

Der Bildsensor





Kenngroößen eines Bildsensors

- ▶ Bauart / Sensortyp
- ▶ Größe – und damit die Helligkeitsempfindlichkeit
- ▶ Pixelanzahl (umgangssprachlich: „Auflösung“)
- ▶ Dynamikbereich
- ▶ Farbtreue
- ▶ Signal- Rauschabstand





Der Bildsensor: Allgemeines

- ▶ Was der Film bei der Analogkamera ist, ist der Sensor bei der Digitalkamera
- ▶ er wandelt das durch die Blende und den geöffneten Verschluss einfallende Licht so um, dass es digital gespeichert werden kann.
- ▶ Flächensensoren bestehen aus Pixel, Bildpunkt, Bildzelle oder Bildelement
- ▶ Das Wort Pixel kommt von Picture (Pics, kurz: Pix) und Elements (El)werden
- ▶ Es gibt unterschiedliche Arten von Sensortechniken (z.B. CCD oder CMOS)

Grundsätzliche Funktionsweise eines Bildsensors

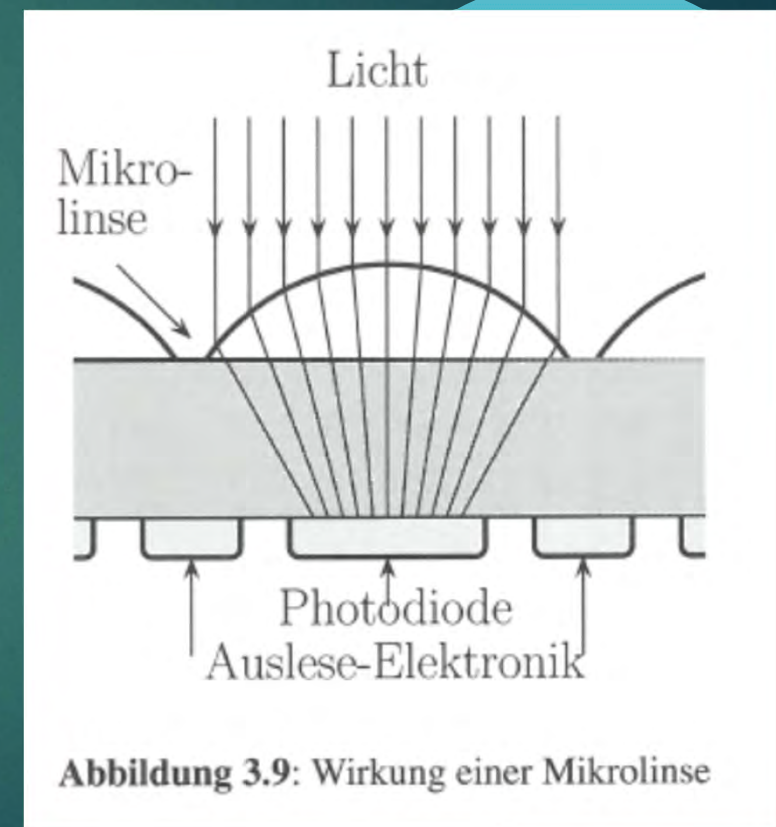
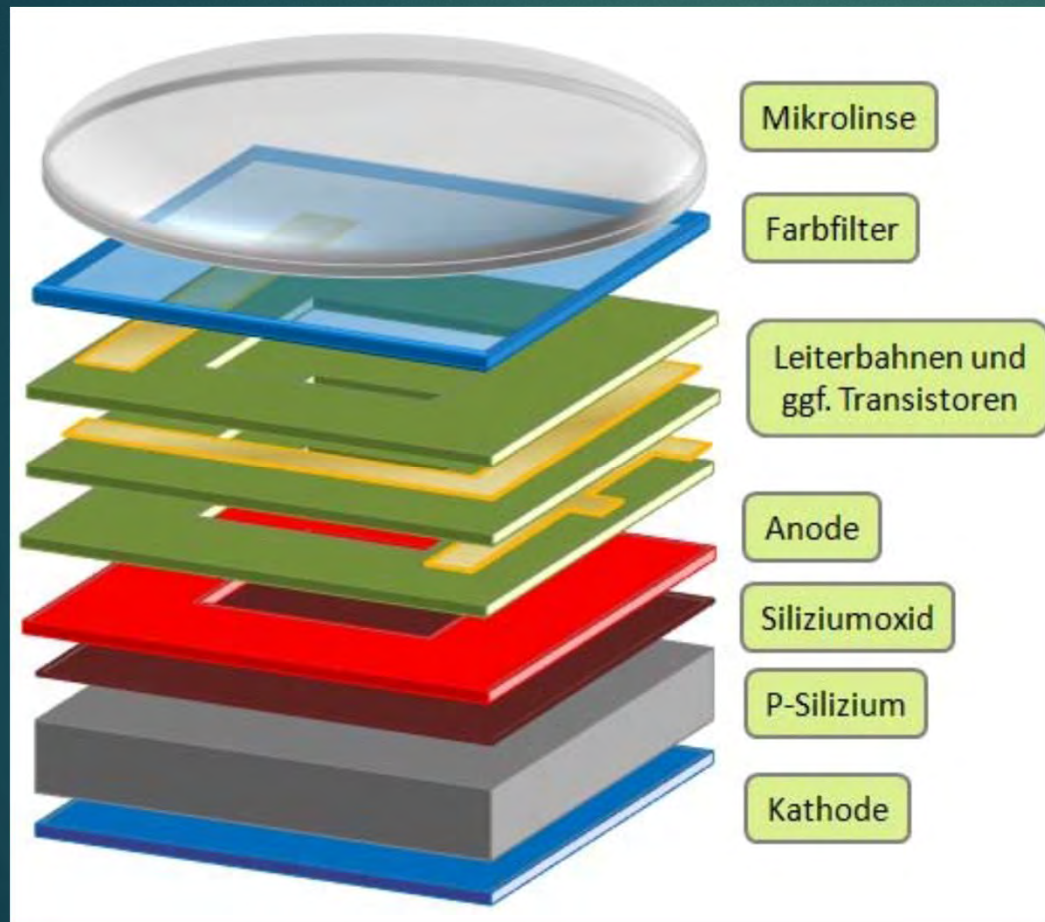
- ▶ Fotozellen stellt einen Pixel des Sensors dar und wandelt das einfallende Licht auf Grund des inneren photoelektrischen Effekts in elektrische Ladung um.
- ▶ Ein Pixel selbst besteht aus einer Mikrolinse, einem Farbfilter, einer Reihe von Leiterbahnen, zwei Elektroden, einer isolierenden Oxidschicht und dotiertem Silizium.
- ▶ Die Mikrolinse bündelt das Licht, so dass möglichst viel Licht auf den lichtempfindlichen Teil des Pixels treffen kann. -> verursacht ein wenig Unschärfe
- ▶ Photodioden reagieren auf Licht in einem breiten Farbspektrum. Mit ihnen kann man die Helligkeit messen und in elektrische Information umwandeln.
- ▶ Um Farbinformationen zu erhalten, ist vor jedem Pixel ein Farbfilter angebracht, welcher nur Licht eines bestimmten Spektralbereichs passieren lässt. Aus der Farbinformation benachbarter Pixel kann die Kamerasoftware sich dann die Farben eines jeden Pixels errechnen.



Grundsätzliche Funktionsweise eines Bildsensors

- ▶ Die Leiterbahnen werden benötigt, um die einzelnen Pixel auslesen zu können. Je nach Sensortyp können zusätzlich noch elektronische Komponenten in diesem Bereich integriert sein.
- ▶ Die Elektroden, das Silizium und das Silizium-Oxid bilden das eigentliche lichtempfindliche Element, wobei hier die Helligkeitsinformation nicht wie einer Photodiode direkt in Strom umgewandelt wird, sondern als Ladung in einer Ladungssenke gesammelt wird. Je mehr Licht auf einen Pixel fällt, desto mehr elektrische Ladung wird erzeugt. Diese Ladung am Ende der Belichtungszeit ausgelesen.
- ▶ Danach wird die Helligkeitsinformation zu einem abtransportiert, verstärkt und digitalisiert.

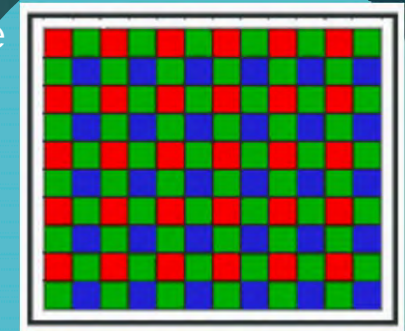
Aufbau eines Sensorpixels



Sensorpixel



- ▶ Vor jedem Pixel sitzt eine Farbfilter, es gibt rote, blaue und grüne Pixel, welche bei den meisten Sensoren im sogenannten Bayer-Muster angeordnet sind. Wie aus dem Bild erkennbar ist, sind es doppelt so viele grüne wie rote oder blaue Pixel. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das menschliche Auge aus dem spektralen Bereich des grünen Lichts die meisten Informationen über Helligkeit, Kontrast und Schärfe erhält.
- ▶ Die **Dichte** dieses Raster bestimmt die physikalische **Auflösung** des Sensors. Bei einem 18MPixel APS-C Sensor sitzt alle $4,3\text{ }\mu\text{m}$ ein Pixel.
- ▶ Trifft viel Licht auf einen Pixel, enthält dieser mehr Ladung, als einer auf den wenig Licht trifft.
- ▶ Nach der Belichtung werden die Ladungen ausgelesen und weiter verarbeitet.



Pixel beim Bayer-Sensor



RAW (Roh) - Signal

- Dieses Signal kann bei einigen Kamerateypen direkt gespeichert werden. Man nennt dieses Format dann RAW-Format, weil es die Rohdaten vom Speicherchip enthält. Damit daraus ein Bild entsteht, müssen die Daten dann noch mit einem Programm bearbeitet werden.



Bayer Farbfilter

- ▶ Ein Bild das aus so einem Chip entsteht, dürfte eigentlich nur einen Bruchteil der Pixel haben, wie der Chip Zellen hat, da ja jeder Sensorpixel nur eine der drei Grundfarben sehen kann. Im endgültigen Bild setzt sich aber jeder Pixel aus den Helligkeiten und der Farbinformation aller drei Grundfarben zusammen.
- ▶ Damit aber ein aus einem 18-Megapixel-Sensor auch ein 18-Megapixel-Bild (z.B. jpeg) wird, werden die RAW-Daten durch Demosaicing entsprechen aufbereitet. Das ganze geschieht mit herstellerspezifischen Algorithmen.
- ▶ Dabei erhält man ein fertiges Bild, welches in der Helligkeit ein Auflösung von 18 Millionen Pixeln erreicht, bei der Farbe aber weniger. Diese Einschränkung ist hinnehmbar, da das menschliche Auge Helligkeitsinformationen höher auflösen kann als Farbinformationen.

Nachteile des Bayer-Filters

- ▶ Durch die Unterabtastung können sich, trotz nachfolgender Interpolation, an Grauwertkanten oder dünnen Linien in einem Bild Störungen ergeben (Farb-Aliasing), was sich durch Moire-Muster im Bild bemerkbar machen kann. Eine Abhilfe wurde dadurch geschaffen, dass man Linsen (*optische Unschärfefilter*) in den Strahlengang bringt, die den Lichtstrahl aufweiten. Gewöhnlich werden zwei optische Filter eingebaut: eines für die Horizontala und eines für die Vertikalaufweitung.
- ▶ Dadurch wird aber auch die Bildschärfe verringert: optische Filter reduzieren die Farbstörungen, die durch das Bayer-Filter verursacht wurden, auf Kosten der Bildschärfe - die sowieso schon durch die Unterabtastung gelitten hat.

Sensortypen

- ▶ In heutigen Kameras werden zwei Sorten von Bildsensoren verbaut:

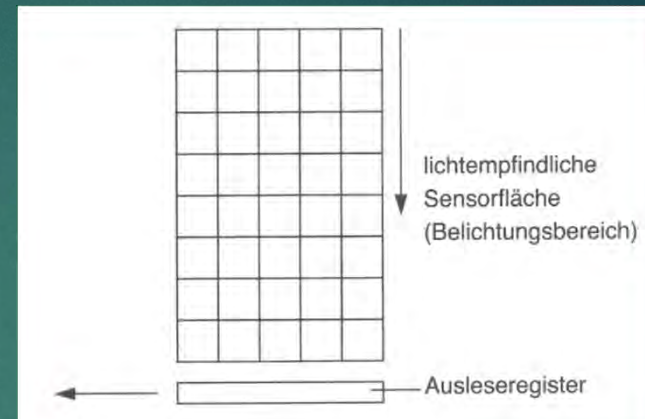
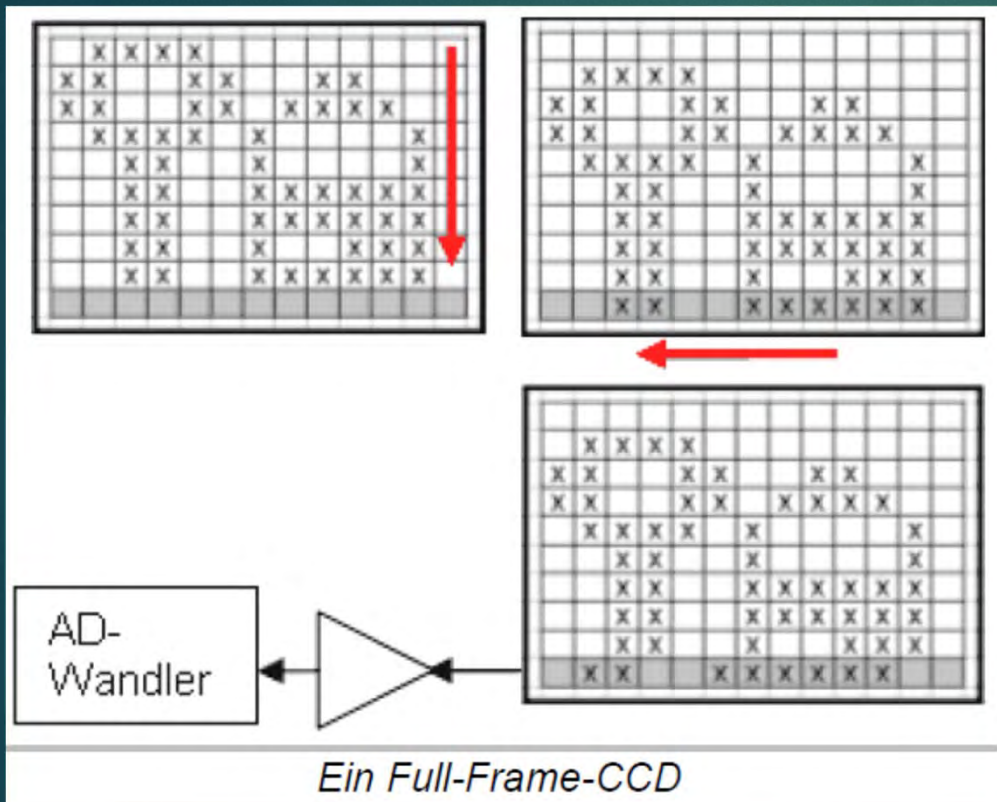
Bezeichnung	Elektronisches Prinzip	Bauteilname
CCD	MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)	CCD (Charge Coupled Device)
CMOS	CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)	APS (Active Pixel Sensor)

- ▶ Beide Sensortypen wandeln das einfallende Licht in Ladungen um.
- ▶ Was mit den Ladungen weiter geschieht, hängt vom Sensor ab.

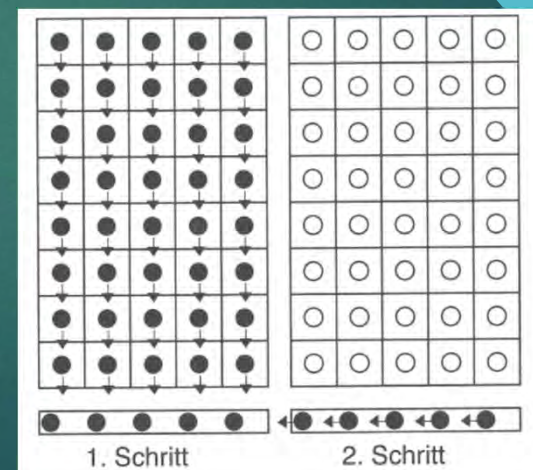
CCD-Sensoren

- ▶ CCD ist die Abkürzung für charge coupled device und heißt auf Deutsch ladungsgekoppeltes Bauelement.
- ▶ Ursprünglich als Datenspeicher konzipiert wurde 1970 der erste CCD-Sensor gebaut. Dessen Erfinder Willard Boyle und George E. Smith bekamen dafür 2009 den Nobelpreis für Physik.
- ▶ Während der Belichtung sammeln die einzelnen Pixel Ladungen, welche von den eintreffenden Photonen erzeugt werden.
- ▶ Die „integrierte“ Ladungsmenge ist proportional zum Lichteinfall
- ▶ Wenn der Verschluss wieder zu ist, müssen diese ausgelesen werden. Hierzu werden die Ladungen in einen lichtunempfindlichen Bereich des Sensors verschoben und dann zu einem Auslesebereich transportiert.
- ▶ Dies kann entweder zeilenweise (Full-Frame), im Ganzen (Frame-Transfer) oder pixelweise (Interline-Transfer) geschehen.

Full-Frame-CCD



Ganze Sensorfläche ist fotoempfindlich



1. Schritt: nach der Integrationszeit werden die Ladungen in das horizontale Ausleseregister übernommen.
2. Schritt: Ladungen werden seriell ausgelesen

Interline-Transfer-CCD

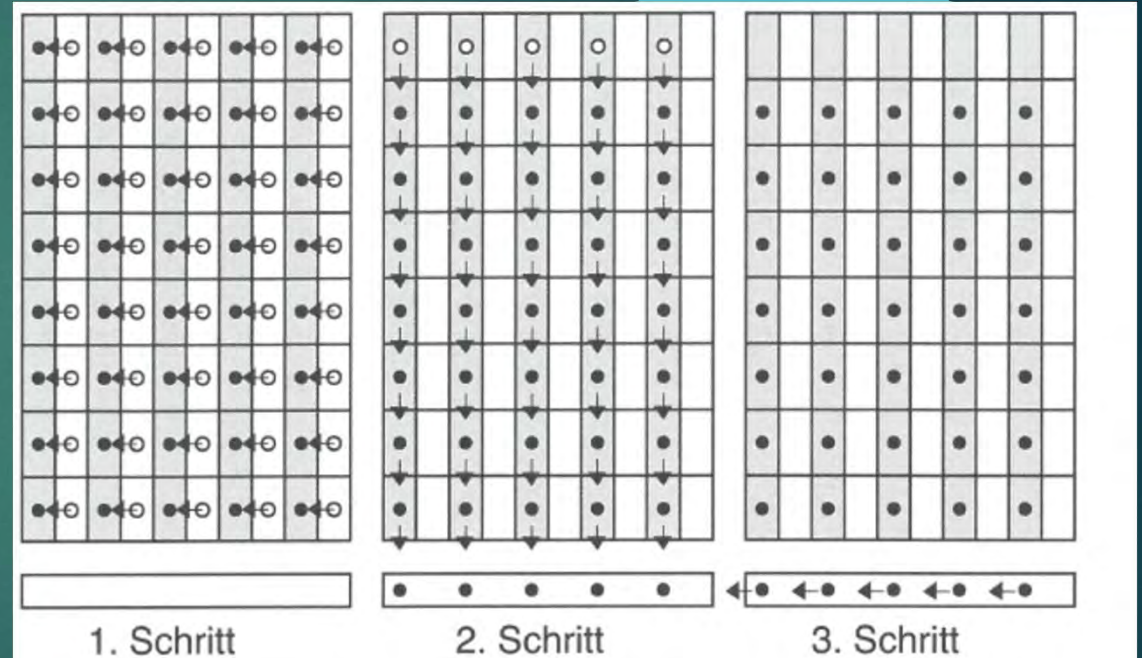
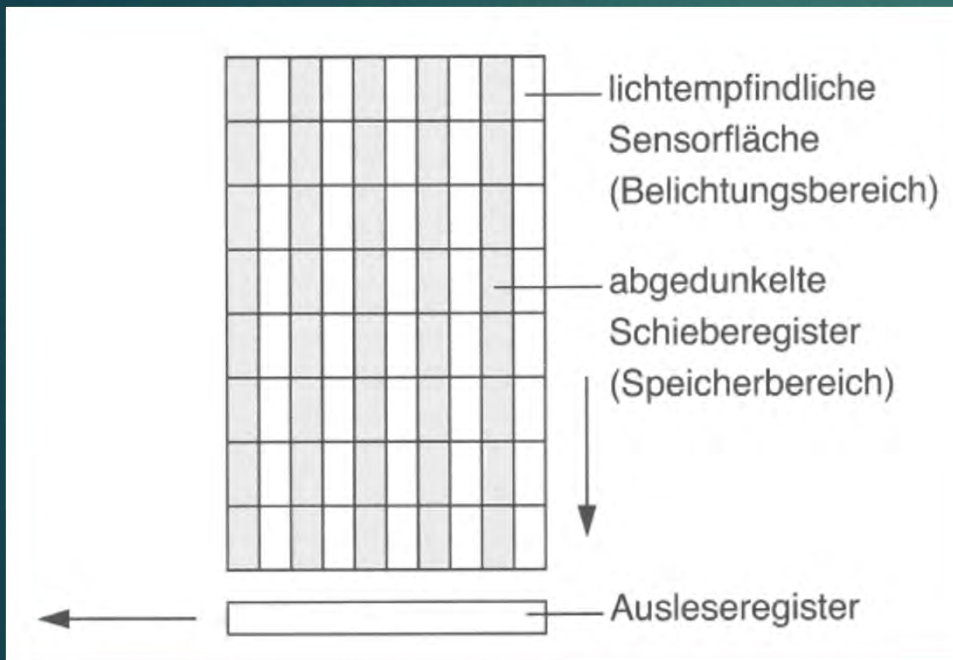
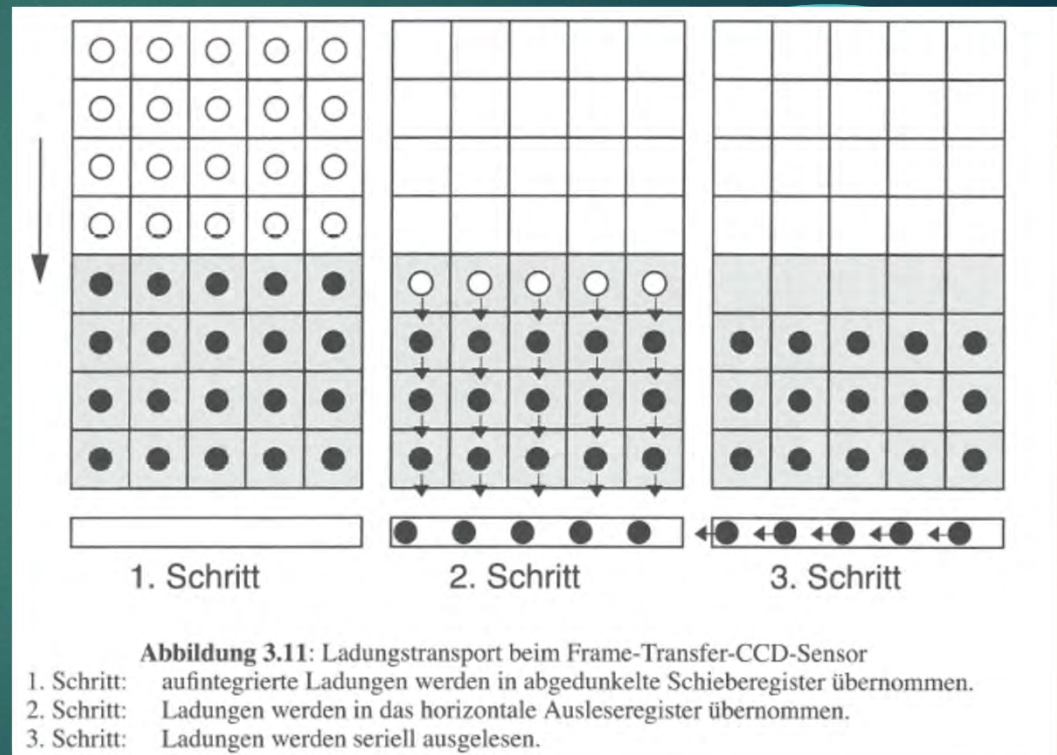
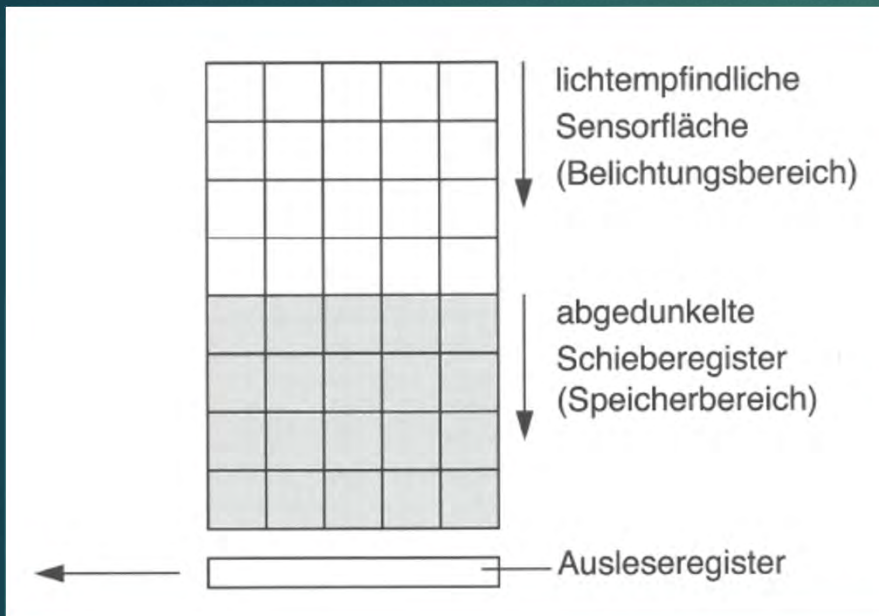


Abbildung 3.8: Ladungstransport beim Interline-CCD-Sensor

- 1. Schritt: aufintegrierte Ladungen werden in abgedunkelte Schieberegister übernommen.
- 2. Schritt: Ladungen werden in das horizontale Ausleseregister übernommen.
- 3. Schritt: Ladungen werden seriell ausgelesen.

Frame-CCD





CMOS-Sensoren

- ▶ Nicht für UV- oder IR-Bereich geeignet
- ▶ Der CMOS-Sensor oder eigentlich besser APS (Activ Pixel Sensor) ist ein Verwandter des CCD-Sensors. Nur sitzt bei diesem Chip nicht ein Ladungsverstärker am Ausgang des Chips, sondern jeder Pixel hat seinen eigenen Verstärker.
- ▶ Deswegen nennt man ihn auch APS. Neben der lichtempfindlichen Zelle müssen noch bis zu 6 Transistoren pro Pixel auf dem Sensor untergebracht werden, dies bedeutet, dass die Information jedes einzelnen Pixels direkt digitalisiert werden kann und nicht erst als Ladung verschoben werden muss. Dadurch ist es möglich, dass schon wieder belichtet wird, während die vorherigen Bilddaten noch ausgelesen werden, mehrere Pixel zusammen ausgelesen werden und nur Teile des Sensors verwendet werden.



Vor- / Nachteile v. CMOS-Sensoren

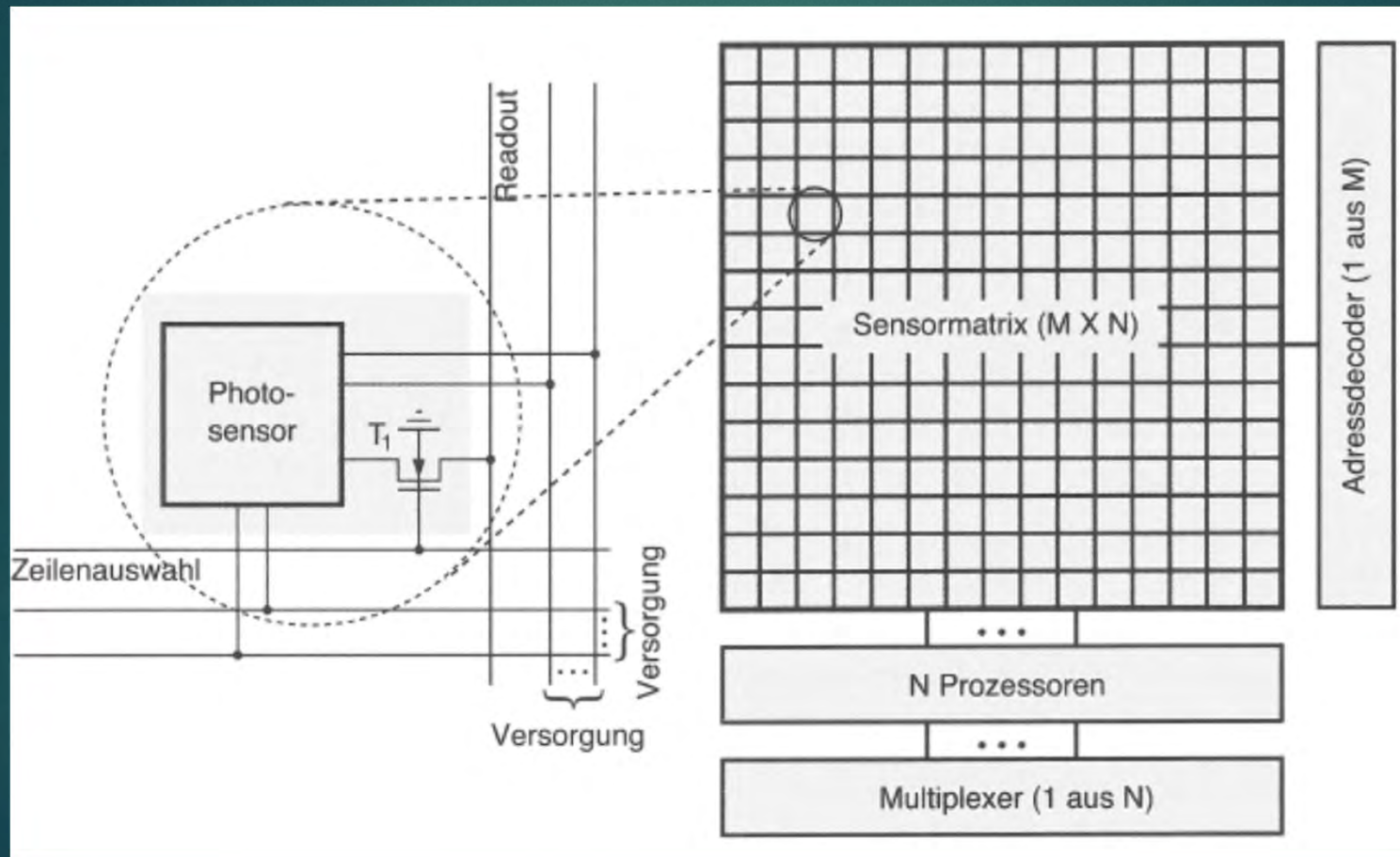
► Vorteile der CMOS-Sensoren:

- geringerer Stromverbrauch (ca. 10% bis 30% eines CCDs, teilw. wird von 1% gesprochen)
- günstiger herzustellen
- kaum Blooming / kein Pixelüberlauf
- variable Auslesbarkeit (jeder Pixel einzeln – ähnlich RAM-Speicher über Index)
- Gesamte Kamerafunktion auf einem Chip verbaubar (VLSI-Technik)
- Hohe Datenrate / schnelle Auslesegeschwindigkeit

► Nachteile:

- weniger effektive Fläche, geringere Empfindlichkeit, anfälliger für Rauschen
- ursprünglich schlechtere Bildqualität als beim CCD (Rauschen,...)

Aufbau eines CMOS-Sensors



Bauarten von CMOS-Sensoren / Verschaltung von CMOS-Pixeln

- ▶ Passive Pixel Sensoren (PPS)
- ▶ Aktive Pixel-Sensoren (APS)
- ▶ Aktive Pixel-Sensoren mit Photogate (Photogate APS)
- ▶ Pixel mit logarithmischer Kennlinie



Passive Pixel Sensoren (PPS)

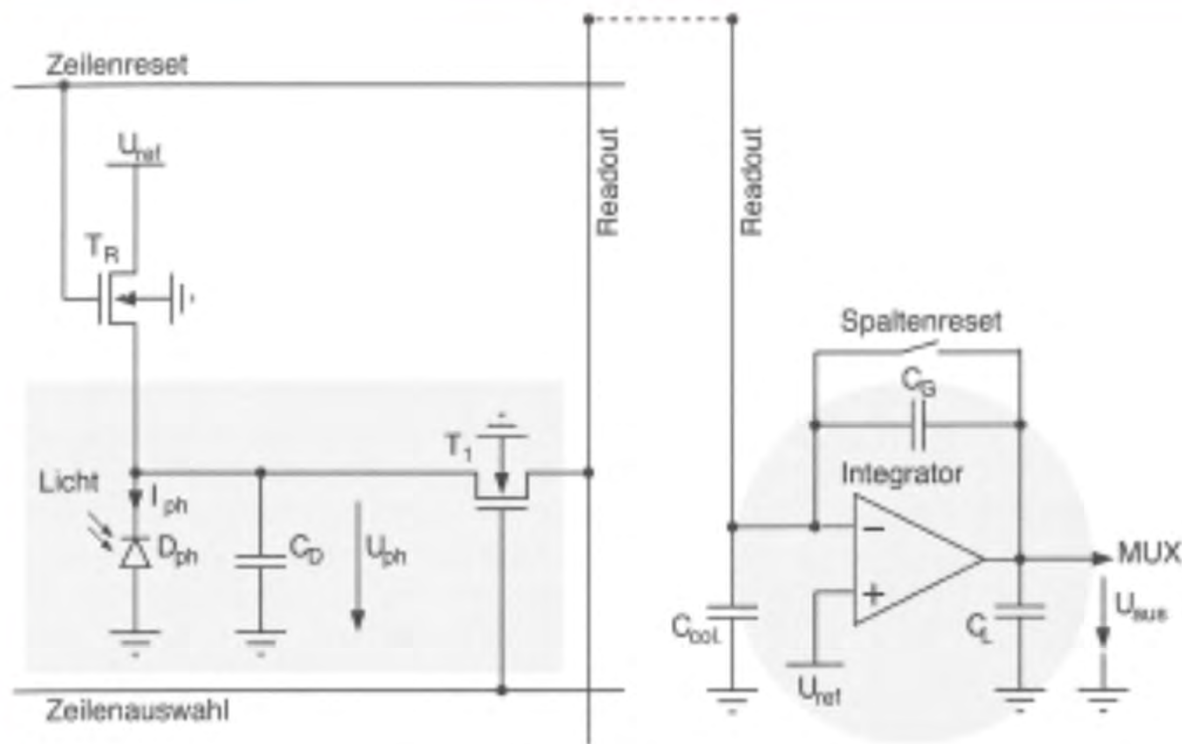


Abbildung 3.19: Passive Pixel Verschaltung

Das eigentliche Pixel ist mit einem grauen Rechteck unterlegt, der Prozessor mit einem grauen Kreis. Letzter ist für jede Spalte nur einmal vorhanden.

Aktive Pixel-Sensoren (APS)

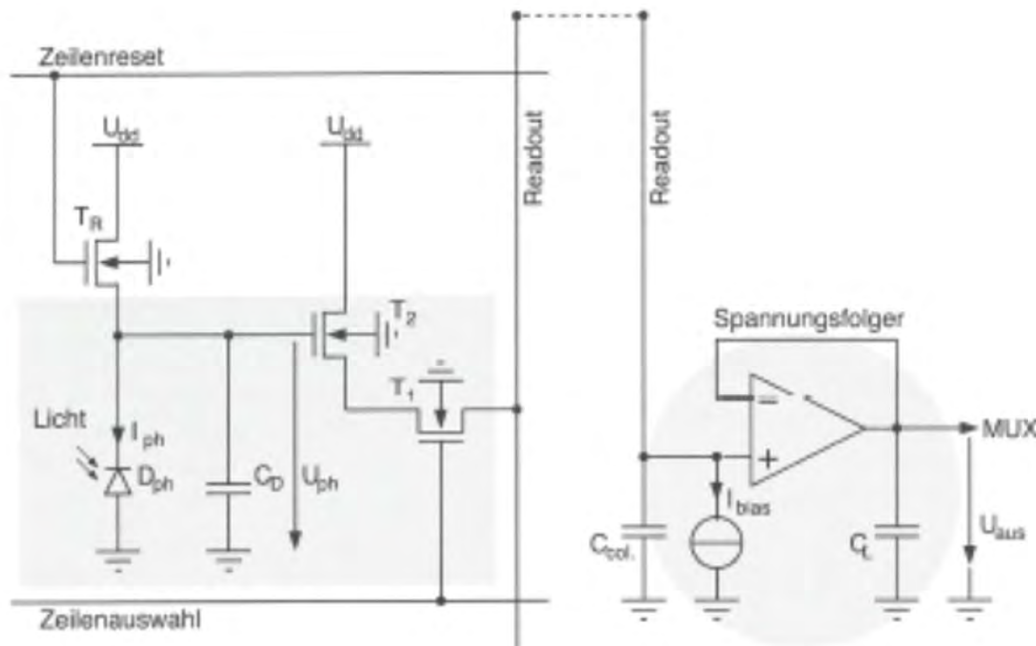


Abbildung 3.20: Active Pixel Verschaltung

Das eigentliche Pixel ist mit einem grauen Rechteck unterlegt, der Prozessor mit einem grauen Kreis. Letzter ist für jede Spalte nur einmal vorhanden.

Pixel mit logarithmischer Kennlinie

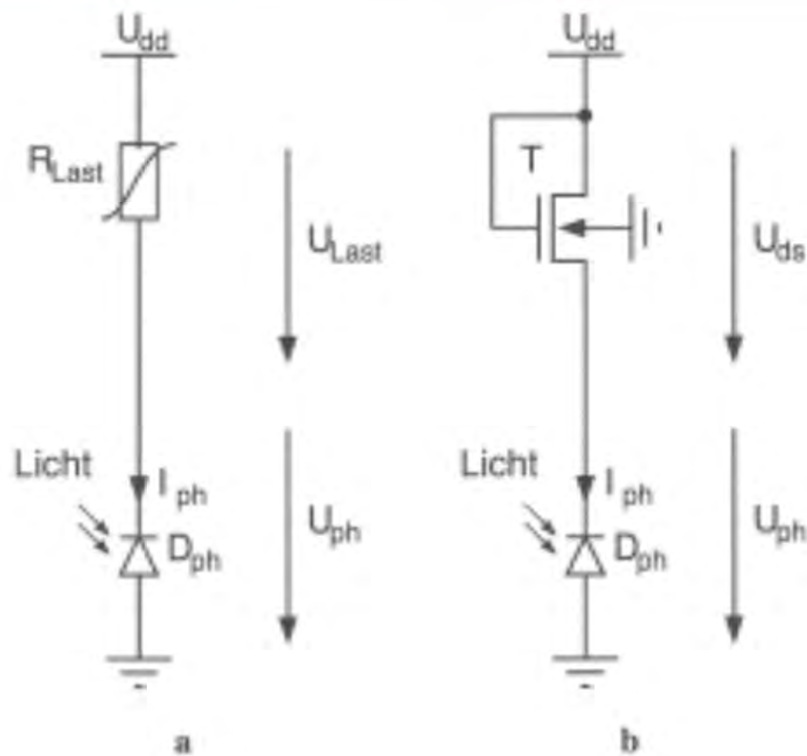


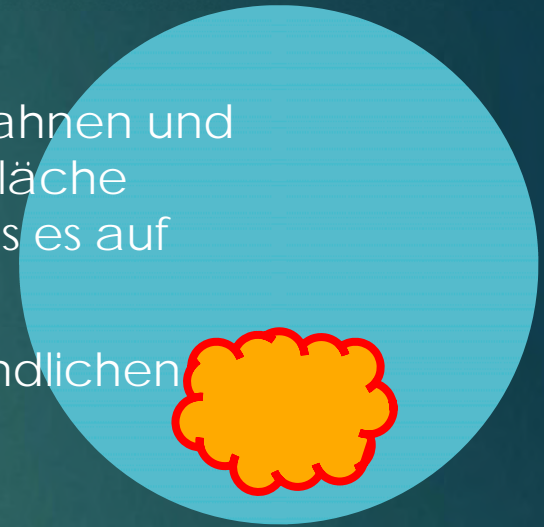
Abbildung 3.21: Prinzipschaltbild eines logarithmischen Pixels

- a) Prinzip mit nichtlinearem Widerstand
- b) Realisierung mit MOSFET Transistor in schwacher Inversion

	Nikon D810	Canon 5D Mark IV	Canon 5D Mark III
Preis	3230 Euro	4065 Euro	3300 Euro
Gehäuse Typ	SLR (mittel)	SLR (mittel)	SLR (mittel)
Material	Magnesiumlegierung	Magnesiumlegierung	Magnesiumlegierung
Sensor			
Maximale Auflösung	7360 × 4912	6720 × 4480	5760 × 3840
effektive Pixelzahl	36,3 Mio.	30,4 Mio.	22,3 Mio.
Sensortyp	CMOS	Dual Pixel CMOS	CMOS
Sensorgröße	35,9 mm × 24 mm	36 mm × 24 mm	36 mm × 24 mm
Crop-Faktor vs. KB	1 (KB-Format)	1 (KB-Format)	1 (KB-Format)
Seitenverhältnis (Aufnahmen)	3:2	3:2, 4:3, 16:9, 1:1	3:2
Prozessor	Expeed 4	DIGIC 6+	DIGIC 5+
Farbräume	sRGB, Adobe RGB	sRGB, Adobe RGB	sRGB, Adobe RGB
Bildformate	NEF (Raw, 12 o. 14 Bit), TIFF, JPEG	CR2 (14 Bit), Dual Pixel Raw, JPEG	CR2, (Raw 14 Bit), JPEG

BSI CMOS

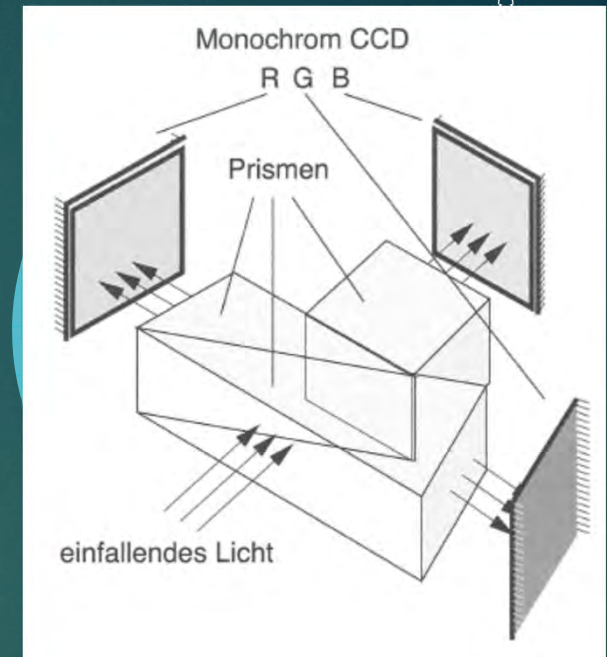
- ▶ Beim normalen CMOS Sensor liegen vor der eigentlichen lichtempfindlichen Schicht, sehr viele Schichten mit Leiterbahnen und Transistoren. Dadurch ist die eigentliche lichtempfindliche Fläche relativ klein und das Licht muss erst durch eine Art Tunnel, bis es auf diese trifft. Dadurch geht einiges an Licht verloren.
- ▶ Beim BSI CMOS ist die Elektronik daher hinter der lichtempfindlichen Fläche angebracht.
- ▶ nicht so einfach herzustellen
- ▶ BSI bedeuten back side illumination, wobei hier das illumination für Belichtung und nicht für Beleuchtung steht
- ▶ also bedeutet BSI rückseitige Belichtung





3-Chip-Kameras (veraltet ?)

- ▶ Wegen der Nachteile des Bayer-Farbfilters baute man hochauflösende CCD-Kameras als *Dreichip-Farbkameras*. Diese besitzen für jede Primärfarbe einen CCD-Sensor.
- ▶ Über vorgeschaltete Prismen wird das Licht in die drei Grundfarben RGB zerlegt und auf den jeweiligen Sensor gelenkt.
- ▶ Die drei CCD-Sensoren können dann in verschiedene Bildspeicherbereiche ausgelesen und getrennt verarbeitet.
- ▶ Dieser Kamerateyp produziert optisch einwandfreie Bilder und war bis vor wenigen Jahren die einzige Möglichkeit, bei digitalen Bildern verlustfrei Farben zu erzeugen.
- ▶ Der Nachteil ist aber, dass wegen der dreifachen Auslegung der gesamten Bildaufnahme-Sensoren und der zugehörigen Elektronik das Bauteil nur begrenzt minimiert werden kann, was der heutigen Tendenz von immer kleiner werdenden Kameras im Wege steht.








Belichtungsumfang

- ▶ Der Belichtungsumfang eines fotografischen Mediums gibt an, wie groß das Verhältnis zwischen der hellsten und dunkelsten gerade noch darstellbaren realen Helligkeit ist.
- ▶ Er wird häufig in Blendenstufen oder Lichtwerten angegeben.
- ▶ Die Änderung der Belichtung um eine Blendenstufe oder einen LW bedeutet eine Verdopplung oder Halbierung der Belichtung
- ▶ bei einem Belichtungsumfang von n Blenden/ LW kann das Verhältnis zwischen hellster und dunkelster Stelle im Motiv 1:2 betragen, ohne dass eine Über-/ Unterbelichtung stattfindet.



Belichtungsreihe

- ▶ In diesem Beispiel wurde von Bild zu Bild mit einem LW mehr belichtet. Dies wurde erreicht, in dem die Belichtungszeit jeweils verdoppelt wurde.

				
1/2000 s	1/250s	1/30s	1/8s	1/4s
+0 LW	+3 LW	+6 LW	+8 LW	+9 LW
1:1	1:8	1:64	1:256	1:1024

- ▶ Für das Beispiel wurden jeweils die Bilder an den Grenzen des Kontrastumfangs, die mittlere Belichtung und zwei Zwischenstufen ausgewählt. Anhand der Belichtungsreihe kann man den Kontrastumfang der Kamera abschätzen.
- ▶ Diese beträgt in etwa 9 Lichtwerte bzw. Blendenstufen. Für eine genauere Bestimmung muss man mit der Kamera ins Testlabor gehen und Aufnahmen mit kleineren Stufen durchführen.



Technische Werte - Gradation

Trägt man den Wert der Helligkeit dieser Bilder über der Belichtungszeit in einem Diagramm auf, dann erhält man folgenden Graphen. Dabei ist zu beachten, dass die Belichtungszeit in Sekunden logarithmisch angetragen ist. Die Darstellung ist also mit der Gradationskurve eines Film vergleichbar.

- ▶ In diesem kann man dann den Verlauf der Bildhelligkeit über der Belichtungszeit erkennen. Aus diesem Verlauf kann man Rückschlüsse auf den Kontrastumfang der Kamera und deren Gradationskurve ziehen:
- ▶ Der Graph nähert sich bei Belichtungszeiten kleiner 1/1000s (0,001s) der Nulllinie, d.h. das Bild wird schwarz.
- ▶ Ab ca. 0,001s Belichtungszeit steigt die Kurve kontinuierlich an.
- ▶ Zwischen 0,01s und 0,1s liegt der lineare Bereich. In diesem Bereich sollte der Hauptteil der Belichtung stattfinden.
- ▶ Bei ca. 0,1s ist die maximal speicherbare Helligkeit von 255 erreicht und der Graph knickt ab. Danach sind alle Bilder überbelichtet, d.h. die Belichtungszeit ist so lang, dass das ganze Bild weiß ist.
- ▶ Der für die Belichtung eines Bildes brauchbare Bereich liegt irgendwo zwischen 1/2000s und 1/4s.
- ▶ Aus diesem Graphen kann man auch erkennen, dass es besser ist, Digitalfotos lieber etwas geringer zu belichten, als es zu riskieren, überbelichtete Bereiche zu haben: der Übergang zwischen Unterbelichtung und linearem Bereich ist sanft wohin gegen der Übergang zur Überbelichtung hart ist.





Technische Werte - Empfindlichkeit

- ▶ Die Empfindlichkeit gibt wie beim Analogfilm an, wie viel Belichtung nötig ist, um eine bestimmte Helligkeit im Bild zu erzeugen.
- ▶ Sprich: bei höherer Empfindlichkeit muss weniger belichtet werden, um ein genauso helles Bild zu erhalten.
- ▶ Die verstellbare Empfindlichkeit bei einer Digitalkamera ist eigentlich ein Verstärkungsfaktor der angibt um welchen Faktor die Signale vor dem Digitalisieren erhöht werden. Dabei sind nach oben hin erst mal keine Grenzen gesetzt, nur nimmt das Bildrauschen bei höheren Verstärkungsfaktoren extrem zu, so dass es eine sinnvolle Obergrenze gibt.
- ▶ Die Angabe der Empfindlichkeit wird analog zum Film in ISO-Werten angegeben und kann, je nach Kamera, im Extremfall zwischen 50 und 25600 variiert werden. Normale Werte liegen zwischen 100 und 1600. Darüber kommt es zu vermehrtem Bildrauschen.



Vorteile elektronischer Sensoren

- ▶ Bildsensoren erzeugen nicht nur während der Aufnahme, sondern auch davor schon Bilder und die Kamera kann diese auf dem Display darstellen. Diese Bilder entsprechen dann genau dem, was beim Auslösen gespeichert wird, also ohne Parallaxenfehler.
- ▶ Das ermöglicht Ansichten wie bei einer Spiegelreflexkamera, ohne dass jedoch ein Spiegel benötigt wird. Wobei das Bild auf dem Display, bedingt durch die Auflösung des selbigen, weniger detailliert ist, als das auf der Mattscheibe einer Spiegelreflexkamera.
- ▶ Wenn der Monitor einen großen Blickwinkel zulässt oder sogar schwenkbar ist, kann man mit so einer Kamera aus verschiedensten Positionen (z.B. über Kopf) kontrollierte Fotos schießen.
- ▶ Realisierung von Live-Histogramm, Bildschirmlupe, Belichtungsvorschau, Weißabgleichvorschau usw.
- ▶ weitere mögliche Aufgaben des Sensors: Belichtungsmessung und Fokussieren mit Vor- und Nachteilen



Nachteile elektronischer Sensoren

- ▶ Ev. geringerer Belichtungsumfang
 - ▶ Blooming
 - ▶ Purple Fringing
 - ▶ Bildrauschen
-
- ▶ Aber: Chips werden immer besser





Probleme und -lösungen

- ▶ Ein Problem bei der Digitalisierung ist das mögliche Auftreten von Aliasing-Effekten wie das Moiré. Dies kann auftreten, wenn sehr feine Strukturen oder Muster fotografiert werden sollen. Wenn also der Sensor zu grob für das Muster auflöst, kann es im Bild zu unschönen Effekten kommen. Richtig auffällig wird Moiré, wenn das Muster nicht eben und senkrecht zur Blickrichtung liegt.
- ▶ Um das zu vermeiden, erzeugt ein Tiefpassfilter (Anti-Aliasing) vor dem Sensor eine leichte Unschärfe, welche später im Bild nicht zu erkennen ist, aber genügt, Aliasing zu verhindern.
- ▶ Ein Anti-Aliasing-Filter ist wie immer in der Digitaltechnik ein Tiefpassfilter, welcher Frequenzen größer als das 2-fache oder 2,5-fache der Auflösung bzw. Abtastfrequenz aus dem Analogsignal filtert.

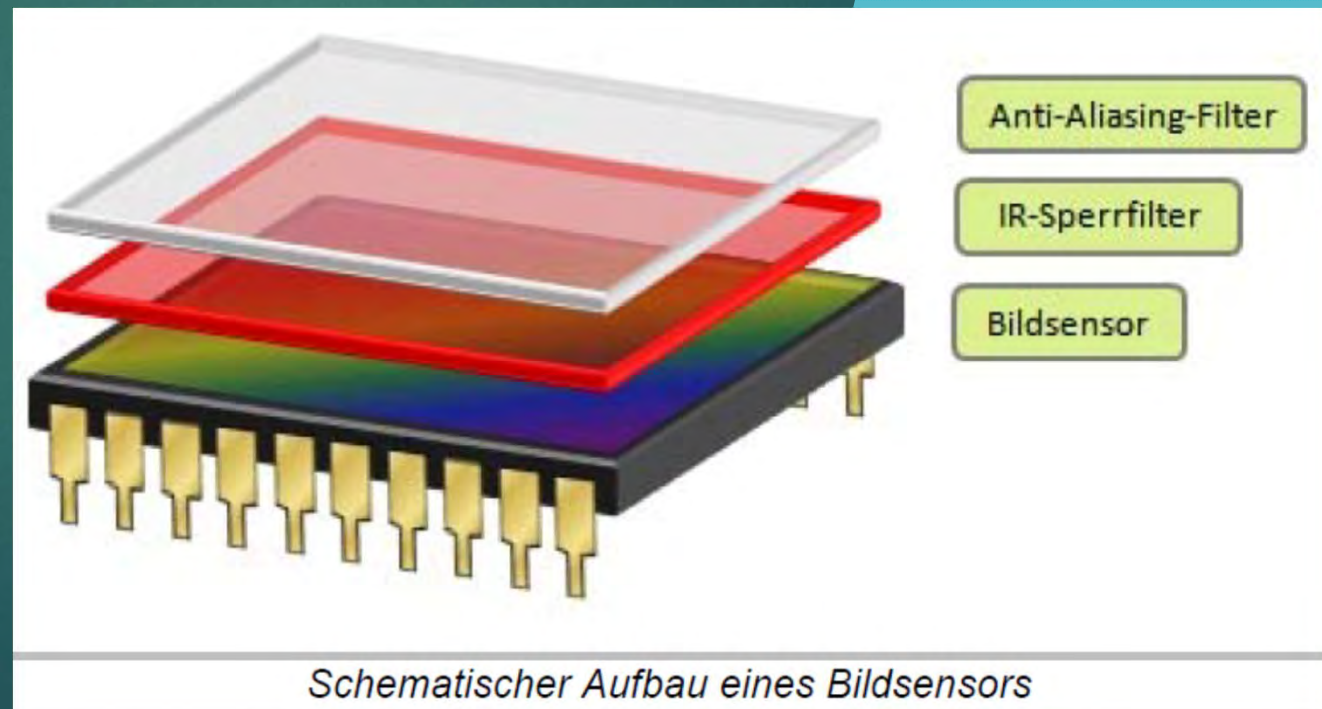


Ohne und mit Anti-Aliasing-Filter



Probleme und -lösungen

- ▶ Da Fotosensoren auch für Infrarotlicht empfindlich sind, sitzt vor dem Sensor ein IR-Sperrfilter um zu verhindern, dass infrarote Strahlung die Bildqualität verschlechtert.





Blooming

- ▶ Blooming tritt auf, wenn ein Pixel viel mehr Licht abbekommt, als er eigentlich in der Lage ist, in Ladung umzuwandeln.
- ▶ Dann passiert es, dass er "überläuft" und seine Ladung an benachbarte Pixel abgibt. Dies kann sich dann auf weitere Pixel in der Nähe vorsetzen und zu großen, überbelichteten Stellen im Bild führen.
- ▶ Vor allem Nachtaufnahmen mit künstlichen Lichtquellen sind für diesen Effekt anfällig.
- ▶ Oft tritt dieser Fehler kombiniert mit Purple Fringing (lila Farbsaum) auf. Nachtaufnahmen lässt er sich relativ schlecht vermeiden. Durch eine geringere Belichtung der Bilder (ca. 1 bis 2 Blenden) und einer nachträglichen Aufhellung am Rechner kann man durchaus brauchbare Ergebnisse erzielen.
- ▶ Ein ähnlicher Effekt wie Blooming ist das so genannte Smearing (Verschmieren) welches immer dann auftritt, wenn kein mechanischer Verschluss nach der Belichtungszeit den Sensor vor weiterem Lichteinfall schützt. Deswegen tritt dieser Effekt fast ausschließlich auf, wenn entweder gefilmt wird oder ein Motiv mit einer hellen Lichtquelle auf dem Monitor betrachtet wird.
- ▶ Beide Probleme sind CMOS-Probleme





Purple Fringing

- ▶ Purple Fringing meint die lila Farbsäume, welche sich um sehr helle Bildbereiche bilden können. Sie treten vornehmlich dann auf, wenn sehr helle Bildbereiche und dunkle aneinandergrenzen, so wie in nebenstehendem Bild.
- ▶ Auch bei Ästen vor sehr hellem Himmel oder auch bei hellweißen Flächen oder bei Lichtquellen bei Nachtaufnahmen.
- ▶ Ursache dafür ist nicht Blooming oder chromatisch Aberration sondern Licht, welches am IR-Sperrfilter und anschließen an der Hinterlinse wieder zurück auf den Sensor reflektiert wird. Je nachdem, wie der Filter und die Hinterlinse vergütet sind, kommt je nach Kameramodell zu mehr oder weniger purple fringing.
- ▶ Beim Fotografieren hat man relativ wenige Möglichkeiten, solche Farbsäume zu vermeiden: entweder man fotografiert mit einer kleineren Blende, belichtet etwas geringer, als nötig oder vermeidet Motive, welche anfällig dafür sind.
- ▶ Nachträglich kann man diese Farbsäume entweder mit einer speziellen Funktion der Software oder durch manuelle Entsättigung reduzieren.





Rauschen

- ▶ Rauschen ist eines der typischen Probleme elektronischer Bauteile und Geräten, es tritt immer auf. Damit es sich nicht störend auswirken kann, muss man entweder dafür sorgen, dass das Nutzsignal eine um vielfach höhere Amplitude aufweist als das Rauschsignal oder man muss das Rauschen mit geeigneten Mitteln aus dem Signal herausfiltern. Filtern ist aber immer die schlechtere Wahl, da dabei auch immer etwas an Nutzsignal verloren geht.
- ▶ Bei Fotosensoren treten zwei Arten von Rauschen auf: fixed pattern noise und thermisches Rauschen.
- ▶ Das fixed pattern noise wird durch die Streuung der Empfindlichkeiten der einzelnen Pixel auf dem Sensor verursacht. Die einzelnen Pixel auf der Sensorfläche erzeugen, bei gleichem Lichteinfall, ein leicht unterschiedliches Signal. Dadurch entsteht ein Muster, welches typisch für jeden einzelnen Sensor ist. Daher kann es leicht kameraintern aus dem Bild gerechnet werden. Dazu ist eine so genannte Weißkalibrierung nötig.



Rauschen

- ▶ Beim thermischen Rauschen handelt es sich tatsächlich um ein zufälliges Signal. Ursache dafür ist, dass in den einzelnen Pixel nicht nur durch Lichteinfall Ladungen erzeugt werden, sondern auch durch Wärme. Dieses tritt umso mehr auf, desto wärmer der Chip in der Kamera wird.
- ▶ Man spricht dabei auch vom Dunkelstrom. Dieser ist proportional zur Wärme des Sensors. Dabei ist aber nicht jeder Pixel gleich anfällig für diesen Dunkelstrom. Ursachen dafür sind ganz normale Verunreinigungen im Silizium und Toleranzen bei der Fertigung.
- ▶ Außerdem rauschen auch alle weiteren elektronischen Bauteile im Analogteil des Sensors und tragen ihren Anteil zum Gesamtrauschen bei.
- ▶ Sichtbar wird Rauschen aber erst, wenn der Signal-Rauschabstand gering wird, d.h. solange genügend Nutzsignal vorhanden ist, wird das Rauschsignal nicht wahr genommen.
- ▶ Wenig Nutzsignal liegt vor wenn bei geringer Helligkeit fotografiert wird, also z.B. bei Nachtaufnahmen. Um ein erkennbares Bild zu erhalten muss dann mit einer höheren Empfindlichkeit = Verstärkung fotografiert werden. Dies führt zu Bildrauschen.



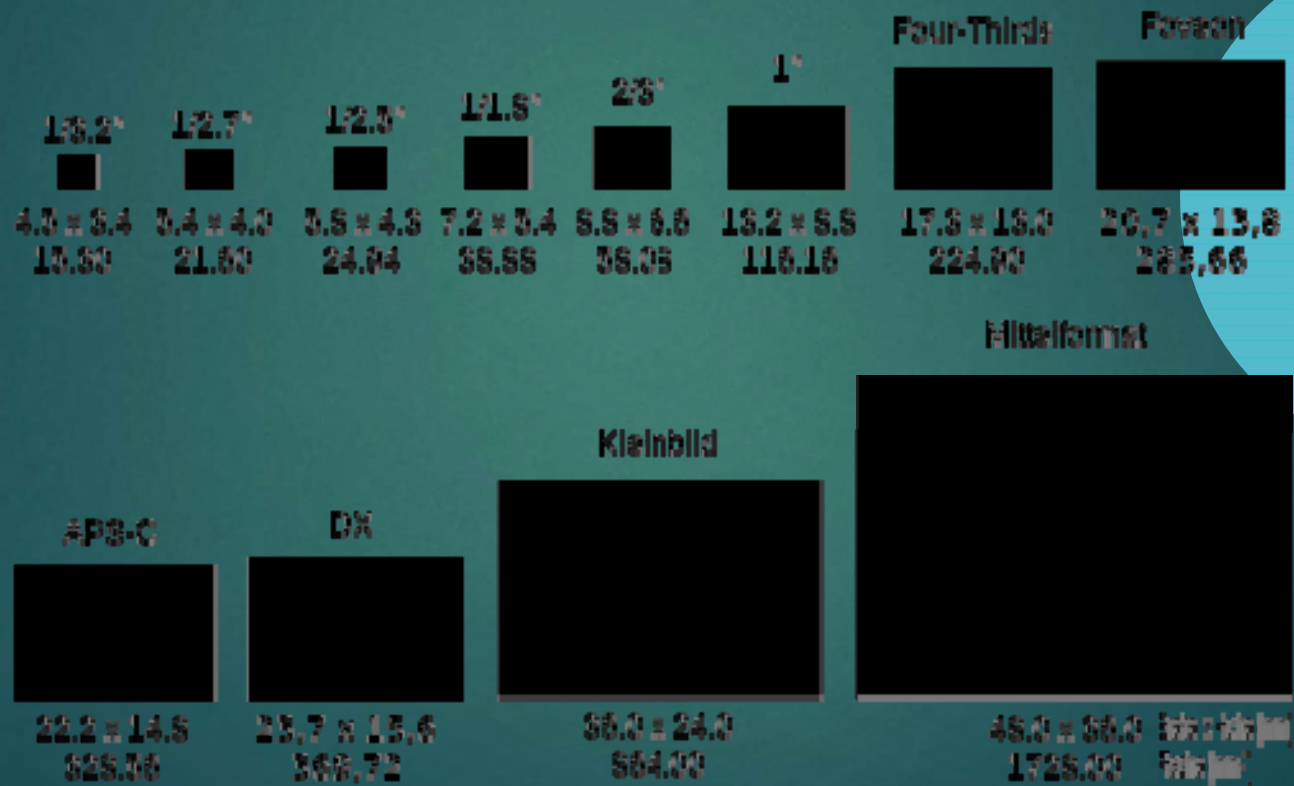
Rauschen

- ▶ Dieses tritt vor allem bei kleinen Sensoren mit hoher Pixelanzahl auf, denn bei diesen sind die Pixel sehr klein. Kameras mit großen Sensoren neigen weniger zu Bildrauschen, da größere Pixel mehr Licht abbekommen und deswegen mehr Signal erzeugen, was weniger stark verstärkt werden muss.
- ▶ Wenig Nutzsignal und hohe Verstärkung führt zu sichtbarem Rauschen.
- ▶ Einfaches Beispiel dazu ist die Stereo-Anlage. Wenn dort eine gut ausgesteuerte CD abgespielt wird, hört man das ständig vorhandene Rauschen nicht. Wird aber bei einer leisen Passage die Lautstärke am Verstärker erhöht, kann man das Rauschen hören.



Sensorgröße

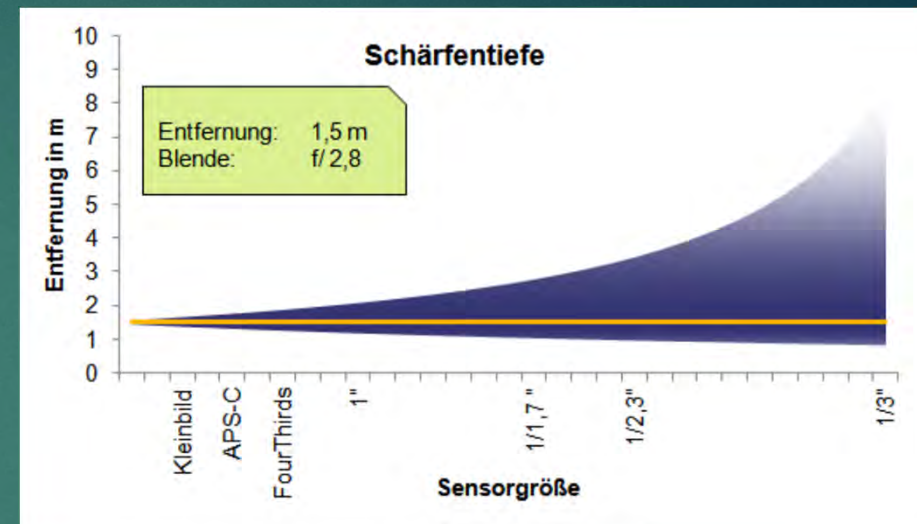
Gängige Formate von Kamerasensoren





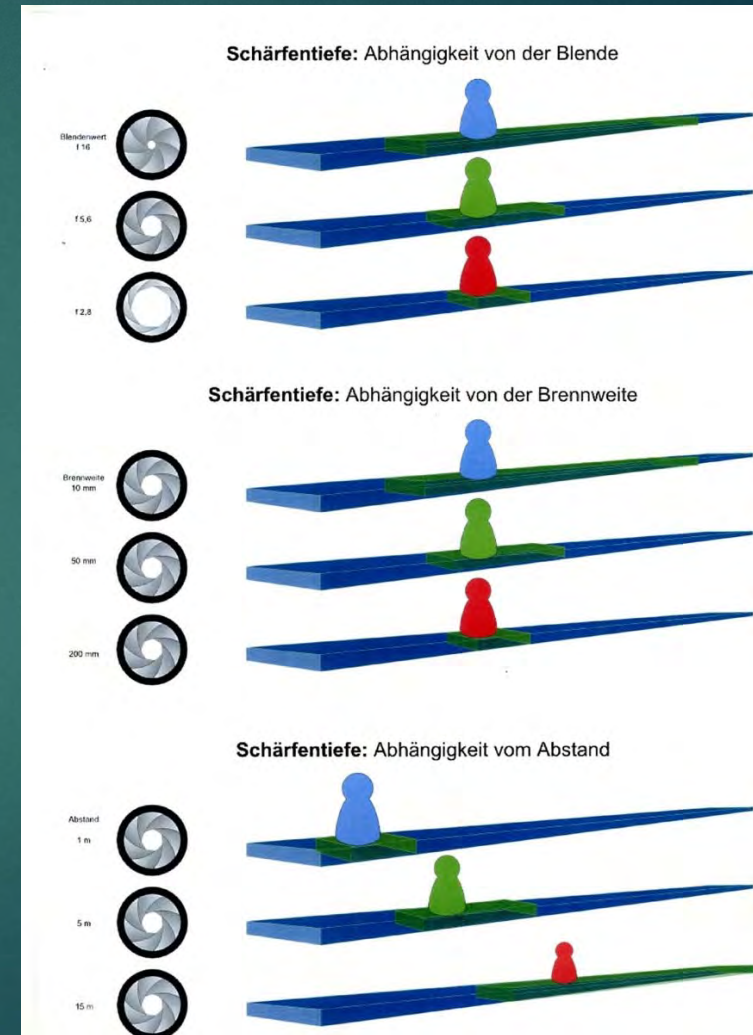
Sensorgröße - Schärfentiefe

- ▶ Viele Digitalkameras haben kleinere Sensoren. Damit ein gleich großes Foto entsteht wie bei einer Kleinbildkamera, muss das Bild des Sensors und damit auch die Unschärfekreise, stärker vergrößert werden. Dadurch sinkt die Schärfentiefe.
- ▶ Da, um den gleichen Abbildungsmaßstab zu erreichen, mit einem kleineren Sensor auch die Brennweite geringer wird, steigt die Schärfentiefe. Die beiden Effekte arbeiten also gegeneinander.



Schärfentiefe allgemein

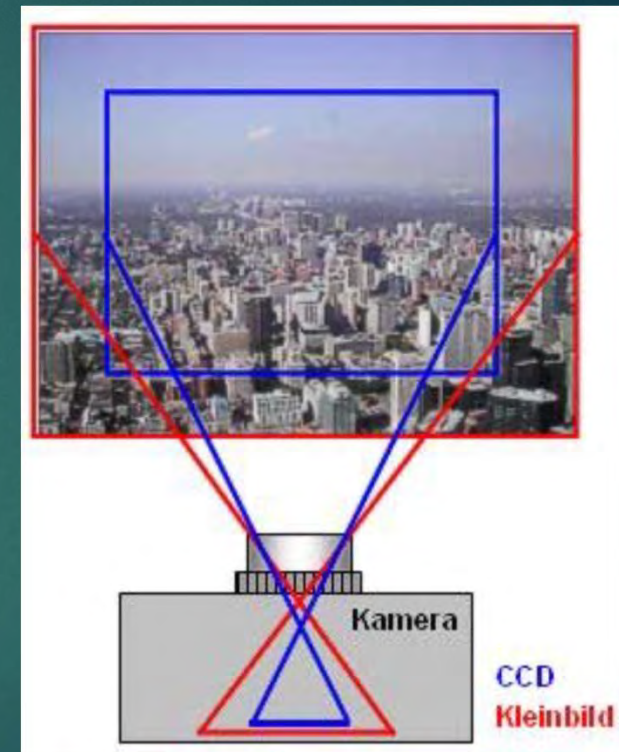
- ▶ Damit gibt es 4 Abhängigkeitskriterien bezüglich Schärfentiefe:
- ▶ Von der Blende
- ▶ Von der Brennweite
- ▶ Vom Abstand des Objektes zum Objektiv
- ▶ Von der Sensorgröße





Crop-Faktor

- ▶ Eigentlich sind digitale Bildsensoren fast immer kleiner als ein Kleinbildnegativ. Es gibt nur wenige Kameras mit einem so genannten Vollformatsensor. Das wäre Kleinbildformat, also 24 mm x 36 mm
- ▶ Selbst die meisten digitalen Spiegelreflexkameras verwenden einen kleineren Sensor, fast immer im Format APS-C (23,7 mm x 15,7 mm) oder vergleichbar.
- ▶ Die Bilddiagonale beider Formate sind ca. um den Faktor 1,5 bis 1,6 verschieden.
- ▶ Der digitale Sensor ist kleiner als das Kleinbildnegativ und kann deswegen nur einen kleineren Ausschnitt aufzeichnen.



Crop-Faktor

- ▶ Wenn der gleiche Ausschnitt fotografiert werden soll, dann muss ein Objektiv mit einem größeren Formatwinkel und damit einer kürzeren Brennweite verwendet werden. Deswegen werden an Digitalkameras kleinere Objektive mit kürzerer Brennweite benötigt, um den gleichen Bildinhalt wie eine Kleinbildkamera zu haben.
- ▶ Der Faktor zwischen beiden Brennweiten ist genauso groß, wie der Faktor zwischen beiden Diagonalen und wird als Crop-Faktor oder Formatfaktor bezeichnet.
- ▶ System- und Kompaktkameras haben meist noch kleinere Sensoren und daher einen noch größeren Cropfaktor.
- ▶ Falsch ist es, wenn man von einer (virtuellen) Brennweitenverlängerung spricht, denn es handelt sich eigentlich um eine Formatwinkelverkleinerung, welche durch eine Veränderung der Brennweite kompensiert wird.



Vor- und Nachteile großer Sensoren

Vorteile:

- ▶ mehr Qualität (weniger Bildrauschen)
- ▶ mehr kreativer Spielraum (Schärfe-Unschärfe)

Nachteile:

- ▶ größere Bildsensoren sind teuer
- ▶ es werden qualitativ bessere Objektive benötigt (kosten mehr, wiegen mehr)
- ▶ das Kameragehäuse ist größer und schwerer





Vor- und Nachteile kleiner Sensoren

Vorteile:

- ▶ kompakte Kameras
- ▶ geringerer Stromverbrauch
- ▶ günstigere Herstellkosten

Nachteile:

- ▶ geringere Lichtempfindlichkeit
- ▶ stärkeres Rauschen
- ▶ geringerer Tiefenunschärfefefferkt





Shutter- Fehler (1)

- ▶ **Rolling Shutter-Effekt tritt auf bei:**

- ▶ Digitalkameras mit Bildwandlern in CMOS-Sensor-Technik. Diese Sensoren lesen das Bild zeilen- oder spaltenweise aus.
- ▶ Kameras mit Schlitzverschluss. Der Effekt tritt hierbei besonders deutlich zutage, wenn das Motiv mit einem Stroboskop beleuchtet wird.





Shutter- Fehler (2)

► Falsche Belichtungszeit - Shuttergeschwindigkeit – Verhältnis:

- Kann beim Filmen mit einer DSLR entstehen (Belichtungszeit und Framerate können separat eingestellt werden)
- Die Belichtungszeiten sollten im Idealfall ganzzahlige Teiler vom Kehrwert der Framerate sein, also bei 25 fps wären das $1/25$, $1/50$, $1/75$, $1/100$, $1/125$, $1/150$, $1/175$ Sek
- Die 180 Grad-Shutter-Regel besagt, dass man mit einer Belichtungszeit von $1/(\text{Framerate} * 2)$ belichten soll
- Resultat bei Nichteinhaltung -> pulsierendes Bild



Weitere Sensortypen

- ▶ Spektralabhängige Sensoren
- ▶ Intelligente TFA-Sensoren