

Nobelpreis 2009 für Physik

Revolutionäre optische Technologien

Claudia Haagen-Schützenhöfer

Überraschend und für die Tradition des Nobelpreises doch eher ungewöhnlich wurde der Nobelpreis 2009 nicht für physikalische Grundlagenforschung vergeben, sondern zu gleichen Teilen für zwei Erfindungen, die unmittelbar das Alltagsleben jedes Einzelnen beeinflussen. Die Wahl des Nobelpreiskomitees fiel auf Charles Kuen Kao, der die Informationsübertragung mittels optischer Glasfasern revolutionierte und auf Willard Sterling Boyle und George Elwood Smith, die mit der Erfindung des CCD (charge-coupled device), eines auf Halbleitertechnik basierenden digitalen Bildsensors, eine Revolution in der Fotografie auslösten.

Die zeitgleiche Verleihung des Nobelpreises für diese Wissenschaftler ist wohl kein Zufall, sondern spiegelt vielmehr wider, dass der tägliche weltweite Informationsfluss, die Übertragung von Daten, Bildern, Musik etc. in Sekundenbruchteilen, erst durch das Zutun beider Erfindungen möglich wurde: Durch die Erfindung des CCD gelang es erstmals, Bilder nicht auf Film, sondern elektronisch zu erfassen und zu speichern. Die elektronische Übermittlung konnte allerdings nur durch den Fortschritt in der Glasfasertechnik, die den Transport derartig großer Datenmengen erst zuließ, bewerkstelligt werden.

Die Lichtgestalten

In den Biographien der drei Ausgezeichneten, die seit Bekanntwerden ihrer Nobelpreisauszeichnung von den Medien als „Masters of Light“ [3] tituliert werden, finden sich neben ihren Beiträgen zur Entwicklung der modernen Informationsgesellschaft noch weitere Parallelen: Ihre prämierten Erfindungen datieren zurück in die 60er Jahre und alle drei haben ihre aktive Forscherkarriere bereits beendet [1].

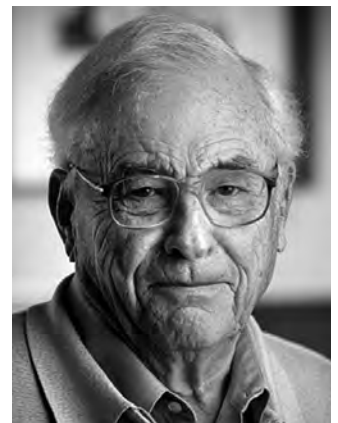
Charles Kuen Kao, an den der Nobelpreis zur Hälfte geht, wurde 1933 in Shanghai geboren und ist sowohl Staatsbürger der USA als auch von Großbritannien. Seine Dissertation im Bereich „Electrical Engineering“ schloss er 1965 an der University of London ab. Zu dieser Zeit war er bereits bei den Standard Telecommunications Laboratories in Harlow (UK) tätig, wo er und sein Kollege George Hockham sich mit Glasfasern beschäftigten. Ihre bahnbrechenden Überlegungen zur effizienten Informationsweiterleitung in hochreinen Glasfasern veröffentlichten sie erstmals 1966 in einem Artikel[A], der von der Fachwelt mit großer Skepsis aufgenommen wurde. Doch schon 1970 konnten die getroffenen Vorhersagen auch experimentell bestätigt werden, womit der Startschuss für die Umsetzung optischer Kommunikation fiel. Seine aktive Karriere beendete Charles K. Kao 1996.

Ein Viertel des Nobelpreises für Physik geht an den 1924 in Amherst (Kanada) geborenen Willard Sterling Boyle, der heute US-Staatsbürger ist. Seine Dissertation schloss er 1950 an der McGill Universität in Kanada ab, um dann von 1953 bis zu seiner Pensionierung 1979 für die Bell Laboratories in den USA tätig zu sein. Dort war er als „Director of the Device Development Laboratory“ der Vorgesetzte des dritten Ausgezeichneten, George Smith, dem ebenfalls ein Viertel des Nobelpreises zuerkannt wurde.

George Elwood Smith wurde 1930 in White Plains (USA) geboren. Sein Studium beendete er an der Universität von Chicago im Jahre 1959 mit einer aufsehenerregenden Dissertation[B], die wegen ihrer Länge von nur acht Seiten in die Annalen der Universität einging. Noch im selben Jahr begann Smith seine Tätigkeit für die Bell Laboratories. Gemeinsam mit Willard Boyle entwickelte er im Jahr 1969 das Basiskonzept für den CCD-Sensor. Das ursprünglich als elektronische Speichereinheit konzipierte Bauteil trat bald seinen Siegeszug als digitaler Bildsensor an, der heute ein wesentlicher Teil der modernen, elektronischen Bildverarbeitung ist.



Charles Kuen Kao



Willard Sterling Boyle



George Elwood Smith

Mag. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am AECC Physik Wien. Der Beitrag basiert auf den Mitteilungen der Nobelstiftung http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/index.html

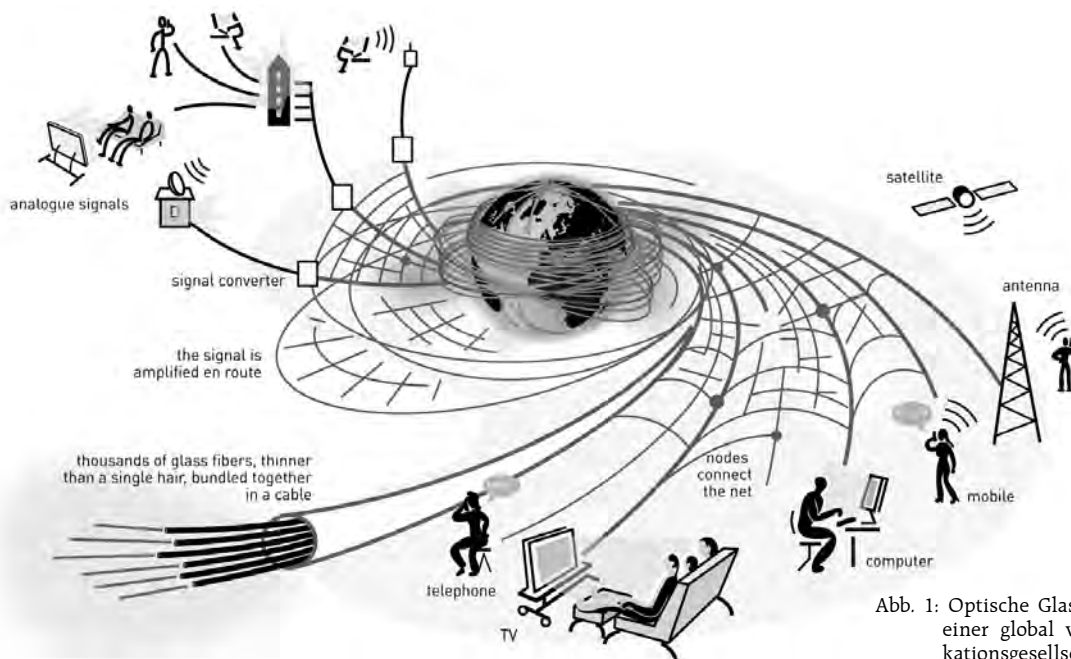


Abb. 1: Optische Glasfasern als Grundlage einer global vernetzten Kommunikationsgesellschaft (siehe [3])

Glasfaseroptik: Datenaustausch über weite Strecken mit geringem Informationsverlust

Von New York nach Sidney in 1/16 Sekunde – die wunderbare Welt der Glasfasern

Die Entwicklung der Glasfaserkabel als adäquates Medium für optische Informationsübermittlung war eine wesentliche Voraussetzung für moderne Kommunikationstechniken, die uns in die Lage versetzen, Text, Musik, Bilder und Videos in Bruchteilen von Sekunden um den Globus zu schicken. Unsere Kommunikationsgesellschaft hängt – bildlich gesprochen – dank Charles K. Kao an einem Netz aus „gläsernen Fasern“ (Abb. 1), das derzeit 25000 Mal den Globus umspannen könnte [3].

Die Anfänge

Farbige Effekte, die beim Zusammenspiel von Glas und Licht entstehen, sind wohl seit der Herstellung von Glas, also seit rund 4500 Jahren, bekannt. Eine wissenschaftliche Erklärung dessen setzte jedoch erst mit der Entdeckung der optischen Gesetze im 17. Jahrhundert ein. Doch erst vor nicht einmal 100 Jahren begann die systematische Anwendung des Phänomens, dass Licht aufgrund von Totalreflexion in durchsichtigen Medien mit höherem Brechungsindex „gefangen“ bleibt und so auch entlang kurviger Bahnen geleitet werden kann. Waren die Anwendungen anfänglich noch ästhetischer Natur wie farbige Wasserstrahlen in Springbrunnen, so finden sich ab den späten 1920ern bereits Einsatzgebiete in der Medizin (Gastroskopie) und beim Militär (flexibles Periskop) [2].

Weiterentwicklungen

Eine deutliche Verbesserung der Glasfasern konnte in den 1950ern durch die Ummantelung (cladding) der Glasfaser-

kerne (core) mit einem Material geringfügig niedrigeren Brechungsindex gelingen (Abb. 2). Dadurch wurde einerseits die Totalreflexion begünstigt und auf der anderen Seite wurde die total reflektierende Grenzfläche vor Kratzern oder Berührungen mit anderen Lichtleitern geschützt. Beschädigungen oder Kontaktstellen mit anderen Lichtleitern können zu lichtdurchlässigen Stellen führen.

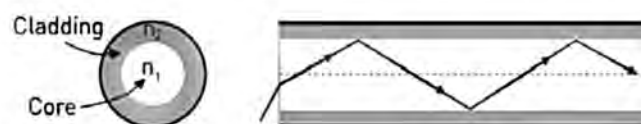


Abb. 2: Der Gesamtdurchmesser einer optischen Faser liegt bei ungefähr 125 Mikrometer. Der Kern (Core) hat abhängig von der Faserart üblicherweise einen Durchmesser von 10 Mikrometern, also weniger als ein Haar (s. [2]). Die Ummantelung (Cladding) hat einen kleineren Brechungsindex n_2 als der Kern.

Für die Informationsübertragung über weite Strecken schien die Glasfasertechnik damals jedoch unbrauchbar. Mit der Verlegung des ersten transatlantischen Koaxialkabels 1956, das gleichzeitig 36 Telefonate übertragen konnte, standen Elektronik und Radiotechnologie im Blickpunkt der Informationstechnik. Der schnell anwachsende Kommunikationsbereich verlangte allerdings rasch nach höheren Übertragungskapazitäten und somit nach einer anderen Technologie.

Der Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen nahem Infrarot und Ultraviolett galt schon länger als besonders attraktiv für die Kommunikationstechnologie (Graham Bells „Photophone“ [2] operierte bereits 1880 mit sichtbarem Licht). Hohe Modulationsfrequenzen lassen in diesem Frequenzbereich des Spektrums hohe Übertragungsgeschwindigkeiten zu, wodurch zehntausendmal mehr Informationen als mit Radiowellen übertragen

werden können. Ein weiterer Schritt in Richtung großtechnischer Nutzung optischer Kommunikationstechnologie war mit der Erfindung des LASERS¹⁾ Anfang der 1960er verbunden, durch den die Qualität der Lichtsignale erheblich gesteigert wurde. Das Hauptproblem, das zu diesem Zeitpunkt allerdings noch ungelöst blieb, war das eines adäquaten Übertragungsmediums.

Charles Kuen Kao Vision

Glasfasern galten aufgrund ihres großen Lichtverlustes – nur 1% des ursprünglichen Lichtsignals konnte mit einer 20m langen Glasfaser übertragen werden (Dämpfungskoeffizient²⁾ $\alpha = 1000 \text{ dB/km}$ – als unbrauchbar. Doch genau dieser in der Scientific Community weit verbreiteten Annahme widersprach Charles Kao 1966 in seiner mit G. Hockham verfassten theoretischen Abhandlung, die voraussagte, dass die verlustbehaftete Übertragung primär auf Verunreinigungen im Glas zurückzuführen sei. Das Potential von Glasfasern bewertete er wie folgt: „[...] a fibre of glassy material constructed in a cladded structure [...] represents a possible practical optical waveguide with important potential as a new form of communication medium [...] Compared with existing coaxial-cable and radio systems, this form of waveguide has a larger information capacity and possible advantages in basic material cost.“ (KAO: 1966, zit.n. [2]).

Im Gegensatz zu anderen Forschungsansätzen auf diesem Gebiet erstreckten sich Kaos Überlegungen nicht nur auf die theoretischen Aspekte der Wellenleitung, sondern bezogen auch Materialeigenschaften des Übertragungsmediums mit ein. Als wichtigste Erkenntnis folgte daraus, dass die Verluste in idealen dielektrischen Übertragungsmedien hauptsächlich durch Absorption und Streuung erfolgen.

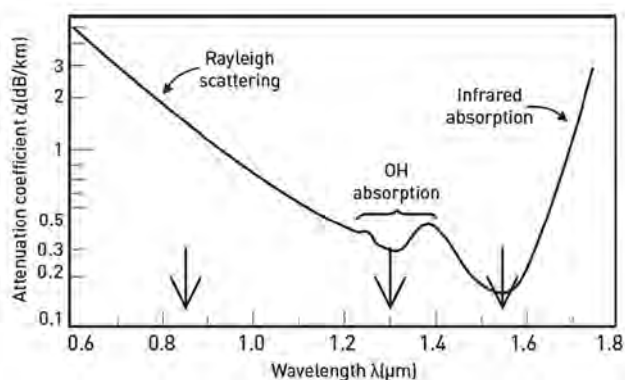


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Lichtdämpfung (Dämpfungskoeffizienten) (s. [2]) für Quarzglas.

Der verwendete Wellenlängenbereich spielt für die Lichtdurchlässigkeit eines Stoffes eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Nach Abb. 3 ist der Dämpfungskoeffizient (in diesem Fall von Quarz/Siliciumdioxid) eine Funktion der Wellenlänge. Im kurzwelligeren Bereich ist ein höherer Dämpf-



Abb. 4: Charles Kuen Kao im Labor ca. 1966

fungskoeffizient auf Effekte der Rayleigh Streuung zurückzuführen, während im langwelligeren Bereich Absorptionseffekte durch Moleküle überwiegen. Als bevorzugte Wellenlängen erwiesen sich somit 1,3 und 1,55 μm , wo beide Effekte gering sind [2]. Die aus den obigen Überlegungen abgeleiteten Lichtdämpfungswerte³⁾ von einigen dB/km standen jedoch im krassen Gegensatz zu den tatsächlich gemessenen Werten, woraus Kao folgerte, dass Verunreinigungen (vor allem Eisenionen) für die Lichtdämpfung hauptverantwortlich sind [2].

Die technische Umsetzung

Messreihen mit verschiedenen Materialzusammensetzungen bei unterschiedlichen Wellenlängen zeigten, dass Quarz (Siliciumdioxid) die besten Eigenschaften als optischer Leiter aufweist. Allerdings stellte die Herstellung durch den hohen Schmelzpunkt von etwa 2000 Grad Celsius vorerst eine technische Hürde dar. Doch bereits 1970 gelang es einem Forscherteam der Corning Glass Works (US) unter der Leitung von R. Maurer, mittels der CVD Methode⁴⁾ (Chemical Vapor Deposition) hochreine Glasfasern aus Siliciumdioxid mit geringfügig unterschiedlichen Brechungsindizes in Kern und Mantel herzustellen. Durch weitere Verbesserungen konnte bereits 1971 eine 1 km lange optische Faser mit einem Lichtdämpfungswert von 4 dB/km bei einer Wellenlänge von 850 nm gefertigt werden.

Die in der Glasfasertechnologie eingesetzten Herstellungsprozesse wirken sich positiv auf die Eigenschaften des Werkstoffs Glas aus. Durch das Ziehen des Glases in Fäden, die dünner als ein Haar sind (mit Durchmessern im Bereich von 125 μm [4]), gewinnt das Material an Festigkeit und Flexibilität und ist gleichzeitig leicht. Zudem besteht gegenüber herkömmlichen Kupferkabeln der Vorteil, dass Glasfasern von Blitzen nicht beeinträchtigt werden.

2) Der Dämpfungskoeffizient – angegeben in [dB/km] – setzt den Leistungsinput $P(0)$ in Bezug zum Leistungsoutput $P(L)$ bezogen auf eine bestimmte Übertragungslänge L und berechnet sich folgend:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log_{10} \frac{P(0)}{P(L)}$$

3) Kao bezog sich auf einen Grenzwert von 20 dB/km.

4) Die erhitzte Oberfläche des Basismaterials wird mit einer flüchtigen Verbindung in Reaktion gebracht. Dadurch wird eine Feststoffkomponente abgeschieden.

1) C.H. Townes, A.M. Prokhorov und N.G. Basov erhielten 1964 den Nobelpreis "Für grundlegende Arbeiten auf dem Gebiet der Quantenelektronik, die zur Konstruktion von Oszillatoren und Verstärkern auf der Basis des Maser-Laser-Prinzips führten" [<http://www.nobelpreis.org/physik/bassow.htm>], (Stand 22.10.2009).

Heute erreichbare Lichtdämpfungswerte liegen bei weniger als 0,2 dB/km bei einer Wellenlänge von 1,55 μm . Die verbleibenden Verluste, die auch bei der reinsten Faser auftreten, werden bei Langstreckenübermittlung durch optische Verstärker, die auf dem Prinzip der induzierten Emission ähnlich dem LASER basieren, kompensiert. Zur Verdeutlichung der unglaublichen Reinheit, die Glasfasern aufweisen müssen, um derart geringe Lichtdämpfungsverluste zu erzielen, dient folgender Vergleich: Im Durchschnitt lässt Meerwasser eine Sichtweite von 10 bis 50 Metern [5]

zu. Würde die Salzwasserreinheit allerdings der von high-end Glasfasern entsprechen, wären Sichtweiten bis zu den tiefsten Meeresstellen möglich.

Die Kapazität optischer Kabelnetzwerke nimmt weiterhin zu – die Übermittlung von Tausenden von Gigabits pro Sekunde ist längst keine Utopie mehr. Technische Entwicklungen zielen verstärkt in Richtung interaktiver Kommunikation, die durch die Vernetzung von Haushalten mittels Glasfasern realisiert werden soll.

Das elektronische Auge – Ein Geistesblitz mit Nebenwirkung

Bevorstehende Etatkürzungen ihrer Abteilung in den Bell Laboratories spornten Willard Boyle und George Smith dazu an, dem von der Abteilung ihrer Opponenten entwickelten magnetischen Speicherbaustein ein auf Halbleitertechnik basierendes Parallelkonzept entgegenzusetzen. Mit dieser Vorgabe trafen sich Boyle und Smith am 17. 10. 1969 zu einem Brainstorming, das etwa eine Stunde dauerte und an dessen Ende die Basisstruktur des CCD (charge-coupled device) stand.

Über den in nur einer Woche von Technikern fertig gestellten Prototyp meinte Boyle: *“...when we made the CCD, it worked immediately and it was amazing! We never had that kind of luck before.”* (Willard Boyle zit.n. [6]) Trotz der raschen Fortschritte bei der technischen Umsetzung verfehlten die Erfinder ihr Ziel, einen revolutionären Datenspeicher zu entwickeln. Berühmt und aus der heutigen Informationsgesellschaft nicht mehr wegzudenken, wurde die „Nebenwirkung“ ihrer ursprünglichen Intention, nämlich die Nutzungsmöglichkeit des CCD als digitalen Bildsensor.



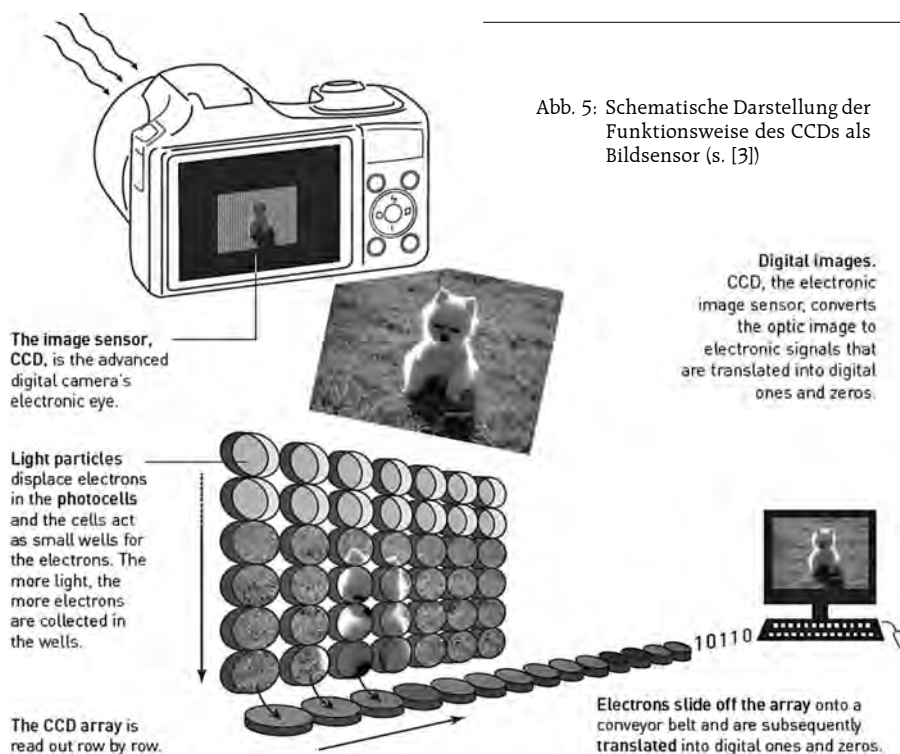
Abb. 6: Willard Boyle und George Smith mit ihrer ersten CCD-Videokamera

Das Konzept des CCD-Sensors

Das CCD, eine Matrix aus lichtempfindlichen Photozellen in der Größe einer Briefmarke, ist ein Produkt der modernen Halbleitertechnik, das auf dem von Einstein erklärten Photoeffekt⁵⁾ basiert. Jedes dieser lichtempfindlichen Bildelemente (Pixel) beinhaltet einen Kondensator aus Metall-oxidhalbleitermaterial MOS). Treffen nun Photonen auf die Oberfläche eines Bildelementes, können durch den Photoeffekt Elektronen aus ihren Bindungen herausschlagen werden. Die Elektronen wandern in Richtung der Kondensatoren, die Potentialtöpfe darstellen. Die Anzahl der pro Potentialtopf gespeicherten Elektronen entspricht der Anzahl der auf die Oberfläche treffenden Photonen (Abb. 7).

In einem weiteren Schritt wird die in den Bildelementen gespeicherte

5) Einstein wurde 1921 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet für seine quantenphysikalische Erklärung des Photoeffekts von 1905.



Information – also die Ladungsmenge⁶⁾ – Element für Element und Reihe für Reihe verschoben – ähnlich einem Rechenschieber oder einer Eimerkette. Im Ausleseverstärker erfolgt schließlich eine Umwandlung in digitale Signale, die zur Weiterverarbeitung geeignet sind [3].

Die technische Umsetzung

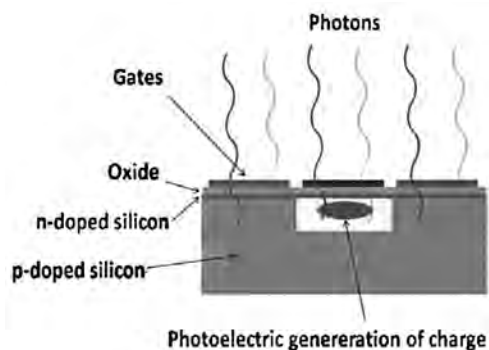


Abb. 7: Schematischer Aufbau eines Bildelements (Pixel) des CCD-Sensors (s. [2]).

Das CCD besteht aus einer Halbleiterplatte (häufig dotiertes Silizium), auf der eine transparente elektrisch isolierende Schichte (etwa Siliziumdioxid) liegt. Darauf befinden sich wiederum unzählige Elektroden (in der Regel drei pro Pixel) aus leitfähigem, transparentem Material. Wird an eine Elektrode (Gate) der positive Pol einer Spannungsquelle angelegt, so findet ausgelöst durch Coulomb'sche Kräfte eine Verschiebung der Ladungsträger statt. Die negativ geladenen Elektronen werden in den Bereich unterhalb der positiven Elektrode verschoben. Gleichzeitig findet eine Abstoßung der Elektronenlöcher⁷⁾ weg vom Elektrodenbereich statt, wodurch sich ein Potentialtopf im Silicium ausbildet.

Treffen nun Photonen, deren Energie größer als die Bandlücke des Halbleiters ist, auf ein Bildelement, so wechseln die Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband und Elektronen-Loch-Paare entstehen. Die derart erzeugten, frei beweglichen Elektronen sammeln sich im Potentialtopf unter der positiven Elektrode an, während die entstanden Elektronenlöcher ins Innere des Halbleiters fließen [7].

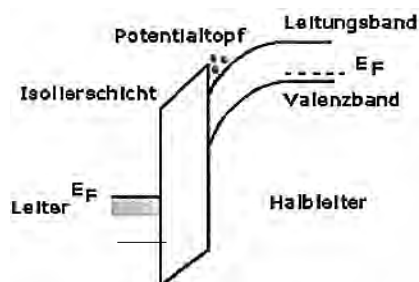


Abb. 8: Bändermodell eines CCD mit Elektronen im Potentialtopf (Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor>).

6) Im ursprünglich zu Speicherzwecken entwickelten CCD-Sensor von 1969 konnten die weiter geleiteten Ladungen dreierlei Ursprung haben „It may come from the bulk or surface generation-recombination centers within the depletion region, from the hole-electron pairs produced by incident radiation, or from the surface when the input gate is turned on“ [8].

7) Als Elektronenlöcher werden Stellen fehlender Valenzelektronen bezeichnet, die bei der Betrachtung von Halbleitern oft wie positive Ladungsträger behandelt werden.

Die Herausforderung besteht in einem zweiten Schritt darin, Informationen aus dem Ladungszustand dieser Potentialtöpfe (Kondensatoren) zu gewinnen. Durch eine zyklische Änderung der an die Elektroden angelegten Spannungen wandern die Ladungspakete aus den einzelnen Pixel nun Schritt für Schritt in Richtung eines Datenverarbeitungselements, wo sie verstärkt und digitalisiert werden. Der gesamte Inhalt des CCD wird dabei in eine Zahlenmatrix konvertiert, in der Werte für die Intensität jedes einzelnen Bildelements stehen und zur Rekonstruktion des Bildes herangezogen werden können [7].

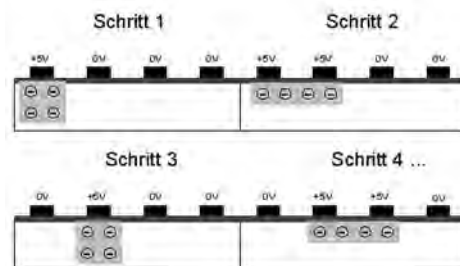


Abb. 9: Modell des Ladungstransports im CCD (Quelle: www.virtualuniversity.ch/elektronik/digital/dvs/images/ccd2.gif, Stand 22.10.2009).

Dieser Ausleseprozess generiert ein Schwarz-Weiß-Bild des Objektes. Um Farbbilder zu erzeugen, werden Farbfilter meist der Grundfarben rot, grün oder blau oberhalb jeder einzelnen Sensorzelle angebracht. Um die Farbgebung der Empfindlichkeit des menschlichen Auges anzupassen, müssen allerdings doppelt so viele grüne wie rote oder blaue Pixel verwendet werden, wodurch die Auflösung gegenüber Schwarz-Weiß-Bildern um einen Faktor 4 verringert wird [2].

Anwendungsbereiche



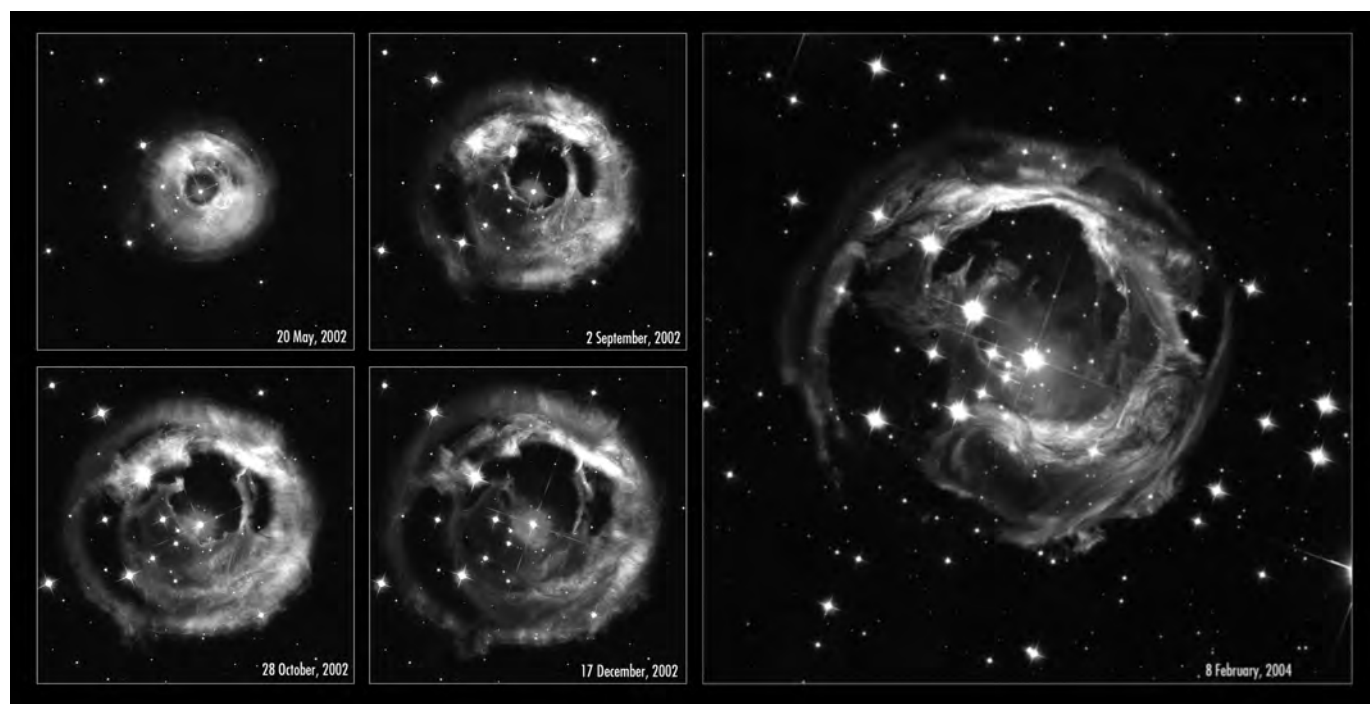
Abb. 8: Aufnahme vom 8. 2. 2004 des Hubble Space Teleskopes mittels CCD Technologie (siehe [3]) zeigt das Lichtecho, das ein Helligkeitsausbruch des roten Überriesen V383 im Sternbild Einhorn im Jänner 2002 in der umgebenden Staubwolke hervorruft. (Der CCD-Sensor der Wide Field Camera 2 des HST hat 1600 x 1600 Pixel.)

Für den Bereich der Alltagsfotographie hat sich die Digitalkamera als wirtschaftlicher Erfolg erwiesen. Welche Technologie, das CCD oder das etwa zeitgleich entwickelte CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sich letztendlich durchsetzen wird, bleibt vorläufig noch unentschieden. Während bei CCD die durch den Photoeffekt generierten Ladungsträger beim Auslesevorgang in einer Reihe verschoben werden, erfolgt das Auslesen bei CMOS am Ort der Ladungsentstehung. Damit ist der Vorteil eines geringeren Energieaufwandes verbunden, der allerdings zu Lasten eines höheren Rauschpegels und einer geringeren Bildqualität geht.

Damit kommt für Anwendungen im wissenschaftlichen Bereich vorwiegend die CCD Technologie zum Einsatz, wie durch Bilder des Hubble Space Teleskops beeindruckend gezeigt werden kann. Für die Astronomie waren die Vorteile durch den Einsatz des digitalen Bildsensors rasch offensichtlich. Basierend auf der Tatsache, dass der CCD-Sensor von 100 auftreffenden Lichtteilchen bis zu 90 aufnimmt, während es bei photographischen Platten oder dem Auge nur eines ist, verringerten sich Belichtungszeiten weit entfernter Objekten oft von mehreren Stunden auf einige Sekunden. Neben dem Einsatz in der Astronomie und der Ozeanographie findet die CCD Technologie auch im medizinischen Bereich Anwendung, sowohl in der Diagnostik als auch bei chirurgischen Eingriffen. Auch aus dem Alltagsleben sind zusätzlich zur digitalen Fotografie Geräte wie Scanner, Fax, Barcodelesegerät usw., die auf der CCD-Technologie beruhen, nicht mehr wegzudenken [3].

Quellen

- [A] Kao, K. C. and Hockham, G. A.: Dielectric-Fibre Surface Waveguides for optical frequencies. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers London, 113, (1966), 1151.
- [B] Smith, G. E.: Anomalous Skin Effect in Bismuth, Physical Review, 115 (1959), 1561-1568.
- [1] The Nobel Prize in Physics 2009. Press Release, 6 October 2009: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/press.html, (Stand 22.10.2009).
- [2] Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2009: Two revolutionary optical technologies. The Royal Swedish Academy of Sciences: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/sciback_phy_09.pdf, (22.10.2009)
- [3] The masters of light: The Nobel Prize in Physics 2009. Information for the Public. The Royal Swedish Academy of Sciences: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/info_publ_phy_09_en.pdf, (22.10.2009).
- [4] Lichtwellenleiter: <http://de.wikipedia.org/wiki/Lichtwellenleiter>, (22.10.2009).
- [5] Sichtweite: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sichtweite>, (22.10.2009).
- [6] Boyle, Willard S. : Interview October 2009 http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/boyle-interview.html, (22.10.2009).
- [7] Barbe, D. F. : Imaging devices using the charge-coupled concept. Proceedings of the IEEE. Vol. 63, No. 1, (1975), 38–67.
- [8] Tompsett, M. F., Amelio, G. F. and Smith, G. E.: Charge coupled 8-bit shift register. In: Applied Physics Letters, 17 (1970), 111-115.



In den Jahren 2002, 2004 und 2009 wurden mittels des Hubble-Teleskops mehrere Aufnahmen des sich ausbreitenden Lichtblitzes von V838 Monocerotis aufgenommen. Neben dem Lichtblitz um die Supernova 1987A ist dies eine der seltenen Möglichkeiten, die dreidimensionale Struktur von Materiewolken in der Umgebung von Sternen zu studieren.

V838 Mon ist etwa 20000 Lj von uns entfernt, seine Leuchtkraft dürfte jene der Sonne beim Ausbruch millionenfach übertroffen haben. Gemäß einer interferometrischen Größenbestimmung könnte er die Jupiterbahn ausfüllen. (Quellen: http://en.wikipedia.org/wiki/V838_Monocerotis und <http://www.spacetelescope.org/images/html/heic0405b.html>).