Von der elektronischen Fotografie zum sehenden Chip : moderne Halbleiter-Bildsensorik

Autor(en): **Seitz, Peter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **84 (1993)**

Heft 17

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902714

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die moderne Halbleitertechnologie ermöglicht die Realisierung von Bildsensoren mit Millionen von Bildpunkten, intelligenten Pixeln und integrierter Analog- und Digitalelektronik für die Bildverarbeitung. Dieser Beitrag beschreibt den heutigen Stand der Technik und die zu erwartende Entwicklung. Ausgehend von den Funktionsprinzipien der Bildsensoren mit Betonung auf der CCD-Technologie werden die Eigenschaften heutiger Sensorbausteine diskutiert und die zu erwartenden Fortschritte und Möglichkeiten in der nahen Zukunft aufgezeigt.

Von der elektronischen Fotografie zum sehenden Chip

Moderne Halbleiter-Bildsensorik

■ Peter Seitz

Die wichtigste Informationsquelle über unsere Umwelt und was in ihr vorgeht ist für uns Menschen – wie auch für die meisten Tiere – der Gesichtssinn, das visuelle Sehen. Etwa 40% aller Fibern, welche in unser Zentralnervensystem hineinführen oder es verlassen, tun dies in den beiden optischen Nerven [1]. Mehr als ein Viertel unseres Gehirns ist nur mit der Verarbeitung des riesigen Datenstroms von Bildern beschäftigt, der durch diese etwa 2 Millionen Fibern in den optischen Nerven fliesst [2]. Schon seit jeher hat der Mensch deshalb versucht, sich ein Abbild von seiner Umwelt zu machen, um diese immer wieder zu betrachten oder um gewisse Eigenschaften von ihr besser auswerten zu können. Mit der Erfindung der Fotografie gegen Ende des letzten Jahrhunderts wurde der Grundstein dazu gelegt, dass heute jedermann mühelos mit einem nur wenige Dutzend Franken teuren Fotoapparat ausgezeichnete, farbige Abbilder von Szenen gewinnen kann. Indem man 25 oder mehr solcher Bilder pro Sekunde in rascher Abfolge zeigt, entsteht der Eindruck einer bewegten Szene, ein Abbild unserer dynamischen Umwelt.

Die Erfindung der Bildaufnahmeröhre und der Bildwiedergabe mittels der auch heute noch in grossem Umfang verwendeten Vakuum-Bildröhren – brachte die Möglichkeit, bewegte Bilder einem viel grösseren Kreis von Zuschauern zugänglich zu machen; das Fernsehen trat seinen Siegeszug in unsere Wohnzimmer an. Die Qualität dieser elektronischen Fernsehbilder war allerdings lange Zeit weit schlechter als die, welche mit der konventionellen Fotografie leicht erzielbar war. Erst die Fortschritte der Halbleiterindustrie haben elektronische Bildsensoren, vor allem in Form von CCD (Charge-Coupled Device-Bildsensoren), auf den Markt gebracht, die bezüglich Auflösung, Empfindlichkeit und Kontrast-Dynamik den fotografischen Film deutlich übertreffen. Damit ist der Zeitpunkt gekommen, wo die elektronische Fotografie den konventionellen Film aus immer mehr Anwendungen verdrängen kann.

Nicht genug damit; nachdem die elektronischen Bildsensoren aus dem Material – Silizium – gefertigt sind, aus dem fast alle heutigen integrierten Schaltkreise bestehen, kann man einem Bildsensor nicht nur die Fähigkeit mitgeben, ein elektronisches Abbild der Umwelt zu erzeugen, sondern ihn auch gleich mit der nötigen Schaltungstechnik versehen, dieses Bild zu verarbeiten. Solche sehenden Chips werden, wenn man sie realisieren kann, von grosser praktischer Bedeutung sein. Es verwundert deshalb nicht, dass führende Hochschulen im In- und Ausland diese Technologie erforschen und sie so rasch wie möglich praktischen, industriellen Anwendungen dienstbar machen möchten.

Dank dessen, dass man heute auf demselben Chip ganz unterschiedliche Anwendun-

Teilaspekte dieses Beitrages wurden vom Autor bereits an der ITG-Informationstagung vom 5. November 1992 in Kloten vorgetragen.

Adresse des Autors:
Dr. *Peter Seitz*, Paul-Scherrer-Institut Zürich, Badenerstrasse 569, 8048 Zürich.

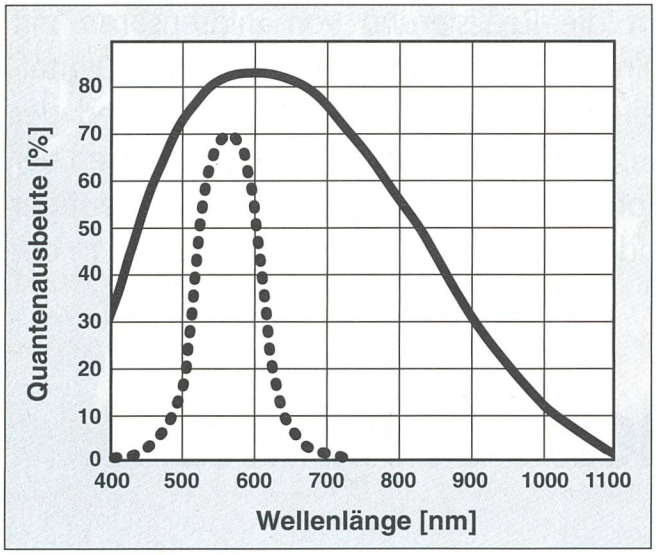


Bild 1 Spektrale Empfindlichkeit des Siliziums und des menschlichen Auges

Die ausgezogene Linie zeigt die absolute Quantenausbeute (Anzahl photogenerierter Ladungsträgerpaare pro einfallendes Photon) eines Silizium-Bildsensors. Zum Vergleich illustriert die gepunktete Kurve die relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges. Im sichtbaren Bereich kann ein guter Bildsensor eine absolute Quantenausbeute von 50 bis 90% aufweisen

gen für verschiedene Kunden integrieren kann, kann man Prototypen von kundenspezifischen Bildsensoren für wenige tausend Franken innerhalb ein paar Wochen fertigen lassen. Bei der Bildsensor-Forschung ist man deshalb nicht mehr auf die traditionellen Video-Bildsensoren angewiesen; man kann sich problemangepasste, intelligente Bildsensoren für eine Anwendung optimieren lassen. Ein nachstehend beschriebenes Beispiel eines solchen intelligenten Sensors ist der dynamische CCD, dessen Pixelgrösse und -form man programmieren kann. Auf diese Weise kann einem Bildsensor immer mehr Funktionaliät mitgegeben werden, in der Hoffnung, ihn irgendwann zum sehenden Chip werden zu lassen. Diese Technologie, ihre Möglichkeiten und Limitationen werden zum Schluss dieser Arbeit diskutiert, mit dem Ziel, dem Leser einen Eindruck davon zu vermitteln, was alles mit sehenden Chips eines Tages möglich werden könnte.

Detektion von Licht mit Silizium

Halbleitermaterialien sind in der Lage, ein einfallendes Lichtteilchen (ein Photon) in ein Ladungsträgerpaar (ein negativ geladenes Elektron und ein positiv geladenes Loch) zu verwandeln, sofern das Photon genügend Energie, das heisst eine genügend kurze Wellenlänge besitzt. Für grössere Wellenlängen ist das Halbleitermaterial durchsichtig. Beim Diamanten beispielsweise liegt diese Grenzwellenlänge bei rund 230 nm, deutlich unter dem für den Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich von etwa 400 bis 700 nm. Diamant ist daher für uns Menschen durchsichtig. Beim technisch wichtigsten Halbleitermaterial, dem Silizium, sind die Verhältnisse viel günstiger. Unterhalb von etwa 1150 nm absorbiert Silizium die einfallende Strahlung; es kann also für den sichtbaren und nahen Infrarot-Spektralbereich als Detektor dienen, wie in Bild 1 gezeigt ist. Dabei ist Silizium sehr effizient; zwischen 50% und 80% aller im sichtbaren Spektralbereich einfallenden Photonen werden in elektrisch nachweisbare Ladungsträgerpaare umgewandelt. Da Silizium nicht nur ein ausgezeichneter Photodetektor, sondern auch der technologisch wichtigste und am besten beherrschte Halbleiter ist, steht mit ihm für die Bildsensorik im sichtbaren Bereich bereits das ideale Material zur Verfügung.

Die durch das einfallende Licht im Silizium erzeugten Ladungsträger würden nach kurzer Zeit unter Wärmeabgabe rekombinieren (d.h. Elektron und Loch würden sich neutralisieren), wenn man sie nicht voneinander trennen würde. Um lichtgenerierte Ladungsträgerpaare sammeln und nachweisen zu können, muss man sie in einem elektrischen Feld voneinander trennen. Dies geschieht in einzelnen, kleinen Kapazitäten, welche die Bildpunkte (Pixel) des Bildsensors darstellen. Wie in den Querschnitten und den schematischen Schaltbildern in Bild 2 dargestellt, verwendet man für deren Realisierung entweder die Raumladungskapazität einer rückwärts vorgespannten Photodiode oder direkt eine MOS-Kapazität (MOS: Metall-Oxid-Halbleiter). Besonders diese zweite, einfachere Technik hat als CCD-Technologie die Bildsensorik revolutioniert, weil man damit sehr rauscharme und uniforme Bildsensoren zu niedrigen Preisen herstellen kann. Typische Pixeldimensionen von modernen Videobildsensoren (buried-channel CCD) liegen bei etwa 7x7 µm, wobei mit Pixel-Kapazitäten von einigen wenigen fF (Femto-Farad) gearbeitet wird, auf denen bei 5 V Spannung also nur etwa 100 000 photogenerierte Ladungsträger Platz haben.

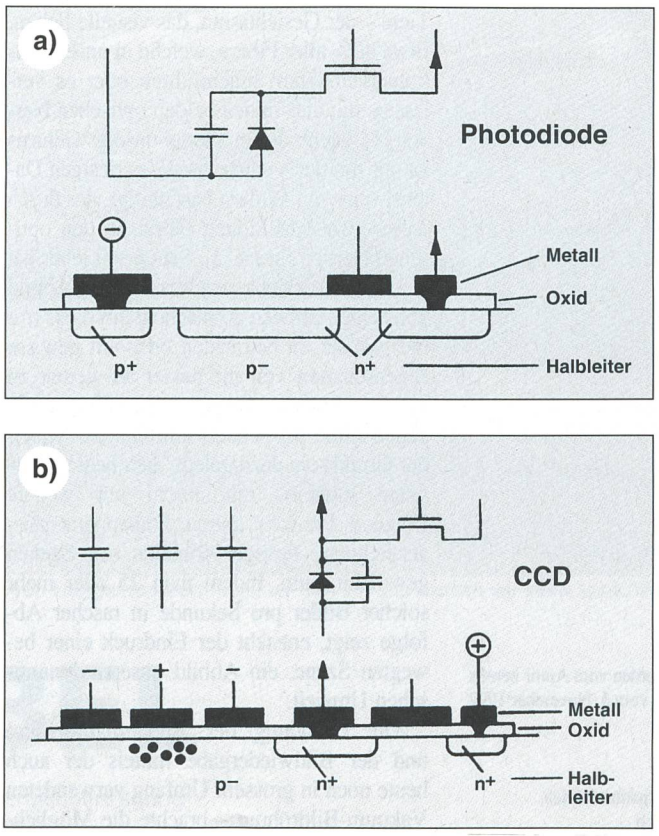


Bild 2 Prinzipschaltbilder und Querschnitte der Halbleiter-Realisierungen von Bildsensoren

a. Beim Photodioden-Bildsensor besteht ein Pixel aus einer Photodiode und einem FET-Schalter zur Adressierung.
b. Beim CCD-Bildsensor besteht ein Pixel aus mehreren (typischerweise drei oder vier) MOS-Kapazitäten. Die photogenerierte Ladung wird durch sequentielles Anlegen von Steuerspannungen an die durch eine Oxidschicht von der Halbleiter-Oberfläche getrennten Metallelektroden zum Ausgangsverstärker transportiert (Eimerketten-Prinzip)

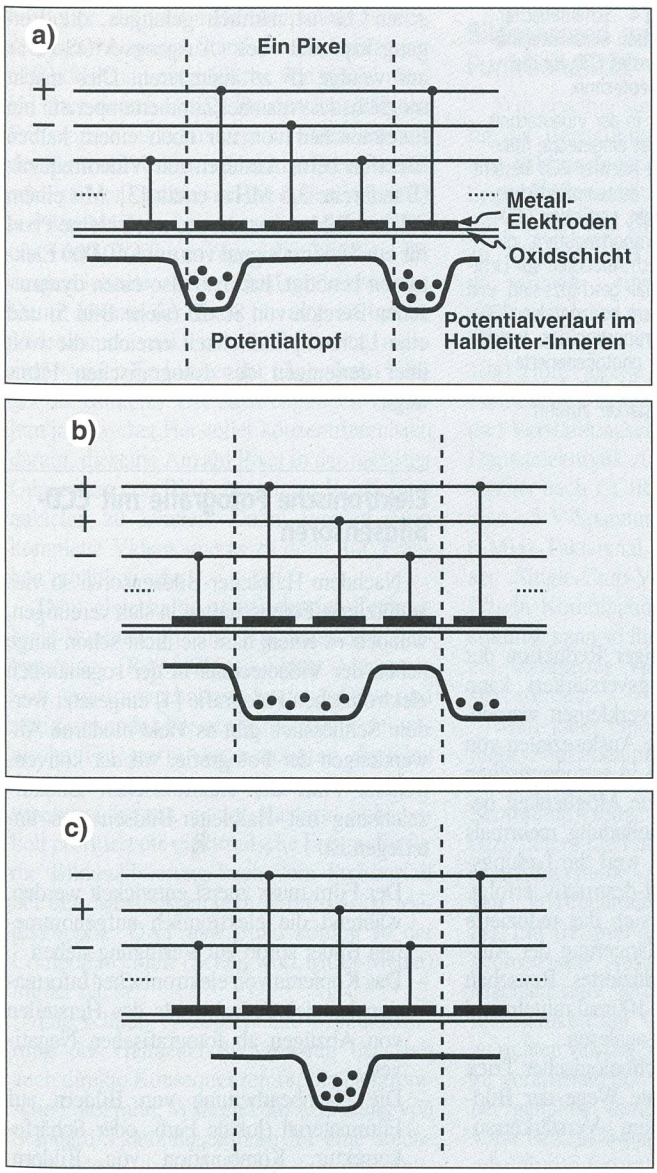


Bild 3 Illustration des Ladungstransport-Prinzips mit CCD

Dieses Beispiel demonstriert die oft verwendete Dreiphasen-Technologie, wobei ein Pixel aus drei Elektroden besteht. Die photogenerierte Ladung wird in drei Taktschritten (a, b, c) durch geeignete Steuerspannungen an den Elektroden um eine Pixelbreite verschoben

Ladungstransport mit CCD

Zum Nachweis der in einem Pixel gesammelten Ladungsträger und damit zur Messung der lokal eingefallenen Lichtmenge werden die Ladungsträger einem ladungsempfindlichen Verstärker zugeführt. In den meisten Fällen ist dies einfach ein MOS-FET in Sourcefolger-Schaltung, der direkt das Signal des Bildsensors an die Aussenwelt liefert. Der Ladungstransport ist bei den zwei vorgestellten Pixel-Typen verschieden gut gelöst: Die Photodiode wird durch den FET-Schalter meist auf eine lange, verschiedenen Pixeln gemeinsame Ausleseleitung mit einer relativ grossen Kapazität von mehreren pF geführt. Der CCD hingegen ist in der Lage, die Ladung durch Anlegen von geeigneten Steuersignalen an die Gate-Elektroden im Halbleiter-Inneren praktisch verlustfrei zu transportieren. Bild 3 illustriert dieses Prinzip am Beispiel der Drei-Phasen-Ansteuerung zur Sammlung von Elektronen, welche bei kommerziellen CCD oft verwendet wird. Dabei bilden je drei Elektroden ein Pixel. In der Ausgangslage ist pro Pixel nur eine Elektrode positiv vorgespannt, das heisst nur unter dieser Elektrode werden die photogenerierten Elektronen gesammelt. In einem zweiten Schritt wird der Potentialtopf verbreitert, indem die Nachbarelektrode ebenfalls auf positives Potential gelegt wird. Unter dem Einfluss der gegenseitigen Abstossung und der Verteilung des elektrischen Feldes im Halbleiter-Inneren verteilen sich die Elektronen sehr schnell unter die beiden Elektroden. Schliesslich wird die Spannung an der ersten Elektrode wieder zurückgesetzt, so dass nur noch eine Elektrode pro Pixel positiv vorgespannt bleibt. Unter dieser Elektrode sammeln sich die Elektronen, die auf diese Weise um eine Elektrodenbreite seitwärts verschoben worden sind. Dieser Elektronentransport ist in modernen CCD sehr effizient: Mittlere Transferverluste von nur 0,0001% pro Transfer sind schon erreicht worden.

Die Taktrate der Ladungstransfers beträgt bei CCD-Bildsensoren für das hochauflösende Fernsehen (HDTV) bereits 37 MHz und über 100 MHz sind für CCD aus Silizium schon demonstriert worden. In anderen Halbleitern (GaAs/AlGaAs) sind sogar schon Taktraten bis 18 GHz gezeigt worden, und Rechnungen zeigen, dass auch diese Geschwindigkeit noch wesentlich übertroffen werden kann.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, den CCD-Ladungstransport zur Konstruktion von Bildsensoren mit bestimmten Eigenschaften zu benutzen. Der Bildsensortyp, der heute in der Videotechnik und der elektronischen Fotografie am meisten verwendet wird, ist der Interline-Transfer CCD (IT-CCD). Das Bild 4 zeigt schematisch seinen Aufbau: Die einzelnen Pixel sind eigentlich Photodioden, die aber über sogenannte Transfer-Elektroden mit einer vertikalen CCD-Struktur verbunden werden können. Weil die vertikalen CCD unter optisch undurchsichtigen Abdeckungen liegen, kann man durch geeignetes Ein- und Ausschalten der Transfer-Elektrode den Ladungsinhalt der Pixel rasch in den CCD-Kolonnen vor weiterer Belichtung schützen und damit einen elektronischen Verschluss realisieren. Mit heutigen CCD kann man so Verschlusszeiten von bis zu 1/10 000 Sekunden erreichen. Zeile für Zeile wird dann die Ladung, die das aufgenommene Bild repräsentiert, in den vertikalen CCD-Kolonnen nach unten in eine horizontale CCD-Struktur geschoben. Diese kann eine Zeile des Bildes mit der nötigen Geschwindigkeit von 10 bis 15 MHz dem Ausgangsverstärker zuführen, der damit das Videosignal erzeugt.

Rauscharmer Ladungsnachweis

Der grosse Vorteil von CCD gegenüber Photodioden-Arrays ist der Ladungstransport zum Ausgangsverstärker über Strukturen mit sehr kleinen Kapazitäten. Damit kann auch die Kapazität, die am Eingang des Verstärkers liegt, sehr klein gehalten werden. Dies ist deshalb sehr wichtig, weil das Rauschen von MOS-FETs direkt proportional zur Eingangskapazität ist, und wir ja sehr kleine Ladungssignale von höchstens ein paar zehntausend Elektronen präzis nachweisen wollen. Heutige CCD-Videobildsensoren weisen bei Raumtemperatur ein Rauschen von unter hundert Elektronen pro Pixel auf[1]. Damit erhält man einen dynamischen Bereich (Maximalsignal bezogen auf das Dunkelrauschen)

[1] Unter Rauschen versteht man in diesem Zusammenhang die statistische Unsicherheit in der Messung der Anzahl Elektronen, das heisst der elektrischen Ladung, welche photogeneriert worden ist.

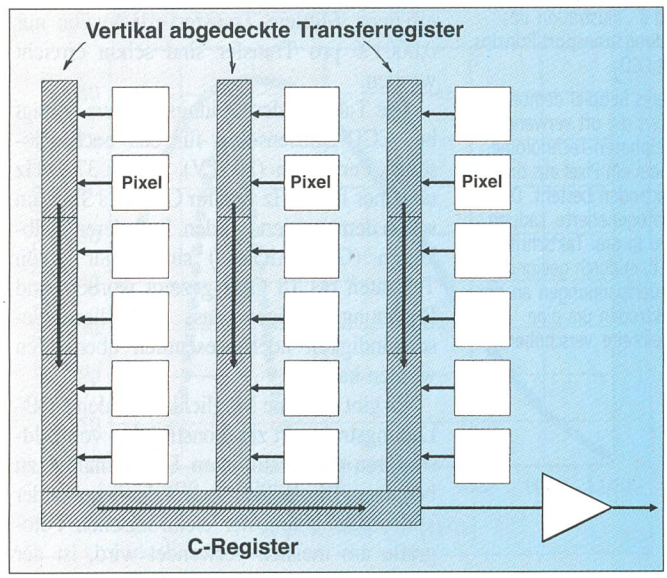


Bild 4 Schematischer Aufbau eines Interline-Transfer CCD für die Videotechnik

Der in der Videotechnik meist eingesetzte Interline-Transfer CCD besteht aus lichtempfindlichen Pixeln, vertikalen CCD-Transportregistern, die durch Abdecken vor Lichteinfall geschützt sind, und einem horizontalen CCD-Transportregister, welches die photogenerierte Ladung dem Ausgangsverstärker zuführt

von knapp 1000 : 1, in logarithmischen Einheiten also typischerweise 55–60 dB. Dies entspricht etwa der Helligkeitsdynamik von Farbnegativ-Filmen für Kleinbildkameras.

Bis vor kurzem konnte dieser dynamische Bereich nur auf drei Arten erhöht werden, wobei in jedem Fall Nachteile in Kauf genommen werden mussten: Durch Abkühlen des Sensors gelingt es, das Dunkelrauschen deutlich zu reduzieren, weil bei Temperaturreduktion um jeweils 8 °C das Rauschen halbiert wird. In der CCD-Bilderfassung für die Astronomie wird beispielsweise bei Temperaturen von –50 °C bis –120 °C gearbeitet, was viele praktische Probleme, zum Beispiel wegen der Kondensation von Feuchtigkeit, mit sich bringt. Durch Verlangsamung des Auslesens bei gleichzeitiger Reduktion der Bandbreite des Ausgangsverstärkers kann das Rauschen weiterhin verkleinert werden. Dies bedingt aber längere Auslesezeiten von bis zu mehreren Minuten in astronomischen Anwendungen. Eine letzte Möglichkeit besteht darin, dieselbe Pixelladung mehrmals zu lesen und zu mitteln, weil die Ladungsdetektion bei CCD nicht-destruktiv erfolgt. Auch hier erkauft man sich das reduzierte Rauschen mit einer Verlängerung der Auslesezeit; für 10fach reduziertes Rauschen muss man beispielsweise 100mal mitteln und damit 100mal langsamer auslesen.

Ein neuer halbleitertechnologischer Trick eröffnet jedoch ganz neue Wege der Bilderfassung mit minimalem Verstärkerrauschen. Es ist nämlich gelungen, die Eingangskapazität des Ausgangs-MOS-FETs auf wenige fF zu reduzieren. Dies macht möglich, dass man bei Zimmertemperatur ein Pixelrauschen von nur noch einem halben Elektron beim Auslesen mit Videofrequenz (Bandbreite 3,6 MHz) erhält [3]. Mit einem solchen Bildsensor, der nur noch kleine Pixel für ein Maximalsignal von etwa 10 000 Elektronen benötigt, hat man also einen dynamischen Bereich von 80 dB (siehe Bild 5) und eine Lichtempfindlichkeit erreicht, die weit über derjenigen des fotografischen Films liegt.

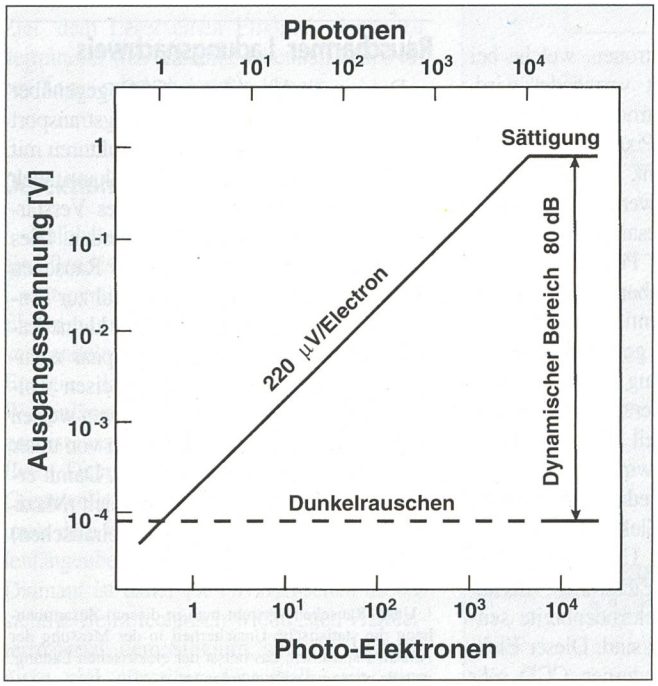


Bild 5 Dynamik eines CCD mit neuartigem, hochempfindlichem Ausgangsverstärker

Diese Grafik, adaptiert aus Referenz [3], zeigt die Spannung am Ausgang eines CCD-Bildsensors, der mit einem besonders empfindlichen Ausgangsverstärker ausgerüstet ist. Ein Dunkelrauschen von 0,5 Elektronen in einem Pixel-Ladungspaket ist experimentell – bei einer Videobandbreite von 3,6 MHz und Zimmertemperatur – nachgewiesen worden. Unter der Annahme von 50% Quanteneffizienz hat dieser Bildsensor ein äquivalentes Rauschen von einem Photon (siehe obere Abszissenbeschriftung) und eine Dynamik von 80 dB

Elektronische Fotografie mit CCD-Bildsensoren

Nachdem Halbleiter-Bildsensoren so viele nützliche Eigenschaften in sich vereinigen, wundert es einen, dass sie nicht schon lange neben der Videotechnik in der sogenannten elektronischen Fotografie [4] eingesetzt werden. Schliesslich gibt es viele moderne Anwendungen der Fotografie, wo der konventionelle Film der elektronischen Bildaufzeichnung mit Halbleiter-Bildsensoren unterlegen ist:

- Der Film muss zuerst entwickelt werden, während die elektronisch aufgenommenen Bilder sofort zur Verfügung stehen.
- Das Kopieren von elektronischer Information ist viel einfacher als das Herstellen von Abzügen ab fotografischen Negativen.
- Die Nachbearbeitung von Bildern auf Filmmaterial (lokale Farb- oder Schärfekorrektur, Kombination von Bildern, Einsatz von Effekten) ist bei Filmbildern nicht nur viel schwieriger als bei elektronisch gespeicherten Bildern, sondern in manchen Fällen sogar unmöglich.

Ein wesentlicher Grund für das erstaunlich lange Überleben des fotografischen Films ist der tiefe Preis, der für das leistungsfähige System «fotografischer Film» bezahlt werden muss; der Film ist nämlich gleichzeitig Bildaufnahme- und Bildspeicher-Medium mit einer sehr hohen Informationsdichte. So hat etwa ein konventioneller 200-ISO-Farbnegativfilm im traditionellen Kleinbildformat (24x36 mm^2) eine Auflösung, die etwa 1700x2500 Farbpixeln bei elektronischer Bildaufnahme entspricht [4]. Bisher hauptsächlich eingesetzte Videobildsensoren haben bei einer Fläche von 6,6x8,8 mm^2 ($^2/_3$"-Format)[2] im besten Fall 570x780 Bildpunkte, also deutlich weniger. Selbstverständlich kann man Halbleiterbildsensoren

[2] Diese alte Bezeichnung für Bildformate in Zoll-Bruchzahlen stammt aus der Zeit der Bildaufnahmeröhre (Vidicons).

herstellen, die weit mehr Bildpunkte aufweisen, beim heutigen Stand der Technik sogar 5192x5192 auf einer Fläche von 62x62 mm^2 [5]. Der tiefere Grund für den langjährigen Preisvorteil des Films liegt im Flächenbedarf der Sensoren, der sich direkt im Preis niederschlägt. Vor kurzem sind die neuen $^1/_3$"-CCD auf den Markt gekommen, die auf einer Fläche von 3,7x4,9 mm^2 etwa 450000 Pixel für ausgezeichnete Video-Qualität aufweisen. Damit konnte der Preis für eine komplette Videokamera auf etwa 300 Franken reduziert werden (je kleiner der Chip, desto billiger die Kamera). Die Anstrengungen vor allem japanischer Hersteller konzentrieren sich darauf, dieselbe Anzahl Pixel in der nächsten Generation von Bildsensoren im $^1/_6$"-Format anbieten zu können. Damit werden dann komplette Videokameras zu unter 100 Franken erhältlich sein.

Dem gleichzeitig stattfindenden Technologie-Wettbewerb um Halbleiter-Speicherbausteine (RAM-Chips, Flash Memories usw.) mit immer höherer Speicherdichte und stetig sinkenden Preisen verdankt die elektronische Fotografie die benötigten digitalen Speicher und damit eine kostengünstige Zwischenspeicherung in der Kamera. Schliesslich profitiert die elektronische Fotografie für die Bildarchivierung auch vom Preiszerfall bei den Massenspeichern (Mini-Disks, Magnetooptik, DAT usw.) und kommt so der Computertechnik (Schlagwort Multi-Media) immer näher.

Die schnell fortschreitende Miniaturisierung der Halbleiter-Bildsensoren hat aber auch direkte Konsequenzen für die elektronische Fotografie: Während die Auflösung von Standard-Videobildsensoren für eine solche Anwendung deutlich hinter dem fotografischen Film zurückbleibt, wird der kommende neue Standard für das hochauflösende Fernsehen (HDTV) diesen Mangel nicht mehr aufweisen. Typische HDTV-Bildsensoren weisen Pixelzahlen von rund 1200x2000 Pixeln auf. Es ist abzusehen, dass die nächste Generation von HDTV-CCD etwa denselben Flächenbedarf und damit den gleichen Preis aufweisen werden, welche heute für die $^1/_2$"-Bildsensoren gelten. Damit werden schon bald Kameras für die elektronische Fotografie auf den Markt kommen, welche bezüglich Auflösung, Empfindlichkeit, Bildverarbeitungsmöglichkeiten und Preis (einige hundert Franken) Fähigkeiten bieten, welche den konventionellen Film über kurz oder lang aus grossen Teilen der Fotografie verbannen werden. Bei professionellen Studiokameras ist dieser Schritt zur elektronischen Fotografie bereits gemacht worden. Der führende Schweizer Hersteller Sinar AG beispielsweise bietet seit kurzem eine Kamera-Rückwand an, bei der ein CCD mit einer Auflösung von 2048x2048 Pixeln eingesetzt wird [6].

Bildsensoren mit erhöhter Funktionalität

Wie erwähnt sind die Halbleiter-Prozesse für die Herstellung von Analog-Digital-ICs und Bildsensoren so ähnlich, dass es nahe liegt, Bildsensoren schon auf dem Chip mit Signal- und Bildverarbeitungselektronik zu versehen. Ein Beispiel dafür ist etwa die «Peach», eine Miniatur-Videokamera, die lediglich aus einem billigen Objektiv und einem einzigen IC besteht. Dieser etwa 10x10 mm^2 grosse Chip enthält neben einem Photodioden-Bildsensor die ganze Auslese- und Verstärkungselektronik sowie die nötige Digitalelektronik zur Erzeugung eines Videosignals nach CCIR-Fernsehnorm. Nur noch eine 5-V-Spannungsversorgung und ein 6-MHz-Taktsignal sind für den Betrieb dieser Single-Chip-Videokamera erforderlich [7]. In Kombination mit einer billigen Plastiklinse kann so für weniger als 100 Franken ein komplettes Video-Kamerasystem realisiert werden.

Man kann einem Bildsensor aber noch mehr Funktionalität mitgeben, indem man die wichtige Bildvorverarbeitung auf dem Sensorchip selbst realisiert. Inspirationen dazu liefern die Fähigkeiten, welche biologische Sehsysteme – Augen – für ihre komplexen Wahrnehmungsfunktionen aufweisen [8]. Ein Beispiel dazu ist die nichtuniforme geometrische Auflösung, welche mit einem Mechanismus verbunden ist, der die Aufmerksamkeit auf verschiedene Bildbereiche zu richten vermag. Damit kann der im Gehirn zu verarbeitetende Bilddatenstrom viel kleiner gehalten werden, als wenn immer die volle Bildauflösung aufgenommen und verarbeitet werden müsste. Das Bild 6 zeigt dies schematisch, indem es die typische, rechteckige Anordnung von Pixeln, wie sie normalerweise in Halbleiter-Bildsensoren verwendet wird, der örtlich variablen Auflösung mit einer Fovea (dem Bereich höchster Auflösung in der Mitte), wie sie natürliche Sehsysteme oft verwenden, gegenüberstellt. Während Menschen nur eine Fovea pro Auge aufweisen, ähnlich wie in Bild 6 (b) illustriert, haben beispielsweise Vögel zwei solche Zentren scharfen Sehens [1]. Man kann nun mit CCD-Bildsensoren nicht nur eine solche ortsabhängige Geometrie realisieren, sondern diese sogar noch in Echtzeit elektrisch einstellbar machen. Der Trick, den wir am Paul-Scherrer-Institut Zürich dazu verwendet haben, ist sogar äusserst einfach und gar nicht aufwendig zu realisieren; wir lassen nämlich die Physik für uns arbeiten, anstatt aufwendige elektronische Schaltungen zu entwickeln. Durch das Einführen zusätzlicher CCD-Elektroden, die geeignet angesteuert werden, kann man photogenerierte Ladungspakete zusammenfliessen lassen; man kann Ladung so summieren. Anhand des CCD-Funktionsprinzipes in Bild 3 lässt sich leicht einsehen, dass dies durch Spannungsverteilungen an den Elektroden zu erreichen ist, welche ausgedehnte Potentialwannen erzeugen, in denen photogenerierte Ladungsträger aus einer grossen Fläche gesammelt werden. Je nach der zweidimensionalen Anordnung dieser rein elektrisch erzeugten Summationsbereiche kann die Auflösung innerhalb des Bildsensors örtlich verschieden gewählt und von Bild zu Bild anders eingestellt werden. Das Beispiel in Bild 7 zeigt dies anhand eines Prototyps eines solchen dynamischen Bildsensors [9], der in diesem Fall nur 70x70 Pixel enthält. Das Bild eines Mitarbeiters ist in diesem Beispiel mit verschieden grossen und verschieden geformten (hier allerdings nur rechteckigen) Pixeln aufgenommen und dargestellt worden. Ein grosser Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Bildsensor bei kleiner Bildauflösung mit sehr viel höheren Bildtaktraten von Hunderten von Bildern pro Sekunde ausgele-

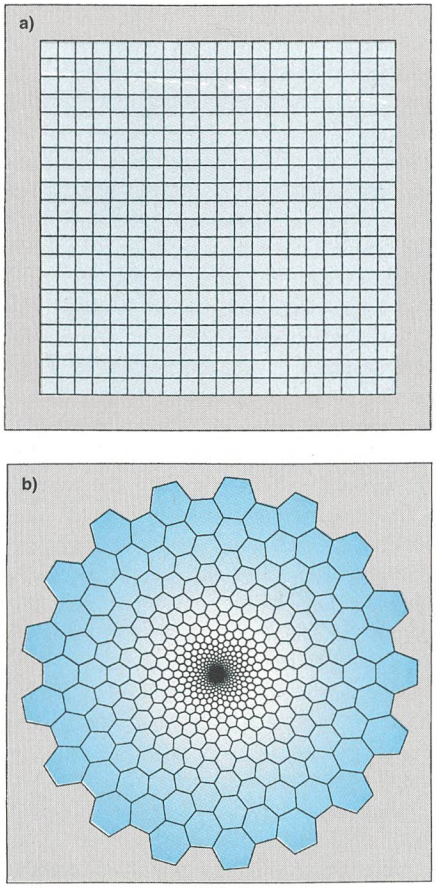


Bild 6 Anordnungen von Pixeln für die uniforme und örtlich variable Auflösung in Bildsensoren

a. Traditionelle, kartesische Anordnung von Pixeln in herkömmlichen Videobildsensoren für die uniforme Bildauflösung über die ganze Bildfläche.
b. Nichtuniforme, radial nach aussen abnehmende Auflösung bei einem Retina-Bildsensor, motiviert durch natürliche Sehsysteme, welche oft eine örtlich variable Auflösung zur Datenreduktion bei der Bildaufnahme aufweisen (sogenannte Foveation)

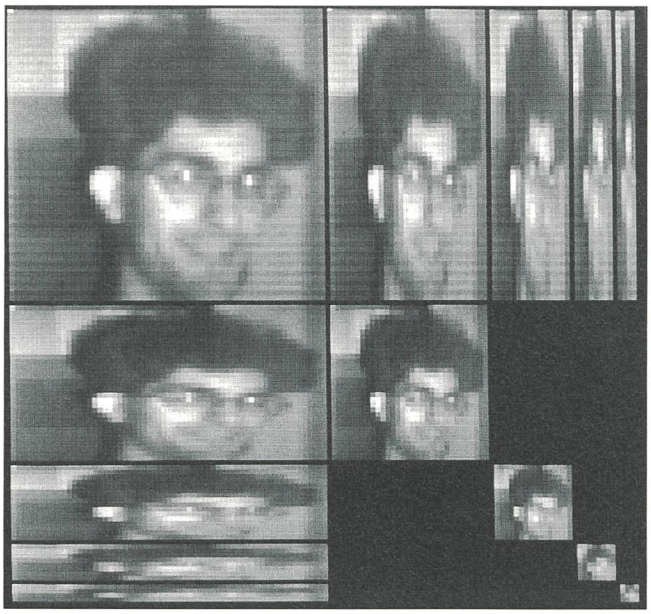


Bild 7 Elektrisch einstellbare Pixelgrösse und -form beim dynamischen CCD

Beim dynamischen CCD kann die Pixelgrösse und deren Form in weiten Bereichen durch geeignete Ansteuerung in Echtzeit gewählt werden. Dieses Bild, aufgenommen mit dem Prototyp eines dynamischen CCD mit 70x70 Pixeln, illustriert verschiedene Formate mit variabler Auflösung und Geometrie, welche mit deutlich höheren Bildwiederholraten aufgenommen werden können

sen werden kann. Dass ein solcher CCD-Bildsensor nicht wesentlich komplexer aufgebaut ist als andere CCD, zeigt Bild 8. Der dargestellte Bildsensor weist nur vier zusätzliche Elektroden auf; die ganze Wahl der Pixelgeometrie erfolgt über die Ansteuerung.

Ein weiteres Beispiel für einen informationsverarbeitenden Bildsensor ist der passive Ein-Chip-Bewegungsdetektor, der in Bild 9 gezeigt ist. Er besteht aus positionsempfindlichen Dioden (PSD) und der nötigen analogen Signalverarbeitungs- und Treiber-Elektronik, um optische Änderungen nachweisen und anzeigen zu können [9]. Dieser Chip benötigt lediglich noch eine Spannungsversorgung und kann dann direkt eine LED-Anzeige treiben. Zwar ist er nicht so vielseitig einsetzbar wie etwa der dynamische CCD-Bildsensor – er ist in seiner Funktionalität auf die Detektion von Änderungen im optischen Signal limitiert –, dafür aber ist er ein gutes Beispiel für einen Photo-Asic, der bereits bei kleinen Stückzahlen kostengünstig gefertigt werden kann. In diesem Fall kostete die Fabrikation von 100 ICs auf einem Multi-Projekt-Wafer nur etwa 4500 Franken, inklusive Herstellungskosten für die Photolithographiemasken.

Bildsensoren mit erhöhter Funktionalität sind mehr als Kuriositäten aus den Forschungslabors: es gibt bereits einige vollständig integrierte Ein-Chip-Bildverarbeitungssysteme auf dem Markt. Der Smart Optical Sensor Mapp 2200 ist ein Photodioden-Array-Bildsensor mit integriertem Parallel-Bildverarbeitungs-Prozessor (bestehend aus 256 Sub-Prozessoren), Analog-Digital-Wandler und 16-Bit-Interface zur Kommunikation mit der Aussenwelt und zur Echtzeit-Programmierung [10].

Eine Spin-off-Firma des California Institute of Technology hat momentan einen informationsverarbeitenden Bildsensor im Beta-Test, der die Bildsensorik mit einem neuronalen Netzwerk kombiniert [11]. Dieser Sensor ist in der Lage, die Zahlen auf Checks zu lesen, allerdings erst die gedruckten und noch nicht die handgeschriebenen. Damit steht bereits ein Ein-Chip-Bild-Erfassungs- und -Verarbeitungssystem zur Verfügung, das zu lesen begonnen hat. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis dieser Chip auch Buchstaben und später vielleicht sogar handschriftlichen Text lesen kann. Wo wird diese Entwicklung wohl enden?

Intelligente Bildsensoren und sehende Chips

Das Ziel der beschriebenen Entwicklungen ist klar: Man will monolithisch integrierte Sehsysteme realisieren – Augen aus Silizium – welche für bestimmte Aufgaben die Leistungsfähigkeit von biologischen Sehsystemen erreichen oder sogar übertreffen können. Je mehr Funktionalität den Bildsensoren mitgegeben wird, desto grösser ist die Berechtigung, sie als intelligent zu bezeichnen. Der Wunsch ist natürlich, intelligente Bildsensoren zu entwerfen und zu fabrizieren, die den Namen «sehende Chips» tatsächlich verdienen [12]. Dies ist ein sehr hochgestecktes Ziel. Es kann – wenn überhaupt – nur von einem interdisziplinären Team von Forschern aus verschiedenen Gebieten erreicht werden: Neurobiologen, welche die Strategien natürlicher Sehsysteme erklären können, Bildwissenschafter und Informatiker, die neue, für die Integration auf Silizium geeignete Algorithmen zur Bildverarbeitung entwickeln, Elektroingenieure und Schaltungstechniker, welche die Integration von sehenden Chips realisieren können,

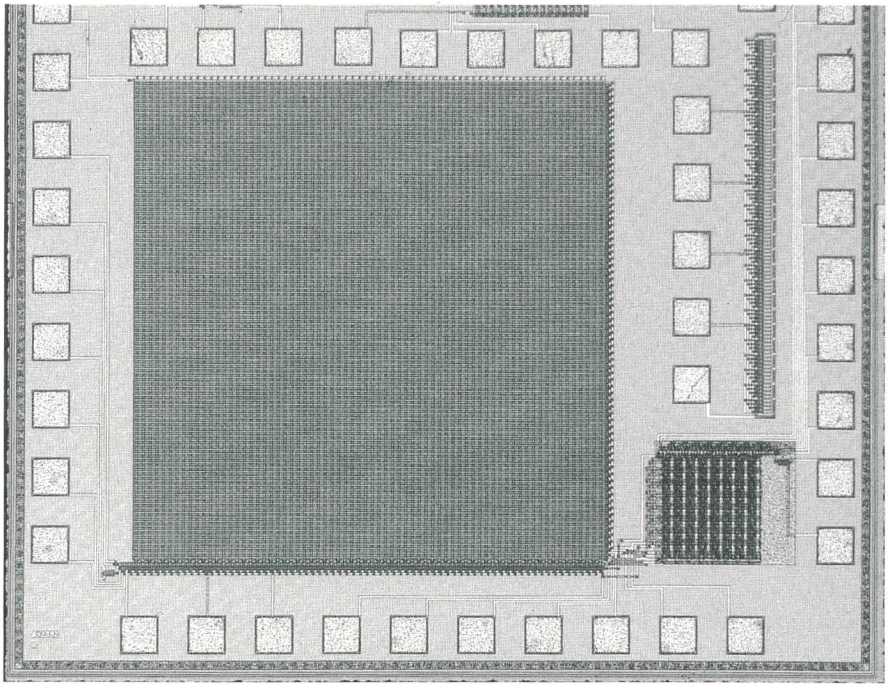


Bild 8 Realisierung des Prototyps eines dynamischen CCD mit 70x70 Pixeln

Mikroskopische Aufnahme des dynamischen CCD, mit dem das Beispiel in Bild 7 aufgenommen wurde. Dieser CCD benötigt eine Fläche von 1,4x1,4 mm² und nur vier Elektrodenanschlüsse mehr als ein konventioneller CCD-Bildsensor. Die beiden Strukturen rechts vom dynamischen CCD sind ein- und zweidimensionale CCD-Testelemente

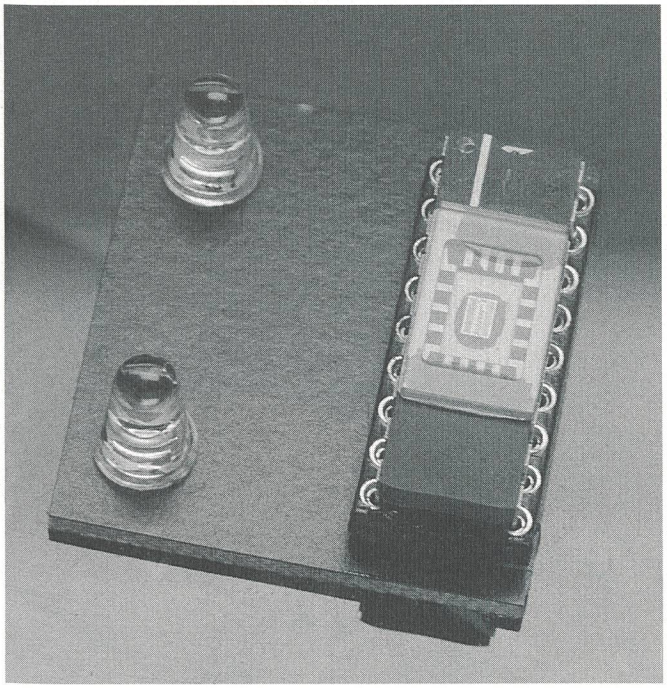


Bild 9 Passiver Ein-Chip-Bewegungsdetektor

Dieser Photo-Asic ist ein passiver integrierter Ein-Chip-Bewegungsdetektor. Er enthält photosensitive Elemente sowie die gesamte analoge Signalverarbeitungs- und Treiberelektronik, welche über die beiden LED eine Änderung des optischen Signals bipolar (kleine positive oder negative Helligkeitsunterschiede) anzeigen. Der abgebildete Sensor soll in einem grossen Winkelbereich empfindlich sein und kann deshalb auf eine Abbildungsoptik verzichten

Optiker, welche einen Teil der Bildverarbeitungsaufgaben bereits optisch erledigen und schliesslich Festkörperphysiker und Halbleitertechnologen, welche neue Prozesse mit kleineren Geometrien und neuen Fähigkeiten entwickeln.

Solche interdisziplinäre Teams sind heute bereits an der Arbeit mit dem Ziel, für eng definierte Aufgaben intelligente Bildsensoren zu entwerfen und herzustellen. Ein typisches Aufgabengebiet ist die Bewegungsanalyse [12], bei der aus der zeitlichen Bildfolge eines Sensors auf die Bewegungen im Bildfeld oder die Eigenbewegung des Bildsensors geschlossen werden soll. Anwendungen finden solche intelligenten Bildsensoren zum Beispiel beim automatischen Manövrieren von autonomen Fahrzeugen oder zum Steuern und Andocken von fliegenden Objekten, wie etwa Satelliten, im Raum. Anstrengungen werden auch beim Stereosehen unternommen, wobei die Information von zwei räumlich getrennten Bildsensoren dazu verwendet wird, eine Tiefen- oder Abstandskarte der Szene zu berechnen. Neben den erwähnten lesenden Sensoren werden auch schon intelligente Bildsensoren entwickelt, welche für die robuste Erkennung von allgemeinen Objekten eingesetzt werden sollen. Solche Sensoren hätten vielseitige Anwendungen in der automatischen Fertigungstechnik und in der computerunterstützten Qualitätskontrolle.

Bei der Entwicklung von neuen Algorithmen der Bildverarbeitung beginnt man darauf zu achten, dass sich diese Algorithmen besonders gut für die Integration in intelligenten Bildsensoren eignen. So wird bereits über intelligente Bildsensoren diskutiert, die Verkehrszeichen vom fahrenden Auto aus erkennen können [13]; man spricht von sehenden Chips, welche Menschen anhand ihrer Gesichter identifizieren können [14], und es werden Augen aus Silizium realisiert [15], welche Schicht um Schicht die Eigenschaften natürlicher Sehsysteme mit Hilfe der modernen Halbleitertechnologie nachbilden. Aber auch viele andere Bereiche, wo sehende Chips eingesetzt werden könnten, werden an Hochschulen und in der Industrie erforscht. Ob man sich bei dieser Forschungsarbeit vor allem von der Biologie inspirieren lässt, um Retinas aus Silizium nachzubauen [15], oder ob man optische und informationstheoretische Wege zu sehenden Chips verfolgt [9; 12], die Entwicklungen der elektronischen Fotografie, der Bildsensoren mit integrierter Funktionalität bis hin zu sehenden Chips werden unser Leben in vielen Bereichen beeinflussen und hoffentlich auch ein bisschen leichter machen.

Literatur

[1] *S. Polyak*: The vertebrate visual system. Univ. Chicago Press, 1957.

[2] *D.H. Hubel*: Eye, Brain and Vision. Scientific American Library, New York, 1988.

[3] *Y. Matsunaga, H. Yamashita* and *S. Ohsawa*: A Highly Sensitive On-Chip Charge Detector for CCD Area Image Sensor. IEEE. J. of Solid-state Circuits 26(1991)4, pp. 652–656.

[4] *M.A. Kriss:* Electronic Imaging, The Challenge, The Promise. J. of the Soc. for Photographic Science and Technology in Japan 50(1987)5, pp. 357–378.

[5] Megasensor, Dalsa CCD Image Sensors Inc., 605 McMurray Road, Waterloo, Ontario, Canada.

[6] Sinar AG, Schaffhausen, 8245 Feuerthalen.

[7] *D. Renshaw, P.B. Denyer, G. Wang* and *M. Lu*: Asic Vision. Proc. of the IEEE 1990, Custom Integrated Circuits Conf., pp. 7.3.1.–7.3.4.

[8] *M. Land:* The optics of animal eyes. Contemporary Physics 29(1988)5, pp. 435–455.

[9] *P. Seitz, D. Leipold, J. Kramer* and *J.M. Raynor:* Smart optical and image sensors fabricated with industrial CMOS/CCD semiconductor processes. Proc. of the SPIE 1900(1993), pp. 30–39.

[10] Integrated Vision Products AB, Teknikringen 1, S58330 Linköping (Schweden).

[11] Synaptics Inc., 2860 Zanker Road, USA – San Jose, CA 95134.

[12] *C. Koch:* Seeing Chips, Analog VLSI Circuits for Computer Vision. Neural Comp. 1(1989)1, pp. 184–200.

[13] *P. Seitz, G.K. Lang, B. Gilliard* and *J.C. Pandazis:* The robust recognition of traffic signs from a moving car. Informatik-Fachberichte Nr. 290, pp. 287–294, Springer Verlag 1991.

[14] *M. Bichsel:* Strategies of Robust Object Recognition for the Automatic Identification of Human Faces, Diss. ETH Nr. 9467, 1991.

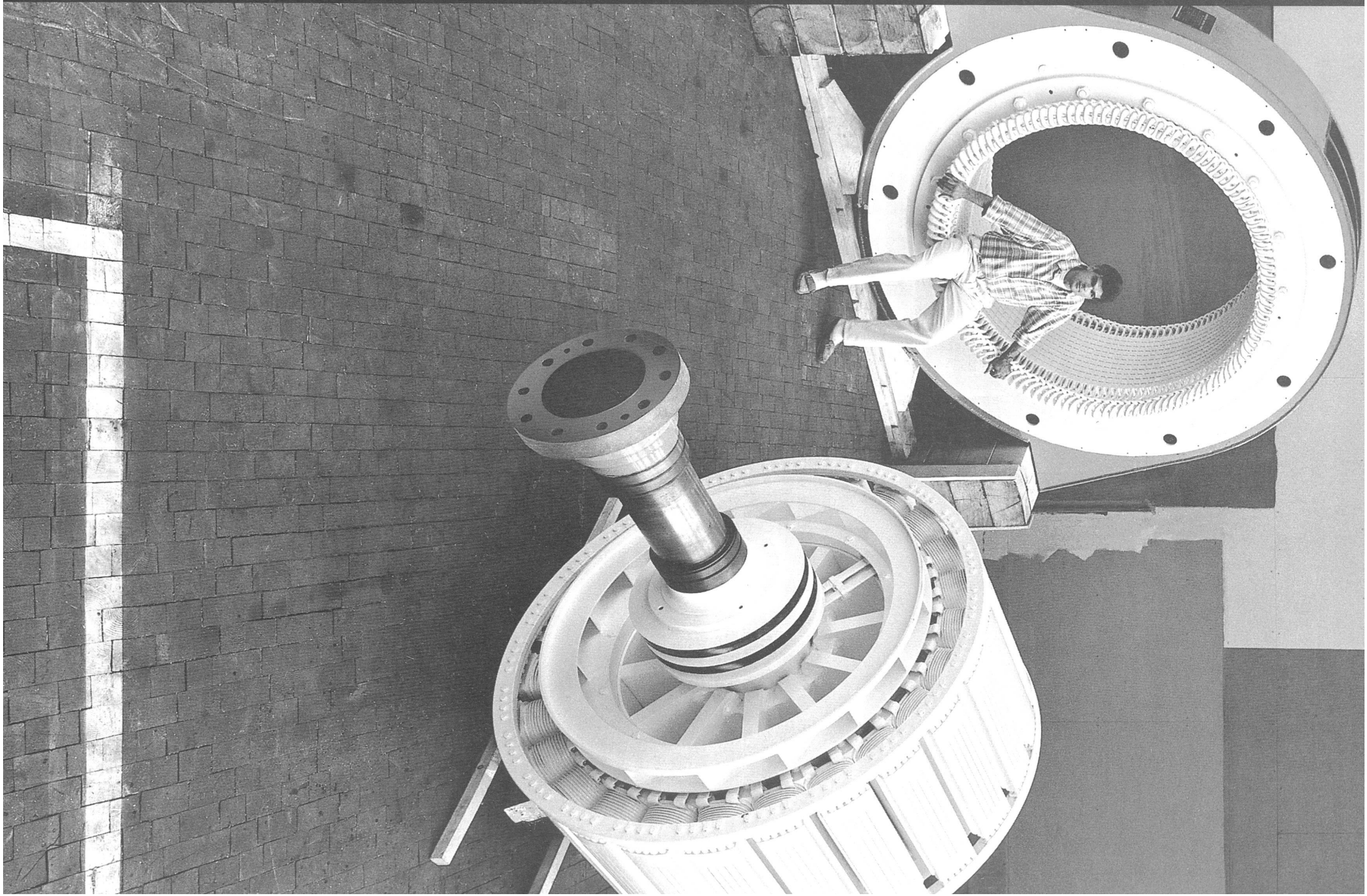
[15] *M.A. Mahowald* and *C. Mead:* The Silicon Retina. Scientific American, Mai 1991, pp. 40–46.

De la photographie électronique à la puce voyante

Capteurs à semi-conducteurs d'images modernes

La technique des semi-conducteurs modernes permet de réaliser des capteurs d'images contenant des millions de points d'image, des pixels intelligents, et intégrant un système électronique analogique et numérique pour le traitement de l'image. On discute déjà de capteurs d'images intelligents qui reconnaissent les panneaux de signalisation à partir de la voiture roulante; on parle de puces voyantes qui identifient les personnes par leur visage, et l'on réalise des yeux en silicium qui imitent couche par couche les propriétés des systèmes de vision naturelle à l'aide de la technique des semi-conducteurs modernes. Nombre d'autres secteurs où les puces voyantes pourraient être utilisées sont étudiés dans les grandes écoles et l'industrie. Que ces travaux de recherche s'inspirent surtout de la biologie en vue de reproduire des rétines en silicium, ou que l'on explore des voies optiques et des techniques de l'information vers les puces voyantes, le développement des capteurs d'images avec fonctionnalité intégrée jusqu'aux puces voyantes, notre vie va être fortement influencée dans de nombreux secteurs.

Die Support-Stellen aller ABB-Gesellschaften sind miteinander verbunden – über das ABB Support Switch Board. Sollten Sie den direkten Weg zu Ihrem Ansprechpartner nicht kennen: Wählen Sie die ABB Hotline 056 / 75 77 88. Rund um die Uhr.



«Wir sind ganz bei Ihrer Sache.

Für mich heisst das zuallererst Beratung und Unterhalt, sachgerecht und fachgerecht! Das ist aus meiner Sicht die einzige Gewähr, um zum Beispiel Stillstandszeiten auch tatsächlich so minim wie möglich zu halten oder die Lebensdauer der mir anvertrauten Anlagen und Objekte zu verlängern. Support ist nicht nur einfach Service; da geht es auch darum, dass die Werte der oftmals teuren Maschinen und Anlagen erhalten bleiben.»

René Schärer

René Schärer ist Chefmonteur bei ABB Drives AG in Birr. Er sitzt im Stator eines Synchronmotors, der normalerweise einen Holzschleifer für die Papierherstellung antreibt. Vor ihm steht der dazugehörende Rotor. Beide Komponenten waren durch einen Störfall schwer in Mitleidenschaft gezogen. Sie wurden von René Schärer und seinem Team einer gründlichen Reparatur unterzogen und sind wieder voll einsatzbereit.

ABB Support. Wir sind ganz bei Ihrer Sache.

ABB

Was haben diese Flüsse und Ströme gemeinsam?

Optimal betriebene Wasserkraftwerke, mit einer Wasserhaushalt-Automatik natürlich von . . .

ineltec 93
Ihre Messe Basel.
7.–10.9.1993
Halle 204
Stand G84

Rittmeyer ist seit 1904 ausschliesslich für die Wasser- und Energiewirtschaft tätig.

Wir entwickeln und fertigen zuverlässige und präzise **Messgeräte** für:

- Durchfluss
- Druck
- Füllstand
- Drehwinkel

Unser **RIDAT-Leitsystem** meistert alle Aufgaben zum Führen von technischen Prozessen im automatischen oder manuellen Betrieb. Die Prozessanordnung kann dabei zentral oder dezentral sein.

Unsere Stärke sind die umfassenden Prozesskenntnisse in der Wasser- und Energiewirtschaft. Wir liefern **schlüsselfertige Anlagen**

- von der Planung bis zur Realisierung
- vom Messgerät bis zur Leitzentrale
- von der Niederspannungsausrüstung bis zur Prozessdatenverarbeitung

rittmeyer

Schweiz:
Rittmeyer AG
Postfach 2143, 6300 Zug 2

Deutschland:
Rittmeyer GmbH
Postfach 1908, 7012 Fellbach

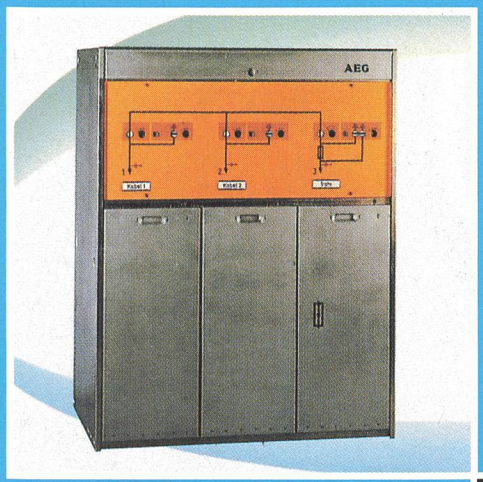
Oesterreich:
Rittmeyer Ges.m.b.H.
Postfach 69, 1152 Wien

Distributions
Moyenne tension

Cellules MT préfabriquées jusqu'à 24 kV, 3150 A, 1000 MVA en exécution isolées à l'air, sous enveloppes métalliques, partiellement cloisonnées ou en exécution isolées au gaz, sous enveloppes métalliques, blindées GIS jusqu'à 52 kV. Pour stations compactes, de réseau, sous-stations et centrales.

Mittelspannungs-
Schaltanlagen

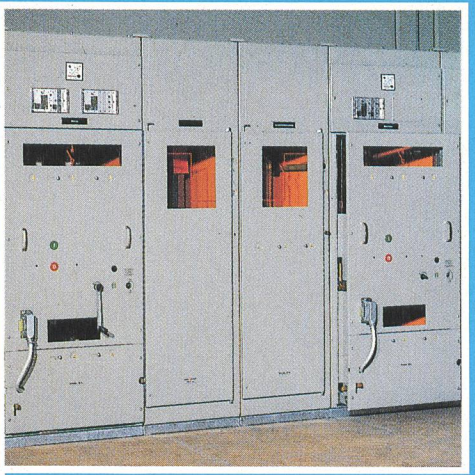
Fabrikfertige MS-Schaltfelder bis 24 kV, 3150 A, 1000 MVA in luftisolierter, metallgekapselter, teilgeschotteter Ausführung oder in gasisolierter, metallgekapselter, metallgeschotteter GIS-Ausführung bis 52 kV.
Für Kompakt-, Netz-, Verteil-, Unterstationen und Kraftwerke.



Wir freuen uns auf Ihren Besuch

ineltec 93

7.–10.9.1993
Halle 105, Stand B10

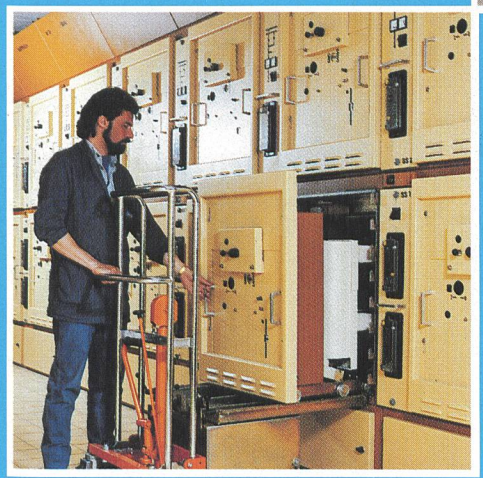


SF_6-Ringkabelschaltanlage
Installation de distribution SF_6
Typ FBA/AEG 3-, 4-, 5-feld./fonct.

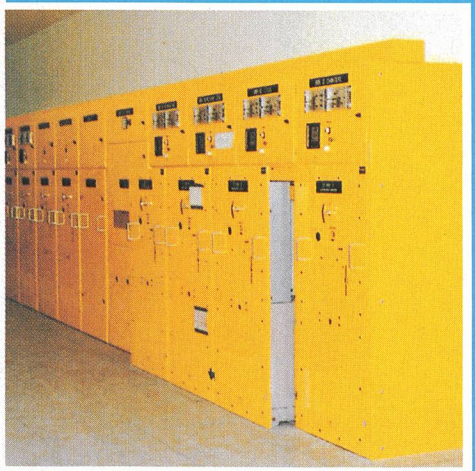
Schmalzellen
Cellules étroites
Typ ME 302 / Lonay

Doppelstöckige Duplexzellen mit Vakuum-LS in Einschubtechnik
Installation duplex à deux étages avec disjoncteurs à vide, sur glissières
Typ ME 160 / EWBO

Vakuum-Leistungsschalterzellen
B = 750 mm, mit 3 Schotträumen
Cellules disjoncteurs à vide
L = 750 mm, avec 3 compartiments
Type ME 160 / Cheneviers



Meterzellen
Cellules 1 mètre
Typ ME 110 / SAK



Appareillage/Schaltgeräte

GARDY SA

Tel. 022/343 54 00
Fax 022/343 95 48 CH-1211 GENÈVE 24

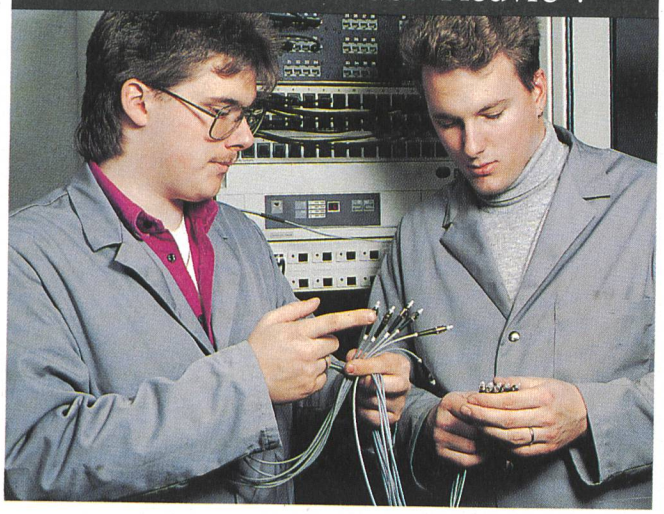
Installations/Schaltanlagen

GARDY SA, Werk Panel

Tel. 021/801 08 11
Fax 021 801 22 83 CH-1028 PRÉVERENGES

Die «Pieuvre» von Cortaillod

Lichtwellenleiter installieren? Ganz einfach mit der «Pieuvre»!



Spezial Ausbildung für Montagepersonal unnötig. Keine teuren Montagewerkzeuge erforderlich. Das LWL-Installationskabel «Pieuvre» für lokale Netzwerke ist bestens den Möglichkeiten des Elektroinstallateurs angepasst. Kabelverlegung und Faseranschluss ist einfach und zeitsparend.

Die «Pieuvre» ist ein LWL-Installationskabel welches an beiden Enden mit werkseitig montierten Steckern ausgerüstet ist. Lieferbar sind Kabel mit 6 bis 8 Fasern und bis 500 m Länge. Für die Verlegung sind die Stecker in einem abmontierbaren Kunststoffschlauch geschützt.

Die «Pieuvre» eine kostengünstige Lösung für Verbindungen von Gebäude zu Gebäude oder im Hausbereich.

zertifiziertes Qualitätssystem SQS ISO 9001/EN 29001 Reg. Nº 10356-02

Besuchen Sie uns an der Ineltec 93, Basel, 7.-10.9, Halle 106, Stand D30

CH-2016 CORTAILLOD/SUISSE
TÉLÉPHONE 038/44 11 22
TÉLÉFAX 038/42 54 43
TÉLEX 952 899 CABC CH

CABLES CORTAILLOD
ÉNERGIE ET TÉLÉCOMMUNICATIONS

Fortschrittliche Technologie, Dienstleistungen und Sicherheit.