

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND
ELECTRICAL ENGINEERING -
DEVICES AND SYSTEMS,
MATERIALS AND TECHNOLOGIES
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische
Angelegenheiten
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Susanne Jakob
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):
Universitätsbibliothek Ilmenau
[ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

R. Mikuta / G. Kuhlemann / E. P. Burte / J. Urban^{*)}

Infrarotsensorarray für die Personenerfassung

ABSTRACT

An Infrared Focal Plane Array with 16 x 8 pixel (128 pixel) is presented. The uncooled thermopile sensor array is fabricated using standard CMOS processes and materials. Modular buildup of the CMOS technology allows advanced analog and mixed signal functionality besides the sensor array. Dielectric membranes as thermopile carriers are bulk-micromachined and released by wet etch processing. The replacement of wet etching by silicon dry etching is possible. Temperature calibration is realised by placing resistors next to every pixel. The primary field of application is thermal presence detection in rooms and buildings. As a mass market product, cheap production with established technologies is required. The sensor comprises highly integrated electronic circuitry for an easy sensor interface.

EINLEITUNG

Zur Steuerung der Beleuchtung, der Heizung oder der Lüftung sowie aus sicherheitstechnischen Gründen ist es in Räumen und Gebäuden wünschenswert, die Anwesenheit und Lage einer oder mehrerer Personen sicher zu erfassen. Zur bedarfsgeführten Steuerung der Klimatechnik benötigt ein Haus- bzw. Gebäudeleitsystem oder der jeweilige Nutzer Informationen über den lokalen Zustand jedes Raumes oder einzelner Gebäudeabschnitte. Die Informationen zur Erfassung von Personen können durch geeignete Sensorik dafür zur Verfügung gestellt werden.

Die sicherste Methode zur Registrierung einer Person in einem Raum ist nach wie vor die manuelle Betätigung eines Tasters. Dabei treten oftmals Bedienungsfehler auf, wenn es sich um Räume mit hoher Personenfluktuation handelt (z.B. Hotel). Für eine große Zahl von Anwendungen in bedarfsgeführten Systemen ist damit eine ordnungsgemäße Bedienung nicht zu erwarten (wie z.B. Gaststätten, Kassenhallen, Begegnungsstätten). Die bisher am Markt verfügbaren Infrarotbewegungsmelder können prinzipbedingt bewegte, nicht aber ruhende Personen erkennen. Das erlaubt das pyroelektrische Wandlungsprinzip nicht. Ultraschallsensoren sind aufgrund der aktiven Beschallung von Personen häufig nicht erwünscht und daher am Markt praktisch nicht durchsetzbar. Licht-

schränken oder Trittmatten sind technisch nicht ausreichend und zeigen oftmals Fehlbelegungen auf [1]. Bildgebende Verfahren im Infrarotbereich, wie sie für die Thermovision zur Anwendung kommen [2, 3], sind für die Gebäudeautomatisierung viel zu teuer und dem Verwendungszweck unangemessen.

Aus diesem Grund bestand das Ziel der Entwicklungsarbeiten darin, ein optisches, kostengünstiges Infrarotsensorarray mit grober Bildstruktur zu entwickeln, dessen Einsatz zunächst vorrangig in der Gebäudeautomatisierung angesiedelt ist. Zur Sicherung einer möglichst geringen Peripherie zum Betrieb des Sensorarrays wird eine interne, sensor-nahe Signalverarbeitung angestrebt, die direkt an einen Mikrokontroller angeschlossen werden kann. Das grob bildgebende Messprinzip nutzt die Person als Infrarotstrahlungsquelle und kommt so im Gegensatz zu bildgebenden Messverfahren auf der Basis von CCD-Bildsensoren ohne Fremdlicht aus. Infolge der groben Bildstruktur von 128 Bildpunkten (8 Zeilen und 16 Spalten) wird die Problematik des Datenschutzes als auch die Respektierung von Persönlichkeitsrechten durch das Messprinzip nicht berührt, das bei bildgebenden Verfahren nicht sicher gestellt werden kann. Diese grobe Bildauflösung ermöglicht es, mittels einer reduzierten Bildverarbeitung von Folgebildern eine kostengünstige Personenerfassung zu realisieren.

SENSORKONZEPT

Die Grundlage des Personenerfassungssystems ist ein sensorisches Element, das thermisch empfindliche Bildpunkte besitzt, die innerhalb eines ebenen Sensorarrays angeordnet sind. Die einzelnen Bildpunkte selbst wurden als Thermoelemente ausgeführt, wobei die „heiße“ Kontaktstelle des Bildpunktes dem Wirkprinzip nach als Gesamtstrahlungspyrometers arbeitet. Zur Erfassung von Personen sind Strahlungstemperaturen zwischen (298 ... 310) K von besonderem Interesse. Das Maximum der spektralen Strahlungsempfindlichkeit für diesen Temperaturbereich liegt dabei zwischen $9,4 \mu\text{m}$ und $9,9 \mu\text{m}$, der durch das Wirkprinzip problemlos abzudecken ist. Das interessierende Strahlungsspektrum verändert sich in diesem Wellenlängenbereich nur gering und kann so vereinfachend als konstant betrachtet werden. Geht man in diesem Temperaturbereich von 256 digitalen Schritten (8 bit) als Messspanne aus, so ergibt sich daraus eine digitale Messempfindlichkeit von 21 K^{-1} .

Das Infrarotsensorarray besteht schaltungstechnisch aus zwei Abschnitten, den 128 Bildpunkten, die mit einer sensornahen Signalverarbeitung [4] ausgestattet sind (**Bild 2**) und der Steuerung (Kontroller), die den Datenaustausch mit dem angeschlossenen Mik-

rokontroller organisiert (**Bild 3**). Als Betriebsspannung wurde der Sensor auf die bei modernen Mikrocontrollern bevorzugten 3,3 V ausgelegt, wobei die eingesetzten Operationsverstärker nur aus einer Spannungsquelle versorgt werden (rail-to-rail).

Die Herausforderung beim Entwurf und der Herstellung des Infrarotsensorarrays bestand nun u.a. darin, ein mikromechanisches Sensorelement (Thermosäule auf silicium-basierter Membran) bekannten technologischen Standards mit dem der ASIC-Fertigung in kostengünstiger CMOS-Technologie zu verbinden. Das **Bild 1** zeigt eines dieser hergestellten Infrarotsensorarrays und eine als Bildpunkt ausgeführte Membrane mit der aufgesetzten Thermosäule. Damit entsteht der erforderliche thermische Bildpunkt (Thermopile) [5, 6] von dem auf dem Sensorarray 128 (8 x 16) angeordnet sind.

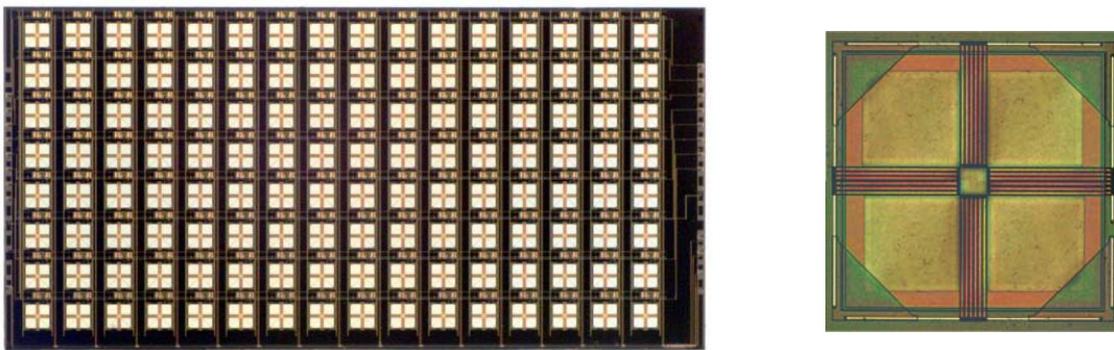


Bild 1: Infrarotsensorarray mit 128 Bildpunkten (links) und Aufbau eines Bildpunkts auf der Basis einer Thermoelementekette (Thermosäule oder auch Thermopile).

Die Funktion jedes der 128 Thermopile (Bildpunkt bzw. Pixel) dieser Anordnung basiert darauf, dass sich infolge der Infrarotstrahlung der Rahmen langsamer erwärmt als das thermisch isoliert angeordnete Zentrum. Dadurch entsteht eine Thermospannung, die mittels einer Operationsverstärkerschaltung verstärkt und am Ausgang gemessen werden kann. Die zugehörige Schaltungsanordnung zeigt das **Bild 2**.

Die vom Thermopile erzeugte Thermospannung ist sehr gering, so dass bei Verwendung nur einer Betriebsspannung die Pegeländerung am Eingang der Operationsverstärker im Bereich der unteren Sättigungsspannung erfolgt. Hinzu kommt noch, dass eine negative Thermospannung überhaupt nicht verstärkt wird. Aus diesem Grund wird an das Thermopile eine Vorspannung von $U_B/2$ angelegt, wodurch eine symmetrische Aussteuerung des Operationsverstärkers um diese Spannung ermöglicht wird [7]. Diese Verstärkerschaltung selbst ist in unmittelbarer Nähe des Bildpunktes angeordnet [4], so dass die Signalleitungen kurz gehalten werden können, um die Einkopplung elektromagnetischer Störungen sehr gering zu halten.

Gemessen an der Thermospannung mit einer Messempfindlichkeit von $45 \mu\text{V/K}$ war die maximale Offsetspannung der verfügbaren Operationsverstärker relativ hoch. Aus die-

sem Grund muss neben der Thermospannung des Bildpunktes auch die Offsetspannung des zugehörigen Verstärkers erfasst werden. Dazu wird das Thermopile durch einen Anlogschalter¹⁾ kurzgeschlossen. Die Differenz beider Spannungen ist dann die verstärkte Thermospannung des jeweiligen Bildpunktes (Pixel). Ergänzt wird der infrarotempfindliche Bildpunkt durch eine im sichtbaren Spektralbereich betriebene Fotodiode²⁾, die der Erkennung stationärer Lichtquellen im Empfangsbereich des Infrarotsensorarrays dient. Dadurch wird eine vorteilhafte Bewertung des Infrarotbildes bezüglich zu erkennender Personenbewegungen ermöglicht.

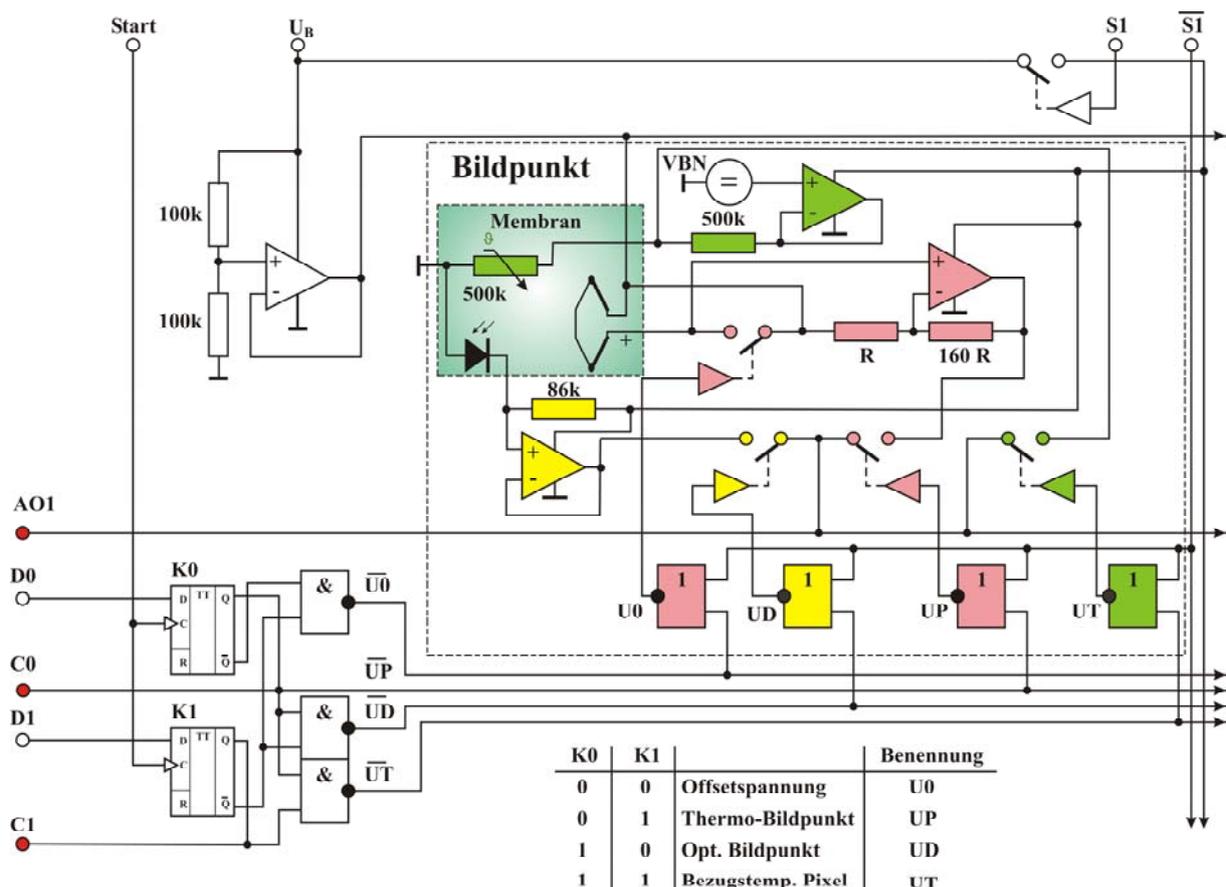


Bild 2: Innenschaltung eines Bildpunktes mit sensornaher Signalverarbeitung und zugehöriger Auswahlschaltung des Infrarotsensorarrays.

Ein weiterer, auch am Bildpunkt angeordneter Operationsverstärker dient der Messung der jeweiligen Rahmentemperatur der Membran. Dabei basiert die Temperaturmessung auf einem temperaturempfindlichen Spannungsteiler, der aus einer Konstantspannungsquelle gespeist wird, wobei die Widerstände gegensinnige Temperaturkoeffizienten be-

¹⁾ Der als allgemeiner Schalter im **Bild 2** dargestellte Anlogschalter soll das Schaltungsprinzip veranschaulichen. Realisiert wird er durch zwei parallel geschaltete FET's, die durch einen Flip-Flop angesteuert werden[7].

²⁾ Die Erweiterung des Bildpunktes durch eine Fotodiode bezieht sich auf den Empfang optischer Strahlungsquellen im sichtbaren Spektrum, die der Infrarotempfänger ebenfalls registriert (Verhalten als Gesamtstrahlungspyrometer).

sitzen. Die Temperatur ist somit eine Funktion des sich ändernden Teilverhältnisses beider Widerstände. Auf diese Weise kann sowohl eine Temperaturverteilung über dem Infrarotsensorarray ermittelt werden als auch mit Hilfe des Heizers, der ebenfalls im Zentrum der Membran angeordnet ist, eine Kalibrierung der einzelnen Bildpunkte vorgenommen werden. Diese Funktion des Infrarotsensorarrays ist besonders für das Bildrauschen [3] von großem Interesse.

Untersuchungen an den ersten Versuchsmustern zeigten, dass im thermisch eingeschwungenen Zustand die Offsetspannungsdrift der eingesetzten Operationsverstärker sehr gering ist, wodurch eine bildpunktbezogene Erfassung der Offsetspannung als auch der Rahmentemperatur nicht zwingend erforderlich ist. Durch eine 2-bit-Zustandssteuerung, wie sie das **Bild 2** gezeigt, kann nun über die Anschlüsse D0 und D1 wahlweise zwischen den vier Signalquellen des Bildpunktes (Pixel) umgeschaltet werden. So kann beispielsweise nach Bedarf die Offsetspannungen der 128 Thermospannungsverstärker gemessen und zwecks Korrektur der verstärkten Thermospannungen abgespeichert werden. Gleiches gilt für die Messung der Rahmentemperatur jedes einzelnen Bildpunktes. Wahlweise kann so die thermische (Thermosäule) oder die sichtbare Strahlung (Fotodiode) erfasst und gegenseitig korreliert werden. Auf diese Weise können störende thermische und optische Lasten im Bild erkannt und registriert werden, woraus sich wiederum eine Bildkorrektur ableiten lässt.

Zur Vermeidung von Wärmeeinträgen infolge der Verlustleistung der eingesetzten Operationsverstärker werden diese nur bei der Übernahme des Messsignals in den Analog-Digital-Wandler des Mikrokontrollers spaltenweise zugeschaltet [4]. Dazu findet ein Schieberegister [8] seinen Einsatz, das die Steuerung der Signalübergabe an den Mikrokontroller übernimmt. Die verstärkte Thermospannung der einzelnen Bildpunkte wird mittels des so betriebenen Multiplexers über die 8 Zeilen des Infrarotsensorarrays ausgegeben. Diese sind an die 8 Analogeingänge des Mikrokontrollers³⁾ angeschlossen, der sich in der Peripherie des Personenerfassungssystems befindet. Die Anzahl seiner Analogeingänge bestimmt somit die Anzahl der Zeilen des Infrarotsensorarrays. Wesentlich für die im **Bild 3** dargestellte Ablaufsteuerung ist, dass sie nur über einen Takt betrieben wird. Alle zur Sicherung einer sicheren Signalübertragung erforderlichen Taktzeiten werden in dieser Steuerung realisiert, so dass diese Schaltung die Funktion eines einfachen fest programmierten Kontrollers übernimmt. So muss nach dem Einschalten einer Spalte das Einschwingverhalten der Schaltungsanordnung abgewartet werden, bis ein stabiles

³⁾ Der eingesetzte Mikrokontroller MSP 430F 148 besitzt 8 Analogeingänge.

Signal auf den Ausleseleitungen anliegt und die Amplitude des Signals gemessen werden kann (**Bild 3**).

Am Beispiel einer vierspaltigen Ausführung des Schieberegisters sind im **Bild 3** die Schaltung und ihr Funktionsablauf zur Spaltensteuerung dargestellt. Das Schieberegister, mit dem die Spalten auf die Auslesekanäle geschaltet werden, wird mittels der beiden Flip-Flops E1 und E2 zu einem Ringzähler [8], so dass über den Takt die Abtastfrequenz des Infrarotbildes bestimmt wird. Daraus erwächst eine größere Flexibilität bei der Programmierung des Mikrokontrollers. So kann der Takt über den Mikrokontroller erzeugt oder extern mittels Frequenzteilung aus dem Mikrokontrollertakt gewonnen werden.

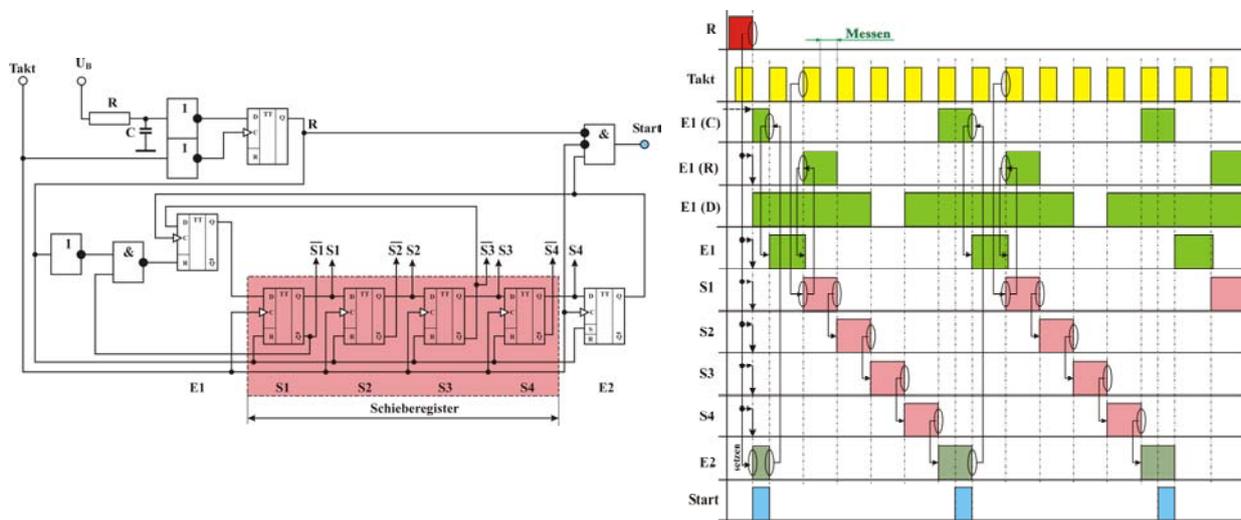


Bild 3: Impulsablaufdiagramm und Steuerung des Infrarotsensorarrays am Beispiel zur Steuerung von vier Spalten, das beliebig erweitert werden kann.

Das Infrarotsensorarray selbst ist mit einer Selbststartvorrichtung („R“) ausgestattet, die durch eine Zeitverzögerung nach Anlegen der Versorgungsspannung ausgelöst wird und das Infrarotsensorarray in einen definierten Anfangszustand versetzt. Somit braucht bei der Inbetriebnahme des Personenerfassungssystems oder nach einem Netzausfall nicht mittels Software nach dem „Start“-Takt gesucht werden. Der Sensor geht selbst in den Anfangszustand über. Die Ausleseroutine beginnt so in der 1. Spalte und im angeschlossenen Mikrokontroller kann die Bildauslesung wieder definiert beginnen.

Im Zusammenhang mit der Programmierung des Personenerfassungssystems muss die maximal zulässige Bildfolgefrequenz bekannt sein, die sich aus der Impulsfolge zum Auslesen eines Bildes ermitteln lässt. Der Mikrokontroller selbst besitzt nur einen Analog-Digital-Wandler, so dass eine serielle Analog-Digital-Wandlung der anliegenden Signale aus den 8 Analogkanälen erfolgt. Damit muss für die Erfassung der Messwerte innerhalb einer Spalte mindestens 8 mal die Umsetzzeit ΔT_{AD} als Messdauer angesetzt

werden. Aus dieser Summe und der Ausleseroutine kann dann die maximal mögliche Bildfolgefrequenz mit der dazu erforderlichen Taktfrequenz berechnet werden.

Untersuchungen bei einer Bildfolgefrequenz von 10 Hz zeigen aber, dass die im **Bild 3** dargestellte Messzeit („Messen“) praktisch kürzer ausfällt. Die Ursache dafür ist das Zeitverhalten der eingesetzten Analogschalter sowie das Abschaltverhalten der Operationsverstärker bei Unterbrechung der Speisespannung. Die Messwerverfassung innerhalb einer Spalte muss nach diesen Untersuchungsergebnissen bereits 378 μs vor Beginn des Abschaltvorgangs der Spalte beendet sein, da sich hier bereits der Analogwert der verstärkten Thermospannung ändert. Geht man nun von einer mittleren Umsetzzeit ΔT_{AD} des AD-Wandlers von $\Delta T_{AD} = 4 \mu\text{s}$ (3,51 μs nach [9]) aus, ergibt sich eine Einschaltzeit der Messwerverfassung („Messen“) von rund 410 μs . Es ist ersichtlich, dass die Zeit der Messgrößenwandlungen für die 8 Analogkanäle (rund 32 μs) nur einen geringen Anteil der Messphase beanspruchen. Das Ausschaltverhalten dominiert das Zeitverhalten, als auch ihre Unsicherheit, die in der Größenordnung der Messwerverfassung von $\pm 16 \mu\text{s}$ liegt. Aus dem Impulsdiagramm (**Bild 3**) lässt sich somit für das Infrarotsensorarray eine maximale Bildfolgefrequenz von 72 Hz und die zugehörige Taktfrequenz von 1,224 kHz ableiten.

Thermisch basierte Sensoren sind in der Regel träger als CCD-Zeilen, so dass für das zu entwickelnde Infrarotsensorarray eine Abtastgeschwindigkeit von 2 Bildern/Sekunde gewählt wurde, die bei den experimentellen Arbeiten mit dem Infrarotsensorarray zunächst auch so beibehalten wurde. Aus thermodynamischen Überlegungen heraus stellt die Frequenz von 72 Hz eine mit der Membrangeometrie nicht erreichbare Grenzfrequenz dar. In Experimenten zeigte sich, dass eine über 10 Hz hinausgehende Bildfolgefrequenz nicht sinnvoll ist. Hinzu kommt noch, dass mit wachsender Bildfolgefrequenz für die Programmabarbeitung weniger Zeit verbleibt. Das führt dann zwangsläufig zu Einschränkungen bei den der Personenerfassung dienenden Algorithmen.

Thermopile als Bildpunkt

Metall-Halbleiter-Kontakte zeichnen sich durch eine besonders hohe Temperaturempfindlichkeit aus, weil neben der unterschiedlichen Austrittsenergie von Metall und Halbleitermaterial (Metall-Halbleiter-Kontakt) auch die Temperaturabhängigkeit des Fermiveaus im Halbleiter einen Beitrag zur Potentialdifferenz liefert. Aus diesem Grund nutzt man solche Übergänge aus Aluminium und n-dotiertem Silicium für die Realisierung von Thermosäulen [6].

Eine weitere Erhöhung kann durch einen zusätzlichen Metall-Halbleiter-Kontakt aus Aluminium und p-dotiertem Silicium erreicht werden, wie er schematisch im **Bild 4** gezeigt wird. Der Aufbau und die Herstellung derartiger Thermosäulen (Thermopile) werden in [5] als auch in [6] beschrieben.

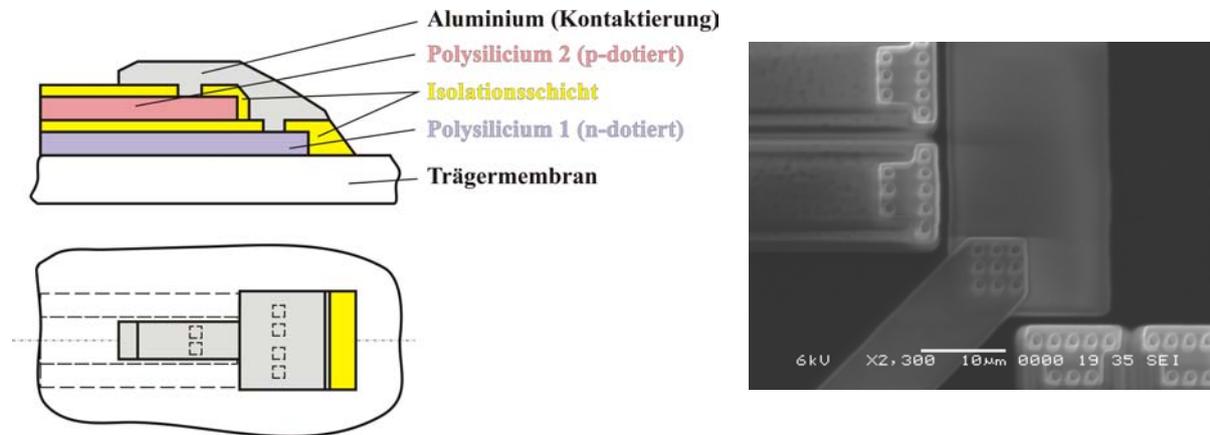


Bild 4: Schichtaufbau und Kontaktstelle eines Thermoübergangs, der Bestandteil der Thermosäule (Thermopile) ist – „heiße“ Kontaktstelle.

Während für die Herstellung der integrierten Schaltungen der standardmäßig vorhandene CMOS-Prozess zum Einsatz kam, musste für die Herstellung der mit einzelnen Thermoelementen belegten Membran eine angepasste Fertigungstechnologie entwickelt werden, die in den CMOS-Standardprozess eingebunden ist. Somit wird die Ausführung der Membran zum maßgeblichen Faktor für die Funktionssicherheit der Infrarotsensorarrays. Die Entwicklung einer stressarmen bzw. stresskontrollierten Membran als Grundlage für die Herstellung des Infrarotsensorarrays stellte so im Hinblick auf die mechanische Stabilität des Bauelements einen entscheidenden technologischen Schwerpunkt dar.

Durch die Verwendung von stöchiometrisch abgeschiedenem LPCVD-Nitrid als Membranmaterial und der sich daraus ergebenden Einschränkung bezüglich der Schichtdicke war zunächst zu überprüfen, ob der gesamte Schichtaufbau im Membranbereich zu einer unter Zugspannung stehenden Membran führt, die Grundvoraussetzung für ein robustes Verhalten gegenüber Stoß- und Vibrationsbeanspruchungen ist. Es kam also nicht darauf an, ein spannungsarmes Membrannitrid zu erzeugen, sondern den Druckspannungsstress der im CMOS-Prozess zum Einsatz kommenden Schichten zu kompensieren. In den nachfolgenden Ausführungen wird der Begriff der Membran als Bezeichnung für die Summe aus allen Schichten einschließlich des Membrannitrids verwendet.

Vorrangiges Ziel des Einbaus des Membrannitrids in den Gesamtprozess war die Bei-

behaltung der Spezifikationsgrenzen der elektrischen Parameter des Basisprozesses, um dessen Funktionalität uneingeschränkt übernehmen zu können. Das konnte schließlich durch die Anpassung der Implantationsdosis erfüllt werden. Dieses Ziel wurde erreicht.

Als Basisprozess wurde ein Standard-1.0- μm -Prozess ausgewählt, welcher unter anderem die Abscheidung und Strukturierung zweier Poly-Silicium-Schichten zur Herstellung der einzelnen Thermoelemente sowie eine 2-Ebenen-Metallisierung beinhaltet. Technologisch findet hier unterschiedlich dotiertes Polysilicium seinen Einsatz, das voneinander isoliert, übereinander gestapelt ausgeführt wird und dessen Ausführung sowohl schematisch als auch in der REM-Aufnahme im **Bild 4** gezeigt wird.

Auf diesen Basisprozess aufbauend wurden auch die integrierten Schaltungen in diesem Standardprozess (1 μm -Prozess) ausgeführt, wobei die von X-FAB bereit gestellten Technologie-Tools benutzt wurden.

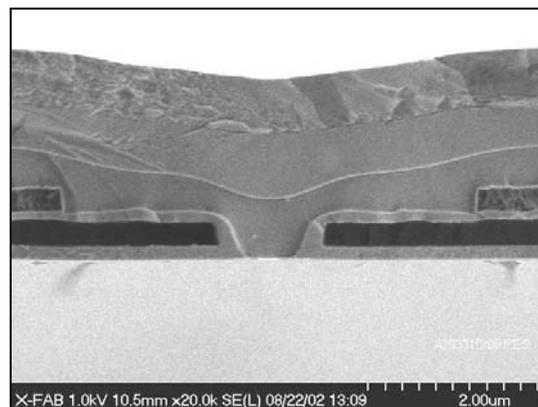


Bild 5: Querschnitt durch 2 benachbarte Thermoelemente (Poly-Si-2 auf Poly-Si-1 mit Zwischenisolator).

Das **Bild 5** zeigt dazu einen Querschnitt durch zwei auf der Membran befindliche benachbarte Einzelemente. Die Reihenschaltung solcher im Zentrum der Membran und an ihrem Rand gelegener Einzelemente bildet schließlich den infrarotempfindlichen Bildpunkt. Die REM-Aufnahme in **Bild 4** veranschaulicht die Gestaltung einer solchen Kontaktstelle.

Die auf der Membran angeordnete Thermosäule (Thermopile) mit 48 Einzelementen (24 Thermoelementepaare) bildet somit innerhalb des Infrarotsensorarrays das sensorische Element eines Bildpunktes. Eine Erhöhung ihrer Anzahl bewirkt zunächst eine Erhöhung der Messempfindlichkeit. Weil sich unter Beibehaltung der Strukturbreite sowie der steigenden Anzahl von Einzelementen auch die Anordnung im Zentrum der Membran vergrößert und die Einzelemente in Richtung des Membranrandes verschoben werden, verringert sich dadurch der Temperaturgradient zwischen heißer und kalter

Kontaktstelle. Die Temperaturdifferenz wird wieder kleiner, was gleichermaßen wieder zu einem anteiligen Verlust an Messempfindlichkeit führt. Auf diese Weise stellen die 48 Elemente ein lokales Optimum dar.

Untersuchungen an den Thermopile eines ersten Sensorentwurfs zeigten bei einer quadratisch ausgelegten Membran von $(1.080 \times 1.080) \mu\text{m}^2$ eine Messempfindlichkeit von $39,4 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$. In Verbindung mit der am Bildpunkt angeordneten Verstärkung der Thermospannung von 160 ergibt sich so eine Messempfindlichkeit von $6,3 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$, ein Wert, der die in [3] veröffentlichte Empfindlichkeit eines Bildpunktes des dort beschriebenen Infrarotsensorarrays von $7,0 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ fast erreicht.

In den Untersuchungen zu einer technologisch wünschenswerten Verkleinerung des Infrarotsensorarrays durch verringerte Membranabmessungen auf eine Kantenlänge von $680 \mu\text{m}$ zeigte sich aber, dass eine solche Flächenreduktion mit einem deutlichen Verlust an Messempfindlichkeit einhergeht. Infolge dieser Verkleinerung vergrößert sich die Wärmeleitfähigkeit zwischen dem Zentrum der Membran und ihrem Rand. Unter vergleichbaren Bestrahlungsverhältnissen mittels Schwarzkörperstrahlers reduziert sich die Messempfindlichkeit auf $6,2 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$, wodurch eine Bildpunktempfindlichkeit von $0,99 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ erreicht wird, wenn wieder die Verstärkung von 160 verwendet wird. Weitergehende Untersuchungen, die Empfindlichkeit durch passive Infrarotabsorber zu erhöhen, waren nur wenig erfolgreich. Vielmehr konnte durch den Einsatz eines Trockenätzverfahrens (Boschprozess) eine deutliche Erhöhung der Messempfindlichkeit der einzelnen Bildpunkte erreicht werden. Auf der Grundlage dieser Trockenätztechnologie gelang es, die primäre Messempfindlichkeit auf $52,2 \frac{\mu\text{V}}{\text{K}}$ ($\approx 5 \frac{\text{V}}{\text{W}}$) zu vergrößern, so dass dadurch eine Bildpunktempfindlichkeit von $8,35 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ erzielt werden konnte. In [6] werden für derartige Thermopile Empfindlichkeiten von bis zu $46 \frac{\text{V}}{\text{W}}$ beschrieben, so dass durch eine Optimierung der einzelnen Thermoelemente der Thermokette eine weitere Erhöhung der Empfindlichkeit erwartet werden kann.

Einsatz des Infrarotsensorarrays zur Personenerfassung

Die Voraussetzung für eine Personenerfassung ist, dass die Informationen aus den einzelnen Bildpunkten des Infrarotsensorarrays mittels eines angeschlossenen Mikrokontrollers auswertbar sind [6]. Dazu müssen Bildfolgen bezüglich beweglicher Infrarotquellen bewertet werden. Eine Bildfolge wird allgemein in einer Bildmenge von 2^m ($m = 2, \dots, 4$) als Datenfeld im Speicher des Mikrokontrollers abgelegt, wobei jeder Bildpunkt eine Auflösung von 8 bit (256) besitzt, die Grauwerten oder Falschfarben zugewiesen werden können, wenn eine bildhafte Darstellung einer personenbezogenen Raumbelagung gewünscht wird, die bei der vorhandenen Auflösung des Infrarotsensorarrays mit 128 Bildpunkten nur sehr grob ausfällt.

Der ausgewählte Mikrokontroller MSP 430F 148 von Texas Instruments besitzt einen Programmspeicher von 48 kByte⁴⁾, 256 kByte für das feste Datenfeld (z.B. Konstanten zur Bildkorrektur) und 2 kByte zur Speicherung der flüchtigen Bildfolgen (RAM) oder anderer flüchtiger Konstanten [9]. Bei einer Grauwerttiefe von 1 Byte⁵⁾ können so bis zu 2^4 (16) Bilder als Datenfeld im flüchtigen Datenspeicher abgelegt werden.

Sollen Personen erkannt werden, so müssen die stationären Infrarotquellen des zu beobachtenden Raumsektors zunächst ermittelt werden, die in einem Bild zu 128 Bildpunkten im Datenfeld abgelegt werden, wozu vorzugsweise der flüchtige Datenspeicher verwendet wird, so dass nur noch maximal 15 Folgebilder gespeichert werden können. Dieses stationäre Infrarotbild muss dann aus der erfassten Bildfolge subtrahiert werden, so dass nur noch die personenspezifische Infrarotstrahlung in der Bildfolge erhalten bleibt. Auf Grund der Offsetspannung entsteht in jedem Bildpunkt ein fehlerhaftes Abbild der bildgebenden Infrarotstrahlung. Die Steuerung des Infrarotsensorarrays erlaubt es nun, die Offsetspannung der einzelnen Bildpunkte wahlweise oder nach Bedarf zu erfassen und sie auf einen Befehl hin im flüchtigen Datenfeld des Mikrokontrollers abzulegen, wo sie bis zur nächsten Aktualisierung festgeschrieben bleiben. Im nun folgenden Ablauf werden nur noch die Infrarotsignale erfasst und mit den bildbezogenen Offsetspannungen als Differenzwert verrechnet und im Datenfeld gespeichert. Diese Betriebsart geht allerdings zu Lasten der maximal speicherbaren Bildfolgengemeinschaft, da nun 2 Bilder im flüchtigen Speicher verbleiben müssen, das Bild der Offsetspannung als auch das der statischen Infrarotquellen, die aus dem Bild zu korrigieren sind. Somit stehen nur noch maximal 14 Infrarotbilder zur Registrierung einer Bildfolge zur Verfügung. Diese spei-

⁴⁾ 1 kByte sind 1024 Byte = 2^{10} Byte oder 262.144 bit (1 Byte = 8 bit).

⁵⁾ 1 Byte = 8 bit

cherbare Bildfolgengemeinschaft reduziert sich um ein weiteres Bild auf nunmehr 13, wenn das durch die Fotodiode erfasste Bild zusätzlich gespeichert wird. Untersuchungen in der Simulation zeigten aber, dass diese Anzahl ausreichend ist, um personenbezogene Bewegungen grob zu erkennen. Bei der hier betrachteten Bildfolgefrequenz von 2 Hz kann eine Szene von 7,5 s beobachtet werden, was für viele praktische Anwendungen ausreichend ist. Muss ein längerer Zeitraum erfasst werden, so kann die Bildfolgefrequenz durch die Verringerung des Taktes reduziert werden. In umgekehrter Weise sind so auch höhere Bildfolgefrequenzen realisierbar, soweit sie aus thermodynamischer Sicht sinnvoll sind. In diesem Zusammenhang besteht auch die Möglichkeit, dass die Bildfolgefrequenz dynamisch der Situation im Raum angepasst werden kann.

Der Einsatz des Infrarotsensorarrays in einem Personenerfassungssystem erfordert die Korrektur von statischen Infrarotquellen im erfassten Bild. Doch dieses Verfahren kann in Einzelfällen auch zu Fehlinterpretationen führen. Aus diesem Grund wurde jedes Thermopile mit einer Fotodiode erweitert, so dass ein Bildpunkt aus zwei Strahlungsempfängern unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit besteht. Das Thermopile des Bildpunktes empfängt praktisch das gesamte Strahlungsspektrum während die Fotodiode nur die Strahlung im sichtbaren Spektralbereich bis hin in das nahe Infrarotspektrum erfasst. Auf diese Weise werden Strahlungsquellen von beiden Strahlungsempfängern unterschiedlich wiedergegeben. Wertet man nun die Kreuzkorrelation zwischen diesen beiden Messsignalen aus, kann anhand des Ergebnisses zwischen Infrarotquellen und Leuchtmitteln, wie Lampen, Außenlicht durch Fenster und Türen sowie anderen Lichtquellen unterschieden werden. Deren störende Auswirkungen können dann bei der Personenerfassung ebenfalls korrigiert werden.

Eine weitere Problematik besteht darin, dass bei einer gleichmäßigen Bestrahlung des Infrarotsensorarrays ein in Graustufen getöntes, strukturiertes Bild entsteht. Die Ursache dafür liegt in Empfindlichkeitsdifferenzen zwischen den einzelnen Bildpunkten begründet. Diese Erscheinung wird noch dadurch verstärkt, dass bei Änderung der Strahlungsleistung über der gleichmäßig ausgeleuchteten Fläche des Sensorsarrays eine sich im Grauwert ändernde Struktur zu beobachten ist. Es sind Strukturänderungen im Bild erkennbar, obwohl das nicht zutreffend ist. Das Bild ist gestört oder auch verrauscht [3], was zunächst die Notwendigkeit einer ausgereiften Bildverarbeitung nach sich zieht. Der Programmumfang muss jedoch gering gehalten werden, um eine vertretbare Bildverarbeitung mittels Mikrokontrollers realisieren zu können. Für alle Programme zur Signal-

verarbeitung, einschließlich der Schnittstellen-Software, steht ohne externe Erweiterung nur ein Programmspeicher von 48 kByte zur Verfügung.

Auf Grund dieser Art von Bildstörungen wurden die einzelnen Bildpunkte mit einer weiteren Funktion ausgestattet, die im Zusammenhang mit einem im Zentrum des Bildpunktes angeordneten aktiven Heizer und einer separaten Temperaturmessung am Rand des Bildpunktes zu sehen ist. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Empfindlichkeit jedes Bildpunktes zu sehen ist. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Empfindlichkeit jedes Bildpunktes zu ermitteln und auf diese Weise das Bildrauschen deutlich zu reduzieren. An dieser Stelle soll noch auf den Einfluss der Sensormontage verwiesen werden, bei der das Infrarotsensorarray auf einer Platine fixiert wird. Bei dem mittels Flip-Chip-Technik montierten Sensorarray entstehen im Randbereich des Durchbruchs auf den dort befindlichen Membranen zusätzliche Temperaturgradienten, die zum Substrat hin gerichtet sind und zu veränderten Bildpunkttemperaturen führen. Diese Werte, die das Ergebnis aus der Summe aller Störeinflüsse sind, müssen nach einem Selbstkalibrierzyklus bildpunktspezifisch in einem Datenfeld abgelegt werden, um sie für die Berechnung des Grauwertes jedes einzelnen Bildpunktes heranziehen zu können. Der Umfang des Mikrokontrollerprogramms muss dann zu Lasten der Filteralgorithmen reduziert werden, weil eine Erweiterung des Programmumfangs die Möglichkeiten preiswerter Mikrokontroller ggf. sprengen könnte. Bei gleich bleibendem Programmumfang führten die dann notwendigen externen Speichermöglichkeiten im Gesamtsystem zu Kostensteigerungen, die so die Verwertungsmöglichkeiten einschränken würden. Eine weitere Konsequenz, die sich aus dem Selbstkalibrierzyklus ableitet, besteht darin, dass auf diese Art ein weiteres Bild im flüchtigen Speicher abgelegt werden muss, das die temperaturabhängige Messempfindlichkeit der 128 Bildpunkte beschreibt.

Zusammenfassung und Ausblick

Charakteristisch für das hier entwickelte Personenerkennungssystem ist, dass die Person als Infrarotquelle empfangen wird und keine Bewegung dieser vorhanden sein muss, wie es bei pyroelektrischen Verfahren der Fall ist. Das erweitert das Anwendungspotential derartig arbeitender Personenerkennungssysteme gegenüber herkömmlichen deutlich. Solche Systeme sind im Bereich der Gebäudeautomatisierung für die raum- und personenbezogene Klimaregelung von besonderem Interesse, können aber auch für die Zugangskontrolle zu Räumlichkeiten eingesetzt werden, wenn eine räumliche Trennung der Einzelpersonen gesichert ist. Infolge der relativ groben bildgebenden Sensorstruktur werden nahe beieinander stehende Personen nur als große Infrarotquel-

le erkannt. Es kann vom derzeitigen Stand der Entwicklung keine Aussage darüber getroffen werden, ob auf Grundlage einer voran gegangenen Einzelpersonenerfassung auf die Anzahl der Personen in einer Gruppe geschlossen werden kann. Der damit im Zusammenhang stehende Nachteil einer geringen optischen Auflösung (128 Bildpunkte) ermöglicht aber eine einfache und schnelle Bildverarbeitung mittels Mikrokontrollers. Aufgrund der einfachen Struktur des hier entwickelten Infrarotsensorarrays ist die Anwendung mehrerer solcher Systeme denkbar, so dass aus unterschiedlichen Perspektiven Einzelpersonen in einer Personengruppe dadurch wieder erkennbar sind, woraus auf die Anzahl geschlossen werden kann. Das wäre besonders für die Raumebelegung bedeutsam, nach der die Klimatechnik effizient gesteuert werden kann.

In welcher Weise ein derartig konzipiertes Personenerfassungssystem zur Lageerkennung von Personen benutzt werden kann, ist beim augenblicklichen experimentellen Stand mit dem Infrarotsensorarray nicht umfassend zu beurteilen. Eine derartige Anwendung des Personenerfassungssystems wäre aber in Gefährdungsbereichen, in Krankenzimmern, in Pflege- und Altenheimen und in Wohneinheiten des betreuten Wohnens älterer und pflegebedürftiger Menschen von größtem Interesse. So könnte eine plötzliche Lageänderung, die einen kleinen Infrarotfleck im Infrarotbild des Sensorarrays zu einer lang gezogenen Infrarotfläche wechseln lässt, den Sturz einer beobachteten Person signalisieren und eine lokale Alarmierung in Gang setzen. In dieser Anwendung des Personenerfassungssystems ist die Montageart an der Decke zu bevorzugen. Infolge der geringen optischen Auflösung des Infrarotsensorarrays werden Persönlichkeitsrechte der zu beobachtenden Person im vollen Umfang gewahrt, was hochauflösende bildgebende Bildsensoren nicht ohne weiteres vermögen. Aus diesem Grund sind aus der Nutzung des Personenerkennungssystems keine personenspezifischen Daten zu gewinnen, die dem Datenschutz zuwider laufen könnten oder gar Persönlichkeitsrechte verletzen. Ein personenbezogener Zugang zu Räumlichkeiten, Sicherheitsbereichen oder Gebäuden muss dann mit einer Zugangskontrolle (Chipkarte, Augenhintergrund, Fingerabdruck o.ä.) kombiniert werden.

Eine weitere Anwendung des Personenerfassungssystems ist im Bereich der Beleuchtungstechnik von Räumen und Flurbereichen angesiedelt. Bislang werden hier pyroelektrische Sensoren zur Betätigung von Beleuchtungseinrichtungen preisgünstig eingesetzt. Weil das Personenerfassungssystem auch stationäre Bilder erfasst, kann mit ihm eine automatisierte optimale Arbeitsplatzbeleuchtung in Form neuartiger Beleuchtungsmittel entworfen und sichergestellt werden.

In Flurbereichen entstehen beispielsweise im Wartebereich von Personenaufzügen Ruhe-zonen, wodurch mit herkömmlichen Bewegungsmeldern mitunter die Beleuchtung ausgeschaltet wird. Durch eine Kommunikation zwischen Rufanforderung des Aufzuges und Bewegungsmelder kann diese Situation zwar beseitigt werden, es setzt aber die Kommunikationsfähigkeit der Einzelkomponenten voraus. Das hier entwickelte Konzept eines Personenerfassungssystems arbeitet autark und belässt die Beleuchtung so lange eingeschaltet, wie sich Personen in seinem Erfassungsbereich aufhalten.

Energiespareffekte können auch dadurch erzielt werden, wenn in Flurbereichen eine personenbegleitende Beleuchtung vor einer energiesparenden Hintergrundbeleuchtung erfolgt. Es wird also nur der Bereich des Flures hinreichend ausgeleuchtet, der von einer oder mehreren Personen begangen wird. Das Abschalten der Beleuchtung erfolgt nicht wie jetzt zeitgesteuert, sondern dann bedarfsgesteuert. Der Einsatz des Personenerfassungssystems erfolgt dabei in einem Doppelsystem von der Flurdecke aus und es ist dabei in der Flurachse ausgerichtet. Bei einem solchen Doppelsystem handelt es sich um zwei Infrarotsensorarrays, die in einem gemeinsamen Gehäuse in einer optischen Achse aber gegeneinander ausgerichtet sind. In ähnlicher Weise können auch abgewinkelte Ausrichtungen realisiert werden. Sowohl die Bilderfassung als auch die Auswertung erfolgen wieder mit einem Mikrokontroller⁶⁾, in dem nun maximal 8 Bilder⁷⁾ der einen und die restlichen 8 Bilder der anderen Richtung zugeordnet sind und verarbeitet werden. Da sich die instationären Infrarotquellen in Form einer oder mehrerer Personen den einzelnen Bildpunkten auf den Infrarotsensorarrays geometrisch zuordnen lassen, kann der Standort der zu begleitenden Person über geometrische Winkelbeziehungen errechnet werden. Dementsprechend kann dann die Ausleuchtung des Flurbereiches ausgeführt werden.

In Erweiterung dieses Beleuchtungskonzepts ist auch die Ausführung solcher Personenerfassungssysteme für Flurabzweige mit einer gerätetechnischen Lösung unter Einsatz von 3 und für Flurkreuzungen durch den Einsatz von 4 Infrarotsensorarrays möglich. Bei derartigen Ausführungen ist allerdings die Erweiterung des Mikrokontrollerkonzepts erforderlich, das dann mit einer externen Speichererweiterung ausgeführt werden kann, weil 5 bzw. 4 Folgebilder für eine Personenerkennung nicht ausreichend sind.

⁶⁾ Bisher eingesetzter Mikrokontroller MSP430F148.

⁷⁾ Wenn keine statischen Infrarotquellen im Bild vorhanden sind, die korrigiert werden müssen. Mit den dargestellten Kapazitätsbetrachtungen des eingesetzten Mikrokontrollers können bei einer Grauwerttiefe von 1 Byte und den 128 Bildpunkten des Infrarotsensorarrays maximal 16 Bilder im RAM des Mikrokontrollers gespeichert werden.

Über diese bedarfgeführte Beleuchtung von Flurbereichen können mit diesem Personenerfassungssystem auch sicherheitsrelevante Informationen erfasst werden. So kann die Anwesenheit von Personen in bestimmten Gebäudeabschnitten registriert und wenn notwendig, die Personen mit nur wenigen Personenerfassungssystemen verfolgt werden. Es ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass die Personenverfolgung autark durch das System selbst vorgenommen wird und keine visuelle Verfolgung über eine bildgebende Darstellung (z.B. Monitor) in einem Kontrollraum notwendig ist. In besonders sicherheitssensiblen Bereichen können hier Kombinationen mit bildgebenden Systemen zur Personenerkennung zum Einsatz kommen, wobei durch das Personenerfassungssystem ein Kontrollsignal bei Erreichung eines Gefährdungsbereiches ausgelöst werden kann und sich dann eine visuelle Kontrolle im Videobild anschließt.

Die hier beschriebene bedarfgeführte Beleuchtungssteuerung ist allerdings nur unter der Prämisse neuartiger Beleuchtungsmittel effektiv anwendbar, wie sie derzeit anwendungsorientiert auf der Grundlage energiesparender LED's vorangetrieben werden. Erfolgt beispielsweise die personenbegleitende Beleuchtung durch Zuschaltung von Energiesparlampen, kann das den Spareffekt ggf. aufheben, weil Energiesparlampen und Leuchtstoffröhren im Einschaltmoment das Mehrfache an elektrischer Leistung benötigen, als für ihren Betrieb erforderlich ist. Die Umsetzung einer derartigen bedarfsbezogenen Beleuchtung ist nur im Zusammenwirken mit dem Personenerfassungssystem und einem neuen Beleuchtungskonzept zu sehen.

Ein solches bedarfsbezogenes Beleuchtungskonzept ist auch zur öffentlichen und nicht öffentlichen Gehwegbeleuchtung aus Anwendersicht durchaus denkbar, aber mit den derzeit etablierten, verfügbaren Beleuchtungsmitteln als Energiesparmaßnahme noch nicht effizient umsetzbar. Während für die Innenbeleuchtung energiesparende Beleuchtungskonzepte unter Verwendung von LED's in greifbare Nähe rücken, sind solche für Außenbereiche praxisrelevant noch nicht erkennbar.

Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet für derartige Personenerfassungssysteme sind die Branderkennung und deren Meldung. Sowohl offene Brände als auch Schwelbrände sind im Wesentlichen dadurch gekennzeichnet, dass sie als stationäre Infrarotquelle mit häufig ändernder Strahlungsleistung im Infrarotbild zu erkennen sind. Sie überstrahlen alle herkömmlichen zu beobachtenden Infrarotquellen, die der Personenerkennung dienen. Dieses Verhalten im Infrarotbild kann zur Erkennung von Brandherden ausgenutzt werden. Das Personenerfassungssystem erweitert dadurch seine Funktionalität und seinen unmittelbaren Anwendungsbereich. Auf diese Weise über-

nimmt das System zusätzliche Aufgaben, ohne dass eine gerätetechnische Erweiterung erforderlich ist. Die Bildbewertung muss nur dahingehend ergänzt werden, was vorrangig im Bereich der Software angesiedelt ist.

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des BMBF (16SV1280) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

References:

- [1] Tränkle, Hans-Rolf; Schneider, Friedrich: Das intelligente Haus – Wohnen und Arbeiten mit zukunftsweisender Technik. München, Bad Kissingen, Berlin, Düsseldorf, Heidelberg: Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG, 2001.
- [2] Mottin, E.; Bain, A.; Martin, J.L.; Ouvrier-Buffet, J.L.; Bisotto, S.; Yon, J.J.; Tissot, J.L.: Uncooled amorphous silicon technology enhancement for 25µm pixel pitch achievement. SPIE Vol. 4721, pp. 56-63, "Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII, Orlando, FL, USA 2002.
- [3] Trouilleau, C.; Crastes, A.; Tissot, J.L.; Chatard, J.P.; Yon, J.J.; Astier, A.: Low cost amorphous silicon based 160 x 120 uncooled microbolometer 2D array for high volume applications. Orlando, FL, USA, 2003.
- [4] Wennmacher, Christian; Burte, Edmund; Mikuta, Reinhard: Auslesung elektronischer Signale aus hoch auflösenden thermischen Sensoren eines Pixelarrays. World Intellectual property Organization (PCT). PCT/DE 2004/001063, München 2004.
- [5] A. Schaufelbuehl, N. Schneeberger, U. Muench, O. Paul, H. Baltes, C. Menolfi, Q. Huang: Uncooled Low-Cost Thermal Imager Using Micromachined CMOS Integrated Sensor Array. *Technical Digest Transducers*, Vol. 1, p. 606-609 (1999).
- [6] Schneeberger, Niklaus Werner: CMOS Microsystems for Thermal Presence Detection. ETH Zürich, Diss. ETH Nr. 12675: 1998.
- [7] Seifert, Manfred: Analoge Schaltungen. Verlag Technik. Berlin, 1987.
- [8] Seifert, Manfred; Beikirch, Helmut: Digitale Schaltungen und Schaltkreise. R. Oldenbourg-Verlag. München, Wien, 2001.
- [9] Texas Instruments: MSP430x13x, MSP430x14x – Mixed Signal Microcontroller. Dallas, Texas, USA: 2004. (Datenblatt)

Authors:

Dr.-Ing. Reinhard Mikuta

Dipl.-Ing. Gerd Kuhlemann

Prof. Dr.-Ing. Edmund P. Burte

^{*)} Dipl.-Phys. Jens Urban: X-FAB Semiconductor Foundries AG Erfurt

Otto-von-Guericke-University, Institute of Micro and Sensor Systems, POB 4120

D-39106, Magdeburg

Phon: (0391) 67 18398

Fax: (0391) 67 12103

E-mail: reinhard.mikuta@e-technik.uni-magdeburg.de