

# Optische Sensoren für Fahrzeuge

Dr.-Ing. **Anko Börner**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Berlin;

## Kurzfassung

Abbildenden optischen Sensoren wird in der Fahrzeugtechnik eine immer bedeutendere Rolle zukommen. Durch die Forderungen nach Erhöhung der Sicherheit im Auto- und Schienenverkehr, nach Verbesserung des Fahrkomforts und die Bestrebungen zur Erhöhung der Autonomie werden Sensorsysteme benötigt, die zuverlässig und in Echtzeit nutzerrelevante Informationen bereitstellen. Bei der Auslegung solcher Sensoren spielt der Systemgedanke eine entscheidende Rolle. Der Beitrag gibt einen Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand auf dem Gebiet der momentan verfügbaren Sensortechnologien und über zukünftige Entwicklungen.

## Abstract

Imaging optical sensors will play a major role in future automotive technology. Regarding the demands on increasing safety in road traffic and rail traffic, the improvements of comfort and the developments for autonomous vehicles, reliable sensor systems are required which provide user relevant information in real time. The design of such systems has to be based on a consequent systemic approach. The paper gives an overview about existing imaging sensor technologies and prospective developments.

## 1 Einleitung

Mit der Steigerung der Mobilität im Individual- und im öffentlichen Verkehr entstehen implizit technische Anforderungen an alle Verkehrsträger. Neben der Erhöhung der Sicherheit und des Fahrkomforts wird die Autonomie der Fahrzeuge eine immer größere Bedeutung gewinnen. Fahrerassistenzsysteme werden unterstützende Informationen liefern und schrittweise Aufgaben des Fahrers übernehmen. Konzepte hierfür sind in Prototypen vielfach demonstriert worden und partiell in Serienprodukten wiederzufinden. Als Beispiele seien Systeme genannt, die bei Einpark- oder Abbiegemanövern assistieren oder Kolonnenfahrten von Lastkraftwagen ermöglichen. Der Überwachung des Fahrzeugumfelds sowie des Fahrers wird dabei eine entscheidende Rolle zukommen, ob im Auto- oder Schienenverkehr. Dazu müssen verschiedene hoch komplexe Elemente der mobilen und stationären Infrastruktur auf einander abgestimmt werden (Car-to-Car, Car-to-Infrastructure, Infrastructure-to-Infrastructure).

Bei all diesen Ansätzen werden Sensoren benötigt, die die lokalen Gegebenheiten in Echtzeit erfassen und analysieren. Abbildenden optischen Sensoren kommt dabei eine herausragende Rolle zu, nicht zuletzt deshalb, weil der Mensch den Großteil seiner Informationen über die Augen wahrnimmt.

Der Beitrag gibt eine Übersicht über abbildende optische Sensoren, geht auf deren Wirkprinzipien, Hauptparameter, Vor- und Nachteile ein und soll helfen, das Potenzial solcher Systeme für Applikationen in der Fahrzeugtechnik richtig einzuschätzen. Der Systemgedanke spielt bei der Konzipierung und Auswahl solcher Sensoren eine entscheidende Rolle, deshalb wird auf Fragen der Simulation und der Kalibration abbildender optischer Sensoren eingegangen.

Seit geraumer Zeit wird versucht, Fahrzeugführern mit Hilfe abbildender optischer Sensoren Zusatzinformationen zur Verfügung zu stellen, die über das reine Visualisieren (z.B. Überwachung des Türraums in Bahnen, Kameras als Einparkhilfe) hinausgehen.

Dazu wurde in den letzten 20 Jahren eine Vielzahl von nationalen und internationalen Projekten initiiert, beispielhaft sei das groß angelegte Eureka-Projekt „Prometheus“ genannt, das im Zeitraum von 1987 bis 1995 durchgeführt wurde, über einen Gesamtetat von 780 M€ verfügte und „Sicheres Fahren“ als eines der Hauptthemen definierte.

Diverse Firmen bieten schon heute abbildende optische Systeme als kommerzielle Produkte an, um über optische, akustische oder haptische Signale bestimmte Gefahrensituationen zu signalisieren (z. B. Spurerkennung). Die nächsten Jahre werden von sehr innovativen Entwicklungen auf diesem Gebiet geprägt sein.

## 2 Abbildende optische Sensoren

Optische Sensoren sind Systeme, die elektromagnetische Wellen im Bereich vom Ultraviolett bis ins Infrarot erfassen und in elektrische Signale wandeln. Damit wird der Spektralbereich (Bild 1), den das Auge erfassen kann, erheblich erweitert.

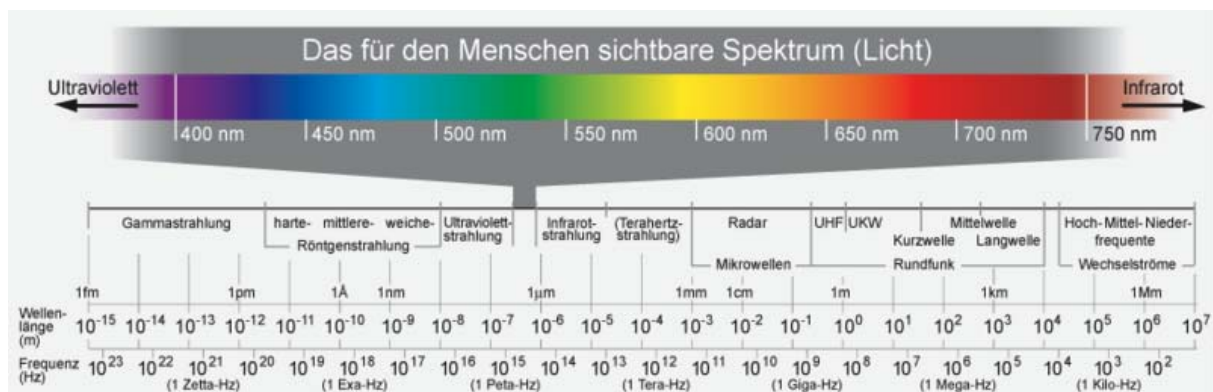


Bild 1: Elektromagnetisches Spektrum

Detektiert wird das Licht, das von einem Objekt reflektiert oder emittiert wird. Der Nutzen des Einsatzes optischer Sensorsysteme hängt von diversen Umgebungsparametern ab. Niederschläge und schlechte Beleuchtungsbedingungen können die Effizienz solcher Systeme begrenzen.

Grundsätzlich wird zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden. Beide Gruppen werden in Kürze vorgestellt, einige beispielhafte Sensorsysteme werden näher erläutert.

## **2.1 Aktive Sensoren**

Aktive Sensoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie aus einem Licht emittierenden Transmitter und einem Receiver bestehen, der das vom Beobachtungsobjekt reflektierte Licht empfängt und in ein elektrisches Signal wandelt. Damit sind aktive Systeme unabhängig von äußeren Beleuchtungsquellen.

### **2.1.1 Lidar**

Lidarsysteme (light detection and ranging) basieren auf einer Laserquelle, die einen Lichtpuls aussendet, und einem Empfänger (z. B. Photodiode), der den von Objekten reflektierten Teil des Lichts in ein elektrisches Signal wandelt. Durch Auswertung der Laufzeit oder durch Messung der Phasenverschiebung eines intensitätsmodulierten Signals kann die Entfernung des Lasermesssystems zum reflektierenden Objekt bestimmt werden. Als Quellen finden typischerweise Halbleiterlaser Anwendung, die im Bereich von 500 bis 1500nm arbeiten. Objekte in einer Entfernung bis zu etlichen hundert Metern können erfasst werden. Ein ein- oder zweidimensionales Bild kann durch einen Laserfächer (Lichtwellenleiterbündel) oder durch rotierende/ wippende Spiegel erzeugt werden. Die so generierte dreidimensionale Punktwolke stellt Informationen über andere Verkehrsteilnehmer, Hindernisse und über die Infrastruktur zur Verfügung (Bild 2). Momentane Forschungsschwerpunkte konzentrieren sich auf die Erhöhung der Punktdichte und Algorithmen zur sicheren Interpretation der Daten (z.B. Erkennung von Mehrfachreflexionen).

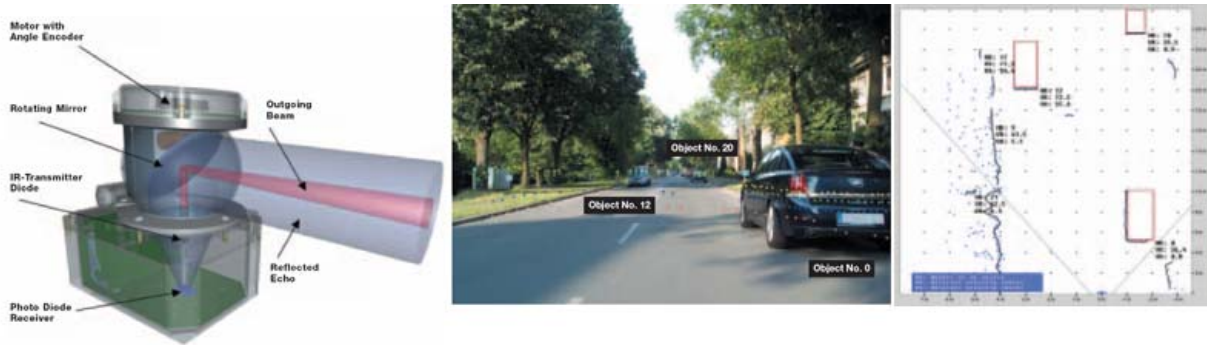


Bild 2: Laserscanner, Videobild der Szene und 3D-Punktwolke, Fa. Hella [1]

### 2.1.2 PMD-Kameras

Eine konsequente Fortsetzung der Laserscanner-Entwicklung stellen die so genannten Photonic Mixer Device (PMD) dar. Eine an der Kamera befestigte Quelle sendet intensitätsmoduliertes Licht aus, das nach einer Reflexion auf den Empfänger gelangt. Die Eingangsoptik und die matrixförmige Struktur des Detektors (momentan max. 120 x 160 Pixel) sorgen für eine orts aufgelöste Abbildung. Das Grundprinzip der PMD-Sensoren besteht darin, dass sich auf jedem Detektorelement zwei zusätzliche Elektroden befinden (Bild 3), die je nach Ansteuerung eine Potentialmulde im Halbleitersubstrat formen und die generierten Ladungsträger in unterschiedliche Auslesekanäle transportiert. Da die Ansteuerung der Elektroden mit dem Modulationssignal der Lichtquelle synchronisiert wird, kann aus der Ladungsträgerverteilung in den beiden Auslesekanälen auf die Entfernung des Objekts geschlossen werden.

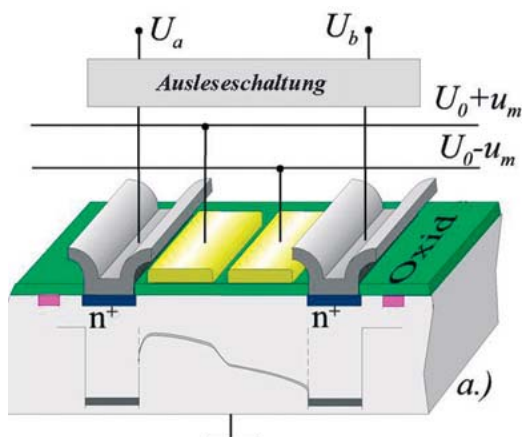


Bild 3: Schematische Darstellung eines PMD-Pixels [2]

Das Ergebnis ist eine 3D-Punktwolke vom beobachtet Objektraum (Bild 4). Auch bei PMD's wird die Interpretation der Messergebnisse durch Mehrfachreflexionen erschwert. Die momentan verwendeten Lichtquellen limitieren die Reichweite des Systems auf einige zehn

Meter. Eine signifikante Erhöhung der räumlichen Auflösung ist in den nächsten Jahren zu erwarten.



Bild 4: PMD-Kamera, aufgenommenes Reflexionsbild und 3D-Punktwolke, Fa. PMD Technologies [2]

## 2.2 Passive Sensoren

Im Gegensatz zu den aktiven Sensoren bestehen passive Sensoren nur aus einer Empfangseinheit, die die einfallende elektromagnetische Strahlung in elektrische Ladungsträger konvertiert.

### 2.2.1 CCD-Sensoren

Charge Coupled Devices (CCD) sind die am weitesten verbreiteten Sensoren zur Bilderzeugung. Jedes Detektorelement gleicht einer Photodiode, auffallende Photonen erzeugen Elektronen-Loch-Paare. Die Elektronen werden gesammelt, durch Anlegen wechselnder Spannungen in ein Ausleseregister verschoben (Bild 5) und von dort seriell einer Analog-Digital-Wandlung unterzogen. Bedingt durch die geringe Anzahl der Schieberegister für alle Detektorelemente sind CCD's auf der einen Seite gekennzeichnet durch eine hohe Uniformität und damit durch ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis, auf der anderen Seite ergeben sich damit aber auch Begrenzungen bei der Auslesezeit und der Bildfrequenz. Zwischen Lichtintensität und Ausgangssignal herrscht eine lineare Abhängigkeit. CCD-Sensoren auf Silizium-Basis sind im Bereich von etwa 400 bis 1100nm sensitiv. Ein Überlaufen der Potentialtöpfe bei zu großen Strahlungsangeboten (Blooming) kann durch entsprechende Anti-Blooming-Gates verhindert werden. Die Verarbeitungselektronik befindet sich außerhalb des Detektorgebiets, was sich in den Abmessungen des Chips bemerkbar macht.

CCD's werden in Matrix- und Zeilenform hergestellt. Die größten momentan verfügbaren CCD-Matrizen bestehen aus etwa 80 Mio Pixeln, kommerziell üblich sind Kameras mit bis zu etwa 16 Mio Detektorelementen. Der zur Herstellung verwendete Halbleiterprozess wird sicher beherrscht, er findet im Consumer-Bereich vielfach Anwendung und ist damit preiswert.

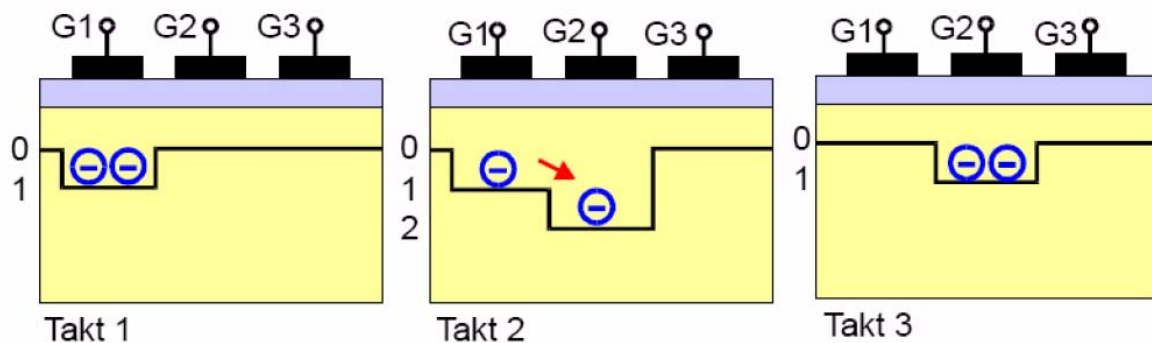


Bild 5: Ladungsträgertransport in einer CCD

### 2.2.2 CMOS-Sensoren

CMOS-(Complementary Metal Oxide Semiconductor)–Kameras haben in den letzten Jahren in vielen Gebieten Einzug gehalten.

CMOS-Sensoren werden in Standard-Silizium-Prozessen hergestellt, damit ist prinzipiell die Integration von Datenverarbeitungsstufen auf dem Chip möglich. Ein weiterer großer Vorteil ist der wahlweise Pixelzugriff.

Bei den meisten CMOS-Kameras existiert eine logarithmische Abhängigkeit zwischen Lichtintensität und Ausgangssignal. Dadurch ergibt sich ein hoher Dynamikbereich, d.h. dass Details sowohl in sehr dunklen als auch in sehr hellen Bereichen erfasst werden können (Bild 6). Kameras mit 10-20 Mio Pixeln sind Standard. CMOS-Kameras können sehr schnell ausgelesen werden, eignen sich deshalb für hohe Bildfrequenzen. Die Bildqualität von CMOS-Kameras ist in der Regel schlechter als die von CCD-Kameras, was vorrangig durch die wechselnde Lastkapazität des Multiplexers verursacht wird. CMOS-Kameras zeichnen sich durch einen geringen Energieverbrauch aus.



Bild 6: Vergleich von Sensorsystemen mit unterschiedlichem Dynamikbereich, Fa. Hella [1]

### **2.2.3 Farbkameras**

Die Bereitstellung von Farbinformationen stellt in der Regel einen Mehrwert für die Informationsextraktion dar, da sich bestimmte Objekteigenschaften durch spektrale Signaturen ableiten lassen. Die Erzeugung von Farbbildern kann auf verschiedenen technischen Prinzipien beruhen, die zwei wichtigsten werden vorgestellt. Voraussetzung für die Akzeptanz aller Ansätze ist die Deckungsgleichheit der Bilder in den unterschiedlichen Farbkanälen. Die nahe liegenden Mehr-Kamera- bzw. Strahlteileransätze erfordern einen sehr hohen Justage-Aufwand und sind für Massen Anwendungen kaum relevant.

#### **2.2.3.1 Bayer-Mosaik**

Zur Erzeugung von RGB-Farbbildern werden CMOS- bzw. CCD-Chips mit einem so genannten Bayer-Mosaik verwendet. Dabei werden Rot-, Grün- und Blau-Filter abwechselnd auf die Detektorelemente aufgebracht (Bild 7). Der Anteil der Grün-Pixel ist höher, da das menschliche Auge im Bereich um 550nm sein Empfindlichkeitsmaximum besitzt. Die Informationen von jeweils vier benachbarten Pixeln werden zu einem RGB-Tripel zusammengefasst. Dabei verringert sich die effektive geometrische Auflösung des Sensors.

#### **2.2.3.2 Foveon-Technologie**

Die Foveon-Technologie wurde Mitte der 80er Jahre entwickelt. Drei übereinander liegende Detektorschichten gewährleisten eine perfekte geometrische Anordnung der Farbkanäle. Die Energie der Photonen, die ein Äquivalent für die Farbe darstellt, entscheidet über die



Eindringtiefe in das Halbleitersubstrat und damit über den Farbkanal, in dem die die Ladungsträger erzeugt und gesammelt werden (Bild 7). Foveon-Chips werden auf CMOS-Basis hergestellt. Der größte momentan am Markt verfügbare Chip besitzt etwa 2200 x 1500 Pixel. Die spektrale Trennung der drei Kanäle ist schwierig.

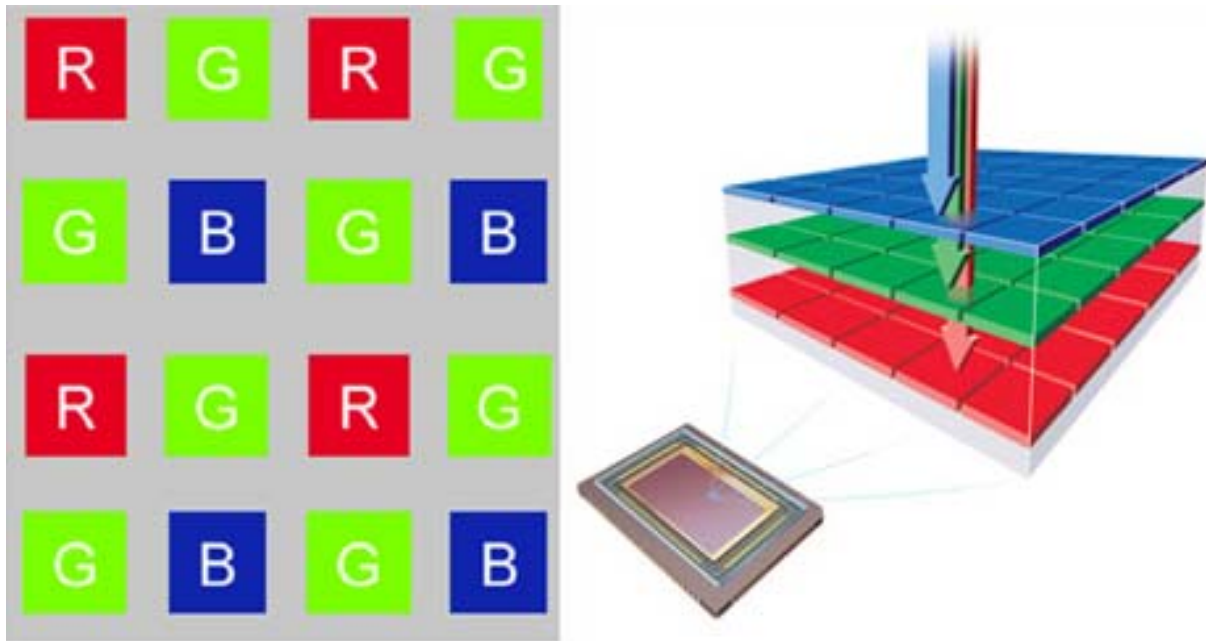


Bild 7: Bayer-Mosaik und Foveon-Ansatz

#### 2.2.4 Stereokameras

Durch die Verwendung von zwei Kameras mit gleicher Blickrichtung aber einem bestimmten Basisabstand lassen sich Stereokamerasysteme aufbauen. Die relative Verschiebung der Abbildung eines Objektpunktes in den beiden Bildern ist ein Maß für die Objektentfernung. Die Aufgabe besteht darin, in Echtzeit identische Bildpunkte mit einer hohen Zuverlässigkeit zu identifizieren. Für die Generierung von Stereobildpaaren können prinzipiell alle abbildenden Systeme (CMOS und CCD, Farb- und Schwarz/Weiß-Kameras) Anwendung finden (Bild 8).



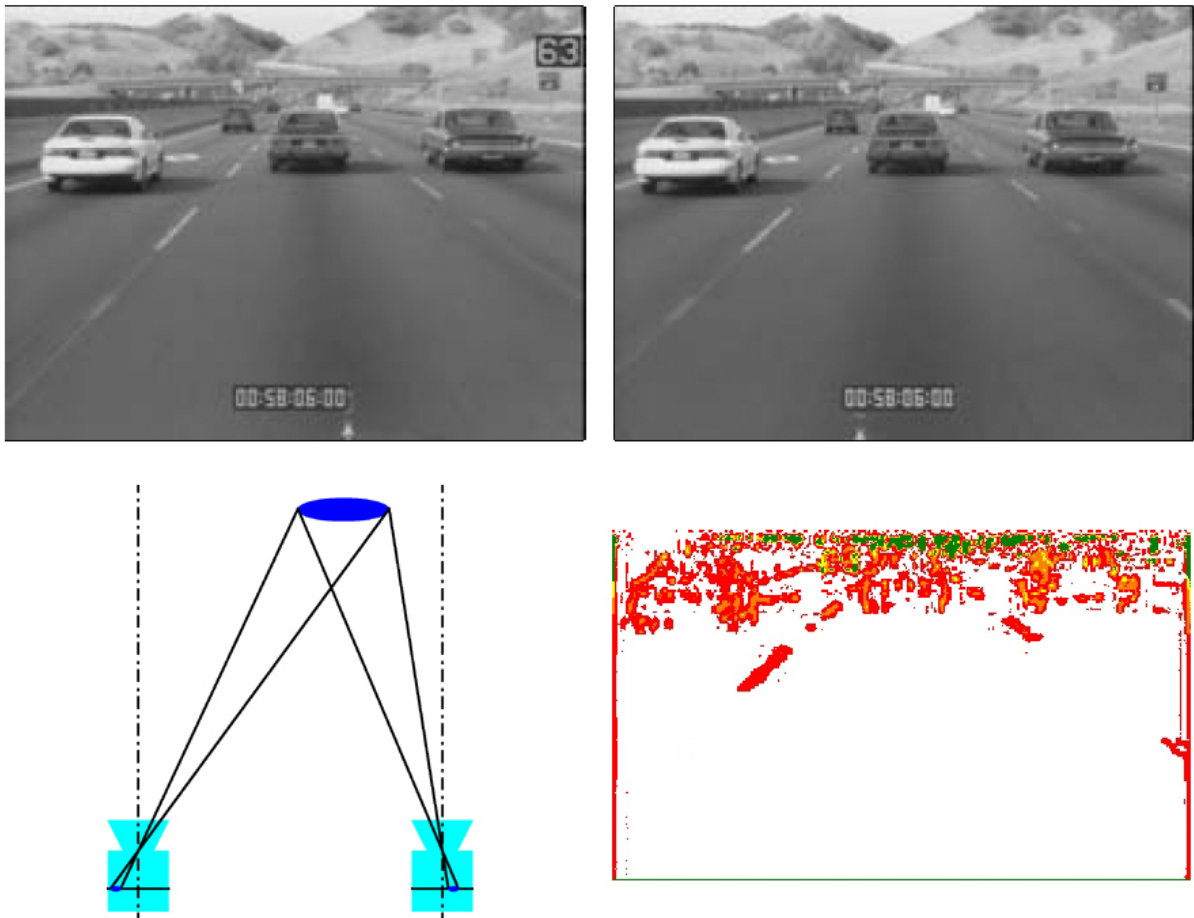


Bild 8: Stereobildpaar, Stereoprinzip, Entfernungskarte für die Beispielbilder [3]

### 2.2.5 Infrarot-Kameras

Körper mit einer Temperatur oberhalb von 0K emittieren Strahlung, die durch geeignete Sensoren erfasst werden kann. Die umgangssprachlich Infrarot- bzw. Wärmebildkameras genannten Systeme wandeln diese Strahlung in Signale um, die Schlüsse auf bestimmte Objekteigenschaften zulassen (z.B. Temperatur). Die technischen Entwicklungen auf dem Gebiet der IR-Detektoren haben in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht.

Dabei kommt den so genannten  $\mu$ -Bolometern eine besondere Bedeutung zu. Diese Systeme arbeiten wie Widerstandsmesser – das Ausgangssignal ist eine Funktion der Temperatur des erfassten Objektpunktes.  $\mu$ -Bolometer arbeiten meist ungekühlt und sind im Wellenlängenbereich zwischen 8 und 14 $\mu$ m sensitiv. Momentan sind Matrizen mit bis zu 320 x 240 Pixeln verfügbar.

Gekühlte Sensoren (meistens HgCdTe) sind Photonen-zähler. Sensoren aus diesen Materialien besitzen bis zu 1000 x 1000 Pixel und arbeiten im Bereich zwischen 0.8 und

12 $\mu$ m. Sie weisen in der Regel ein deutlich besseres Signal-Rausch-Verhältnis als  $\mu$ -Bolometer auf, sind aber wesentlich teurer als diese.

Infrarot-Systeme können für die Fahrzeugtechnik einen enormen Mehrwert liefern, da der Informationsgehalt ihrer Daten unabhängig von dem Bereich des elektromagnetischen Spektrums ist, den das menschlichen Auges oder eine CMOS-/CCD-Kamera abdecken. Infrarot-Systeme sind in der Lage, bei Nacht und in begrenztem Maße bei Regen und Nebel nutzerrelevante Bilddaten zu liefern (Bild 9).



Bild 9: Von links oben nach rechts unten: Bilder einer CCD-, HgCdTe- und einer  $\mu$ -Bolometer-Kamera von ein und derselben Szene und das Ergebnis einer Datenfusion, Quelle Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information [4]

### 3 Tools für die Sensorauswahl und -bewertung

Bei der Konzipierung und Auslegung von Sensorsystemen für den operationellen Einsatz in Fahrzeugen sind bestimmte Randbedingungen zu beachten. Die speziellen Anforderungen

in punkto Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Echtzeit etc. verlangen ein konsequentes systemorientiertes Herangehen. Dabei spielen Simulation und Kalibration eine besondere Rolle.

### **3.1 Simulation**

Bei der Auswahl und der Optimierung von optischen Sensorsystemen für dedizierte Anwendungen spielt die Software-Simulation eine entscheidende Rolle. Durch sie ist man in der Lage, die komplexen Wechselwirkungen zwischen Beobachtungsobjekt, Umgebung und Kamera unter Berücksichtigung der wesentlichen physikalischen Parameter nachzubilden. Ausgehend von einer Strahlungsquelle (z.B. Sonne) müssen die Wechselwirkungen mit der Atmosphäre (z.B. Streueigenschaften durch Nebel), dem Objekt (z.B. Reflexionseigenschaften von Fahrzeugen), dem bildgebenden Sensor (z.B. Rauscheigenschaften) und einer komplexen Auswertesoftware untersucht werden, um zuverlässige und belastbare Aussagen zu treffen. Damit unterscheidet sich diese Herangehensweise auch von klassischen Virtual-Reality-Ansätzen.

### **3.2 Kalibration**

Sollen optische Systeme als Messsysteme zum Einsatz kommen, müssen sie kalibriert werden. In der Fahrzeugtechnik betrifft das insbesondere die geometrische Kalibration. Bei dieser Kalibration wird jedem Detektorpixel eine Blickrichtung zugewiesen. Nur mit Hilfe dieser Kenntnis ist es beispielsweise möglich, die Daten unterschiedlicher Systeme zueinander in Beziehung zu setzen (CCD- und IR-Kamera) und zu messen (z.B. mit Stereokameras). Der Kalibrationsprozess gibt auch Auskunft über bestimmte Abbildungsfehler (z.B. Verzeichnung, Farbsäume) und die reale Auflösung des Kamerasystems (Modulationstransferfunktion).

## **4 Ausblick**

Es gibt eine Vielzahl von abbildenden optischen Systemen, die basierend auf unterschiedlichen Wirkprinzipien elektromagnetische Strahlung aus einem großen Wellenlängenbereich in ein elektrisches Signal wandeln. Die Entwicklungen haben einen Stand erreicht, der einen operationellen Einsatz abbildender Sensoren ermöglicht. Die große Herausforderung für Forschung und Industrie liegt für die nächsten Jahre in der intelligenten Datenverarbeitung. Dabei wird Sensornetzwerken unter Verwendung verschiedener Sensoren eine besondere Bedeutung zukommen. Komplexe Algorithmen, die in Hardware

implementiert werden, ermöglichen intelligente Kameras, die statt der Daten nur noch Informationen an eine zentrale Einheit weitergeben.

## **Literatur**

- [1] <http://www.hella.com>
- [2] <http://www.pmdtec.com>
- [3] Using Binocular Stereopsis for Vision-based Vehicle Control, Dieter Koller, Quang-Tuan Luong, and Jitendra Malik, In Proc. of the Intelligent Vehicles Symposium 1994, pp. 237-242, October 24-26, 1994, Paris, France
- [4] <http://www-leti.cea.fr>