

Fotoelektrische Bildempfänger für schwache Intensitäten

Dipl.-Ing.
REINHARD SCHIELICKE

Mitteilung aus der Universitäts-Sternwarte Jena

Auf sehr vielen Gebieten von Wissenschaft und Technik ist es auch im Hinblick auf Notwendigkeiten der Automatisierung von Meßprozessen erforderlich, optische Bilder, also die Verteilung des Strahlungsstromes einer Quelle auf einem zweidimensionalen Feld, zu untersuchen. Im allgemeinen muß dazu die Information, die in dem auszuwertenden Bild enthalten ist, während einer vorgegebenen Meßzeit in eine Matrix von Zahlenwerten umgesetzt werden, die dann zur weiteren Auswertung zur Verfügung steht. Jeder technisch realisierte Detektor unterliegt Einschränkungen, die nur gestatten, einen begrenzten Ausschnitt einer endlichen Bildfläche mit endlicher räumlicher Auflösung, endlicher Meßzeit und endlichem Rauschen zu messen.

Klassifikation der Bildempfänger

In engem Zusammenhang mit der Vervollkommnung elektronischer Rechenhilfsmittel und ihrer Speichermöglichkeiten konnten in immer größerem Umfang neben der Fotoplatte als vielfach bewährtem optischem Mehrelementempfänger fotoelektrische Wandler mit linearer Empfindlichkeit, größerem dynamischem Bereich und höherer

In vielen Bereichen wird die fotografische Emulsion als bewährter Empfänger und Speicher für Strahlung im optischen Wellenlängenbereich durch fotoelektrische Bildempfänger, nicht zuletzt auch mit dem Ziel der Automatisierung von Meßprozessen im Labormaßstab und bei Industrierobotern, immer mehr verdrängt. International ist dazu eine Vielzahl von zweidimensionalen Detektoren eingesetzt worden. Die vorliegende Arbeit gibt eine Übersicht über solche Empfänger, die auch für die meßtechnische Erfassung sehr geringer Strahlungsströme geeignet sind.

Quantenausbeute zur Steigerung der Effektivität der Informationsgewinnung beitragen.

Im Bild 1 ist eine Übersicht über die eingesetzten Lichtempfänger für den optischen Spektralbereich unter dem Gesichtspunkt der Wirkprinzipien dargestellt. Einfallende Photonen können mit dem Auge, der fotografischen Emulsion, einer Fotokathode (äußerer lichtelektrischer Effekt) oder mit halbleitenden Empfängern (innerer lichtelektrischer Effekt) zusammenwirken. In der Praxis werden in der Regel in einem Empfängersystem mehrere Prinzipien ausgenutzt, so daß eine größere Anzahl von Empfängern realisierbar wird.

Zur Klassifikation können folgende Größen herangezogen werden:

geometrische Parameter:	Bildformat und Auflösung
fotometrische Parameter:	dynamischer Bereich und Rauschen
spektrale Parameter:	Spektralbereich und Quanteneffektivität

zeitliche Parameter:	zeitliche Auflösung und Integrationszeit
Betriebsparameter	
Langzeitstabilität und Einleseart:	Multielementdetektorsysteme Einzelementsysteme mit Multiplexbetrieb
Integrationsart:	analog digital (photonenzählend)
Ausleseart:	parallel } zerstörend seriell } nicht zerstörend

Nach den technischen Realisierungsvarianten der fotoelektrischen Bilddetektoren lassen sich diese nach einem Schema ordnen, das im Bild 2 wiedergegeben ist.

Wirkungsweise der wichtigsten Bild-detektoren

Fotografische Emulsion

Die Fotoplatte kann als Array mit nach Ort und Größe zufällig verteilten Bildelementen

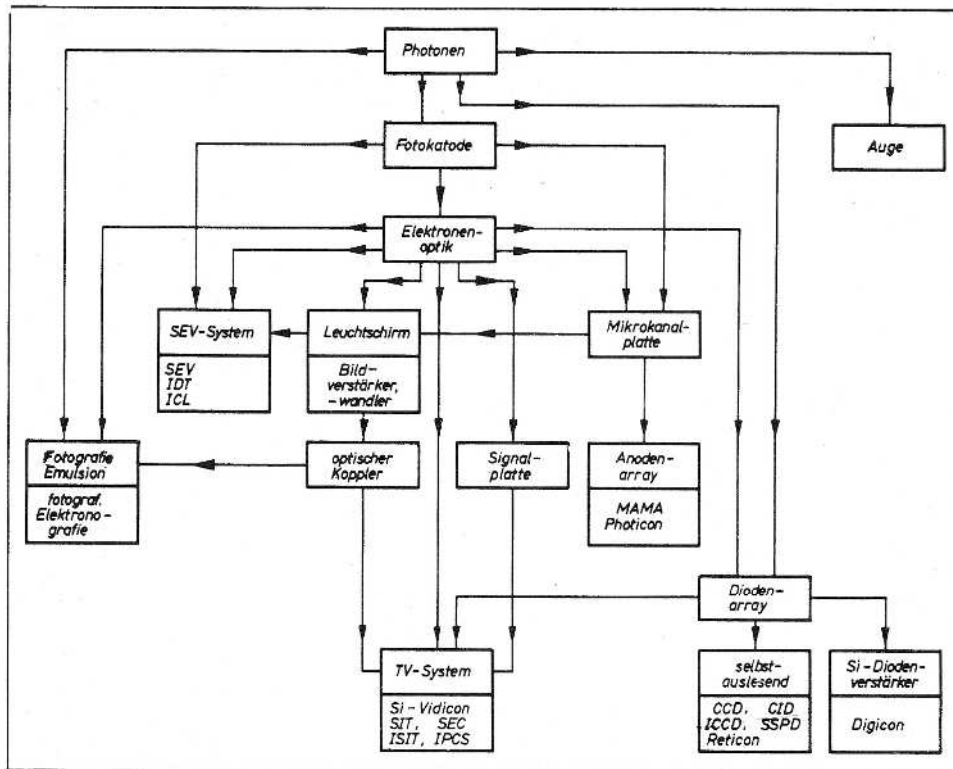


Bild 1: Übersicht über die Wirkungsweise lichtoptischer Empfänger

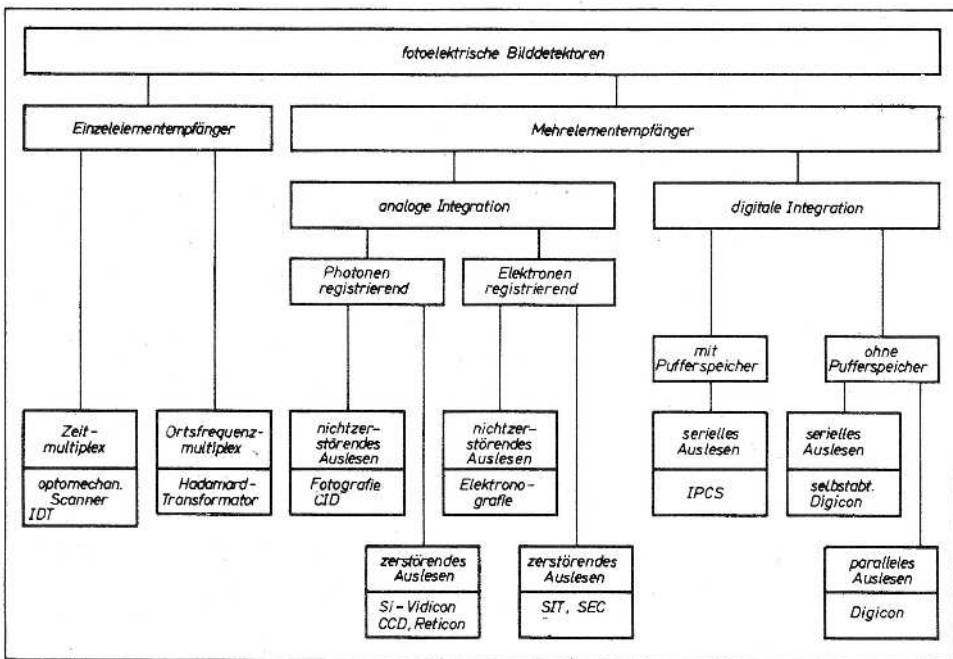


Bild 2: Klassifikation fotoelektrischer Bilddetektoren nach technischen Verfahren

mit innerem Übersprechen aufgefaßt werden. Die Schwärzung ist von der Intensität und der Wellenlänge des auffallenden Lichts nichtlinear abhängig. Rauschen und Auflösung sind ihrerseits dichteabhängig. Die Schwärzung kann sowohl durch Photonen (Fotografie) als auch durch Elektronen (Elektronografie) hervorgerufen werden.

Si-Vidicon

Der Empfänger ist ein zweidimensionales Array von Si-Fotodioden, das vor der Belichtung auf ein gleichmäßiges Potential aufgeladen wird und nach der Belichtung durch einen Elektronenstrahl mit elektrisch geregelter Lage ausgelesen werden kann. Der Strom, der dabei zum Wiederaufladen der Bildelemente notwendig ist, ist der Anzahl der registrierten Photonen proportional.

SIT-Vidicon (SIT = Silicon Intensified Target)

Das Target eines Si-Vidicons registriert nicht Photonen, sondern Elektronen, die in einem Bildverstärkersystem freigesetzt werden. Der Auslesevorgang ist analog dem des Si-Vidicons.

SEC-Vidicon (SEC = Secondary Electron Conduction)

Der Aufbau ist ähnlich dem des SIT-Vidicons, allerdings werden die Elektronen auf ein halbleitendes Target fokussiert, wo sie je 50 bis 100 Sekundärelektronen auslösen, die zu einer Signalplatte wandern und dadurch auf dem Target eine positive Ladung entstehen lassen. Das Target integriert und speichert die Ladungsmengen, bis beim digitalen Auslesen durch einen Elektronen-

strahl das Meßsignal entsteht und das Target wieder neutralisiert wird.

Mikrokanalplattenempfänger

Bei Kanalplattendetektoren besteht das Hauptelement aus einer Vielzahl von parallel angeordneten, dicht gepackten Glaskapillaren mit Durchmessern von $10\text{ }\mu\text{m}$ und einer Länge von etwa $0,5\text{ mm}$, die S-, C- oder J-förmig ausgebildet sind. Diese Platte liegt zwischen Fotokatode und einem Anodenarray, das die Zahl der Bildelemente und damit die Auflösung bestimmt. Durch eine an den Röhrenenden liegende Hochspannung wird ein aus der Katode ausgelöstes Fotoelektron bei seinem Durchgang durch eine Kapillare beschleunigt und setzt bei jedem Auftreffen auf die Wand Sekundärelektronen frei, die ihrerseits wie beim Sekundärelektronenvervielfacher beschleunigt werden und lawinenartig weitere Elektronen zu einer Elektronenwolke freimachen. Sie kann nach Verlassen der Kapillare an einem Element des Anodenarrays registriert werden.

CCD-Empfänger (CCD = Charge Coupled Device)

Diese Halbleiterbilddaufnahmeeinrichtungen bestehen aus Ketten von MOS-Kondensatoren, in denen während der Belichtung Elektronen-Loch-Paare entstehen, wobei eine zeitliche Integration über die Anzahl der gebildeten Ladungsträger in Abhängigkeit von der Lichtstärke erfolgt. Die so während des Lichteinfalls entstandenen Ladungen können durch Steuerimpulse in der Kette verschoben werden und stehen am Ende sequentiell für die weitere Verarbeitung zur Verfügung. Für die Abfrage von zweidimensionalen Bildsensoren wurden das Bild-Zwischenzeilen- und das Zeilenübertragungsprinzip entwickelt.

CID-Empfänger

(CID = Charge Injection Device)

Bei dieser Bilddaufnahmeeinrichtung besteht jedes Bildelement aus zwei benachbarten MOS-Kapazitäten, von denen eine der Zeilen, die andere der Spaltenleitung zugeordnet ist, so daß hier jedes Element einzeln adressiert werden kann. Neben der Möglichkeit des sequentiellen Auslesens wie bei CCD-Empfängern gibt es hier ein Verfahren zum Auslesen ohne Zerstörung des Ladungsbildes.

IDT-System (IDT = Image Dissector Tube)

Die durch Photoneinfall aus der Fotokatode ausgelösten Fotoelektronen werden elektronenoptisch auf eine Blendenplatte fokussiert, die in ihrer Mitte eine kleine, kreisförmige oder quadratische Öffnung besitzt. Wenn das Licht auf der optischen Achse einfällt, gelangen alle Fotoelektronen durch die Blende in ein wie beim SEV angeordnetes Dynodensystem. Durch ein System von Ablenkspulen kann der Elektronenstrahl zwischen Fotokatode und Blendenplatte abgelenkt werden, so daß verschiedene Elemente des Bildes auf der Fotokatode gemessen werden können.

Hadamard-Transformationsempfänger

Das Verfahren basiert auf der pseudobinären und normalisierten Hadamard-Transformation. Das Bild wird durch eine Serie von Hadamard-Masken auf einem Einkanal-detektor abgebildet. Das Detektorsignal in Verbindung mit der Nummer der

Maske wird bei diesem Ortsfrequenz-Multiplexempfänger zur numerischen Rücktransformation benutzt.

ICL-System (ICL = Imperial College of London)

Auf der Grundlage des Image Dissector Scanners ist am Imperial College London ein photonenzählendes Empfängersystem für Spektrografen entwickelt worden. Davon ausgehend, daß ein Image Dissector keine speichernde Wirkung aufweist, so daß nur die wenigen Fotoelektronen registriert werden, die gerade durch die Aperturblende auf die erste Dynode fallen, wurde der Phosphorschirm eines Bildverstärkers als Speicher benutzt und optisch mit dem Image Dissector gekoppelt. Damit ergibt sich aber die Schwierigkeit, daß kurz nacheinander einfallende Photonen nicht mehr getrennt werden können, so daß die Scanning-Rate optimiert werden muß, denn wenn diese andererseits zu klein gewählt wird, kann eine Szintillation zweimal gezählt werden. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, ist ein spezieller Bildverstärker entwickelt worden, bei dem eine hohe zeitliche Auflösung dadurch erreicht wird, daß in kleinen Zeitschritten eine Versetzung des Bildes senkrecht zur Dispersionsrichtung vorgenommen wird und der Image Dissector den Phosphorschirm in dieser Richtung abtastet.

Digicon (Digital Image Tube)

Ein Si-Diodentarget dient als Empfänger für beschleunigte und fokussierte Fotoelektronen. Jede Diode des Targets besitzt einen eigenen Vorverstärker, Verstärker, Diskriminator und digitalen Akkumulator, die Zählergebnisse werden seriell ausgegeben. Durch den Diskriminator können Dunkelstrom- von Signalimpulsen unterschieden werden, so daß der Einfluß des Dunkelstromes auch ohne Kühlung sehr klein gehalten werden kann.

Optische Mehrelementempfänger

Empfänger	Bildelementfläche in μm^2	Elementzahl	dynamischer Bereich	fotometrische Genauigkeit in %	Quanten- effektivität in %	spektraler Bereich in μm	Bemerkungen, Literatur
Fotografie	10 $\times$ 10	30 000 $\times$ 30 000	$3 \cdot 10^2$	7	0,1	0,25...1,1	
Elektronografie	100 $\times$ 100	64 $\times$ 1	$3 \cdot 10^6$	0,5	20	0,25...0,9	[17] [19] [22] [25] [40]
Si-Vidicon	40 $\times$ 40	1 000 $\times$ 1 000	100		20	0,3 ...1,05	[45] [46]
SIT-Vidicon	25 $\times$ 25	2 000 $\times$ 2 000	100	5	20	0,25...0,9	[3] [21] [37] [38] [45]
SEC-Vidicon	25 $\times$ 25	2 000 $\times$ 2 000	100	5	20	0,25...0,9	[11] [13] [14] [15] [23] [24] [28] [29]
Mikrokanalplatten- empfänger	32 $\times$ 300 25 $\times$ 25 12,5 $\times$ 12,5	1 024 $\times$ 1 512 $\times$ 512 1 024 $\times$ 1 024	10^2 10^2	2			MAMA: Multianode Micro-channel Array Photicon [10] [44]
CCD	23 $\times$ 23 610 $\times$ 25 25 $\times$ 25 40 $\times$ 35	400 $\times$ 400 1 024 $\times$ 1 100 $\times$ 100 400 $\times$ 125 100 $\times$ 100	2 700 $4 \cdot 10^3$ 200 $10^3 \dots 10^4$ 1 500	1 1 3 1	60 80	0,45...1,05 0,3 ...1,05	Reticon; SSPD: Self Scanning Photodiode Array ICCD: Intensified CCD Back Illuminated ICCD: Front Illuminated UMAP: Universality of Maryland Array Photometer [3] [5] [6] [9] [16] [24] [30] [31] [40] [43] [45] [48] [18]
CID	60 $\times$ 80	244 $\times$ 188	10^4		40	0,45...1,05	
Image Tube Scanner mit IDT	35 $\times$ 250	2 048 $\times$ 2	$6 \cdot 10^3$	2	20	0,25...0,9	IDS: Image Dissector Scanner (Robinson Wampler) [4] [8] [27] [33] [34] [35] ICL-System (Imperial College London) [2] serieller Ausgang
Digicon	25 $\times$ 400 35 $\times$ 35	1 024 $\times$ 1 512 $\times$ 512 512 $\times$ 512	$4 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^6$	1 0,2	20	0,25...0,9 0,25...0,9	paralleler Ausgang [5] [8] [20] [26] [40]
Image-Photon- Counting-System	20 $\times$ 20	1 000 $\times$ 200	$6 \cdot 10^4$	1	20	0,25...0,9	UCL-System (University College London; Boksenberg) [7] [12]

Das Digicon mit parallelem Auslesen arbeitet mit einer speziellen Anodensektion. Nach dem im Digicon verwirklichten Prinzip arbeiten die Quadrant-Photosil-Detektoren, bei deren Prototyp vier quadratische Si-Fotodioden mit einer Kantenlänge von 250 μm auf einem Chip von 610 μm mal 610 μm angeordnet sind. Diese Quadrantendetektoren sind speziell für Positioniersysteme konzipiert worden.

Image-Photon-Counting-System (IPCS)

Bei diesem System werden ausschließlich durchkonstruierte und kommerziell verfügbare fotoelektronische Geräte eingesetzt. Ein Kaskaden-Bildverstärker mit vier Stufen liefert eine Verstärkung von $5 \cdot 10^5$ im blauen Spektralbereich. Das so verstärkte Bild wird mit einer TV-Kamera mit einer Plumbicon-Aufnahmeröhre registriert. Durch einen rauscharmen Verstärker mit nachgeschalteten Diskriminatoren werden Rauschanteile des Videosignals weitgehend unterdrückt. Die weitere Verarbeitung der Signale erfolgt durch einen über ein spezielles Interface angekoppelten Kleinrechner, der seinerseits die Abtastspannungen des Plumbicons steuert. Der Rechner ermittelt zunächst das scheinbare Bildelement für jedes einfallende Photon, errechnet daraus den wirklichen Ort und erhöht den Inhalt des zugehörigen Speicherplatzes um Eins. Die Auswertung der Meßwerte kann auf verschiedene Weise erfolgen.

Die heute für die Messung schwacher Strahlungsströme eingesetzten lichtelektrischen Mehrelementempfänger können zusammenfassend wie in der Tafel angegeben charakterisiert werden. Diese Tafel basiert auf den Übersichtsartikeln [1] [32] [36] [39] [41] [42] [44] und der in der Tafel selbst angegebenen Literatur.

Stand der Technik, Trends

Alle genannten Detektoren sind mit Erfolg

getestet worden und befinden sich im Einsatz. Fotoelektrische Bilddetektoren haben heute für die zweidimensionale, hochgenaue Fotometrie größere Bedeutung erlangt als Fotografie und Elektronografie. Die Fotoplatte stellt aber einen bewährten Detektor für große Bildformate mit hoher geometrischer Stabilität dar. Multielementdetektoren werden häufiger eingesetzt als Scanner mit Image-Disssector-Röhren oder Ortsfrequenz-Multiplexempfänger. Dabei kann der gesamte optische Spektralbereich vom Ultravioletten bis ins nahe Infrarot, etwa bis 1 μm Wellenlänge, erfaßt werden. Allerdings behauptet der Hadamard-Transformationsempfänger sein Einsatzgebiet noch im Infrarot und im fernen Infrarot. Das Ziel der weiteren Entwicklung der neuen Empfänger ist die Kombination der Vorteile der Fotoplatte mit denen des Fotomultipliers wie

- große Empfängerabmessungen (einige zehn Zentimeter)
- Auflösung bis hinab zu 10 μm
- geringe Dunkelstromeffekte
- hohe Quanteneffektivität im gesamten visuellen Bereich
- keine Empfindlichkeitsschwelle
- Linearität über einen großen Bereich
- Möglichkeit des Nachweises einzelner Photonen
- unbegrenzte Speicherkapazität
- unmittelbare Überwachung des Meßprozesses durch Monitore.

Die Tendenz der Anwendung der verschiedenen Empfänger wird sich zugunsten der CCD- und CID-Typen verschieben, wie aus der neueren Literatur deutlich wird, obwohl gegenwärtig SIT- und SEC-Vidicons einfach zu handhabende, sehr zuverlässige zweidimensionale fotometrische Empfänger darstellen, die leicht verfügbar und billig sind, weil sie für viele Zwecke in großen Stückzahlen gebaut werden.

Literatur

- [1] Ahern, F. J.: Modern Instrumentation for Optical Astronomy. Commun. David Dunlap Observatory No. 403 (1974)
- [2] Airey, R. W.; Delori, F. C.; McGee, J. D.; Morgan, B. L.: A Photoelectron - Counting Spectrophotometer. Proc. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes (1972), S. 333-343
- [3] Atwood, B.; Ingerson, T.; Lasker, B. M.; Osmer, P. S.: Integrating Vidicon Systems at Cerro Tololo. Publ. Astron. Soc. Pacific 91 (1979), S. 120-139
- [4] Ball, W. F.; Hoag, A. A.: Kitt Peak's New Photoelectric Guider. Sky and Tel. 35 (1958), S. 22-24
- [5] Barbieri, C.; di Serego, A.: The Reticon Spectrophotometer at CIMA EKAR Observatory. Specola Vaticana, Ricerche Astron. 9 (1979), S. 235-237
- [6] Bergmann, H.: Halbleiter-Bildaufnahme-einrichtungen. radio fernsehen elektronik 28 (1979) H. 2, S. 75-78
- [7] Bokkenberg, A.: Performance of the UCL Image Photon Counting System. Proc. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Genf 1972, S. 295-316
- [8] Burbidge, E. M.: Review: Some Problems in Extragalactic Astronomy. Proc. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Genf 1972, S. 9-19
- [9] Campbell, B.: The DDO Diode Array Spectrometer. Publ. Astron. Soc. Pacific 89 (1977), S. 728-732
- [10] Catchpole, C. E.; Johnson, C. B.: The Multi-anode Photomultiplier. Publ. Astron. Soc. Pacific 84 (1972), S. 134-136
- [11] Crane, P.; Nees, W.: Television Detector System Development at ESO. The ESO-Messenger No. 17 (1979), S. 34 und 35
- [12] Danziger, I. J.; de Jonge, M.: The Image Photon Counting System and Quasars at La Silla. The ESO-Messenger No. 15 (1978), S. 19 bis 21
- [13] Dennison, E. W.: A High Sensitivity TV-System as a Visual Aid for Observers. Proc. ESO CERN Conference on Large Telescope Design, Genf 1971, S. 429-435
- [14] Dennison, E. W.: A Photon Counting Image Recorder. Proc. ESO CERN Conference on Large Telescope Design, Genf 1971, S. 495 bis 499
- [15] Deutschmann, W. A.: A Calibration Model for a Stellar Photometer using a SEC Vidicon. Publ. Astron. Soc. Pacific 84 (1972), S. 123-126
- [16] Elsässer, H.: Jahresbericht des Max-Planck-Instituts Heidelberg für das Jahr 1978. Mitt. der AG 46 (1979), S. 155-177
- [17] Hiltner, W. A.: Image Converters for Astronomical Photography. In Stars and Stellar Systems, Vol. II: Astronomical Techniques, Univ. of Chicago Press 1962, S. 347-353
- [18] Hubbard, G.; Hege, K.; Reed, M. A.; Strittmatter, P. A.; Woolf, N. J.: Speckle Interferometry. I. The Steward Obs. Speckle Camera. Astron. Journal 84 (1979), S. 1437-1442
- [19] Hunter, A.; Smith, F. G.: Reports from Observatories: The Royal Greenwich Observatory. Quarterly Journ. RAS 19 (1978), S. 116-125
- [20] Jelley, J. V.: Semiconductor Image Devices for Spectroscopy, Autoguiding and Photometry. Observatory 93 (1973), S. 9-13
- [21] Kent, S. M.: An SIT-Vidicon Detector System for the Palomar 1.5-Meter Telescope. Publ. Astron. Soc. Pacific 91 (1979), S. 394-398
- [22] Lallemand, A.: Sur l'application à la photographie d'une méthode permettant d'amplifier l'énergie des photons. Compt. Rend. Acad. Sci. Paris 203 (1936), S. 990 und 991
- [23] Lawrance, J. L.; Morton, D. C.; Zucchini, P.: The Spectrum of the Quasi-Stellar Object PHL 957. Astrophys. Journ. 171 (1972), S. 233 bis 251
- [24] Mathewson, D. S.: Reports from Observatories: Mount Stromlo and Siding Spring Observatories. The Australian National University. Quarterly Journ. RAS 19 (1978), S. 468 bis 472
- [25] McGee, J. D.: Image Tubes in Astronomy. Vistas in Astronomy 15 (1973), S. 61-89
- [26] McGee, J. D.: Comment on a Paper by Dr. Jelley. Observatory 93 (1973), S. 207 und 208
- [27] McNall, J.; Robinson, L. B.; Wampler, E. J.: The Response of Phosphor-Output Image Intensifiers to Single Photon Inputs. Publ. Astron. Soc. Pacific 82 (1970), S. 837-845
- [28] Morton, D. C.: An Integrating Television System for Astronomy. Proc. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Genf 1972, S. 317-331
- [29] Münch, G.: High Resolution Astronomical Spectroscopy: Its Future. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Genf 1972, S. 21-33
- [30] Overbye, D.: Making it in Monterey. Sky and Tel. 57 (1979), S. 223-230
- [31] Percival, J. W.; Nordsieck, K. H.: Reticon Data Reduction Program. A User's Guide. Wisconsin Astrophysics 94 (1979)
- [32] Rego, M.: Técnicas observacionales en espectroscopia astrofísica. Univ. Madrid, Semin. Astron. y Geodesia Publ. 91 (1976), S. 41-52
- [33] Robinson, L. B.: Some Applications of Small Computers to Optical Spectroscopy. Publ. of Royal Obs. Edinburgh 8 (1971), S. 198-204
- [34] Robinson, L. B.; Wampler, E. J.: The Lick Observatory Image Dissector Scanner. Publ. Astron. Soc. Pacific 84 (1972), S. 161-166
- [35] Rodgers, W. A.; Roberts, R.; Rudge, P. T.; Stapiński, T.: A Multichannel Spectrophotometer. Publ. Astron. Soc. Pacific 85 (1973), S. 268 bis 274
- [36] Rudolph, R.; Schlosser, W.; Schmidt-Kaler, Th.; Tüg, H.: Characteristics of Optical Multi-element Detectors. Astron. Astrophys. 65 (1978), S. L5 und L6
- [37] Sachs, H. G.: A Digital Image Recorder. Publ. Astron. Soc. Pacific 84 (1972), S. 127 bis 132
- [38] Schielicke, R.: Messung schwacher Intensitäten mit einem SIT-Vidicon. Feingerätetechnik 29 (1980) H. 4, S. 168-170
- [39] Schmidt, H.; Schumann, J.-D.: Elektronische Bildverstärker in der Astronomie. Mitt. Astron. Inst. Bonn Nr. 127 (1970)
- [40] Schmidt-Kaler, Th.: Jahresbericht des Astronomischen Instituts der Ruhr-Universität Bochum für das Jahr 1978. Mitt. AG 45 (1979), S. 19-30
- [41] Sedmak, G.: Detection of Optical Images. Uppsala Astron. Obs. Report No. 12 (1978)
- [42] Sedmak, G.: Detection of Optical Images. In B. E. Westerlund (ed.): Stars and Star Systems, D. Reidel Publ. Proc. Vol. 75 (1978), S. 221-234
- [43] Smith, F. G.: Reports from Observatories: The Royal Greenwich Observatory. Quarterly Journ. RAS 19 (1978), S. 456-457
- [44] Tüg, H.: Vielkanal-Detektoren in der optischen Astronomie. Sterne und Weltraum 16 (1977) H. 11, S. 366-369
- [45] Westphal, J. A.; Kristian, J.: The Use of Silicon Target and Intensified Silicon Target Camera Tubes for Photometry, Spectroscopy, and Field Viewing. IAU Coll. No. 40 on Astronomical Applications of Detectors with Linear Response. Paris-Meudon (1975), S. 19.1-19.21
- [46] Westphal, J. A.; McCord, T. B.: A Silicon Vidicon Photometer. Publ. Astron. Soc. Pacific 84 (1972), S. 133
- [47] Wood, H. J.: A Computer-Controlled Digital Spectrum Scanner for La Silla. Proc. ESO CERN Conference on Auxiliary Instrumentation for Large Telescopes, Genf 1972, S. 165 bis 168
- [48] Zurbuchen, R.: A Magic Eye for Astronomical Spectrophotometry. The ESO-Messenger No. 12 (1978), S. 18 und 19