

Vom CCD-Chip zum Bild

Forschungsinfo 2/2006

Einleitung

Bilder haben eine große Aussagekraft. Das gilt insbesondere für Aufnahmen aus Bereichen, die für den Beobachter nicht unmittelbar zugänglich sind. Bei wissenschaftlichen Missionen im Weltraum wird daher der Kameratechnik stets eine vorrangige Stellung eingeräumt. Die technischen Probleme bei der erdfernen Bildaufnahme konnten allerdings erst mit dem Einsatz der elektronischen (CCD-) Bildaufnehmer befriedigend gelöst werden.

CCD-Bildaufnehmer

Die CCD-Technik wurde Anfang der 70er Jahre von Willard Boyle und George Smith in den Bell Laboratorien in New Jersey entwickelt. Der Begriff CCD steht hier für Charged-Coupled Device, ladungsgekoppeltes Bauteil. Im Prinzip besteht ein CCD aus einem Silizium-Plättchen, auf dem einfallendes Licht analog in Ladungspakete aus freien Elektronen umgewandelt wird. Den beiden Forschern war es gelungen, die Ladungspakete mit Hilfe von Potentialschwellen in einzelne Bildpunkte (Pixel) zu separieren. Der Bildbereich ist dabei in eine Anzahl von Zeilen und eine Reihe von Bildpunkten in jeder Zeile aufgeteilt. Mit Hilfe von externen Steuersignalen können die Bildpunkte in ein serielles Register transportiert und schließlich nacheinander mit hoher Genauigkeit ausgelesen werden. Am Ausgang steht dann eine elektrische Signalfolge zur Verfügung, die für jeden Bildpunkt die zugehörige Helligkeitsinformation enthält.

Die Bildübertragungskette wird schließlich geschlossen, wenn - wie hier in Abbildung 1 - das Ausgangssignal direkt in einen Bildschirm eingespeist wird. Das Bild zeigt die erste funktionsfähige CCD-Kamera mit den beiden Entwicklern und wurde 1970 bei der Erprobung aufgenommen.

Da elektrische Signale problemlos übertragen werden können, kann die Bildübertragung zwischen der Kamera und Bildschirm auch über weite Entfernungen ausgedehnt werden, wie es uns heutzutage beim Fernsehen geläufig ist.

Obwohl die CCD-Technologie weltweit von mehreren Firmen aufgegriffen und kontinuierlich verbessert wurde, dauerte es etwa 10 Jahre, bis die ersten gebrauchsfähigen CCDs zur Verfügung standen. Wegen der hohen Kosten wurden sie zunächst vorwiegend von Astronomen für bodengebundene Beobachtungen eingesetzt. Im Vergleich zu den bis dahin üblichen Filmaufnahmen konnte selbst mit dem damaligen Stand der CCDs einen wesentlich größeren Dynamikbereich erfasst werden; darüber hinaus waren die digitalisierten Bilddaten für die wissenschaftliche Auswertung hochwillkommen.



Abb. 1: Die erste CCD-Kamera 1970 im Bell-Labor

Die CCD-Bildaufnahmetechnik der Halley Multicolour Camera

Zum Ende der 70er Jahre war die Entwicklung der CCDs so weit fortgeschritten, dass sie auch für einen Einsatz im Weltraum eingeplant werden konnten. Bei der NASA hatte man begonnen, die ersten CCDs für das Hubble Space Telescope zu entwickeln.

Zur gleichen Zeit wurde bei der europäischen Raumfahrtbehörde ESA mit den Vorbereitungen zum Projekt Giotto, einer Mission zum Kometen Halley, begonnen. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Mission war eine Kamera, die Halley Multicolour Camera (HMC), die unter anderem den Nachweis für die Existenz eines Kometenkerns erbringen sollte.

Die Kamera wurde von einem europäischen Konsortium unter der Leitung von H.U. Keller am damaligen Max-Planck-Institut für Aeronomie gebaut.

Bei diesem aufwendigen Projekt waren die Anforderungen an die Technik der Bildaufnahme besonders hoch. Diese Aufgabe konnte nur mit einem CCD gelöst werden, der bei geringstem Raumbedarf eine hervorragende optische Auflösung und Empfindlichkeit bietet.

Eine spezielle Bildaufnahmetechnik musste entwickelt werden, um von einer rotierenden Raumsonde her (1 Umdrehung in 4 Sekunden) scharfe Bilder aufnehmen zu können. Besondere Anforderungen wurden an die Empfindlichkeit des Bildaufnehmers gestellt, weil im Laufe des Vorbeiflugs wegen der zunehmenden Bildgeschwindigkeit die Belichtungszeit bis auf 60 μ s reduziert werden musste.

Ausgehend von einer vorhandenen Bauserie wurde für die HMC Kamera ein hochempfindlicher, raumfahrtqualifizierter CCD mit 392x584 Bildpunkten bei der Firma Texas Instruments entwickelt. Wegen der stark begrenzten Datenübertragungsrate konnten am Ende nur noch Teilbilder (74x74 Bildpunkte) übertragen werden.

Abbildung 2 zeigt ein Bild des HMC CCDs. Dieser sogenannte Max-Planck-Chip ist der erste CCD, der in der westlichen Welt für eine hochauflösende wissenschaftliche Kamera im Weltraum eingesetzt worden ist. Die Oberfläche erscheint schwarz, weil der Chip das einfallende Licht fast vollständig aufnimmt und nur einen geringen Anteil wieder zurückspiegelt.

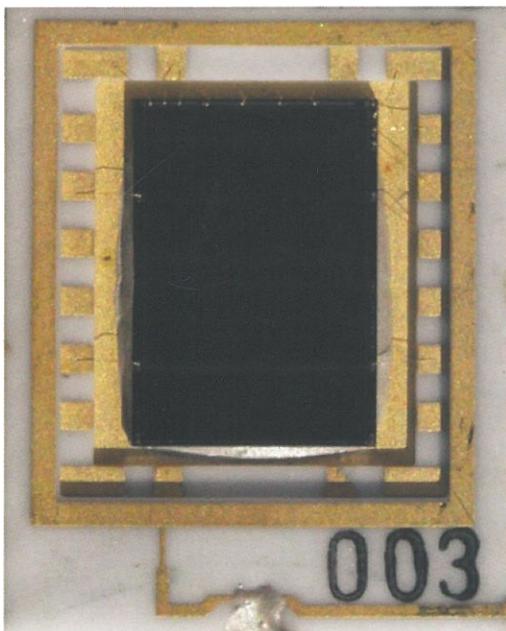


Abb. 2: Der HMC CCD-Bildaufnehmer-Chip

Insgesamt wurden zwei CCDs eingesetzt. Einer der Detektoren war mit einem Filterrad mit Farbfiltern für detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen in verschiedenen Spektralbereichen ausgerüstet.

HMC hat während des 2½-stündigen Vorbeiflugs am Kometen mehr als 2000 Bilder aufgenommen. Aus einer Entfernung von 100 000 km ist zum ersten Mal der Kern eines Kometen aufgelöst worden; damit konnte die vermutete Existenz eines Kometenkerns tatsächlich nachgewiesen werden. Der Kern hat in der Längsachse eine Ausdehnung von 15 km und ist von der Erde aus nicht sichtbar.

Das sogenannte 'beste' Bild in Abbildung 3 ist aus den letzten 70 Aufnahmen mit der höchsten Auflösung zusammengesetzt worden und zeigt den Kometenkern und die Koma, also den von der Sonne hell beleuchteten Kometenstaub.

Jeder CCD hat individuelle Eigenheiten. Während der Evaluierung der CCDs werden diese Eigenschaften im Labor eingehend analysiert und vermessen. Die Ergebnisse werden im Rechner in Matrizen für die spätere Kalibrierung der Bilder bereitgehalten. Im Weltraum können zudem die Eigenschaften einzelner Bildpunkte durch kosmische Einstrahlung verändert werden; die Kalibrierung muss gegebenenfalls nachträglich aktualisiert werden.

Die Kalibrierung der Daten und die anschließende Bildbearbeitung ist daher ein wesentlicher Bestandteil der Auswertung. Für diese Arbeiten bis hin zum 'besten' Bild wurde insgesamt ein Zeitraum von etwa 3 Jahren benötigt.



Abb. 3: Das 'beste' HMC-Bild des Kometen Halley

CCD-Chips für Titan und Mars

Um 1990 begannen die Vorbereitungen für die Cassini/Huygens-Mission zum Saturn mit der geplanten Landung der Huygens-Sonde auf dem Saturnmond Titan. Aus wissenschaftlicher Sicht war diese Mission besonders interessant, weil der Titan durch dichte Methanwolken verhüllt ist und sich damit einer Beobachtung von außen her weitgehend entzieht.

Mit Hilfe einer amerikanischen Kamera, dem Descent Imager/Spectral Radiometer-Instrument (DISR), sollte die Struktur der Wolken und der Oberfläche während der Landung analytisch untersucht werden. DISR ist ein komplexes Instrument mit 13 optischen Kanälen. Wegen der eingeschränkten Baugröße wurden davon neun optische Kanäle, darunter 3 Kamerakanäle, über ein Glasfaserbündel auf einen CCD projiziert.

In einer Zusammenarbeit mit der University of Arizona wurde die CCD-Bildaufnahmetechnik für DISR vom MPS beigesteuert. Für diese Aufgabe wurde ein spezieller CCD entwickelt. Abbildung 4 zeigt ein Bild des DISR-CCDs, der 512×256 Bildpunkte und ebenso viele Bildspeicherpunkte hat. Der Bildaufnahmebereich erscheint dunkel. Der darunterliegende, hell erscheinende Bildspeicherbereich ist mit einer opaken Aluminiumbeschichtung abgedeckt. Nach jeder Belichtung werden die Bildladungen sehr schnell in den geschützten Speicherbereich geschoben und von dort ausgelesen. Diese sogenannte Frame Transfer-Technik ermöglicht perfekte Bildaufnahmen auch ohne den Einsatz eines störanfälligen mechanischen Verschlusses.

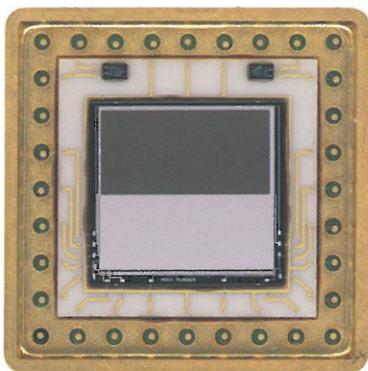


Abb. 4: Der DISR CCD-Bildaufnehmer-Chip

Im 14. Januar 2005 erfolgte der Abstieg der Huygens-Sonde an einem Fallschirm auf Titan. DISR nahm innerhalb von 2½ Stunden etwa 600 Bilder sowie weitere Daten aus verschiedenen Spektralbereichen auf. Wegen der großen Entfernung von etwa 1,4 Mrd. km war das übertragbare Datenvolumen stark begrenzt.

Abbildung 5 zeigt zwei Aufnahmen der DISR-Kamera. Auf dem linken Bild ist eine Landschaft mit den Konturen eines Flussbettes und eines Sees zu sehen. Die dunkel erscheinenden Konturen werden auf Sedimentablagerungen zurückgeführt, die durch heruntergeregnetes flüssiges Methan ausgewaschen worden sind. Vergleichbar mit Wasser unter irdischen Bedingungen kann Methan bei Temperaturen von etwa -180°C sowohl in gasförmiger wie auch in flüssiger Form vorliegen.

Das rechte Bild ist nach der Landung aufgenommen worden. Auf der Oberfläche des Titans sind verschiedenartige Brocken zu erkennen, die vermutlich aus gefrorenem Wasser bestehen. Wie alle wissenschaftlichen Kameras ist auch DISR nur für Schwarz-Weiß-Aufnahmen eingerichtet. Die rote Farbe ist aus den Ergebnissen der Spektraluntersuchungen abgeleitet worden.

Die für DISR entwickelte Kameratechnik ist in einer weiteren Zusammenarbeit mit der University of Arizona für insgesamt 5 Kameras für die Erforschung des Planeten Mars eingesetzt worden. Die bekannteste Mission war die Mars Pathfinder-Mission, die 1997 weltweit eine große Beachtung gefunden hat. Innerhalb von drei Monaten wurden insgesamt fast 20 000 Bilder aufgenommen. Das farbige Bild in Abbildung 6 ist aus jeweils etwa 60 Einzelaufnahmen in den drei Grundfarben zusammengesetzt worden. Die Temperaturen lagen zwischen -80°C und -10°C. Die Kameratechnik war für Temperaturen bis -120°C qualifiziert. Wasserbestandteile konnten nur in den Morgenstunden in Form von Wolken aus Eiskristallen nachgewiesen werden.

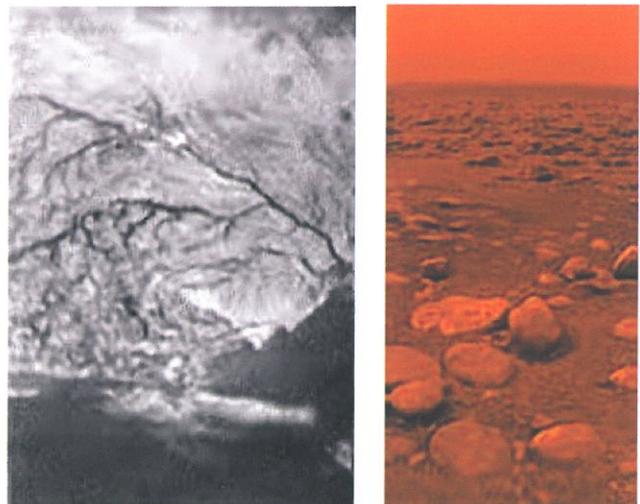


Abb. 5: DISR Aufnahmen von der Titanoberfläche. Schwarz-Weiß-Aufnahme aus 8,9 km Höhe (links) und Oberflächen-Farbbild nach der Landung (rechts). Die rötliche Farbe entsteht durch spektrale Filterung des Sonnenlichts in der Titanatmosphäre.

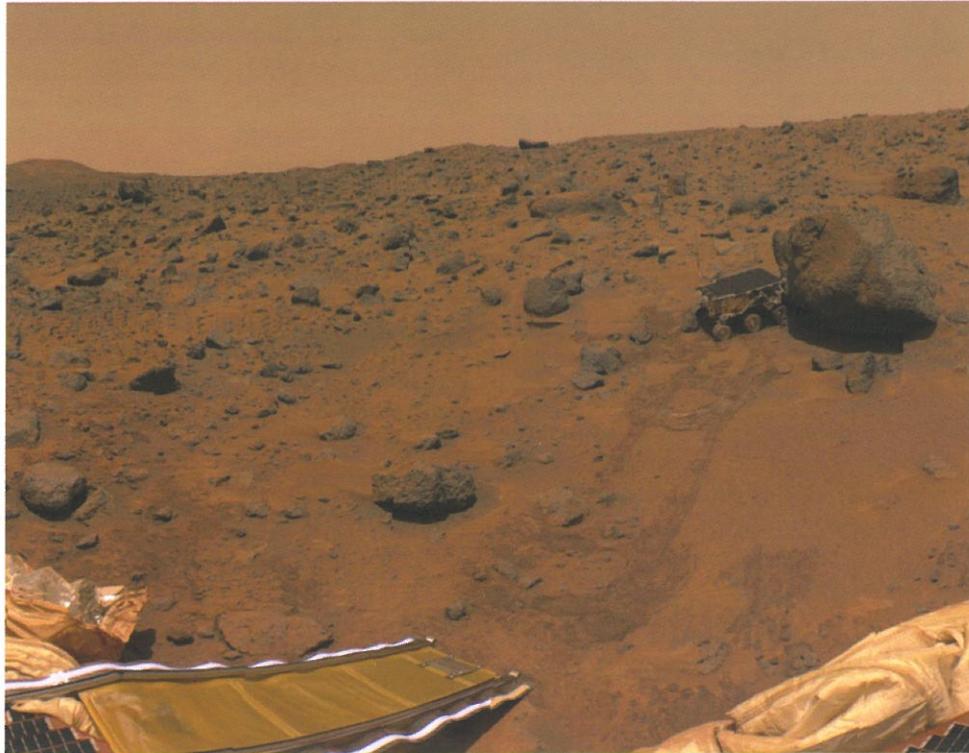


Abb. 6: Aufnahme der Marsoberfläche vom Imager for Mars Pathfinder, IMP (1997)

CCD-Chips für die OSIRIS-Kamera

Im März 2004 wurde die ESA Raumsonde Rosetta gestartet, die im Jahre 2014 den Kometen 67P/Churyumov-Gerasimenko erreichen und für mehrere Jahre begleiten und beobachten soll. Das OSIRIS Kamerasystem auf dieser Sonde besteht aus einer Tele- und einer Weitwinkelkamera und ist von einem europäischen Konsortium unter der Leitung von H.U. Keller am MPS gebaut worden.

Beide Kameras sind mit einer Vielzahl von Farbfiltern für spezifische wissenschaftliche Untersuchungen ausgerüstet. Die OSIRIS CCDs sind in Zusammenarbeit mit einer englischen Firma entwickelt worden und haben 2048×2048 Bildpunkte. CCD-Chips dieser Größe können heutzutage eingesetzt werden, weil nunmehr ausreichend Speicherplatz in der Sonde zur Verfügung steht.

Bereits während der Anreise ist OSIRIS schon für eine Reihe von Beobachtungen eingesetzt worden. Abbildung 7 zeigt ein Farbbild des Orion Sternennebels M42, das mit drei Farbfiltern aufgenommen worden ist. Ebenso konnte im Juli 2005 der Deep Impact-Einschlag auf dem Kometen Tempel 1 detailliert beobachtet und ausgewertet werden.

Rainer Kramm



Abb. 7: OSIRIS-Aufnahme des Orion Sternennebels

Internet Seiten:

<http://www.mps.mpg.de/en/projekte/giotto/hmc/>
(MPS Giotto Webseite)

<http://www.lpl.arizona.edu/DISR/Multimedia/Description%20of%20Titan%20Posters.htm>
(University of Arizona DISR Webseite)

<http://huygens.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=12> (ESA Huygens Webseite)

<http://mpfwww.jpl.nasa.gov/MPF/index1.html>
(NASA Mars Pathfinder Webseite)

<http://www.mps.mpg.de/de/projekte/rosetta/osiris/>
(MPS OSIRIS Webseite)

http://www.mps.mpg.de/de/aktuelles/presenotizen/presenotiz_20050705.html (MPS Deep Impact Pressenotiz)