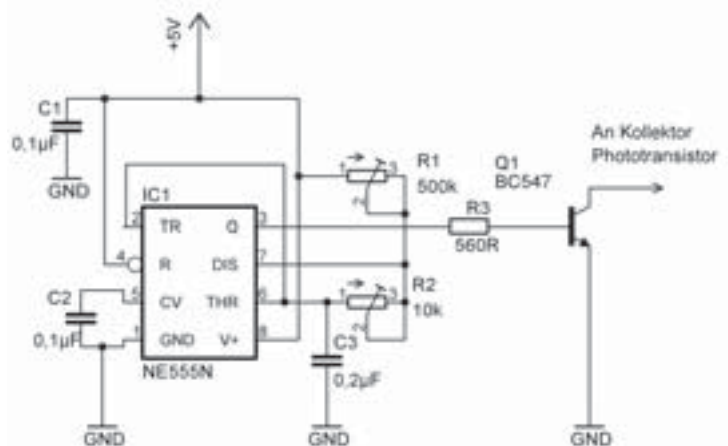


Abb. 12: Schaltplan des Multivibrators

5.4 Systemtest

Beim Testen unserer Schaltung hatten wir ein Problem: das Teleskop kann nur Objekte scharf abbilden, die mindestens 60-70 Meter entfernt sind. Da wir unsere Versuche aber in einem Kellerraum durchgeführt haben, war diese Entfernung zu groß, außerdem konnten wir in der dunklen Jahreszeit auch kein geeignetes Objekt durch das Fenster anpeilen.

5.4.1 Abbilden eines feststehenden Objektes

Deshalb haben wir bei unseren Tests statt des vorhandenen Teleskops eine andere Optik zur Erzeugung des Bildes verwendet. Diese besteht aus einem hochwertigen großformatigen Kameraobjektiv mit 180 mm Brennweite, hinter dem unsere Sensorelektronik mit dem CCD angeordnet ist (siehe Abb. 13). Auf den CCD-Sensor darf von der Seite kein oder nur sehr wenig Fremdlicht fallen, weil sonst das Bild zu stark aufgehellt wird, deshalb haben wir die Raumbelichtung ausgeschaltet und zusätzlich unsere Elektronik mit einem passend zugeschnittenen Karton (hier



Abb. 13: Testaufbau mit Kameraobjektiv

nicht zu sehen) abgedeckt. Hiermit können wir Objekte zwischen 3 und 10 m Entfernung abbilden.

Bei unserem ersten Scanversuch mussten wir noch die Optik samt Sensor bewegen, da sich das zu scannende Objekt (Diskette am Schrank) nicht bewegt hat. Dabei konnten wir bereits feststellen, dass die Empfindlichkeit unserer Anordnung hinreichend groß und somit keine zusätzliche Beleuchtung unseres Objektes notwendig war.

Abbildung 14 zeigt unser erstes brauchbares Bild, dass wir mit unserer Kamera aufnehmen konnten. Es zeigt eine Diskette, die wir in ca. 6 m Entfernung an einem Schrank mit weißer Front mittels Klebestreifen (am oberen Rand der Diskette zu erkennen) festgeklebt haben. Trotz der Bewegung von Hand ist die Form der Diskette eindeutig zu erkennen, auch der Schatten auf dem Schrank ist noch gut zu sehen.



Abb. 14: Testbild

5.4.2 Abbilden eines sich bewegenden Objektes

Um eine Bewegung der Optik zu vermeiden, haben wir bei unserer zweiten Versuchsreihe einen um eine Achse rotierenden Lauftext verwendet, den wir mit einer Anordnung aus Fischertechnik improvisierten. Dies erlaubt es uns auch, die Abtastrate so zu justieren, dass das Bild nicht mehr verzerrt wiedergegeben wird, außerdem können wir die benötigte Lichtmenge in Abhängigkeit von den Programmeinstellungen gezielter variieren. Aus 4 Meter Entfernung haben wir mit unserer Scanner-Kamera den sich drehenden Text (1 Umdrehung in ca. 4 s) nahezu verzerrungsfrei aufnehmen können.

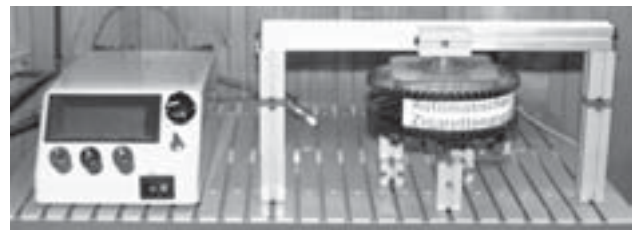


Abb. 15: Anordnung zur Aufnahme eines bewegten Testbildes, oben: rotierender Text, unten: aus 4 m Entfernung aufgenommenes Bild

Unter dem Text erkennt man zum Teil außerdem noch die einzelnen Zähne des verwendeten Zahnrades. Die nicht bewegten Teile des Bildes sind gleichmäßig über die ganze Breite des Bildes dargestellt. Obwohl uns hier nur 16 Graustufen zur Verfügung stehen, ist der Kontrast durchaus hinreichend. Da der Text nicht selbst leuchtend ist, haben wir ihn mit einer Lampe beleuchtet.

5.5 Ausblick: Eigene Sensorschaltungen

Durch eine großzügige Spende der Firma Toshiba sind wir in den Besitz von 12 Single-Line-CCD's samt Datenblatt gekommen (siehe S. 7, Abb. 7). Von diesen Sensoren sind 4 Stück S/W-CCD's mit 2160 Pixeln, 4 Stück S/W-CCD's mit 2048 Pixeln und 4 Stück Farb-CCD-Sensoren mit 2700 Pixeln. Diese Sensoren sind deutlich hochauflösender als unser jetziges CCD mit 1600 Pixeln. Außerdem

kann man bei einer Eigenentwicklung der zugehörigen Ansteuerelektronik die Belichtungszeit deutlich besser steuern, bei der jetzigen Elektronik ist das nur in einem sehr beschränkten Rahmen möglich. Auch kann ein besserer A/D-Wandler verwendet werden, der 256 Graustufen bzw. 256 Stufen pro Grundfarbe ermöglicht, anstatt im Moment 16 Graustufen. All diese Faktoren tragen dazu bei, dass ein deutlich besseres Bild möglich ist als das jetzige.

6 Quellenangaben

- [1] Wilfried Kuhn: Physik Band I, Westermann Verlag, Braunschweig 1987
- [2] Dr. Alfred Recknagel: Physik Band Optik, VEB Verlag Technik, Berlin 1990
- [3] CCD Linear Image Sensor Databook, Toshiba Corporation Japan, 1997
- [4] Dieter Nährmann: Das Große Werkbuch Elektronik Teil B, Franzis Verlag, München 1989
- [5] Dr. Oskar Höfling: Physik- Formeln und Einheiten Sek. II, Aulis Verlag, Köln 1989

7 Danksagung

Wir bedanken uns bei unserem Betreuungslehrer, Herrn StD Thomas Biedermann, für seine große Geduld und Zeiteinsatz. Außerdem bedanken wir uns bei der gesamten Familie Biedermann, die uns an langen Forschungstagen ertragen und gut gepflegt hat. Unser Dank gilt auch der Firma Toshiba, die uns freundlicherweise 12 CCD's für weitere Experimente sowie ein umfangreiches Datenbuch kostenlos zur Verfügung gestellt hat, sowie der Firma e2v, die uns ebenfalls weitere Sensoren in Aussicht gestellt hat. Last but not least bedanken wir uns bei unseren Eltern für ihre Geduld und Taxifahrerei.

DANKE!!!