

## Wider das Rauschen

Moderne Digitalkameras minimieren inzwischen sehr gut das Bildrauschen. Doch in manchen Situationen stoßen sie an ihre Grenzen.

Michael Vogel

Die Qualität eines digitalen Fotos hängt stark von der Situation ab: Was im Freien bei Tageslicht gut funktioniert, führt in der Dämmerung oder im schlecht beleuchteten Innenraum zu einem krisseligen Bild. Bei starker Vergrößerung zeigen sich deutliche Helligkeits- und Farbunterschiede zwischen benachbarten Pixeln. Schuld daran ist das Bildrauschen: Es ist immer gegenwärtig, fällt aber bei guten Lichtverhältnissen aufgrund des hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnisses moderner Kameras kaum noch auf; andernfalls ruiniert es viele Aufnahmen.

Digitalkameras besitzen meist einen CMOS-Sensor als Detektor;

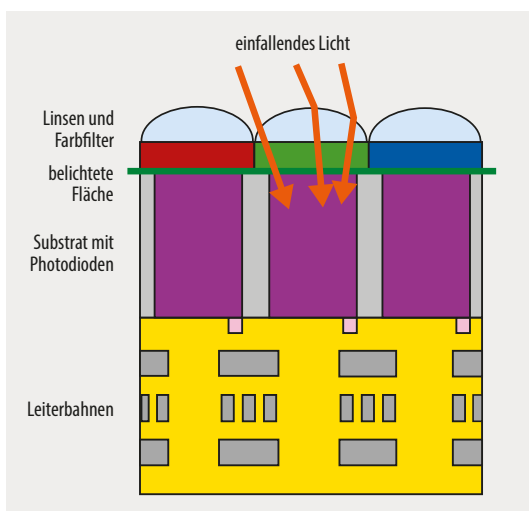
Smartphone- und Vollformatkameras nutzen lediglich verschieden große Sensoren. Treffen Photonen auf das Halbleitermaterial der Pixel, hebt der innere Photoeffekt Elektronen in das Leitungsband. Diese sammeln sich während der Belichtungszeit in den einzelnen Pixeln, bevor eine Elektronik sie ausliest. Mehr Elektronen ergeben ein größeres Signal: Idealerweise ist die Anzahl der Elektronen proportional zur ausgelesenen Spannung, die von der Kamera verstärkt und digitalisiert wird. Im Automatik-Modus wird das resultierende Bild weiter optimiert.

Um das Bildrauschen zu minimieren, gilt es, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern, indem das Signal möglichst groß wird. Das Rauschen muss dann klein sein, wenn das Signal per se schwach ausfällt. Eine Aufnahme führt zu einem starken Signal, wenn in der Belichtungszeit viele Photo-Elektronen in den Pixeln entstehen. Drei Faktoren bestimmen ihre Anzahl bei konstanter Belichtungszeit: die Optik, die Pixel und der Füllfaktor. Eine Optik mit großer Blende leitet mehr Licht auf den Bildsensor als eine kleine Blende, deren Eintrittspupille bei gleicher Brennweite kleiner ist. Auf Pixel mit größeren lichtempfindlichen Flächen können mehr Photonen auftreffen und Elektronen auslösen. Der Füllfaktor gibt an, wie hoch der lichtempfindliche Anteil eines Pixels in Relation zu dessen Gesamtfläche ist. Liegt die Auslese-Elektronik auf der

Rückseite der Pixel (**Abb. 1**), ergibt sich ein hoher Füllfaktor. Mikrolinsen vor den Pixeln, inzwischen eine etablierte Technologie, vergrößern deren optisch wirksame Flächen zusätzlich. Eine lichtstarke Optik führt zusammen mit einem Bildsensor, der große Pixel und einen hohen Füllfaktor besitzt, demnach zu einem guten Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das verschafft Vollformatkameras mit einem entsprechenden Objektiv einen Vorteil in Sachen Bildrauschen gegenüber Smartphone-Kameras.

### Mangelnde Proportionalität

Kameraobjektive bestehen aus mehreren Linsen, um optische Abbildungsfehler zu minimieren, und verringern durch integrierte Blenden Streulicht. Auch wenn es die perfekte Optik nicht gibt, verschlechtern verbleibende optische Fehler das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nur wenig. Zum Bildrauschen trägt aber auch die opto-elektronische und elektronische Verarbeitungskette bei. In den elektronischen Schaltkreisen, etwa im Verstärker für das Spannungssignal der Pixel, treten thermische Bewegungen der Ladungsträger auf. Das zerstört die exakte Proportionalität zwischen der Zahl der Photo-Elektronen im Pixel und dem Spannungswert. Die Schwankungen verfälschen das Signal bei jedem Verarbeitungsschritt und führen zum Ausleserauschen. Bei modernen Kameras spielt es aber in der Regel nur bei Aufnahmen mit sehr



**Abb. 1** Ein CMOS-Bildsensor wandelt das einfallende Licht (orange) mit Photodioden (lila) um: Die Zahl der Elektronen ist proportional zur Intensität. Eine Elektronik liest die einzelnen Pixel aus; Farbfilter teilen die Pixel den Grundfarben zu. Je weniger Photonen sich pro Pixel sammeln, umso stärker tritt Bildrauschen auf.



▲ Das Schrotrauschen lässt sich anhand eines Beispielfotos illustrieren: Die Zahl der Photonen pro Pixel nimmt von links nach rechts um jeweils eine Größenordnung zu: beginnend mit  $10^{-3}$  Photonen pro Pixel bis zu  $10^5$  Photonen pro Pixel. In der Mitte (10 Photonen pro Pixel) steigt die Bildqualität sprunghaft an.

schlechten Lichtverhältnissen oder in sehr dunklen Bildbereichen eine Rolle: Dann ist das Signal im Signal-zu-Rausch-Verhältnis sehr klein.

Dabei minimieren die Bildsensoren heute schon selbstständig das Ausleserauschen. Wird ein Pixel beim Auslesen nicht vollständig „geleert“, liegen bei der nächsten Aufnahme mehr Elektronen vor, als aus der Zahl einfallender Photonen folgt. Moderne CMOS-Sensoren messen daher den Zustand der Pixel unmittelbar vor einer Belichtung und ziehen danach den Überschuss von der Zahl der Elektronen ab.

Auch die Umwandlung der Spannung von analogen zu digitalen Werten trägt minimal zum Rauschen bei. Das zwangsläufige Runden auf diskrete Werte führt zum Quantisierungsrauschen. Thermisch bedingte Elektronen entstehen mit einer relativ konstanten zeitlichen Rate und verursachen das thermische Rauschen. Bei langen Belichtungszeiten von mehr als einer Minute gewinnt dieses an Bedeutung. Grundsätzlich entstehen nicht alle Elektronen in einem Pixel durch den inneren Photoeffekt, sondern gelangen auch durch inelastische Stöße ins Leitungsband. Deshalb liefert selbst ein abgedeckter Bildsensor einen Dunkelstrom. Beim Auslesen und Verstärken des elektrischen Signals lassen sich die Elektronen verschiedenen Ursprungs aber nicht un-

terscheiden. Manche Kamera macht daher automatisch nach einer langbelichteten Aufnahme eine zweite: Der abgedunkelte Bildsensor erfasst während derselben Belichtungszeit das thermische Rauschen, um die eigentliche Aufnahme zu korrigieren. Bei kürzeren Belichtungszeiten spielt thermisches Rauschen nur dann eine Rolle, wenn die Kamera länger dem prallen Sonnenlicht ausgesetzt war und sich der Bildsensor erwärmt hat.

### Verarbeitetes Rauschen

Die Kamera bearbeitet das Digitalbild nach, sobald es aus den Spannungswerten erstellt ist. Dabei verändert sie das vorhandene Rauschen. Zu diesen Verarbeitungsschritten gehört zum Beispiel das Demosaiking. Es korrigiert den Umstand, dass ein Bildsensor mehr Pixel für grüne Farbwerte besitzt als für rote und blaue. Die Aufteilung beruht auf der maximalen Empfindlichkeit des menschlichen Auges, die im Grünen liegt: Der Sensor ist auf das Auge optimiert. Dadurch besitzt das grüne Bild eine höhere Auflösung als die beiden anderen Farbkanäle. Damit ein RGB-Farbbild für jedes Pixel vorliegt, gilt es, benachbarte Grundfarbenwerte zu interpolieren. Dabei entstehen Artefakte, die letztlich auch das Rauschen beeinflussen.

Ein weiteres Beispiel eines nachträglichen Verarbeitungsschritts ist die Schärfung. Das Schärfen verbessert den subjektiven Eindruck beim

Betrachten eines Bildes, indem es ihn an die menschlichen Sehgewohnheiten anpasst. Beispielsweise hebt das Schärfen den Kontrast nur entlang der Kanten in einem Bild an und kann so ebenfalls das Rauschen verändern.

Einige dieser Verarbeitungsschritte lassen sich bei manchen Kameras unterbinden: durch das Speichern der Bilder im RAW-Format. Die manuelle Bearbeitung solcher Fotos bietet mehr Kontrolle über das Resultat – und damit auch über das Rauschen. Interessant ist diese Herangehensweise vor allem in der professionellen und semiprofessionellen Fotografie.

Alle bislang beschriebenen Quellen des Bildrauschens lassen sich mit technischen Gegenmaßnahmen reduzieren. Nur auf das Schrotrauschen des Lichts trifft dies nicht zu. Da Licht aus Photonen besteht, sorgt eine höhere Intensität dafür, dass mehr Photonen pro Zeiteinheit auf den Bildsensor fallen. Weil es sich um Teilchen handelt, schwankt die Intensität dabei statistisch um einen Mittelwert. Das daraus resultierende Schrotrauschen des Lichts ist, wenn man so will, das ultimative Bildrauschen. Es ist physikalisch unvermeidlich, sodass kein Bildsensor komplett rauschfrei arbeitet.<sup>+)</sup>

### Der Autor

**Dipl.-Phys. Michael Vogel**, Journalist,  
www.mv-vogel.de

+) Ich danke Uwe Artmann von der Image Engineering GmbH & Co. KG, Kerpen, für hilfreiche Erklärungen.