

FAHRERASSISTENZSYSTEM

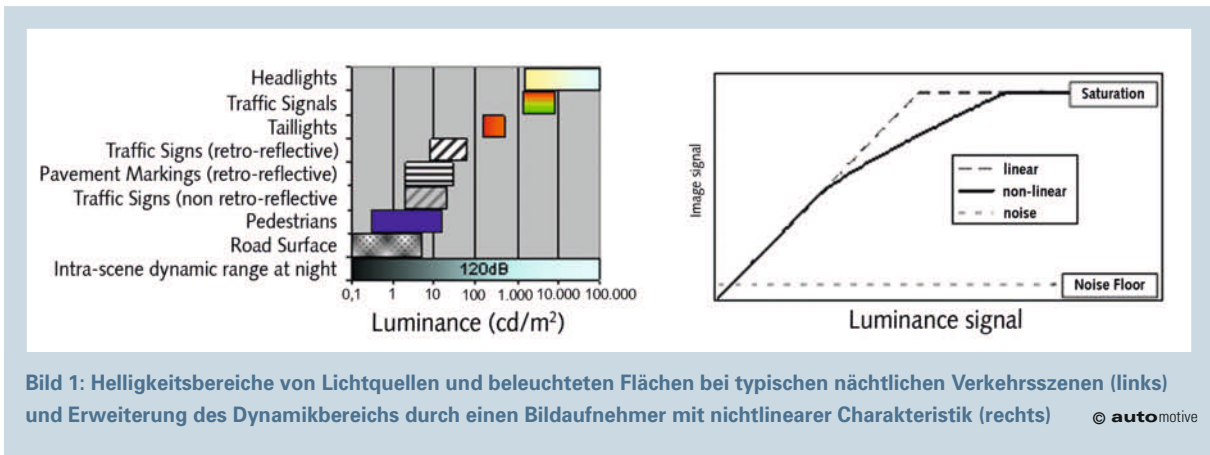
Nachtsichtsysteme mit Farbe!

Das hier vorgestellte Nachtsichtsystem von Melexis kombiniert in ein und demselben Bildaufnehmer die WDR-Technologie (Wide Dynamic Range) mit einem bis ins nahe Infrarot (NIR) ausgedehnten Empfindlichkeitsbereich sowie mit Farbwiedergabe. Das System stellt ein farbfähiges, für sichtbares Licht und den Nahinfrarot-Bereich (NIR) geeignetes Nachtsichtsystem mit einem modifizierten Farbfilter-Array dar. Das Resultat ist eine gegenüber konventionellen Farbkameras um 70% gesteigerte Empfindlichkeit.

Bildgebende Fahrerassistenzsysteme zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Fahrbahn und Hindernissen bei Nacht können das Unfallrisiko entscheidend senken. Schlechte Sichtverhältnisse bei Dunkelheit erhöhen das Unfallrisiko erheblich, wenn z. B. Fahrbahnverhältnisse falsch eingeschätzt oder Hindernisse nicht erkannt werden. Aktive Fahrerassistenzsysteme mit Videounterstützung können die Sichtbarkeit der Straßenverhältnisse verbessern. Die Bilder werden dabei entweder auf einem Display in der Instrumententafel dargestellt oder per Software analysiert, um Warnhinweise zu generieren oder in die Bedienung des Fahrzeugs einzugreifen. Als Frontend für diese Systeme kommen Videokameras

zum Einsatz, die in der Lage sein müssen, Details wie Ort, Form, Größe, Helligkeit und Farbe von Objekten unter allen Bedingungen zuverlässig zu erfassen.

Die visuelle Erfassung des Verkehrsgeschehens bei Dunkelheit stellt nicht nur für den Menschen, sondern auch für Kameras eine große Herausforderung dar. Oft ist der Sichtbereich auf die Leuchtweite der Scheinwerfer begrenzt. Der Dynamikbereich einer Szene, also das Helligkeitsverhältnis zwischen den Lichtquellen und den von ihnen angeleuchteten Objekten, übersteigt bei weitem die Fähigkeiten linearer CMOS-Bildaufnehmer. Das Scheinwerferlicht entgegenkommender Fahrzeuge beeinträchtigt entscheidend die Fähigkeit des Auges oder der Kamera, dunklere



Details auf der Fahrbahn oder Hindernisse zu erkennen. Werden diese Einzelheiten wegen des unzureichenden Dynamikbereichs der Kamera nicht erfasst, können sie auch mithilfe nachträglicher Bildaufbereitung nicht mehr regeneriert werden. Da das Design von Videokameras für Automotive-Anwendungen vom Preis-Leistungs-Verhältnis abhängt, muss klar festgelegt werden, welche Grenzwerte in Bezug auf die Empfindlichkeit, den Signal-Rausch-Abstand und den Dynamikbereich keinesfalls unterschritten werden dürfen.

Dynamikbereich nächtlicher Szenen
 Welcher Dynamikbereich benötigt wird, wurde mithilfe eines quantitativen Modells der Bilderfassungsumgebung ermittelt. Dabei wird die Helligkeit von verschiedenen Bildelementen wie etwa Lichtquellen (Scheinwerfer, Rückleuchten, Ampeln) und angestrahlten Objekten (Verkehrszeichen, Fahrbahnmarkierungen, Fußgänger, Fahrbahnoberfläche) photometrisch vermessen. **Bild 1 links** zeigt, dass das Helligkeitsverhältnis zwischen Autoscheinwer-

fern und Fußgängern zwischen 100 und mehr als 500.000 liegen kann. Aus den Messungen wurden Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Helligkeit verkehrsrelevanter Bildelemente erstellt. Es zeigt sich, dass das Helligkeitsverhältnis bei Dunkelheit mit 106 deutlich größer ist als bei Tageslicht (104 bis 105). Damit eine Kamera sowohl sehr helle Bilddetails als auch dunkle Objekte gleichzeitig zuverlässig erfassen kann, benötigt sie einen Dynamikbereich von 106:1 (120 dB).

Zuverlässige Detailerkennung
 Der Dynamikbereich eines Bildaufnehmers gibt an, über welchen Helligkeitsbereich hinweg Details sowohl in hellen als auch in dunklen Zonen des Bildfelds unterschieden werden können. Voraussetzung hierfür ist ein Schwellenwert des inkrementellen Signal-Rausch-Abstands (incremental Signal-to-Noise Ratio – iSNR):

$$iSNR = \frac{g(L) \cdot L}{\sigma_D(L)} > threshold$$

Leistungsstark? ...dann sind Sie hier richtig!

Der Marktplatz für Entwickler und Innovatoren. Hier entsteht Zukunft!



Bild 2: Szene mit zusammenhängenden Farben bei Tag und unzusammenhängenden Farben bei Dunkelheit.

© automotive

Nachtsicht mit Farbe

Bei abnehmender Helligkeit setzt das mesopische Dämmerungssehen ein. Die für das Nachtsehen zuständigen Netzhautrezeptoren (Stäbchen) werden zunehmend aktiviert, während die farbempfindlichen Zapfen hellere Objekte wahrnehmen. Im Verkehrsgeschehen bei Nacht beschränkt sich die Farbwahrnehmung z. B. auf farbige Lichter, die relativ klein und voneinander isoliert sind und daher als unzusammenhängende

Darin ist L das eingangsseitige Intensitätssignal, $D(L)$ ist das ausgangsseitige Bildsignal, $g(L) = dD(L)/dL$ ist die inkrementelle Verstärkung und $\sigma_D(L)$ ist das Bildrauschen. Mit Verringerung des Eingangssignals geht auch der $iSNR$ immer mehr zurück, bis schließlich Details in dunklen Zonen wegen des Eigenrauschens des Bildsensors nicht mehr erkannt werden. Wird die Helligkeit umgekehrt immer weiter erhöht, verhindert irgendwann die Sättigung des Bildsensors eine weitere Zunahme des Ausgangssignals, sodass die inkrementelle Verstärkung null wird.

Der Dynamikbereich lässt sich vergrößern, indem man sowohl das Eigenrauschen absenkt als auch dafür sorgt, dass die Sättigung erst bei höherer Signalstärke einsetzt. Erreichen lässt sich dies durch eine nichtlineare Kennlinie des Bildsensors. Ab einem bestimmten ‚Knickpunkt‘ verläuft die Kennlinie flacher, sodass die Sättigung später einsetzt (**Bild 1 rechts**). Man erkaufte sich dies allerdings mit einem abrupten Rückgang des $iSNR$ ab dem Knickpunkt. Da der Schwellenwert des $iSNR$ für jede Intensität innerhalb des Dynamikbereichs einschließlich der Knickpunkte erreicht sein muss, ist für den mit nichtlinearen WDR-Bildsensoren erreichbaren Dynamikbereich eine Grenze gesetzt.

Farben (unrelated colours) bezeichnet werden. Während also Ampeln farblich wahrgenommen werden, erscheint der unbeleuchtete Hintergrund grau. Für die WDR-Kamera stellt die Konzentration der Farbinformationen in den Lichtern eine besondere Herausforderung dar, da Signalsättigung zu einer Verweisslichung der Farben führt. Ein Nachtsichtsystem mit Farbunterstützung benötigt somit einen noch größeren Dynamikbereich als eine Graustufenanwendung.

Für das Nachtsichtsystem ist es ausreichend, dunkle Details in Graustufen wiederzugeben, jedoch müssen verkehrsrelevante farbige Objekte (z. B. Ampeln) mit ausreichender Farbunterscheidung und Farbsättigung dargestellt werden, damit diese zweifelsfrei erkannt werden können (**Bild 2**).

Echtfarb-Nachtsichtsystem

Die in den NIR-Bereich bis 1.000 nm Wellenlänge reichende Empfindlichkeit der CMOS-Bildsensoren ermöglicht es, den großen für den Menschen nicht sichtbaren Teil des von Glühlampen abgestrahlten Spektrums zu nutzen. Mit speziellen NIR-Fernscheinwerfern lässt sich der Sichtbereich ohne Blendung des Gegenverkehrs erweitern. Konventionelle Farbkameras sind hier jedoch ungeeignet, da die Farb-

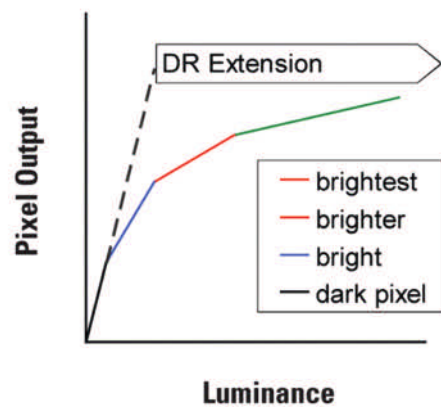
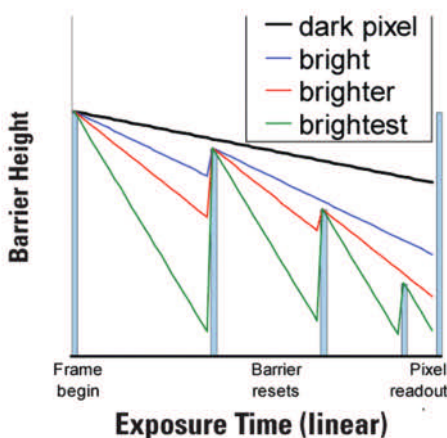


Bild 3: Spannungsverlauf über die Zeit (links) und Pixel-Spannung als Funktion der Helligkeit (rechts) im Betrieb mit mehreren partiellen Resets.

© automotive



Bild 4: Nächtliche Stadtverkehrsszene. Panchromatisches P'-Bild (links oben); RGB-Farbbild nach virtueller NIR-Filterung (rechts oben) und zusammengesetztes Bild nach Zusammenführung beider Komponenten (unten).

© automotive

filtermaterialien für NIR-Licht durchlässig sind, wodurch dieses in die RGB-Farbkanäle überspricht und diese völlig verweisslicht. Farbkameras benötigen aus diesem Grund ein IR-Sperrfilter, das bis zu 80% der von einer Glühlampe abgestrahlten Intensität entfernt. Soll das NIR trotzdem genutzt werden, muss es mit anderen Verfahren vom Farbsignal separiert werden, welches im Folgenden beschrieben wird.

NightBrite – Bildsensor-Technologie mit erweiterter NIR-Empfindlichkeit und Farbrunterstützung

Das Nachtsichtsystem von Melexis fasst vier Technologien in einem Bildsensor zusammen:

- Der Melexis Avocet CMOS imager basiert auf einem konventionellen 3T-Pixel, was ihn auch für kostengünstige Automotive-Applikationen attraktiv macht. Dank spezieller Optimierung wurde die Empfindlichkeitsgrenze bis auf ca. 1.100 nm erweitert. Multiple-Slope-CMOS-Pixeltechnologie sorgt für den nötigen Dynamikbereich.
- Die adaptiven *Autobrite*-Algorithmen sind für die WDR-Anpassung verantwortlich und gewährleisten eine hinreichende Detailwiedergabe über den gesamten Dynamikbereich.
- Der *AutoView*-Tonemapping-Algorithmus komprimiert die höhere Bittiefe der WDR-Bildinformationen so, dass sie ohne Detailverlust auf normalen Displays wiedergegeben werden können. Dunkle Bilddetails werden besser sichtbar, und der Kontrast zur Erzielung einer natürlicheren Wiedergabe optimiert.
- Die *NightBrite*-Technologie kombiniert die WDR-Fähigkeit mit in den NIR-Bereich erweiterten spektraler Empfindlichkeit und Farbfähigkeit.

Die Multiple-Slope CMOS-Pixeltechnologie kann wie folgt beschrieben werden: Die bei der Belichtung freigesetzten Photoelektronen entladen die im Pixel gespeicherte Ladung. Die Entladegrate nimmt proportional zur Lichtintensität zu. Während dunkle Pixel nach Ablauf der Integrationszeit nur teilweise entladen sind, kommt es bei sehr hellen Pixeln schon davor

zu einer völligen Entladung und damit zur Sättigung. Vermeiden lässt sich dies durch ein partielles Wiederaufladen aller Pixel vor Ablauf der Integrationszeit („Reset“). Dies lässt die dunklen Pixel unbeeinflusst, überschreibt jedoch den Ladungszustand jener helleren Pixel, deren Ladung bereits zu stark abgenommen hat. Die so zurückgesetzten Pixel können erneut mit der Bildaufzeichnung beginnen, jedoch mit der verbleibenden kürzeren Integrationszeit. Dieser Vorgang kann mehrmals mit immer niedrigeren Wiederaufladespannungen und kürzeren Restzeiten wiederholt werden. Das Ergebnis ist eine stückweise lineare Näherung einer logarithmischen Kennlinie. Der *AutoBrite*-Algorithmus passt die Belichtungszeit und die Dynamikbereich-Erweiterung an die Bildszene an und sorgt dafür, dass der inkrementelle Signal-Rauschabstand stets über dem Schwellwert bleibt. Mit *AutoBrite* können bis zu sechs Resets geschaltet werden, womit der Dynamikbereich auf mehr als 120 dB erweitert wird, womit die Anforderungen für Kfz-Nachtsichtsysteme erfüllt oder gar übertroffen werden.

Die *NightBrite*-Version des WDR-Bildsensors besitzt ein modifiziertes Farbfilterarray (CFA), in dem ein filterloses P'-Pixel das zweite G'-Pixel der Bayer-Matrix ersetzt. Das P'-Pixel hat eine Doppelfunktion. Erstens erfasst es Luminanzinformationen aus dem panchromatischen Empfindlichkeitsbereich, der den visuellen und NIR-Bereich umfasst, und ist deshalb mehr als dreimal empfindlicher als ein Farb-Pixel. Zweitens dient das P'-Pixel als Referenz zum Abschätzen des NIR-Anteils in den R'G'B'-Pixeln.



Bild 5: Nächtliche Stadtverkehrs-Szene mit NightBrite (links) und linearer Farbkamera (rechts).

© automotive

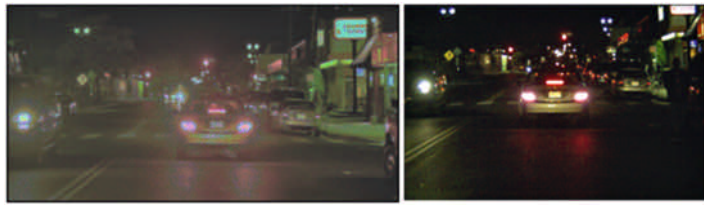


Bild 6: Städtische Nachtverkehrsszene, aufgenommen mit NightBrite (links) und linearer Farbkamera (rechts).

© automotive

ist, ist die Helligkeitskomponente der gefilterten Farben deutlich schwächer als die Luminanz der P'-Pixel. Die WDR-Kompression mit dem adaptiven Auto-brite-Algorithmus sowie die virtuelle NIR-Filktierung sorgen dafür, dass die Farben in den Lichtern erhalten bleiben. Das zusammengeführte finale Bild liefert eine natürlich Darstellung mit sämtlichen verkehrsrelevanten Farbinformationen.

Bild 7: Mit NightBrite können Fahrer nachts zum Beispiel Fußgänger auf dem Bildschirm erkennen, bevor diese deutlich im Scheinwerferlicht sichtbar sind.



Unerwünschte NIR-Anteile lassen sich damit aus dem Farbsignal herausrechnen. Dieses virtuelle NIR-Filter bewährt sich selbst bei hohem NIR-Anteil, zum Beispiel bei Glühlampenlicht mit 3.200 K Farbtemperatur, bei dem nur 20% des Signals auf den sichtbaren Bereich entfallen. Da herkömmliche Filtermaterialien verwendet werden, liegen die Produktionskosten auf dem Niveau konventioneller Farbbildsensoren.

Die Echtfarb-Bildfusion kombiniert danach das P'-Bildsignal mit dem gefilterten Farbsignal, wodurch das aus dem visuellen und NIR-Bereich gewonnene helle Graustufenbild durch die Farben heller Objekte ergänzt wird. Selbst wenn die NightBrite-Technik im Verbund mit einem NIR-Sperrfilter angewendet wird (zum Beispiel, wenn besonders hohe Farbtreue erforderlich ist), ist sie um 25% empfindlicher als konventionelle Farbkameras.

NightBrite-Beispiele

Bild 4 zeigt, dass die panchromatischen P'-Pixel auch bei einer Bildfrequenz von 30 fps ein hinreichend helles Graustufenbild liefern. Das vergleichsweise dunkle Farbbild oben rechts gibt dagegen hauptsächlich die nicht zusammenhängenden Farben der Ampeln und Rücklichter auf nahezu schwarzem Hintergrund wieder. Da die spektrale Energie im sichtbaren Bereich verglichen mit dem gesamten Empfindlichkeitsbereich des Bildsensors klein

Wie effektiv die NightBrite-Technik im Vergleich zu einer linearen CMOS-Farbkamera ist, ist in **Bild 5** klar zu sehen. Die höhere spektrale Empfindlichkeit sorgt dafür, dass das mit NightBrite-Technik aufgenommene Bild links einen helleren Hintergrund aufweist. WDR-Kompression und virtuelle NIR-Filterung ermöglichen die Wiedergabe der roten Bremslichter (**Bild 5, links**), während diese beim linearen Bildaufnehmer infolge der Sättigung so verweisslicht sind, dass sie von Scheinwerfern nicht zu unterscheiden sind (**Bild 5, rechts**).

Fazit

Thema dieses Artikels war ein farbfähiges, für sichtbares Licht und den Nahinfrarot-Bereich (NIR) geeignetes Nachtsichtsystem mit einem modifizierten Farbfilter-Array. Ein virtuelles NIR-Filter entfernt die NIR-Anteile aus den Farbsignalen. Die abschließende Bildfusion wiederum nutzt die zusätzliche NIR-Empfindlichkeit, um die Helligkeit des Luminanzkanals zu erhöhen. Die Praxistauglichkeit dieses Konzepts ließ sich mit ersten Prototypen belegen. (oe)

Bearbeitet nach Unterlagen der Fa. Melexis, Tessenderlo/Belgien.



Lambda-Referenzmessungen am Prüfstand und im Fahrzeug

ES63x – Lambda-Module

- Präzise Lambda-Meter in Ein- und Zweikanalausführung
- Unterstützen Breitband-Lambdasonden von Bosch inklusive LSU ADV sowie NTK ZFAS-U2
- Integrierte Messung und automatische Kompensation des Luftdrucks bei Höhenerprobungen
- Optionale Messung und Kompensation des Abgasgegendrucks
- Leuchtstarke Anzeige für den Standalone-Betrieb
- Datenerfassung synchron zu ES400- und ES600-Messmodulen von ETAS

- Messung, Steuergeräte-Applikation und Diagnose mit INCA
- Offene Schnittstellen und dokumentierte Treiber zur Integration in vorhandene Toolandschaften
- LA4-kompatibel

ES63x-Produktfamilie:

- ES630:** 1 Kanal Lambda-Modul
- ES631:** 2 Kanal Lambda-Modul
- ES635:** 1 Kanal Lambda-Modul mit Abgasgegendruckkompensation
- ES636:** 2 Kanal Lambda-Modul mit Abgasgegendruckkompensation

ETAS GmbH
Borsigstraße 14
D-70469 Stuttgart

Telefon +49 711 89661-0
Telefax +49 711 89661-106
sales.de@etas.com

www.etas.com

ETAS