

Wie groß darf's sein?

Pixelgröße beeinflusst Bildqualität und Empfindlichkeit von Bildsensoren

Die Anzahl der Bildpunkte oder Pixel in Bildsensoren ist sowohl bei Fotoapparaten und Handy-Kameras, als auch bei digitalen Kamerasystemen für Messzwecke, wie sie in der industriellen Bildverarbeitung oder in der Forschung zu finden sind, von zentraler Bedeutung. Generell ist der Trend zu höheren Auflösungen erkennbar, weil sie mehr Informationsgehalt versprechen. Begrenzt durch die existierenden Formate der abbildenden Optiken und deren Preis sowie durch akzeptable Baugrößen bei Kameragehäusen und durch den Ertrag pro Wafer ergeben sich deshalb bei höheren Auflösungen kleinere Abmessungen der eigentlichen Pixel. Da man in den meisten Anwendungen nicht unbegrenzt Licht zur Verfügung hat, stellt auch die Empfindlichkeit der Pixel einen sehr wichtigen Parameter für den erfolgreichen Einsatz einer Kamera dar. Welchen Einfluss hat also die Pixel-Größe auf die Bildqualität und Empfindlichkeit genau?

Füllfaktor und Mikrolinsen

Bevor die eigentliche Pixelgröße betrachtet wird, ist zu bestimmen, wie effizient ein Pixel Licht einfängt. Der dazu geeignete Parameter ist der Füllfaktor, der als das Verhältnis von lichtempfindlicher Fläche zur Gesamtfläche des Pixels definiert ist. Bedingt durch Ansteuerleitungen, notwendige elektrische Bauteile oder abgedunkelte Register ist unabhängig von der Technologie, CCD oder CMOS, immer ein Teil der Pixelfläche lichtunempfindlich. Dies fällt bei kleineren Pixeln mehr und bei größeren weniger ins Gewicht.

Sowohl CMOS- als auch CCD-Bildsensoren setzen Silizium als Detektormaterial ein. Da CMOS-Bildsensoren verglichen mit CCD-Bildsensoren mehr elektrische Bauteile pro Pixel benötigen, waren sie früher weniger empfindlich. Die CCD-Hersteller hatten zudem mit dem Problem des Füllfaktors mehr Erfahrung und kompensierten

schlechte Füllfaktoren durch den Einsatz von Mikrolinsen (Abbildung 1 [c]).

Während, wie in Abbildung 1 zu sehen ist, bei kleinerer lichtempfindlicher Fläche ein Teil des Lichts verloren geht, gelingt es der Mikrolinse (Abbildung 1[c]) das auf das Pixel fallende Licht auf den kleineren lichtempfindlichen Teil zu fokussieren. Wird nun der tatsächliche Füllfaktor durch einen effektiven Füllfaktor ersetzt, ist letzterer deutlich größer. Gleiches gilt für den physikalischen Parameter, der die Empfindlichkeit eines Photodetektors beschreibt: Der Quantenwirkungsgrad gibt an, wieviele Photonen Ladungsträger und somit ein Signal erzeugen. Tabelle 1 zeigt die Parameter lichtempfindliche Fläche, Quantenwirkungsgrad und Signal bei unterschiedlichen Füllfaktoren.

Bei der Optimierung der genannten Parameter sind neben höheren Kosten in der Herstellung einige physikalische und technologische Beschränkungen zu berücksichtigen. So kann für Pixel, die eine Kantenlänge von mehr als $12\ \mu\text{m}$ haben, die Schichtdicke bzw. der Abstand von der eigentlichen Oberfläche des Bildpunkts nicht groß genug gemacht werden, um eine gute Linse zu erzeugen. Der erforderliche Abstand und die Dicke sind direkt proportional zur Fläche des Pixels, was eine Größenbeschränkung für Mikrolinsen darstellt.

CMOS Pixel haben einen begrenzten maximalen Füllfaktor, denn aufgrund der Halbleiter-Herstellungsprozesse sind mindestens 25 % der Pixelfläche mit einer Metallschicht bedeckt, woraus sich ein maximaler Füllfaktor von 75 % ergibt.

Grundsätzlich muss man auch beachten, dass lichtempfindliche Flächen größer als $25\ \mu\text{m} \times 25\ \mu\text{m}$ schwierig zu realisieren sind, weil physikalisch der Weg der durch Licht entstandenen Ladungsträger zu den Zuleitungen zunimmt und damit auch die Wahrscheinlichkeit von nicht erwünschten Ereignissen wie Rekombination.

Vergleich von Bildsensoren

Fällt Licht auf Bildsensoren mit unterschiedlicher Pixelfläche, z. B. einen Bildsensor mit

DER AUTOR

GERHARD HOLST

Gerhard Holst studierte Nachrichtentechnik an der RWTH Aachen. Er promovierte an der Universität Dortmund und dem MPI für Systemphysiologie über einen neuartigen optisch chemischen Sensor und dessen Mess-System für die Medizintechnik. Nach 7 Jahren in der Mikrosensorenforschung des MPI für Marine Mikrobiologie, Bremen, wechselte er zur PCO AG. Dort leitet er die Wissenschafts- und Forschungsabteilung.



Gerhard Holst
PCO AG
Donaupark 11
93309 Kelheim, Deutschland
Tel.: +49 (0)9441 2005 36
Fax: +49 (0)9441 2005 20
E-Mail: gerhard.holst@pco.de
Website: www.pco.de

der vierfachen Pixelfläche eines anderen Bildsensors, so ist zuerst einmal nachvollziehbar, dass das größere Pixel in derselben Zeit viermal so viele Photonen sammelt wie das kleinere. Daraus ergibt sich die häufig zu findende Einschätzung, dass große Pixel immer viel empfindlicher sind. Dies ist allerdings nur ein Kriterium zum Vergleich von Kameras mit unterschiedlichen Pixelgrößen. Wie man in der Entwicklung der größer werdenden Pixel in Abbildung 2 sieht, wird zwar der Bildsensor immer „empfindlicher“, aber leider sinkt der Informationsgehalt des Bildes.

Vergleicht man zwei Kameras mit unterschiedlichen Pixelgrößen unter Annahme des gleichen Informationsgehalts ergibt sich etwas anderes als die Einschätzung, große Pixel seien immer empfindlicher. Als maßgeblicher Parameter dient hierfür das Signal-Rausch-Verhältnis.

Der Einfachheit halber wird angenommen, dass beide Bildsensoren die gleiche quadratische Fläche haben und dass Bild-

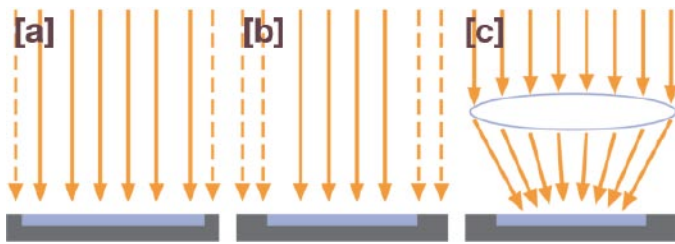


ABB. 1: Nur Licht (orangene Pfeile), das auf die lichtempfindliche Fläche (blau) eines Pixels (Querschnittsansicht) trifft, trägt zum gemessenen Signal bei: [a] Pixel mit 75 % Füllfaktor, [b] Pixel mit 50 % Füllfaktor und [c] Pixel mit 50 % Füllfaktor und Mikrolinse.

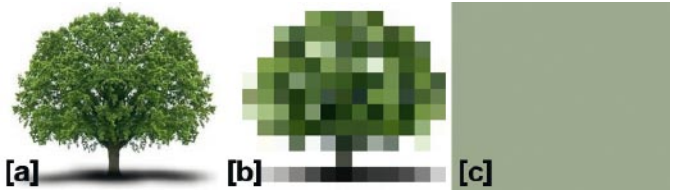


ABB. 2: Vergleich des Ergebnisses, wenn ein Objekt wie z. B. ein Baum mit unterschiedlichen Auflösungen aufgenommen wird: [a] hohe Auflösung, [b] niedrige Auflösung und [c] 1 Pixel Auflösung.

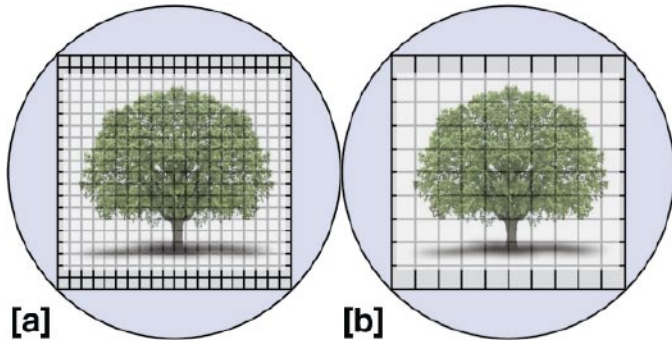


ABB. 3: Illustration zweier quadratischer Bildsensoren innerhalb des Bildkreises desselben Objektivs, welches das Bild eines Baumes abbildet. Bildsensor [a] hat Pixel mit einem Viertel der Fläche der Pixel von Bildsensor [b].

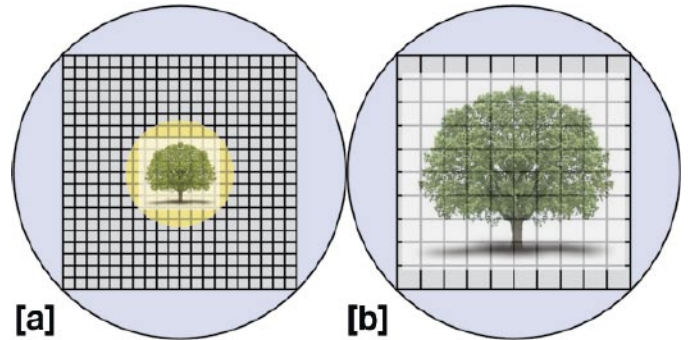


ABB. 4: Illustration zweier quadratischer Bildsensoren innerhalb des Bildkreises desselben Objektivtyps (z.B. F-Mount). Der Baum wird jeweils auf die gleiche Anzahl von Pixeln abgebildet durch unterschiedliche Brennweiten.

sensor [a] die vierfache Auflösung von Bildsensor [b] hat. Zum Vergleich der beiden Bildsensoren kann man sich der Situation auf zwei Arten nähern. Dazu wählt man Bereiche, so dass entweder die Gesamtfläche oder die Auflösung konstant gehalten wird.

Konstante Gesamtfläche

In Abbildung 3 ist die zu betrachtende Fläche konstant gehalten. Damit bleiben Bildkreis, Brennweite, Blendenöffnung, Objektstand und Lichtdicke gleich, aber Auflösung und Pixelgröße sind verschieden. Zudem wird angenommen, dass der effek-

tive Quantenwirkungsgrad ebenfalls gleich sei, die Bildsensoren und Pixel quadratisch seien und vom Bildkreis des Objektivs ausgeleuchtet werden.

Bildsensor [a] mit der hohen Auflösung hat also Pixel mit einem Viertel der Fläche von Bildsensor [b]. Bei gleicher Beleuchtung wird also jedes Pixel von Bildsensor [a] ein Viertel des Lichts einsammeln, welches ein Pixel von Bildsensor [b] aufnimmt (Abbildung 3). Es stellt sich nun die Frage, welcher Bildsensor das größere Signal sieht und das bessere Signal-Rausch-Verhältnis hat. Dazu könnte jedes einzelne Pixel beur-

teilt werden, aber dies berücksichtigt nicht den Unterschied im Informationsgehalt aufgrund der unterschiedlichen Auflösung. Wenn man den gleichen Informationsgehalt fordert, muss man vier kleinere Pixel zu einem großen Pixel zusammenfassen (Binning).

Das kleine Pixel misst nun das Signal m , wobei m ein zur Photonenzahl proportionaler Zahlenwert ist. Bei gleichem Füllfaktor misst somit das große Pixel das Signal $4 \times m$. Für das Signal-Rausch-Verhältnis ($s = m/r$) ist zwischen zwei Rauscharten zu unterscheiden. Bei kleinen Signalen ist das Ausleserauschen dominant. Das Ausleserauschen entspricht dem Signal, das beim Dunkelbild, also ohne Licht gemessen wird. Es setzt sich aus den verschiedenen Rauschquellen einer Kamera (Sensor, Temperatur, Verstärkung etc.) zusammen. Bei großen Signalen dominiert das Photonenrauschen, welches aus der Photonenstatistik resultiert. Für das kleine Pixel ergibt sich mit einem Ausleserauschen r_0 des kleinen Pixels ein s_0 Signal-Rausch-Verhältnis für kleine Signale und ein s_1 Signal-Rausch-Verhältnis für große Signale. Weil es erlaubt ist, die Rauschleistungen zu addieren, ergibt sich das Ausleserauschen als Quadratwurzel aus $(4 \times r_0^2)$. Die hier diskutierten Größen sind in Tabelle 2 einander gegenüber gestellt.

Das kleine Pixel misst nur ein Viertel des Signals, das ein großes Pixel misst. Doch

TABELLE 1: Qualitativer Vergleich wichtiger Kenngrößen bei unterschiedlichen Füllfaktoren.

Füllfaktor	lichtempfindliche Fläche	Quantenwirkungsgrad	Signal
groß	groß	groß	groß
klein	klein	klein	klein
klein + Mikrolinse	große effektive Fläche	groß	groß

TABELLE 2: Signal und Signal-Rausch-Verhältnis unterschiedlicher Pixelgrößen bei konstanter Gesamtfläche.

Pixel Typ	Signal	Ausleserauschen	Signal-Rausch-Verhältnis bei wenig Licht	Signal-Rausch-Verhältnis bei viel Licht
klein	m	r_0	s_0	s_1
groß	$4 \times m$	$> r_0$	$< 4 \times s_0$	$2 \times s_1$
$4 \times$ klein	$4 \times m$	$2 \times r_0$	$2 \times s_0$	$2 \times s_1$

dürfen bei gleichem Informationsgehalt vier kleine Pixel zusammengefasst werden, die dann bei viel Licht das gleiche Signal-Rausch-Verhältnis wie ein großes Pixel aufweisen. Bei wenig Licht ist es sogar möglich, dass die vier kleinen Pixel ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis als das große Pixel haben. Ob das der Fall ist, hängt vom Ausleserauschen des großen Pixels ab. Bei gleicher Gesamtfläche spricht also nichts dafür, dass große Pixel besser sind.

Konstante Auflösung

Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Auflösung konstant zu halten. Das führt dazu, dass man das Bild bei dem Bildsensor mit den kleineren Pixeln auf einen kleineren Bildkreis abbilden muss (Abbildung 4). Daraus ergibt sich, dass die Brennweite verkürzt werden muss.

Bei diesem Vergleich muss man vorsichtig sein, um nicht zu einem falschen Resultat zu kommen. Als Beispiel sind in Abbildung 5 drei Messergebnisse gezeigt. Alle Bilder wurden mit der gleichen Belichtungszeit und dem gleichen Objektstand aufgenommen. Bild [a] zeigt die Aufnahme eines Testmusters mit der Kamera, die 14,8 µm große Pixel hatte, bei einer Brennweite von $f = 100$ mm und einer Blende von 16. Nimmt man nun die Kamera mit 7,4 µm großen Pixeln, braucht man ein $f = 50$ mm Objektiv, um dasselbe Testmuster auf 1000×1000 Pixel abzubilden. In einem ersten Versuch würde man z. B. bei f-Mount Objektiven denselben Blendenwert einstellen wie zuvor, nämlich 16. Das ergibt Bild [b], welches eindeutig dunkler ist. Die Schlussfolgerung wäre, dass große Pixel empfindlicher sind.

Der gleiche Blendenwert bei Objektiven unterschiedlicher Brennweite bedeutet, dass

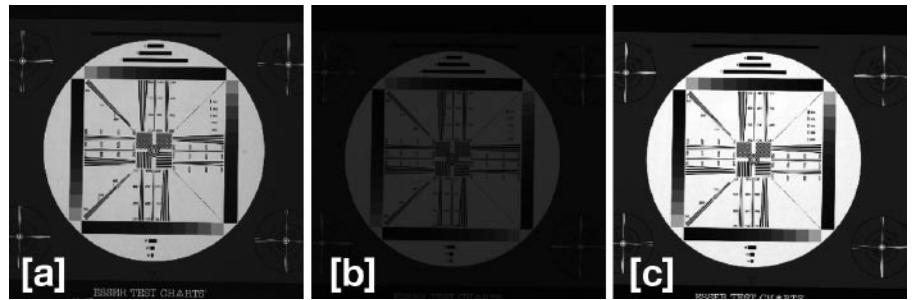


ABB. 5: Aufnahmen desselben Testmusters, die jeweils mit der gleichen Auflösung, demselben Objektstand, demselben Füllfaktor gemacht wurden. Unterschiedlich sind die Pixelgröße, die Brennweite und die Objektiveneinstellungen:

- [a] Pixelgröße 14,8 µm x 14,8 µm, $f = 100$ mm, Blendenzahl = 16,
- [b] Pixelgröße 7,4 µm x 7,4 µm, $f = 50$ mm, Blendenzahl = 16,
- [c] Pixelgröße 7,4 µm x 7,4 µm, $f = 50$ mm, Blendenzahl = 8.

TABELLE 3: Signal und Signal-Rausch-Verhältnis unterschiedlicher Pixelgrößen bei konstanter Auflösung.

Pixel Typ	Signal	Ausleserauschen	Signal-Rausch-Verhältnis bei wenig Licht	Signal-Rausch-Verhältnis bei viel Licht
klein	m	r_0	s_0	s_1
groß	m	$> r_0$	$< s_0$	s_1

die gleiche Lichtmenge auf die Fläche eines Kleinbild-Negativs fällt. Damit trifft die gleiche Lichtmenge wieder auf die große Fläche, was aber für den Vergleich nicht beabsichtigt war und dem Ziel widerspricht, das Bild mit der gleichen Lichtmenge auf den kleineren Bildkreis abzubilden. Dazu ist es notwendig, den Blendenwert zu verringern, damit die gleiche Blendenöffnung, erreicht wird. Wiederholt man die Messung mit den kleinen Pixeln bei einem Blendenwert von 8 ergibt sich Bild [c]. Das Resultat ist ein ähnlich helles Bild wie in Bild [a].

Wiederum stellt sich die Frage, welcher Bildsensor das größere Signal bzw. das bessere Signal-Rausch-Verhältnis hat. Dazu werden die selben Grundannahmen wie im ersten Fall gemacht. Bei gleichem Füllfaktor misst das kleine Pixel, welches das Ausleserauschen r_0 hat, das Signal m . Bei wenig Licht ergibt sich das Signal-Rausch-Verhältnis s_0 , bei viel Licht s_1 . In Tabelle 3 werden diese Größen mit denen des großen Pixels verglichen. Das große Pixel hat ein höheres Ausleserauschen, was zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis bei wenig Licht führt. Somit ergibt sich auch bei diesem Vergleich kein Vorteil für das große Pixel in Bezug auf die Empfindlichkeit.

Sind große Pixel besser als kleine?

Die häufig zu hörende Vermutung, große Pixel seien empfindlicher als kleine, lässt sich durch die vorgestellten Betrachtungen nicht belegen. Es gibt aber auch unbestrittene

Vorteile bei großen Pixeln. So haben sie meistens das größere maximale Fassungsvermögen für Ladungsträger (Fullwell-Kapazität) und können dadurch ein besseres maximales Signal-Rausch-Verhältnis erreichen. Auch steigt häufig die Intraszenen-Dynamik eines Bildsensors mit der Fullwell-Kapazität, welche sich aus dem Verhältnis von Fullwell-Kapazität zu Ausleserauschen bestimmt. Die Dynamik eines Pixels beschreibt die Anzahl der unterscheidbaren Helligkeitsstufen.

Ein großes Pixel hat zwar eine höhere Dynamik und eine größere Fullwell-Kapazität, doch nehmen mit der Fläche auch die Rauschwerte zu, was sich insbesondere bei schlechten Lichtverhältnissen nachteilig auf die Empfindlichkeit auswirkt. Zwischen diesen verschiedenen Kriterien gilt es, einen Kompromiss zu finden. Für kurze Belichtungszeiten und dunkle Lichtverhältnisse ist die Empfindlichkeit wichtig, was für kleine Pixel spricht. Ist ein hoher Kontrast gewünscht, sind große Pixel interessant. Die Größe der Pixel ist auf die konkrete Anwendung abzustimmen. So haben Handy-Kameras eine Pixelgröße von $(1,4 \mu\text{m})^2$, bei highspeed-Kameras beträgt sie durchaus $(12-18 \mu\text{m})^2$. Wissenschaftliche Arbeiten haben gezeigt, dass bei einer mittleren Pixelgröße von $(6-8 \mu\text{m})^2$ ein optimales Verhältnis von Rauschen, Fullwell-Kapazität und Dynamik erreicht wird.

● DIE FIRMA

PCO AG
Kelheim, Deutschland

1987 wurde die PCO AG gegründet mit dem Ziel, schnelle und empfindliche Video-Kameras zu entwickeln, die den speziellen, hohen Anforderungen in wissenschaftlichen Anwendungen gerecht werden. Mittlerweile umfasst der Produktbereich der PCO AG digitale Kamerasysteme mit hoher Dynamik, hoher Auflösung und niedrigem Rauschen, welche international sowohl in wissenschaftlichen als auch in industriellen Anwendungen eingesetzt werden.

www.pco.de