



Whitepaper

High Dynamic Range Imaging:

Bilder und Sensoren

Grundlagen, Funktionsweise und Anwendung

© 2009 IDS Imaging Development Systems GmbH. Alle Rechte vorbehalten.



IDS Imaging Development Systems GmbH
Dimbacher Str. 6-8
74182 Obersulm
sales@ids-imaging.de
www.ids-imaging.de

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Begriffsdefinition Dynamikumfang	4
2.1.1	Dynamikumfang messen	4
2.2	Kennlinien und Bildaufnahme	4
2.2.1	Lineare Kennlinie	5
2.2.2	Gamma-Kennlinie	5
2.2.3	Logarithmische Kennlinie	6
2.3	Dynamikumfang bei digitalen Bildern	7
2.3.1	Bittiefe	7
2.3.2	Höhere Bittiefe in der Bildverarbeitung	7
2.3.3	Histogramm und digitale Kontrastanpassung	8
3	Erzeugung von HDR-Bildern	11
3.1	HDR-Bildaufnahme mit linearen Sensoren	11
3.1.1	Funktionsweise von linearen Sensoren	11
3.1.2	Linearer Sensor mit Belichtungsreihen (Multiple Exposure)	12
3.1.3	Linearer Sensor mit Kniepunkt-Kennlinie	13
3.1.4	Logarithmische HDR-Sensoren mit herkömmlicher Fotodiode	14
3.1.5	Logarithmischer HDR-Sensor mit Solarzelle	15
4	Funktionsweise des HDR-Sensors FX4	16
4.1.1	Aufbau der Pixel	16
4.1.2	Belichtung	16
4.1.3	Auslesemethode	16
4.1.4	Korrektur von feststehenden Rauschmustern (FPN)	17
5	Anwendung	18
5.1	Typische Anwendungsgebiete	18
5.2	Anwendungshinweise	18
5.2.1	Darstellung und Verarbeitung von HDR-Bildern	18
5.2.2	Auswahl von Objektiven	19
5.2.3	Blitzbetrieb und gepulste Beleuchtung	20
5.2.4	Bewegung	20
6	Anhang	21
6.1	Spezifikationen FX4 HDR-Sensor	21
6.2	Kontakt und weitere Informationen	21

1 Einleitung

Die technologische Entwicklung im Bereich der Bildsensoren zielte in der Vergangenheit in erster Linie auf höhere Auflösung durch mehr Pixel. Digitalkameras der aktuellen Generation bieten bereits Auflösungen im Bereich von mehr als 10 Megapixeln. Damit können – eine entsprechende Optik vorausgesetzt – Details abgebildet werden, die mit bloßem Auge nicht mehr zu unterscheiden sind.

In Bezug auf den Dynamikumfang jedoch ist das menschliche Sehvermögen herkömmlichen Bildaufnehmern weit überlegen: Umfasst ein Motiv sehr helle und sehr dunkle Bereiche, stößt eine Kamera schnell an ihre Grenzen. Während das Auge alle Helligkeitsstufen wahrnehmen kann, kommt es beim Bildsensor zu Überbelichtung – und damit zum Verlust von Bildinformation.

Die HDR-Technologie (High Dynamic Range) ermöglicht hingegen, ähnlich dem menschlichen Auge, auch in sehr hellen Motiven noch feine Helligkeitsunterschiede abzubilden. Das vorliegende Whitepaper erklärt die Hintergründe der HDR-Technologie sowie die Funktionsweise von HDR-Bildsensoren. Besonderes Augenmerk gilt dabei dem neuartigen HDR-Sensor *FX4*, der 2009 von IDS in der *uEye* Kameraserie vorgestellt wurde. Abschließend werden Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der neuen Technologie aufgezeigt.

2 Grundlagen

Die Abkürzung HDR (manchmal auch HDRI) steht für *High Dynamic Range (Imaging oder Imager)* und bezeichnet das Aufnehmen oder Erzeugen von digitalen Bildern mit hohem Dynamikumfang. Bildaufnahmen mit herkömmlichen Verfahren werden im Gegensatz mit LDR, *Low Dynamic Range*, bezeichnet.

2.1 Begriffsdefinition Dynamikumfang

Als Dynamikumfang (auch: Dynamikbereich oder Kontrast) wird bei Bildern das Verhältnis des größten Helligkeitswerts zum geringsten Helligkeitswert bezeichnet. D. h., ein Motiv besitzt einen hohen Dynamikumfang, wenn innerhalb einer Szene zur gleichen Zeit sehr helle und sehr dunkle Bereiche vorhanden sind (Beispiel: Aufnahme einer Person, die mit dem Rücken zur Sonne steht). Ein Motiv kann jedoch auch sehr große Helligkeit bei geringem Dynamikumfang besitzen, weil keine dunklen Bereich enthalten sind (Beispiel: Direkter Blick in die Sonne).

2.1.1 Dynamikumfang messen

Dynamikbereiche werden üblicherweise in der logarithmischen Einheit dB (Dezibel) angegeben. Der Wert in dB drückt dabei aus, um welchen Faktor der höchste Helligkeitswert größer ist als der geringste Helligkeitswert. Das Verhältnis von zwei Helligkeitswerten I_1 und I_2 lässt sich mit folgender Gleichung in einen Wert D mit der Einheit dB umrechnen:

$$D = 20 \cdot \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \text{ dB}$$

Ein typischer Bildsensor mit einem Dynamikbereich von 60 dB könnte also eine Motividynamik von 1000:1 abbilden, d. h. der höchste Helligkeitswert ist 1000 mal so hell wie der geringste Helligkeitswert. Das menschliche Auge kann einen Dynamikumfang von bis zu 100 dB innerhalb einer Szene wahrnehmen, was einem Helligkeitsverhältnis von 100.000:1 entspricht. Die folgende Tabelle zeigt für verschiedene Größen in dB den entsprechenden Dynamikumfang.

Wert in dB	Dynamikumfang
60	1.000:1
80	10.000:1
100	100.000:1
120	1.000.000:1

Tabelle 1: Werte für den Dynamikumfang in dB

2.2 Kennlinien und Bildaufnahme

Bei der Wahrnehmung bzw. Abbildung eines Motivs ist die Form der Abbildungskennlinie wichtig für die Darstellung der Helligkeitsunterschiede. In der Bildverarbeitung (z. B. Anwendungen wie Kantenantastung oder Zeichenerkennung) werden in der Regel lineare Kennlinien

vorausgesetzt. Das menschliche Auge hingegen nimmt Helligkeitsunterschiede mit einer logarithmischen Kennlinie wahr, die man in der Praxis oft mit einer Gamma-Kennlinie annähert. Alle drei Formen werden im Folgenden gezeigt.

2.2.1 Lineare Kennlinie

Wenn ein System (beispielsweise eine Kamera mit einem herkömmlichen CCD-Sensor) bei doppelter Helligkeit auch den doppelten Ausgangswert liefert, besitzt das System eine lineare Kennlinie (*Abb. 1*).

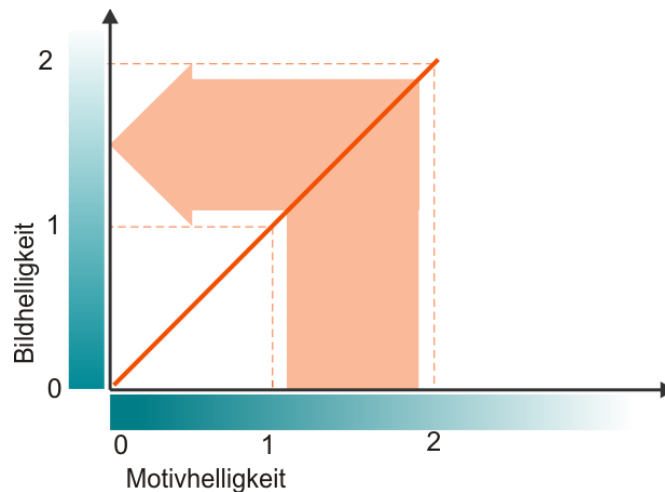


Abb. 1: Abbildung mit linearer Kennlinie

2.2.2 Gamma-Kennlinie

Gamma-Kennlinien (oder Gammakurven) sind nach dem griechischen Formelzeichen γ benannt. Gammakurven sind Potenzfunktionen von der Form

$$y = x^{\frac{1}{\gamma}}$$

und werden oft in der Fotografie oder bei der Bildarstellung an PC-Bildschirmen angewendet. Ein Gammawert von 1 erzeugt wieder eine lineare Kennlinie. Eine Kurve mit dem bei PC-Bildschirmen verwendeten Wert $\gamma = 2,2$ zeigt *Abb. 2*.

Eine solche Gamma-Kennlinie hellt dunkle Bildbereiche auf (s. *Abb. 3*), was der Wahrnehmung des menschlichen Auges eher entspricht. In hellen Bildbereichen werden die Helligkeitsunterschiede dafür komprimiert.

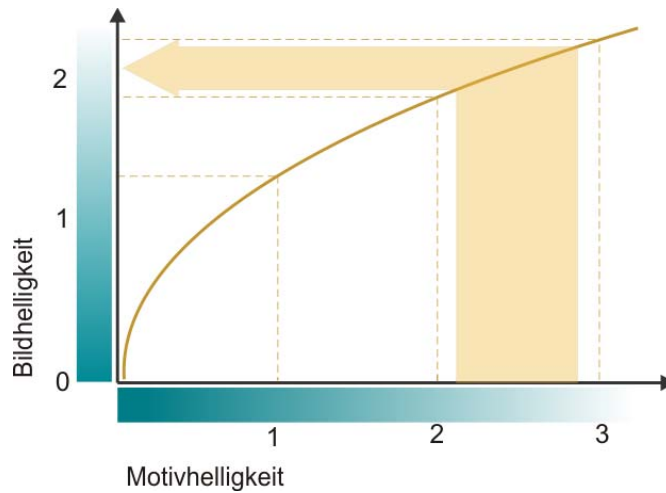


Abb. 2: Abbildung mit Gamma-Kennlinie

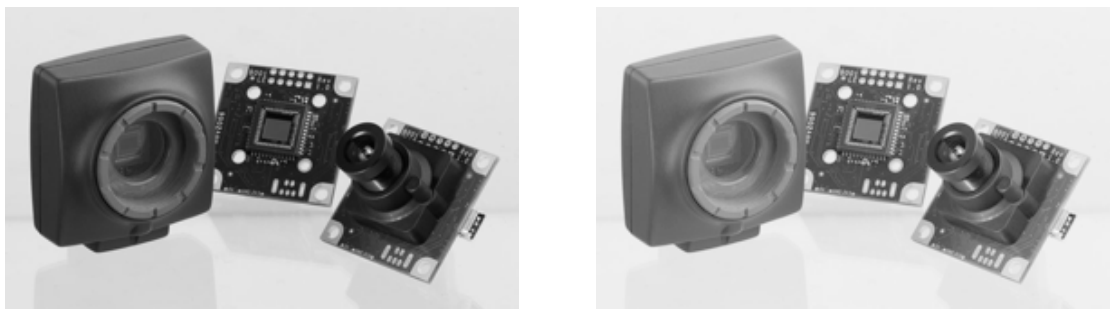


Abb. 3: Bild mit linearer (links) und Gamma-Kennlinie (rechts)

2.2.3 Logarithmische Kennlinie

Noch stärker ist der Effekt der logarithmischen Kennlinie. Hier folgt die Kennlinie der Funktion

$$y = \lg(x)$$

Das Diagramm in *Abb. 4* verdeutlicht, dass sehr große Helligkeitssprünge in hellen Motivbereichen nur noch kleine Änderungen in der Bildhelligkeit bewirken. Das erklärt, warum vor allem Bildsensoren mit einer logarithmischen Kennlinie dazu geeignet sind, Motive mit sehr großem Dynamikumfang abzubilden.

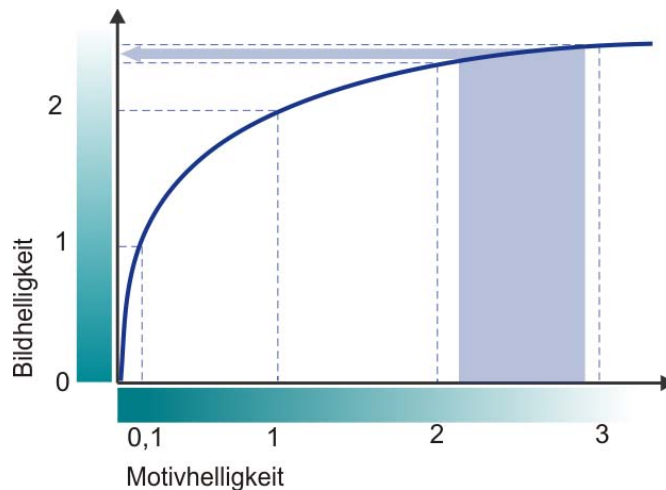


Abb. 4: Abbildung mit logarithmischer Kennlinie

2.3 Dynamikumfang bei digitalen Bildern

Bei der Digitalisierung von Bildern muss darauf geachtet werden, dass sich der Dynamikumfang der Aufnahme in dem gewählten Bildformat korrekt wiedergeben lässt. Entscheidend ist hierbei die Bittiefe, mit der die Bilder digitalisiert werden.

2.3.1 Bittiefe

Die Pixel von Bildsensoren erzeugen zunächst ein analoges Spannungssignal proportional der eingefallenen Lichtmenge. Für die Weiterverarbeitung wird das Bild digitalisiert, d. h. das stufenlose Signal wird in einen digitalen Zahlenwert umgerechnet. Die nachfolgende *Abb. 5* zeigt dies am Beispiel eines Grauverlaufs. Wird der stufenlose Verlauf z. B. auf einen digitalen Bereich mit 2 Bit abgebildet, erhält man $2^2 = 4$ Stufen; bei 4 Bit sind es bereits $2^4 = 16$ Stufen und so weiter. Die dazwischen liegenden Helligkeitswerte des ursprünglichen Verlaufs sind nach der Digitalisierung irreversibel verloren.

Ab etwa 200 Stufen sind die Helligkeitssprünge mit dem Auge nicht mehr zu unterscheiden – aus diesem Grund arbeiten gängige Monitore und Digitalkameras mit 8 Bit (256 Stufen) pro Farbkanal, was für die Visualisierung völlig ausreichend ist.

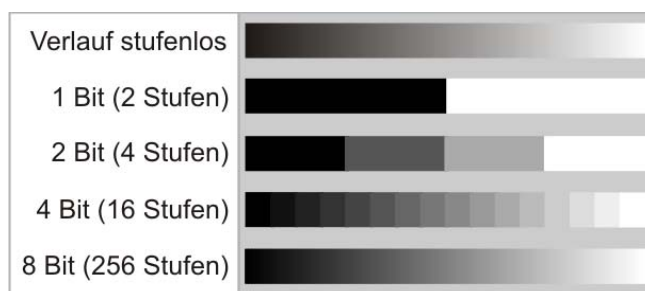


Abb. 5: Verschiedene Bittiefen am Beispiel eines Graustufenverlaufs

2.3.2 Höhere Bittiefe in der Bildverarbeitung

Werden digitale Bilddaten allerdings in einer Bildverarbeitung weiterverwendet, können mehr als 8 Bit Bittiefe erforderlich sein. Der Computer ist in der Lage, auch diese sehr feinen Helligkeitsunterschiede noch zu unterscheiden und zu verarbeiten, die mit dem Auge nicht mehr zu unterscheiden sind. Aus diesem Grund arbeiten Industriekameras oft mit 12 Bit.

Bittiefe	Helligkeitsstufen
8	$2^8 = 256$
10	$2^{10} = 1024$
12	$2^{12} = 4096$
14	$2^{14} = 16.384$

Tabelle 2: Bittiefe und entsprechend mögliche Helligkeitsstufen

Höhere Bittiefen erfordern allerdings äußerst rauscharme Bildsensoren. Sobald die durch Rauschen erzeugten Helligkeitsunterschiede größer sind als die Digitalisierungsstufen, wird keine weitere Information gewonnen.

2.3.3 Histogramm und digitale Kontrastanpassung

Die Helligkeitsverteilung digitaler Bilder wird in einem Histogramm¹ dargestellt. Besitzt ein Bild einen optimalen Kontrast, umfasst das Histogramm praktisch alle Helligkeitswerte zwischen 0 und dem Höchstwert (bei 8-Bit-Bildern also 255). Besitzt ein Bild geringen Kontrast, umfasst das Histogramm nur einen geringen Teil der möglichen Werte; das Bild wirkt flau (Abb. 6).

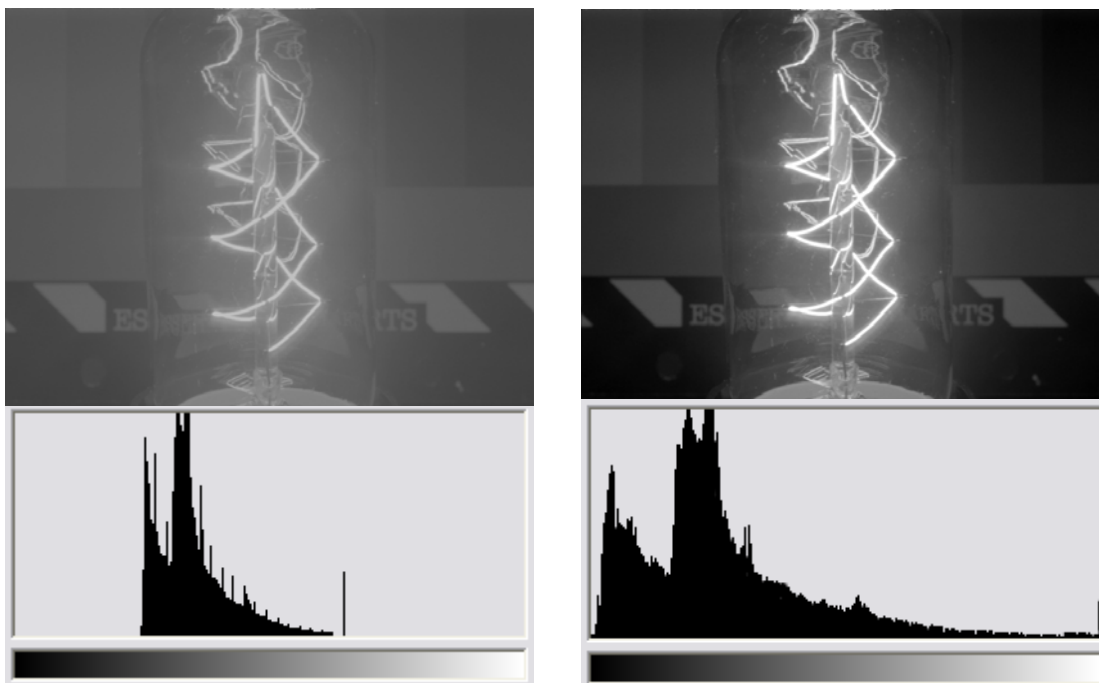


Abb. 6: HDR-Aufnahme und Histogramm mit geringem Kontrast (l.) und mit optimalem Kontrast nach einer Kontrastanpassung (r.)

Zur besseren Darstellung am Bildschirm oder im Druck kann das Histogramm gespreizt werden, um die möglichen Helligkeitsstufen optimal auszunutzen. Dazu werden mittels einer LUT-Kennlinie² die dunklen Bildteile weiter abgedunkelt und die helleren Bildteile aufgehellt. Das menschliche Auge kann somit die unterschiedlichen Helligkeitsstufen besser unterscheiden, das Bild wirkt kontrastreicher.

Es gilt allerdings zu beachten, dass durch eine nachträgliche Bearbeitung im PC keine Informationen gewonnen werden. Für die Verwendung in einer Bildverarbeitung ist eine nachträgliche Kontrastanpassung per Software also nicht notwendig. Der PC kann die Helligkeitsunterschiede auch ohne Kontrastanpassung unterscheiden.

Vorteil von hoher Bittiefe bei der Kontrastanpassung

Wichtig für die Kontrastanpassung ist die Bittiefe im Ausgangsbild. Die nachfolgenden Abbildungen (Abb. 7 und Abb. 8) verdeutlichen dies: Im Beispiel aus Abb. 7 enthält das 8-Bit-Ausgangsbild weniger als 100 Helligkeitsstufen, da keine dunklen und keine sehr hellen Stellen vorkommen. Das Bild besitzt einen geringen Kontrast.

¹ Diagramm, das die Verteilung der Helligkeitswerte eines Bildes zeigt. Auf der x-Achse sind die Helligkeitswerte (bei 8-Bit 0...255), auf der y-Achse deren Häufigkeit aufgetragen.

² Look-Up-Table: Tabellarische Zuordnung von Ein- und Ausgangswerten, somit leicht zu berechnen.

Bei einer Kontrastanpassung werden die Werte des Histogramms auseinandergezogen, so dass man ein kontrastreiches Bild erhält. Die weniger als 100 Helligkeitswerte verteilen sich nun auf die Stufen 0...255 – es entstehen Lücken im Histogramm, die als Helligkeitssprünge im Ergebnisbild sichtbar werden (s. Abb. 7, unteres Histogramm).

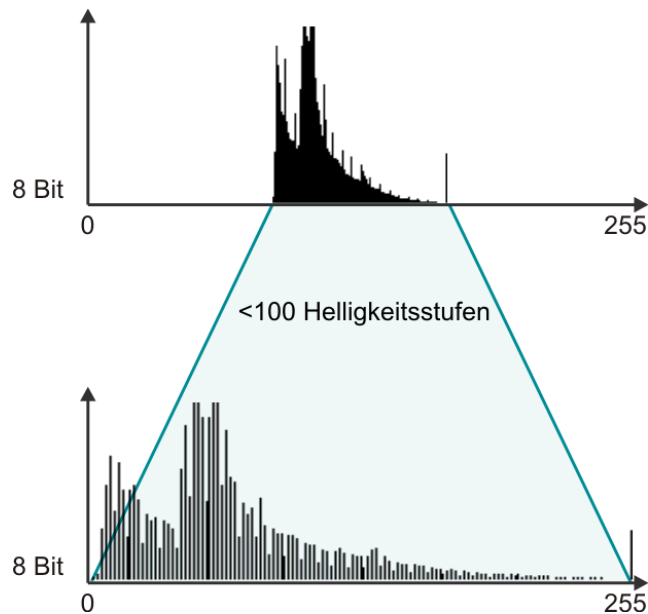


Abb. 7: Kontrastanpassung bei 8 Bit Ausgangsdaten

Das zweite Beispiel in Abb. 8 zeigt das gleiche Ausgangsbild mit 12 Bit Bittiefe direkt bei der Aufnahme. Diese Bild besitzt ebenfalls einen geringen Kontrast, da es nur mittlere Helligkeitswerte enthält. Durch die höhere Bittiefe werden die Helligkeitswerte des Bildes allerdings auf über 1000 verschiedene digitale Stufen abgebildet. Das komplette Histogramm umfasst im 12-Bit-Bild 4096 Werte (im Gegensatz zu 256 Werten bei 8 Bit).

Das bedeutet, dass nun eine Kontrastanpassung für die Bildschirmdarstellung ohne Qualitätsverlust vorgenommen werden kann: Die 1000 Werte des Ausgangsbild werden dabei so auf die 256 Werte des 8-Bit-Zielbildes verteilt, dass ein optimaler Kontrast entsteht. Durch die hohe Menge an Ausgangswerten entstehen keine Lücken im Histogramm (s. Abb. 8).

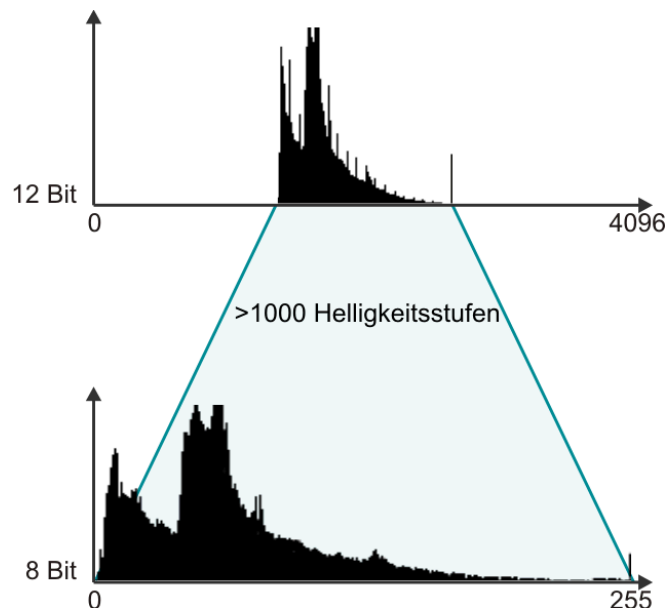


Abb. 8: Kontrastanpassung bei 12 Bit Ausgangsdaten

Diese Art der Kontrastanpassung findet teilweise bereits in der Kamera statt, wenn ein Bild mit z. B. 12 Bit digitalisiert und mit 8 Bit übertragen wird. In diesem Fall ist es auch für die Bildverarbeitung von Bedeutung, dass die 8 Bit Daten optimal ausgenutzt werden.

Kontrastanpassung bei HDR-Sensoren

Besonders bei HDR-Sensoren spielt die Kontrastanpassung eine wichtige Rolle. Da der Dynamikumfang des Sensors oft größer ist als der des Motivs, entstehen flau wirkende Bilder. Eine Kontrastanpassung wie in *Abb. 6* (S. 8) verbessert den visuellen Eindruck dieser Bilder.

3 Erzeugung von HDR-Bildern

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, HDR-Bilder zu erzeugen. Vier verbreitete Methoden werden im Folgenden vorgestellt. Wesentliche Unterschiede der Methoden sind ob ein herkömmlicher Sensor mit linearer, ein herkömmlicher Sensor mit nichtlinearer oder ein echter HDR-Sensor mit logarithmischer Kennlinie zum Einsatz kommt. Eine Sonderrolle nehmen die Belichtungsreihen ein, die der Vollständigkeit halber ebenfalls erwähnt werden.

3.1 HDR-Bildaufnahme mit linearen Sensoren

3.1.1 Funktionsweise von linearen Sensoren

Die Pixel eines herkömmlichen CCD- oder CMOS-Sensors erzeugen elektrische Ladung proportional zur einfallenden Lichtmenge. Für die Dauer der Belichtungszeit werden die Ladungsträger gesammelt und am Ende der Belichtungszeit wird für jeden Pixel ausgelesen, wie viel Ladung vorhanden ist. Der Dynamikbereich eines solchen Sensors wird nach oben durch die Sättigung der Pixel begrenzt. Die Grafik in *Abb. 9* zeigt anhand der Kennlinie, dass ein herkömmlicher linearer Sensor nur einen recht begrenzten Dynamikbereich des Motivs abbilden kann. Die restlichen Bereiche können aufgrund der Sättigung nicht abgebildet werden.

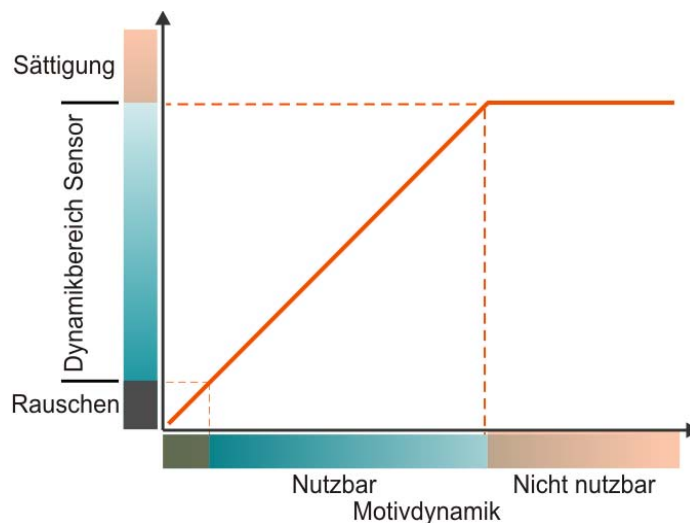


Abb. 9: Bildaufnahme mit linearem Sensor

Wenn bei einem Sensor die Sättigung erreicht ist, führt weiterer Lichteinfall zur Überbelichtung. Bei CCD-Sensoren tritt außerdem der sogenannte Blooming-Effekt auf: Ladungsträger aus überbelichteten Pixeln „fließen“ in die Nachbarpixel, so dass ganze Bereiche im Bild weiß erscheinen – die Bildinformationen sind damit verloren.

Um die Überbelichtung zu verhindern, kann die Blende geschlossen oder die Belichtungszeit reduziert werden. Beides führt jedoch dazu, dass dunkle Bildbereiche nur noch Rauschen enthalten, die Bildinformation ist in diesem Fall ebenso verloren.

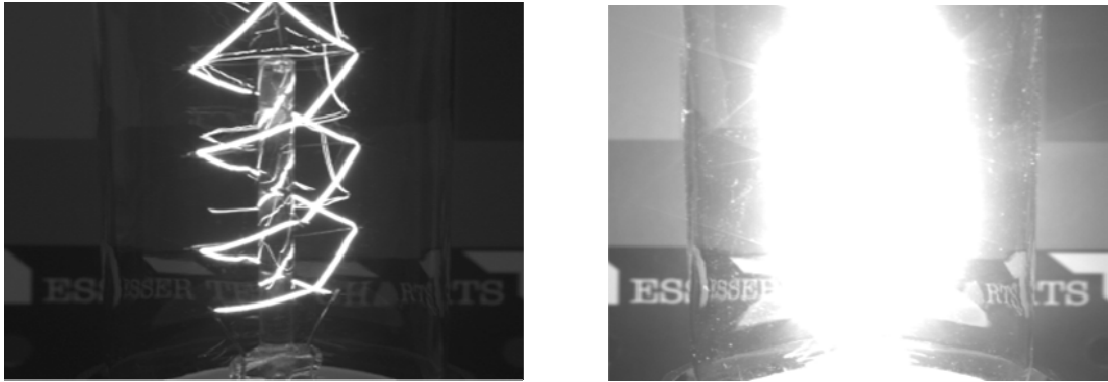


Abb. 10: CCD-Sensor bei korrekter Belichtung (l.) und bei Überbelichtung (r.) mit Blooming

3.1.2 Linearer Sensor mit Belichtungsreihen (Multiple Exposure)

Belichtungsreihen sind eine Methode, die besonders in der Digitalfotografie oft verwendet wird, um Szenen mit hohem Dynamikumfang abzubilden. Dabei werden eine Aufnahme mit korrekter Belichtung und mindestens zwei weitere Aufnahmen mit Unter- bzw. Überbelichtung angefertigt. In den unterbelichteten Aufnahmen sind sehr helle Stellen gut abgebildet, ohne dass es zu überstrahlten Bereichen kommt. In den überbelichteten Aufnahmen sind die sonst zu dunklen Bildbereiche gut dargestellt, während helle Bereiche überstrahlt sind. Diese Aufnahmen werden mit einem sog. Tonemapping-Operator zu einem Bild mit hohem Dynamikumfang verrechnet. Mit dieser Technik lässt sich ein prinzipiell unbegrenzter Dynamikumfang erzielen. Für den industriellen Einsatz eignet sich die Methode nur begrenzt, da sich das Motiv über mehrere Aufnahmen nicht ändern darf. Zudem ist ein hoher Rechenaufwand notwendig.



Abb. 11: Belichtungsreihe (oben) und HDR-Bild nach Tonemapping (unten)³

³ Bilder: Kevin McCoy / Wikimedia Commons, Lizenz: Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0

3.1.3 Linearer Sensor mit Kniepunkt-Kennlinie

Manche CMOS-Sensoren⁴ bieten die Möglichkeit, eine stückweise lineare Kennlinie mit Kniepunkten zu verwenden. Mit solch einer stückweise linearen Kennlinie wird die Form einer Gamma- oder logarithmischen Kennlinie grob angenähert.

Nach einer wählbaren Zeitspanne t_l (die kleiner als die Belichtungszeit sein muss) werden alle Pixel, deren Ladung einen wählbaren Wert q_l übersteigt, auf diesen Wert q_l zurückgesetzt. Die Belichtung wird normal fortgesetzt. Die Grafik in *Abb. 12* (S. 13) zeigt eine solche Kennlinie mit einem Kniepunkt. In diesem Fall sind die Werte so gewählt, dass nach 85% der Belichtungszeit alle Pixel ermittelt werden, deren aktuelle Ladung mehr als 60% des Maximalwerts (Sättigung) beträgt. Diese Pixel werden dann auf genau diesen Wert von 60% des Maximums zurückgesetzt und weiter belichtet. Dadurch tritt die Sättigung von Pixeln in hellen Bildbereichen später auf, das Bild besitzt einen höheren Dynamikumfang.

Bei Sensoren mit mehreren Kniepunkten werden mehrere Zeiten t_n und Schwellwerte q_n definiert. Mit dieser Methode werden Dynamikbereiche von rechnerisch etwa 80 dB erreicht. Nachteilig ist, dass die Kniepunkte an jede Belichtungssituation neu angepasst werden müssen und eine Überbelichtung des Sensors nach wie vor möglich ist. Außerdem eignet sich diese Methode hauptsächlich für Monochromsensoren, da der Weißabgleich bei Farbsensoren durch die unterschiedlichen Kniepunkte nicht praxisgerecht möglich ist.

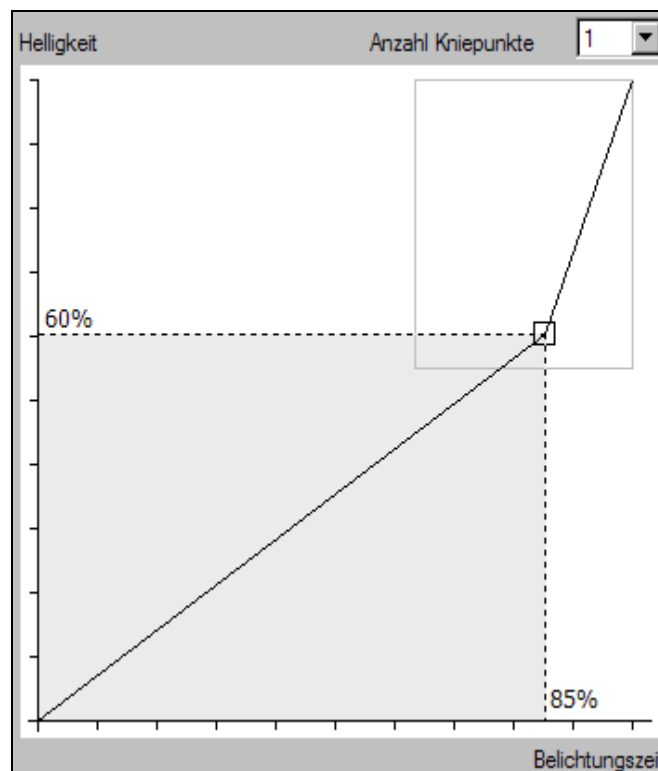


Abb. 12: IDS uEye Kamera mit HDR-Kniepunkt-Funktion

⁴ Z. B. Aptina MT9V033, verbaut u. a. in Kameras der IDS uEye Serie vom Typ UI-122x / UI-522x

3.1.4 Logarithmische HDR-Sensoren mit herkömmlicher Fotodiode

Mit der Formel aus Kapitel 2.1.1 lässt sich errechnen, dass ein *lineares* 8-Bit-Bild mit 256 Helligkeitsstufen nicht mehr als etwa 48 dB Dynamikumfang abbilden kann:

$$D_{8\text{ Bit}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{256}{1}\right) = 48,16\text{ dB}$$

Um also einen Dynamikumfang von 120 dB mit einer *linearen* Kennlinie wiedergeben zu können, wären nach dem Sensor 1 Million Digitalstufen und demnach eine Bittiefe von 20 Bit erforderlich. Wenn allerdings der Sensor eine *logarithmische* Kennlinie besitzt, lässt sich der Dynamikumfang des Motivs von 120 dB mit einer geringeren Anzahl digitaler Stufen abbilden. Es findet eine Dynamikkompensation im Pixel statt. Aus diesem Grund wird für HDR-Sensoren eine logarithmische Kennlinie angestrebt.

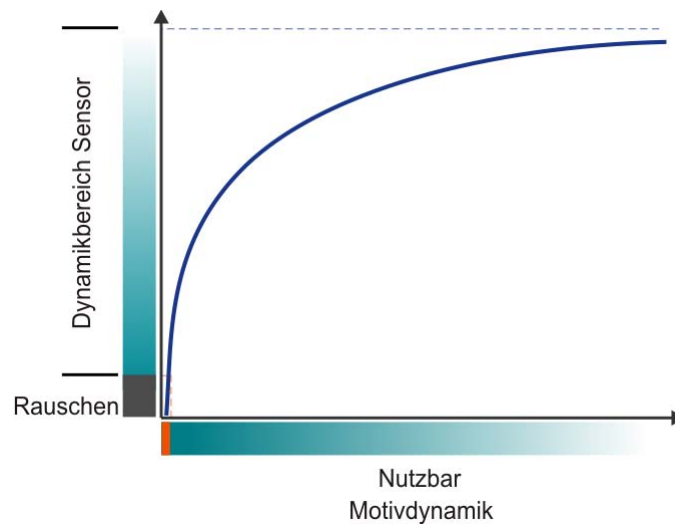


Abb. 13: Bildaufnahme mit einem logarithmischen Sensor

Eine Möglichkeit, diese zu erzielen, ist die Verwendung einer Fotodiode und eines nichtlinearen Widerstands. Die Fotodiode liefert, genau wie in einem herkömmlichen CMOS-Sensor, einen Fotostrom, der linear proportional zur einfallenden Lichtmenge ist. Dies wird oft durch einen oder mehrere MOS-Transistoren erreicht, die mit der Diode in Reihe geschaltet sind. Durch die logarithmische Kennlinie dieser Transistoren ergibt sich eine logarithmische Ausgangsspannung (s. Abb. 14).

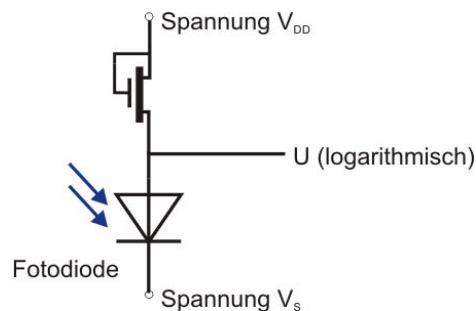


Abb. 14: Schematischer Aufbau eines HDR-Pixels mit logarithmischer-Transistor

Feststehende Rauschmuster (FPN) bei HDR-Sensoren

Ein großer Nachteil dieses Aufbaus ist der hohe Anteil feststehender Rauschmuster (FPN, *Fixed Pattern Noise*). Durch Dunkel- und Leckströme entsteht in jedem Pixel ein anderer Offset. Bei herkömmlichen linearen Sensoren tritt dieser kaum in Erscheinung. Da die logarithmische Kennlinie aber gerade Helligkeitsunterschiede in dunklen Bildbereichen hervorhebt, wirken sich diese Rauschmuster bei HDR-Sensoren oft sehr stark aus.

Um FPN und weitere Nachteile dieses Pixelaufbaus zu umgehen, gibt es Sensoren, die im unteren Helligkeitsbereich mit einer linearen Kennlinie arbeiten. Erst ab einer bestimmten Schwelle schalten die Pixel in den logarithmischen Modus. Die LinLog™-Sensortechnologie nutzt eine solche Kombination, die die Vorteile von linearen und logarithmischen Kennlinien vereinen soll. Nachteilig bei dieser Kombination ist allerdings, dass die Übergangspunkte zwischen den beiden Modi jeder neuen Belichtungssituation wieder angepasst werden müssen.

3.1.5 Logarithmischer HDR-Sensor mit Solarzelle

Der in IDS *uEye* Kameras verwendete HDR-Sensor vom Typ FX4 arbeitet mit einem komplett anderen Prinzip: In diesem Sensor kommen keine herkömmlichen Fotodioden zum Einsatz, sondern miniaturisierte Solarzellen. Dies sind prinzipiell ebenfalls Fotodioden, die allerdings anders betrieben werden. Während Fotodioden einen linearen Strom proportional zur Lichtmenge erzeugen, geben Solarzellen eine logarithmische Spannung in Abhängigkeit von der Lichtmenge aus. Das bedeutet, dass keine nachträgliche Logarithmierung des Signals erforderlich ist – die Kennlinie ist bereits echt logarithmisch.



Abb. 15: 40-W-Glühbirne mit CCD-Sensor (l.) und mit FX4-HDR-Sensor (r.) aufgenommen.

4 Funktionsweise des HDR-Sensors FX4

Durch einen neuartigen Pixelaufbau ist es gelungen, einen Sensor mit echt logarithmischer Kennlinie zu entwickeln, der keinen sichtbaren *Fixed Pattern Noise* (s. o.) aufweist. Die Funktionsweise dieses Sensors wird im Folgenden erklärt.

4.1.1 Aufbau der Pixel

Der in *uEye* HDR-Kameras verwendete Sensor FX4 besitzt einen patentierten Pixelaufbau, der für eine echt logarithmische Wiedergabe bei effektiver Unterdrückung von feststehendem Rauschen (*Fixed Pattern Noise*, siehe [oben](#)) sorgt.

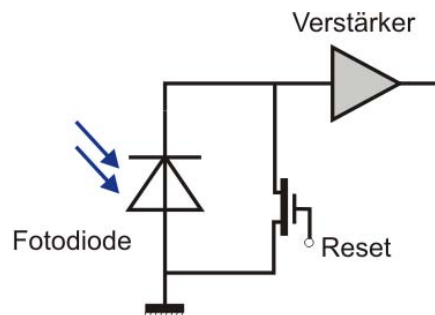


Abb. 16: Schematischer Aufbau des FX4 Pixels

Die Fotodiode wird hier als Solarzelle betrieben und erzeugt eine Spannung, die sich exakt logarithmisch zur einfallenden Lichtmenge verhält. Das Signal wird im Pixel verstärkt und analog ausgegeben. In *uEye* Kameras übernimmt ein externer A/D-Wandler mit 14 Bit Auflösung die Digitalisierung. Der Spannungsbereich des A/D-Wandlers ist höher als die maximale Ausgangsspannung des Sensors, um Übersteuerung der digitalen Stufe zu verhindern und Temperaturdrift des Sensors zu kompensieren.

Der FX4-Sensor erreicht einen Dynamikumfang von 120 dB. Zu beachten ist, dass die HDR-Technologie nicht gleichzusetzen ist mit einer erhöhten Empfindlichkeit des Sensors. Die Lichtempfindlichkeit des FX4 HDR-Sensors liegt im Bereich aktueller CCD- und CMOS-Sensoren.

4.1.2 Belichtung

Der FX4-Sensor besitzt kein integratives Prinzip, d. h., es gibt keine Belichtungszeit. Die HDR-Pixel geben zu jedem Zeitpunkt eine Spannung aus, die dem momentanen Lichteinfall entspricht. Dieser Spannungswert wird in der gewünschten Bildfrequenz abgefragt. Bei z. B. 30 Bilder/s wird also 30 Mal in der Sekunde der aktuell von jedem Pixel gemessene Lichtwert ausgegeben. Die analogen Spannungswerte werden von einem nachgeschalteten Analog/Digital-Wandler digitalisiert.

4.1.3 Auslesemethode

Das Auslesen der Pixelwerte erfolgt beim FX4 zeilenweise (*rolling readout*). Durch den leichten zeitlichen Versatz zwischen dem Auslesen einer Zeile n und der nächsten Zeile $n+1$ kann der sogenannte *Rolling-Shutter-Effekt* auftreten. Dabei werden Objekte, die sich mit hoher Geschwindigkeit durch das Bildfeld bewegen, geometrisch verzerrt dargestellt. Wird bei-

spielsweise ein quadratisches Objekt horizontal zum Bild bewegt, erscheint es im Bild als Parallelogramm, da die oberen Bereiche des Objekts zeitlich gesehen vor den unteren Bereichen abgebildet werden.

Die Auslesedauer für ein komplettes Bild beträgt $t_{\text{Bild}} = 1/\text{Bildrate}$, der zeitliche Versatz zwischen zwei Zeilen ist demnach $t_{\text{Zeile}} = t_{\text{Bild}}/\text{Bildhöhe}$.

Der Sensor arbeitet im *Progressive Scan* Modus, bei dem Vollbilder ausgelesen werden (im Gegensatz zum *Interlaced Scan*, bei dem im Zeilensprung-Verfahren Halbbilder ausgelesen werden).

4.1.4 Korrektur von feststehenden Rauschmustern (FPN)

Der FX4 besitzt einen effektiven Mechanismus, um feststehende Rauschmuster praktisch vollständig zu eliminieren. Vor dem Auslesen des Sensors wird durch den Reset-Transistor (s. Abb. 16, S. 16) die Fotodiode kurzgeschlossen. Das vom Pixel ausgegebene Signal enthält ausschließlich den momentanen Offset und kann vom direkt danach aufgenommenen Bild abgezogen werden. Dieser Vorgang wird vor jeder Aufnahme zeilenweise durchgeführt.

5 Anwendung

5.1 Typische Anwendungsgebiete

Kameras mit HDR-Sensoren eignen sich hauptsächlich für die folgenden beiden Anwendungsgebiete:

1. Umgebungen mit sehr hohem Dynamikumfang
2. Umgebungen mit starken und unvorhersehbaren Helligkeitsschwankungen.

Umgebungen mit sehr hohem Dynamikumfang finden sich beispielsweise in folgenden Bereichen:

- Automotive und Verkehr: Hier treten oft Situationen auf, in denen ein Sensor sehr starker Lichteinwirkung ausgesetzt ist, etwa durch Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge, und gleichzeitig Informationen in dunklen Bildbereichen (z. B. Fahrzeuginnenraum) ausgewertet werden sollen.
- Schweißen: Durch den Schweißbogen entsteht große Helligkeit, wodurch es mit herkömmlichen Sensoren nicht mehr möglich ist, das Schweißobjekt oder die Schweißnaht zu erkennen.
- Lacke und glänzende Oberflächen: Reflexionen und Glanzpunkte auf spiegelnden Oberflächen erfordern Sensoren mit erhöhtem Dynamikumfang.
- Kioskanwendungen: Bei Geldautomaten oder anderen freistehenden Selbstbedienungsanwendungen sind Porträtaufnahmen der bedienenden Person gefordert. Bei ungünstiger Beleuchtung ist der Dynamikumfang herkömmlicher Sensoren nicht mehr ausreichend.

Umgebungen mit starken Helligkeitsschwankungen sind oft in diesen Anwendungen gegeben:

- Sicherheitstechnik und Überwachung: Gerade im Außenbereich entstehen durch Sonneneinstrahlung und schnell aufziehende Bewölkung Szenen mit hoher Motividynamik. Regelungen wie etwa Auto-Iris an Überwachungskameras sind oft mit solchen Einflüssen überfordert.

5.2 Anwendungshinweise

Beim Einsatz von Kameras mit HDR-Sensoren allgemein und dem FX4 Sensor im Besonderen sollten folgende Hinweise beachtet werden.

5.2.1 Darstellung und Verarbeitung von HDR-Bildern

Wie in Kapitel [2.3.2](#) und [2.3.3](#) erklärt, sind für die Verarbeitung insbesondere von HDR-Bildern höhere Bittiefen von Vorteil. Um den Dynamikumfang der Bilder voll nutzen zu können, sollten die Bilder mit 12 Bit Bittiefe übertragen werden. So lassen sich per Software die relevanten Bildbereiche in bestmöglicher Qualität weiterverarbeiten.

Zur reinen Darstellung der Bilder verfügen uEye HDR-Kameras über einen näherungsweise linearen Modus, in dem der Bildkontrast dem von herkömmlichen Sensoren entspricht. Dazu werden kameraintern die Ausgabewerte des Sensors quadriert. Das Ergebnis der Multiplikati-

on $\log(x) * \log(x)$ entspricht mit guter Näherung einer Kennlinie mit $\gamma = 0,5$ und ist damit gut für die Darstellung am Bildschirm geeignet (siehe auch Kapitel 2.2.2). Es gilt allerdings zu beachten, dass durch die Quadrierung der nutzbare Dynamikumfang verkleinert wird. Es wird empfohlen, diesen Modus nicht zur Weiterverarbeitung der Bilddaten zu verwenden.

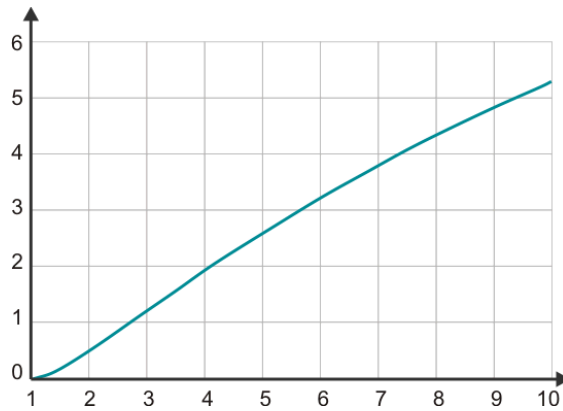


Abb. 17: Die Funktion $\log(x) * \log(x)$ entspricht etwa einer Kennlinie mit $\gamma = 0,5$

5.2.2 Auswahl von Objektiven

Durch den extrem hohen Dynamikumfang des HDR-Sensors treten in Objektiven immer vorhandene Linsenreflexionen deutlicher hervor als bei der Verwendung herkömmlicher Sensoren. An unvergüteten Linsen kann die Reflexion mehr als 4% der einfallenden Lichtmenge betragen. Das so reflektierte Licht wird an folgenden Linsenelementen wieder gespiegelt und tritt schließlich als störender Lichtfleck auf dem Bild in Erscheinung. Um auf Kameras mit HDR-Sensoren gute Ergebnisse zu erzielen, müssen die einzelnen Linsenelemente des Objektivs mit einer hochwertigen Antireflexbeschichtung versehen sein.

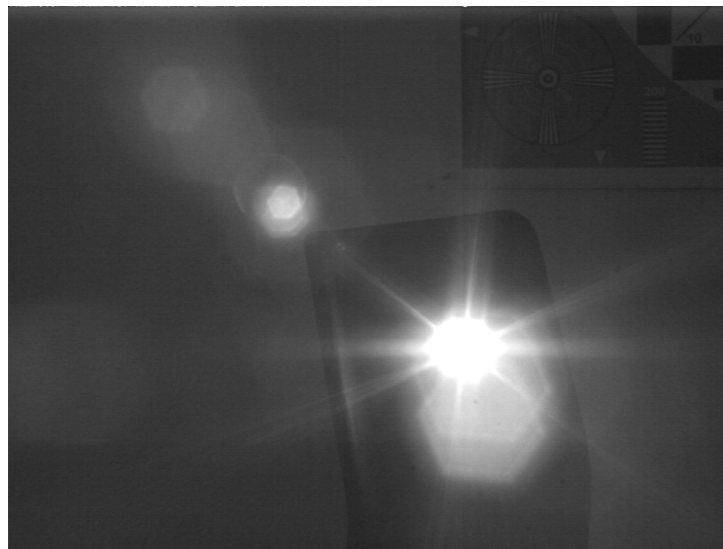


Abb. 18: Starke Linsenreflexionen in einem C-Mount-Objektiv. Deutlich erkennbar ist die sechseckige Form der Blendenöffnung.

5.2.3 Blitzbetrieb und gepulste Beleuchtung

Da HDR-Sensoren wie der FX4 nicht – wie herkömmliche Sensoren – Ladungen integrieren, ergeben sich Einschränkungen beim Blitzbetrieb. Beim Auslesen des Sensors wird exakt die momentan auf jedem Pixel einfallende Lichtmenge gemessen. Deshalb muss ein Blitz während der kompletten Auslesedauer aktiv sein, um das vollständige Bild zu erhellen. Bei einem Sensor mit *rolling readout* müsste die Lichtquelle während der kompletten Auslesezeit $t = 1/\text{Bildrate}$ leuchten, um das Bild gleichmäßig aufzuhellen, was bei Hochleistungsblitzen in der Regel nicht möglich ist.

Eine weitere Auswirkung der fehlenden Integration auf dem Sensor ergibt sich bei schnell gepulstem Licht, wie es bei LED- und Laserlichtquellen oder beim Lichtbogenschweißen auftritt. Die durch das Pulsen bedingten Helligkeitsschwankungen der Lichtquelle werden als Hell-Dunkel-Übergänge im Bild sichtbar, deren Abstand von der Frequenz der Lichtquelle abhängt.

5.2.4 Bewegung

Bei der Aufnahme schnell bewegter Objekte mit dem FX4-Sensor sind die unter [4.1.3 Auslesemethode](#) genannten Hinweise zu beachten.

6 Anhang

6.1 Spezifikationen FX4 HDR-Sensor

Sensortyp	HDR CMOS-Sensor
Pixelgröße	10 µm x 10 µm
Auflösung	768 x 576 Pixel (CCIR)
Dynamikumfang	120 dB
Max. Bildrate	50 fps
Ausleseverfahren	Rolling Readout
Digitalisierung	14 Bit A/D-Wandler, Ausgabe 8 o.12 Bit

6.2 Kontakt und weitere Informationen

Die IDS Imaging Development Systems GmbH bietet mit der uEye® Kamerafamilie eine Serie moderner USB- und GigE-Kameras für die Bildverarbeitung im industriellen und nichtindustriellen Umfeld. CMOS- und CCD-Sensoren namhafter Hersteller liefern Auflösungen von VGA bis 10 Megapixel und Bildraten bis zu 100 Vollbilder in der Sekunde. Über das umfangreiche, kostenlos verfügbare uEye® Softwarepaket lassen sich alle Kameras in Bildverarbeitungsbibliotheken oder eigene Anwendungen einbinden.

Weitere Informationen zu IDS und den uEye® Kameras finden Sie unter www.ids-imaging.de.

Kontaktieren Sie uns bei Fragen zur HDR-Technologie oder für ein unverbindliches Angebot:

IDS Imaging Development Systems GmbH
Dimbacher Str. 6-8
D-74182 Obersulm

Tel.: 07134-96196-0
Mail: sales@ids-imaging.de