

# Was ich schon immer wissen wollte ...

## #4

### Wie aus Licht ein digitales Foto wird

Bausteine eines PC's oder Smartphones

32 oder 64 Bit Bus – was es bedeutet?

Wo und wie wird die Taktfrequenz erzeugt?

Auf was nimmt die Taktfrequenz Einfluss?

Ausgangspunkt: Ein Foto wird erstellt

Optik und Fotochip

Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts treffen auf den Fotochip

Der Fotochip hat z.B. 10 MP – wie ist er in einzelne Pixel aufgeteilt?

Wie werden im Fotochip die Wellenlängen in elektrische Signale umgewandelt?

Wie ergeben sich pro Pixel unterschiedliche Signale?

Wie wird Farbe erfasst?

Das elektrische Signal: Spannung, Stromstärke oder Elektronen?

Welchen Weg durchlaufen die elektrischen Signale des Fotochips, bis das Foto bzw. die Pixel am Bildschirm erscheinen?

Wie ist ein Displaypixel genau definiert?

Wie werden die 24 oder 32 Pixel-Bits genau gespeichert?

Für was wird der 32- oder 64-Bit-Bus konkret benötigt?

Wofür werden i9-Prozessoren mit all den Transistoren benötigt?

Welchen Weg nehmen die elektrischen Signale des Fotos, um dauerhaft gespeichert zu werden?

Um was für ein elektrisches Signal handelt es sich in Bezug auf die Speicherung?

Wie erfolgt die Speicherung der elektrischen Signale/Elektronen?

Zusammengesetztes Gesamtbild: Vom Licht bis zum gespeicherten Foto

Fazit



© meier eMOTION / 2026



# Bausteine eines PCs oder Smartphones

Ein PC oder Smartphone besteht auf hoher Ebene aus folgenden Hauptblöcken bzw. Bausteinen:

## 1. Recheneinheiten

- **CPU:** allgemeine Berechnungen, Steuerung
- **GPU:** Bild-/Grafikverarbeitung, massiv parallele Rechenoperationen
- **ISP (Image Signal Processor):** speziell für Kameradaten
- ggf. **NPU/AI-Beschleuniger**

## 2. Speicher

- **RAM:** flüchtiger Arbeitsspeicher
- **Flash/SSD/UFS/eMMC:** dauerhafter Speicher
- **Caches:** sehr schneller interner Speicher in Prozessoren

## 3. Schnittstellen / Busse

- Datenbusse
- Adressbusse
- Steuerbusse
- Hochgeschwindigkeitsverbindungen zwischen SoC, Speicher, Kamera, Display

## 4. Ein-/Ausgabe

- Kamera / Sensoren
- Display
- Touchscreen
- Funkmodule
- Audio
- USB

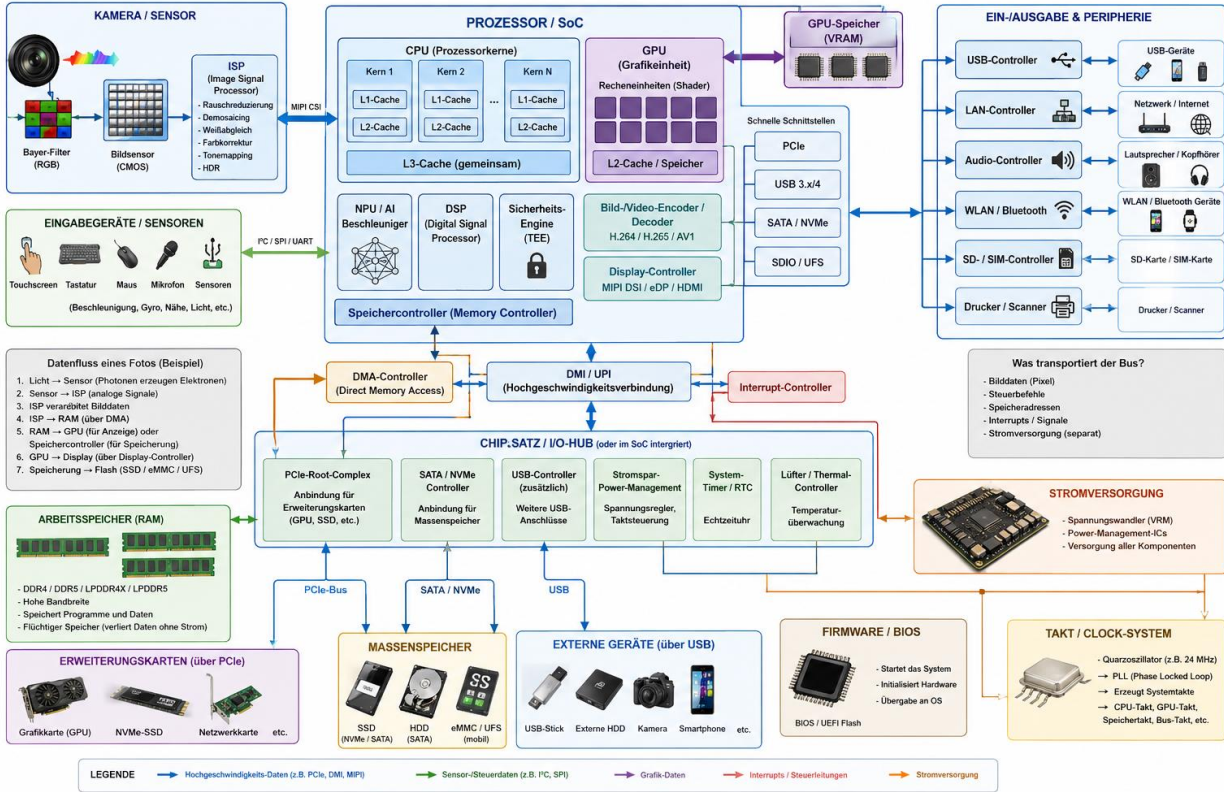
## 5. Takt- und Energieversorgung

- Quarzoszillatoren
- PLLs (Phase-Locked Loop → Takterzeugung und Synchronisation)
- Spannungsregler
- Power-Management-ICs

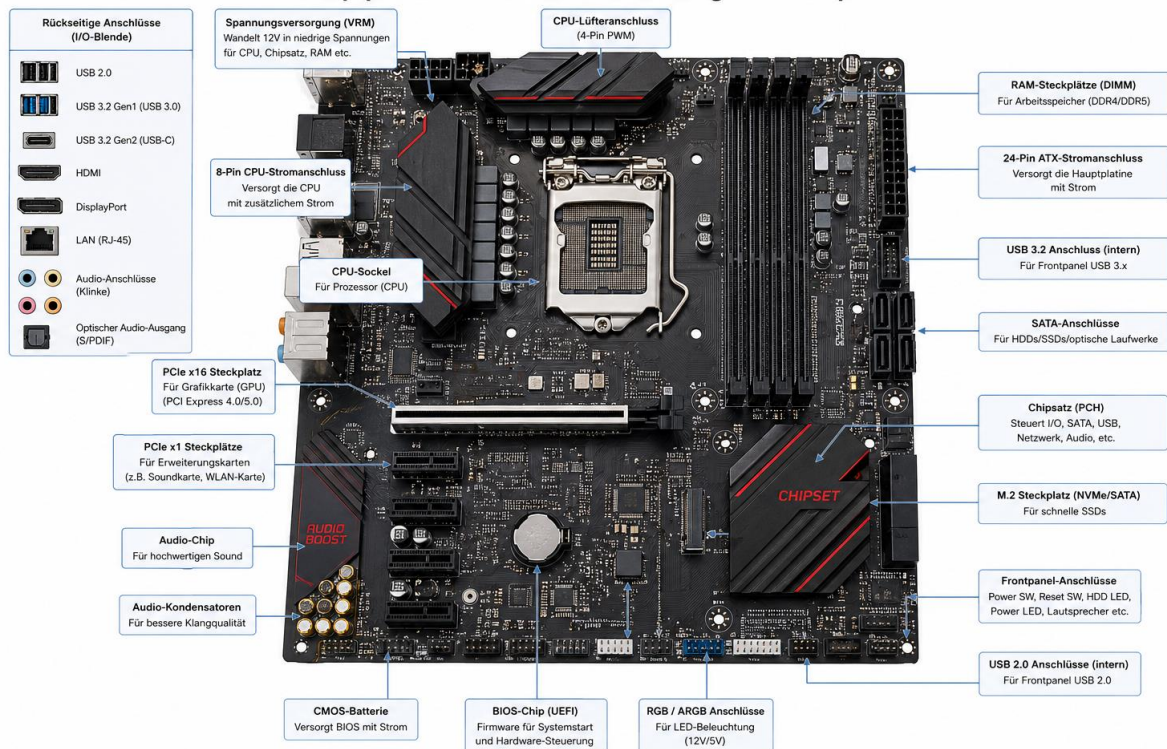
## 6. Hauptplatte (Mainboard o. Motherboard)

Alle Bausteine sind über Leiterbahnen auf einer Platine oder in einem SoC/System-in-Package verbunden.

### PC / Smartphone Architektur – Alle wesentlichen Bausteine



### Hauptplatte – Übersicht der wichtigsten Komponenten



## 32 oder 64 Bit Bus — was bedeutet das?

Ein Bus ist ein System von Leitungen und Protokollen, über das Daten transportiert werden.

### 1. 32-Bit- oder 64-Bit-Bus

Das bedeutet meist:

Wie viele Bits können in einem Transfer oder pro Takt parallel übertragen oder intern verarbeitet werden?

32 Bit = 4 Byte

64 Bit = 8 Byte

### 2. Wofür wird das benötigt?

Für den schnellen Austausch von:

- Pixeldaten
- Speicheradressen
- Befehlen
- Rechenergebnissen



### 3. Wichtig

In modernen Systemen gibt es nicht „den einen einzigen Bus“, sondern viele verschiedene:

- CPU-Datenpfade
- Speicherbusse
- interne Fabrics im SoC
- PCIe
- MIPI CSI für Kamera
- MIPI DSI für Display

Die Begriffe 32-Bit/64-Bit beziehen sich oft auf:

- Breite von Registern
- Breite von ALUs
- Breite eines Speicherinterfaces
- Breite von Adressen

# Wo und wie wird die Taktfrequenz erzeugt?

Digitale Elektronik arbeitet synchron mit Taktsignalen.

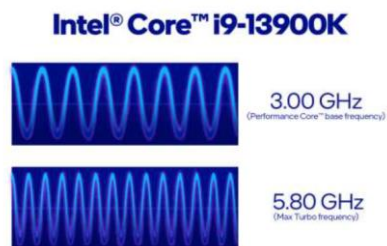
## 1. Ursprung

Die Taktfrequenz wird meist von einem **Quarzoszillator** erzeugt.

Ein Quarz schwingt mechanisch-elektrisch mit sehr stabiler Frequenz.

Beispiele:

- 24 MHz
- 26 MHz
- 19,2 MHz
- 38,4 MHz



## 2. Weiterverarbeitung

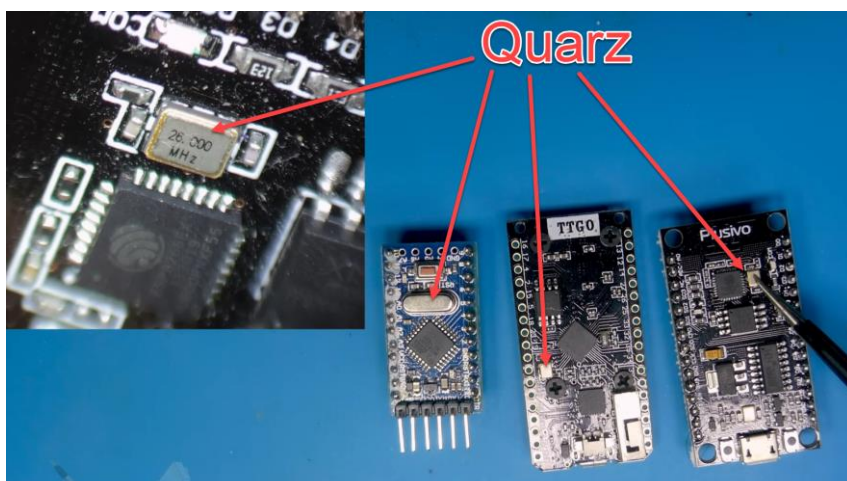
Aus diesem Referenztakt erzeugen PLL-Schaltungen (Phase-Locked Loops) weitere Taktsignale:

- CPU-Takt
- GPU-Takt
- Speichertakt
- Kamera-Interface-Takt
- Display-Takt

## 3. Wo sitzt das?

Je nach System:

- externer Quarzoszillator auf der Platine
- interne PLLs im SoC
- zusätzliche Clock-Generatoren in Nebenbausteinen



## Auf was nimmt die Taktfrequenz Einfluss?

Die Taktfrequenz bestimmt, wie schnell synchrone digitale Schaltungen arbeiten.

Sie beeinflusst u. a.:

- wie schnell die CPU Befehle ausführt
- wie schnell Daten über Speicherinterfaces transportiert werden
- wie schnell Bilddaten verarbeitet werden
- wie schnell Sensoren ausgelesen werden können
- wie schnell Displays aktualisiert werden

### 1. Beispiel CPU

Bei 3 GHz gibt es 3 Milliarden Taktzyklen pro Sekunde.

Nicht jeder Zyklus ergibt einen vollständigen Befehl, aber der Takt gibt den Grundrhythmus vor.

### 2. Beispiel Bildverarbeitung

Je höher die geforderte Bildrate und Auflösung, desto höher meist die Anforderungen an:

- Sensortakt
- Speicherbandbreite
- ISP-Takt
- Display-Takt

### 3. Wichtiger Zusatz

Mehr Takt bedeutet nicht automatisch proportional mehr Leistung, weil auch wichtig sind:

- Parallelität
- Architektur
- Cache
- Datenzugriffsmuster
- Energieverbrauch
- Wärmeabfuhr

## Ausgangspunkt: Ein Foto wird erstellt



Ein Foto entsteht, wenn Licht von einer Szene über eine Optik auf einen Bildsensor fällt. Der Bildsensor wandelt das einfallende Licht in elektrische Signale um. Diese Signale werden von der Elektronik verarbeitet, in digitale Werte übersetzt, gespeichert und später auf einem Bildschirm wieder dargestellt.

Die komplette Kette ist also:

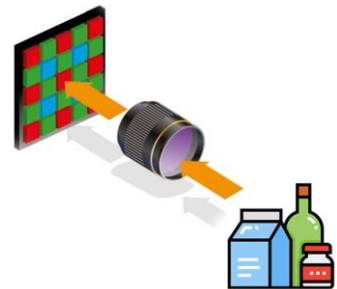
Szene → Licht → Objektiv/Optik → Fotochip/Bildsensor → elektrische Signale → Digitalisierung → Bildverarbeitung → Arbeitsspeicher → Speicherung → Anzeige auf dem Bildschirm

## Optik und Fotochip

### 1. Die Optik

Die Optik eines Kamerasystems besteht prinzipiell aus:

- Linsen
- Blende
- eventuell Filter
- Fokusmechanik



Die Aufgabe der Optik ist, das von der Umgebung kommende Licht so auf den Sensor zu projizieren, dass an jeder Sensorstelle ein kleiner Ausschnitt der Szene abgebildet wird.

Wichtige Funktionen der Optik:

- Fokussierung: Das Bild soll scharf auf der Sensorebene liegen.
- Lichtdosierung: Die Blende bestimmt, wie viel Licht durchgelassen wird.
- Abbildungsqualität: Minimierung von Fehlern wie chromatischer Aberration, Verzeichnung, Unschärfe.

### 2. Der Fotochip

Der Fotochip ist der **Bildsensor**, meist ein **CMOS-Sensor**, seltener CCD. Er besteht aus einer sehr großen Zahl lichtempfindlicher Einheiten, die man vereinfacht als Pixelzellen oder Sensel bezeichnen kann.

Der Sensor ist eine Halbleiterstruktur, meist aus **Silizium**.

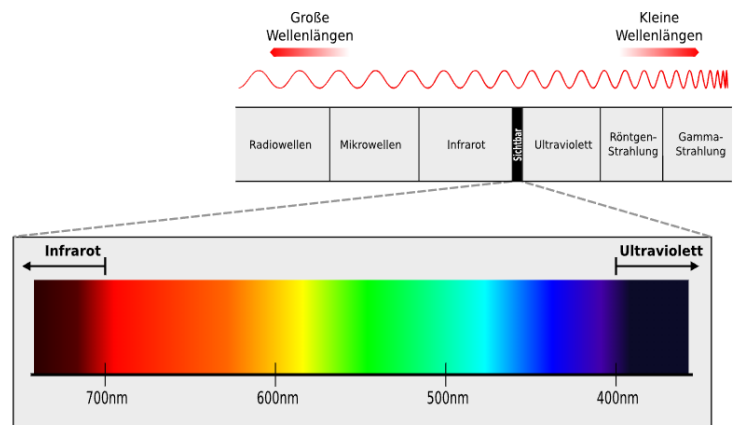
## Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts treffen auf den Fotochip

Sichtbares Licht hat ungefähr **Wellenlängen** von:

ca. 380 nm bis 750 nm

Unterschiedliche **Wellenlängen** entsprechen unterschiedlichen **Farben**:

- kurzwelliger: violett/blau
- mittel: grün
- langwelliger: gelb/rot



**Wichtig ist:**

Der **Siliziumsensor** misst nicht direkt „Farbe“ als abstrakten Begriff, sondern er **reagiert auf Photonen**, also Lichtteilchen. Diese Photonen tragen Energie, die von der Wellenlänge abhängt.

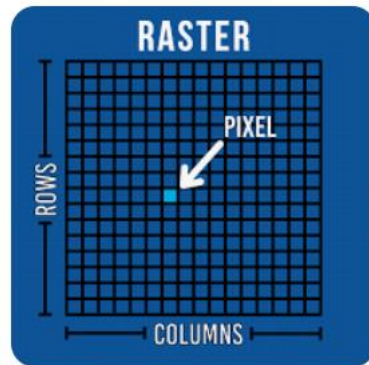
## Der Fotochip hat z.B. 10 MP — wie ist er in einzelne Pixel aufgeteilt?

Ein Sensor mit **10 Megapixeln** besitzt ungefähr **10 Millionen einzelne lichtempfindliche Sensorelemente**.

Beispiel:

10 MP kann z. B. etwa  $3648 \times 2736 = 9.980.928$  Pixel bedeuten.

Jedes dieser Elemente ist eine kleine Fläche auf dem Chip. Der Sensor ist also ein 2D-Gitter aus Pixeln.



## 1. Physikalische Pixelgröße

Wichtige Größen:

- Anzahl der Pixel
- Sensorbreite und Sensorhöhe
- daraus ergibt sich die **Pixelpitch** (Abstand/Maße pro Pixel)

Beispiel:

Ein Sensor sei 6,17 mm breit und habe 4000 Pixel in der Breite.

Dann beträgt die Pixelbreite etwa:

$$\frac{6,17 \text{ mm}}{4000} \approx 1,54 \mu\text{m}$$

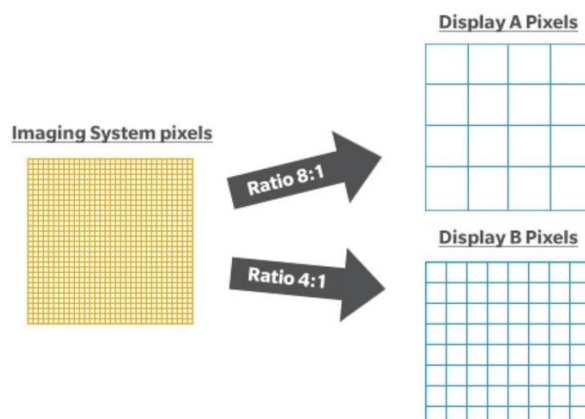
Ein einzelnes Pixel ist also physisch sehr klein.

## 2. Ein Pixel auf dem Sensor ist nicht dasselbe wie ein Bildschirmpixel

Das ist wichtig:

- **Sensorexpixel:** lichtempfindliche Zelle
- **Bilddatei-Pixel:** digital gespeicherter Bildwert
- **Displaypixel:** Anzeigeeinheit auf dem Bildschirm

Im Alltag werden diese drei Dinge oft gleich genannt, technisch sind sie verschieden.



# Wie werden im Fotochip die Wellenlängen in elektrische Signale umgewandelt?

## 1. Grundprinzip: Photoeffekt im Halbleiter

Im Sensor besteht jedes Pixel im Kern aus einer lichtempfindlichen Struktur, meist einer **Photodiode**.

Wenn ein Photon im Silizium absorbiert wird und genug Energie besitzt, erzeugt es ein **Elektron-Loch-Paar**.

Das bedeutet:

- ein freies Elektron wird erzeugt
- gleichzeitig entsteht ein „Loch“ als positive Ladungsträgerstelle

Durch das elektrische Feld in der Photodiode werden diese Ladungsträger getrennt. Die Elektronen werden in einem Ladungsspeicher gesammelt.

## 2. Was wird also physikalisch gesammelt?

Im Pixel werden zunächst Elektronen gesammelt.

Das ist der wichtigste Punkt:

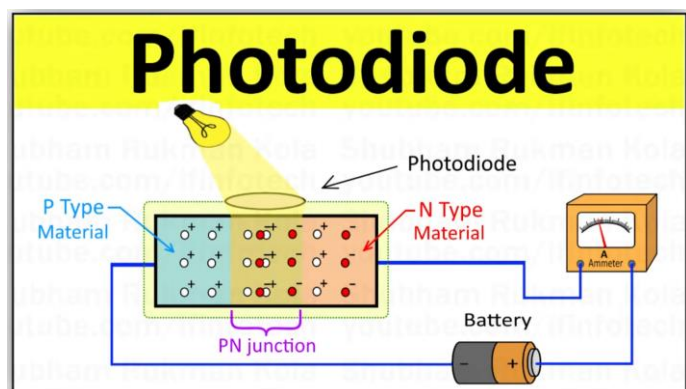
Der primäre Messwert eines Sensors ist nicht direkt Spannung oder Strom, sondern zunächst **eine Ladungsmenge**, also eine Anzahl von Elektronen.

## 3. Zusammenhang zwischen Licht und Elektronen

Mehr einfallendes Licht bedeutet:

- mehr Photonen
- mehr absorbierte Photonen
- mehr erzeugte Elektronen
- größere gespeicherte Ladung

Dunkle Bildstellen erzeugen wenige Elektronen, helle viele.



## Wie ergeben sich pro Pixel unterschiedliche Signale?

Jedes Pixel „sieht“ nur den kleinen Bildausschnitt, der über die Optik genau auf seine Fläche projiziert wird.

Deshalb erhält jedes Pixel unterschiedlich viele Photonen, abhängig von:

- Helligkeit der Szene an dieser Stelle
- Farbe der Szene
- Belichtungszeit
- Blende
- Effizienz des Pixels
- Mikrolinsen und Farbfilter

Daher sammelt jedes Pixel eine andere Anzahl von Elektronen. Diese Unterschiede ergeben die Bildstruktur.

## Wie wird Farbe erfasst?

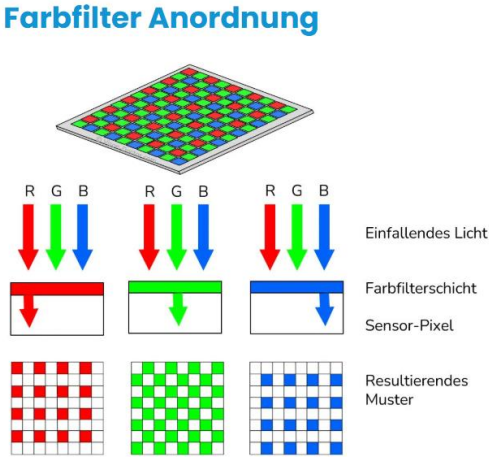
Ein normaler Siliziumsensor misst zunächst nur die **Menge des absorbierten Lichts**, nicht direkt Rot, Grün oder Blau.

Deshalb liegt über dem Sensor meist ein **Farbfiltermuster**, meist ein **Bayer-Pattern**:

- 50 % grün
- 25 % rot
- 25 % blau

Beispiel eines 2x2-Musters:

- G R
- B G



Jedes Sensorpixel misst also meist nur **einen Farbanteil**:

- Rotpixel messen rotes Licht
- Grünpixel messen grünes Licht
- Blaupixel messen blaues Licht

Danach berechnet die Elektronik aus den Nachbarpixeln vollständige RGB-Werte. Dieser Vorgang heißt **Demosaicing**.

### Debayering

Da jedes Pixel nur eine Farbinformation liefert, müssen die fehlenden Farbwerte für jedes Pixel rekonstruiert werden, um ein vollständiges Farbbild zu erzeugen. Dieser Prozess wird Debayering oder Demosaicing genannt. Die Bayer-Interpolation ist eine Methode, bei der die fehlenden Farbwerte durch Interpolation der benachbarten Pixel berechnet werden.

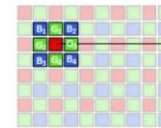
Die Interpolation der fehlenden Farbwerte aus den umgebenden Pixelwerten kann auf verschiedene Arten erfolgen, die unterschiedlich rechenintensiv sind, aber große Auswirkungen auf das resultierende Farbbild haben. So können 2x2- oder 3x3-Kerne oder komplexe mehrstufige Softwareberechnungen zur Unterdrückung von Artefakten eingesetzt werden. Besonders schwierig ist typischerweise die Interpolation senkrecht zu den Kanten von Farbbereichen. Je nach Algorithmus (nearest neighbor, linear, kubisch...) entstehen kammartig ausgefrante oder glattere Kanten.

#### Beispiel einer 3x3 Interpolation:

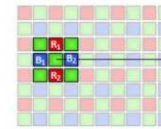
In einem 3x3-Pixelblock ist das zentrale Pixel von jeweils 8 Nachbarn umgeben. Jeweils vier der Nachbarpixel sind direkt vertikal und horizontal angeordnet, vier weitere diagonal. Aus diesen Pixeln wird nun für das zentrale Pixel die fehlende Farbinformation für die beiden anderen Farbkanäle durch Mittelwertbildung aus den Nachbarn berechnet.

### Farbrekonstruktion

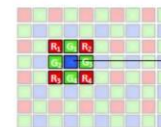
#### Bayer-Mosaik Farbinterpolation



**Rotes Pixel:**  
Interpolation der Blau- & Grün-Information  
Rot= Rot  
Blau=  $(B_1 + B_2 + B_3 + B_4) / 4$   
Grün=  $(G_1 + G_2 + G_3 + G_4) / 4$



**Grünes Pixel:**  
Interpolation der Blau- & Rot-Information  
Rot=  $(R_1 + R_2) / 2$   
Blau=  $(B_1 + B_2) / 2$   
Grün= Grün



**Blaues Pixel:**  
Interpolation der Grün- & Rot-Information  
Rot=  $(R_1 + R_2 + R_3 + R_4) / 4$   
Blau= Blau  
Grün=  $(G_1 + G_2 + G_3 + G_4) / 4$

## Das elektrische Signal: Spannung, Stromstärke oder Elektronen?

Die korrekte Antwort lautet:

### 1. Primär im Pixel

Zuerst liegt die Information als **gesammelte elektrische Ladung** vor, also als **Anzahl von Elektronen**.

### 2. Beim Auslesen

Diese Ladung wird dann in eine **Spannung** umgewandelt. Typisch gilt:

$$Q = C \cdot U$$

mit:

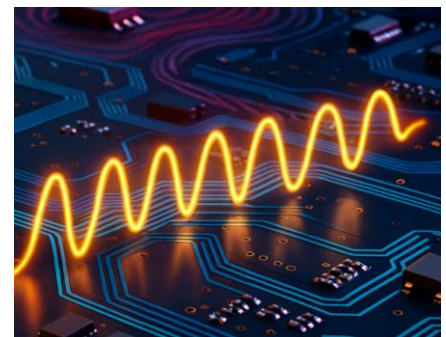
$Q$ : Ladung

$C$ : Kapazität

$U$ : Spannung

Das heißt:

Eine bestimmte Anzahl gesammelter Elektronen auf einer kleinen Kapazität erzeugt eine bestimmte Spannung.



### 3. Während des Transports

Beim Umladen oder Auslesen fließt kurzzeitig auch **Strom**.

Also:

- **im Pixel gespeichert:** Ladung / Elektronen
- **zur Messung dargestellt:** Spannung
- **beim tatsächlichen Transport:** Stromfluss

Technisch ist das Signal also je nach Betrachtung:

- Ladung
- Spannung
- zeitweise Strom

**Welchen Weg durchlaufen die elektrischen Signale des Foto-chips, bis das Foto bzw. die Pixel am Bildschirm erscheinen?**

Jetzt die gesamte Signalkette.

#### 1. Licht trifft auf Sensorpixel

Photonen erzeugen in jedem Pixel Elektronen.

#### 2. Ladungssammlung während der Belichtung

Während der Belichtungszeit sammelt jedes Pixel Ladung.

#### 3. Auslesen des Sensors

Nach der Belichtung wird Pixel für Pixel oder zeilenweise ausgelesen.

Im CMOS-Sensor geschieht das typischerweise so:

- jedes Pixel besitzt Transistoren zur Auswahl und Auslesung
- Zeilen werden selektiert
- die Ladung wird in eine Spannung umgesetzt
- Spaltenverstärker lesen diese Spannungen

#### 4. Verstärkung

Das analoge Signal ist sehr klein und wird verstärkt:

- analoger Verstärker
- evtl. korrelierte Doppelabtastung zur Rauschminderung

## 5. Analog-Digital-Wandlung

Die analoge Spannung wird durch einen **ADC** in einen digitalen Zahlenwert umgewandelt, z. B.:

- 10 Bit
- 12 Bit
- 14 Bit

Beispiel 12 Bit:

Wertebereich 0 bis 4095 pro Pixel

## 6. Übergabe an den Image Signal Processor

Der ISP führt typischerweise aus:

- Schwarzpegelkorrektur
- Defektpixelkorrektur
- Demosaicing
- Weißabgleich
- Rauschreduktion
- Farbkorrektur
- Schärfung
- Tonemapping
- HDR-Verarbeitung
- Kompression zu JPEG/HEIF

## 7. Ablage im RAM

Die Bilddaten liegen zunächst im Arbeitsspeicher.

## 8. Übergabe an die Grafikeinheit / Display-Engine

Wenn das Bild angezeigt werden soll:

- Daten werden aus RAM gelesen
- Grafik-/Display-Controller formatiert sie
- Übergabe an das Displayinterface
- Display erhält die Pixelwerte

## 9. Anzeige auf dem Bildschirm

Das Display steuert pro Bildschirmpixel seine Subpixel:

- Rot
- Grün
- Blau

Daraus entsteht das sichtbare Bild.

## Wie ist ein Displaypixel genau definiert?

Ein Pixel ist die kleinste einzeln adressierbare Bildinformation in einem digitalen Rasterbild.

Ein Pixel ist **kein farbiger Punkt als physisches Ding**, sondern ein **Datenelement**, das eine bestimmte Position und bestimmte Kanalwerte besitzt.

### 1. Typische Pixeldefinition

Ein Pixel kann z. B. enthalten:

- Rotwert
- Grünwert
- Blauwert

also **RGB**.

### 2. Beispiel 8-8-8

Das bedeutet:

- 8 Bit für Rot
- 8 Bit für Grün
- 8 Bit für Blau

also insgesamt:

$$8 + 8 + 8 = 24 \text{ Bit}$$

Somit sind pro Kanal 256 Werte möglich:

0 bis 255

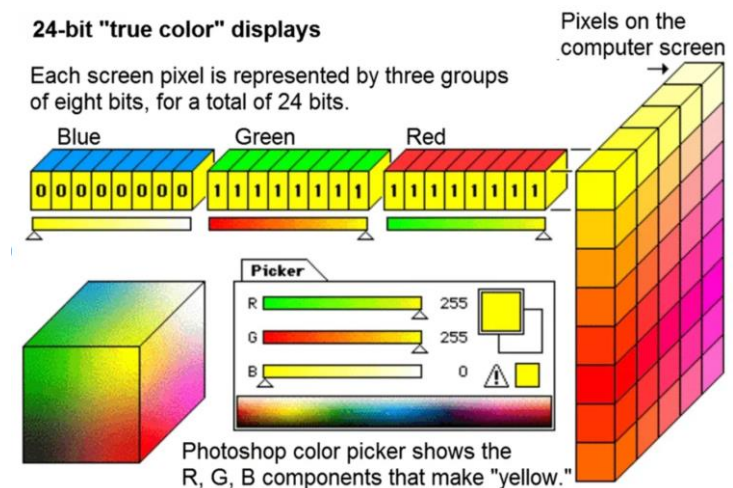
### 3. 32 Bit

Häufig sind 32 Bit verwendet, z. B.:

- 8 Bit Rot
- 8 Bit Grün
- 8 Bit Blau
- 8 Bit Alpha

also **RGBA 8-8-8-8**

Alpha beschreibt Transparenz bzw. Deckkraft.



#### 4. Höhere Präzision

Es gibt auch:

- 10 Bit pro Kanal
- 12 Bit
- 16 Bit
- Fließkommadarstellungen in Spezialanwendungen

**Wie werden die 24 oder 32 Pixel-Bits genau gespeichert?**

Ein digitales Pixel ist letztlich einfach eine Folge von Bits.

Beispiel für 24 Bit RGB:

R = 10110010

G = 01101100

B = 11110000

Zusammen sind das 24 Bits.

Im Speicher werden diese Bits physikalisch in Speicherzellen abgelegt.

##### 1. Bedeutet 0 oder 1 einfach Strom oder kein Strom?

Nicht ganz. Das ist eine nützliche Vereinfachung, aber physikalisch zu grob.

Korrekt ist:

- eine 0 oder 1 wird durch einen **elektrischen Zustand** repräsentiert
- meistens durch einen Spannungsbereich
- im Speicher durch einen gespeicherten Ladungszustand

Also nicht dauerhaft „ Strom an/aus “, sondern eher:

- **Spannung niedrig/hoch**
- **Ladung vorhanden/nicht vorhanden**
- oder präziser: **Schwellspannungszustand der Zelle**

##### 2. Wie viele Elektronen entsprechen einer 1?

Es gibt keinen universellen festen Wert wie „ 1 Bit = genau X Elektronen “.

Warum nicht?

Weil das von der Technologie abhängt:

- Strukturgröße
- Speichertyp
- Zellkapazität
- Störabstand
- Ausleseverfahren

In einem sehr kleinen Speicher- oder Sensorknoten können es sehr wenige Elektronen sein, in anderen deutlich mehr.

Wichtig ist:

Die Elektronik muss die Zustände sicher unterscheiden können. Deshalb arbeitet man mit Toleranzbereichen, nicht mit einem einzigen magischen Elektronenwert.

<b>Für was wird der 32- oder 64-Bit-Bus konkret benötigt?</b>
---

Er wird benötigt, um Daten effizient zu transportieren und zu verarbeiten, etwa:

- Sensorwerte zum ISP
- Bilddaten in den RAM
- Bilddaten vom RAM zur GPU oder Display-Engine
- CPU-Befehle
- Speicherzugriffe
- Adressen und Steuerinformationen

Ein breiterer Bus kann pro Transfer mehr Daten bewegen. Das ist gerade bei Bildern wichtig, weil Bilddaten sehr groß sind.

Beispiel:

Ein Bild mit  $4000 \times 3000$  Pixeln und 24 Bit Farbtiefe hat:

$$4000 \cdot 3000 \cdot 24 = 288.000.000 \text{ Bit}$$

das sind:

$$36.000.000 \text{ Byte} = 36 \text{ MB}$$

Schon ein einziges unkomprimiertes Bild ist also groß. Für Video erst recht.



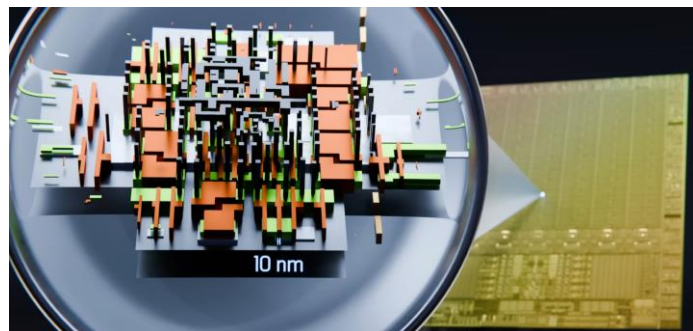
**Wofür werden i9-Prozessoren mit all den Transistoren benötigt?**

Ein moderner Prozessor hat Milliarden von Transistoren. Diese werden benötigt für:

### 1. Logikfunktionen

Transistoren bilden die Grundbausteine für:

- Gatter
- Addierer
- Multiplexer
- Register
- Steuerlogik



### 2. Speicherstrukturen

Sehr viele Transistoren stecken in:

- Cache-Speichern
- TLBs
- Pufferregistern

### 3. Mehrere Rechenkerne

Ein i9 enthält mehrere CPU-Kerne, jeder mit:

- Pipelines
- Sprungvorhersage
- Out-of-order-Execution
- SIMD-Einheiten

- Caches

#### 4. Leistungssteigerung

Mehr Transistoren ermöglichen:

- höhere Parallelität
- größere Caches
- breitere Datenpfade
- komplexere Vorhersage- und Steuerstrukturen
- höhere Rechenleistung pro Zeit

#### 5. Für Bildverarbeitung

Beim Foto relevant für:

- RAW-Entwicklung
- KI-basierte Bildverbesserung
- Kompression
- Mehrbild-Verrechnung
- Benutzeroberfläche
- Speicherung
- Dateiverwaltung

**Welchen Weg nehmen die elektrischen Signale des Fotos, um dauerhaft gespeichert zu werden?**

Nach dem Sensor und der Digitalisierung liegen die Bildinformationen als digitale Bitmuster vor.

Der Weg ist typischerweise:

**Sensor → ADC → ISP/CPU/GPU → RAM → Speichercontroller → Flash-Speicher/SSD**

##### 1. Zunächst im RAM

Das Bild wird fast immer zuerst im Arbeitsspeicher zwischengespeichert.

##### 2. Dann in den Massenspeicher

Danach schreibt das System die Daten in:

- Smartphone: meist NAND-Flash
- PC: SSD mit NAND-Flash oder seltener HDD

## Um was für ein elektrisches Signal handelt es sich in Bezug auf die Speicherung?

Auf der Ebene digitaler Elektronik sind die Daten als logische Zustände 0 und 1 codiert.

Physikalisch werden diese Zustände durch Spannungsbereiche repräsentiert.

Beispiel:

- niedrige Spannung  $\rightarrow$  logische 0
- höhere Spannung  $\rightarrow$  logische 1

Beim tatsächlichen Schreiben in Speicherzellen geht es wieder um **Ladungen**, also Elektronen.

Also:

- in Leitungen: Spannungspegel und dadurch Stromflüsse
- im Speicher: gespeicherte Ladung / Elektronenverteilung

## Wie erfolgt die Speicherung der elektrischen Signale/Elektronen?

### 1. RAM

Im RAM erfolgt die Speicherung flüchtig.

#### DRAM:

Ein Bit wird als Ladung in einem kleinen Kondensator gespeichert.

- geladen  $\approx 1$
- entladen  $\approx 0$

Weil Ladung verloren geht, muss DRAM ständig aufgefrischt werden.

#### SRAM:

Bitzustände werden in einer Transistorschaltung stabil gehalten, solange Strom anliegt.

## 2. Flash-Speicher

Für dauerhafte Speicherung in Smartphones und SSDs wird **NAND-Flash** verwendet.

Hier wird Ladung in einem speziellen Transistor gespeichert, klassisch in einem **Floating Gate** oder in modernen Varianten in einer **Charge-Trap-Struktur**.

Die gespeicherte Ladung verändert die Schwellspannung des Transistors.

Beim Lesen prüft die Elektronik:

- ab welcher Spannung der Transistor leitend wird
- daraus wird auf den gespeicherten Zustand geschlossen

Wichtig:

Das Bit ist also nicht einfach „dauernd Strom“ oder „kein Strom“.

Es ist eher:

- ein physikalischer Ladungszustand in einer Speicherzelle
- dieser beeinflusst das elektrische Verhalten der Zelle
- daraus wird beim Lesen 0 oder 1 rekonstruiert



## **Zusammengesetztes Gesamtbild: Vom Licht bis zum gespeicherten Foto**

Hier noch einmal die gesamte Kette als kompakter technischer Ablauf:

### **Schritt 1: Szene sendet/reflektiert Licht**

Objekte reflektieren Licht verschiedener Wellenlängen.

### **Schritt 2: Optik bildet Szene ab**

Das Objektiv projiziert das Bild auf den Sensor.

### **Schritt 3: Farbfilter und Mikrolinsen**

Mikrolinsen bündeln Licht auf jedes Pixel, Farbfilter trennen grob nach RGB.

### **Schritt 4: Photonen erzeugen Elektronen**

In jeder Photodiode entstehen durch Licht Elektron-Loch-Paare.

### **Schritt 5: Ladung wird gesammelt**

Die Zahl der gesammelten Elektronen entspricht der lokalen Lichtmenge.

### **Schritt 6: Auslesen**

Die Ladung wird in Spannung umgesetzt und verstärkt.

### **Schritt 7: ADC**

Die Spannung wird in einen digitalen Wert umgewandelt.

### **Schritt 8: Bildverarbeitung**

Der ISP erzeugt aus Rohdaten ein nutzbares Bild.

### **Schritt 9: Arbeitsspeicher**

Das Bild liegt im RAM als digitale Pixelwerte.

### **Schritt 10: Anzeige**

Display-Controller und Bildschirm setzen die Werte in leuchtende RGB-Subpixel um.

### **Schritt 11: Speicherung**

Die Pixelwerte werden als Bits in Flash-Speicherzellen abgelegt.

## Fazit

Ein digitales Foto ist das Ergebnis einer mehrstufigen Umwandlung:

- optische Abbildung
- photonische Wechselwirkung
- Erzeugung und Sammlung von Elektronen
- Umwandlung in analoge Spannungen
- Digitalisierung
- algorithmische Bildverarbeitung
- Transport über Busse
- temporäre Speicherung im RAM
- dauerhafte Speicherung in Flash
- Wiedergabe über ein Display

Die elementare physikalische Größe am Anfang ist auf dem Sensor vor allem die elektrische Ladung in Form von Elektronen.

Die elementare digitale Größe am Ende ist das Bitmuster, aus dem Pixelwerte, Dateien und schließlich sichtbare Bilder entstehen.

# Vom Licht zum gespeicherten Foto – Der komplette Weg eines Pixels

