



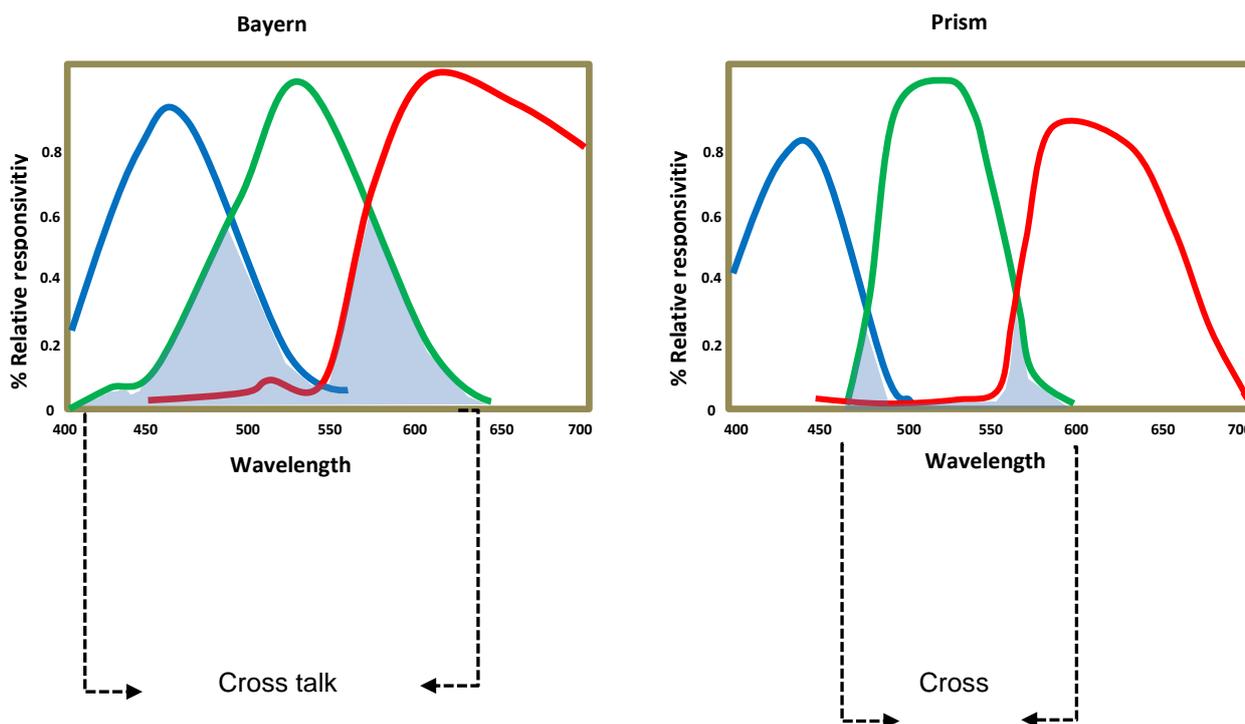
# Spektrale Empfindlichkeitskurven von Kameras

*Whitepaper*

Die Hersteller von Farbkameras verfolgen unterschiedlichen Konzepte im Design der spektralen Empfindlichkeitskurven.

So stellen beispielsweise verschiedene line scan prism Hersteller in ihrer Werbung zwei mögliche Verläufe dieser Kurven gegeneinander und argumentiert damit, dass die steileren Flanken eine bessere da trennschärfere Farbwiedergabe ermöglichen sollen.

### Line Scan Spectral response



Die Argumentation erscheint schlüssig – ist sie auch richtig?

Um diese Aussage beurteilen zu können ist ein Blick auf die Grundlagen notwendig.

Die heute noch meist verwendete Farbmeterik beruht auf dem sogenannten CIE-Normalbeobachter von 1931. Damals wurde durch eine vergleichende Bewertung von Farbflächen mit 3 Spektrallinien ein spektraler Empfindlichkeitsverlauf für die farbempfindlichen Rezeptoren des Auges ermittelt. Diese Kurven wurden dann in das CIE-Normalvalenzsystem überführt.

Die gesamte Farbmeterik nimmt auch heute noch Bezug auf dieses System. Die heute verwendeten Farbräume wie sRGB, AdobeRGB, eciRGB und CIELAB sind alle im Rückgriff auf das CIE-Normalvalenzsystem definiert.

Jede RGB-Kamera liefert für eine vorgegebene Farbe ein Farbtupel {r,g,b} als Antwort. Dieser RGB-Wert ist eine gerätespezifische Beschreibung der vorgelegten Probe und kann

ohne Bezug auf genau diese Kamera nicht interpretiert werden. Das ist aber notwendig, wenn man

- den Abstand der gemessenen Farbe zu einer in einem Normsystem vorgegebenen Farbe
- oder
- dem Farbunterschied mehrerer Proben zueinander einen farbmetrisch definiertes Abstandsmaß zuordnen möchte.

Sowohl Farben wie auch Farbabstände sind wie oben ausgeführt immer in Bezug auf das CIE-Normvalenzsystem festgelegt.

Daraus folgt, dass es notwendig ist, die gerätespezifischen RGB-Werte der Kamera irgendwie in dieses System überzuführen.

Robert Luther hat 1927 erstmalig die notwendige Bedingung dafür, dass ein technisches Aufnahmegerät das visuelle Verhalten des Auges nachbilden kann, formuliert. Dies ist dann der Fall, wenn die spektrale Empfindlichkeitskurve aus Filter und spektraler Charakteristik des Empfängers sich von den Normspektralwertkurven nur durch einen Faktor  $k$  unterscheiden.

$$\tau(\lambda)_X = k_X \cdot \frac{\bar{x}(\lambda)}{s(\lambda)} \text{ für die Rotorangefilter-Analyse,}$$

$$\tau(\lambda)_Y = k_Y \cdot \frac{\bar{y}(\lambda)}{s(\lambda)} \text{ für die Grünfilter-Analyse und}$$

$$\tau(\lambda)_Z = k_Z \cdot \frac{\bar{z}(\lambda)}{s(\lambda)} \text{ für die Blauviolettfilter-Analyse}$$

mit

Diese Bedingung wird allerdings von keiner Standard-RGB Kamera erfüllt. Der Grund liegt darin, dass die Filter mit Blick auf den Ausgabefarbraum optimiert werden.

Dieser z.B. beruht für den weit verbreiteten sRGB-Standard auf den zum Zeitpunkt der Festlegung typischen Primärfarben für die Monitore und gewährleistet so, dass ein Kameraausgabebild ohne Umrechnung einen brauchbaren Farbeindruck auf dem Monitor ergibt.

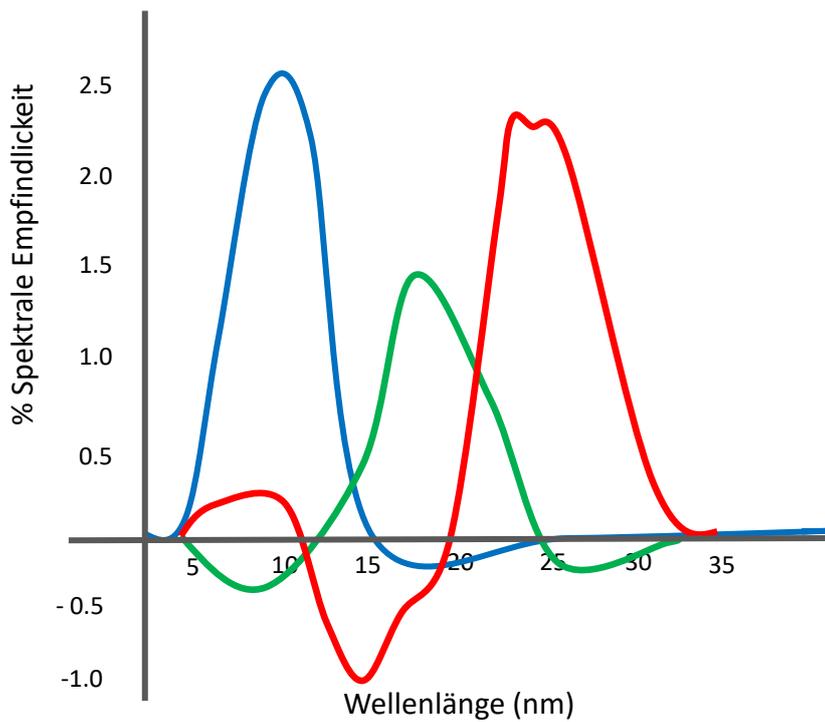
Ein gute Filtercharakteristik in der industriellen Umgebung soll möglichst beiden Anforderungen gerecht werden.

Dies könnte dadurch erreicht werden, dass die spektralen Verläufe fundamentale Metamere der Normspektralwertkurven sind. Diese Bedingung ist dann erfüllt, wenn die Filterfunktion

durch eine nicht-singuläre 3x3 Matrix auf die Normspektralwertfunktion abgebildet werden kann.

Die Transformation der Normspektralwertkurven in Filterkurven für gängige Ausgangsfarbräume führen i.A. auf physikalisch nicht realisierbare Kurven mit negativen Anteilen.

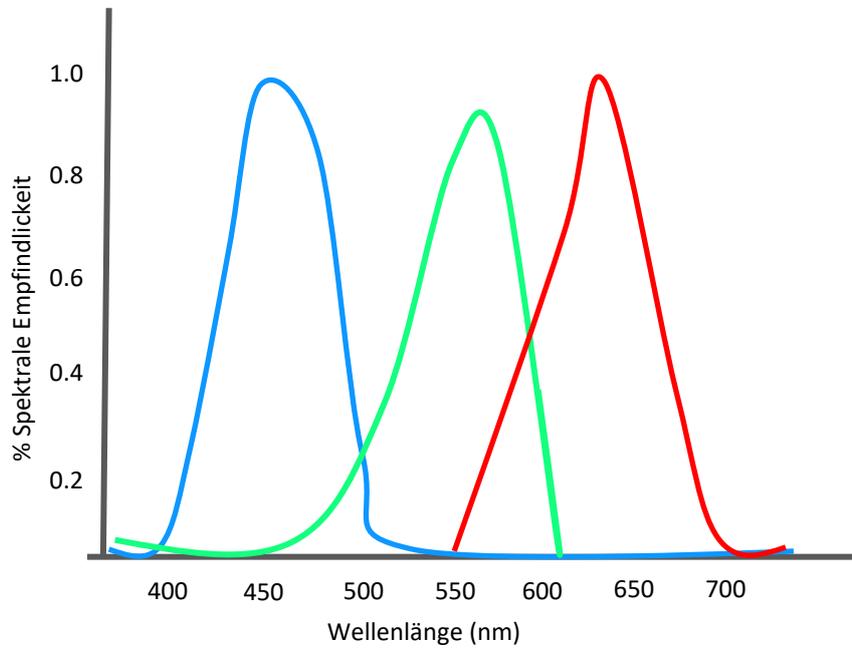
### Theoretische Filterfunktion für sRGB- Ausgabe



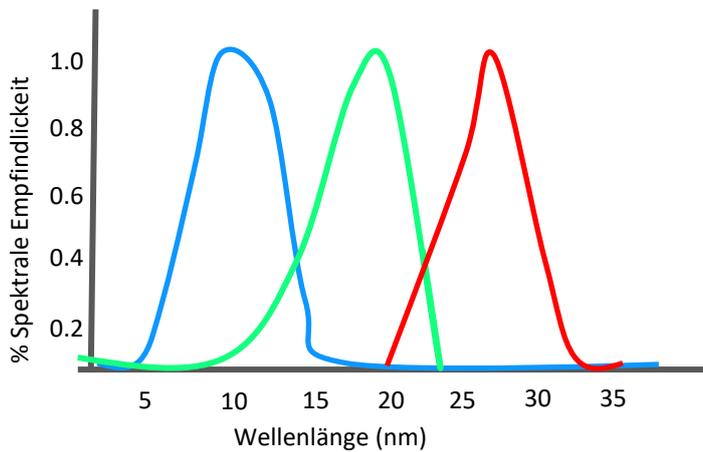
Tatsächliche realisierte Filterfunktion stellen immer einen Kompromiss aus theoretischer Betrachtung und praktischer Realisierbarkeit.

## Drei Beispiele zum Vergleich

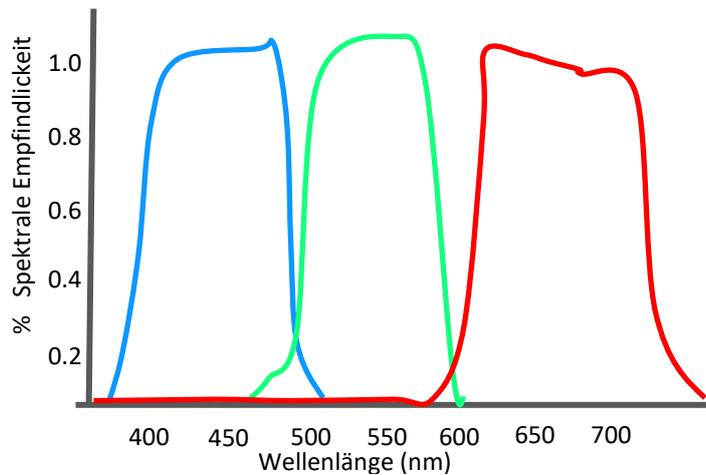
### 1. Filterkurven einer gut gewählten Filtercharakteristik



### 2. Filterkurven nach dem Standardkameranmodell der EBU in Dokument TECH 3353



### 3. Aus from Primis camera



Die Kurven unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Flankensteilheit. Durch die verwendeten dichroitischen Filter sind die Kurven in 3 wesentlich steiler als in 1 und 2.

Der Kamerahersteller mit Kurven 3. argumentiert damit, dass die Steilheit der Flanken eine gute Farbtrennung möglich wäre.

Keine der beiden Kurven erfüllt das oben erwähnte Lutherkriterium, das eine korrekte Transformation der RGB-Werte in den Normfarbraum ermöglichen würde.

Bei welcher der beiden Kurven gelingt dies mit weniger Abweichungen?

## Schwarz-Metamere

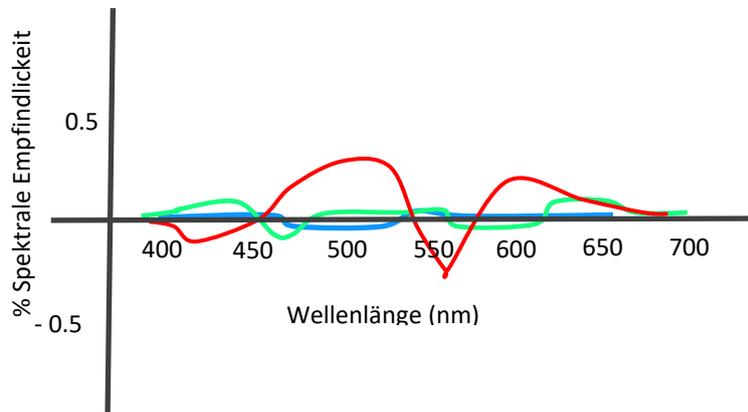
Hinter dieser Frage steht die Frage welche Kurve einem fundamentalen Metamer der Normspektralwertkurven am nächsten kommt. Diese Frage soll mit Hilfe der Cohen-Matrix beantwortet werden.

Diese kann als Projektor verstanden werden, der die Filterfunktion der Sensoren auf die fundamentalen Metamere der Normspektralwertfunktionen projiziert. Dabei werden diese Funktionen in Anteile zerlegt, die in diesem von den Metameren aufgespannten Raum liegen und den dazu senkrechten Anteil. Dieser senkrechte Anteil heißt Schwarz-Metamer. Der Name rührt daher, dass bei der Untersuchung von metamerem Verhalten von Farbspektren, dies derjenige Anteil des Spektrums ist, der bei einem Beobachter nicht zur Farbunterscheidung beiträgt.

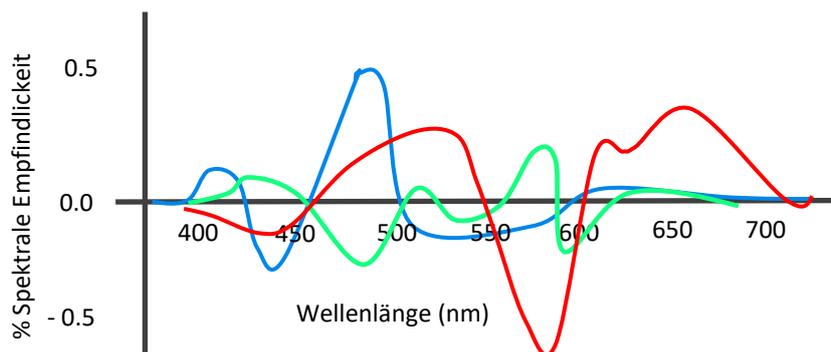
Bei der technischen Verarbeitung von Farbinformation ist der Schwarz-Metamer des Sensorspektrums der Anteil des Signals, der die Abbildung auf die Normspektralwerte „stört“. Je geringer dieser Anteil ist, desto besser gelingt die Transformation.

Hier die spektralen Verläufe der Schwarz-Metamere für die beiden Farbfilterfunktionen.

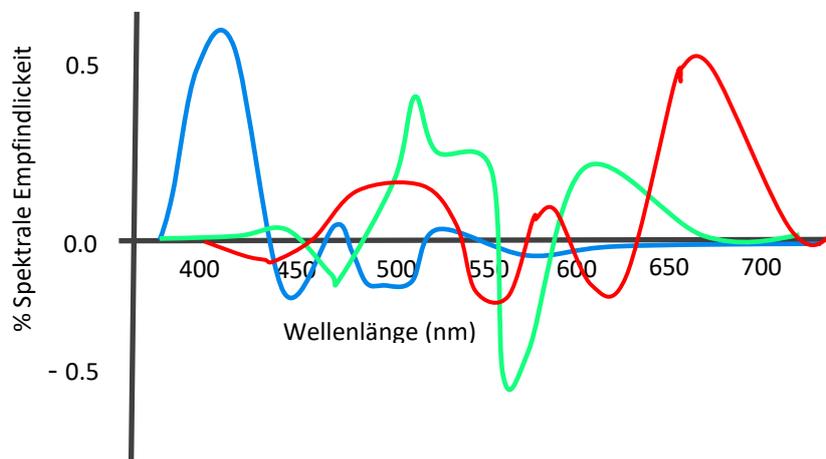
Spekt Verlauf Schwarz – Metamaer Filter 1



Spekt Verlauf Schwarz – Metamer Filter 2

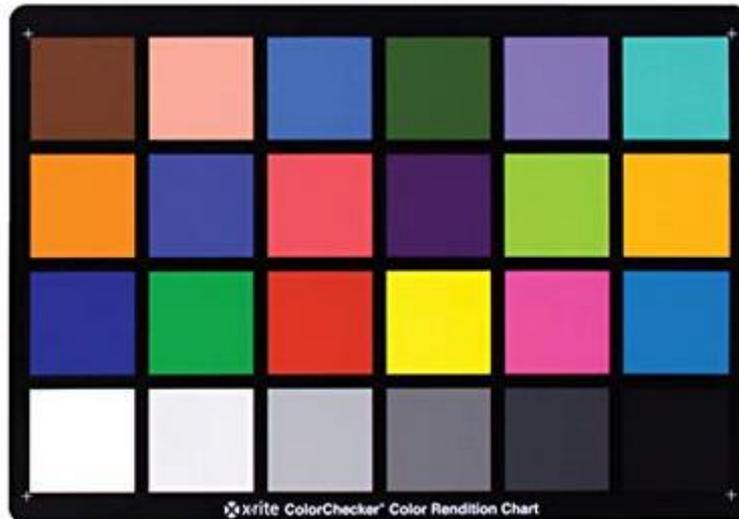


Spekt Verlauf Schwarz – Metamer Filter 3



Der Signalanteil des störenden Schwarz-Metamers ergibt sich aus dem Inneren Produkt von Farbspektrum und den spektralen Schwarz-Metamerkurven. Dieser ist bei Kurven 3 insbesondere im kritischen Grünanteil deutlich größer als bei 1. Und 2. Diese Störanteil kann ohne Kenntnis des Farbspektrums nicht vollständig korrigiert werden.

### Simulation mit ColorChecker



Dazu in einer Nachbildung des Scanprozesses aus den Spektren  $\beta$  der  $n=24$  Farbfelder und den spektralen Sensorempfindlichkeiten  $S$  von den dazugehörigen RGB-Werten berechnet. Es wird dabei eine Beleuchtung mit D50-Charakteristik angenommen.

$$rgb_n = (S_{r,g,b} * D50) \cdot \beta_n$$

Die so gewonnenen RGB-Werte werden mit einer 3x3 Matrix  $M$  auf die XYZ-Werte abgebildet und die Statistik der Differenzen im Farbabstandsmaß  $\Delta E$  nach CIE2000 bestimmt. Die Matrix  $M$  wird jeweils über die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

Zu den beiden Sensorvarianten gehören diese Fehlerstatistiken:

Spektrale Empfindlichkeitskurven 1:

Mean $\Delta E$	Q95	Max $\Delta E$
0.673978	1.4768	2.11624

Spektrale Empfindlichkeitskurven 2:

Mean $\Delta E$	Q95	Max $\Delta E$
2.11357	4.2178	4.66706

Spektrale Empfindlichkeitskurven 3:

Mean $\Delta E$	Q95	Max $\Delta E$
2.85943	6.5727	10.5661

Wie zu erwarten können die mit Filterkurven 1 gewonnenen RGB-Werte mit den geringsten Abweichungen in den Normfarbraum überführt werden. Während Kurven 2 noch akzeptabel sind ist der hohe Maximalfehler bei Kurven 3 kritisch.

## 1.1 Gesamtbetrachtung

Die dE-Abweichungen können mit nichtlinearen Verfahren deutlich verringert werden. Doch bringen diese immer auch eine größere Empfindlichkeit der Transformation für geringe Abweichungen der Prozessparameter mit sich.

Es soll aber auch erwähnt werden, dass diese Transformierbarkeit nur ein Aspekt des Filterdesigns darstellt. Es ist beim Vergleich der Kurven augenfällig, dass die Flächen unter den Kurven bei 2. und 3. deutlich größer sind. D.h. das vorhandene Licht wird besser ausgenutzt was sich in einem besseren Signal/Rauschverhältnis niederschlagen kann.

Literatur:

1. EBU TECH 3353 Development of a „Standard” Television Camera Model implemented in the TLCI-2012
2. White Paper Jai: How does prism technology help to achieve superior color image quality
3. Jozef Cohen: Visual Color and Color Mixture: The Fundamental Color Space

Whitepaper



**Chromasens GmbH**

Max-Stromeyer-Straße 116  
78467 Constance  
Germany

Phone: +49 (0) 7531 876-0

Email: [info@chromasens.de](mailto:info@chromasens.de)