

# VIDEOTECHNIK MIB1

Folien zur studiengangbezogenen Grundlagenvorlesung SoSe\_24

## Druckversion

Dies ist KEIN Skript, sondern eine einfache Druckversion der, in der Vorlesung verwendeten, Folien und Animationen.

Diese Druckversion ist optimiert auf DINA4-Format pro Seite, Bitte verwenden Sie keine kleinere Druckformatierung.

**Diese Druckversion dient nur zur Orientierung bezüglich  
der angesprochen Fachthemen und ersetzt kein Lehrbuch.  
Zum vertiefenden Lernen bitte die Fachbücher der  
Literaturliste verwenden!**

HOCHSCHULE  
FURTWANGEN  
UNIVERSITY



### Copyright

Diese Lerneinheit unterliegt einer permanenten Aktualisierung. Einige Quellen sind noch nicht sachgerecht gekennzeichnet. Daher sind diese Folien ausschließlich für den internen Gebrauch in der Fakultät Digitale Medien / Hochschule Furtwangen bestimmt.

# Einführung

# Geschichten erzählen in Bildern

Der erste Schritt in die Welt der Medienproduktion geschieht im KOPF:

**Photografie, Video und Film können niemals die „Realität“ abbilden !**

Grund:

jedem Produktionsvorgang eines Bildes geht ein Reflexionsvorgang voraus! (im primitivsten Fall: *Was will ich überhaupt aufnehmen = sichtbar machen?*)

**Photografie, Video und Film  
erzählen  
Geschichten in Bildern! \***



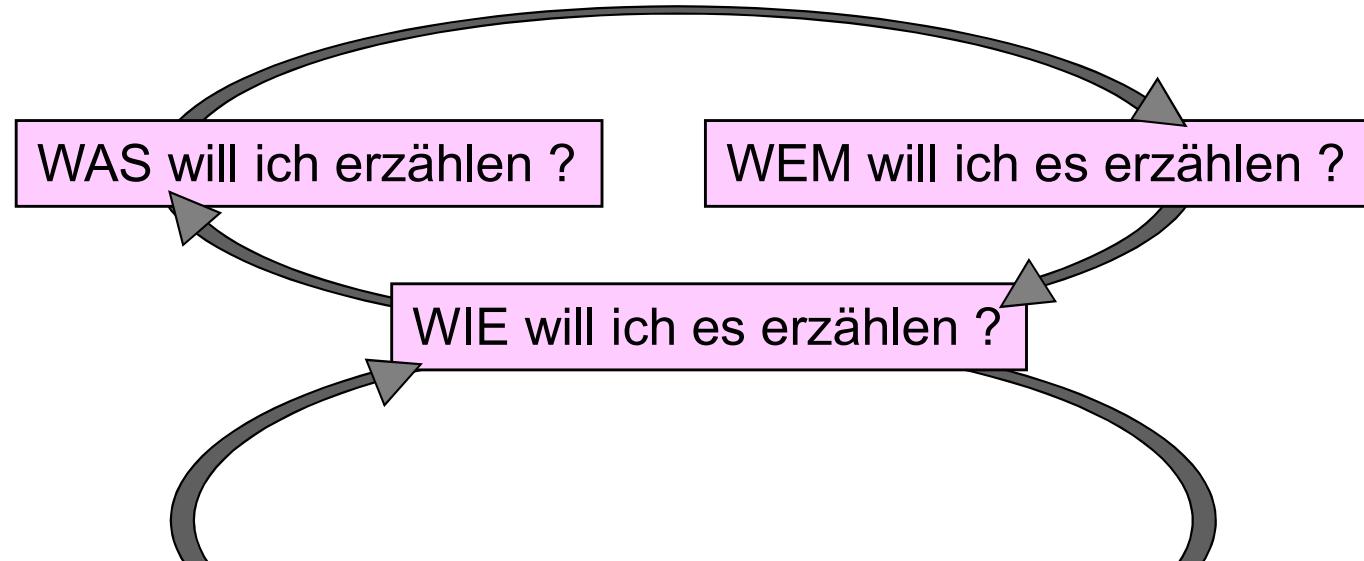
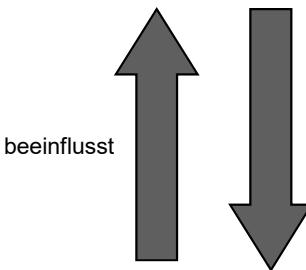
\* d.h. in der Konsequenz:  
jedes visuelle Medium transportiert Informationen mittels einer „Bildsprache“ (engl. visual style)

Frage:  
Welche ersten Konsequenzen ergeben sich daraus  
z.B. für einen Kameramann (Director of Photography/DoP)?

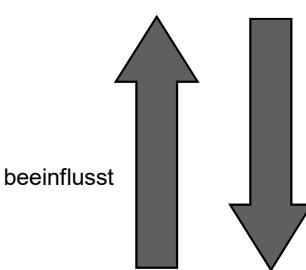
# Medientechnik / Mediengestaltung / Medienkonzeption:

(wie hängen sie zusammen?)

## MedienKONZEPTION:

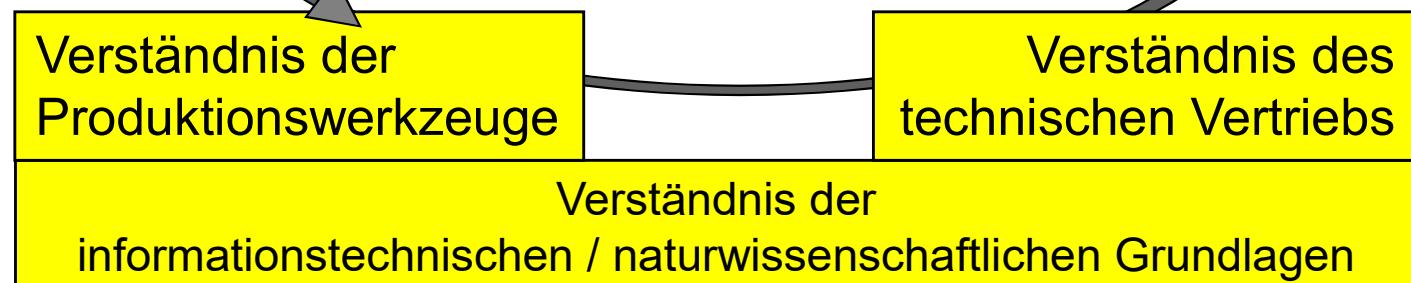


## MedienGESTALTUNG:



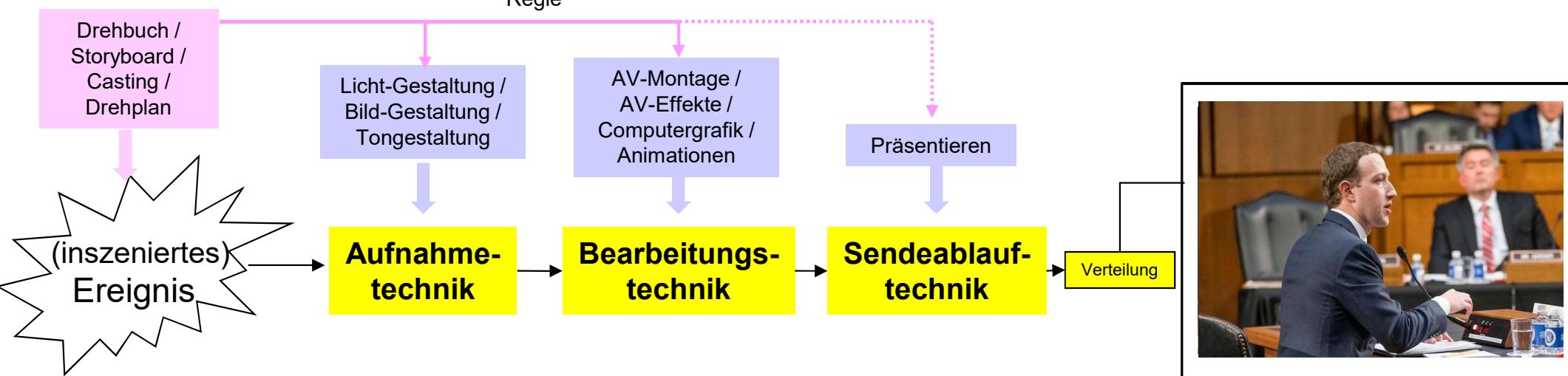
Handwerklich-kreative Umsetzung des Konzeptes

## MedienTECHNIK:



# Ein Beispiel (klassische TV-Produktion):

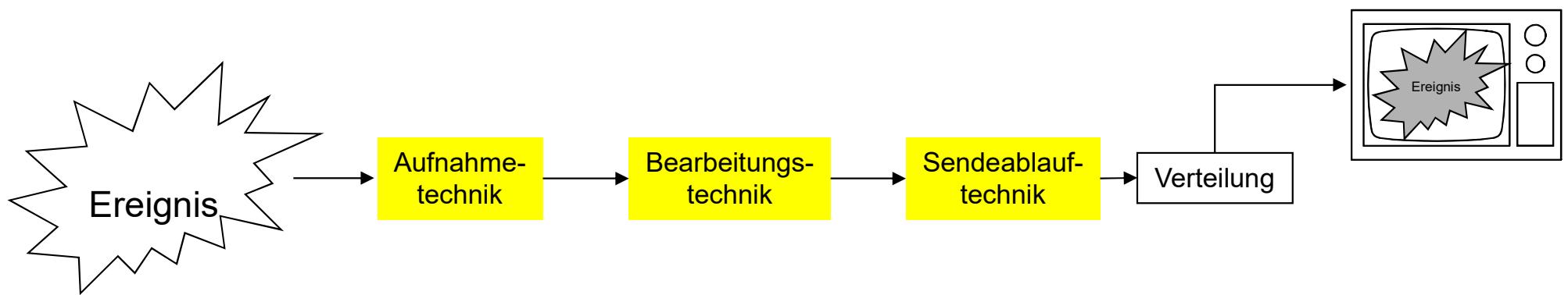
Exposee / Treatment



## Anmerkung:

Natürlich gab es kein Drehbuch für die Bundestagswahl-Berichterstattung oder die Kongressanhörung von Marc Zuckerberg.  
Diese Bilder sind nur ein hervorragendes Beispiel dafür, dass in der Medienproduktion immer inszeniert wird !

# Medienproduktion ist TEAMWORK !



Auszug:  
beteiligte  
Berufs-  
gruppen  
  
(männliche  
Bezeichnungsform)

Reporter,  
Schauspieler, Statist,  
Set-Designer,  
Maske/Kostüm,  
Lichttechniker,  
Produktionsleiter,  
...

Aufnahmeleiter,  
Regisseur,  
Kameramann,  
Bildtechniker,  
Tontechniker,  
Assistenten,  
...

Cutter,  
Toningenieur,  
Grafiker,  
Komponist,  
Animations-Editor,  
Synchronsprecher,  
Geräuschemacher,  
...

Moderator,  
Ablaufregisseur,  
Chef v. Dienst,  
Bildingenieur,  
Toningenieur,  
Lichttechniker,  
...

Schaltmeister,  
Sendertechniker,  
...

Redaktion, Herstellungsleitung, Archiv, Honorare, Systemservice und Projektierung, Disposition, Catering, Bürokommunikation, ...

**Beispiel: TV-Produktion / beteiligte Berufsgruppen:**

# Einordnung der Vorlesung Videotechnik:

Die Vorlesung **Videotechnik** versucht eine enge Kopplung zwischen **Technischem Grundverständnis** und Verständnis des **Einsatzes der Videotechnik** herzustellen !

## 1. Naturwissenschaftliche Grundlagen der Videotechnik

- Licht
- visuelle Wahrnehmung des Menschen
- visuelle Wahrnehmung von „Motion-Pictures“

- Bildaufnahme-
- Bilderdarstellungs- } Techniken

- Video-Signale

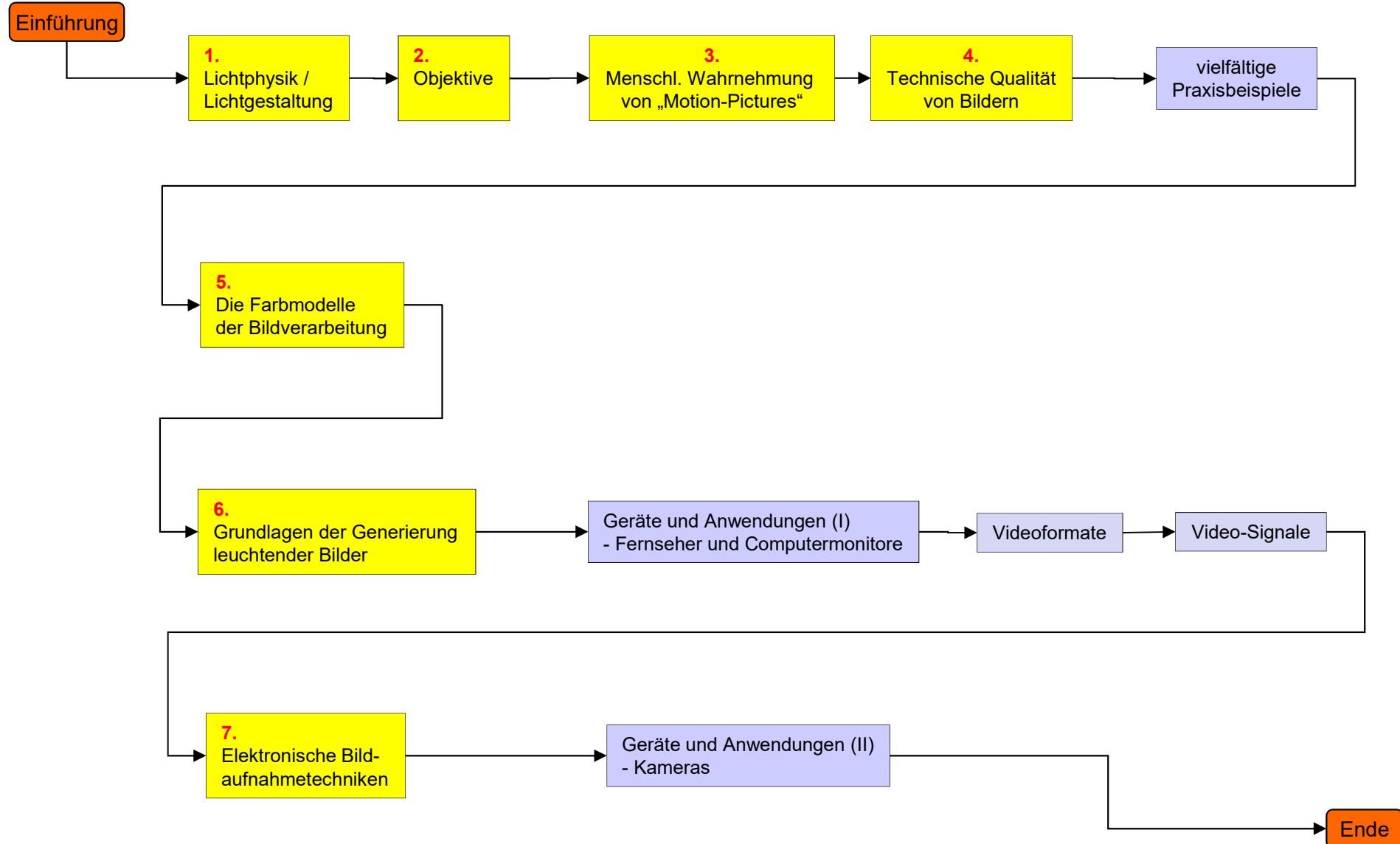
- Speicherungs-
- Bearbeitungs- } Techniken
- Übertragungs-

## 2. Konsequenzen für den technischen Einsatz in der Videoproduktion

- Objektive/Kameras
- Technische Beschreibung von bewegten Bildern
- Technische Qualität von bewegten Bildern
- Fernseher vs. Computermonitore
- Signalformate
- Produktionsformate
- Computergrafik
- etc.

# Ablauf der Grundlagenvorlesung VIDEOTECHNIK:

(s.a „Strukturierter Themenüberblick VIDEOTECHNIK / Lerneinheiten 1-7“ und „Walkthrough Vorlesungsinhalte VT“ im Dateibereich!)



# Literaturhinweise:

- **Ulrich Schmidt**  
“**Professionelle Videotechnik**”  
**Springer Vieweg; Auflage: 7., 2021**  
**ISBN-13: 978-3-662-63943-6**
- **Videotechnik-Lernprogramm!**  
(von Studenten - für Studenten)  
**explodedview.dm.hs-furtwangen.de**  
(am besten downloaden!!)
- **Charles Poynton**  
„**Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces**“, **Morgan Kaufmann Publishers**,  
**Second Edition 2012, ISBN-13: 978-0123919267**  
zusätzlich: [www.poynton.com](http://www.poynton.com)
- **Herbert Zettl**  
“**Sight, Sound, Motion: Applied Media Aesthetics**”, **Cengage Learning**  
**5<sup>th</sup> Edition 2007, ISBN-13: 978-0-495-502203**
- **Petrasch, Zinke**  
“**Videofilm: Konzeption und Produktion**”, **Carl Hanser Verlag; 2. Auflage, 2012**  
**ISBN-13: 978-3446427570**
- **Collin Ware**,  
„**Information Visualization: Perception for Design**“, **Morgan Kaufmann, 4. ed., 2020**  
**ISBN-13: 978-0128128756**
- **Roland Greule**,  
„**Licht und Beleuchtung im Medienbereich**“, **Carl Hanser Verlag, 2021**  
**Ebook-ISBN: 978-3-446-46865-8**

Dieses Folienscript dient nur zur Orientierung bezüglich der angesprochenen Fachthemen und ersetzt kein Lehrbuch. Zum vertiefenden Lernen bitte die Fachbücher der Literaturliste verwenden !

# Lernziele der Vorlesung:

Die Vorlesungen VIDEOTECHNIK erfolgt im *Grundstudium* über ca. 15 Vorlesungseinheiten und versucht folgende Eigenschaften zu vereinen:

- Überblick (thematischer Bogen von den Grundlagen zu den wichtigsten Basis-Anwendungen der Videotechnik)
- Wissen (es werden zu jedem Thema die wesentlichen, technischen Fakten vermittelt)
- Praxis (es wird konsequent der Bezug zwischen Theorie und Praxis hergestellt)

**Es sollen folgende Lernziele erreicht werden:**

- Nomenklatur nach Bloom,u.a./1972 -

1. Reproduktion des in der Vorlesung präsentierten Fachwissens
2. Fähigkeit zur Einordnung des Fachwissens (Reorganisation/Verständnis)
3. Fähigkeit zur Anwendung des Fachwissens (Transfer / Analyse)

Schwierigkeitsgrad

# Workload der Veranstaltung und Lernzielkontrolle:

## **Workload der gesamten Veranstaltung: 2 ECTS = ca. 60h**

Diese Veranstaltung ist mit einem studentischen Workload von 2 ECTS (Leistungspunkte) beziffert, dies entspricht einem Arbeitsaufkommen vom 60h für einen "mittleren" Studenten.  
Der Workload umfasst die Vorlesungszeit und die Prüfungszeit.

**Der empfohlene Zeitaufwand pro Student teilt sich dabei folgendermaßen auf:**

- 1. Vorbereitung der Vorlesung:  $14 \times 0,5\text{h} = 7\text{h}$**
- 2. Teilnahme an der Präsenzlehre (Vorlesung):  $15 \times 1,5\text{h} = 22,5\text{h}$**
- 3. Nachbereiten der Vorlesung (Recherche + VL-begleitende Übungsaufgaben):  $14 \times 1\text{h} = 14\text{h}$**
- 4. Gezielte Prüfungsvorbereitung : 2Tage à 8h = 16h**

***Das Niveau der Abschlussprüfung basiert auf diesen Zeitannahmen !!!***

### Hinweis:

Fragen zum Vorlesungsstoff können jederzeit auch im Forum der Veranstaltung gestellt werden.  
Antwort meinerseits erfolgt prompt (bitte auch gegenseitig antworten).

## Einordnung des Praktikums:

Zwischen VERSTEHEN und „BE-GREIFEN“ liegen Welten!

Zwischen THEORIE und PRAXIS liegt die Unzulänglichkeit des Machbaren!

Eine weitere, gezielte und an die Vorlesungsthemen gekoppelte Vertiefung von Videotechnik/Videoproduktion findet an 7 Doppelterminen im **Medientechnik-Praktikum** statt !

### Die Vision:

„Die Studierenden sollten nach Absolvieren der Vorlesungen Audio- und Videotechnik und des zugehörigen Medientechnik-Praktikums in der Lage sein

- die technischen Grundlagen der AV-Produktion zu verstehen und
- die Technik in einfachen Konfigurationen professionell anwenden zu können“.

„Es werde Licht!“

# Licht-Physik & Licht-Definitionen

## Was wir in dieser Runde lernen:

- In der Medientechnik haben wir es oft mit Zeit- und Raumphänomenen zu tun, welche über trigonometrische Funktionen beschrieben werden. Beispiele: Schallwelle und Videosignal.
- Die medientechnische Definition von Licht als elektromagnetische Welle.
- Die medientechnische Definition vom *sichtbarem Lichtspektrum* als Mix mehrerer elektromagnetischer Wellen unterschiedlicher Wellenlänge und Intensität im Bereich ca. 400-800nm.
- Definitionen: *Natürliches Licht* vs. *Künstliches Licht*.
- Innerhalb des Künstlichen Lichts: Unterscheidung zwischen *Kunstlicht* vs. (*Quasi-*)*Tageslicht*.
- Spektrale Unterschiede bei Außenaufnahmen vs. Innenaufnahmen.
- Luminous efficiency: Menschen nehmen einen roten, grünen und blauen Scheinwerfer gleicher Leistung unterschiedlich hell wahr → Alle Lichtmessungen nehmen die menschliche Helligkeitswahrnehmung als Referenz!
- Die wichtigsten physikalischen Messgrößen in der Medienproduktion für Lichtleistung, Leuchtdichte, Belichtung und Spektralverteilung. Wie wird gemessen? („Belichtungsmessungen“)
- Wichtige Basis-Kenngrößen für Scheinwerfer.

# Medienphysik = Beschreibung von Zeit- und Raumphänomenen

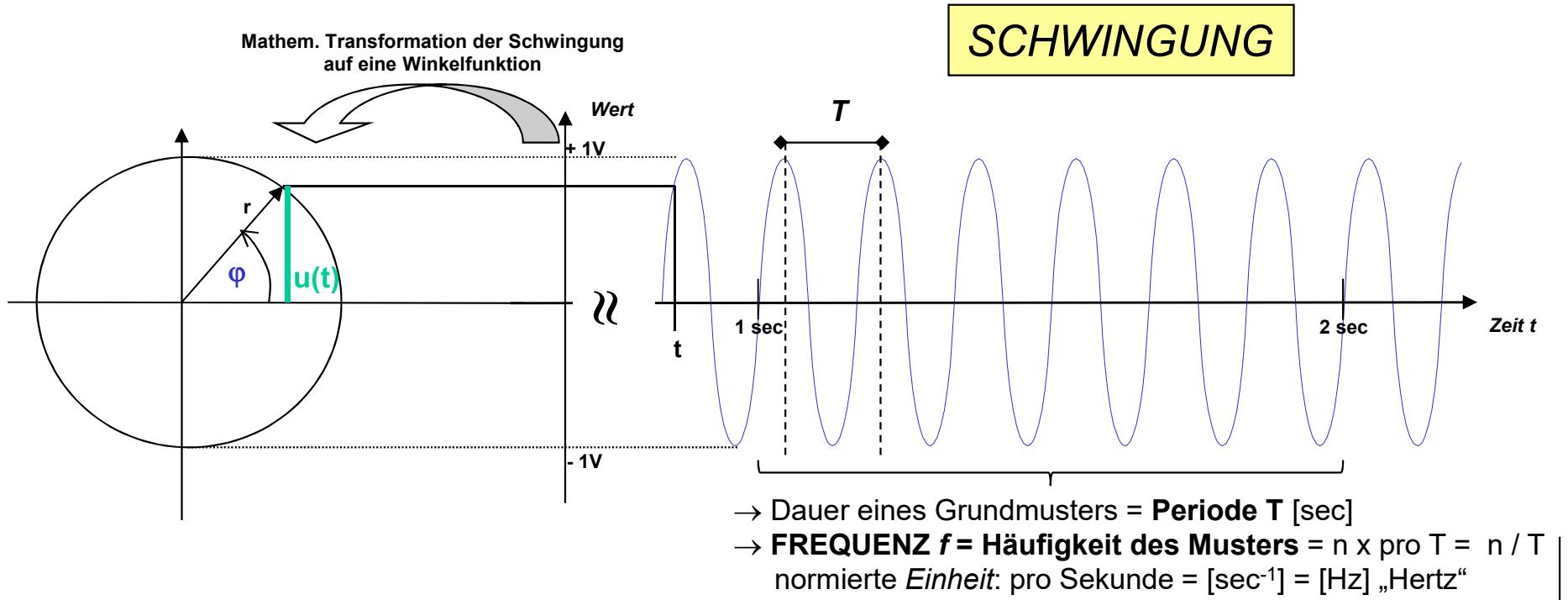
Ein über die ZEIT regelmäßig wiederkehrendes, harmonisches Wertemuster nennt man ...

SCHWINGUNG

Ein sich über den RAUM regelmäßig ausbreitendes, harmonisches Wertemuster nennt man ...

WELLE

# Mathematische Beschreibung von schwingenden Phänomenen:



## Mathematische Beschreibung einer Schwingung:

$$u(t) = |u| * \sin [(2\pi/T) * t + \varphi_0]$$

Amplitude

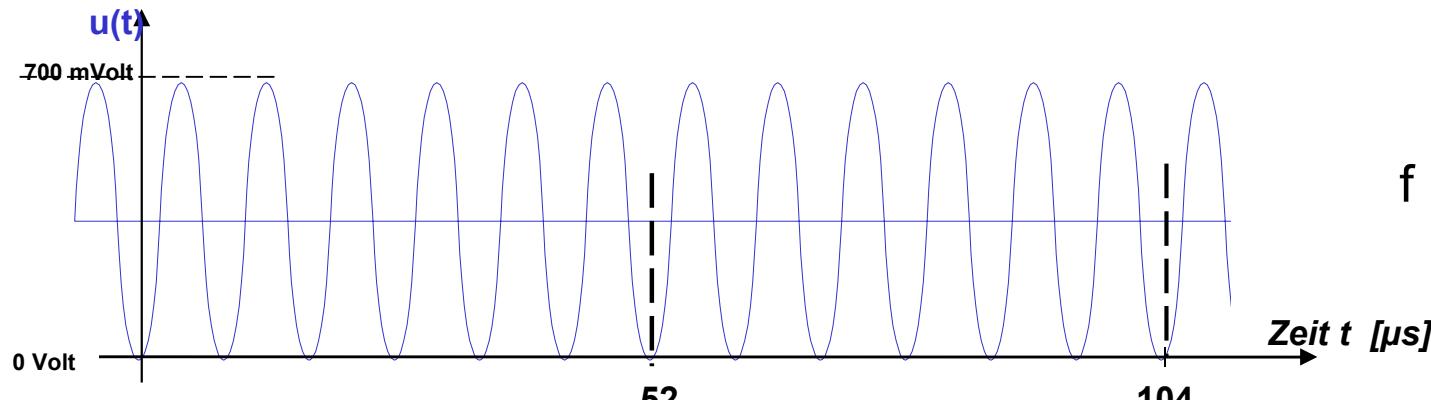
$$= 1V * \sin [\underbrace{2\pi f}_{\text{Abk.: „Kreisfrequenz“}} * t + \varphi_0] = 1V * \sin [2\pi 6Hz * t + 0^\circ]$$

(Start-)Phase = Winkel zum Zeitpunkt  $t=0$

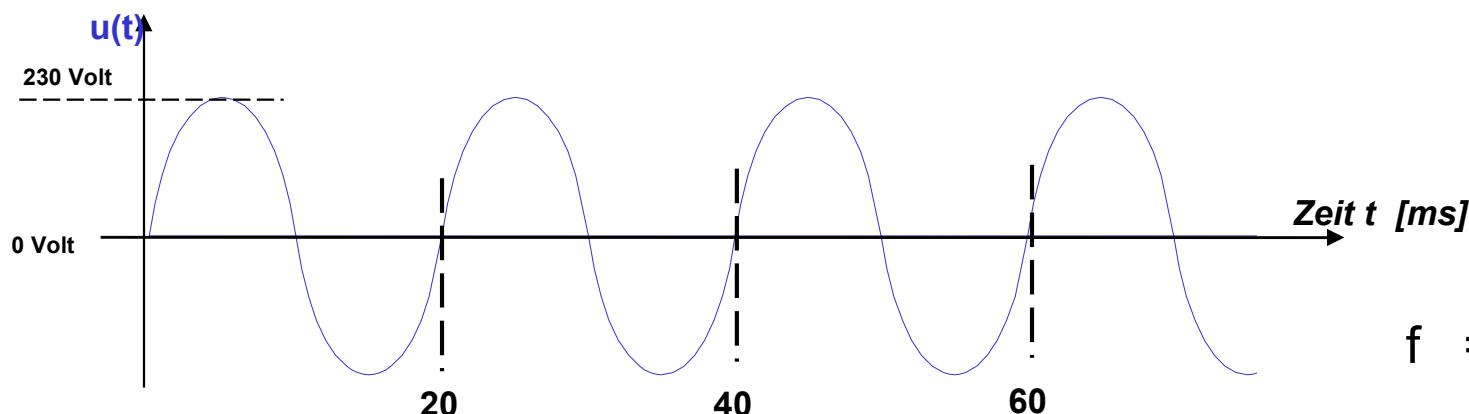
Häufigkeit dieser Schwingung  
1 x pro 0,167sec ODER  
6 x pro 1 sec = 6 Hz

# Übungsaufgabe 1:

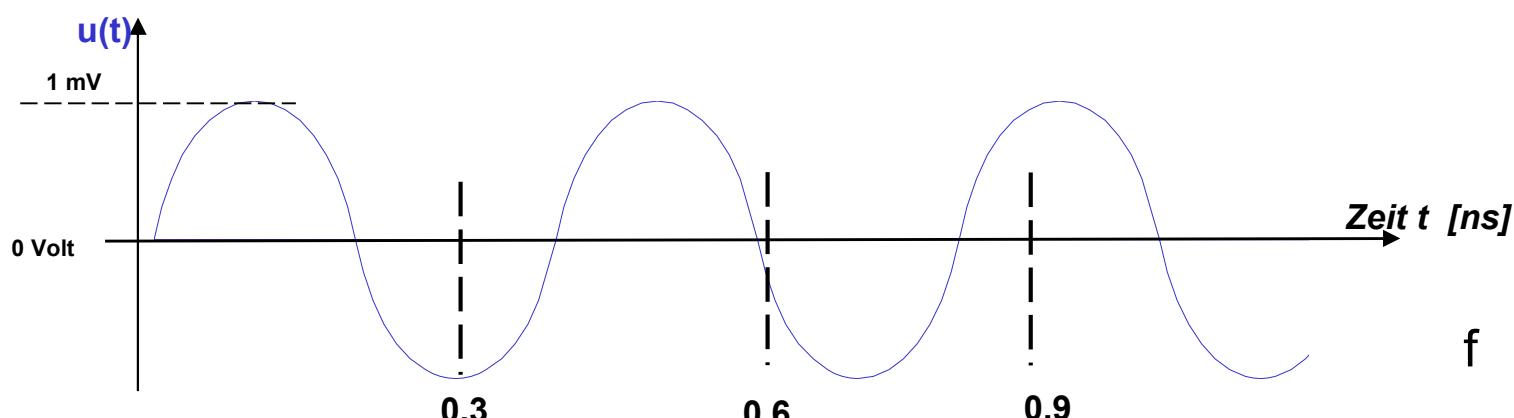
Ermitteln Sie (nur) die *Frequenz f* der folgenden Signale:



$$f = \frac{6 \text{ (Schwingungen)}}{(\text{pro}) 52 \mu\text{s}} = 115,4 \text{ kHz}$$

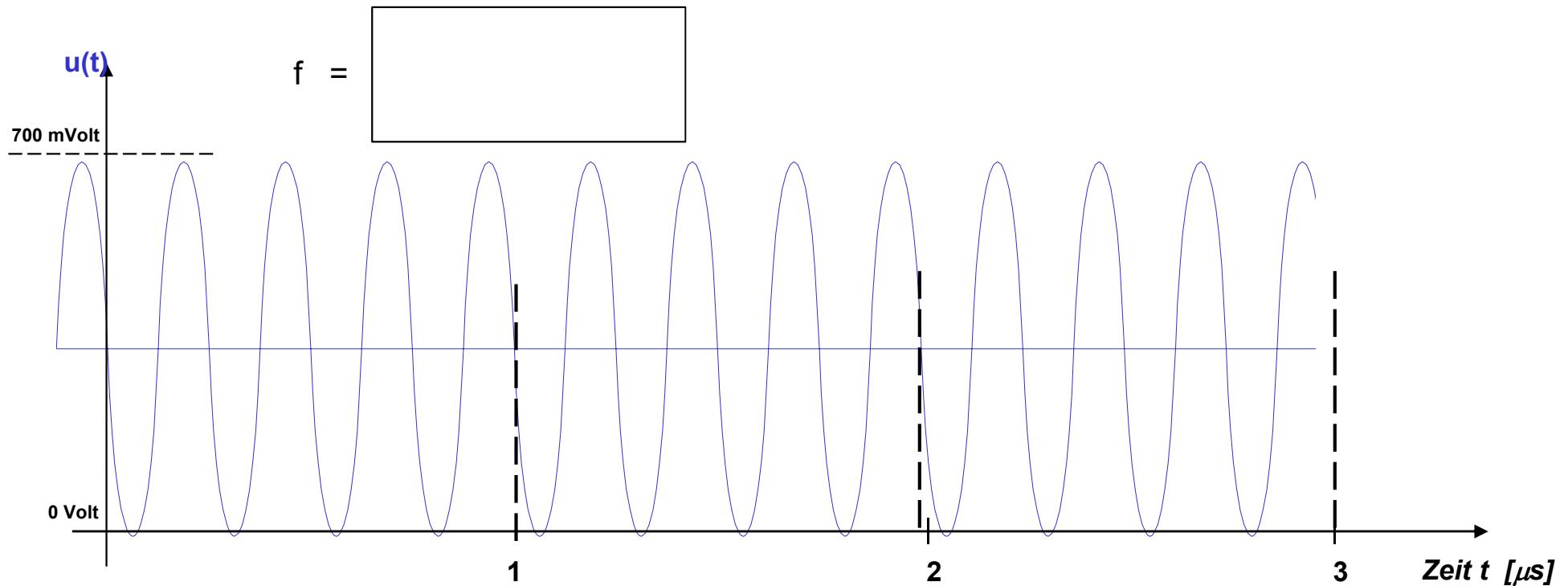


$$f = \dots = \dots \text{ Hz}$$



$$f = \dots = \dots \text{ Hz}$$

## Übungsaufgabe2:

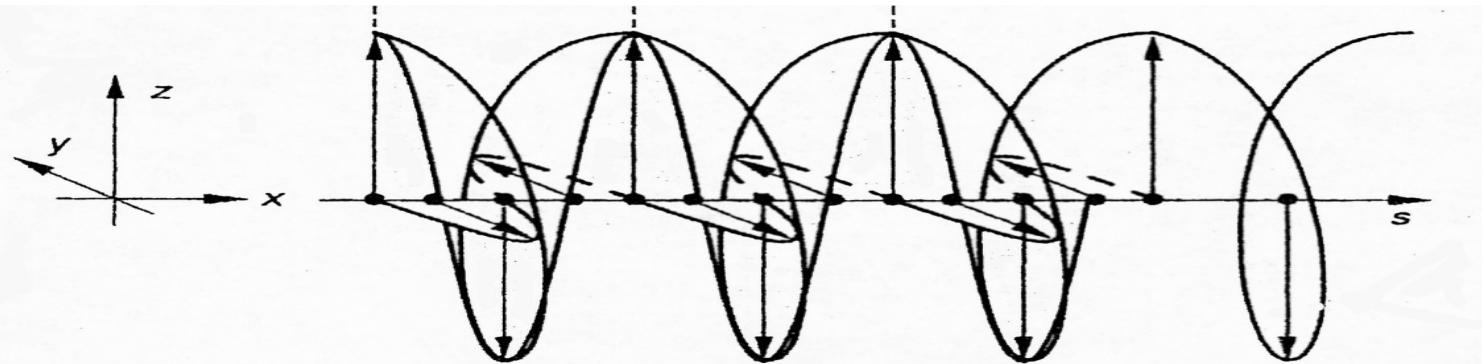


Wie lautet die exakte mathematische Beschreibung dieser Video-Signalschwingung  $u(t)$  ?

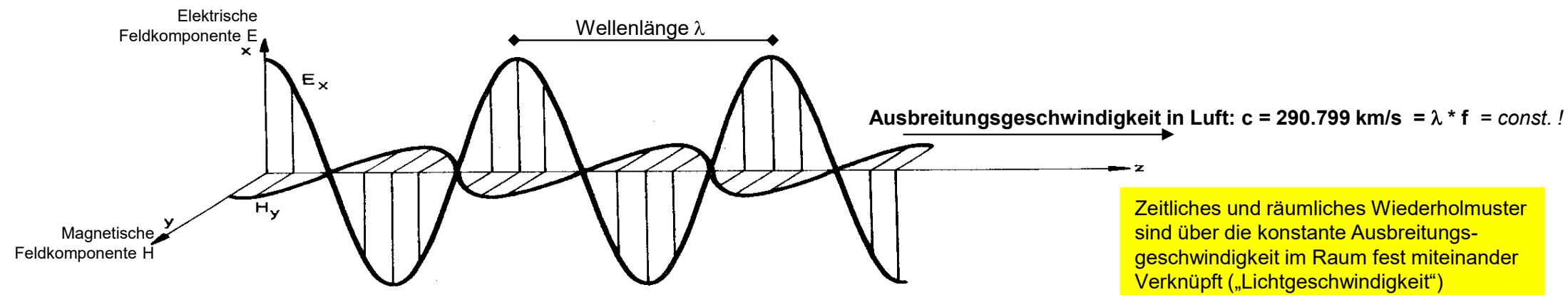
# Naturwissenschaftliche Beschreibung von Licht:

LICHT ist eine **elektromagnetische** Naturerscheinung, d.h. Licht kann als *schwingendes UND sich gleichzeitig räumlich ausbreitendes elektro-magnetisches Feld* beschrieben werden.

(Bsp. Zirkularwelle).



(Bsp. Transversalwelle).



# Polarisationsfilter im professionellen Filmeinsatz

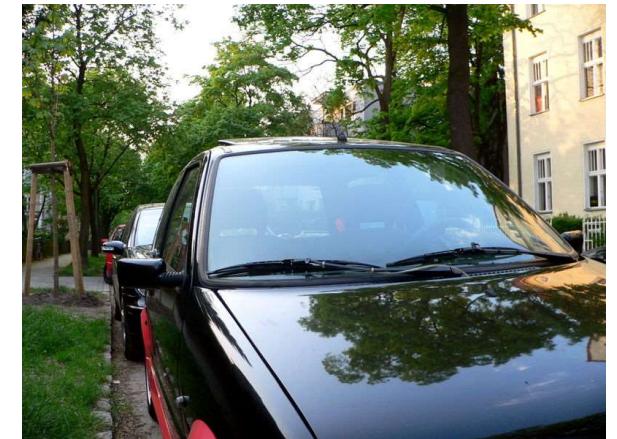
## Aufgabe 1:

### Drehbuch:

Tag / Sonnenschein: Detektiv X (und sein Assistent ;>) fahren mit dem Wagen vor dem Gebäude vor. Nahaufnahme durch die Frontscheibe auf ihren Dialog:  
„Wir müssen sofort rein und ...“

### Gestalterisches Problem:

Kamera vor dem Auto kann die Personen hinter der Glasscheibe, aufgrund der Lichtreflexionen auf der Glasscheibe, kaum „erkennen“



---

Verstehen Sie die Lösung unter <http://de.wikipedia.org/wiki/Polarisationsfilter> ?

## Aufgabe 2:

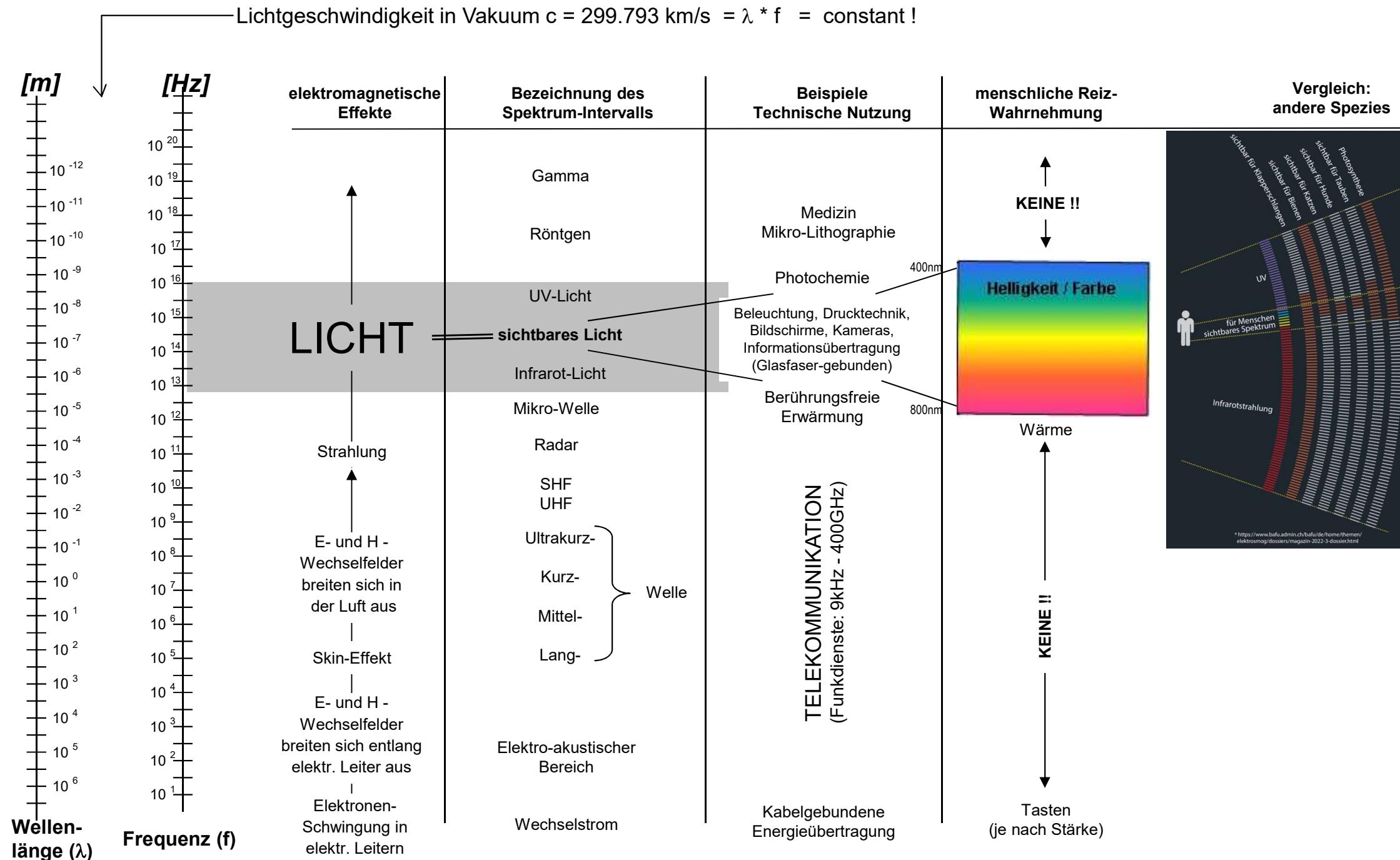
Recherchieren Sie den Einsatz von Polfiltern in 3D-Kinos und erläutern Sie die Funktionsweise.

# Definitionen Lichtspektrum:

LICHTSPEKTRUM ist der Oberbegriff für **elektromagnetische Wellen mit einem zeitl. Wiederholungsmuster** zwischen  $10^{13}$  Hz und  $10^{16}$  Hz (bzw. einer Wellenlänge von  $10^{-6}$  m bis  $10^{-9}$  m)

Mit SICHTBAREM LICHT wird der kleine Wellenlängenbereich zwischen 380nm bis 780nm bezeichnet, in dem der **Mensch** die elektromagnetischen Wellen als *Helligkeits- und Farbreiz wahrnehmen kann (!).*

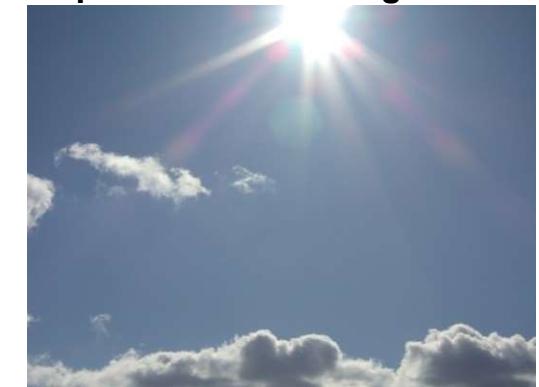
# Überblick: Elektromagnetisches Frequenzspektrum:



# Begriff: „Spektralverteilung“

Beispiele für Wellenlänge-Gemische:

In der Medienproduktion kommt  
**selten Licht mit einer eindeutiger Wellenlänge vor,**  
 sondern meist ein  
**Wellen(längen)-Gemisch mit einer  
 spezifischen Spektralverteilung !**

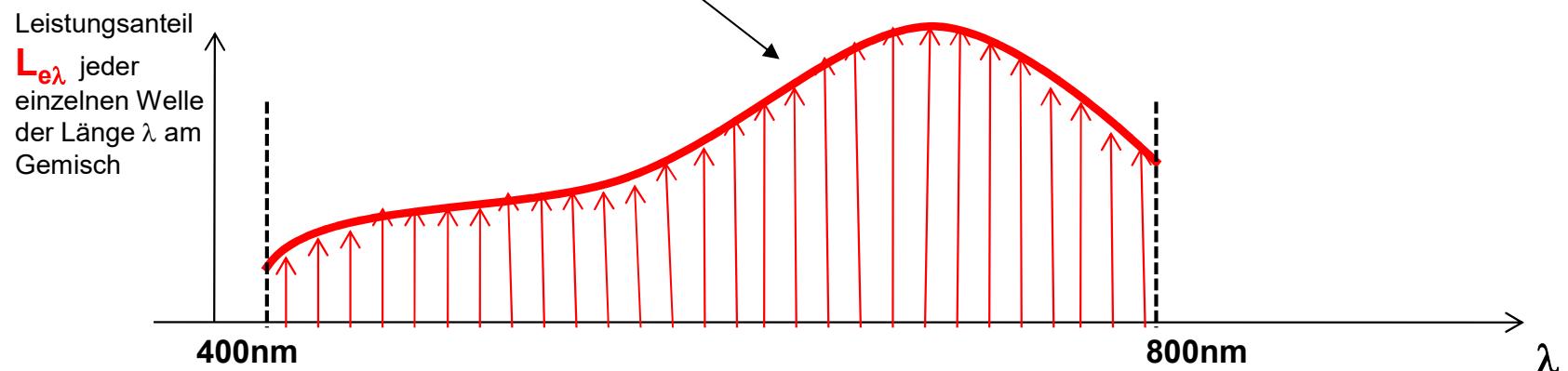


Natürliches  
Licht



Scheinwerfer

In der Medienproduktion ist daher die **Spektralverteilung** im Intervall des **sichtbaren Lichts** maßgeblich !



# Definition: Natürliche Licht

Als **NATÜRLICHES LICHT** bezeichnet der Mensch:

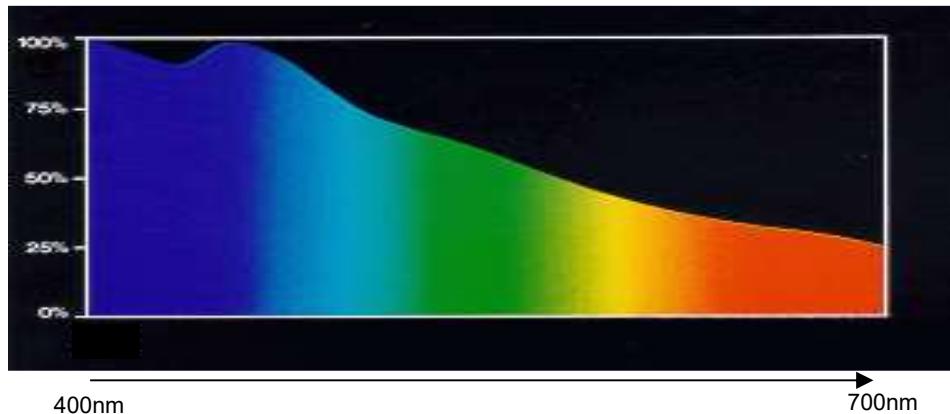
- das sichtbare, räumlich lokalisierbare Licht der **Sonneneinstrahlung**,
- das sichtbare, diffuse Streulicht des **Himmels**.

Beide ändern ihre **Wellenlängen-Zusammensetzung** über den Tagesablauf (Sonnenstand und Bewölkung).

Angaben zum *Natürlichen Licht* müssen daher immer verknüpft werden mit **Jahreszeit, Uhrzeit und Bewölkung**.

**Bsp. Spektralverteilung:**

*Natürliche Licht im Sommer morgens/vormittags*



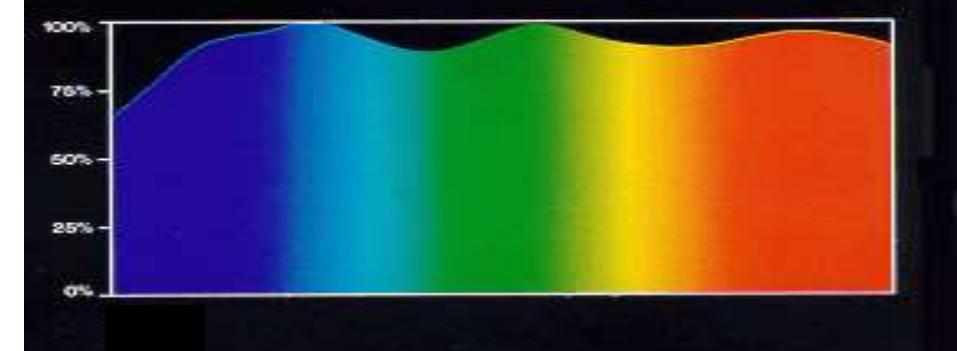
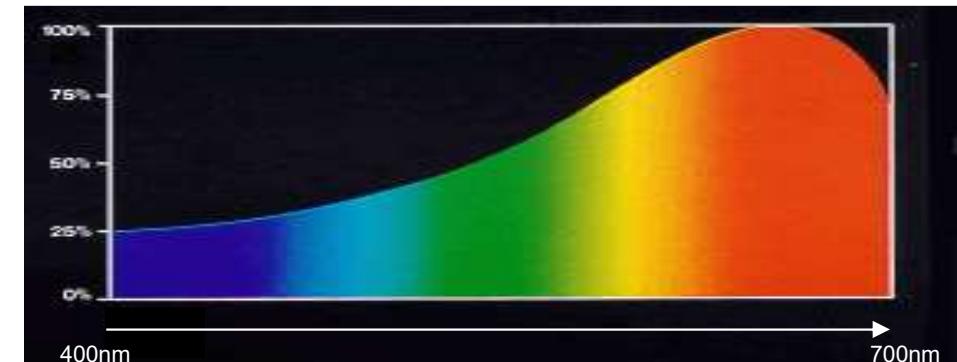
Anm.: Seit Lord Rayleigh (1842 bis 1919) wissen wir, warum die Himmelsfläche tagsüber eher kurzwellig=blau ist: Verantwortlich sind die Luftmoleküle, vorwiegend Stickstoff und Sauerstoff, die das Sonnenlicht in alle Raumrichtungen streuen. Diese Streuung hängt in der vierten Potenz von der Wellenlänge des Lichts ab: Je kürzer die Wellenlänge, umso stärker die flächige Streuung. Und die Wellenlänge von Blau ist ca. halb so groß wie die von Rot.

Dass der Himmel früh-morgens und spät-abends eher rot-orange leuchtet, erklärt die Rayleigh-Streuung auch: Da aufgrund des Sonnenstandes nun der Weg des Lichtes durch die Atmosphäre sehr viel weiter ist, hat das Licht schon sehr viele Luftmoleküle getroffen. Die blauen Anteile sind in ihrer Intensität längst in alle Richtungen „verstreut“ und wir sehen nur noch, was weitestgehend ungestreut hindurchgelangt: Rot-Orange.

Wolken (= große Wassermoleküle) diffusieren gemäß des Mie-Gesetzes alle Wellenlängen gleich stark und erscheinen daher weiß/grau.

**Bsp. Spektralverteilung:**

*Natürliche Licht im Sommer spät-nachmittags / abends*



**Bsp. Spektralverteilung:**

*Natürliche Licht im Sommer mittags*

# Definition: Künstliches Licht

KÜNSTLICHES LICHT (exakt: künstlich **erzeugtes** Licht)

sind vom Menschen **technisch erzeugte, elektromagnetische Wellen im sichtbaren Bereich.**

Dies können entweder einzelne, *klar abgegrenzte Wellenlängen* sein (Quelle: LASER\* oder monochrome LED\*\*) oder *Wellenlängen-Gemische* (Quelle = „Lampen“).

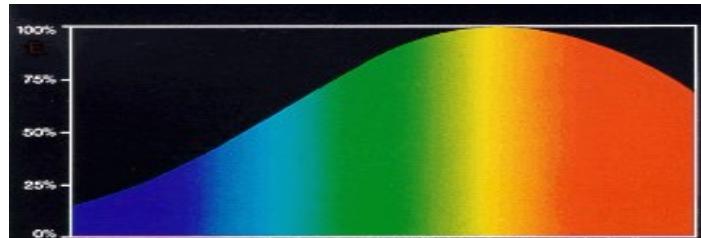
\* Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

\*\* Light Emitting Diode

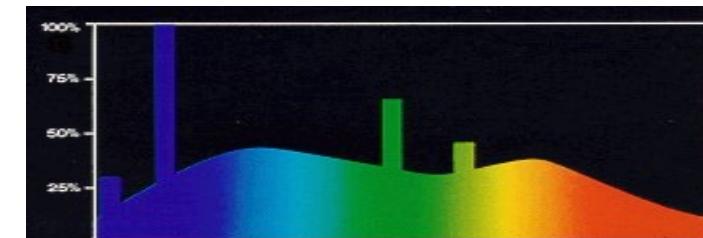
Eine technische Vorrichtung zur **Erzeugung + Verteilung** von künstlichem Licht nennt man

LEUCHTE oder SCHEINWERFER.

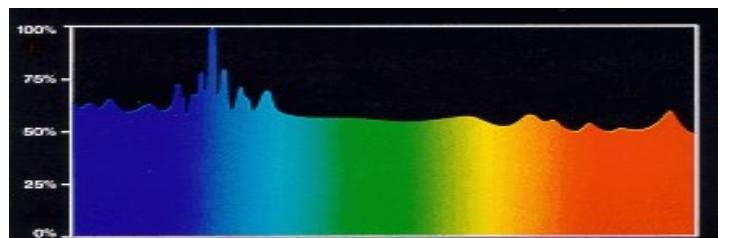
**Scheinwerfer = Lichtquelle** (Lampe) **+ Lichtverteilung** (Reflektor, Lichtkanal, Linse, etc.)



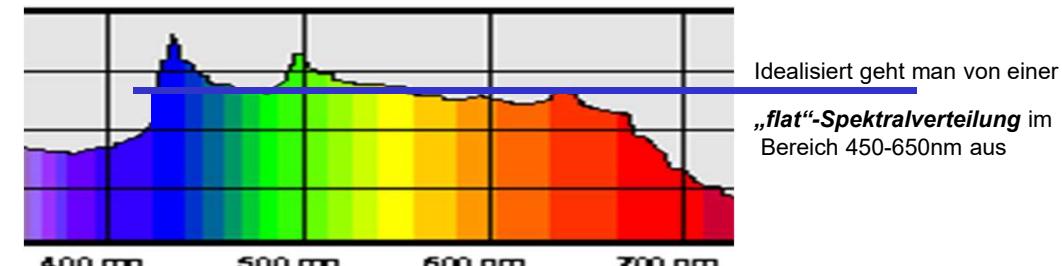
Bsp. Spektralverteilung: **Glühlampe**



Bsp. Spektralverteilung: **Tageslicht-Leuchtstoffröhre**



Bsp. Spektralverteilung: **Xenon-Lampe (Auto)**

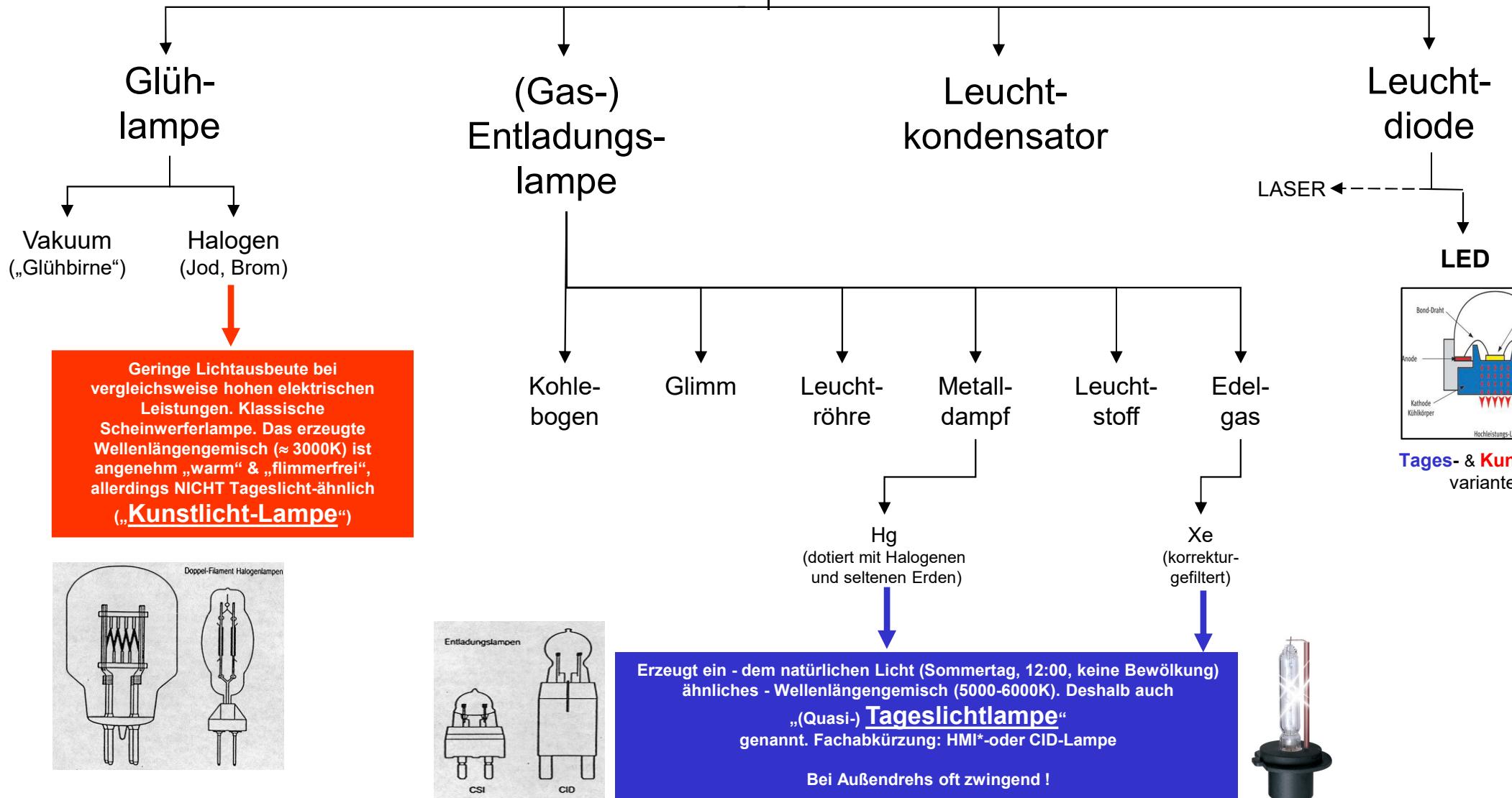


Bsp. Spektralverteilung: **HMI-Tageslicht-Lampe/Filmproduktion** (s.a. Folie 33)

# Elektrische („künstliche“) Lichtquellen in der Medienproduktion:

(Anm.: es gibt neben elektrischen auch noch Verbrennungs-Lichtquellen z.B. Gaslampen etc.)

## Elektrische Lichtquellen (Lampen)



# Ein Ansatz zur objektiven Bestimmung des sichtbaren Lichtes:

Bis auf künstlich-erzeugtes,  
*monofrequentes LASER/LED-Licht*

kommt in der Natur

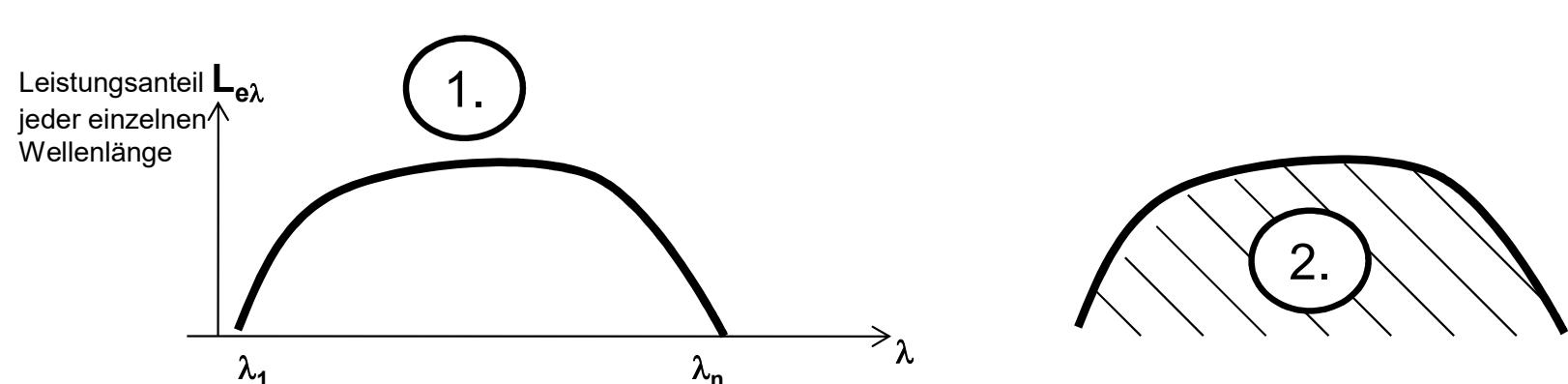
***selten Licht mit einer eindeutiger Wellenlänge vor !***

⇒ sichtbares LICHT ist also mehrheitlich

1. ein **Wellenlängen-Mix\***,

\* Fachbegriff : „Spektralverteilung“

2. mit einer (integralen) elektromagnetischen Gesamt-**Strahlungsleistung** !

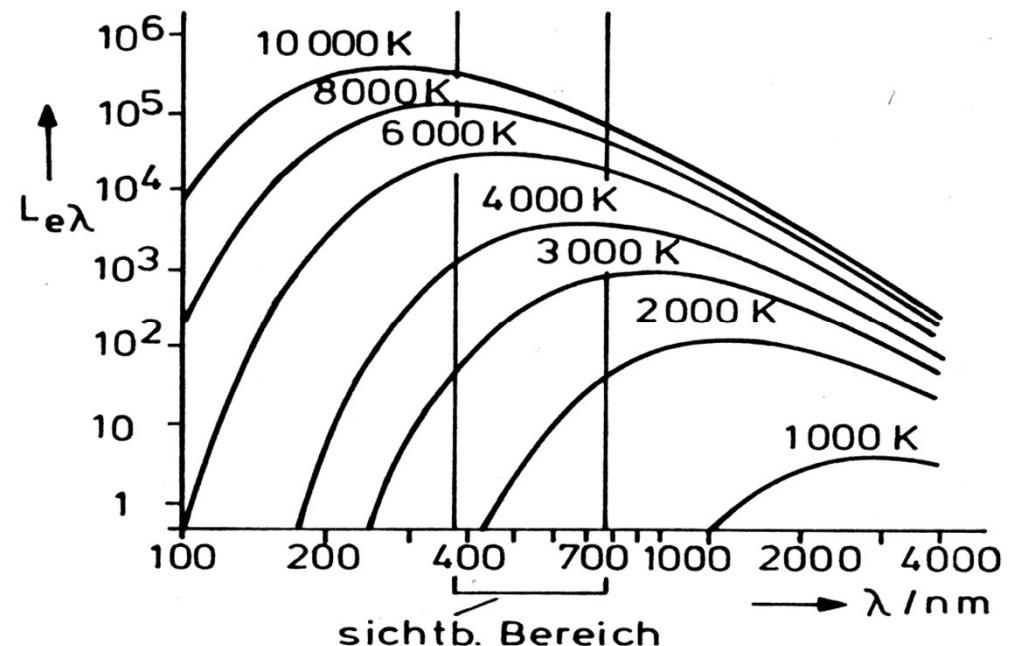


# Objektive Bestimmung des Wellenlängen – Mix von Licht:

Fachbegriff: „Spektralverteilung“

- Lampen (und die Sonne) sind meist Temperaturstrahler, d.h. der von ihnen erzeugte Wellenlängenmix ist vergleichbar der Spektralverteilung, eines schwarzen Temperaturstrahlers, wie er im Planck'schen Strahlungsversuch verwendet wird !
- Die Planck'sche-Verteilungskurve ist aber eine direkt zuordenbare Funktion der Temperatur !  
(angegeben in [Kelvin] = [Temp°C + 273] )
- Somit wird es möglich, jedes sichtbare Licht (im Sinne einer Spektralverteilung) durch EINEN repräsentativen Temperaturwert zu beschreiben !
- Man bezeichnet diesen „repräsentativen Wert“ als die **FARBTEMPERATUR**.

Strahlungsleistung  $L_e\lambda$  eines „Schwarzen Temperaturstrahlers“ für verschiedene Erhitzungszustände, analysiert nach den ausgesendeten Wellenlängen !  
(Max Planck, 1901)



z.B. Beleuchtungs-Festlegungen Film und Photobranche:

**Kunstlicht:** Wellenlängenmix  $\approx 3000-3500\text{K} \pm 150\text{K}$   
**(quasi-)Tageslicht:** Wellenlängenmix  $\approx 5000-7000\text{K} \pm 500\text{K}$

Anm.: FARBTEMPERATUR ist ein rein *technischer* Begriff und hat nichts damit zu tun, welche Emotion ein Licht bei uns auslöst  
(= Farb-Psychologie: Warmes Licht/ Kaltes Licht)

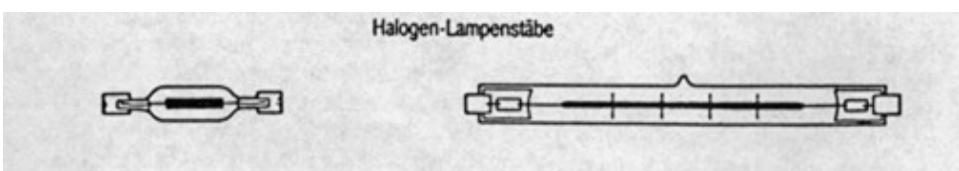
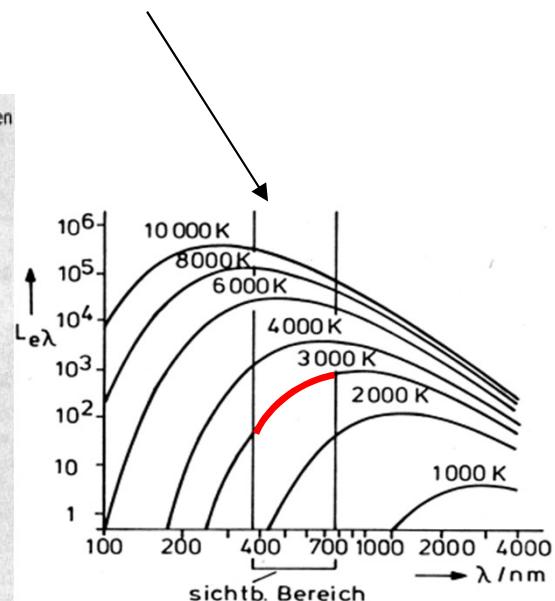
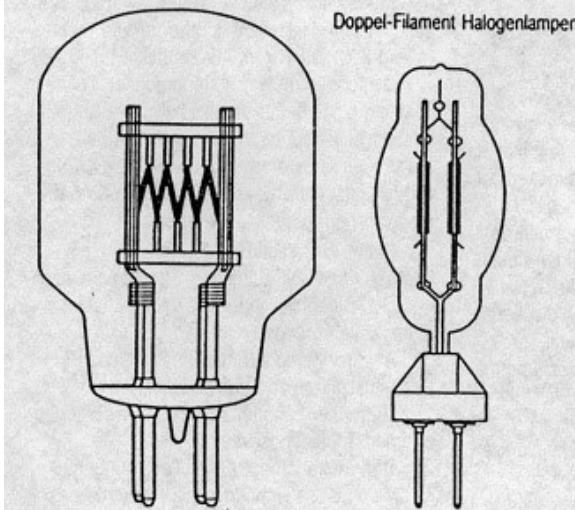
# Beispiel: typische Lampen in der Video/Film - Produktion

## 1) Kunstlichtlampen (KL) (engl. „Tungsten Luminaires“)

glühende Wolframdrähte, ummantelt von Halogen-Gas (Jod o. Brom).

**Wellenlängenmix im sichtbaren Bereich**

(bei maximaler Betriebsspannung) : **3000-3500 Kelvin**

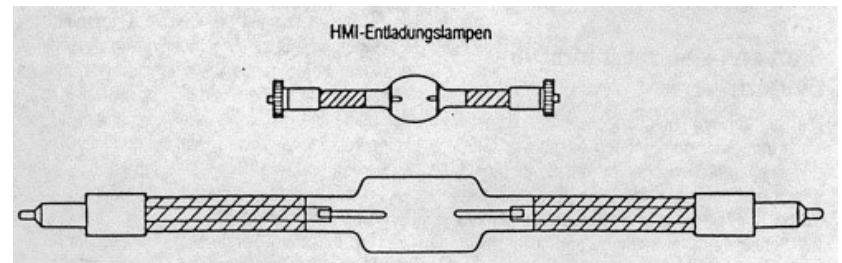
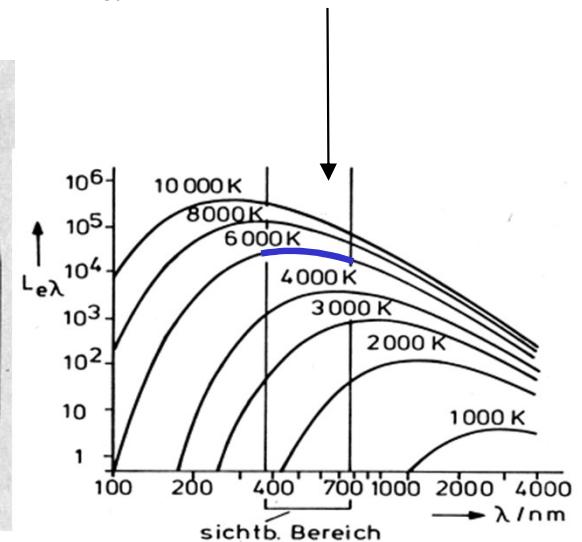
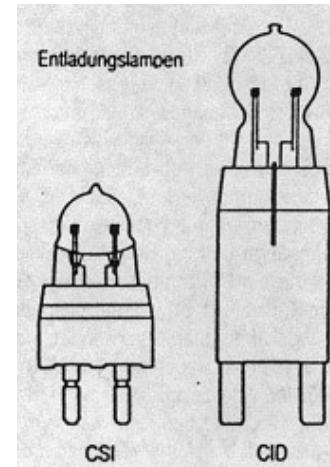


## 2) (quasi) Tageslichtlampen (TL) (engl. „Daylight Luminaires“)

Gezündetes Plasma aus Quecksilberdampf und Halogenen sowie geringen Anteilen von Atomen aus der Gruppe der „Nebenelemente“.

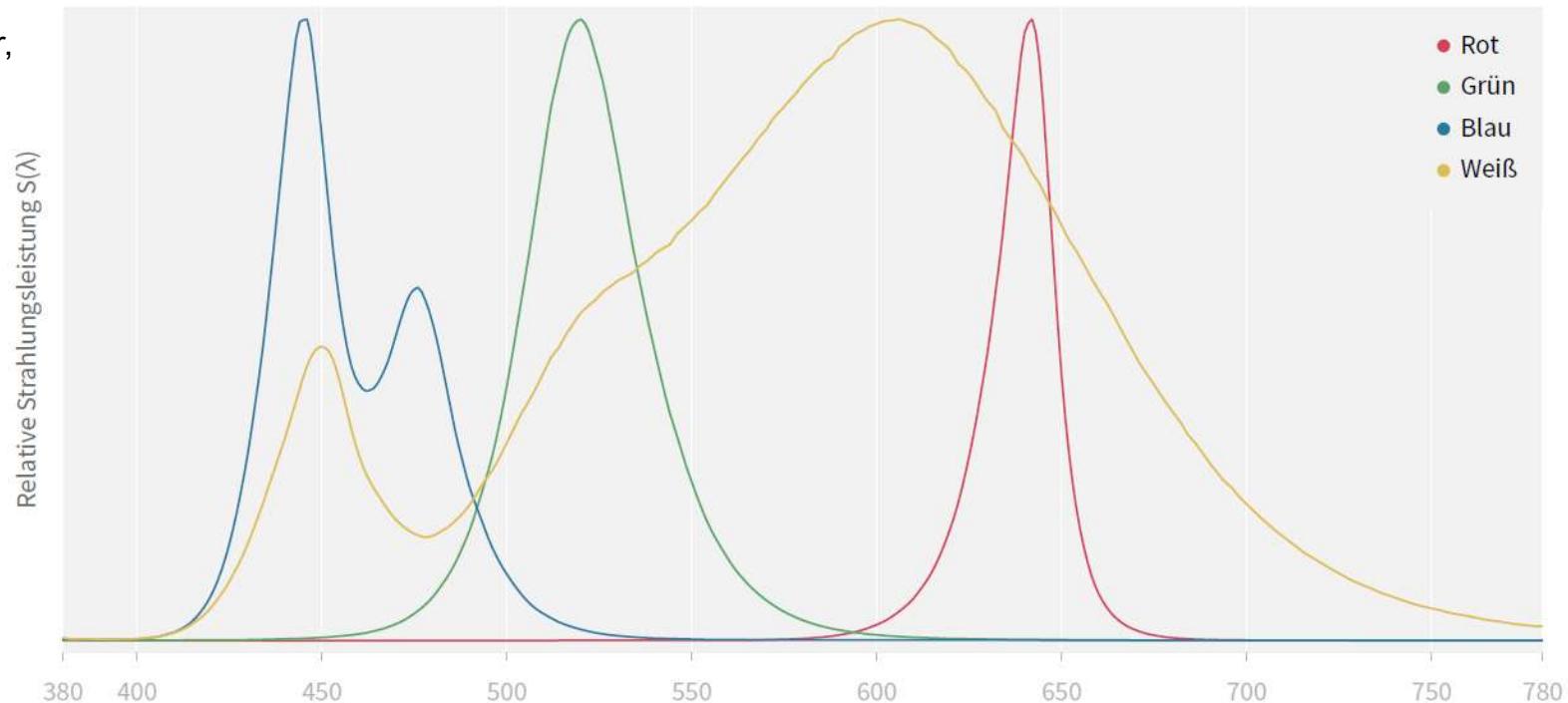
**Wellenlängenmix im sichtbaren Bereich**

(bei maximaler Betriebsspannung) : **5000-7000 Kelvin**

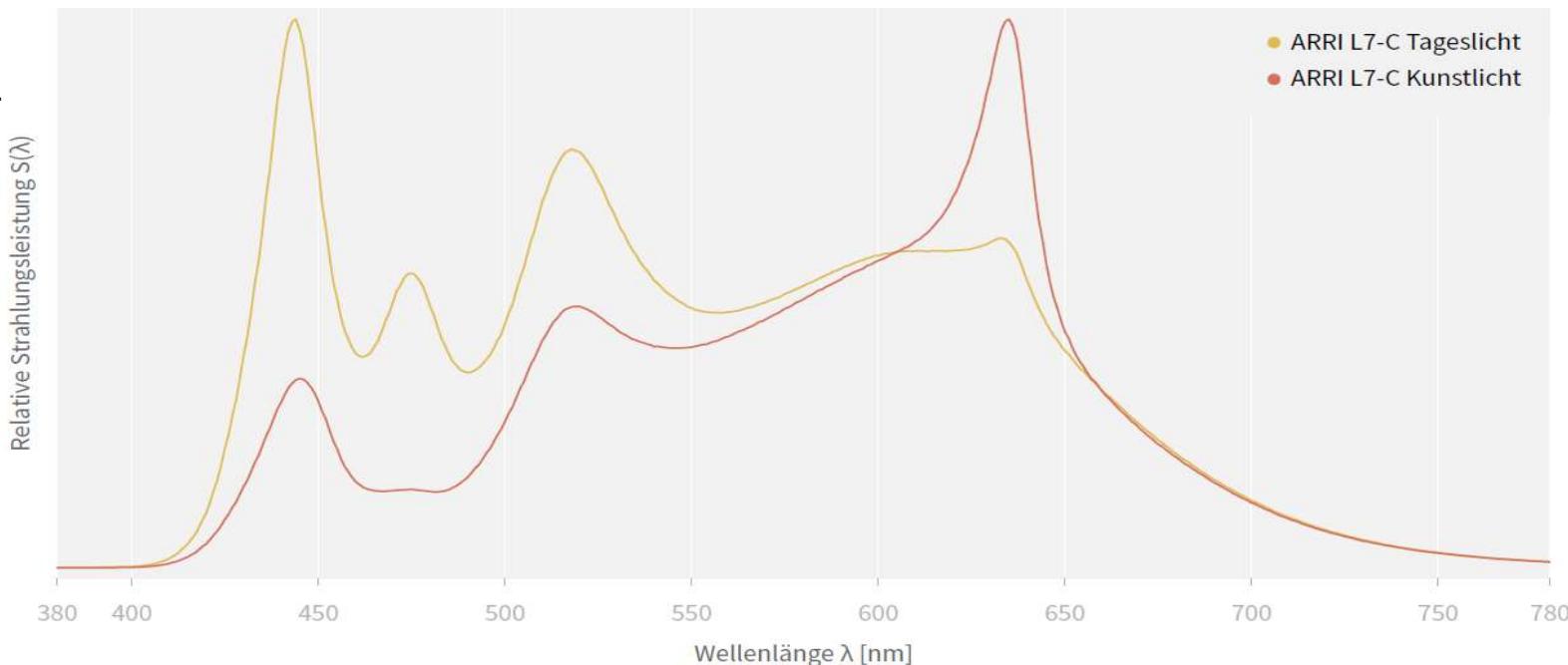


# Spektralverteilungen: Theorie vs. Praxis bei LED-Scheinwerfern

Voll-steuerbarer LED-Scheinwerfer,  
bestehend aus geclusterten roten,  
grünen, blauen und weißen LEDs.  
(Arri L7-C)

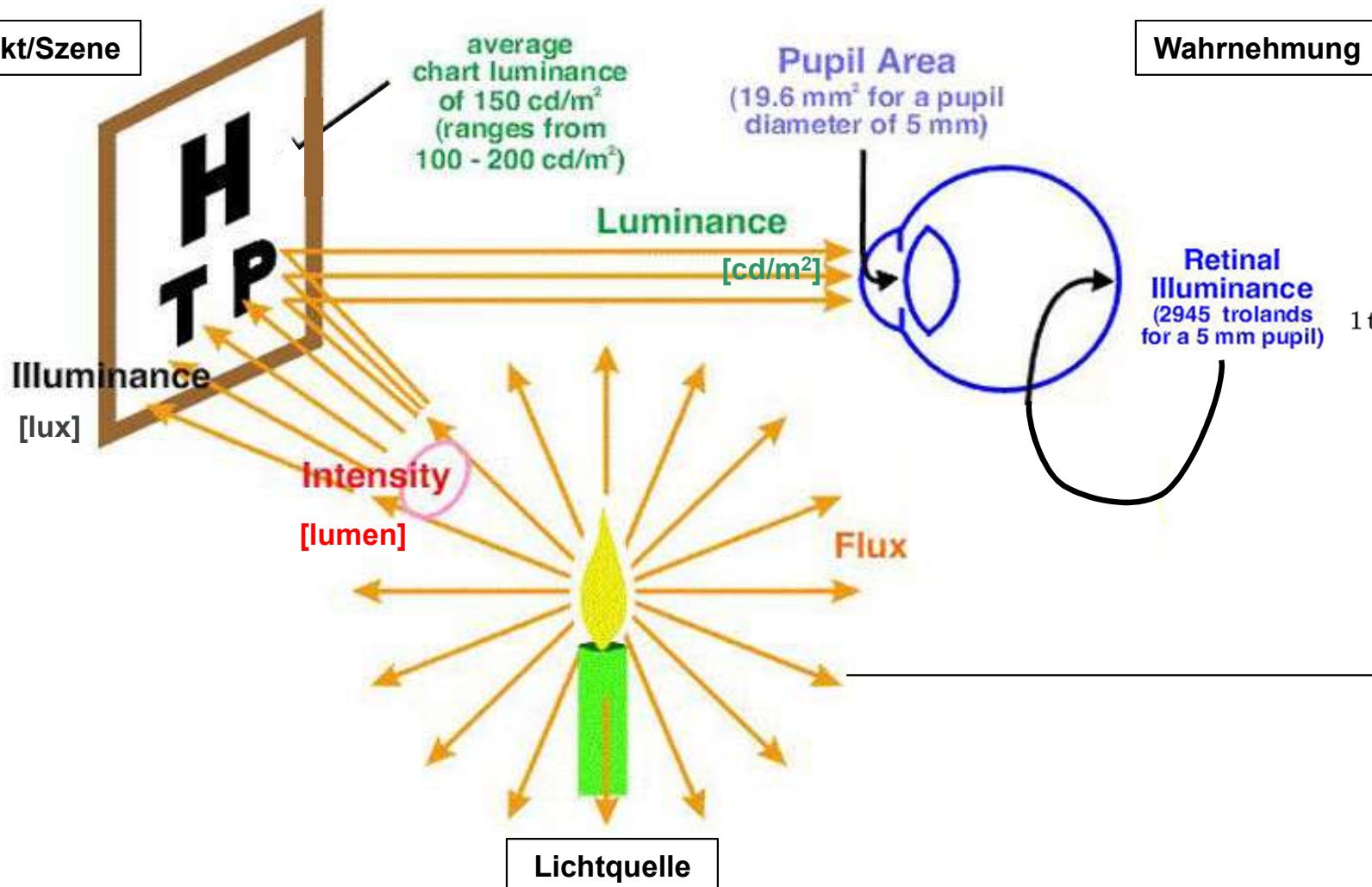


Bestmögliche erreichbare Gesamt-spektren für Tages- und Kunstlicht.



# Messgrößen zur direkten/indirekten Licht-Leistungsmessung: (Photometrie)

Objekt/Szene



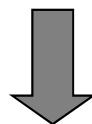
Beachte in der Praxis (z.B. Computergrafik, Fotografie, Filmaufnahmen):  
**Die Lichtleistung verringert sich mit zunehmenden Abstand und erhöht sich mit abnehmenden Abstand jeweils quadratisch!**  
 („Näher rangeln ersetzt oft einen zusätzlichen Scheinwerfer“)

# Meßtechnische Erfassung der Strahlungsleistung (Photometrie):

## Tatsächliche Erfassung

Bestrahlungsstärke = objektiv gemessene, elektromagnetische *Strahlungsleistung einer Lichtquelle* (über alle Wellenlängen -> Integral) **an einer zuvor festgelegten Messposition.**  
Einheit: [Watt]

## Messmodi:



Filterung/Umrechnung im **Messgerät** (aufgrund des gewählten „Messmodus“)

1. Lichtstrom I = gemäß dem spektralen Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges **BEWERTE** *Strahlungsleistung*  
„Intensity“ Einheit: [WATT<sub>Wellenlängenbewertet</sub>] = [**lumen**]

2. Beleuchtungsstärke = **Lichtstrom** pro beleuchteter (Meßsensor-)Fläche A.  
„Illuminance“ Einheit: [**lumen/m<sup>2</sup>**] = [**lux**]

Typische Praxiswerte bei Außenaufnahmen:

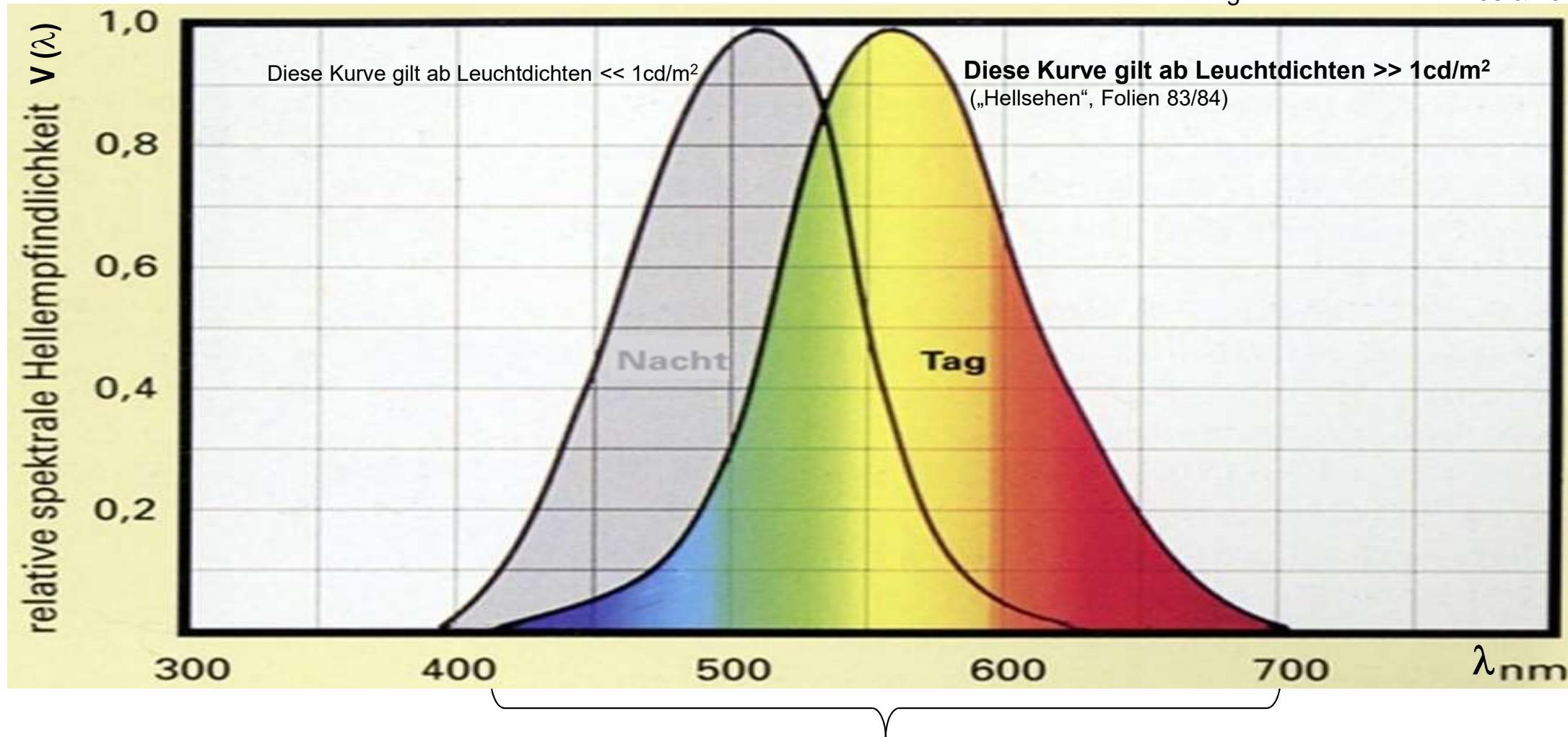
Ambient Light	Illumination (Lux)
BRIGHT SUN	132.000 100.000 64.000
HAZY SUN	50.000 32.000
BRIGHT CLOUDY	25.000 16.000 10.000
DULL CLOUDY	8.000 4.000
VERY DULL DAY	2.000 1.000 500
SUNSET	400 250
DUSK	125 62.5
TWILIGHT	31.25 15.125

3. Leuchtdichte = auf eine Augen-/Kameraposition im Raum einstrahlender **Lichtstrom** pro m<sup>2</sup>  
„Luminance“ = (Lichtstrom / Raumwinkel) / m<sup>2</sup>  
Einheit: [(lumen/steradian) / m<sup>2</sup>] = [**candela/m<sup>2</sup>**]

# von Wellenlängen gleicher Leistung durch unser Auge:

engl. luminous efficiency

s.a. Anwendung der Kurve in Folien 138 & 154



Achtung:

Farbskala nur Orientierungshilfe

→ es geht hier um das HELLIGKEITSEMPFINDEN von Wellenlängen!

# Kamerabezogene Lichtmessungen in der Film-/Videoproduktion = „Belichtungsmessungen“:

Belichtungsmessungen sind ebenfalls BEWERTETE Leistungsmessungen und unterscheiden sich von den photometrischen Messungen von Einzel-Lichtquellen nur durch zwei Aspekte:

- Es ist bei der Messung immer der Richtungsbezug zur Kamera herzustellen
- Da am Drehort meist mehrere Lichtquellen aus verschiedenen Richtungen eingesetzt werden, muss der Meßsensor (zur gleichmäßigen Bewertung) mit einem vorgeschalteten Diffusor versehen werden.

Was wird gemessen:

Belichtungsstärke = einfallender, gesamter Lichtstrom I auf die Sensorfläche A an der Messposition, gewichtet gemäß dem spektralen Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges,  
Einheit: [lumen/m<sup>2</sup>] = [lux]

Wie wird gemessen:

1 . „Lichtmessung“ oder „Auflichtmessung“:

*Messposition: am „beleuchteten Set“ in Richtung Kamera !*

2 . „Objektmessung“ oder „Reflexionsmessung“:

*Messposition: „an der Kamera“ in Richtung des aufzunehmenden Objektes !*

$$\text{Belichtung} = \text{Belichtungsstärke} \times \text{Belichtungsdauer} \quad \text{Einheit: [lux·sek]}$$

Engl.: „Exposure value“ / EV

# Weitere wichtige technische Kenndaten von Lampen in der Medienproduktion

## Lichtausbeute [lm/W]

Lichtstrom, den eine Lampe pro 1 Watt elektrischer Leistung erzielt; die Effizienz der Lampe

Deshalb sind bei Lampen die lumen-Angaben wichtiger als die Watt-Angaben. Es handelt sich bei lm um den tatsächlich nutzbaren Lichtstrom, ohne die bauartbedingten Verluste (wärme+elektrische Verluste)

## Farbwiedergabeindex [CRI]

Errechnet sich aus acht Farbtönen und beschreibt, wie natürlich Objekte im Lampenlicht erscheinen; der CRI von Glühlampen ist 100, bei LED-Lampen sollte er über 80 liegen

## Einschaltzeit [s]

Zeitraum, ab dem eine Lampe 95 % ihrer vollen Helligkeit erreicht hat

## Schaltfestigkeit [Anzahl]

Beschreibt, wie oft man eine Lampe schadlos an- und ausschalten kann

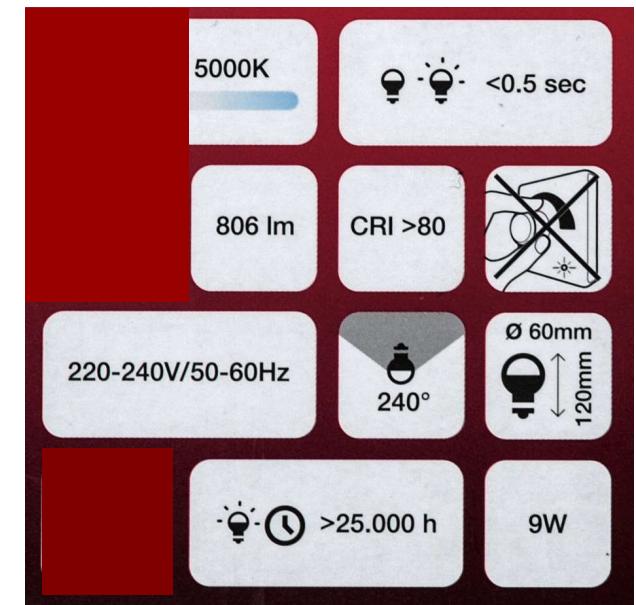
## Lebensdauer [h]

Betriebszeit, nach der der Lichtstrom unter 70 Prozent des Ausgangswerts fällt oder nach der 50 Prozent aller Lampen überlebt haben, je nachdem was zuerst eintritt

Achtung: **Praktikum**  
Wichtiger ist oft, ob man die Lampe eingeschaltet oder ausgeschaltet um positionieren darf/muß! Bzw. ihre Heiß- oder Kaltzündbarkeit (Bsp.: Halogen vs. HMI)

### Prüfungsfragen:

- Welche Lichtausbeute bietet diese Lampe?
- KL oder TL?
- Zeichnen Sie die idealisierte Spektralverteilung.



# Aufgaben zum Nachdenken!

## Aufgabe 1:

Wie können Sie mit einer Halogen-Lampe einen „quasi-Tageslicht“-Scheinwerfer bauen ?

## Aufgabe2:

Zeichen Sie die ungefähre Spektralkurve eines Kunstlicht-Scheinwerfers (KL) auf.

Zeichen Sie im zweiten Schritt in das Diagramm die Wirkung eines CTB-Vorsatzfilters ein.

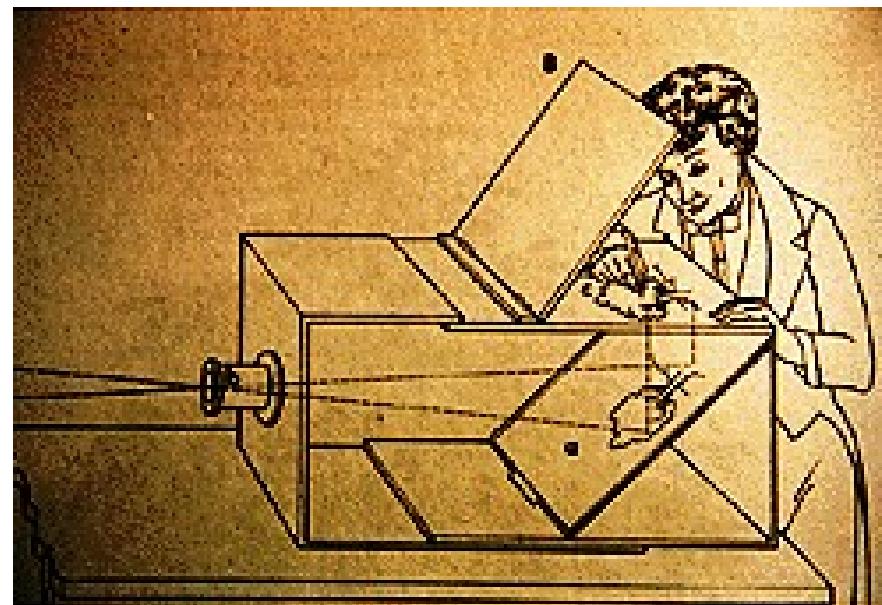
## Aufgabe3:

Innen-Dreh mit Halogen-Scheinwerfern:

Wie können Sie - über ein Fenster einfallendes - Tageslicht in „Kunstlicht“ umwandeln, um Mischlicht zu vermeiden?

Das Licht der Welt einfangen:

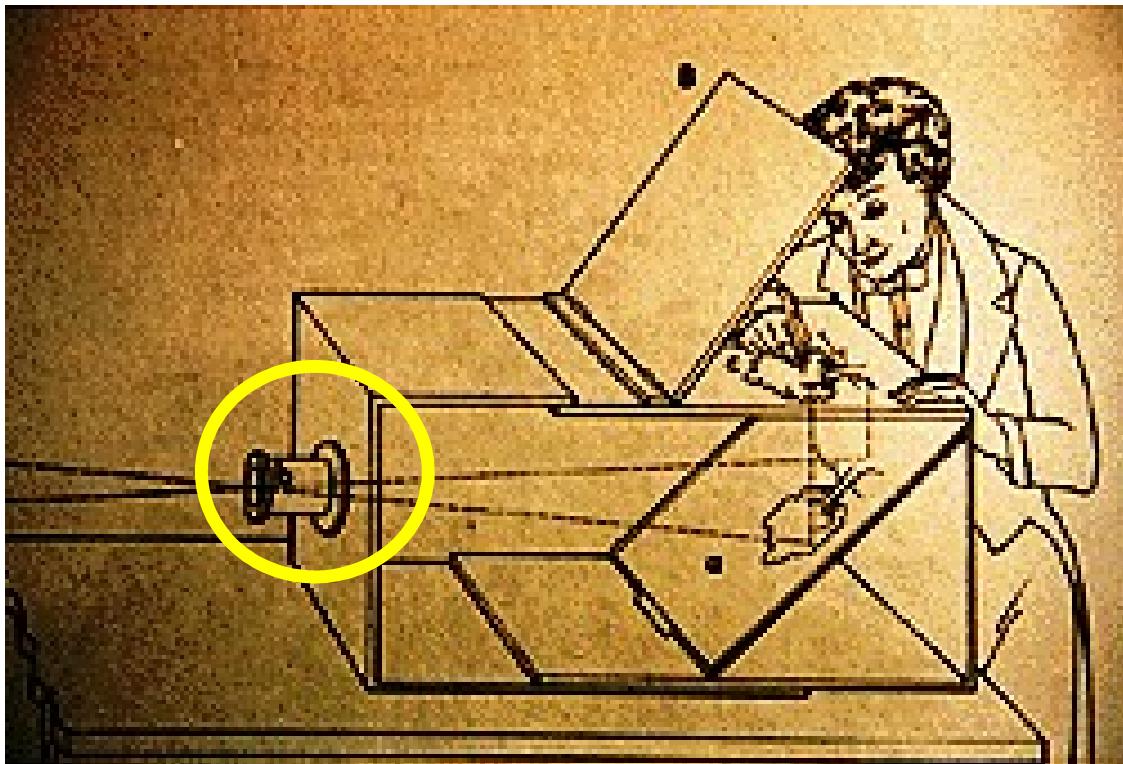
# „Objektive“



# Was wir in dieser Runde lernen:

- Die grundlegenden Praxiskategorien von Objektiven in der Medienproduktion.
- Die Grundfunktionen von Objektiven in der Medienproduktion.
  - a) Brennweite/Öffnungswinkel:
  - b) Focus:
  - c) Blende:
- Das Kernproblem aller realen Objektive  $\Rightarrow$  Dunkelheit/Schwachlicht.
- Wie wird der generelle *Lichtverlust* eines Objektivs aufgrund der Gläser+Fassungen spezifiziert?  
(Volksmund: „Lichtstärke“ eines Objektivs)
- Mit der Blendenzahl  $k$  wird die *kreativ/bewußt hergestellte Lichtreduzierung* im Objektiv erfasst.  
In diese geht die Brennweite und die (wirksame) Blendenöffnung ein.
- „Ramping-Effekt“ bei Zoom-Objektiven
- Alternative Reduktionsmöglichkeiten von zu-viel-Licht (ND-Filter und Abstand).
- Definition und Berechnung der *Tiefenschärfe* einer Aufnahme. Beeinflussende Kameraparameter und Objektiveinstellungen. Wechselwirkungen. Erzählerische Funktion.
- Fehlverhalten und Bestimmung der Qualität von Objektiven.

# Licht richtig „einfangen“ und „abbilden“:



## Aufgaben eines Objektivs:

- **Abbildungsschärfe** = optimale Kontrastübergänge von (fix entfernten) Objekten des Gegenstandsraums auf der Abbildungsebene
- **Abbildungsgröße** = Objektabbildung vergrößern  $\triangleq$  Bildausschnitt verkleinern,  
Objektabbildung verkleinern  $\triangleq$  Bildausschnitt vergrößern
- **Lichtmenge auf der Abbildungsebene begrenzen**

## Funktion am Objektiv:

- **FOCUS [m o. ft.]**  
„Einstellentfernung“
- **BRENNWEITE  $f$  [mm]**
- **BLENDE(nzahl)  $k$**

# Überblick: Objektiv-Typen in der Medienproduktion

## ENG – Objektive (Electronic News Gathering)



Weitwinkel-,  
Standard-  
Tele- }  
- Ausführungen inkl.  
(begrenzter) Zoomfunktion

## EFP – Box-Objektive (Electronic Field Production)



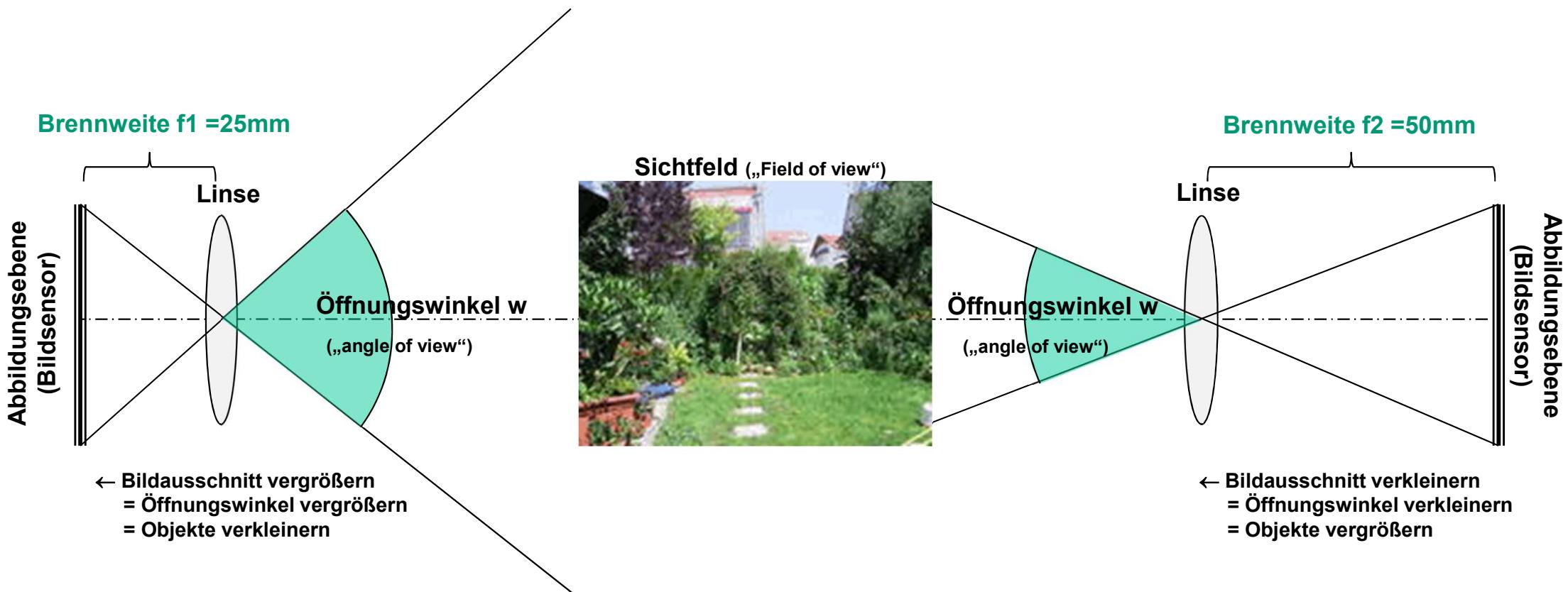
Weitwinkel-,  
Standard-  
Tele- }  
- Ausführungen inkl.  
Zoomfunktion

## Primes – Festbrennweiten-Objektive



**keine Zoomfunktion**  
(Brennweitenänderung = Objektiv-Wechsel)

# 3.1.BRENNWEITE (Abbildungsgröße/Öffnungswinkel/Sichtfeld):



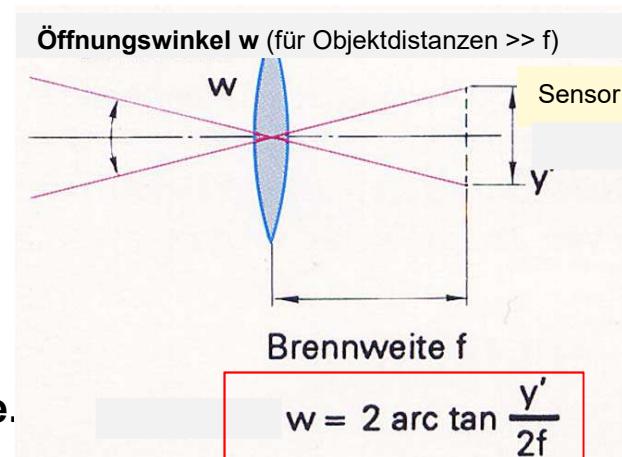
## Fachbegriffe:

Sichtfeld  $> 60^\circ$  Öffnungswinkel → kleine Brennweiten  $\Rightarrow$  Weitwinkel-Objektiv

Sichtfeld  $30^\circ - 55^\circ$  Öffnungswinkel → mittlere Brennweiten  $\Rightarrow$  Normal-Objektiv  
 $(31^\circ \approx \text{horizontales } \textit{Blickfeld} \text{ des Menschen, s.a. Folie 97})$

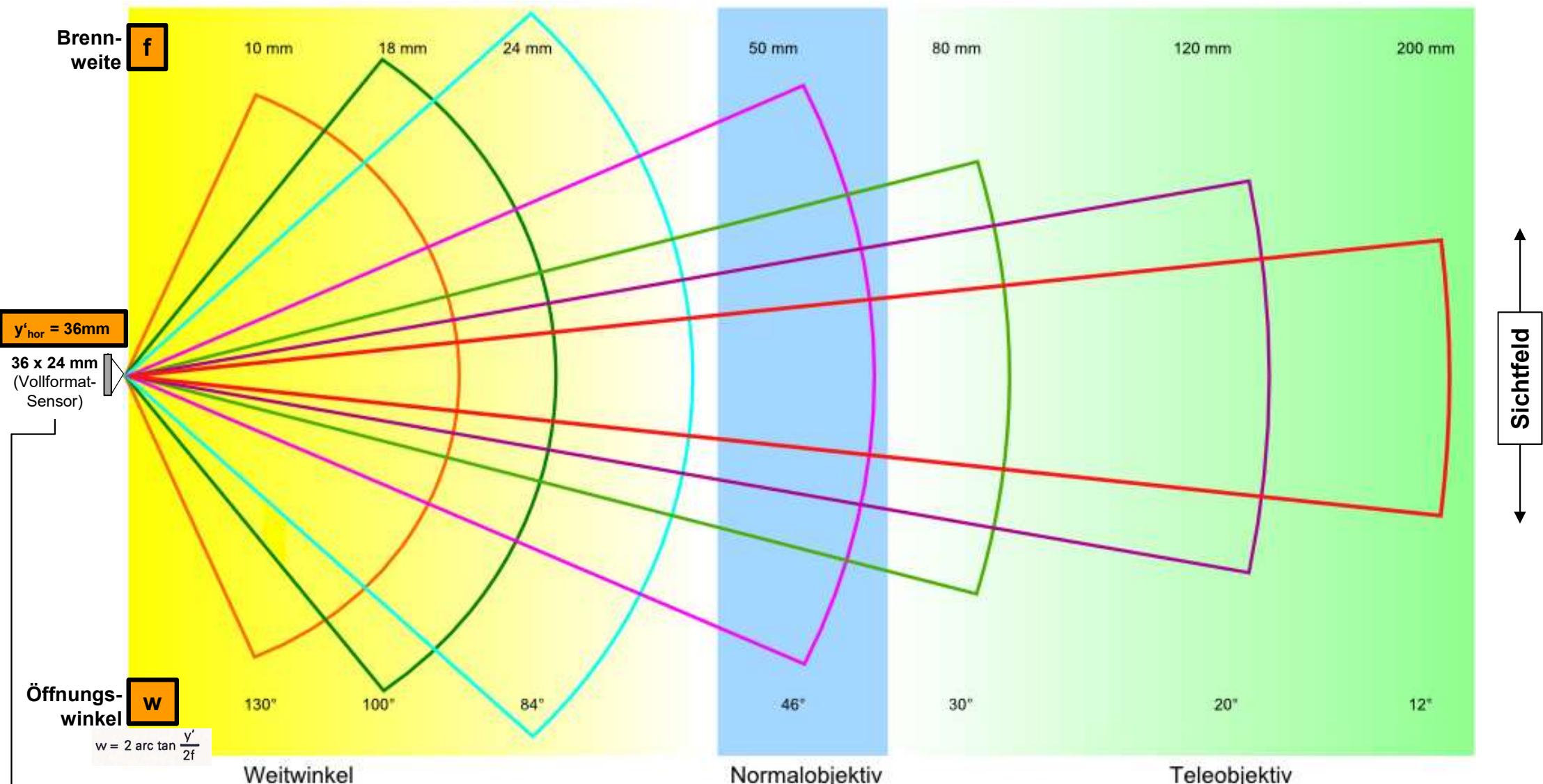
Sichtfeld  $< 25^\circ$  Öffnungswinkel → lange Brennweiten  $\Rightarrow$  Tele-Objektiv

Ein Zoom-Objektiv ist ein Objektiv mit variabler, stufenlos einstellbarer Brennweite.



# Die horizontalen Öffnungswinkel verschiedener Brennweiten:

am Beispiel Kleinbildformat (KB) / Vollformat-Sensor:



→ Nachdenken: Was verändert sich, wenn man - bei gleicher Brennweite - das Objektiv auf einen *kleineren* Kamerásensor schraubt?

# Bildgestaltung mittels Brennweite → „Einstellungsgrößen“ (“Shot-Size”)



„wide shots“

1. Panorama



„medium shots“

4. Halbnah



5. Amerikanisch



6. Nah



„close-ups“

7. Groß



8. Detail



2. Totale



3. Halbtotale

Typische Bildaussagen:  
Einführung in Szene

Perspektivkontrast!

Typische Bildaussagen:  
Protagonisten im Kontext ihres Umfelds

Typische Bildaussagen:  
Protagonisten und ihre Emotionen  
Loslösung vom Umfeld

Perspektivkontrast!

**Faustregel1:** „Perspektivkontraste für Umschnitt herstellen“  
Ähnliche Einstellungen erzählen nichts, also VERMEIDEN !!  
(ähnlich sind:  
1-3,  
4-6,  
7-8  
= redundante Information)

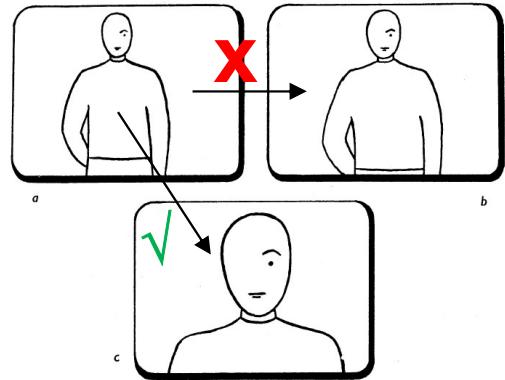


Figure 3. A cut from a to b has too small a change in image size ; the cut needs to be to a considerably closer image as in c.

**Faustregel2:** „E-Änderungen bei gleichem Motiv immer entlang der Blickachse“, da sonst springende Hintergründe = Irritation

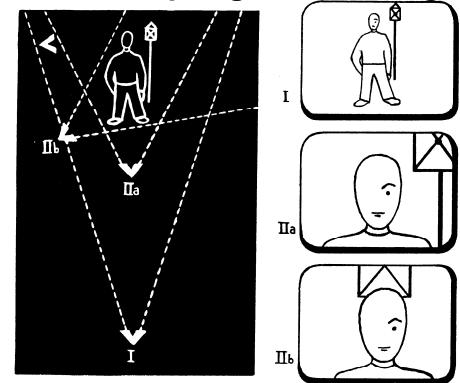
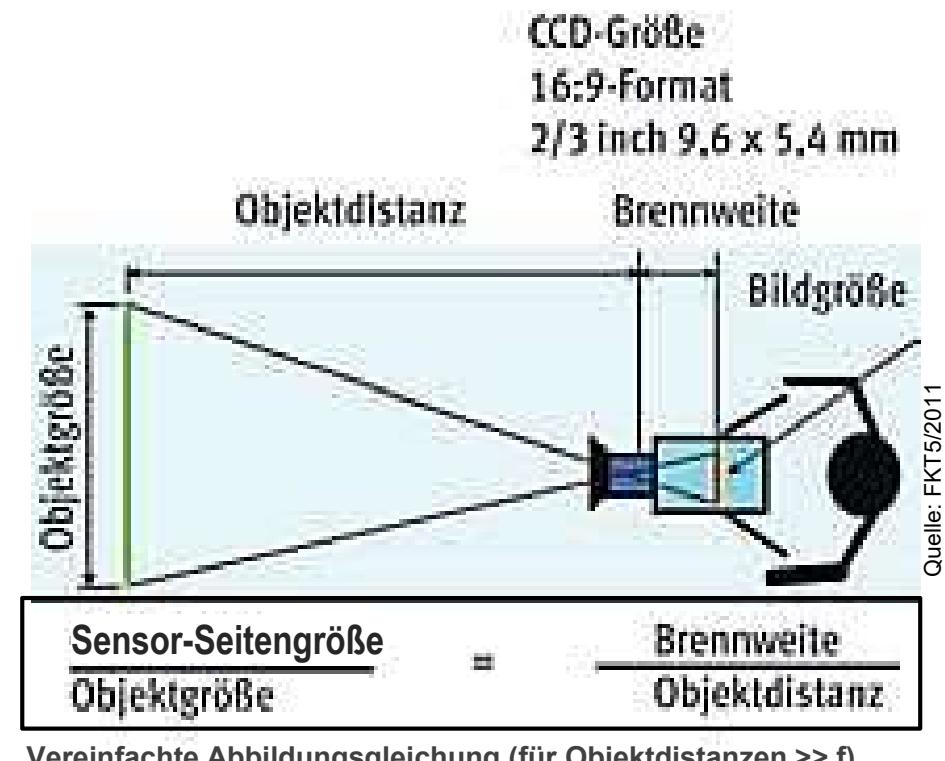


Figure 4. IIa faces in the same direction as I. IIb makes a slight change. The same angle or a marked change is to be preferred.

# Übungsaufgaben: Brennweite, Objektdistanz und Objektgröße:



## Auswahl eines Zoomobjektivs für ein Studio

Der CCD-Sensor in der Studio-HD-Kamera (16:9-Format) hat die Maße 9,6mm×5,4 mm.

Die Studioverhältnisse erlauben eine maximale Kamera-Objekt-Distanz von 26 m und eine minimale Kamera-Objekt-Distanz von 2,4 m.

Ein max. 2 m *hohes* Objekt (z.B. Moderator) soll den Bildschirm an beiden Positionen voll ausfüllen können.

*Es wird also ein Zoom-Objektiv mit einer Brennweite zwischen ... mm bis .... mm benötigt.*

## Öffnungswinkelvergleich: Typ 1/3"-Sensor gegen 35mm Vollformat

Der Bildsensor einer Prosumer-HD-Kamera (16:9-Format) hat die Maße 5,7 mm×3,2 mm (1/3"-Typ), der Bildsensor einer Film-Kamera hat die Maße 23,7 mm×13,4 mm (35mm-Typ).

Bei welcher Brennweite erreichen Sie bei Kamera1 einen horizontalen Öffnungswinkel von 40°?

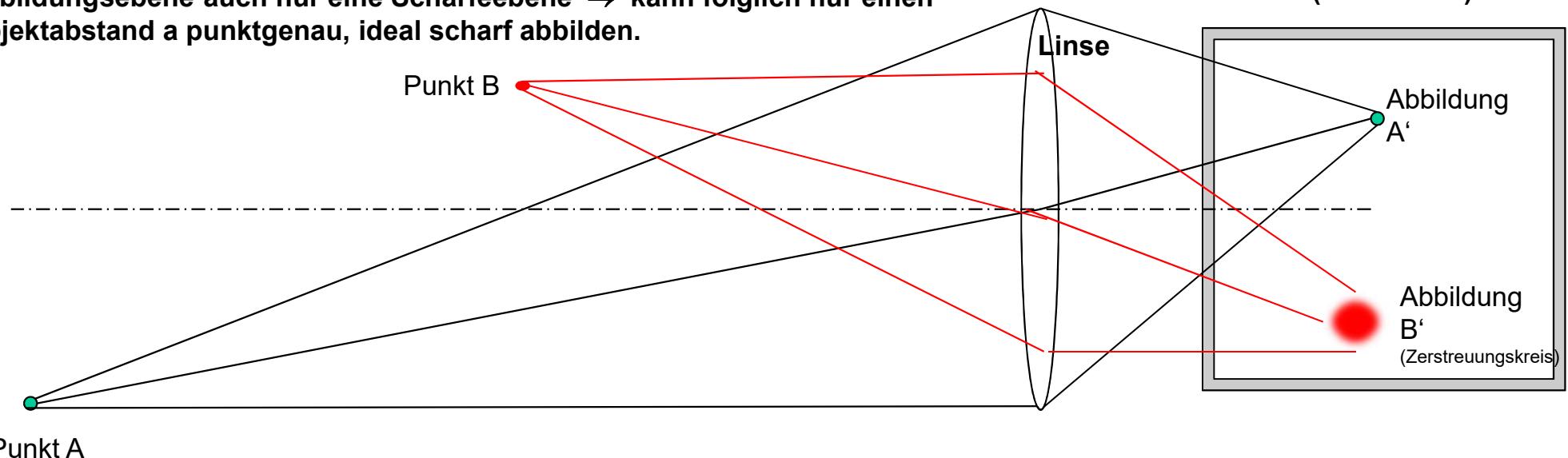
Bei welcher Brennweite erreichen Sie bei Kamera2 einen horizontalen Öffnungswinkel von 40°?

**Recherchieren: Was ist der „Macro-Bereich“ einer Kamera, was ist ein „Macro-Objektiv“ ?**

## 3.2. FOCUS (Schärfeebe):

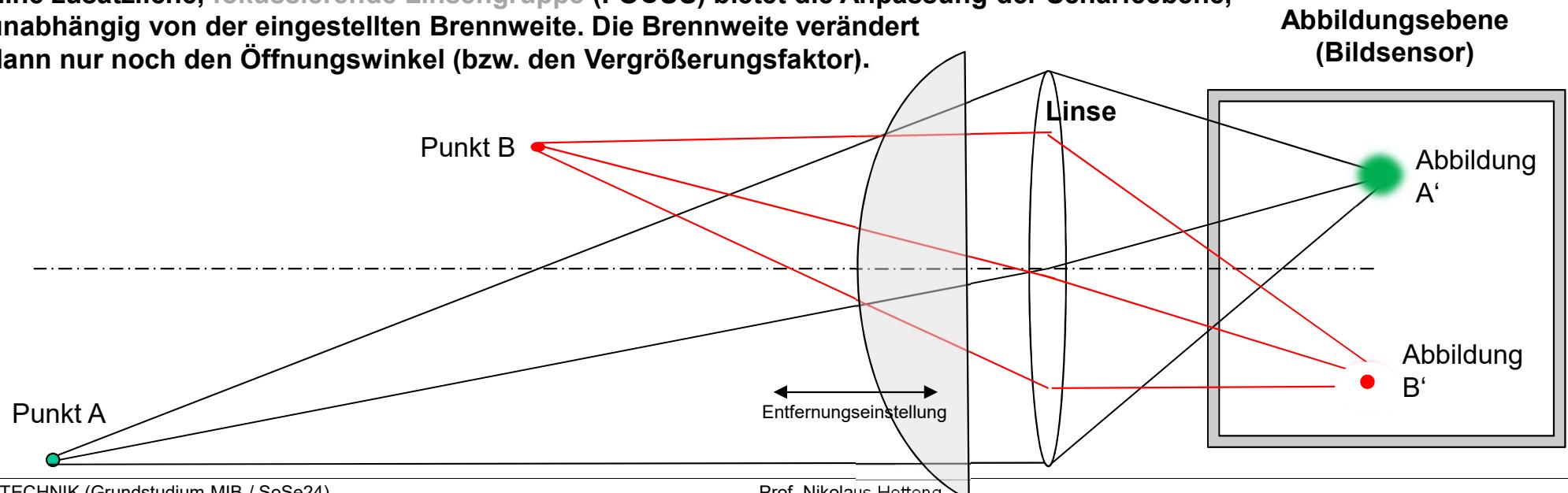
### Problematik:

Eine Sammellinse mit gegebener Brennweite  $f$  hat bei fixiertem Abstand zur Abbildungsebene auch nur eine Schärfeebe → kann folglich nur einen Objektabstand  $a$  punktgenau, ideal scharf abbilden.

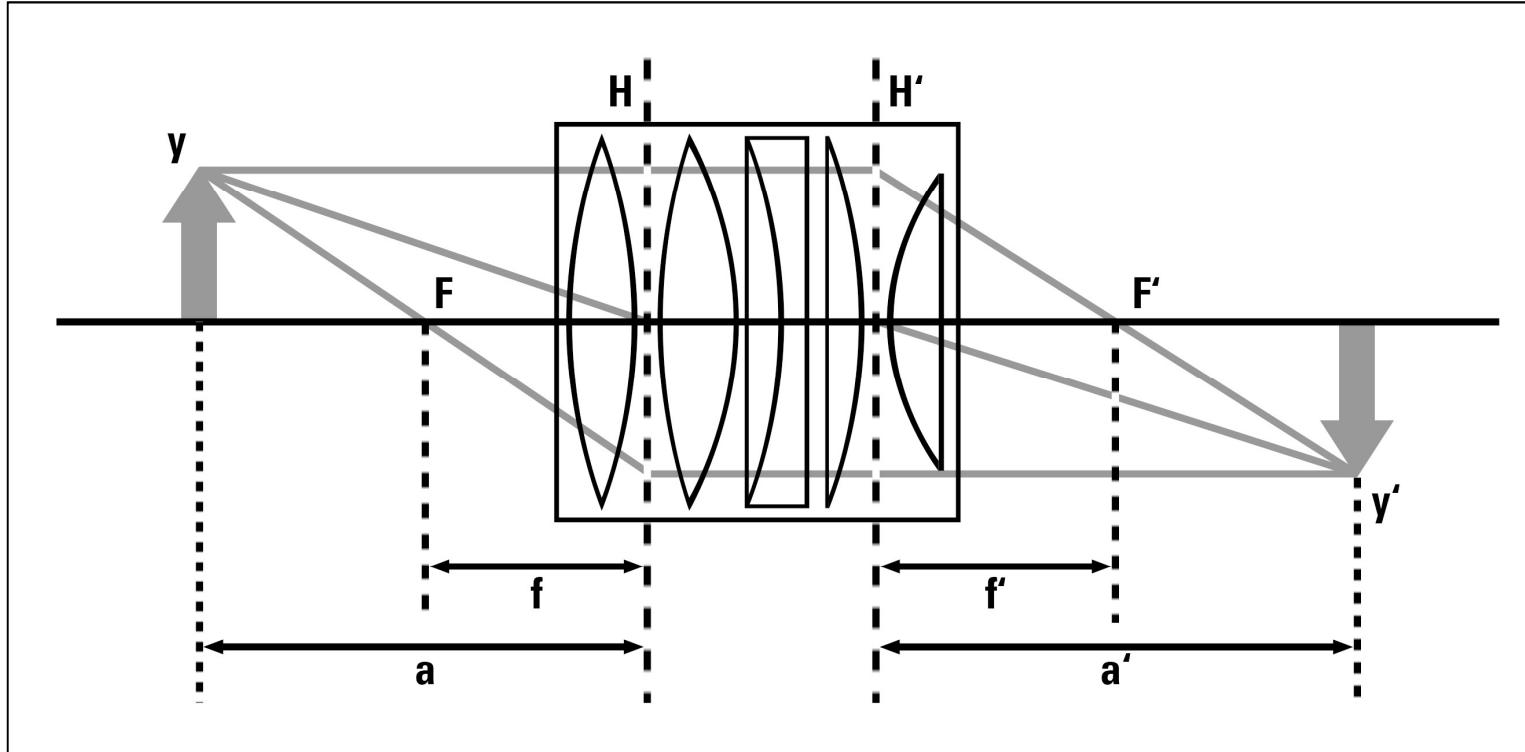


### Lösung:

Eine zusätzliche, fokussierende Linsengruppe (FOCUS) bietet die Anpassung der Schärfeebe, unabhängig von der eingestellten Brennweite. Die Brennweite verändert dann nur noch den Öffnungswinkel (bzw. den Vergrößerungsfaktor).



# Vereinfachte Modellierung komplexer Objektive:

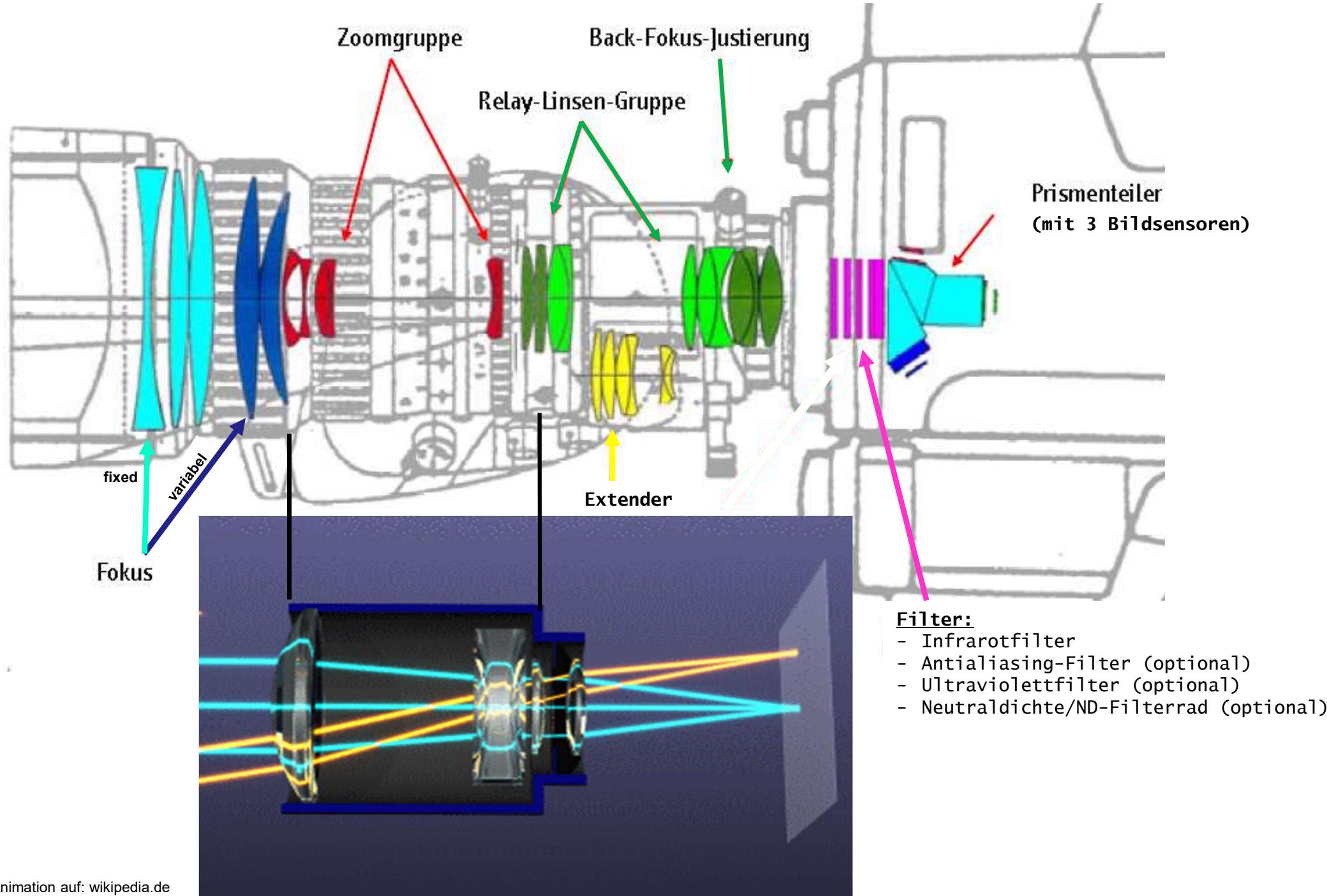


In der Praxis besteht ein optisches System meist aus einer Ansammlung von Linsen unterschiedlicher Formen, die hintereinander angeordnet sind und von denen jede einen bestimmten Zweck erfüllt. Ein Teil der Linsen sorgt für die korrekte Fokussierung der Strahlen auf die Bildebene, d.h. sie ermöglichen eine Anpassung der Schärfenebene. Andere Linsengruppen kompensieren Bildfehler wie z.B. Verzerrungen oder chromatische Aberrationen. Das Konzept der einfachen dünnen Linse erweitert sich, indem sog. **Hauptebenen H** definiert werden, von denen jede eine Gruppe von Linsen repräsentiert.

Es existieren dann je eine **bilddseitige H'** und eine **objektseitige Hauptebene H**. Das Gleiche gilt für Brennweite f und Brennpunkt F. Bei Berechnungen für Bildweite und Objektweite stellt die jeweils nächstgelegene Hauptebene und die zugehörige Brennweite den Bezug dar.

Die Brennweite beeinflusst gemeinsam mit dem Faktor der Größe des Bildfeldes Ausschnitt und Perspektive für die zweidimensionale Abbildung der dreidimensionalen Szene. Da die Bildebene i.d.R. eine feste Position besitzt, muss zur Änderung des Bildausschnitts die Position der Linse verändert werden – unter der Voraussetzung, dass weiterhin eine scharfe Abbildung gewährleistet werden kann. Dies wird realisiert durch die Nutzung eines anderen Objektivs oder durch Zoomobjektive, bei denen die Position der verschiedenen Linsen innerhalb des optischen Systems verändert werden kann

# Anschauungsbeispiel: Broadcast-Zoomobjektiv



# Exkurs: bauartbedingter „Lichtverlust“ in Objektiven

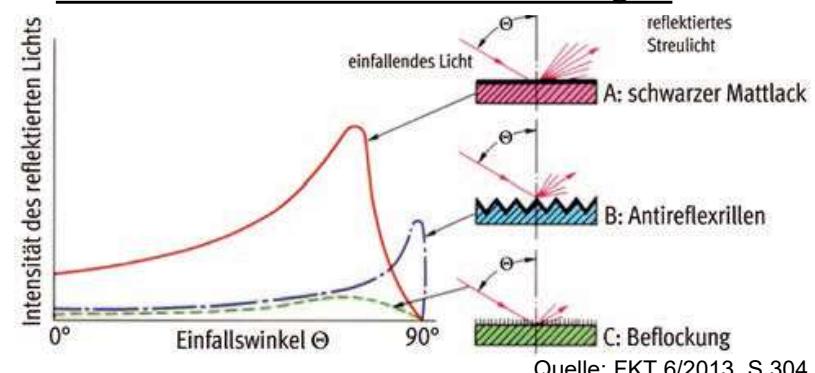
- a) Jedes Glas und jede Glasfassung reflektieren  
- insbesondere schräg einfallendes – Licht

(Effekt: „Streulicht“, engl. Lensflare)

- b) In optisch (ansatzweise) abbildungsfehlerfreien  
Objektiven müssen viele Linsen verbaut werden

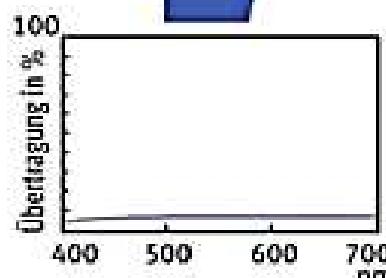
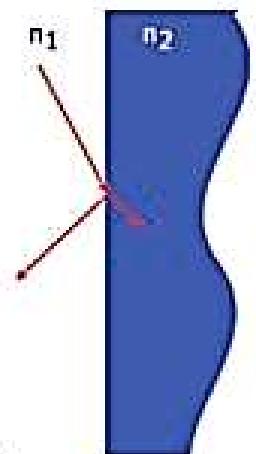
→ Ziel jeder Objektivkonstruktion muss es daher sein, den **Licht-Transmissionsfaktor** („T-Nummer“) durch **Oberflächenvergütung der Linsen** („Coating“) und **Mattierung der Fassungen** hoch zu halten.

## Einfluß unterschiedlicher Linsen-Fassungen:

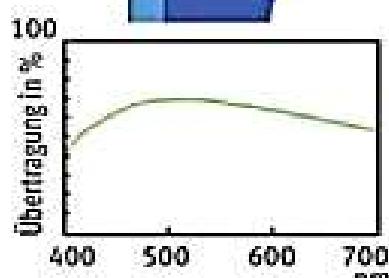
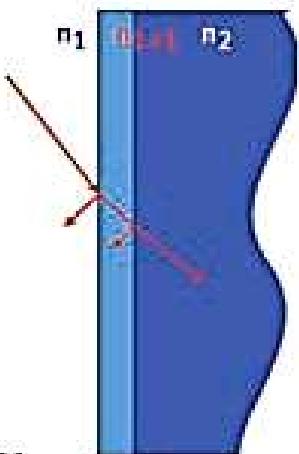


## Einfluß Oberflächenvergütung der Linsen:

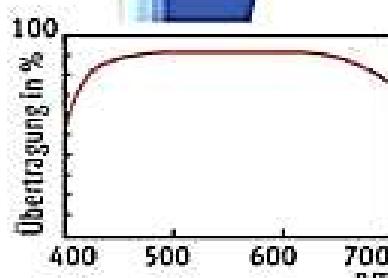
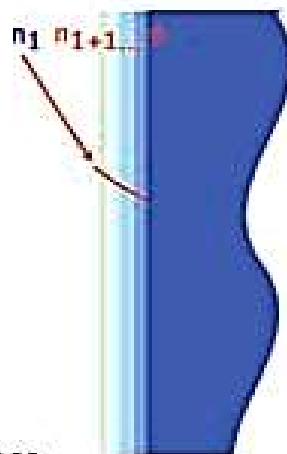
keine Beschichtung



1-Ebenen-Beschichtung



Mehr-Ebenen-Beschichtung



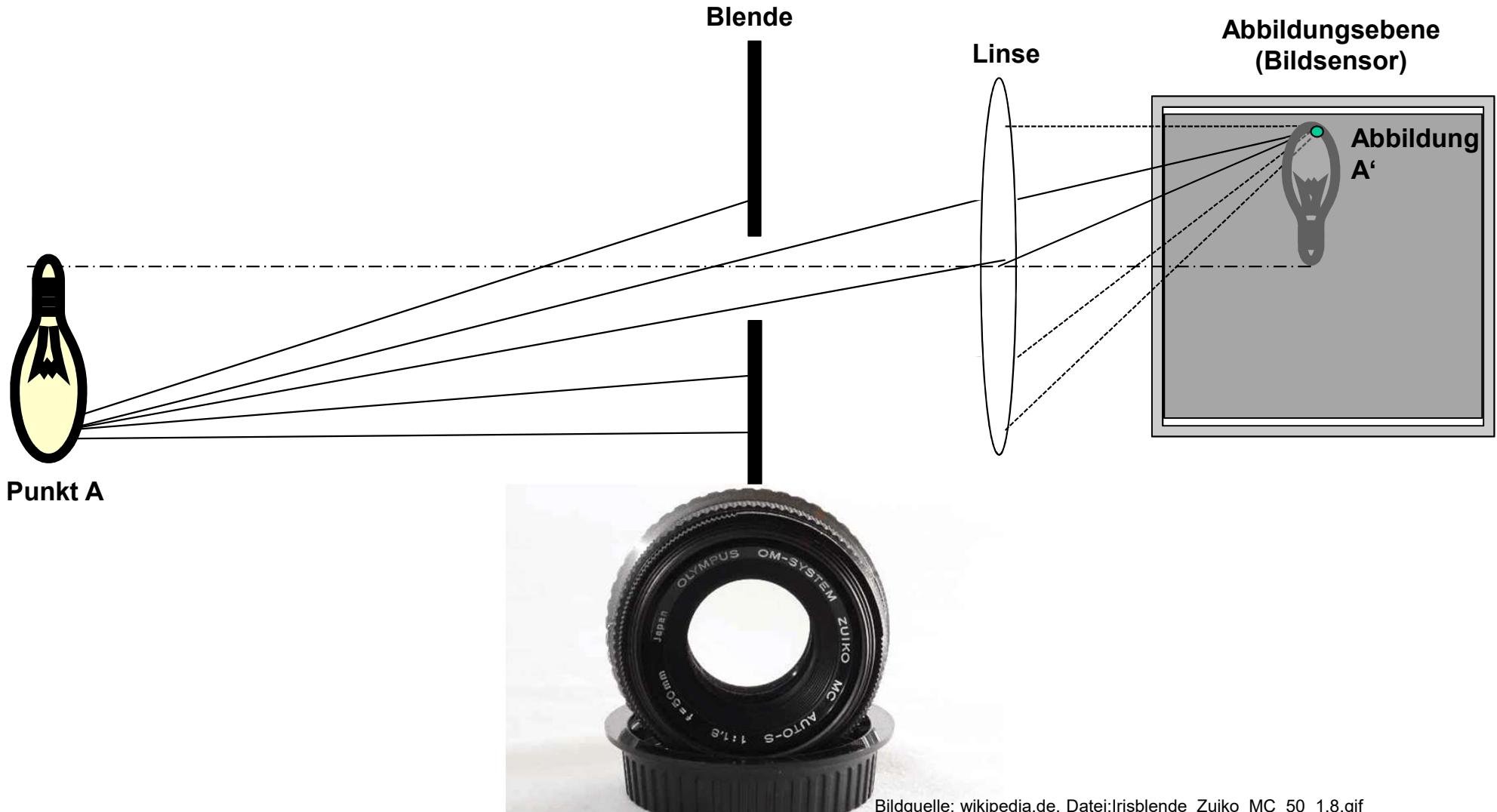
## Praxis:

Zusätzlich zur Blendenzahl  $k$  eines Objektivs (s. nächste Folien), welche in erster Linie auf die Lichtmengenbegrenzung durch die Öffnung des Objektivs referenziert, wird bei professionellen Objektiven daher zusätzlich die „**T-Nummer**“ angegeben, welche die maximal mögliche Lichtdurchlässigkeit bei voll geöffneter Blende unter Einbeziehung aller Verluste z.B. durch die Glaskomponenten angibt und somit ein Maß für die optische Qualität („Lichtstärke“ oder „Öffnung“) des Objektivs darstellt.

$$T - \text{Nummer} = \frac{10}{\sqrt{\text{Transmission}[\%]}} \cdot k_{\min}$$

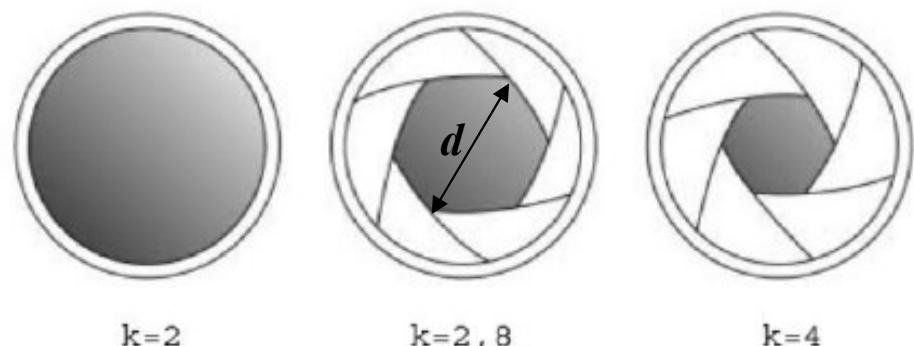
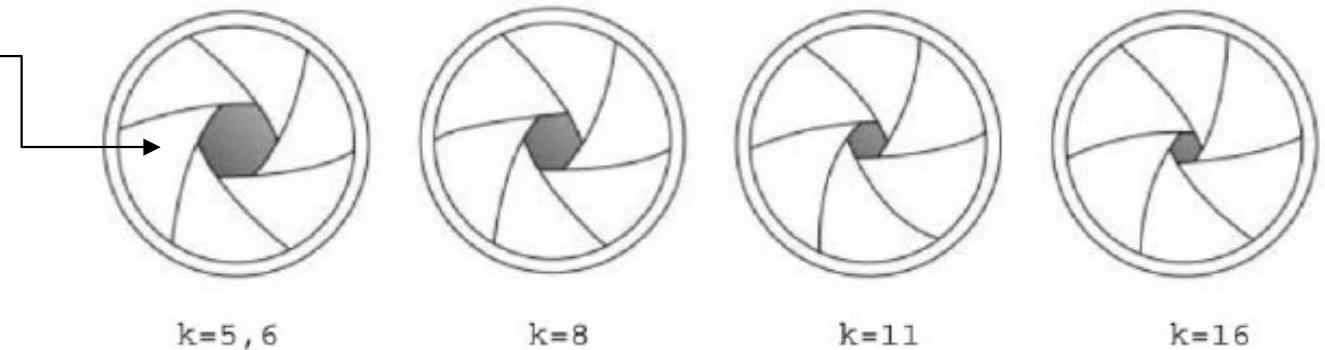
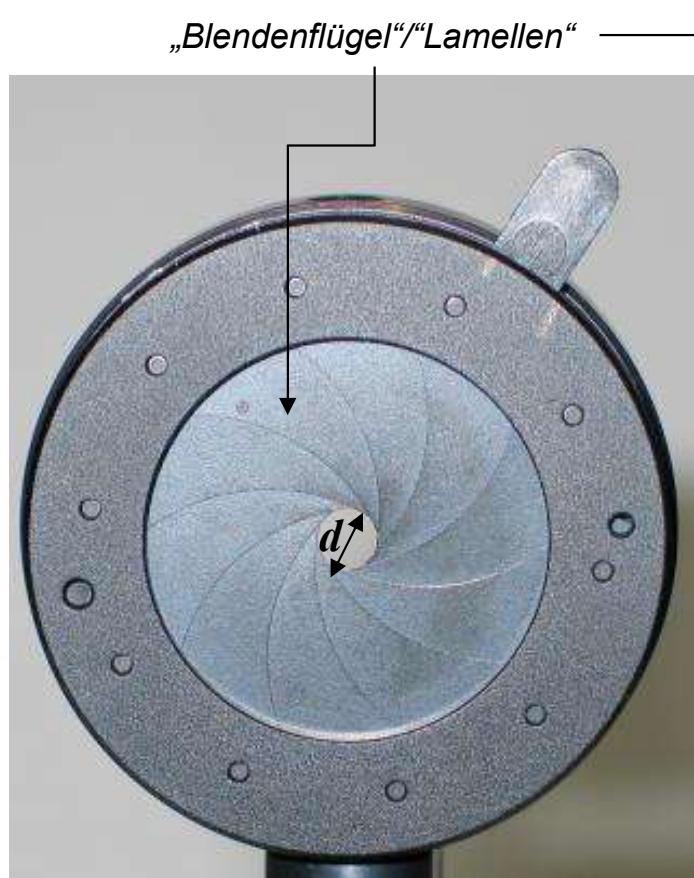
### 3.3. BLENDE (Iris):

- ⇒ Reduziert kontrolliert die einfallende Lichtmenge, in dem der Strahlengang vom Rand her beschnitten wird.
- ⇒ Ergebnis: mechanischen Regelung der Lichtmenge auf der Abbildungsebene.



Bildquelle: wikipedia.de, Datei:Irisblende\_Zuiko\_MC\_50\_1.8.gif

# Kamerablende: reale Bauform



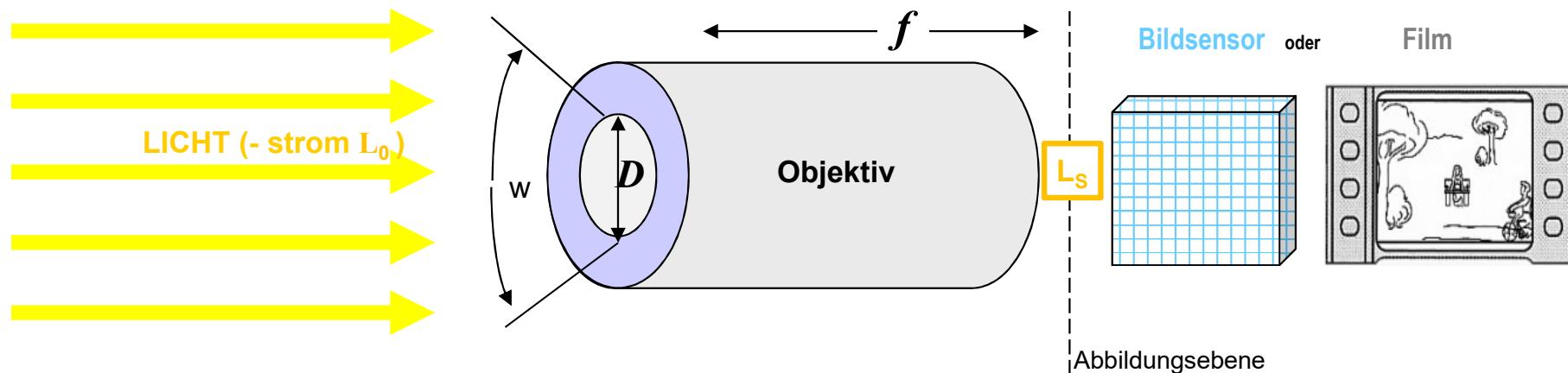
$$\text{Lichtdurchlass-Fläche: } A \approx \pi r^2 = \pi (d/2)^2 = \pi/4 * d^2$$

Beachten Sie den *quadratischen* Zusammenhang zwischen  $A$  und  $d$ !

# Lichtmenge, Brennweite, Blende und Lichtmenge

Wieviel Lichtstrom  $L_s$  letztendlich auf der Abbildungsebene einer Kamera ankommt ist *geometrisch* von 3 Faktoren abhängig:

- Dem Ergebnis der Objektmessung (wieviel Lichtstrom  $L_0$  [lumen] kommt - je nach Beleuchtung und Abstand - überhaupt am Objektiv der Kamera an)
- der gewählten Brennweite  $f$  des Objektivs [ $\rightarrow$  Öffnungswinkel  $w$  des Objektivs],
- der *wirksamen Blendenöffnung* („Eintrittspupille“)  $D$  des Objektivs (bei dieser Brennweite).



Die beiden letzten Werte werden in der **BLENDENZAHL k** zusammengefasst:

„Die Blendenzahl k ist die Verhältniszahl zwischen der Brennweite und dem Durchmesser der wirksamen Blendenöffnung“,

$$\text{Blendenzahl } k = \frac{\text{Brennweite } f}{\text{wirks. Blendenöffnung } D}$$

Typische „Blendenzahlreihe“ einer Photo-Kamera.

Blende geöffnet	Blende geschlossen
2.0	22
2.8	
4.0	
5.6	
8.0	
11	
16	
22	
18	
2.4	
3.5	
4.8	
6.5	
9.0	
13	
19	

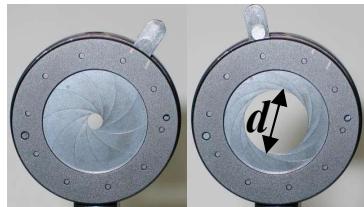
Beachten Sie die **reziproke Wechselwirkung** zwischen k und D !

### Vorteil in der Praxis:

Gleiche Blendenzahlen repräsentieren ansatzweise das gleiche Lichtverhältnis  $L_s/L_0$  auf der Sensorebene (unabhängig vom tatsächlich gewählten Objektivtyp).

# Traditionelle Unterschiede Photo vs. Video

(s.a. Folie 226)

Lichtdurchlass-Fläche:

$$A \approx \pi r^2 = \pi (d/2)^2 = \pi/4 * d^2$$

**Brennweite  $f$**   
**Blendenzahl  $k =$**  \_\_\_\_\_  
**wirks. Blendenöffnung  $D$**

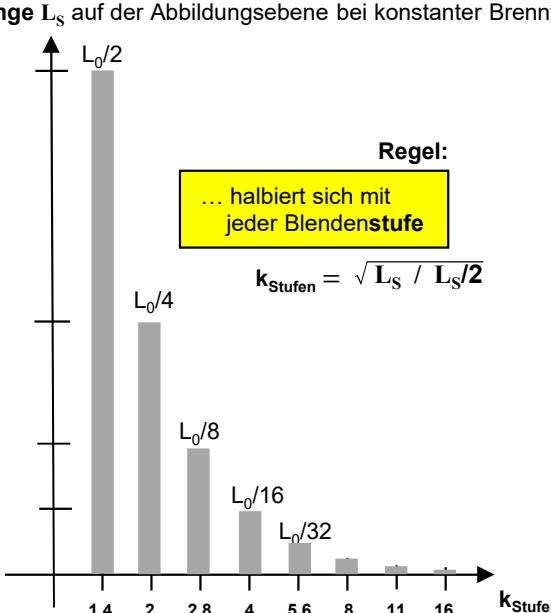
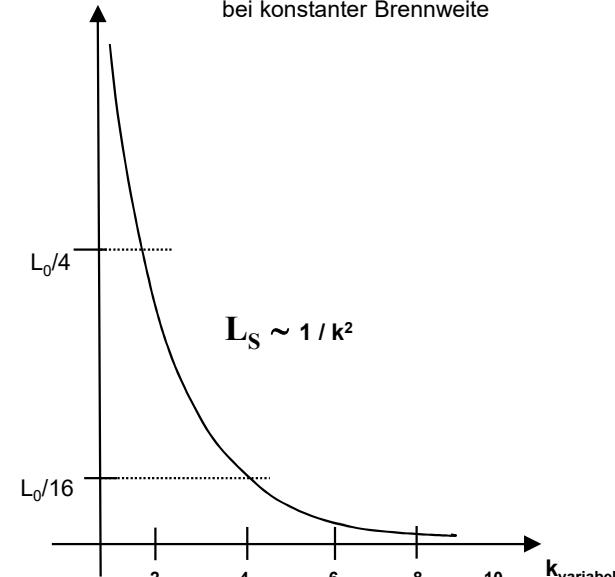
Vereinfachte Blendenzahlberechnung (ohne wirksame Blendenöffnung):

$$k = f/d \rightarrow d = f/k$$

$$A_k = \pi/4 * (f/k)^2 \quad \text{mit } A_{\max. \text{ offen}} \text{ bei } k=1$$

**Photografie → geregelte Stufenblende („F stops“)****Lichtmenge  $L_S$  am Sensor ~  $A_{\text{offen}} / A_k$** 

$$L_S \sim \frac{L_0}{k^2} \quad \text{für } k > 1 \text{ und } f = \text{const}$$

 $L_0$  = Lichtmenge am Objektiveintritt**Video/Film → stufenlose Blende****Lichtmenge  $L_S$  auf der Abbildungsebene bei konstanter Brennweite**

# Was ist die „wirksame Blendenöffnung“? (Eintrittspupille)

Heutige Objektive sind durch Anordnung und Vielzahl der eingebauten Linsen de facto komplexer (s. Folie 52 & 53) als das einfache „Lochkamera-Denkmodell“ der Physik/Optik.

Dies zeigt sich in der Praxis u.a. darin, daß die über die Blendenlamellen eingestellte Öffnung  $d$  („Austrittspupille“) nicht mehr alleine für die Lichtmenge am Sensor verantwortlich ist, sondern daß die **effektive Öffnung** zusätzlich von den optischen Eigenschaften der vorgelagerten Linsen mit beeinflusst wird.

Maßgeblich ist in der Kamerapraxis also nicht der gemessene Öffnungs durchmesser der Blendenlamellen sondern die sog. „Eintrittspupille“ - auch „wirksame Blendenöffnung“  $D$  genannt. Sie bezeichnet die tatsächlich wirksame Öffnung des Objektivs, welche die - der Blende vorgelagerten - **Linsenabbildung mit einbezieht**. („pupil-magnification“)

Wirksame Blendenöffnung  $D$

Eintrittspupille



Schaut man vom Gegenstandsraum aus in ein Objektiv hinein, dann sieht man die „wirksame Blendenöffnung“ des Objektivs als helle kreisrunde Scheibe mit dem Durchmesser  $D$ .

Nur dieser Wert ist für die Bildung der Blendenzahl  $k$  auf dem Objektivring relevant!

Für mittlere bis lange Brennweiten oder bei relativ geschlossenen Blenden nähert sich  $D$  schnell an  $d$  an.

Zum Vergleich: **Austrittspupille**  
Durchmesser  $d$  Blendenlamellen

ZE/ZF Planar

1.4/85mm

f/1.4

$$\text{Blendenzahl } k = \frac{\text{Brennweite } f}{\text{wirksame Blendenöffnung } D}$$

$$\rightarrow D = f / k$$

f/4

deshalb auch die internationalen, Öffnungs-bezogenen Blendenschreibweisen,  
z.B. F2.8 (meist Photo mit  $F_{\text{stops}}$ ) oder f / 2.8 oder f 18mm / 1:2.8

# Exkurs: Blendenzahl bei Zoomobjektiven und Tele-Primes („Ramping“)

$$\text{Blendenzahl } k = \frac{\text{Brennweite } f}{\text{wirksame Blendenöffnung } D}$$

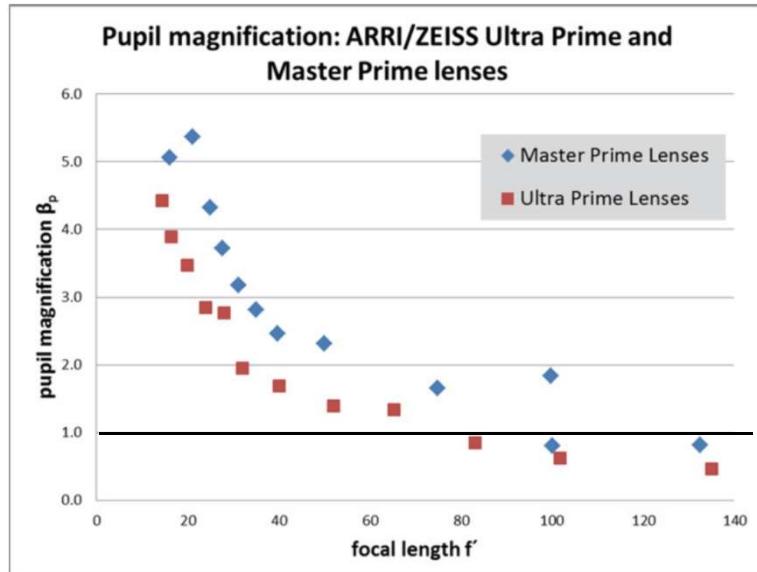


Bedeutet das, dass sich bei langen Brennweiten (z.B. zoomen in den Telebereich) die Blendenzahl automatisch erhöht (das Bild also dunkler wird)?

JA!

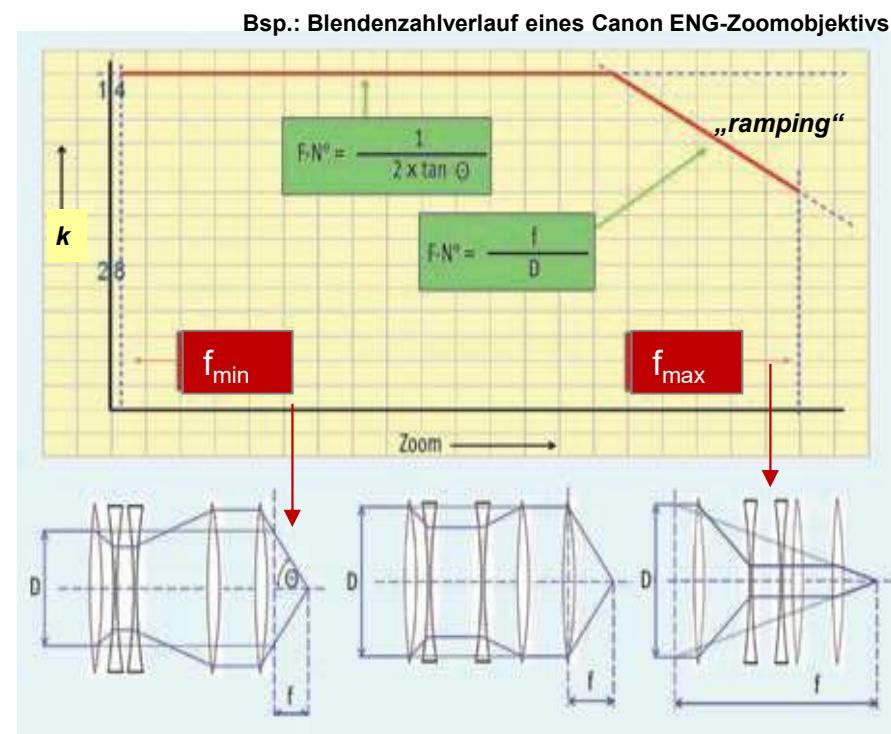
(... aber man kann den Effekt beim Objektivdesign durch eine sich gleichzeitig vergrößernde Eintrittspupille abmildern).

Bsp.: Durch optimiertes Lens-Design erzielte Pupillenvergrößerung von ARRI/ZEISS Master-Primes vs. Ultra-Primes



Quelle: V. Blahnik, „Zur Bestrahlungsstärke und Blendenzahl ...“ (Fa. Zeiss)

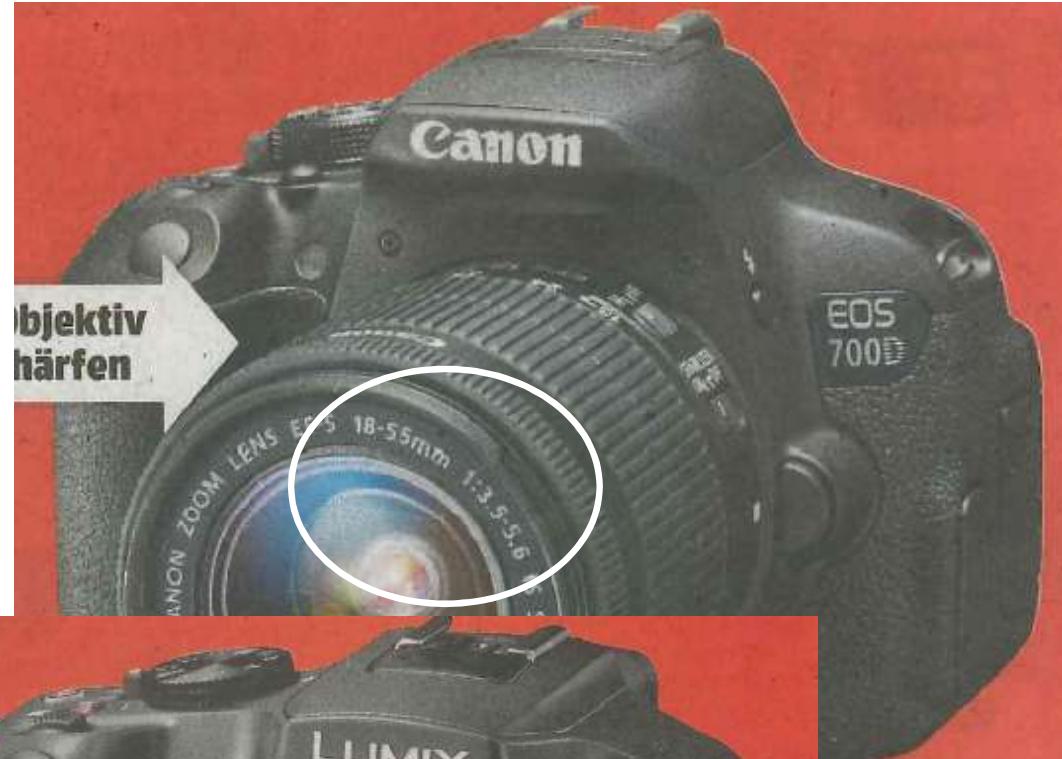
Die irgendwann unvermeidbare Abnahme der Lichtstärke im Telebereich bezeichnet man engl. als „ramping“.



Quelle: FKT 5/2011, S.228

Das Maß an Ramping und der Zoombereich, welcher frei von Ramping ist, stellen deshalb einen wichtigen Faktor bezüglich der Qualität eines Zoomobjektivs und seines praktischen Nutzens im Telebereich dar (z.B. Zoomfahrten oder schnelle Einstellungsänderungen ohne Helligkeitsverlust) und wird bei professionellen Zoomobjektiven auch konsequent angegeben (s. Folie 64, unteres Datenblatt).

# Wirksame Blendenöffnung in der Photopraxis:



Kein „ramping“ über den gesamten Brennweitenbereich



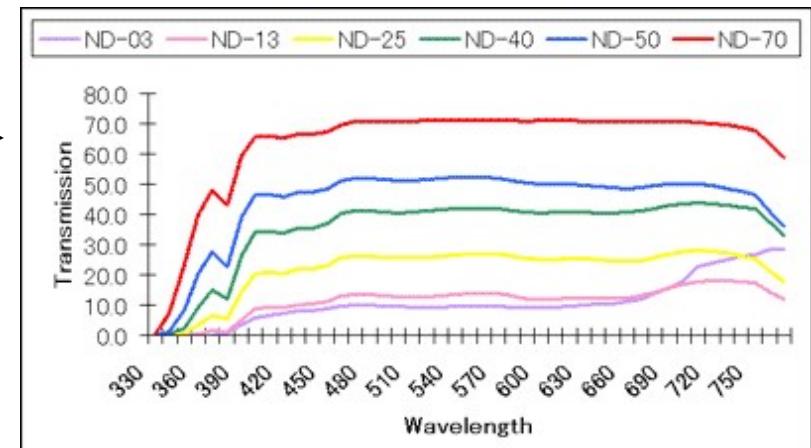
Lichtstarkes Carl-Zeiss-Objektiv

JA!  
Aber beachten Sie den  
nutzbaren Brennweitenbereich.

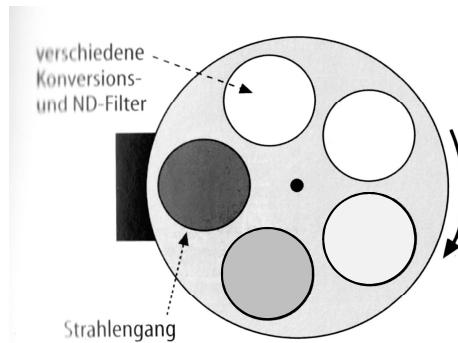
Quelle: Mediamarkt-Prospekt 11/2016

# Exkurs ND: Lichtmenge reduzieren ohne Blende

- Elektronische Bildsensoren sind sehr empfindlich bezüglich Überbelichtung (und eher tolerant bez. Unterbelichtung).
- Folglich muss (z.B. bei Außenaufnahmen) die einfallende Lichtmenge oft vorab deutlich reduziert werden.
- Da die mechanische Blende (neben der Lichtreduzierung) sehr viele Nebeneinflüsse auf den Bild-Look hat (s. Folie 66ff), wird bei starkem Lichteinfall die Lichtmenge lieber mit einem vorgeschalteten Neutraldichtefilter (ND) reduziert.
- Ein ND-Filter dämpft das einfallende Licht also nur in seiner Leistung, ohne eine zusätzliche spektrale Manipulation durchzuführen (also ohne Farbverfälschung).
- Für Landschaftsaufnahmen werden gern auch ND-Filter verwendet, deren Dichtewert erst in der oberen Bildhälfte (=Himmel) ansteigt (sog. ND-VerlaufsfILTER).



← alternative Bauformen →



Neutraldichte-Filterrad mit 3 ND-Stärken am Objektivflansch einer Kamera

# Übungsaufgaben: Objektivparameter interpretieren

Anmerkung: wirksame Blendenöffnung/Eintrittspupille heißt auf Englisch: „aperture“

- Testfrage um Profi von Amateur zu unterscheiden:  
„Wann kommt bei gleicher Bildausschnittswahl mehr Licht am Bildsensor an, bei Blendenzahl  $k = 2.8$  oder bei  $k = 28$ ?“

$$\text{Blendenzahl } k = \frac{\text{Brennweite } f}{\text{wirksame Blendenöffnung } D}$$

Bsp.: Objektiv mit  
Festbrennweite 50mm:

- Bei einer gewählten Blendenzahl  $k = 2$  beträgt die *wirksame* Blendenöffnung ... mm, also das ...-fache der Brennweite
- Bei einer gewählten Blendenzahl  $k = 22$  beträgt die *wirksame* Blendenöffnung ... mm, also das ...-fache der Brennweite

- Blendenzahl  $k$  vs. T-Nummer

Worin unterscheiden sich die beiden Begriffe ?

Ein professionelles Cine-Objektiv (Festbrennweite) ist mit F/1,2 und T/1,8 ausgezeichnet. Wie ist das zu interpretieren?

Wie groß ist der Lichtverlust durch die verbauten Linsen in diesem Objektiv ?

Was bedeuten diese Zahlen?

• XS17x5.5



Specifications/Lens	XS17x5.5BRM
Zoom ratio / Format	17x / 1/2" <span style="color:red">Zoomwert und Brennweitenangaben gelten nur für 1/2 Zoll- SensorTYP</span>
Focal length	5.5–94 mm
Maximum relative aperture	F1.4 (5.5–77 mm) / F2.4 (94 mm)
Angular field of view	16:9 Aspect ratio
M.O.D. (Minimum Object Distance) from front of lens	5.5 mm: 64°43'x39°14' / 94 mm: 4°15'x2°23'
Object dimensions at M.O.D.	0.60 m <span style="color:red">Naheinstellgrenze / Mindestentfernung</span>
	5.5 mm: 741 x 417 mm / 94 mm: 41 x 23 mm

Frage:  
Bei welcher Brennweite nimmt das Objektiv in etwa in der Größe des horizontalen Blickfelds des Menschen auf ?

Frage:  
Warum zwei Blendenzahlen (abhängig von der Brennweite)?

# Exkurs: Schärfe, Tiefenschärfe und Bildgestaltung

Kameramänner/-frauen setzen Schärfe ganz bewusst zur Lenkung und Bindung der Aufmerksamkeit der Zuschauer ein (→ psychologische Fokussierung). Dabei wird eine Abstandsebene gezielt scharf gehalten, während der Rest bewusst in die (Tiefen-) Unschärfe gesetzt wird („Selektive Schärfe“).



Beispiele aus dem Film „Any given sunday / 1999 / directed by Oliver Stone / DoP Salvatore Totino

## Zusatzeffekt 1:

Da Unschärfe im Hintergrund vom menschl. Gehirn oft als „große Entfernung“ interpretiert wird, bekommen die 2D-Bilder automatisch einen gesteigerten Tiefeneffekt.

## Zusatzeffekt 2:

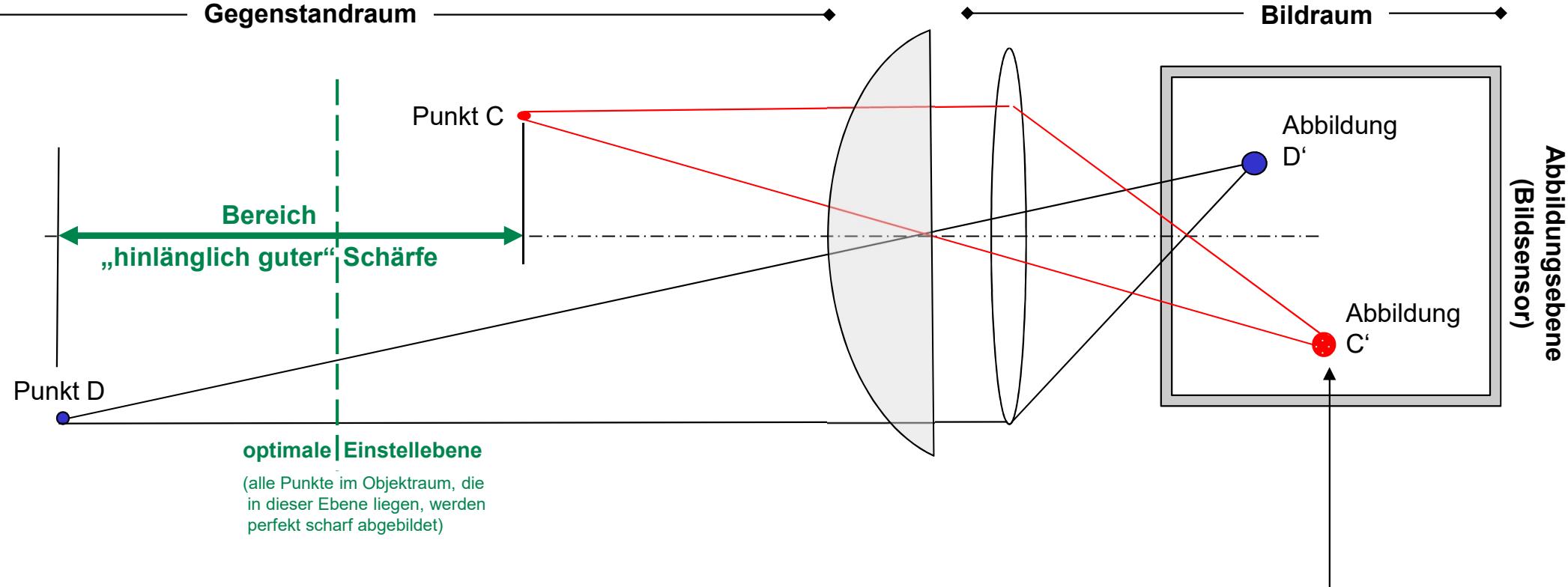
Die entstehende „Bildsprache“ (engl. visual style) ist in unserem kollektiven Gedächtnis stark mit „Kino-Look“ bzw. mit „Traum“ verknüpft (da wir glauben in der Realität immer alles scharf zu sehen, s.a. Folie 89)

Schauen Sie sich das mittlere Bild an und überlegen Sie anhand einer kurzen Skizze/Aufsicht auf die Szene:

- In welchem Abstand „a“ zu den Schauspielern hat der Kameramann die Kamera aufgebaut ? (nah, mittel, weit )
- Mit welcher Brennweite könnte die Aufnahme erfolgt sein ? (kurz, mittel, lang)

# Definition Tiefenschärfe/Schärfentiefe:

Die **Schärfentiefe** beschreibt denjenigen Ausschnitt des Gegenstandraums, innerhalb dessen alle Objekte **FÜR MENSCHLICHE AUGEN *hinlänglich scharf*** auf die Abbildungsebene (Sensor) abgebildet werden.



Die Definition „*hinlänglich scharf*“ erfolgt technisch über den Durchmesser des zulässigen Unschärfekreises eines abgebildeten Punktes im Bild, bei dem ein Mensch noch keine Unschärfe wahrnehmen kann.

Der Unschärfekreis („Zerstreuungskreis“) bedeutet kamerabezogen: über wie viele Sensorzellen die Abbildung eines Objektpunktes verteilt sein darf, ohne daß ein Mensch Unschärfe wahrnimmt. (s. nächste Folie)

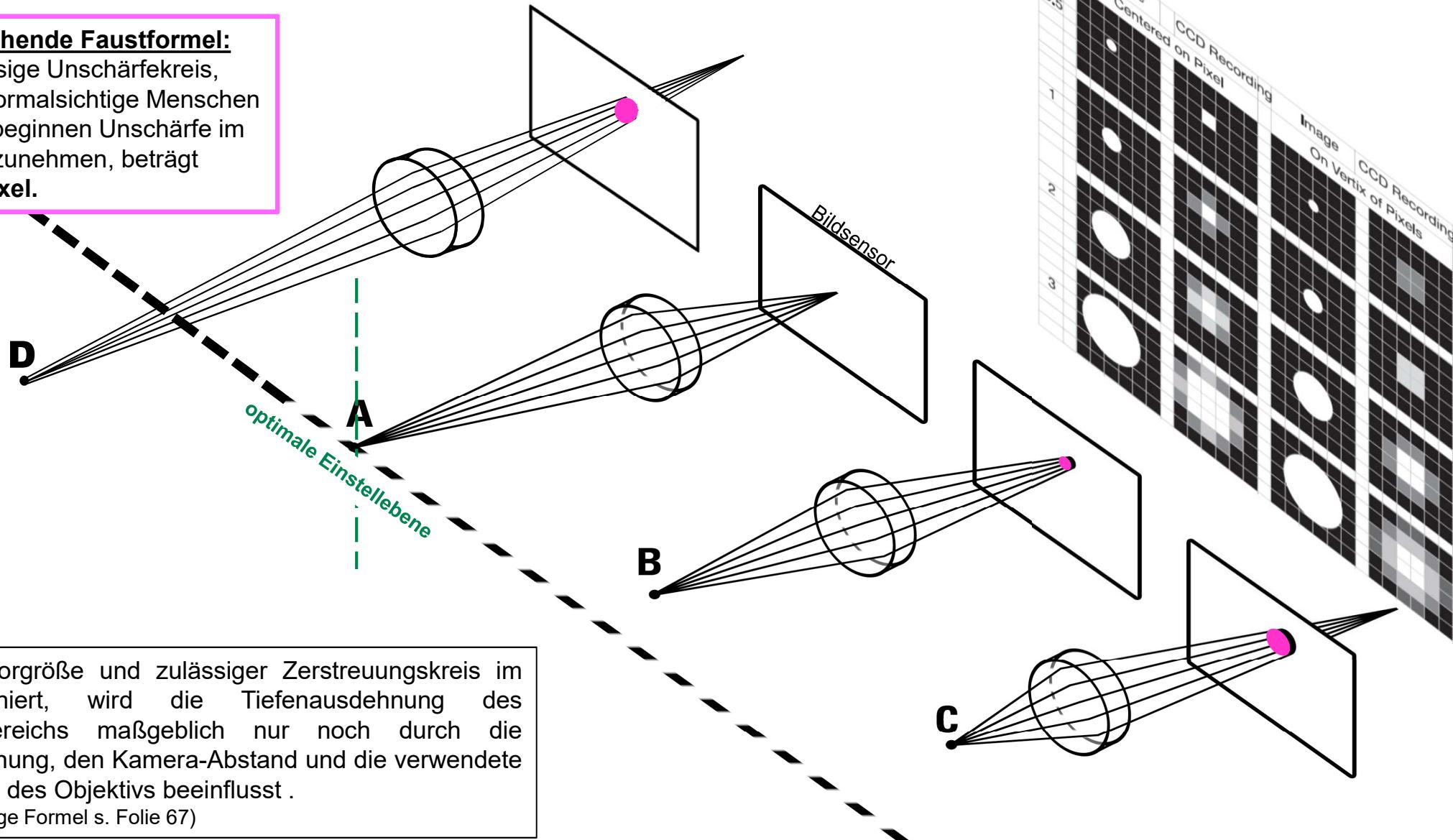
# Definition Zerstreuungskreis:

Der zulässige **Unschärfekreis** („Zerstreuungskreis“, engl. „point spread function“) beschreibt, über wie viele Sensorzellen die Abbildung eines Objektpunktes maximal verteilt sein darf, ohne daß ein Mensch Unschärfe wahrnimmt. D.h. **Pixelgröße und Füllfaktor (= Pixelzahl zu Sensorgröße) der Kamera sind hierfür zunächst maßgeblich.**

Traditionell wurde der (noch) zulässige Zerstreuungskreis meist mit  $0,025\text{mm}=25\mu\text{m}$  angegeben. Bei professionellen Videokameras variiert die Pixelgröße heute aber zwischen 5 und  $10\mu\text{m}$  Kantenlänge.

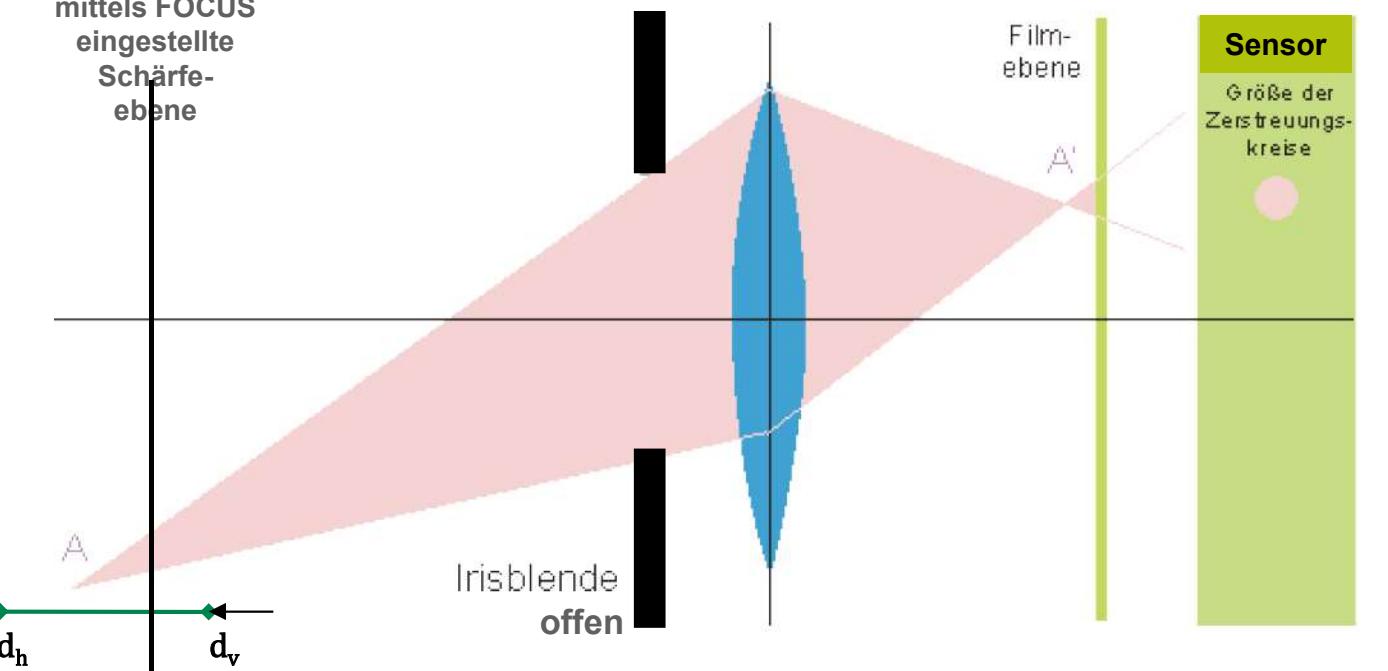
## Vereinfachende Faustformel:

Der zulässige Unschärfekreis, ab dem normalsichtige Menschen langsam beginnen Unschärfe im Bild wahrzunehmen, beträgt  
 **$> 2 \times 2 \text{ Pixel}$ .**



### 3.4. Objektiv-Wechselwirkungen II: Blende und Tiefenschärfe

mittels FOCUS  
eingestellte  
Schärfe-  
ebene



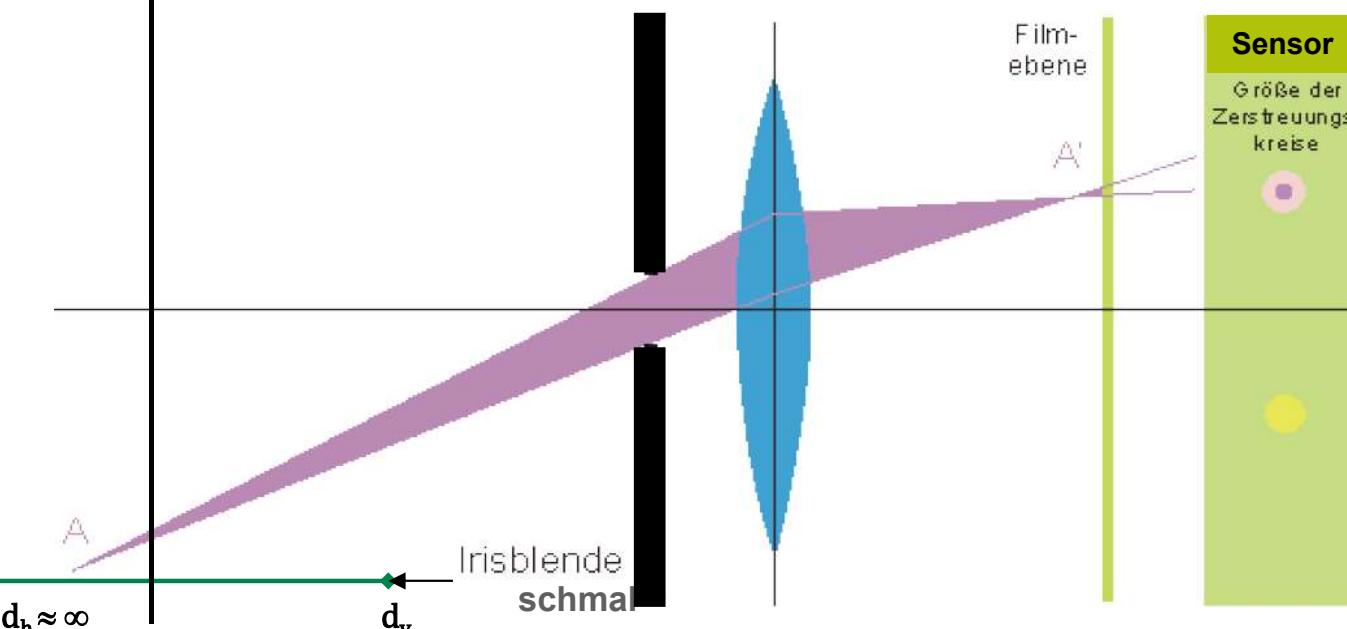
**Offene Blende =**  
große Zerstreuungskreise für fast alle Objekte  
außerhalb der Schärfeebeine

- große Tiefenunschärfe
- geringe Tiefenschärfe

Vollständige Formel:

$$\text{Beginn vorderer Schärfebereich } d_v = \frac{a * f^2}{f^2 + k * u * (a - f)}$$

$$\text{Ende hinterer Schärfebereich } d_h = \frac{a * f^2}{f^2 - k * u * (a - f)} \approx a \quad (\text{für } a \gg f)$$



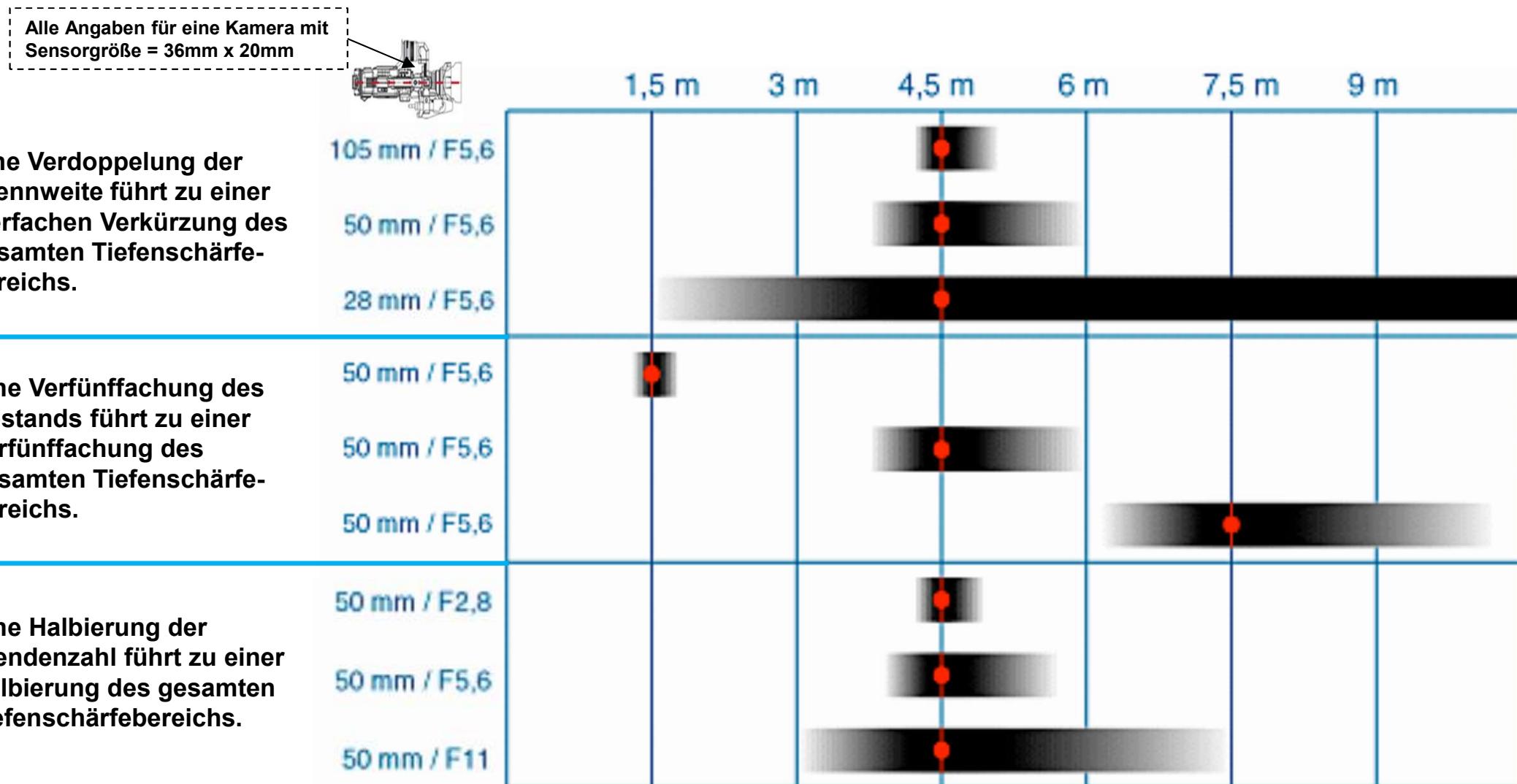
**Schmale Blende =**  
kleine Zerstreuungskreise für alle Objekte  
außerhalb der Schärfeebeine

- geringe Tiefenunschärfe
- hohe Tiefenschärfe

$k$  = Blendenzahl  
 $a$  = Einstellentfernung (Fokussierabstand)  
 $u$  = zul. Unschärfekreisdurchmesser  
 $f$  = Brennweite

# (grobe) TIEFENSCHÄRFE-FAUSTREGELN:

Beachten Sie den Einfluß von k, a und  $f^2$  in der Schärfebereichformel Folie 66!



Nachdenken:

Welcher Einstellring an einem Zoomobjektiv hat also den stärksten Einfluß auf die Tiefenschärfe?

# Objektiv Wechselwirkungen III: Sensorgroße+Abstand vs. Brennweite und Tiefenschärfe

## Bsp.: Bildsensorgrößen 4:3

### Consumer -Kameras

1/4 Zoll 2,4 mm  
3,2 mm

1/3 Zoll 3,6 mm  
4,8 mm

Film S 8 mm 4,01 mm  
5,36 mm

1/2 Zoll 4,8 mm  
6,4 mm

2/3 Zoll 6,6 mm  
8,8 mm

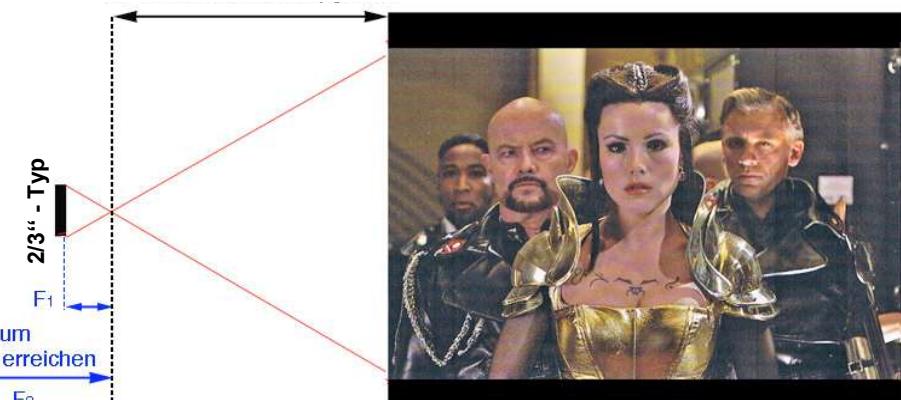
Film S 16 mm 7,0 mm  
12,35 mm

1 Zoll 9,6 mm  
12,8 mm

### Professionelle -Kameras

gleiche Aufnahmedistanz „a“ bei verschiedenen Bildsensorgrößen

„Look“:



Verschiedene Brennweiten um gleichen Aufnahmewinkel zu erreichen

### Professionelle Kino-Kameras

Film S 35 mm 18,1 mm  
24,0 mm



Brennweitenverlängerung (Zoom), um trotz kleinerer Sensorgröße ansatzweise\* den gleichen, gestalterischen Tiefenschärfe-Effekt zu erreichen.  
(s. Einfluß von  $f^2$  in Formel Folie 66)

$f_2$

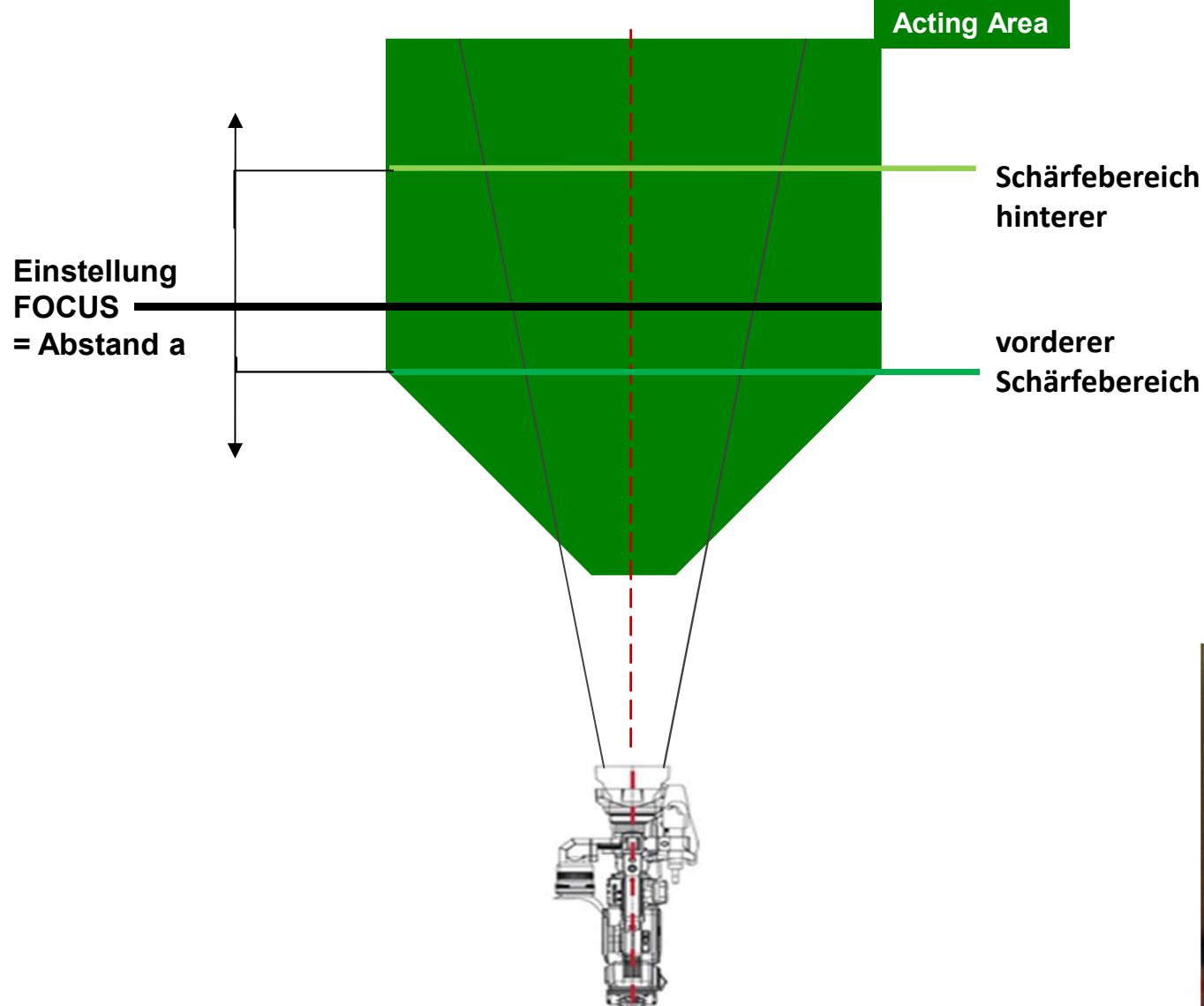
2/3“ - Typ



\*Gegeneffekt in der Praxis: Vergrößerung der Aufnahmedistanz „a“, um trotzdem wieder den gleichen Bildausschnitt aufzunehmen.  
(→ verlängert den TS-Bereich wieder leicht, s. Einfluß von a in Formel Folie 66)

# 2D-Tiefenschärfe gestaltung in der Praxis: (k.a.u.f.)

Lesen Sie im Dateibereich nochmals die Datei „Tiefenschärfe faktoren\_kurz\_ erklärt.pdf“ durch!



$$\text{Ende hinterer Schärfebereich } d_h = \frac{a * f^2}{f^2 - k*u*(a-f)}$$

$$\text{Beginn vorderer Schärfebereich } d_v = \frac{a * f^2}{f^2 + k*u*(a-f)}$$

Ausdehnung Tiefenschärfebereich abhängig von:

- **k** Blendenzahl k
- **a** Fokussierabstand a zur Szene („Einstellentfernung“)
- **u** zulässiger Unschärfekreis \*
- **f** gewählte Brennweite f

\* Korreliert in der Praxis bei gleicher Bildauflösung und gleichem Öffnungswinkel direkt mit Sensorgröße!  
(Sensor groß → TSB klein, Sensor klein → TSB groß)



# Übungsaufgabe: Tiefenschärfe technisch verstehen



Eine Spiegelreflex-Kamera vom Typ CANON EOS

- Genutzte Bildsensorgroße 36 x 20,3 mm
- Ausgegebene Bildgröße (im HD-Movie-Mode): 1920 x 1080 Pixel

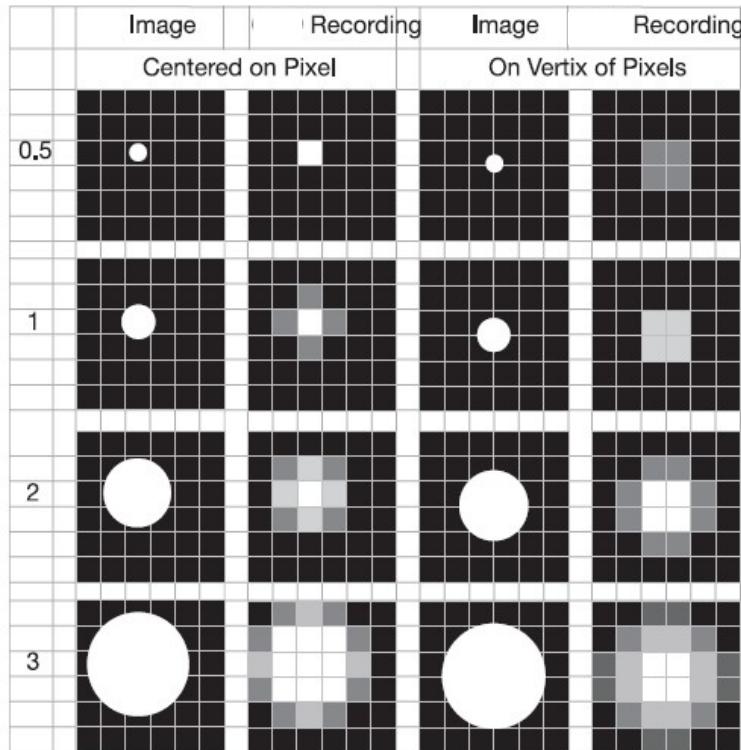


Eine Cinema-Kamera vom Typ ARRI Alexa

- Genutzte Bildsensorgroße 23,8 x 13,4 mm
- Ausgegebene Bildgröße: 1920 x 1080 Pixel

Eine HD-Broadcastkamera vom Typ SONY EX1

- Genutzte Bildsensorgroße 9,0 x 5,0 mm
- Ausgegebene Bildgröße: 1920 x 1080 Pixel



Als Beginn der Unschärfe im Bild nehmen wir einmal (streng) an:

*„Ein Objektpunkt im Raum wird auf mehr als 2 x 2 pixel im Ausgangsbild abgebildet“*  
Fälle 2+3 in der Grafik links:

- Der gerade noch zulässige Zerstreuungskreis ist dann für obige Kameras jeweils wieviel mm groß?

Alle Kameras sollen aus der gleichen Position eine Szene mit 48,5° horizontalen Öffnungswinkel aufnehmen

- Welche Brennweite muss dafür an den Objektivringen der Kameras eingestellt werden?

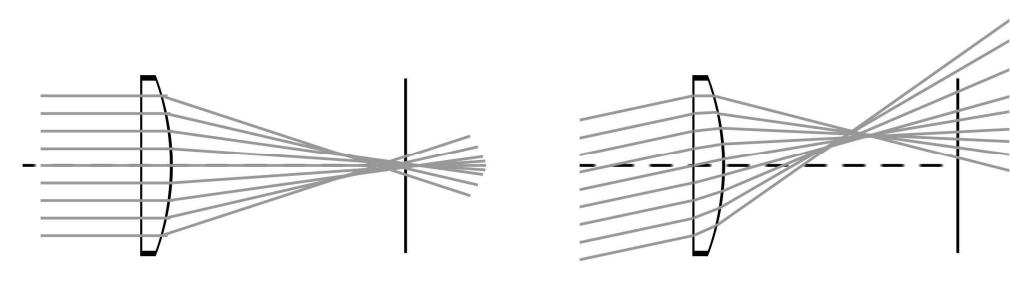
Aufgenommen werden sollen ein Schauspieler in 2m Entfernung von der Kamera, jeweils mit 48,5° hor. Öffnungswinkel. Gedreht wird die Szene mit Blendenzahl k= 4.

- Berechnen Sie für alle drei Kameramodelle den vorderen und hinteren Tiefenschärfebereich für diese Aufnahmesituation! (Formeln Folie 70)

# Fehlverhalten & Qualität von Objektiven

Da Objektive in der Videoproduktion das erste technische Bauteil einer langen Prozesskette sind und Fehler an dieser Stelle sich durch alle nachfolgenden Produktionsstationen durchziehen - zum Teil durch multiplizierende Operationen sogar verstärkt werden - unterliegen professionelle Objektive strengen Qualitätskriterien bezüglich folgender Faktoren:

- **Sphärische Aberration** (Öffnungsfehler)
- **Koma** (Asymmetriefehler)
- **Astigmatismus** (hor./vert. „Punktlosigkeit“  $\equiv$  Schärfeabfall zum Bildrand)
- **Bildfeldwölbung/Verzeichnung** („Distortion“)
- **Chromatische Aberrationen** (Farbsäume)
- **Vignettierung** (ungleichmäßige Helligkeitsverteilung über die Abbildungsebene)

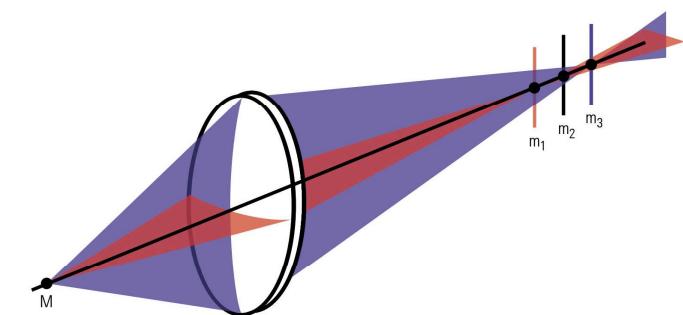


Öffnungsfehler

Koma



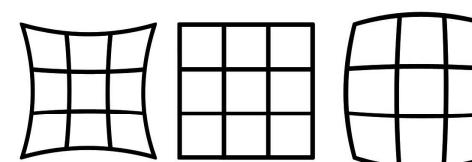
Vignettierung



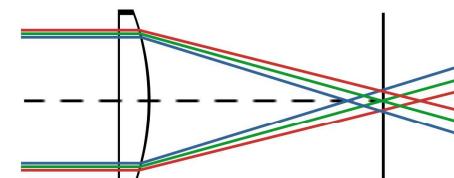
Astigmatismus

## Qualitätsgrößen von Objektiven:

- **MTF** („Schärfeleistung“)  
(realisierbarer Kontrasthub in benachbarten  
Abbildungsbereichen vs. räuml. Auflösungs-  
vermögen, Erläuterung s. Folie 120ff)
- **T-Nummer** („Lichtstärke“)  
(Lichtdurchlässigkeit bei voll geöffneter  
Blende unter Einbeziehung aller optischen  
Verluste, Erläuterung s. Folie 54)



Verzeichnung



Farbfehler

# Optische Präzision (mit vielen kombinierten Linsen) ist teuer!



Zeiss DigiZoom 6...24 mm zum Preis von 48.624 €  
(Jahr: 2004)

# Nachdenken !!!!

- Warum verhält sich der Lichtstrom  $I$  auf der Abbildungsebene einer Kamera umgekehrt quadratisch zur Blendenzahl  $k$  ?
- Um Überbelichtung zu vermeiden, möchten Sie den Lichtstrom auf die Abbildungsebene ihrer Kamera begrenzen, ohne dass es zu Schärfe-Änderungen kommt. Wie kann dies bewerkstelligt werden?
- Zwei typische *Merkhilfen* ("Eselsbrücken") für Fotografen lauten:  
*"Wenn die Sonne lacht – nimm Blende acht"* und *"Blende kleiner drei – der Hintergrund wird Brei"*. Erläutern Sie die korrekten technischen Ursachen/Hintergründe jeder Regel.
- Schauen Sie sich das Bildergebnis ihrer eigenen Webcam an. Welche Objektivfehler können Sie erkennen? Sollten Webcam-Objektive eher weitwinkliger oder kurzwinkliger ausfallen? (Begründung) Was bedeutet das bezüglich ihrer Brennweite?
- Die Tiefenschärfe ihrer Aufnahme ist zu gering. Welche Gegenmaßnahmen können Sie beim Dreh ergreifen?
- Die Tiefenschärfe ihrer Aufnahme ist zu hoch. Welche Gegenmaßnahmen können Sie beim Dreh ergreifen?
- Bei der Videoübertragung von Sportevents im Freien werden mehrheitlich Zoom-Objektive mit extrem langen Brennweiten eingesetzt. In diesem Falle lieber Kameras mit kleineren oder größeren Sensoren verwenden? (Begründung)

# Unsere Wahrnehmung von „leuchtenden“ & „bewegten“ Bildern

... und dann werde ich oft von meinen Studenten gefragt,  
„WARUM ist das (videotechnisch) denn so?“  
und die Antwort lautet in 99 von hundert Fällen  
„.... weil Video und Film für Menschen und ihren  
Sehapparat gemacht werden“.

C. Poynton, in einem BBC-Interview (übersetzt)

## Was wir in dieser Runde lernen:

- Motivation: Viele technische Regeln und Gesetze der Videotechnik/Computergrafik basieren auf den visuellen Fähigkeiten der Zielgruppe „Mensch“.
- Grundsätzliches zum Mensch, die Reize seiner Sinne und ihrer Wahrnehmung.  
(z.B. Stevens'sches Potenzgesetz)
- Der Vorgang des Sehens und die beteiligten Körperteile. (Human Visual System/HVS)
- Die Dynamik des Auges (Iris, Akkommodation, muskuläre Augenbewegungen).
- Die Physiologie des Sehens.  
(Blickachse, Rezeptorentypen, Arbeitsteilung der Retina-Zonen, retinale Vorverarbeitung u. rezeptive Felder, Arbeitsteilung im HVS)
- Hellsehen vs. Dunkelsehen. (Arbeitsteilung Rezeptoren)
- Definition des binokularen Gesichtsfelds des Menschen (und dessen grobe Wahrnehmungszonen).

# Der Mensch, die Reize seiner Sinne und ihre Wahrnehmung

- Der Mensch hat sich (wie andere Spezies auch), bezüglich seiner Sinne, über Jahrtausende immer weiter evolutionär *optimiert*, um sich seiner Umwelt immer besser anzupassen.
- Dazu zählt insbesondere die Ausweitung seiner Sinne über einen immer größeren Reizbereich (womöglich, um bessere Überlebens-Chancen zu erzielen), obwohl die Anzahl der neuronal verarbeitbaren Stufen gleich blieb.
- Dabei hat sich die **nichtlineare Wahrnehmung** als optimales Verfahren ausgeprägt.
- Dies bedeutet, dass bei allen menschlichen Sinnen im Wahrnehmungskorridor zwischen
  - „gerade etwas bemerken“ (Sehschwelle, Hörschwelle, Tastschwelle, Riechschwelle) und
  - „Reiz ist so stark, dass er Schmerz auslöst“ (Schmerzgrenze)
 nicht in gleichförmig großen Stufen wahrgenommen wird.
 

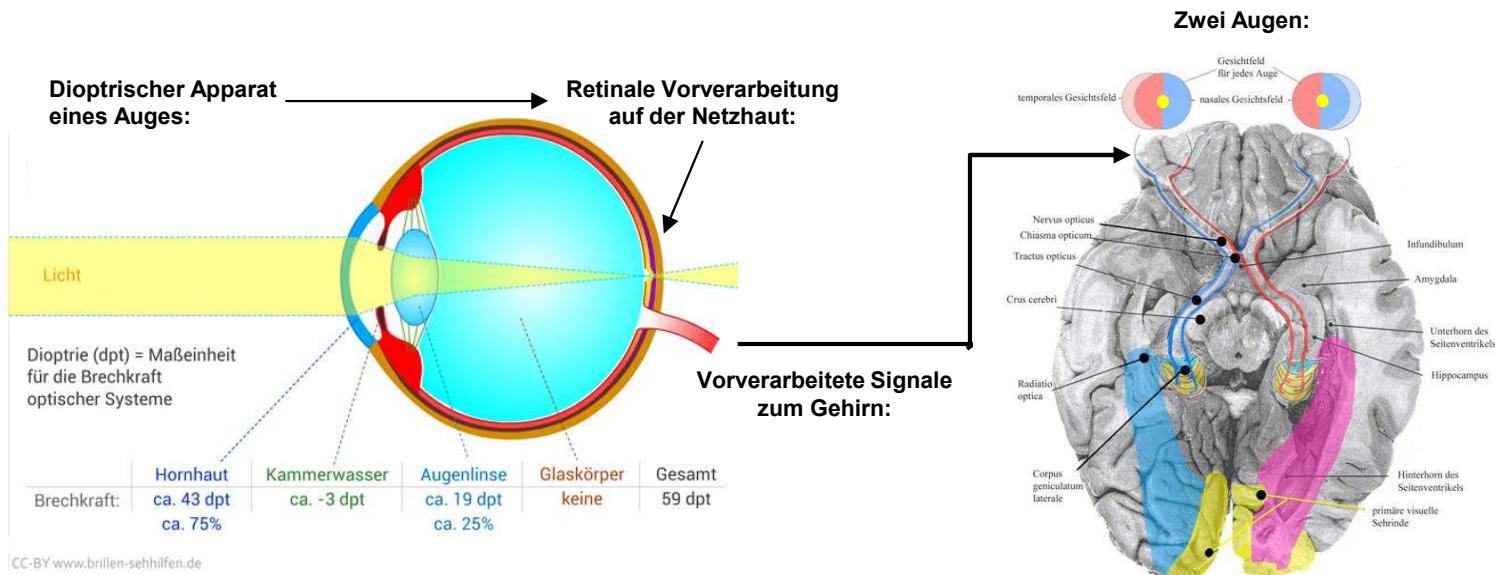
Ernst Heinrich Weber (1795-1878):  
 „Der Zuwachs an Reizstärke, den ein Mensch benötigt, damit ein Reizunterschied bemerkt wird, muss umso höher sein, je intensiver der Reiz.“ (gilt nicht an den Wahrnehmungsgrenzen)
- Stevens'ches Potenzgesetz der Sinnesorgane (1957, engl. „power-law“):  $W = k * (S_i - S_0)^n$   
 $W$  = wahrgenommene Stärke (Mensch)     $S_i$  = Reizintensität     $S_0$  = Wahrnehmungsschwelle     $k$  = individuelle Konstante     $n$  = individuelle Potenz je nach Sinnesorgan

## Praxisbeispiele:

- Die Leuchtdichte einer Lichtquelle ( $\rightarrow S_i$ ) muss sich in etwa um 0,83 potenzieren, um ein doppelt so starkes Helligkeitsempfinden ( $\rightarrow W$ ) beim Menschen auszulösen.  $\rightarrow k \approx 1$ ,  $n = 0,83$  (vgl. Einführung der Gammakorrektur in der Videotechnik)
- Die Leistung einer Schallquelle muss sich in etwa verzehnfachen, um ein doppelt so starkes Hörempfinden („Lautheit“) auszulösen.

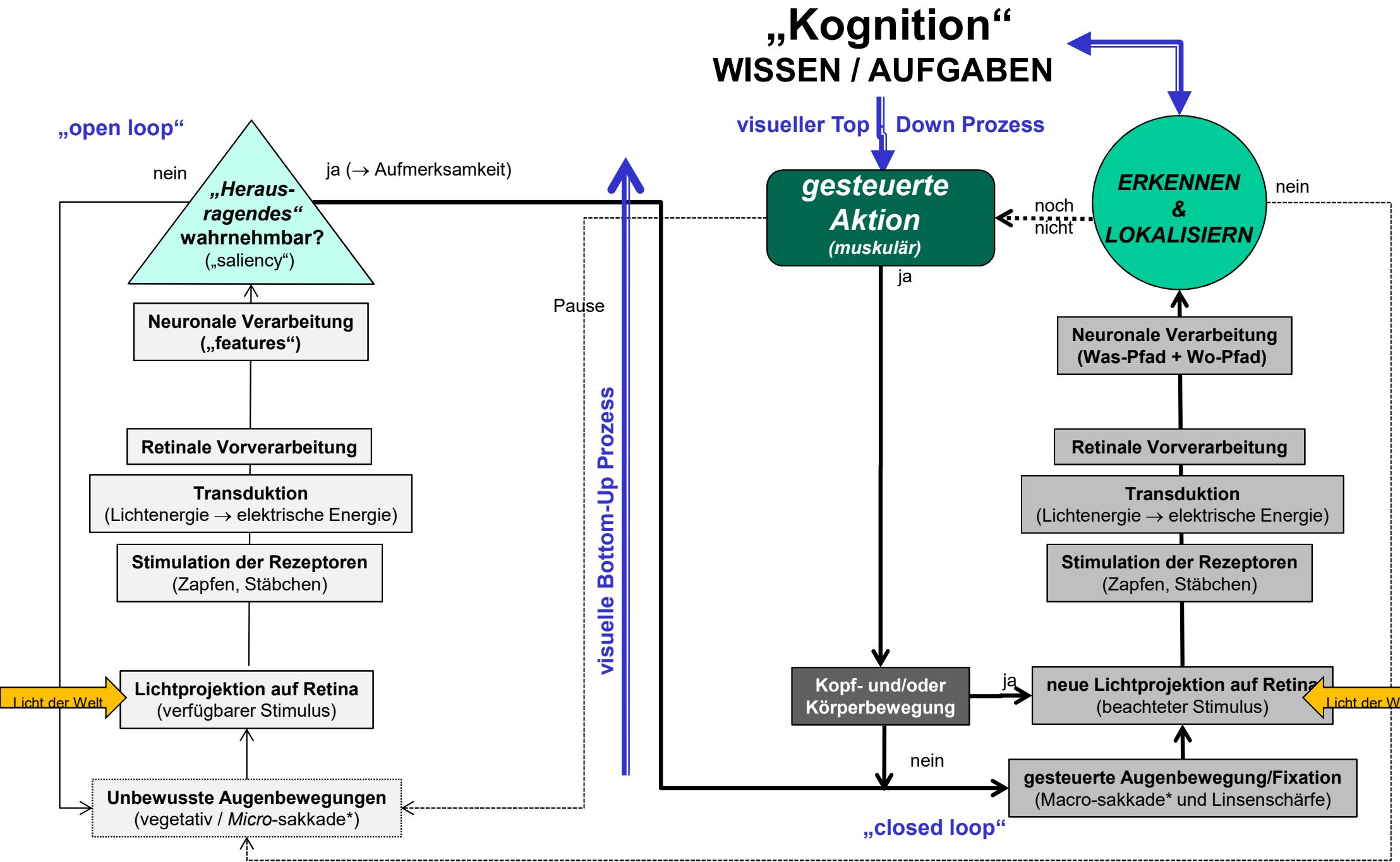
→ Vgl. Einführung von *DeziBel [dB]* und *sone* in der Audiotechnik!

# Der Vorgang des Sehens



entire Human Visual System (HVS)

# Vereinfachtes Modell des visuellen Wahrnehmungsprozesses



# Körperteile, die zum Sehen dazugehören

(Sinnesphysiologie)

Pupille &amp; Iris

bei starkem Lichteinfall

Reaktionszeit  $\leq 0,2\text{s}$ 

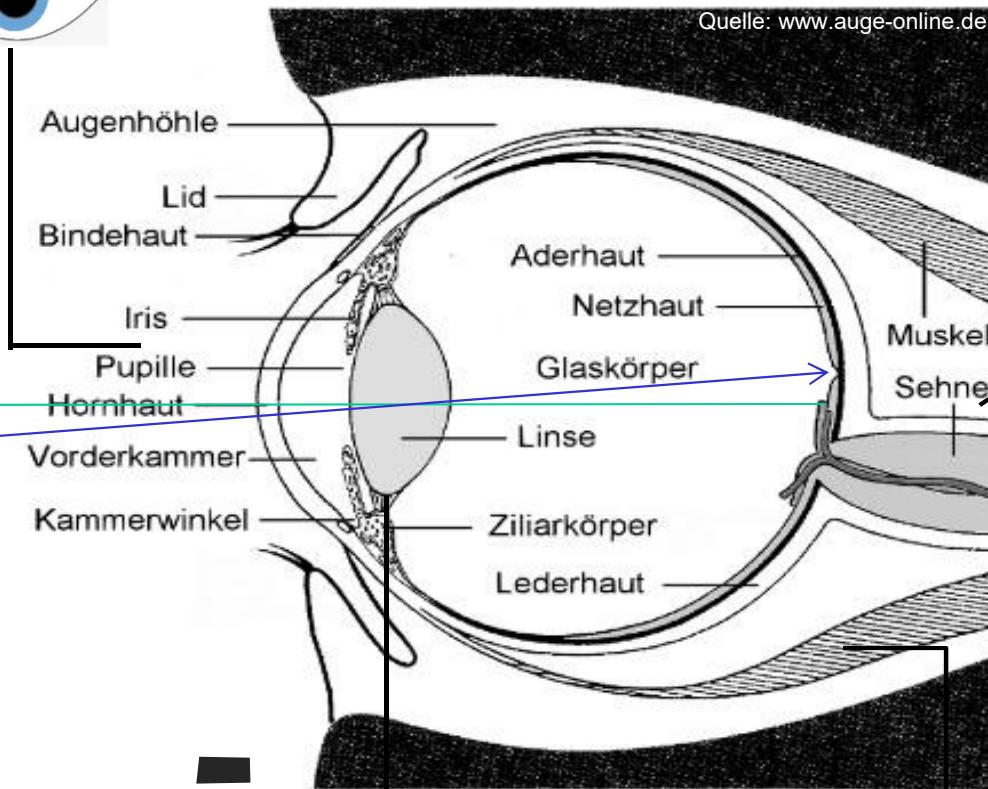
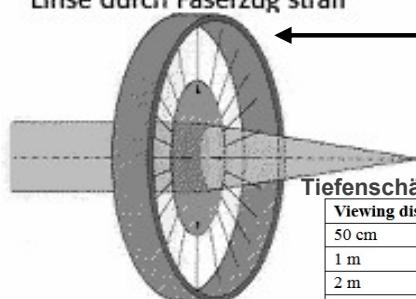
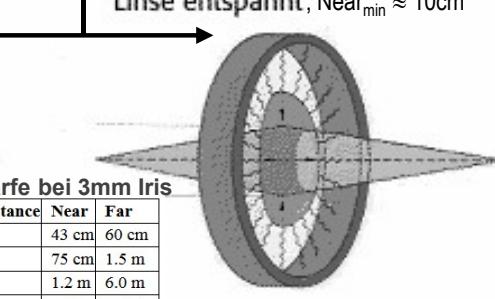
bei schwachem Lichteinfall

 $\varnothing_{\min} \approx 2\text{mm}, \varnothing_{\max} \approx 7\text{mm}$ 

Licht

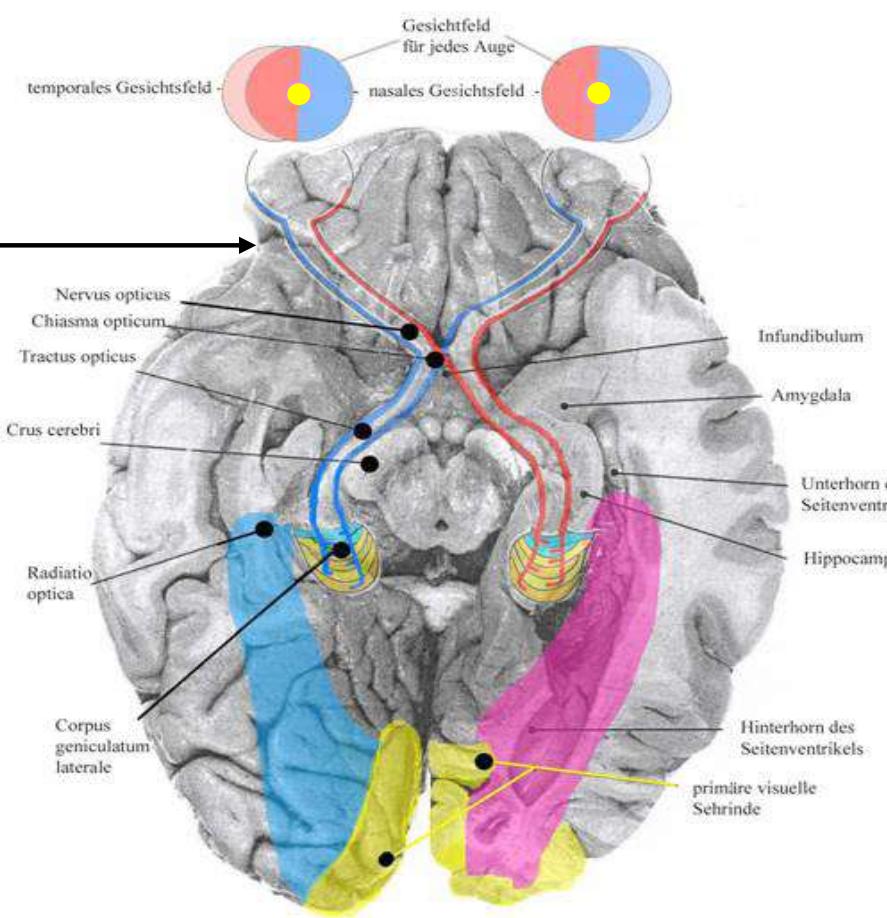
optische Achse

visuelle Achse

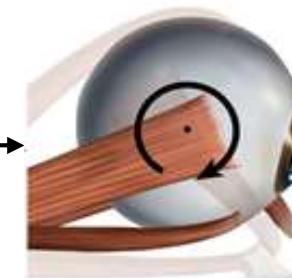
**Blick in die Ferne**Ringmuskel entspannt  
Linse durch Faserzug straff**Naheinstellung**Ringmuskel angespannt  
Linse entspannt, Near<sub>min</sub>  $\approx 10\text{cm}$ 

Tiefenschärfe bei 3mm Iris

Viewing distance	Near	Far
50 cm	43 cm	60 cm
1 m	75 cm	1.5 m
2 m	1.2 m	6.0 m
3 m	1.5 m	Infinity

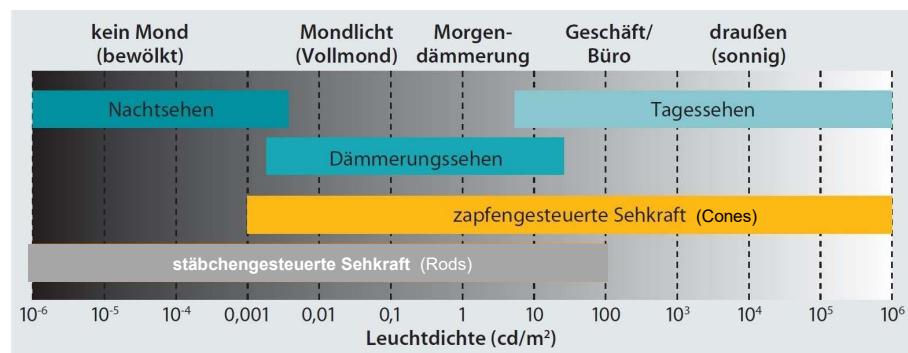
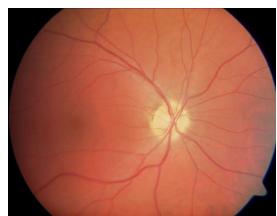
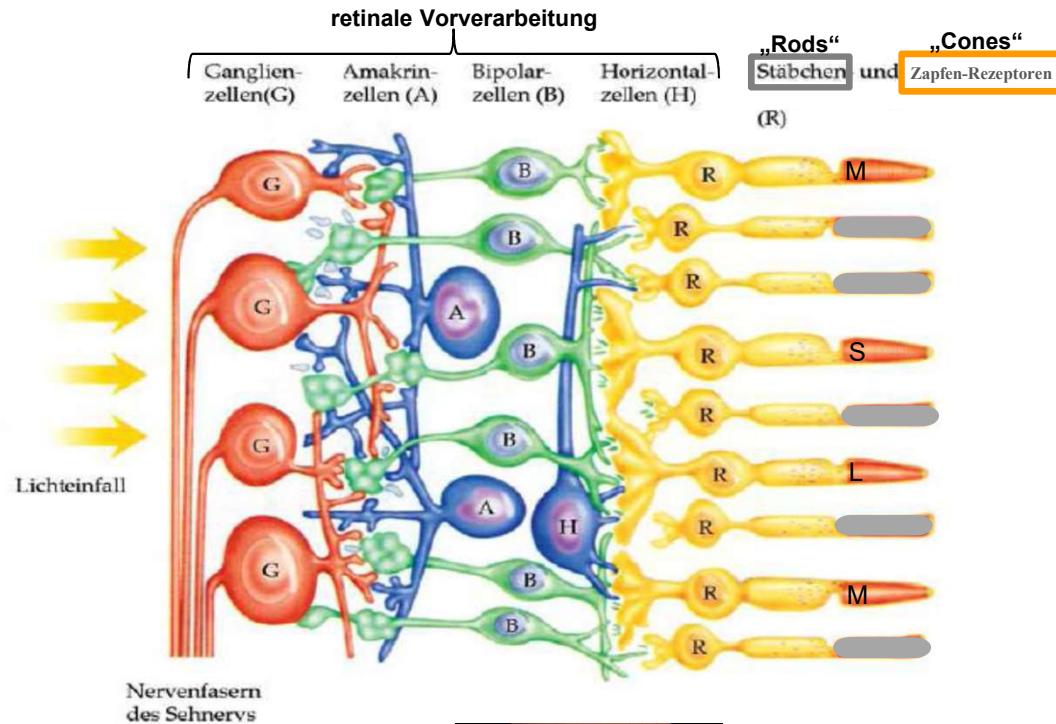
**Augenbewegungen**

(8 Muskel), → s.a. Folie 90

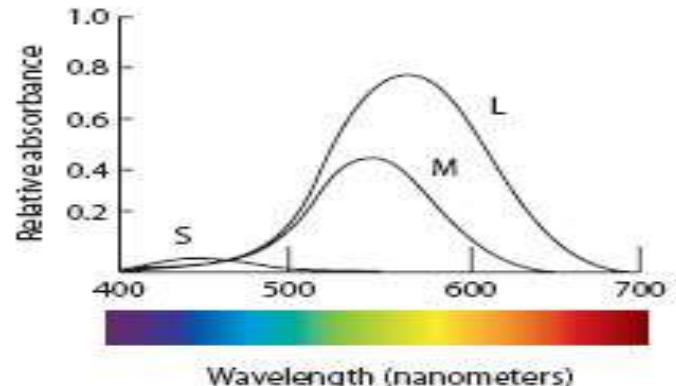


# Detail: menschl. Netzhaut (Retina, invertiert\*)

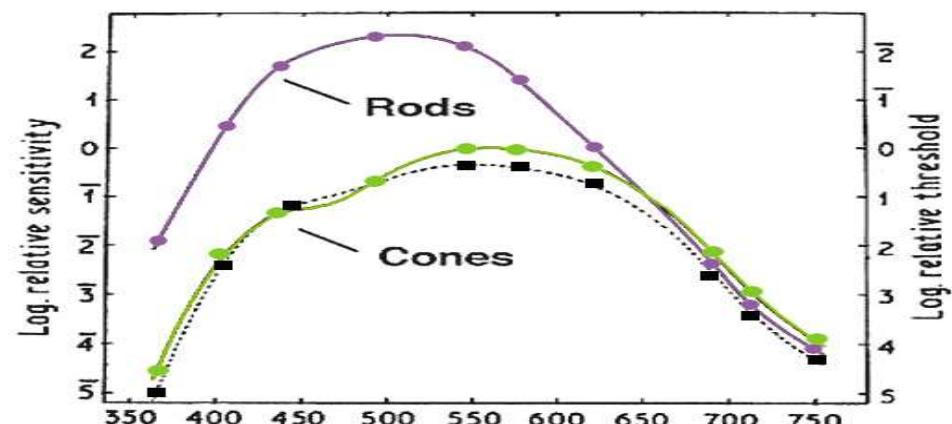
\* Bei allen Wirbeltieren werden die Rezeptoren erst nach dem Durchgang durch eine Gewebe-/Nervenschicht „beleuchtet“



Relative spektrale Empfindlichkeit von S-, M- & L-Zapfen bei auftreffendem Licht



Vergleich der Empfindlichkeit von Zapfen („Cones“, SML-aufsummiert) gegenüber Stäbchen („Rods“) → vereinfacht s. Folie 37

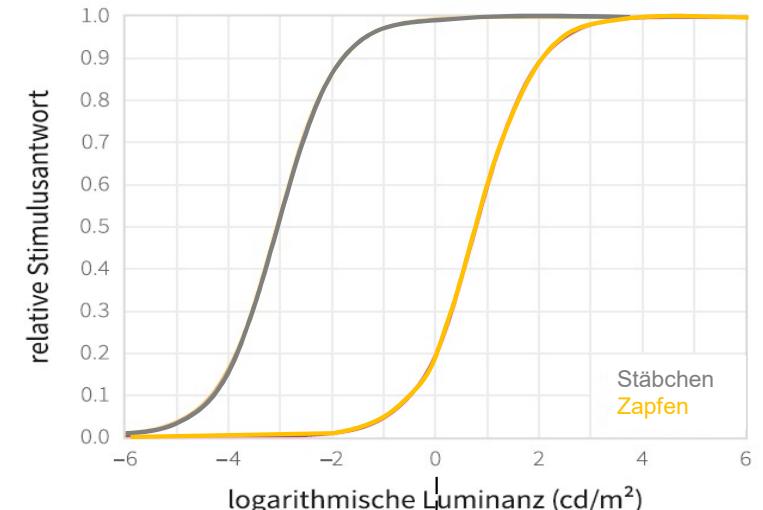


# Vereinfachte Modelle für Hell- & Dunkelsehen:

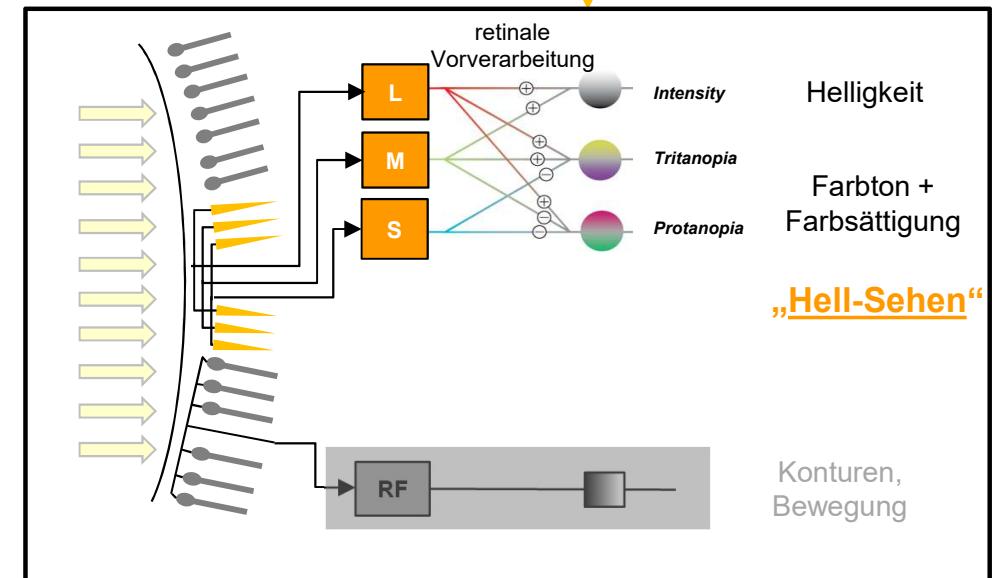
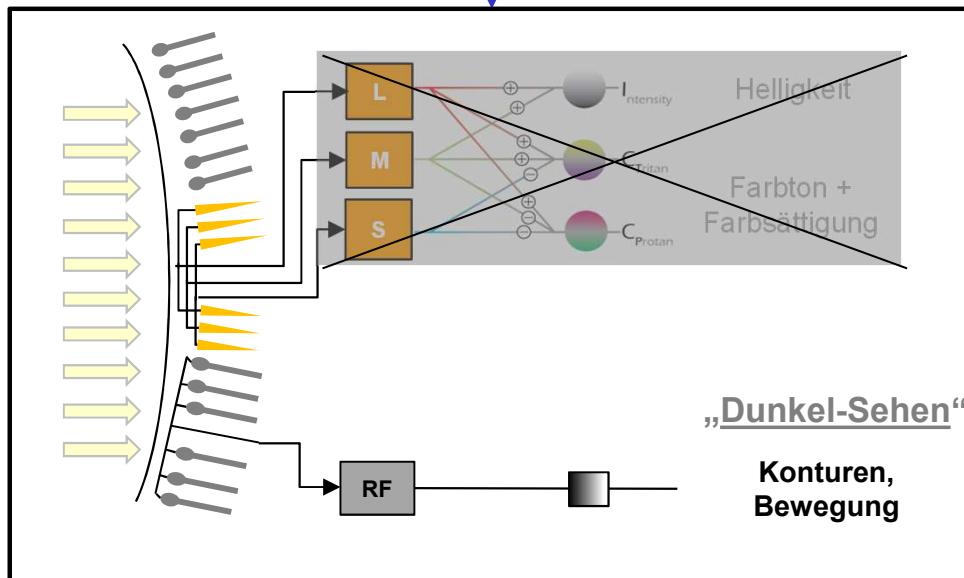
## Große Arbeitsteilung der Rezeptoren (zur Vergrößerung des menschl. Wahrnehmungsbereichs)

- **Zapfen** weisen eine hohe Richtungssensitivität für Licht auf, reagieren langsam auf Lichtintensitätsänderungen, sind allerdings erst an Leuchtdichten  $>1\text{cd}/\text{m}^2$  deutlich reizbar.  
→ Farbiges Hellsehen, „**photopisches Hellsehen**“
- **Stäbchen** sind schon bei niedrigen Lichtleistungen reizbar\*\*, reagieren schnell auf Lichtintensitätsänderungen, übersteuern aber ab Leuchtdichten  $>10\text{cd}/\text{m}^2$ .  
→ Graues Dunkelsehen, „**scotopisches Dunkelsehen**“

\*\*(bei sehr niedrigen Leuchtdichten allerdings erst nach längerer Dunkeladoptionsphase von 10 – 20 min, s. Folie 107)



Übergangsbereich:  $\approx$  bei  $1\text{cd}/\text{m}^2$

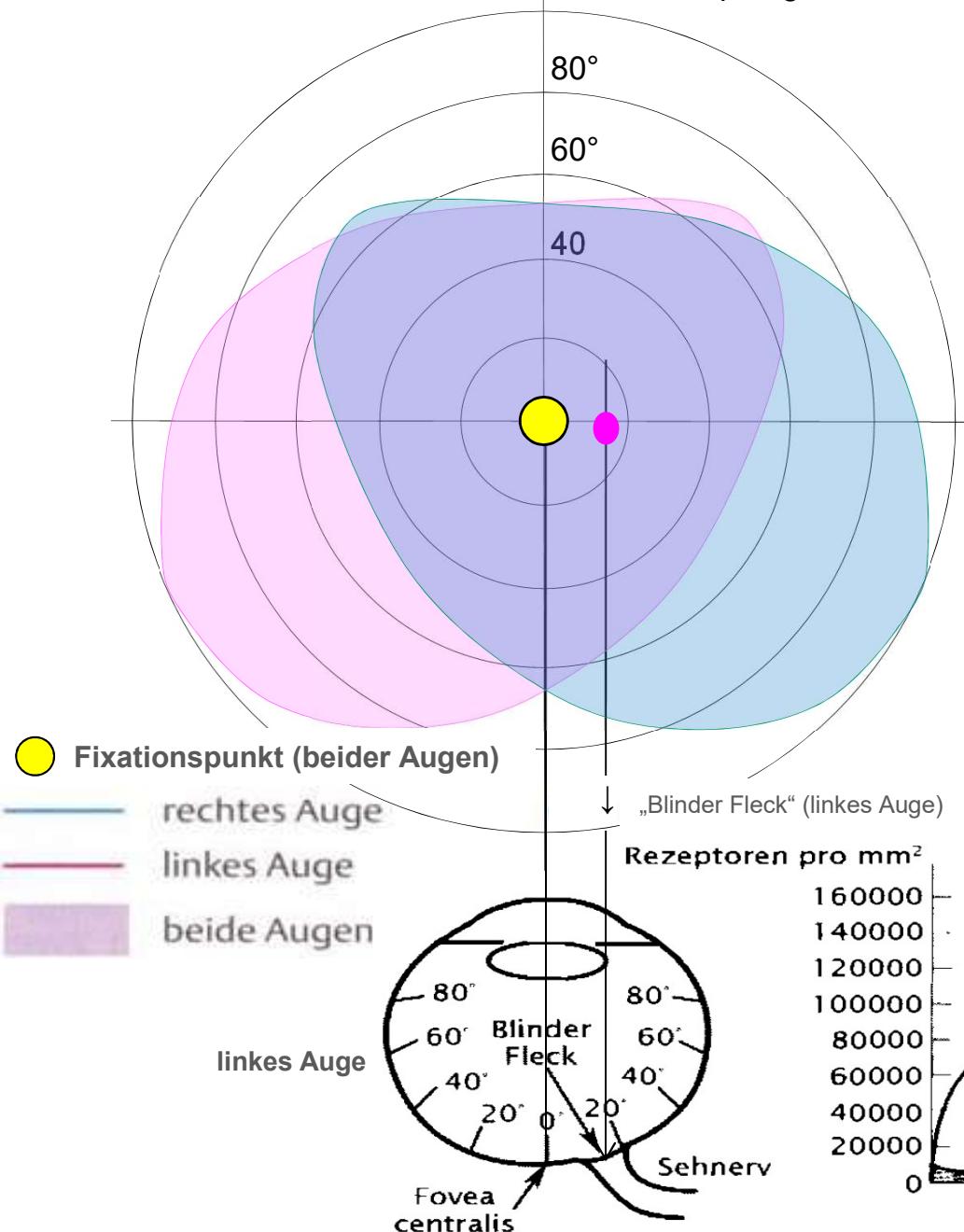


Wichtiger Nebeneffekt:  
Der Mensch kann (im Schärfebereich seiner Augen) Helligkeitswechsel wesentlich genauer wahrnehmen als Farbwechsel (s.a. Folie 106)

Für die Videotechnik ist das **Hellsehen** maßgeblich.  
(leicht davon abweichend: Filmbetrachtung im dunklen Kino)

# Gesichtsfeld des Menschen und Rezeptorverteilung:

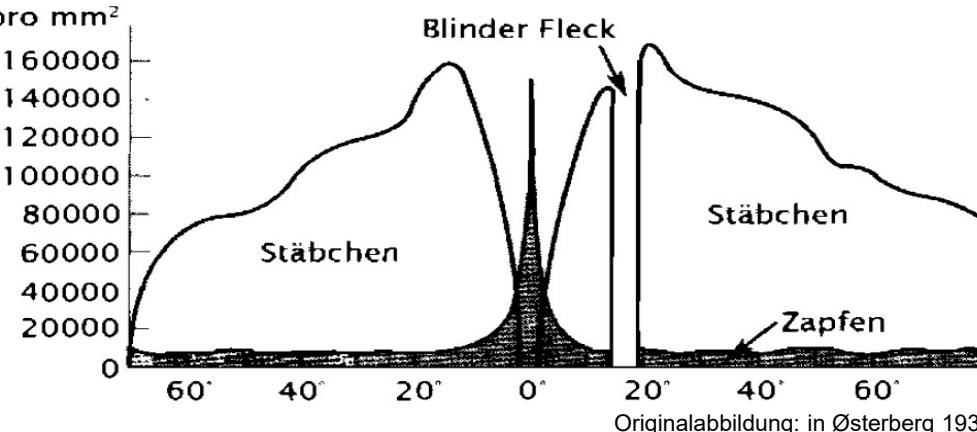
Der gesamte Winkelbereich (von beiden ruhenden Augen, ohne Kopf- oder Körperbewegung), in welchem wir grundsätzlich in der Lage sind visuelle Reize der Umwelt zu empfangen, wird als **statisches/stationäres Gesichtsfeld** bezeichnet.



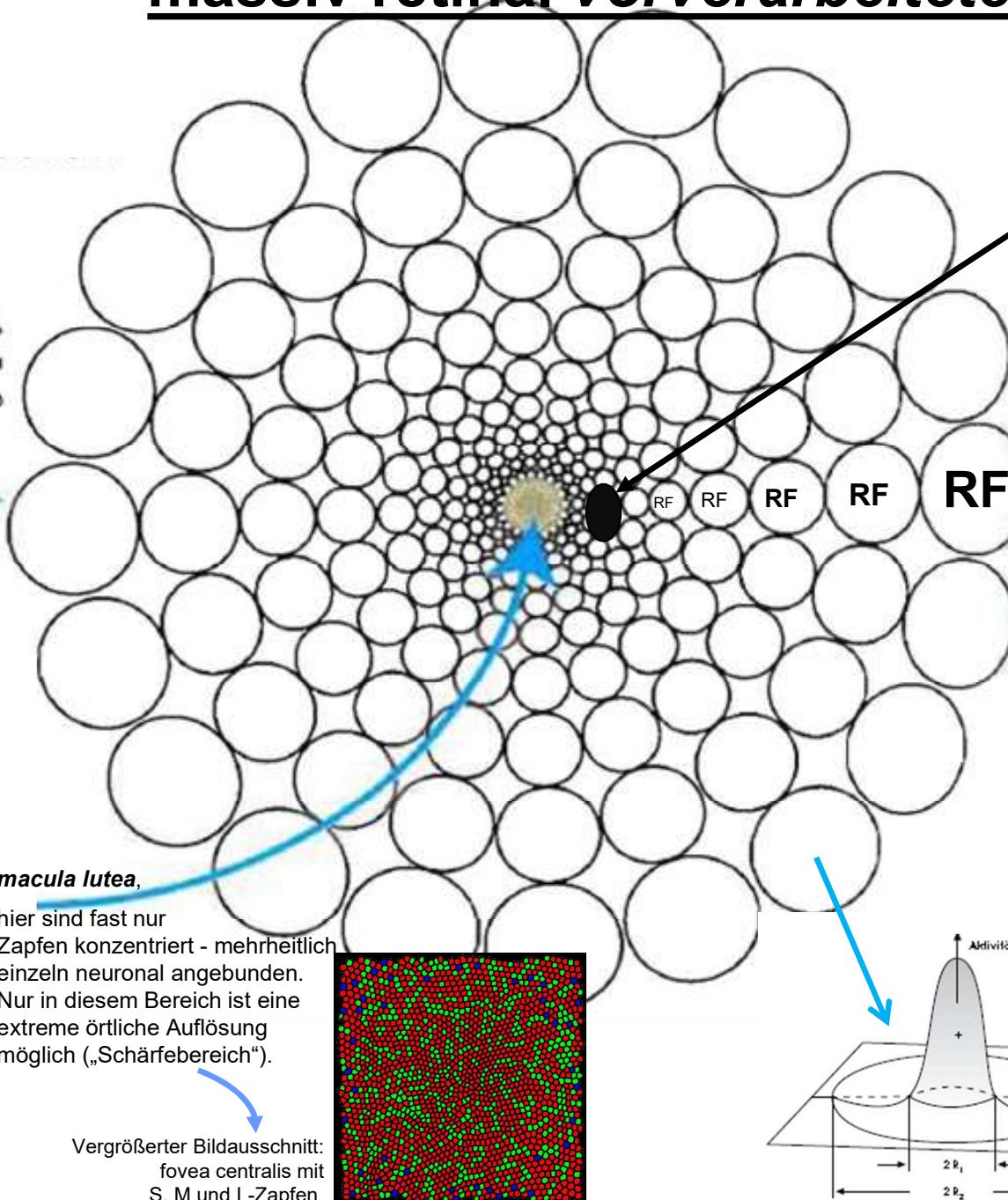
Jedes Auge könnte retinal theoretisch einen Sichtbereich von 180° horizontal und vertikal abdecken. Dem stehen jedoch die Augenhöhle, die Augenlider und die Nase hinderlich gegenüber – es ergibt sich folglich eine ovale Area.

Die Pupille unseres Auges *fokussiert* konstant auf die **macula lutea** (Bereich 0° bis  $\pm 6^\circ$ ). Nur in diesem Bereich besteht - aufgrund der hohen Zapfendichte mit quasi-direkter 1:1 - Anbindung zum visuellen cortex - die Möglichkeit einer hochauflösten Wahrnehmung der Außenwelt. Da an dieser Stelle die Bipolar- und Ganglienzellen zum Blinden Fleck hin schon leicht auf die Seite gedrängt sind, fällt hier das Licht sogar direkt auf die Rezeptoren. Durch diese besonderen Merkmale werden diese  $\pm 6^\circ$  **zum Bereich der schärfsten Sehfähigkeit des Menschen**. Im Zentrum dieses Bereiches liegt die **fovea centralis**.

Die umliegenden optischen Abbildungsbereiche der Pupille sind von den Stäbchen dominiert. Obwohl sie ebenfalls eine hohe Rezeptordichte aufweisen, führt deren massive retinale Zusammenschaltung (→ rezeptive Felder, s. nächste Folie) zu einem verringerten räumlichen Auflösungsvermögen, allerdings gepaart mit einer gesteigerten Wahrnehmung für Kanten und Flächen plus (zum Rand hin) beachtlichen zeitlichen Auflösungsvermögen (→ Bewegungswahrnehmung & Fluchtreflex).



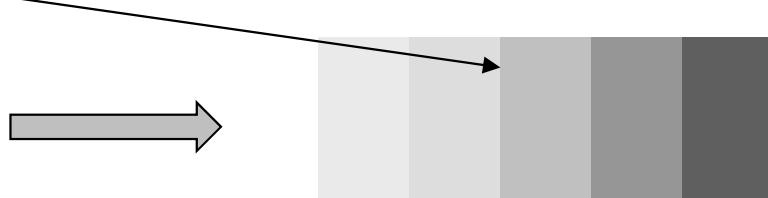
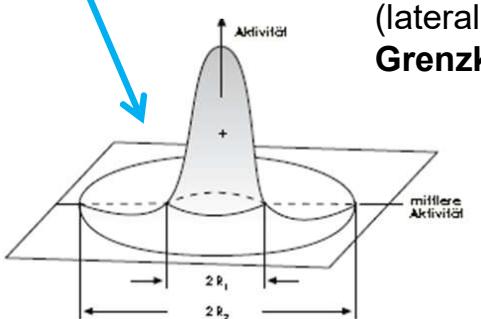
# Jenseits des Schärfebereiches erreichen das Gehirn nur massiv retinal vorverarbeitete Ergebnisse → Rezeptive Felder



Da es in der Retina mehr als **126 Millionen Rezeptoren**, aber nur ca. **eine Million Ganglien** gibt, ist die neuronale Anbindung der Rezeptoren an das Gehirn – mit zunehmenden Abstand vom *Blinden Fleck* - von einer hohen Konvergenz geprägt. D.h. mit zunehmenden Abstand von der Augenmitte ist ein Ganglion für immer mehr Stäbchen zuständig, welche es zu einem sog. **Rezeptiven Feld (RF)** zusammenfasst (s. Folie 83, Bipolar- & Amakrinzellen).

Rezeptive Felder bestehen also im Wesentlichen aus immer mehr zusammengefassten Stäbchen, mit denen eine differentielle Vorverarbeitung des projizierten Lichtes (bezüglich Helligkeits-UNTERSCHIEDEN) vorgenommen wird. Die differentielle Verarbeitung von immer mehr Stäbchen führt auch zu einer **gesteigerten Bewegungswahrnehmungsfähigkeit in den äußeren Bereichen der Retina**.

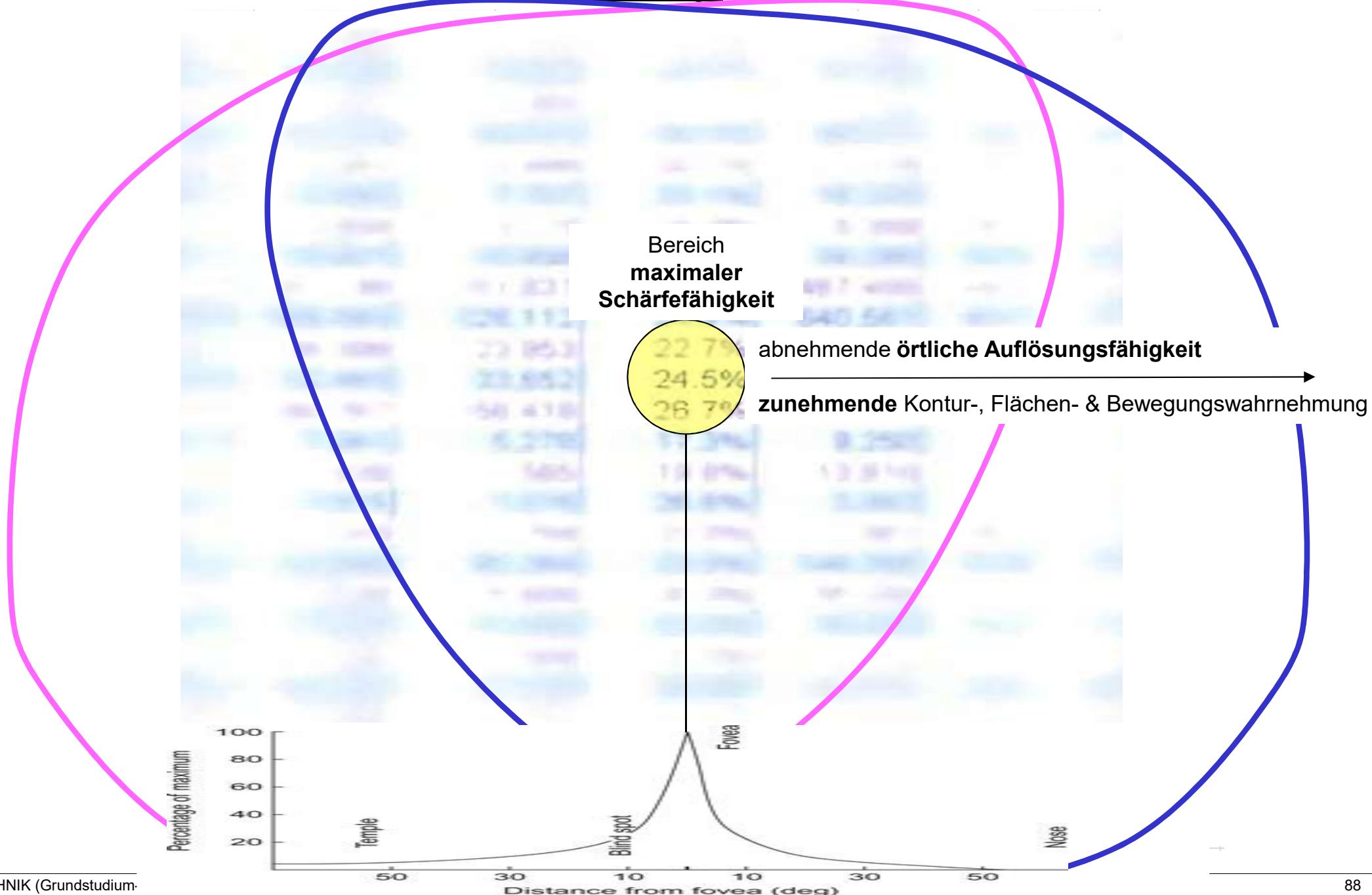
Jedes RF besteht aus einem Zentrum und einer Peripherie und gibt seine Signale an genau eine Ganglienzelle ab. Deren Signale fallen besonders stark aus, wenn entweder das RF-Zentrum Licht empfängt, die Peripherie aber im Dunkeln liegt (On-Zentrum-RF) oder aber das Zentrum dunkel und die Peripherie hell ist (Off-Zentrum-RF). Durch eine geeignete Kombination von On- und Off-Zentrum-RF ist die Netzhaut in der Lage, den Kontrast zwischen hellen und dunklen Objekten deutlich zu verstärken (laterale Inhibition), woraus z.B. **überhöht wahrgenommene Grenzkontraste und Objektkonturen** resultieren („Mach-Effekt“).



# Zusammenfassung:

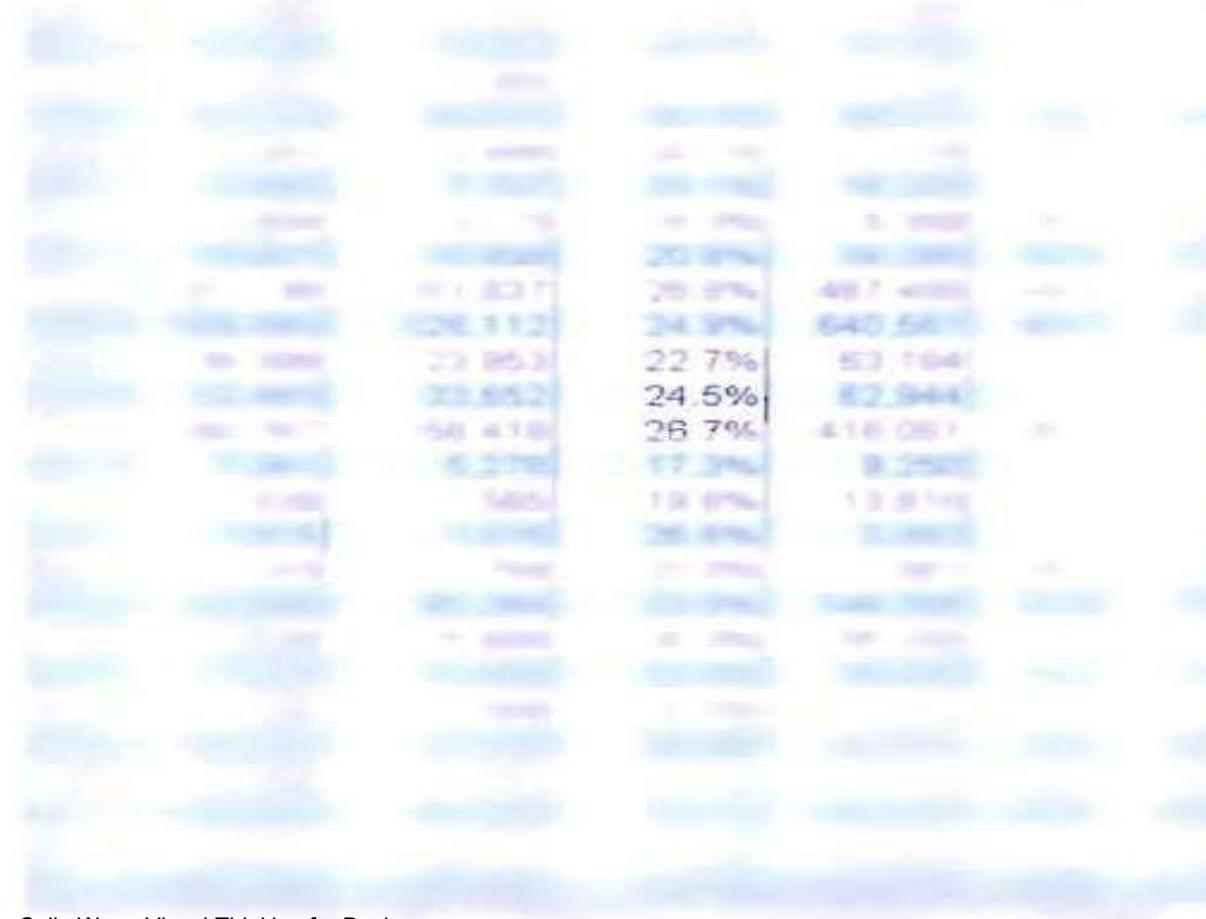
(Druckversion)

Verdeutlichung unserer visuellen Wahrnehmung durch fovea centralis und die umliegenden rezeptiven Felder  
*bei ruhendem Auge („Fixation“)*



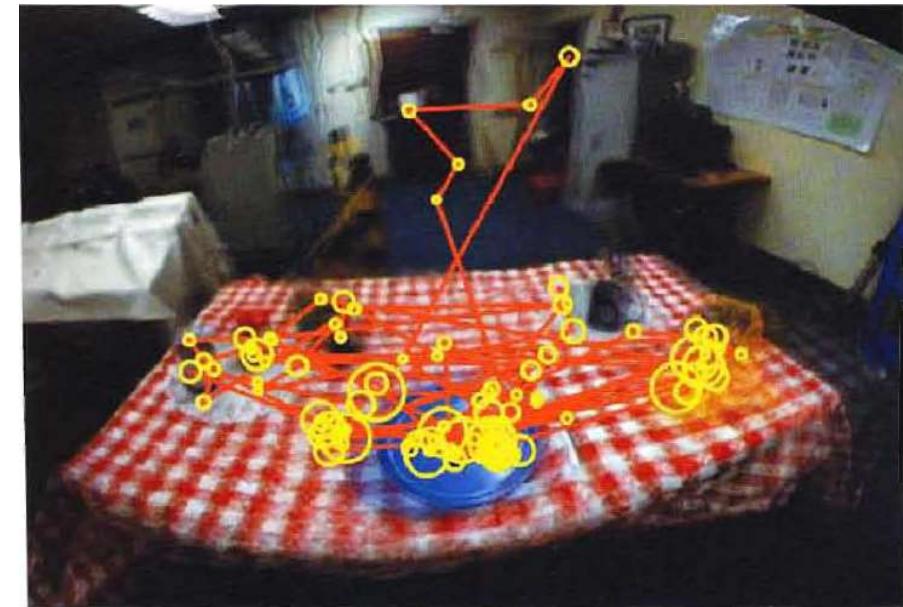
# Der Irrglaube, das Auge würde scharf sehen

Verdeutlichung unserer visuellen Wahrnehmung durch fovea centralis und die umliegenden rezeptiven Felder bei ruhendem Auge (Fixation)  
→ Detailwahrnehmung



Colin Ware, Visual Thinking for Design

Aufzeichnung der Augenbewegungen\* einer Testperson  
→ Gesamtwahrnehmung (rot = Blickpfade, gelbe Kreise = Fixationspunkte)



Colin Ware, Visual Thinking for Design

\* Weicht ein Fixationspunkt über 25° von der Grundstellung der Augen (horizontal nach vorn) ab, so werden die muskulären Augenbewegungen („Saccaden“) in der Regel von Kopfbewegungen begleitet.

Erst durch die *summarische Auswertung* der Fixationspunkte im primären visuellen Cortex ergibt sich im Gehirn die (scheinbar) scharfe **Gesamtwahrnehmung** unserer Umgebung.

# Ohne muskuläre Bewegung kein Wahrnehmen:

Die differentielle Vorverarbeitung – insbesondere in den Rezeptiven Feldern (RF) - bedeutet konkret:

**Nur VERÄNDERUNGEN in den elektrischen Signalen der Rezeptoren führen zur neuronalen Aktivität = Signal an das Gehirn**

Dies bedeutet: die Abbildung auf der Netzhaut muss sich in regelmäßigen Zeitabständen ÄNDERN, sonst „verbleicht“ der Seheindruck („Troxler Effekt“).

## Binokulare Augenbewegungen:

Quellen: Guski, Mallot

Typ:	Definition:	L zu R	Agilitätsdaten:
Saccaden:	<b>Blicksprünge</b> , sowohl willkürlich/aufmerksamkeitsgesteuert (top-down) als auch unwillkürlich/vegetativ (bottom-up) durchgeführt. Für die Dauer einer Saccade ist die neuronale Signalübertragung „abgeschaltet“. Nur Fixationen erzeugen neuronale Aktivität im visuellen Cortex.	gleichsinnig/ konjunkt	abrupt, Sprungweiten: bis zu 100° Sprunggeschwindigkeiten: 20°-600°/sec, Dauer: 10-100ms
Kompensatorische Augenbewegungen:	<b>Gleichsinnige Augenbewegungen bei Kopf- und Körperbewegungen um die Blickrichtung konstant zu halten.</b> Ausgelöst durch Beschleunigungssinn im Innenohr oder als Reaktion auf großflächige visuelle Reize (z.B. Blick aus dem Zugfenster)	gleichsinnig/ konjunkt	stetig, glatt
	<b>Sonderfall:</b> Nystagmus = abrupte Rückstellbewegungen aus länger andauernder Folgebewegungen heraus.	gleichsinnig/ konjunkt	abrupt
Vergenzbewegungen:	<b>Gegensinnige Augenbewegungen zur Vorbereitung einer Fixation</b>	gegensinnig / disjunkt	stetig, glatt Geschwindigkeiten: bis zu 10°/sec
Fixation:	<b>Statische Ausrichtung der Blickachsen auf einen (gemeinsamen) Punkt;</b> nur noch Mikrobewegungen (Drift, Mikrosakkaden,Mikrotremor)	L+R haben gemeinsamen Schnittpunkt	Mikrobewegungen: Augendrift: 4'/sec Mikrosakkaden: Sprungweite: min.2'-max.28', meist: <15'/3s Mikrotremor: Amplitude 0,5' / Frequenz 30-100Hz
Folgebewegungen:	<b>Visuelles Verfolgen von bewegten Objekten.</b> Wird eine komplexe optische Anordnung betrachtet, folgen die Augen hauptsächlich den Konturen und fixieren vor allem jene Teile der Anordnung die bedeutungshaltige Information enthalten. Verfolgte Objekte werden im Bereich von 2° um die Mitte der Hauptblickrichtung gehalten. Folgebewegungen können nicht willkürlich/bewusst durchgeführt werden (dann Wechsel zu Saccaden)	gleichsinnig/ konjunkt	prinzipiell stetig, Geschwindigkeiten: 20°-30°/sec  Bei sehr schnellen [Objekt]Bewegungen werden Saccaden eingeschoben, um das Objekt nicht aus dem Focus zu verlieren. Beträgt die Objektgeschwindigkeit mehr als etwa 80°/sec setzt zusätzlich meist eine Kopfbewegung ein.

# Hausaufgaben\*

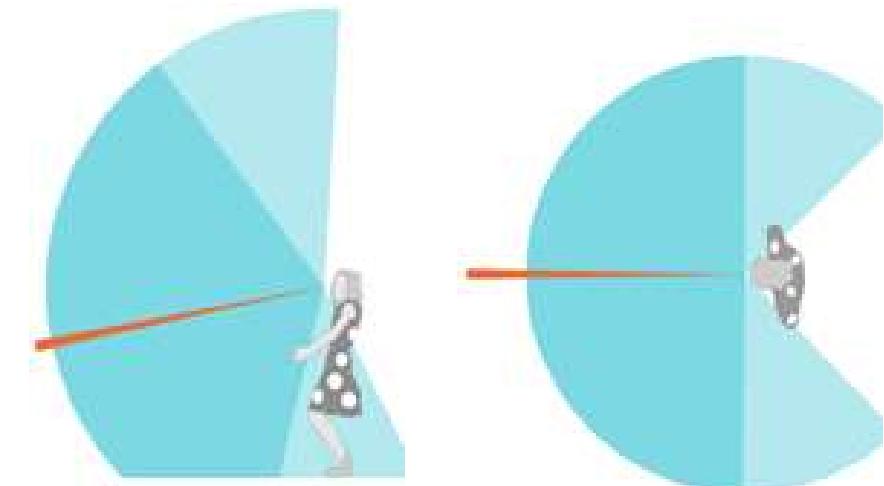
\* (A1 sofort, A2&3 bis Ende der Vorlesungszeit, prüfungsrelevant !)

- 1) Bitte lesen Sie die Artikel „Grundlagen der visuellen Wahrnehmung“ sowie „Visuelle Wahrnehmungsphysiologie des Menschen in Zahlen“**  
(im Dateibereich zu finden als .pdf) **und stellen sie Fragen dazu in der nächsten Vorlesung.**
  
- 2) Bitte lesen Sie die ersten Kapitel des folgenden Buchs** (bei Interesse auch gerne mehr ;>)  
**„Visual Thinking for Design“**  
**von: Colin Ware,**  
**Morgan Kaufmann Publishers / Elsevier**  
**ISBN 978-0-12-370896-0**  
*Diese ersten Kapitel sind ebenfalls im Dateibereich als .pdf zu finden*
  
- 3) Welche Zusammenhänge können Sie zwischen den zurückliegenden Folien und den „Gestaltgesetzen“ aus der Veranstaltung *Grundlagen Gestaltung* erkennen ?**

# Grundlagen der menschlichen Wahrnehmung von Motion-Pictures

## Daumenkino:

Ab wieviel Bilder pro Sekunde beginnt der Mensch scheinbar Bewegung wahrzunehmen?



<https://eph-demenz.de/grundlagen/visuelle-warnehmung/>

## Ein zweite Übung vorweg:

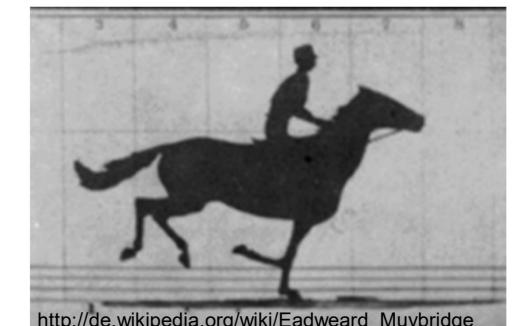
Schauen Sie konsequent geradeaus,  
strecken beide Arme zur Seite aus und wackeln mit den Daumen.

Ab welchem Sichtwinkel können Sie das Winken wahrnehmen?  
Ab welchem Sichtwinkel können Sie erkennen, daß es der Daumen ist?

# Was wir in dieser Runde lernen:

- Warum bezeichnet man Film, Video und Computergrafik als "Motion Pictures"?
- Wie oft muß ich eine neues Bild zeigen, damit ich Bewegungen flüssig wahrnehme?
- Wie oft muß ein Bild leuchten, damit ich kein (Großflächen-)Flimmern mehr wahrnehme?
- Wie schauen Menschen auf Bildschirme? (Gesichtsfeld, Blickfeld und Schärfebereich)
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen Displaygröße, Pixelanzahl und optimalem Betrachtungsabstand?
- Was ist das feinste Bildelement, das Menschen überhaupt noch wahrnehmen können?
- Nimmt der Mensch örtl. Farbigkeitsunterschiede genauso fein wahr wie Helligkeitsunterschiede? (die 3 Faustregeln bez. Videowahrnehmung).
- Was ist die hellste Helligkeit und dunkelste Dunkelheit, die Menschen (in Bildern) wahrnehmen können ...?
- .. und welche biologischen "Tricks" sind dabei zu berücksichtigen?

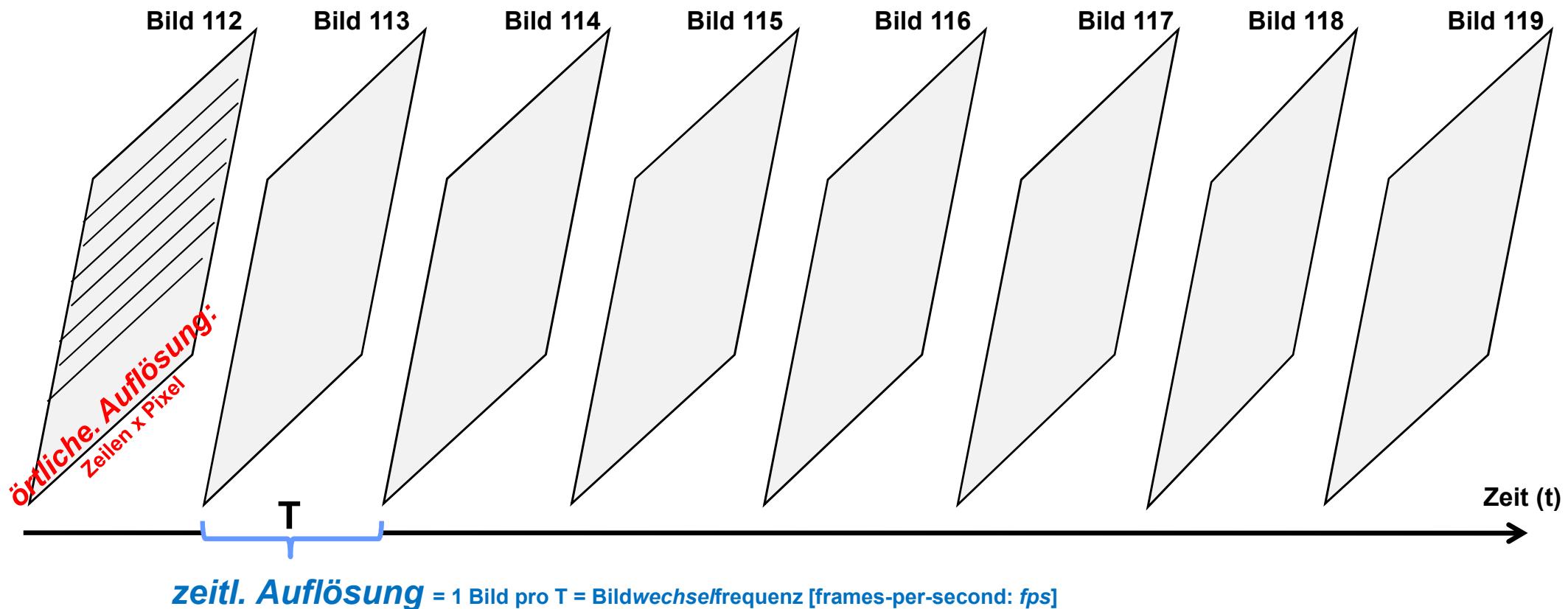
# Motion-Pictures:



Video/Film/Computeranimation sind ...

[http://de.wikipedia.org/wiki/Eadweard\\_Muybridge](http://de.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge)

... eine Abfolge von einzelnen, definiert-großen (Leucht-)Bildern in einem festgelegten zeitlichen Abstand,



... mit der Bewegungsphasen als („eingefrorene“) Einzelbilder aufgenommen werden können, und

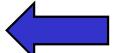
... bei deren Betrachtung der Mensch eine Bewegung von Objekten und Szenen wahrzunehmen GLAUBT!

# Bewegungsverschmelzung vs. Großflächenflimmern

Wie reagiert die menschliche Sehwahrnehmung auf das „Leuchtfeuer“ der motion-pictures ?

## Am Rand des *Gesichtsfeldes*\*:

Die differentielle Verarbeitung von immer mehr (zusammengefassten) Stäbchen durch die Rezeptiven Felder führt in den äußeren Bereichen der Retina zu einer extremen **Sensitivität für Helligkeits-Änderungen**.



## Im Zentrum des *Blickfeldes*\*: (→ Augenfolgebewegung)

Örtlich eingeschränkte (= fixierbare/verfolgbare) Lichtimpulse verschmelzen neuronal schon ab Wechselselfrequenzen zwischen 15 und 25 Hz zu einer kontinuierlichen Bewegungswahrnehmung („Scheinbewegung“).

→ **Bewegungsverschmelzungsfrequenz**,

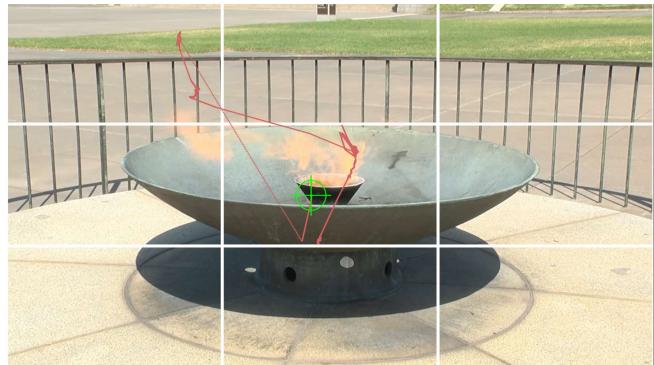
... sofern uns die Bewegungsphasen logisch/vorausschaubar/ erfahrungsgemäß erscheinen (sonst höher).

... der Effekt ist stark abhängig von der Helligkeit bzw. dem Kontrastumfang der einzelnen Bilder. Mit zunehmender Leuchtdichte des Bildschirms nimmt die Wahrnehmung von Ruckeln wieder deutlich zu! (weswegen z.B. in Computergames, Apps, etc. > 60fps empfohlen werden)

- In den äußeren Rändern des Gesichtsfeldes Bildes (z.B. bei größerem Bildschirm/Leinwand oder geringem Betrachtungsabstand) wird bei Bildwechselselfrequenzen  $\geq 25\text{B/s}$  ein deutliches **Großflächen-Flimmern** (engl. „flicker“) wahrgenommen.
- Die erzielbare → **Flimmerverschmelzungsfrequenz** (engl. critical flicker fusion frequency/CFF) ist stark vom Umgebungslicht abhängig. In extrem dunklen Umgebungen liegt sie bei nur 10 und 25 Lichtreizen pro Sekunde (also nahe an der Bewegungsverschmelzungsfrequenz); im photopischen Bereich steigt die CFF mit dem Logarithmus der Lichtintensität (Ferry-Porter-Gesetz) und abhängig von der Flächenverteilung der Lichtintensität (Granit-Harper-Gesetz) auf 80–90 Hz an. Oberhalb von 100 Lichtreizen pro Sekunde tritt an den Rändern des Gesichtsfelds kein menschlich-wahrnehmbares Flimmern mehr auf.

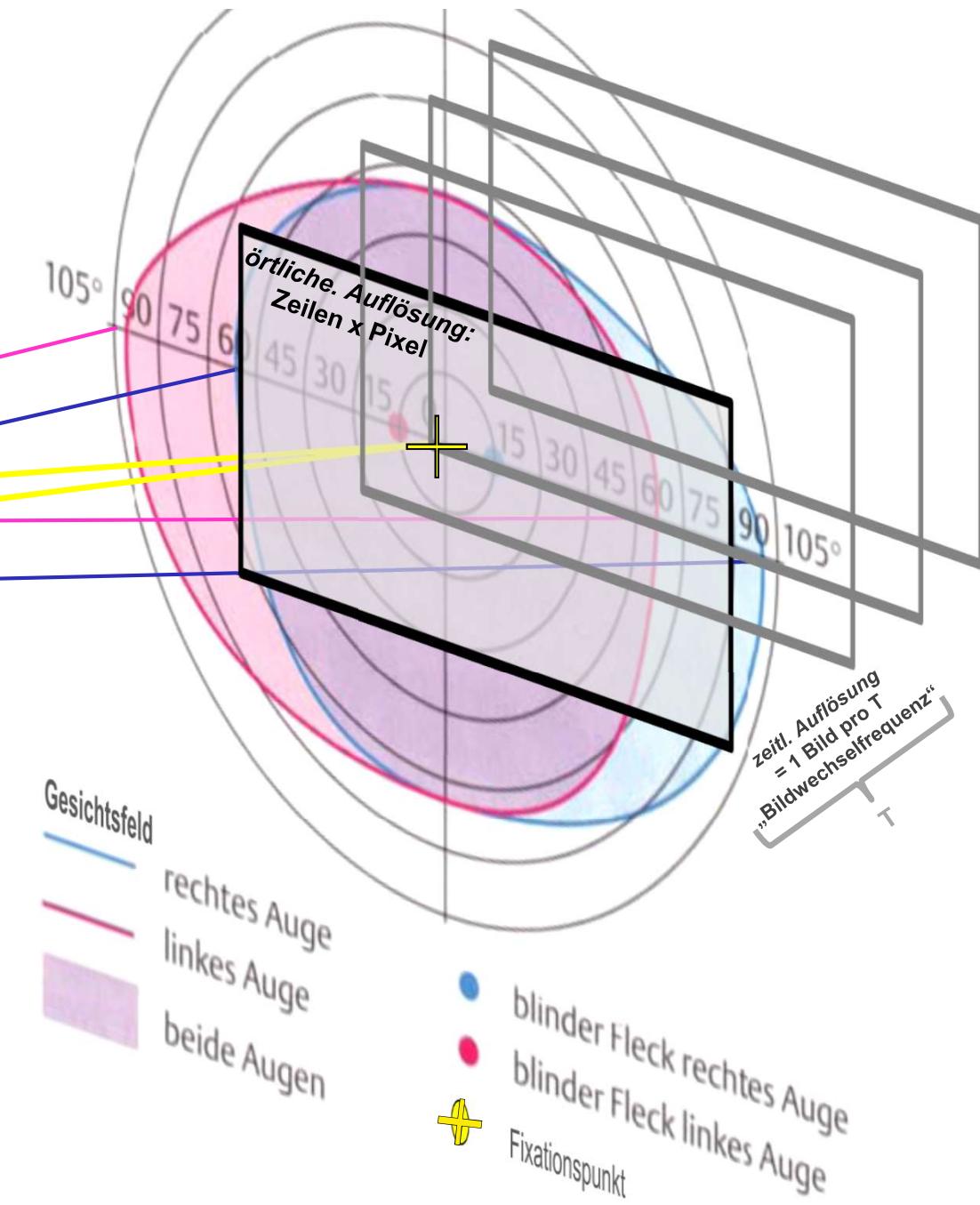
Diskutieren Sie diese Erkenntnisse an den Benutzungsfällen Kino, Fernseher (Wohnzimmer), VR-Headset, Smartphone!

# Ein Modell für die Betrachtung leuchtender Bilder:



**Augenbewegungen**  
**= aufmerksamkeitsgesteuerte „Wanderung“**  
**von Fixationspunkten** (und damit des gesamten Gesichtsfelds)  
**über das Bild.**

**Diskussion:**  
**Welchen Einfluss hat also der**  
**Betrachtungsabstand**  
**auf die Bilderfassung?** (s.a Folien 99ff)



# Gesichtsfeld, Blickfeld und Schärfebereich des Menschen:

Es muss bei der **Betrachtung von Leuchtbildern** grundlegend zwischen dem **Gesichtsfeld**, dem **stationären Blickfeld** und dem **Bereich maximaler Schärfewahrnehmung während einer Fixation** unterschieden werden: (s.a. Folie 85 & 88)

- Binokulares, statisches **Gesichtsfeld**  
bezeichnet den gesamten Winkelbereich, aus welchem (mit ruhenden Augen, ohne Kopf- oder Körperbewegung) prinzipiell visuelle Reize der Umwelt empfangen werden können.

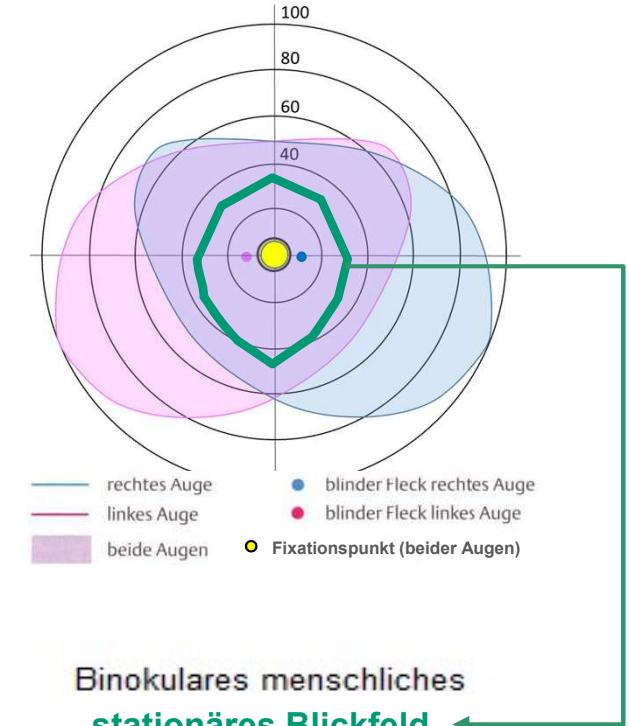
- Binokulares, stationäres **Blickfeld** „effective field“ meint –
  - einerseits diejenigen Umweltbereiche, welche mit den beweglichen Augen (*ohne Kopf- und Körperbewegungen\**) noch scharf *fixierbar* sind.
  - andererseits können während einer Fixation auf einen Punkt zusätzlich alle im Blickfeld liegenden *Strukturen* sehr gut und schnell wahrgenommen werden.

\*Achtung:

spontane Kopf und Körperbewegungen setzen im realen Leben meist schon bei Interesse für Bereiche ab ca.  $\pm 20^\circ$  -  $25^\circ$  ein.

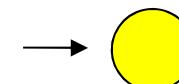
- Während *einer* Fixation im Blickfeld ergibt sich im Bereich  $\pm 6^\circ$  um die fovea centralis herum die **maximale (örtliche) Auflösungsmöglichkeit** des Menschen (siehe Folie 85/86).

Anmerkung: ob der Mensch dann dort etwas „scharf“ *erkennen* kann hängt mehrheitlich vom Kontrasthub des Bildes/Motivs an dieser Stelle ab (→Folie 116ff).

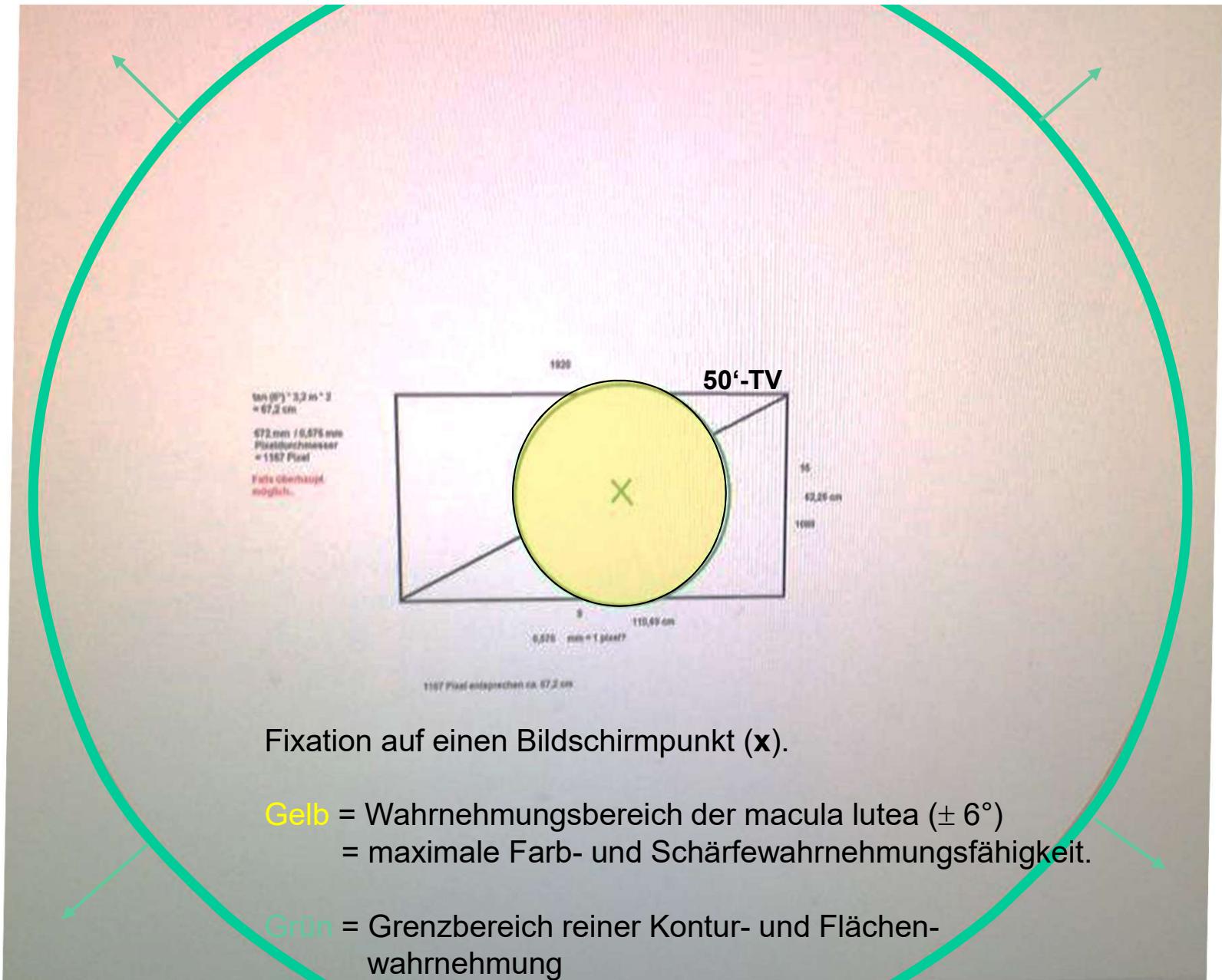


	horizontal	vertikal
optimal	$\pm 9^\circ$ – $\pm 10^\circ$	$+25^\circ$ , $-35^\circ$
maximal	$\pm 30^\circ$	$+30^\circ$ , $-45^\circ$

(Vertikal positiv ist oben, negativ unten.)

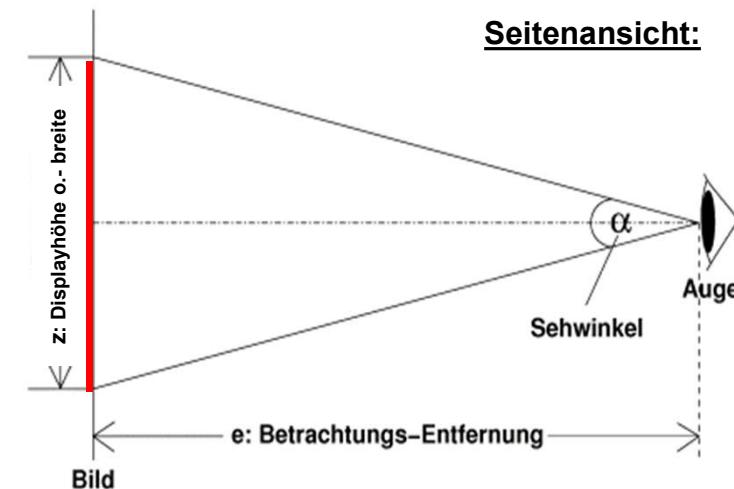
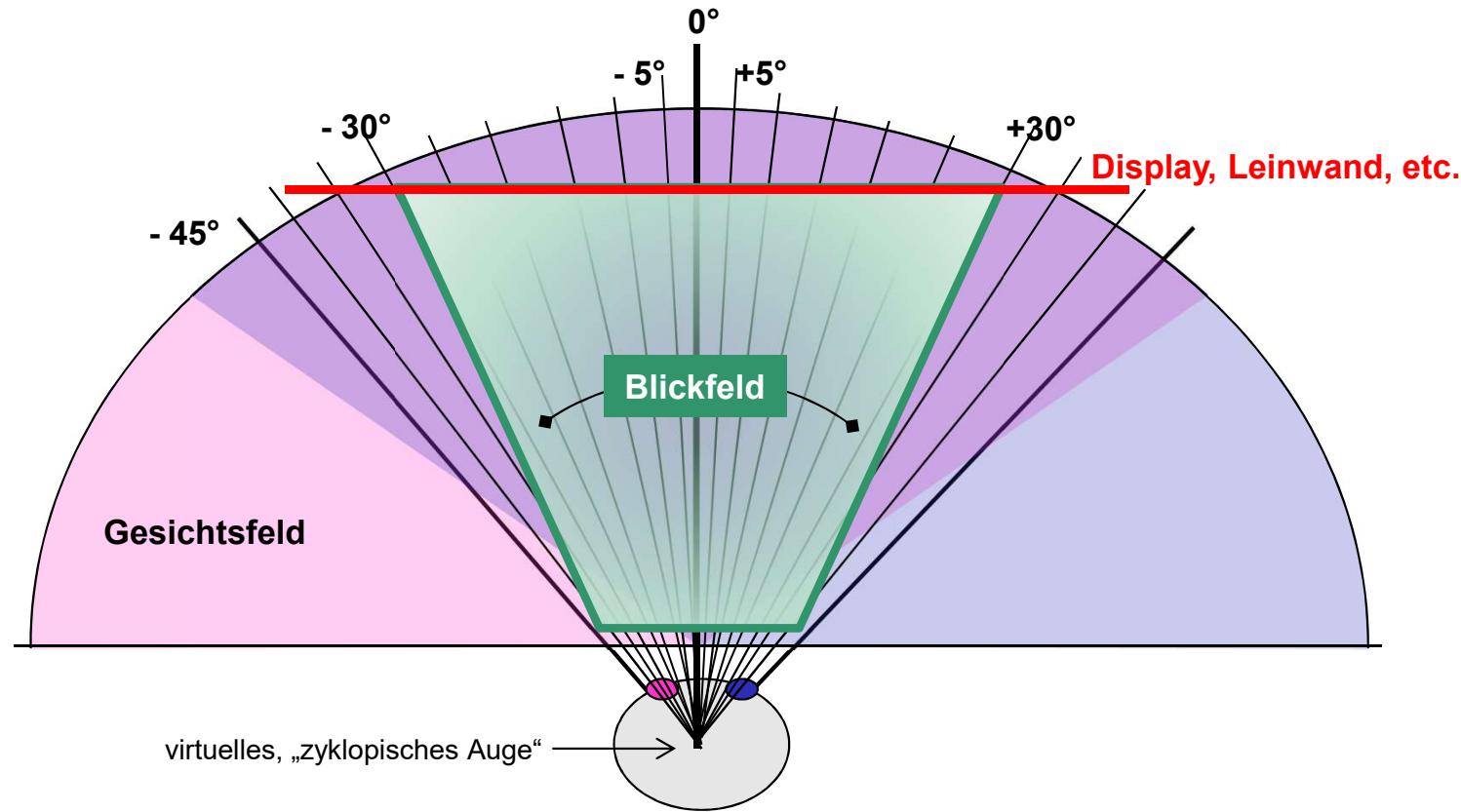


# Zuschauer im Sitzabstand 3,2m vor 50-Zoll HD-Fernseher



# Erläuterung: Winkelangaben, Geschwindigkeitsangaben und cpd

- Gesichtsfeld/Blickfeld-Angaben, z.B. Position von Objekten: → grad [°]
- Feinunterteilung:  $1^\circ = 60 \text{ Winkelminuten } [60'] = 3600 \text{ Winkelsekunden } [3600"]$
- Geschwindigkeitsangaben für beobachtete Objekte: → grad/sek. [°/s] im Blickfeld/Gesichtsfeld
- Kanten-/Objektwahrnehmung: → Hell/Dunkel-Wechsel pro Grad Blickfeld [cycles per degree/cpd] (s.a. Folien 105/106)



$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{z}{2e} \Rightarrow \frac{\alpha}{2} = \arctan \left( \frac{z}{2e} \right)$$

typ. Praxisfall1: Displayhöhe/-breite und Betrachtungsabstand sind vorgegeben, dann ist ausgefüllter Bereich im Gesichtsfeld ⇒  $\alpha = 2 \arctan \left( \frac{z}{2e} \right)$

typ. Praxisfall2: erwünschtes Blickfeld und Betrachtungsabstand sind vorgegeben, dann ist optimale Displayhöhe/-breite ⇒  $z = 2e * [\tan(\alpha/2)]$

typ. Praxisfall3: optimales Blickfeld und Displayhöhe/-breite sind vorgegeben, dann ist einzunehmender Betrachtungsabstand ⇒  $e = z / [2 \tan(\alpha/2)]$

## Für die Betrachtung von Motion-Pictures gilt:

### Regel1: (ergonomisches Blickfeld)

Für TV und Kino gibt es (zyklopisch) **vorgegebene *Blickfelder***, in denen eine optimale Bildqualität gewährleistet sein muss:

- **TV:** **Horizontaler Blickwinkel bis 12°** (bei 4:3-Bildschirmen), **bis 31°** (für 16:9-HD-Bildschirme) oder **bis 58°** (für 4k-Bildschirme), nach ITU-R BT.2022
- **Kino:** **Horizontaler Blickwinkel zwischen 24°** (letzte Reihe) **und 94°** (erste Reihe) **bei einem Bildseitenverhältnis von 2,35:1** (DIN 15584-1)

### Regel2: (Minimale Betrachtungsnähe, „Designed Viewing Distance“)

**Der minimale Betrachtungsabstand darf nur so nah sein, dass bei Fixation nicht plötzlich die Pixelstruktur erkannt wird! (60cpd-Grenze)**

Faustformeln:

- In Kinos (2k/4k) nicht näher als 0,5 Leinwandhöhe (gilt nicht für IMAX\*)
- Bei UHD-Monitoren (3480x2160, 16:9) nicht näher als 1,5 Bildschirmhöhen
- Bei HD-Monitoren (1920x1080, 16:9) nicht näher als 3 Bildschirmhöhen
- Bei SD-Monitoren (720 x 576, 4:3) nicht näher als 6 Bildschirmhöhen

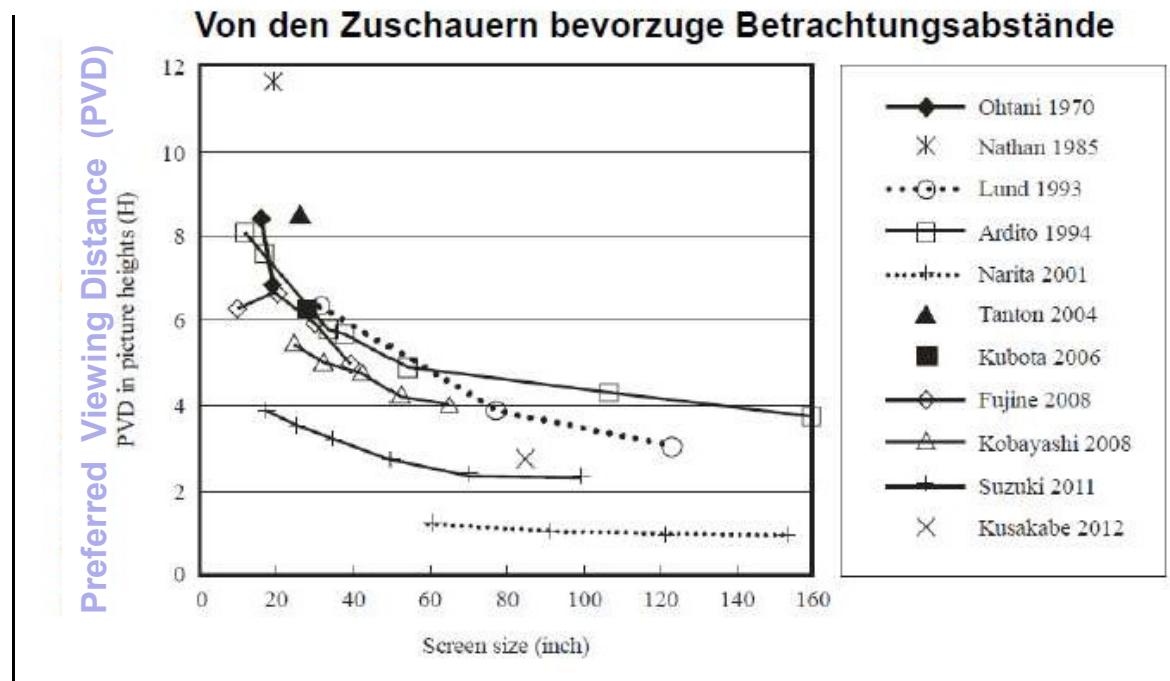
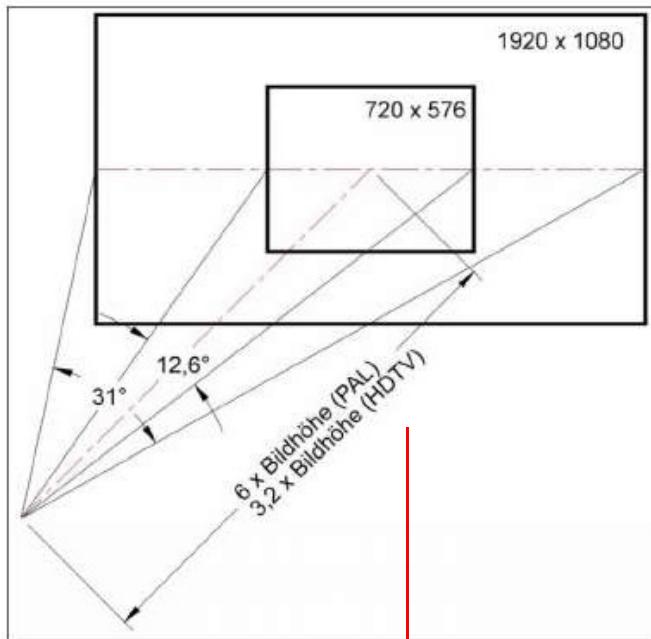
\* Im IMAX-Kino ist die letzte Reihe selten viel weiter als eine Bildwandhöhe von der Bildwand entfernt; dies geht nur, da beim IMAX-Material eine sehr hohe räumliche Auflösung der Bilder vorliegt.

**Oberhalb dieser Entfernungsgrenzen wirken alle Bilder scharf** (deshalb muss in der Videoproduktion eine Bildkontrolle immer nahe des minimalen Abstands erfolgen, um Schärfefehler, etc. optimal identifizieren zu können. Anm.: In Heim-Umgebungen werden oft spontan deutlich größere Abstände eingenommen, s.a. nächste Folie: „Designed Viewing Distance“ vs. „Preferred Viewing Distance“).

### Regel3: (visuelle Immersion)

Erzwingt der eingenommene Abstand zum Bild, dass zur Gesamtbetrachtung die Augenposition deutlich über 25° von der Grundstellung der Augen (horizontal nach vorn) wandern muss, so werden die Augenbewegungen in der Regel von Kopfbewegungen begleitet. In diesem Falle fühlt sich der Betrachter schneller in das Bild „eingebettet“ (visuelle Immersion).

# Praxisbeispiel: TV-Betrachtungsabstände gem. dem Standard ITU-R.BT2022



## Designed Viewing Distance (DVD)

Image system	Reference	Aspect ratio	Pixel aspect ratio	Optimal „Design Viewing Distance“ (60cpd-Limit)	resultant horizontal viewing angle
720 × 483	Rec. ITU-R BT.601	4:3	0.89	7 H	11°
640 × 480	VGA	4:3	1	7 H	11°
720 × 576	Rec. ITU-R BT.601	4:3	1.07	6 H	13°
1 024 × 768	XGA	4:3	1	4.5 H	17°
1 280 × 720	Rec. ITU-R BT.1543 Rec. ITU-R BT.1847	16:9	1	4.8 H	21°
1 400 × 1 050	SXGA+	4:3	1	3.3 H	23°
1 920 × 1 080	Rec. ITU-R BT.709	16:9	1	3.2 H	31°
3 840 × 2 160	Rec. ITU-R BT.1769	16:9	1	1.6 H	58°
7 680 × 4 320	Rec. ITU-R BT.1769	16:9	1	0.8 H	96°

# Praxisbeispiel: Machen 65Zoll-große 8k-TVs im Wohnzimmer Sinn?

## Designed Viewing Distance (DVD)

Image system	Reference	Aspect ratio	Pixel aspect ratio	resultant horizontal viewing angle	Optimal „Design Viewing Distance“ (60cpd-Limit)
7 680 × 4 320	Rec. ITU-R BT.1769	16:9	1	96°	0.8 H



Samsung 65Q800T 65 Zoll Fernseher (8K Ultra HD Q HDR 2000)

2.800,00€

15,00 € Versand

**H = ? cm      Berechnen Sie H über das Bildseitenverhältnis 16:9 und die Diagonale!**

**Optimal DVD = 0,8 x H cm = ... cm !!!**

# Aufgaben zum Nachdenken und Nachrechnen:

1. In vielen Elektronik-Märkten wird bezüglich des optimalen Aufbaus eines 16:9 HD-Fernsehers folgende Behauptung aufgestellt:

„Um einen optimalen Betrachtungsabstand zu erzielen, sollten Sie *mindestens* viermal so weit entfernt sitzen, wie Ihr Fernseher diagonal groß ist.

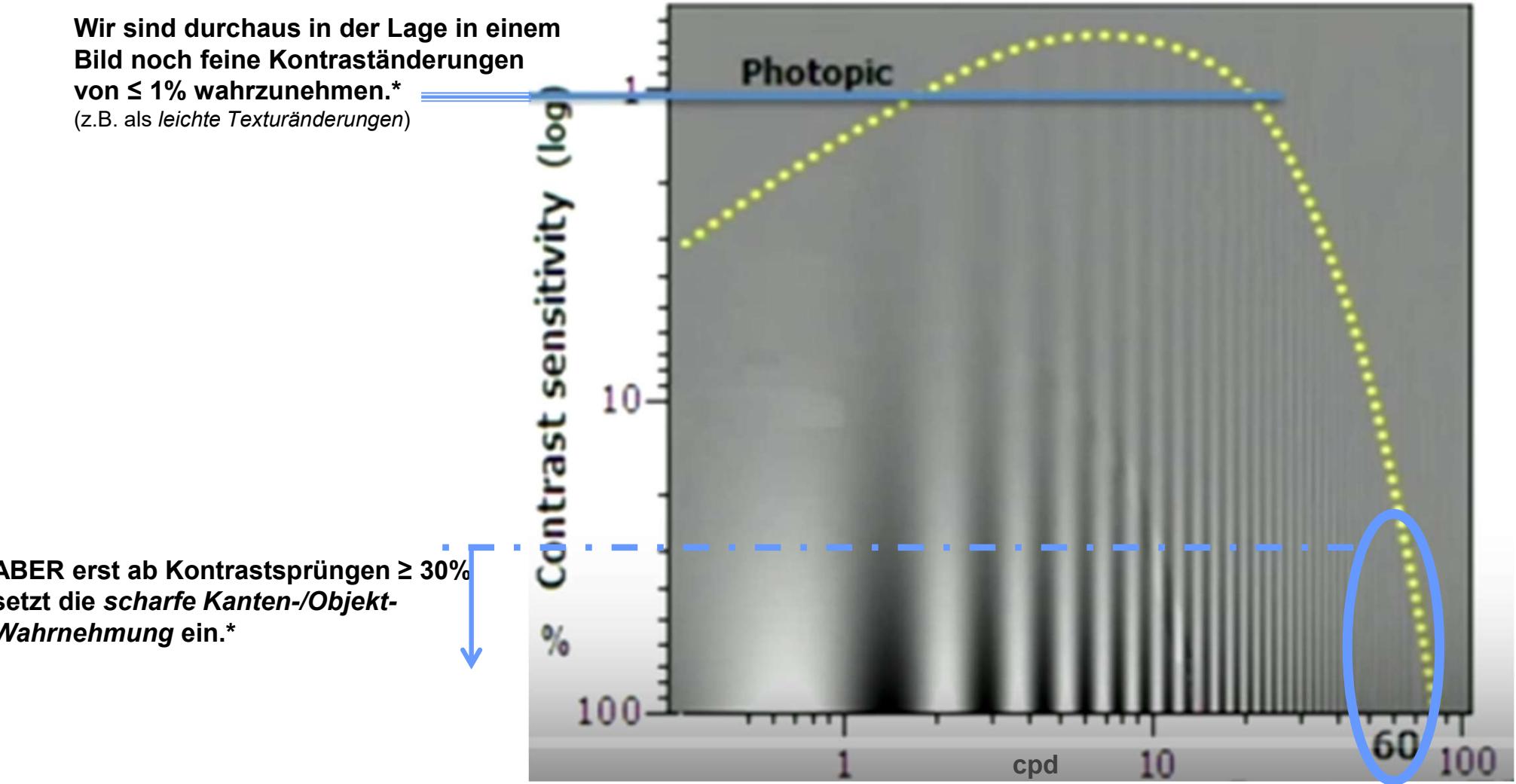
Bei einer Diagonale von 40 Zoll ( $\approx 102\text{cm}$ ) bedeutet das einen Mindestabstand von etwa 4m“.

Stimmt diese Faustregel ?

Berechnen Sie, ob - gem. dieser Aussage - Regel1 und Regel2 der vorherigen Seite eingehalten werden.

2. Ein HD-Fernseher besitzt 1920 x 1080 Pixel. Diese sollen im Idealfall das komplette horizontale **Blickfeld** des Betrachters anregen. Könnte der Betrachter dann bei Fixationen einzelne Pixel erkennen?  
(nachdenken und nachrechnen!)
3. Zwei **visuelle Argumente** werden von den Verfechtern von extremen Breitbildern (z.B. Cinemascope) als Verbesserung gegenüber dem 4:3-Bildseitenverhältnis genannt. Welche könnten das sein?

# Wichtige „Eckpfeiler“ der menschlichen Kontrastwahrnehmung:



Auflösungsgrenze der menschl.  
Objekt-/Kanten-wahrnehmung  
(bei optimalen Kontrastverhältnissen):  
 $60 \text{ cpd} \approx \text{Objektgröße von}$   
 $1 \text{ Winkelminute im Blickfeld}$

\* Werte gelten für Grundhelligkeiten („Adoptionsleuchtdichten“)  $\geq 100 \text{ cd/m}^2$  und Adoptionszeiten  $\geq 1 \text{ min}$ .

# Grenzen der menschl. Fähigkeit zur Detailerkennung:

(im Schärfebereich)

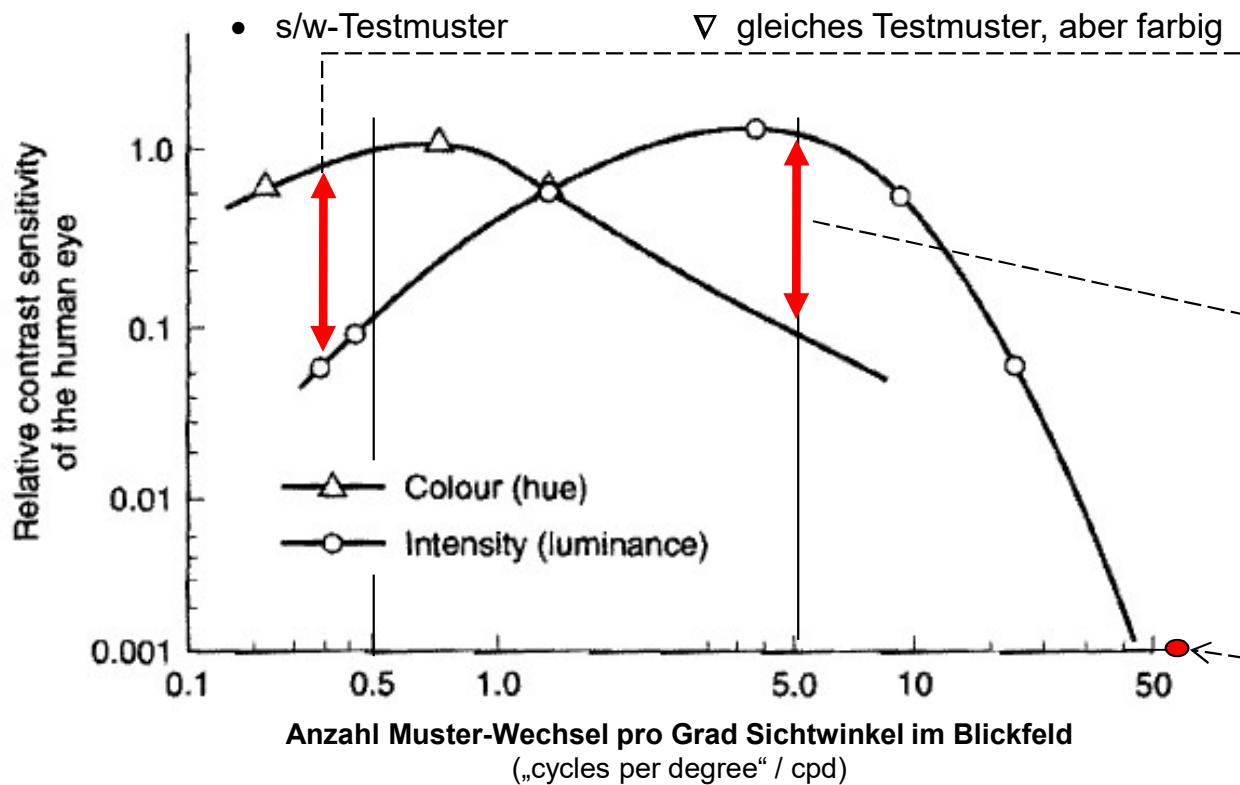


Unsere **Schärfewahrnehmung** ist offenbar stärker von der Hell-zu-Dunkel-Wahrnehmung geprägt\* als durch **Farbunterschiede** (welche eher als Flächenkontraste wirken).

\* s.a. Folie 118ff

## Auflösungsfähigkeit des Menschen („contrast sensitivity function“)

[für Grundhelligkeiten ab  $100 \text{ cd/m}^2$  und Adoptionszeiten > 1min].



### Video-Faustregel 1:

„Grobstrukturen=Flächenkontraste“ ( $0,1\text{-}0,5 \text{ cpd}$ ) können vom Menschen *in Farbe* zehnmal sensibler wahrgenommen werden als Grauflächen“

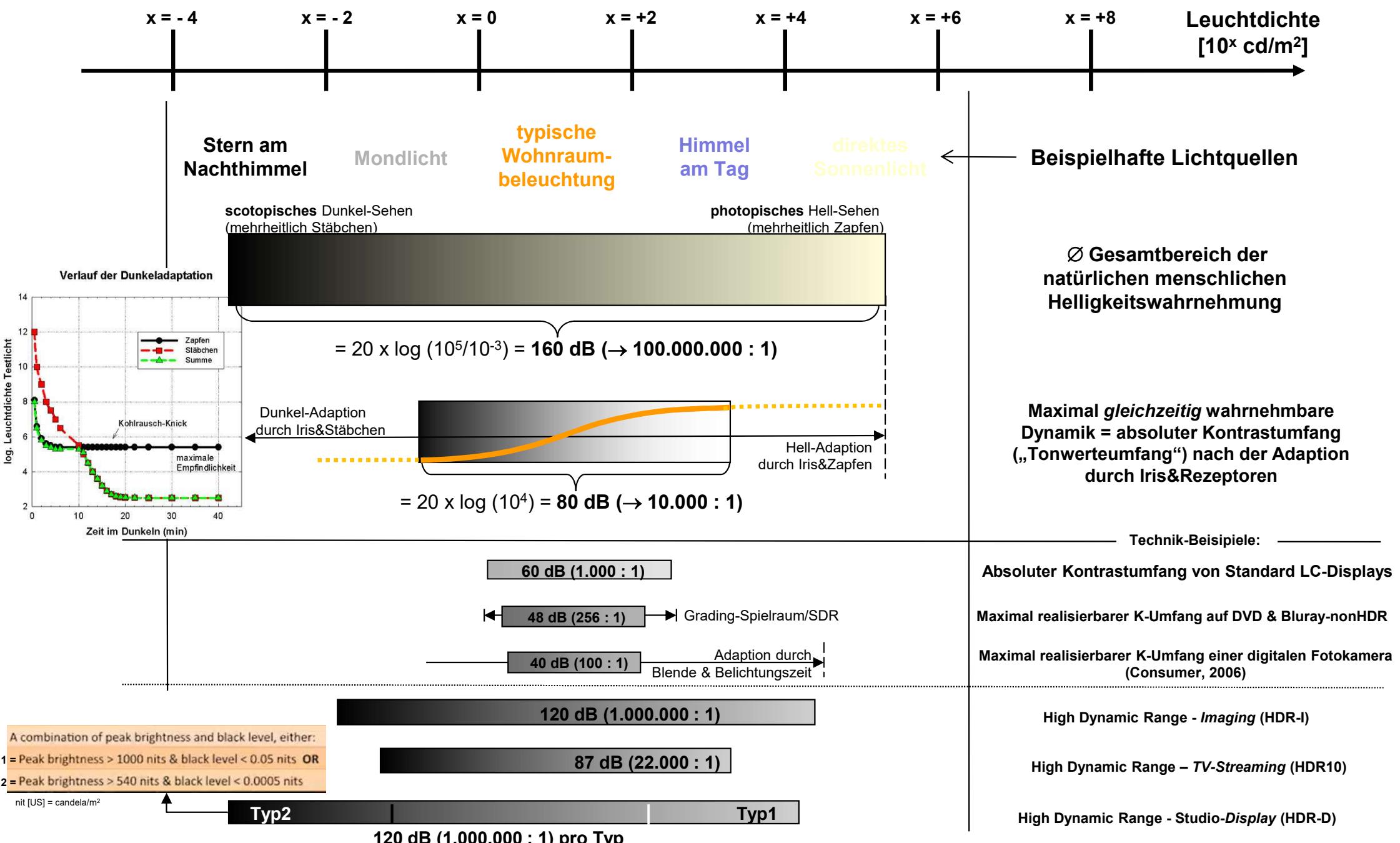
### Video-Faustregel 2:

„Feine Helligkeitsunterschiede=Details“ ( $5\text{-}10 \text{ cpd}$ ) können vom Menschen örtlich zehnmal sensibler wahrgenommen werden als Farbunterschiede!“

### Video-Faustregel 3:

Auflösungsgrenze der menschl. Objekt-/Kantenwahrnehmung (bei optimalen Kontrastverhältnissen):  $60 \text{ cpd} \approx \text{Objektgröße von 1 Winkelminute im Blickfeld}$

# Dynamikbereich des menschlichen Sehapparats bez. Helligkeit:



# Absolut wahrnehmbarer Kontrastumfang des Menschen nach Adaption durch Iris & Rezeptoren:

Die Kontrastwahrnehmung des Menschen startet grundsätzlich auf dem von Iris und Rezeptoren adaptierten *mittleren Niveau* der Betrachtungssituation. („Umgebungsleuchtdichte“ oder „Bezugslichtart“ genannt)

Ausgehend von diesem Bezugspunkt ergibt sich die Empfindung **Kontrast** als Wahrnehmung von „dunkler als Bezugspunkt“ und „heller als Bezugspunkt“)

Bsp. **orangene Kurve** Adaption auf  $10^2 = 100 \text{ cd/m}^2$  Umgebungsleuchtdichte

→ Die Kontrastwahrnehmung um den Bezugspunkt herum ist *nicht linear* sondern **eine Potenzfunktion!**

Mathematisch approximiert werden kann dieser Verlauf für alle  $L/L_w > 0,008856$  durch folgende Gleichung\*:

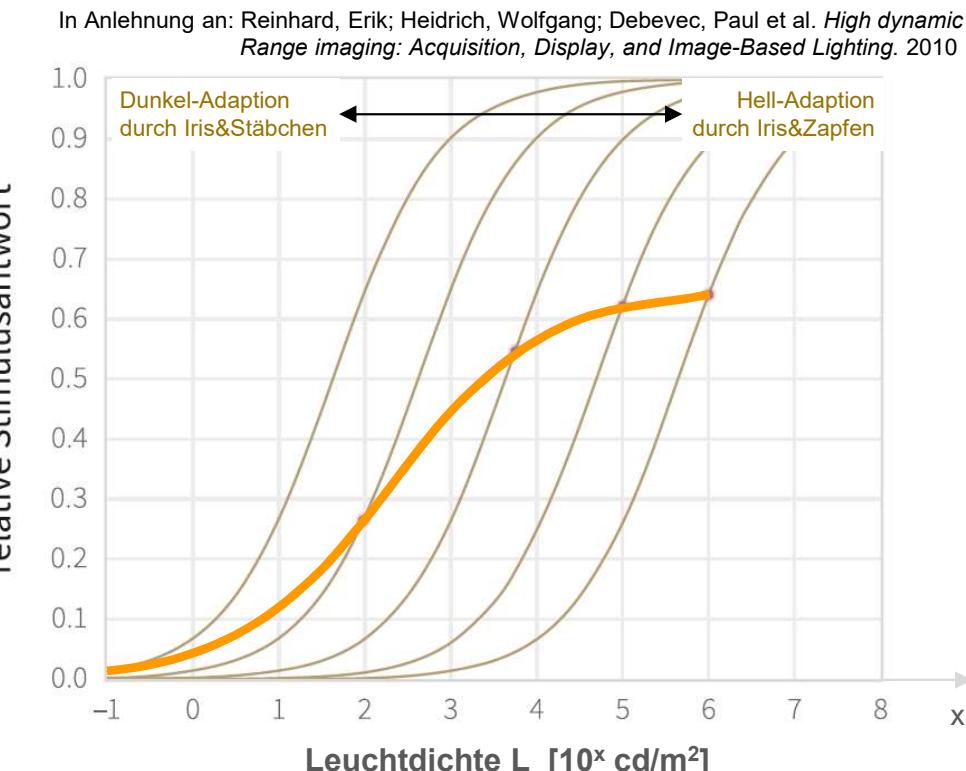
$$Y = 116 \left( \frac{L}{L_w} \right)^{1/3} - 16$$

Anm.: vereinfachte Faustformel auf nächster Folie

$Y$  Stimulusantwort der Photorezeptoren (empfundener Kontrast im Motiv)

$L_w$  adaptierte Umgebungsleuchtdichte

$L$  Helligkeit im Motiv

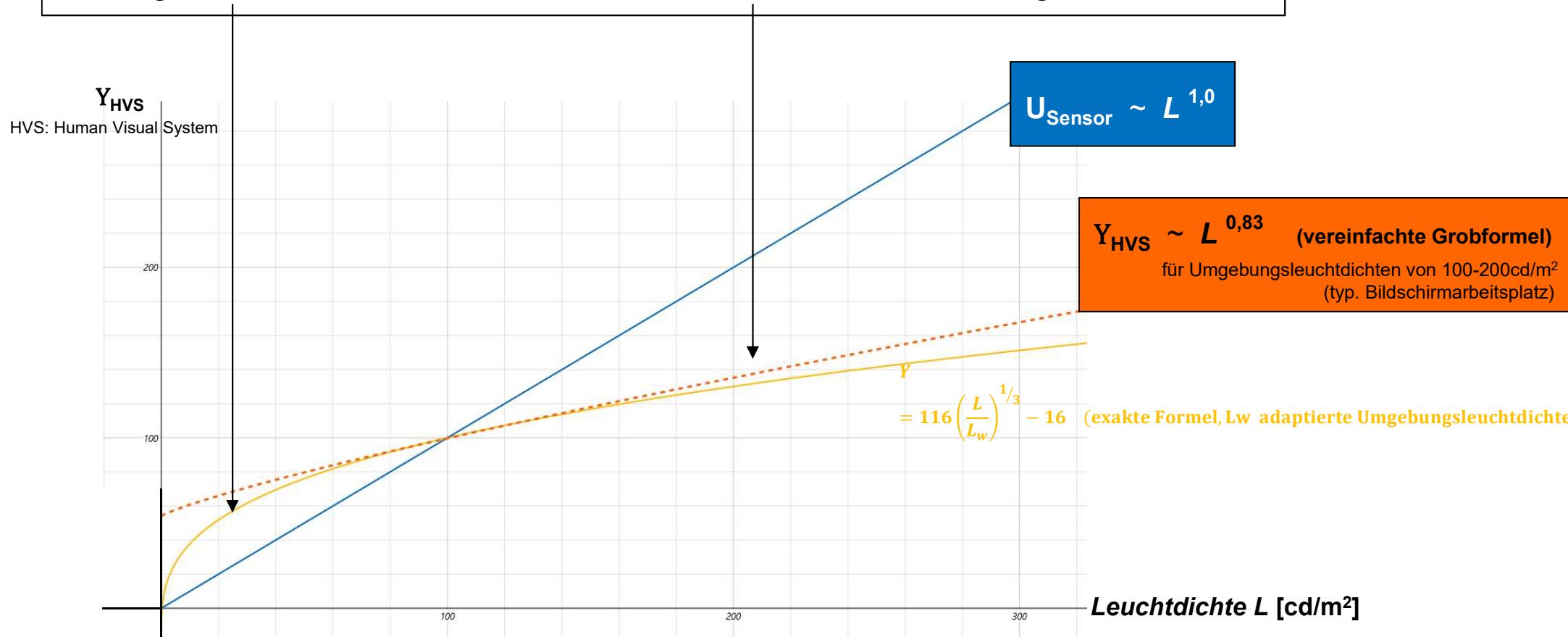


# → „wahrnehmungsbezogene Gammakorrektur“:

Die Kontrastwahrnehmung des Menschen verläuft *nicht linear* sondern **potenziell!**

Der empfundene Kontrast **Y** ...

... steigt in dunklen Bereichen steiler und in hellen Bereichen weniger steil an.



**Bildsensoren** arbeiten hingegen oft *annähernd linear* (siehe blaue Linie) bezüglich Input zu Output. Im Falle der Medienproduktion wird daher in den Kameras intern meist sofort eine „Empfindungs-Korrektur“ durchgeführt, welche als → **wahrnehmungsbezogene Gammakorrektur** bezeichnet wird. s. dazu auch Folie 152ff (zusätzliche „historische Röhrenkorrektur“, etc.)

# Technische Qualitätsparameter von Videobildern (für Menschen):

- Kontrastumfang (absolut & relativ)
- Schärfe/MTF (→ Kontrasthub über räumliche Auflösung)
- zeitl. Auflösung/Bewegungsabbildung (→ Bildwechselfrequenz + Belichtungszeit)
- Flimmerfreiheit (→ Bildwiederholfrequenz)

# Was wir in dieser Runde lernen:

- Was bedeuten die Begriffe *absoluter* und *relativer Kontrastumfang*? (und welcher ist für die menschliche Qualitätswahrnehmung von Bildern der Wichtigere?).
- Schärfe ist eine visuelle Empfindung (engl. *Visual perception*), die nur wenig mit der Anzahl der Pixel im Bild zu tun hat, sondern mit der menschl. Erkennung von Objekten/Kanten. Deshalb ist es kompliziert diese Empfindung meßtechnisch zu erfassen. Heute orientiert man sich am erreichten *Kontrasthub an den Kanten* der aufgenommenen/dargestellten Objekte. technischer Messwert: Fläche unter der Modulationtransferkurve (MTF).
- „Motion Pictures“ sollen Bewegungen der Kamera oder des Motivs korrekt wiedergeben, also nicht stottern (engl. *judder*) und nicht (zu) unscharf sein (engl. *motion blur*).  
Was ist folglich bei der Aufnahme von Bewegtbildern zu beachten?  
In welchem Zusammenhang steht dabei die Verschlusszeit/Belichtungszeit einer Kamera zur verwendeten Bildwechselfrequenz (framerate)?
- Bewegte Bilder dürfen bei der Darstellung auf Displays oder Leinwänden am Rande unseres Gesichtsfeldes nicht flimmern! Wie wird dies im Kino, im TV und bei Computergames (trickreich) erreicht (Bildwiederholfrequenz / refreshrate)?

# 1. Kontrastumfang

# Absoluter und Relativer Kontrast von Videos

Die Helligkeits-Spanne zwischen dem dunkelsten Pixel zum hellsten Pixel wird als **Kontrast** bezeichnet

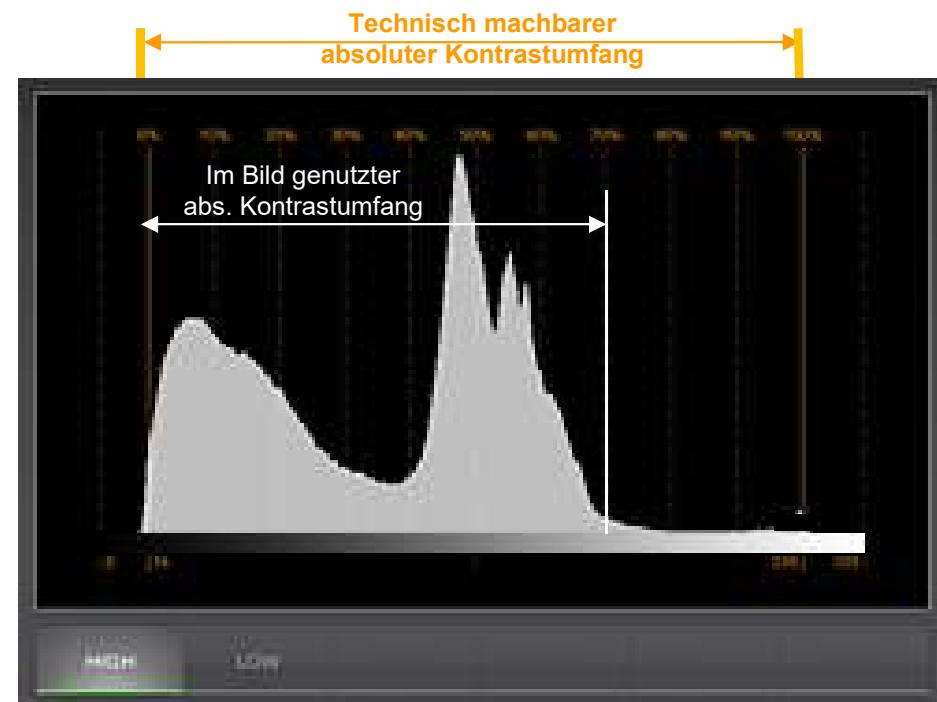
Dabei ist im Detail zu unterscheiden zwischen dem ...

- **dynamischem/relativem Kontrast** = max. Helligkeitsunterschiede der Pixel in *aufeinanderfolgenden Bildsequenzen*
- und dem
- **absolutem Kontrast** = max. Helligkeitsunterschiede der Pixel *innerhalb eines Bildes*.

Im einzelnen Bild kann bei der Erzeugung/Aufnahme technisch ein **absoluter Kontrast** umgesetzt werden. Dessen Umfang ist für die menschliche Qualitätswahrnehmung von Bildern/Videos der wichtigere Wert!  
(s.a. nächste Folien)

Der absolute Kontrastumfang eines Bildes wird über ein sogenanntes **Histogramm** gemessen. Dabei ist die Spanne zwischen hellstem und dunkelstem Pixel im Bild maßgeblich.

Abhängig von Motiv und Ausleuchtung wird in Aufnahmen grundsätzlich immer versucht, den technisch machbaren Kontrastumfang als Qualitätsoptimum zu erzielen.

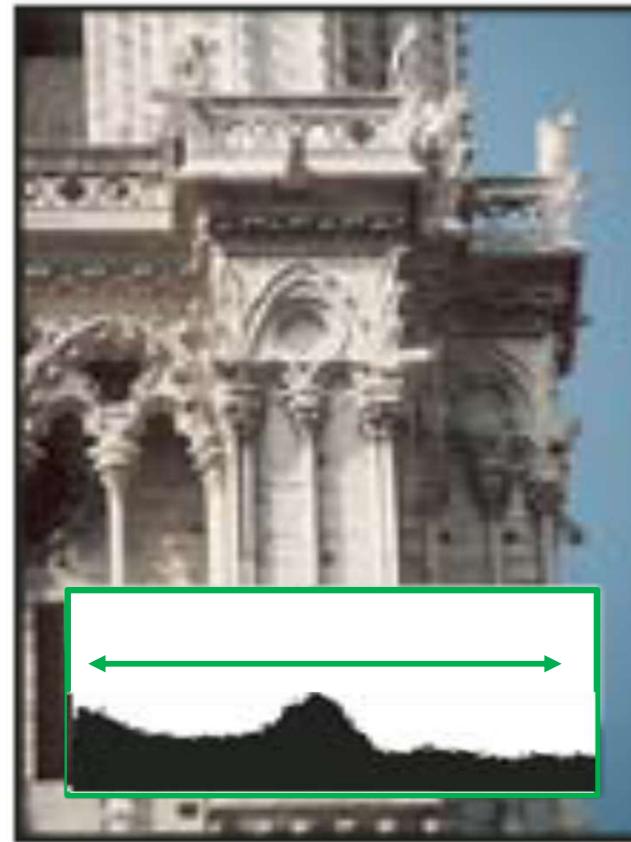


# Praktische Histogramm-Beispiele

<https://helpx.adobe.com/de/photoshop/using/viewing-histograms-pixel-values.html>



Überbelichtung



beste Ausnutzung = hoher abs. Kontrast



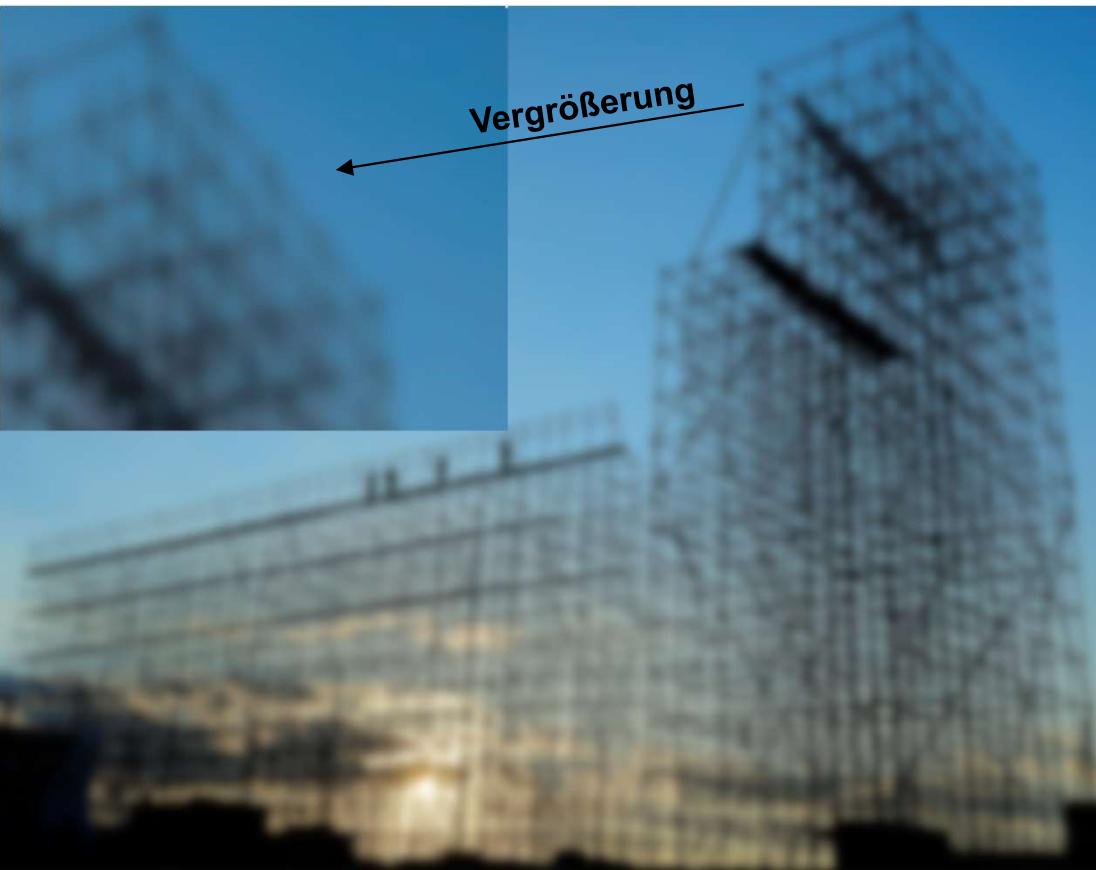
Unterbelichtung

Für Druckversion verschieben!

## 2. Schärfe / MTF

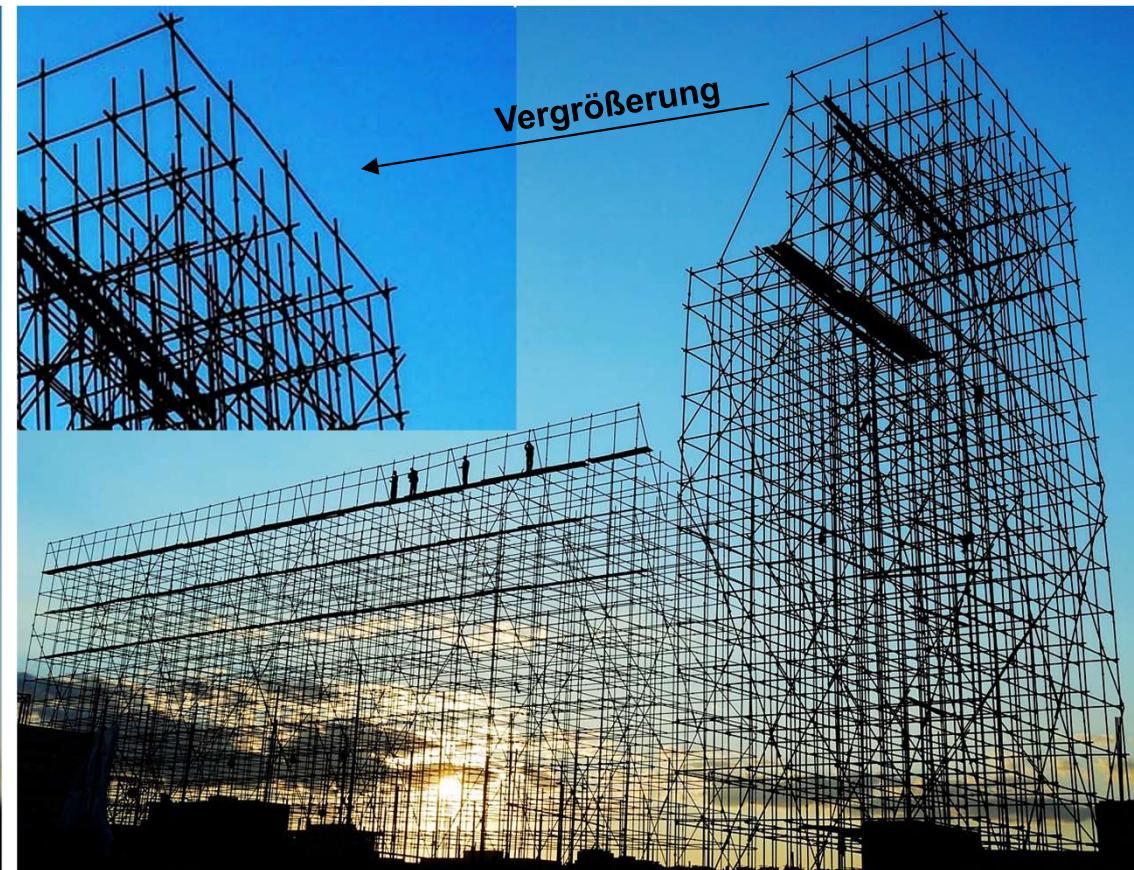
# Schärfewahrnehmung ≠ viele Pixel (Beispiel I)

Dieses Bild besteht aus 1,2 Millionen Pixel!



1280 x 960

... und dieses AUCH!



1280 x 960

Versuchen Sie den Unterschied zu *beschreiben*.  
(achten Sie dabei auf die Kanten!)

## Schärfewahrnehmung $\neq$ viele Pixel (Beispiel II)

(Druckversion)



1600 x 1200 Pixel

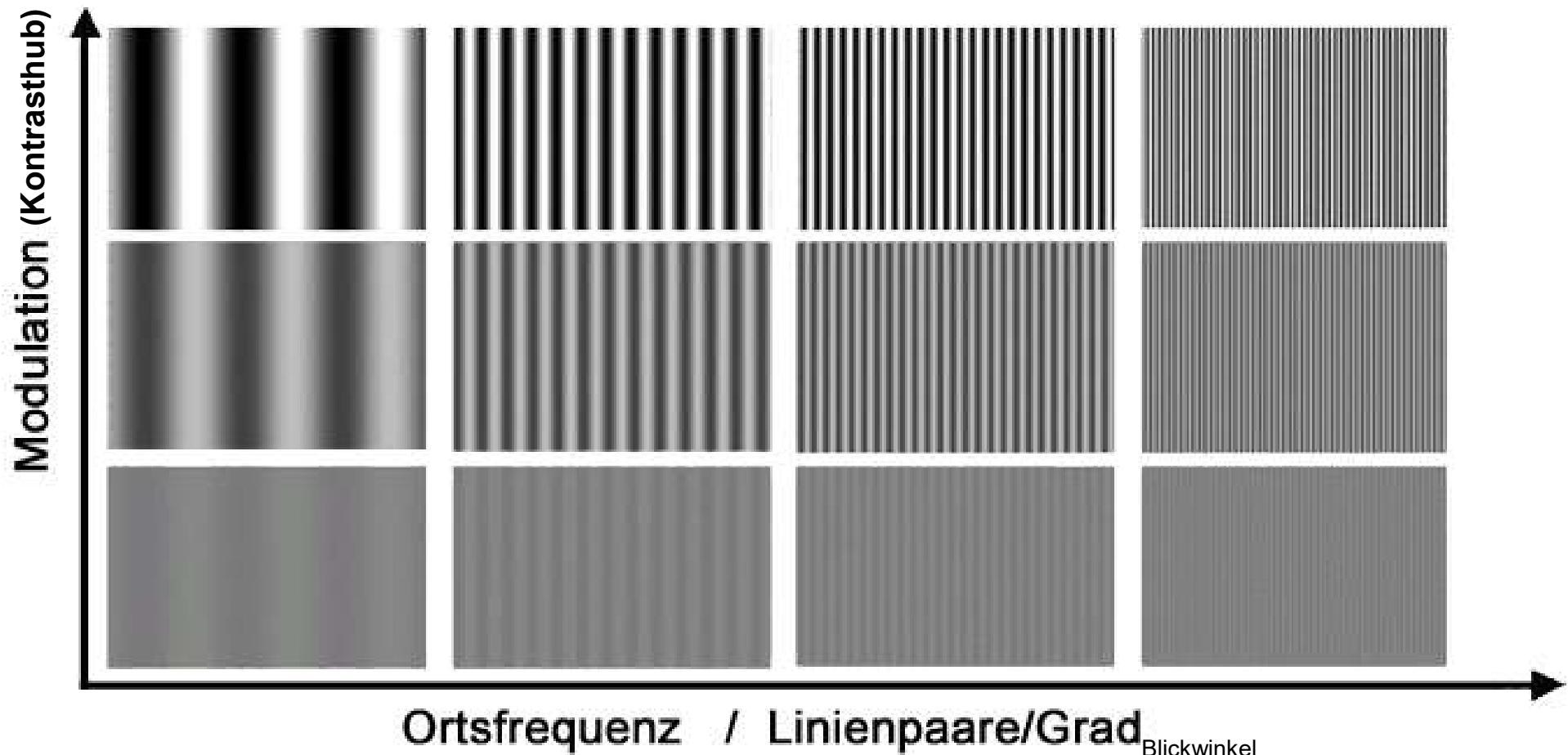
800 x 600 Pixel

Aufgrund der evolutionären Ausprägung unseres visuellen Systems - insbesondere der Orientierung an Kanten zur Objekterkennung - ist für die menschliche Empfindung „Schärfe“ der **Kontrastwechsel** („Kontrasthub“) zwischen benachbarten Bildpunkten **höher gewichtet** als die räumliche Dichte der Bildpunkte („räumliches Auflösungsvermögen“).

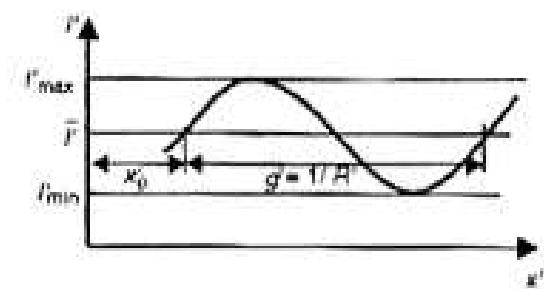
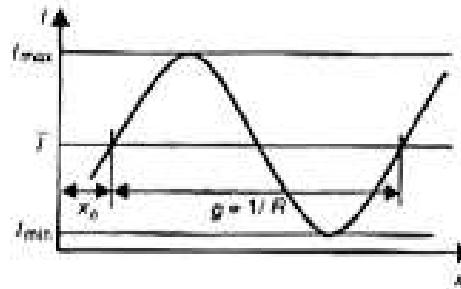
**Unterhalb eines Kontrastunterschieds von 30% zwischen benachbarten Bildpunkten werden keine scharfen Kanten mehr wahrgenommen!** (s. Folie 105)

## Schärfewahrnehmung $\neq$ viele Pixel (III)

Schärfe ist eine menschliche Erfahrung, die entsteht, wenn hohe **Kontrasthübe** in mittleren und feinen Details vorhanden sind (s.a. Folie 116). Die Ausprägung des Kontrasthubs ist dabei die maßgeblichere Größe als die örtliche Auflösung (pixel x pixel) des Bildes!

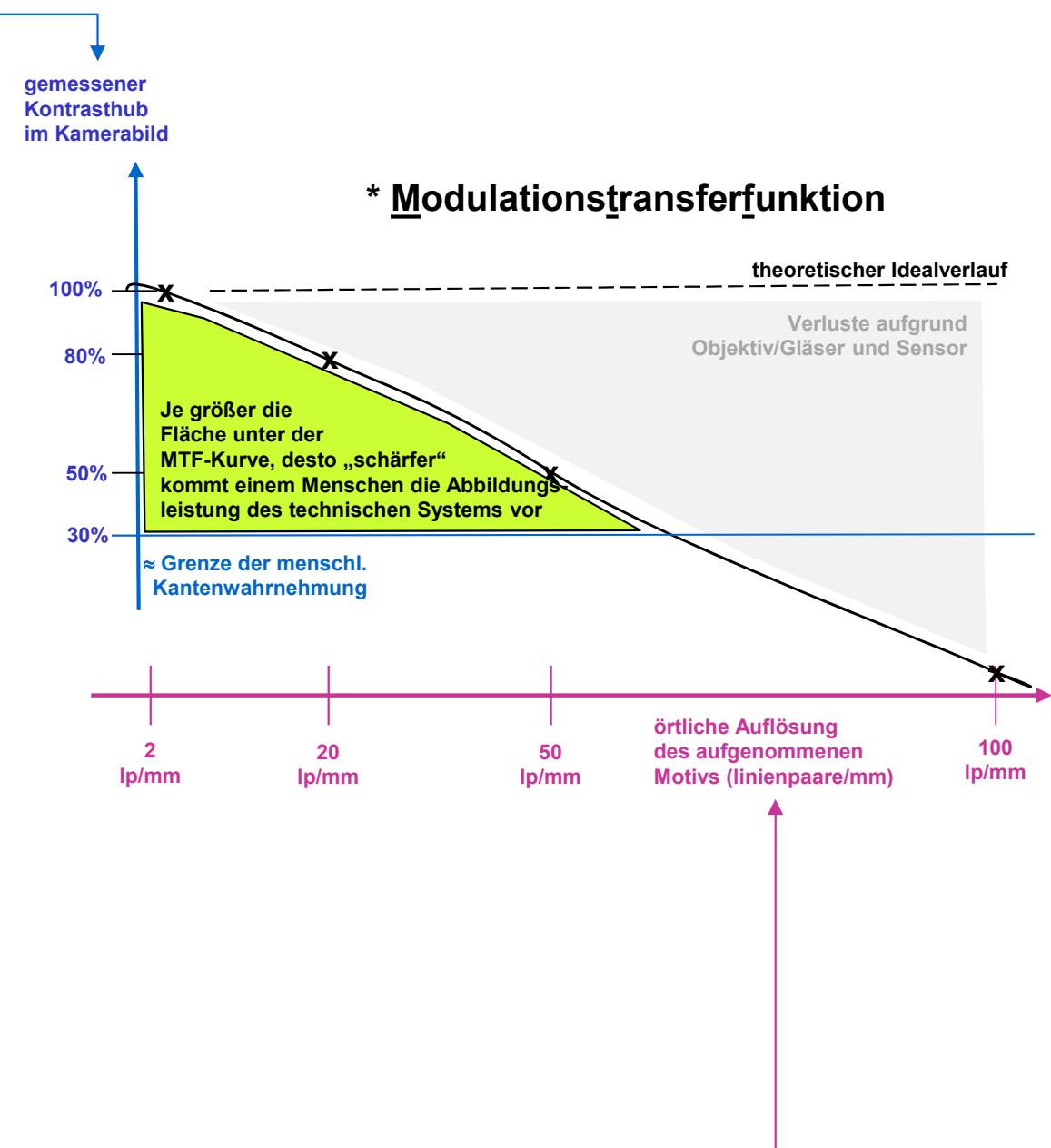
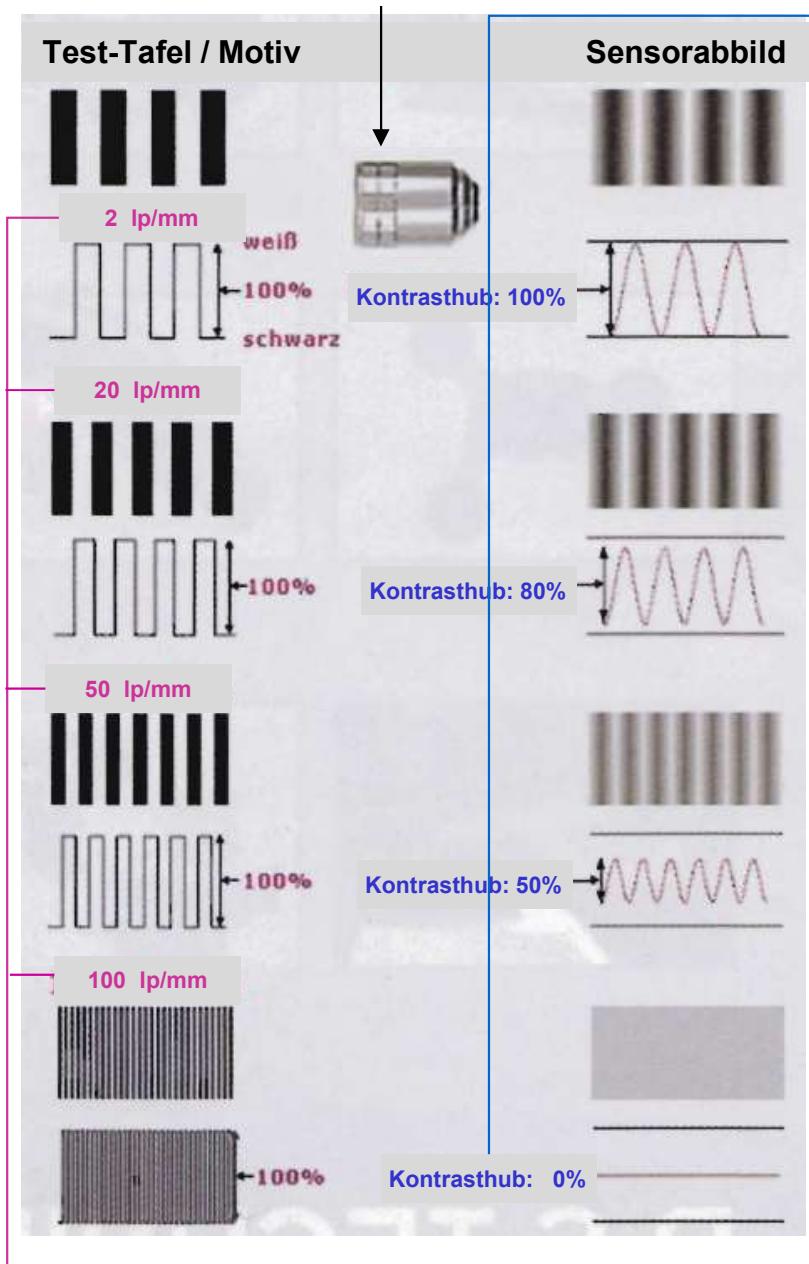


$$\text{Modulation} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



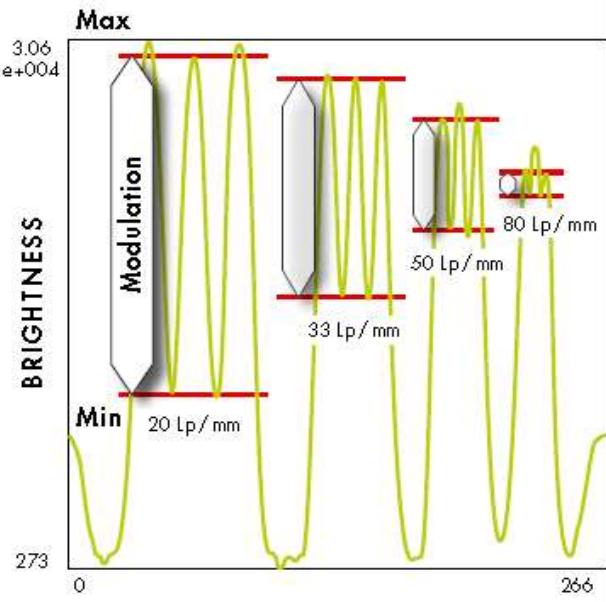
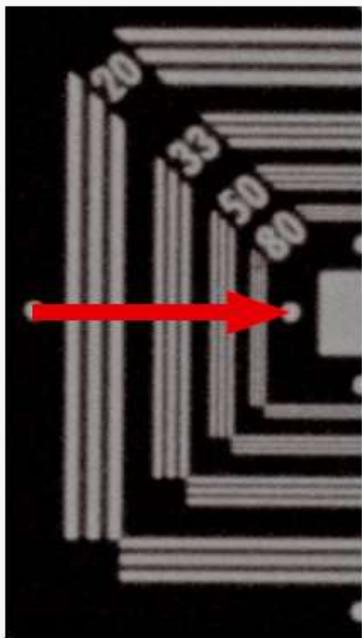
# MTF\*: das „menschl. Gefühl der Schärfe“ technisch messen

Beispiel: Messung der Schärfeleistung eines Objektivs im optimalen Focus (Einstellentfernung)

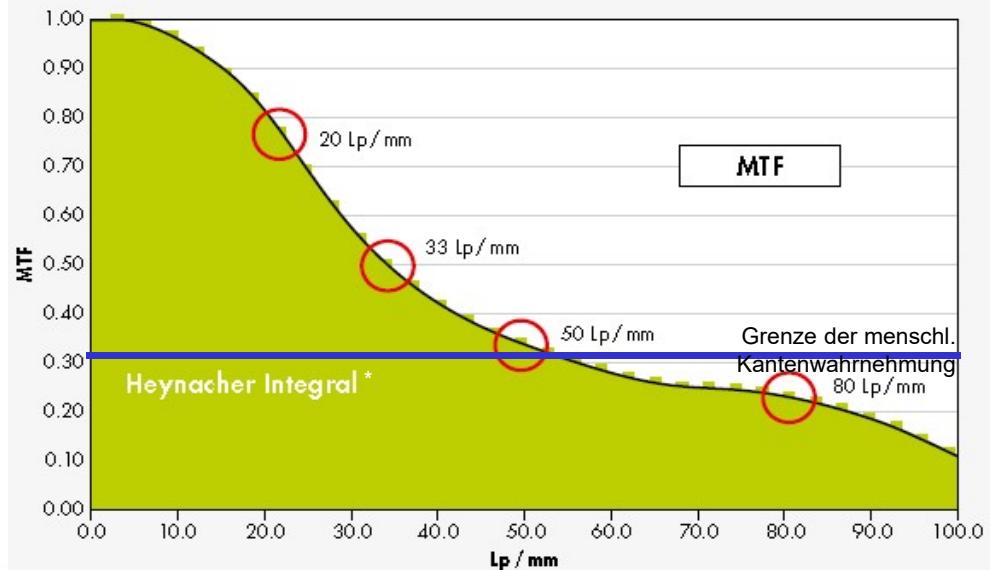


# Schärfe = Integral unter der Modulationtransferfunktion (MTF)

Alternatives Testbild:



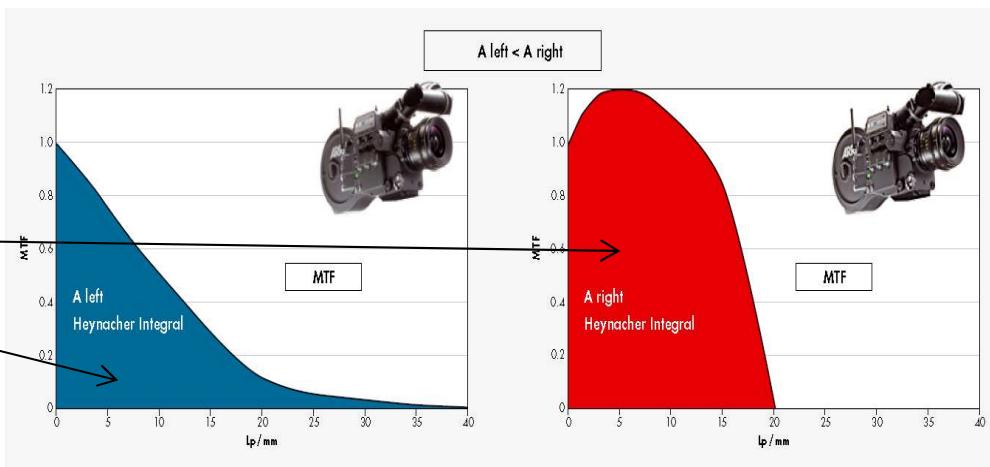
$$\text{Modulation} = \frac{(I_{\text{Max}} - I_{\text{Min}})}{(I_{\text{Max}} + I_{\text{Min}})}$$



Die Auflösung der Frage von der vorherigen Seite:  
Warum kam uns das geringer-aufgelöste Bild  
schärfer vor ?

Beachten Sie die Größe der Flächen  
unter den MTF-Kurven\* !

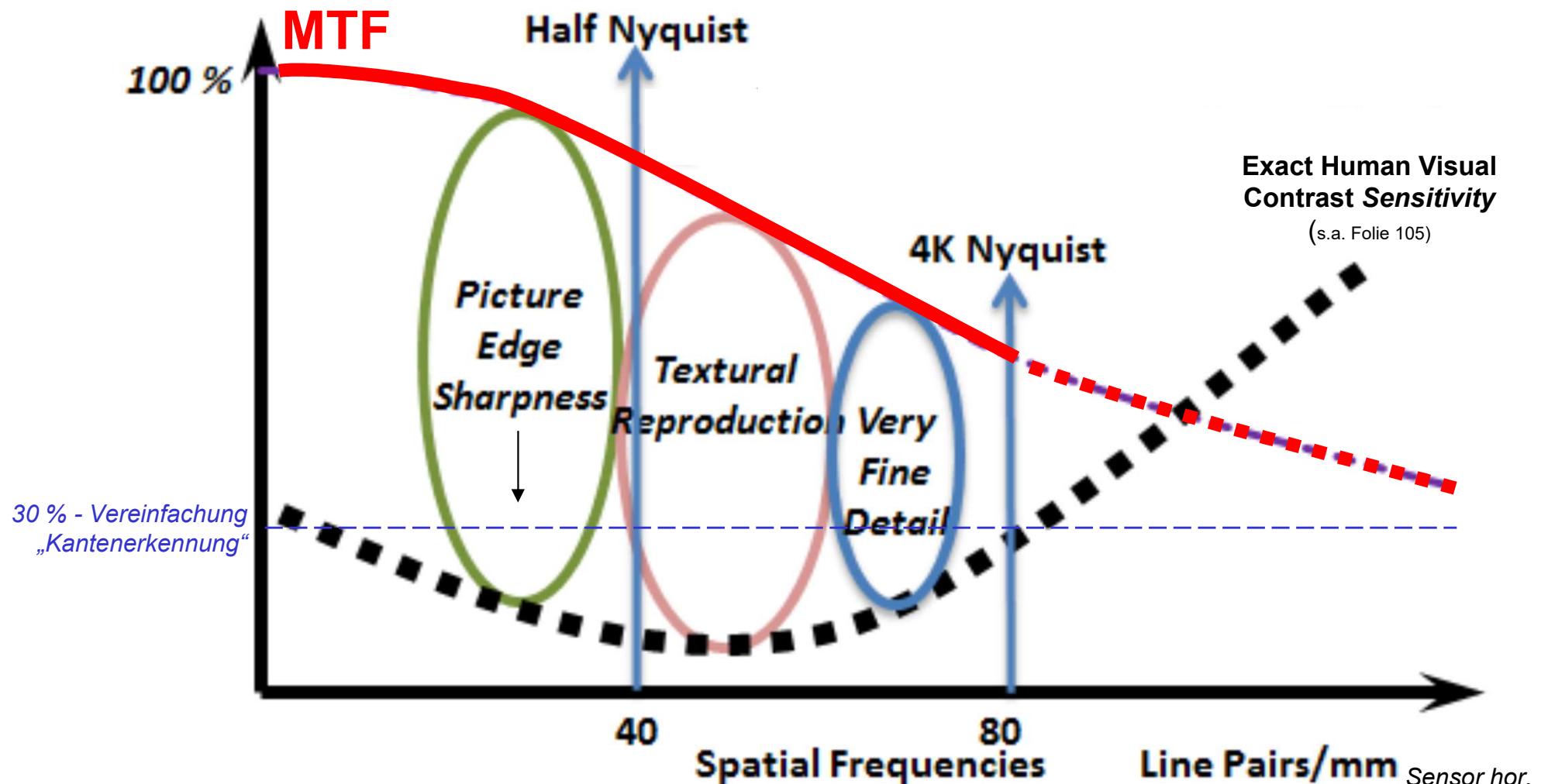
\* In the 1970s, Erich Heynacher from Zeiss provided the decisive proof that humans attach more value to coarse, contour-defining details than to fine details when evaluating an image. He found that the area below the MTF curve corresponds to the impression of sharpness perceived by the human eye (the so-called Heynacher Integral). Expressed simply: the larger the area beyond MTF=0.3, the higher the perception of sharpness.



# MTF-Verlauf

## einer professionellen 4k-Kamera/Objektivkombination:

(inkl.: welche Motivbereiche liegen Wo in der MTF-Kurve)



# Beispiel: MTF-Verlauf von Consumer HDV-Videokameras

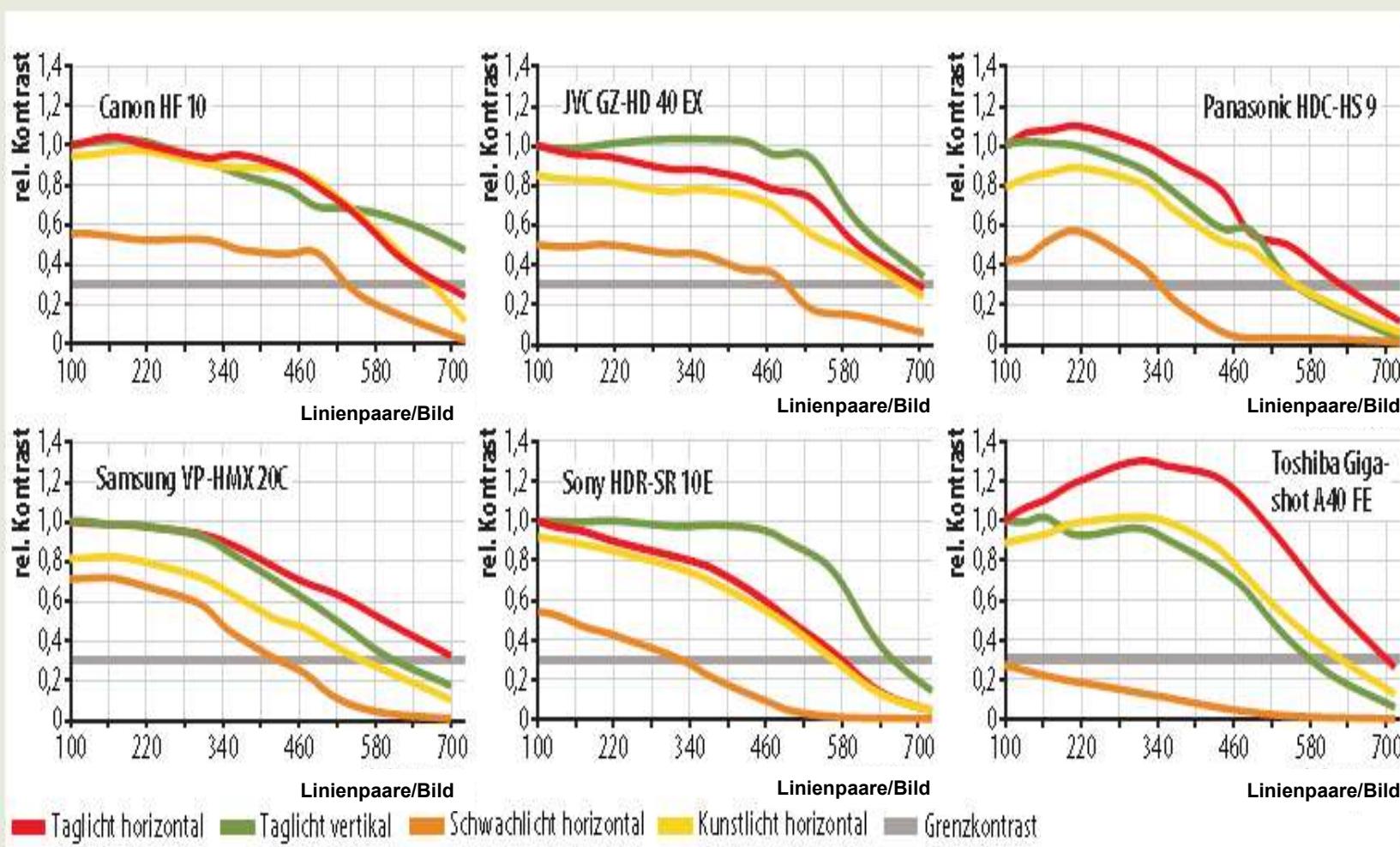
Denken Sie an die Motivbereiche aus der vorhergehenden Folie!

Die Diagramme geben die Messergebnisse der tatsächlich nutzbaren Auflösung wieder. Die rote und gelbe Kurve zeigt, wie viele senkrechte Linienpaare – eine weiße und eine schwarze Linie – das Gerät nebeneinander in der Bildzeile (horizontal) darstellen kann. Die physikalische Grenze eines Camcorders, der 1440 Bildpunkte in der Zeile darstellt, liegt bei 720 Linienpaaren (Nyquist-Frequenz). Die rote Kurve zeigt die horizontale Auflösung bei Tageslicht (1000 Lux), die orangefarbene die bei Schwachlicht (30 Lux). Die grüne Kurve stellt das vertikale Auflösungsvermögen dar; der Wert wurde dem Seitenverhältnis entsprechend skaliert, um die Mess-

ergebnisse für vertikale und horizontale Auflösung vergleichen zu können. Bei HD-Camcordern entspricht die vertikale Auflö-

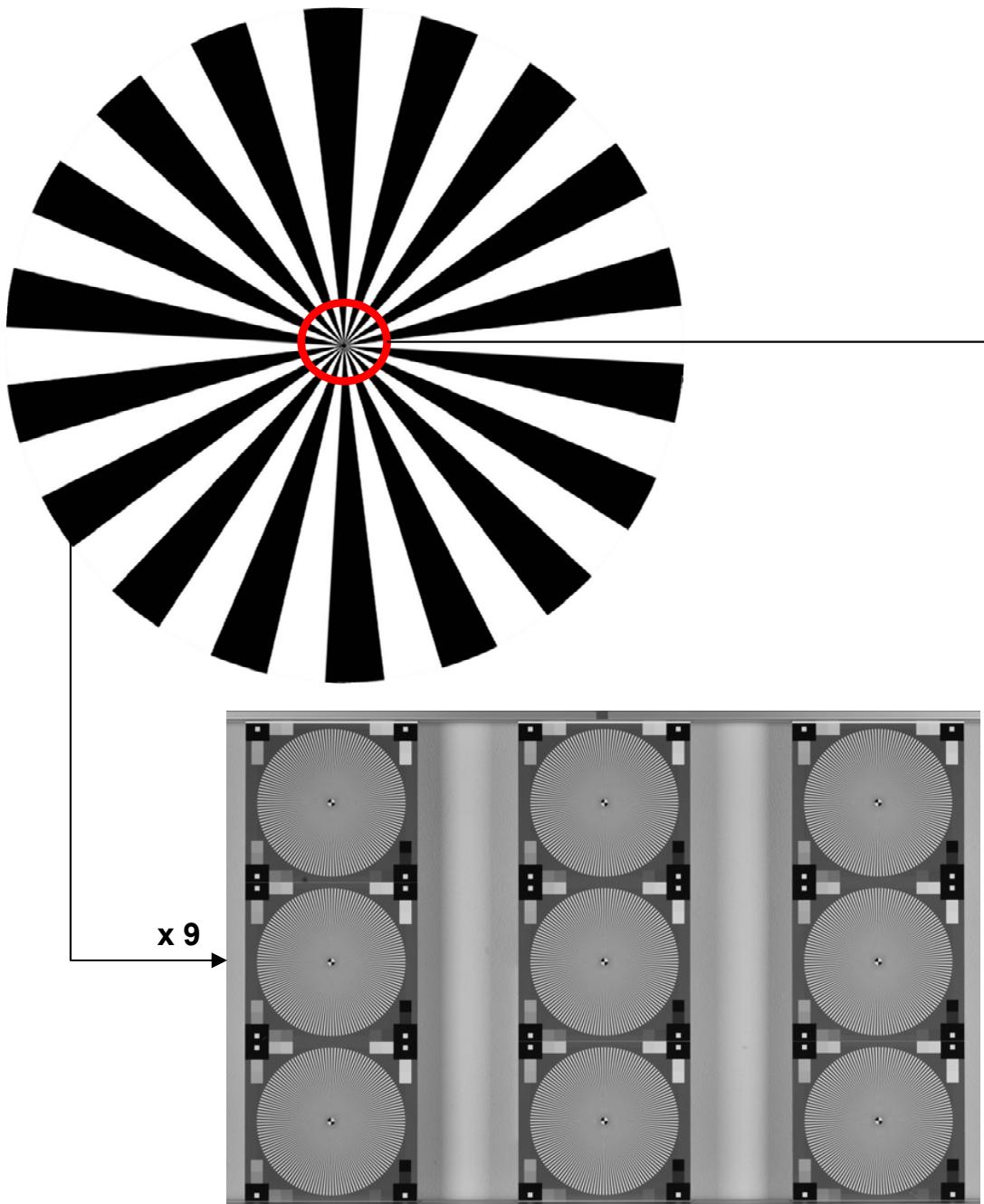
sung in etwa der horizontalen. Das menschliche Auge trennt Linien nicht mehr voneinander, wenn der Helligkeitsunterschied

zwischen weißen und schwarzen Linien auf 30 Prozent des Maximalwertes gefallen ist (graue Linie).



aus: c't 22/2008

# Schärfe-Fähigkeit von Kamera oder Bildschirm schnell&einfach testen:



Testbild „Siemensstern“:

Der realisierbare Kontrasthub kann in beliebiger Kantenrichtung beurteilt werden. Je kleiner die **Fläche des verschmierten „Graukreises“** (Kontrasthub  $\leq 30\%$ ), desto höher die realisierbare Schärfewirkung.

Das Testbild wird auch gerne bei **Zoomobjektiven** zur Kontrolle der exakten Brennpunkt-Justierung auf die Bildsensorebene verwendet.  
(„Auflagemaß“, engl. „backfocus“)

EXKURS: Auflagemaß nach Zoomobjektiv-Wechsel justieren

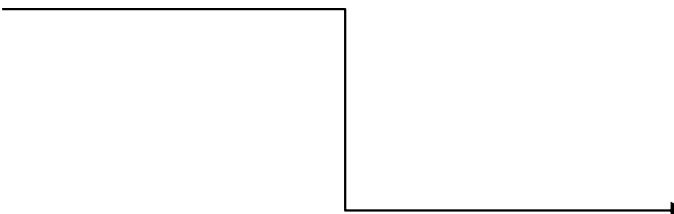
1. Auflagemaß-Ring vorsichtig lockern.
2. Bei maximaler Brennweite den Siemensstern mit dem FOCUS-Ring scharf stellen.
3. Bei minimaler Brennweite den Siemensstern am Auflagemaß-Ring scharf stellen.
4. Gegebenenfalls erneute Kontrolle und Wiederholung der Schritte 2 und 3.
5. Auflagemaß-Ring fixieren.

# Hausaufgaben:

## 1.) Lesen Sie den Artikel

„**Sharpness, Resolution and Aliasing. The Basics About Film and Digital Imaging**“  
der Firma ARRI (zu finden im Dateibereich der Veranstaltung).

## 2.) Hat Frau Jarsetz Recht?



## 3.) Überlegen:

Warum sind alle Testmuster für Schärfemessungen schwarz-weiß und nicht farbig?

## 4.) Diskussion:

Wie steht dieses Kapitel („Schärfe/MTF“) im Einklang mit den Gestaltungs-Ansätzen der selektiven Bildschärfe (Folie 70&71)?

**ct Fotografie**

News - Tests Galerie Aktuelles Heft Foren -

Praxis: Schärfen in Photoshop und Lightroom

16. Dezember 2017 – Maike Jarsetz

Mit der gesteigerten Qualität der digitalen Aufnahmen hat sich die Herangehensweise beim Schärfen gegenüber früheren Jahren verändert. Dieser Praxis-Workshop setzt bei den Grundlagen der Scharfzeichnung an. Er zeigt Ihnen, wie Sie zu den richtigen Scharfzeichnungswerten finden, und begleitet Sie vom Pre-Sharpening bis zur Ausgabe-Schärfung.

Was ist eigentlich Scharfzeichnung? Kann ich wirklich unscharfe Bilder – also Motive, die entweder aufgrund langer Belichtungszeit oder falscher Fokussierung die Schärfe vermissen lassen, zu der Objektivqualität und Auflösung eigentlich fähig wären –, mit digitalen Mitteln nachträglich scharf stellen?

Nein, mitnichten. Aber wir können solchen Bildern einen scharferen Eindruck geben. Der Weg dazu ist ganz einfach: Wir erhöhen den Kontrast in den Bilddetails – auch Mikrokontrast genannt – so wirkt die Darstellung „knackiger“ und damit scharfer.

INHALTSVERZEICHNIS

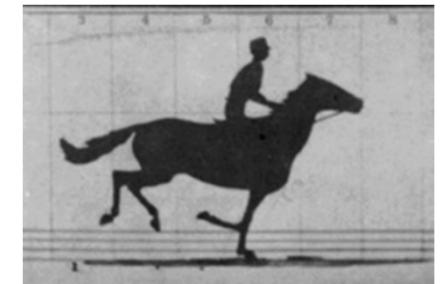
- 1. Praxis: Schärfen in Photoshop und Lightroom
- 2. Das Prinzip Scharfzeichnung
- 3. Scharfzeichnung bei der Raw-Entwicklung
- 4. Individuelle Ausgabeschärfung in Lightroom
- 5. Kreatives Schärfen
- 6. Schärfen für die Ausgabe
- 7. Unschärfe maskieren
- 8. Hochpass-Filter: Experte für detaillierte Motive
- 9. Selektiver Scharfzeichner
- 10. Schärfen von Raw-Daten
- 11. Verwacklung reduzieren

» Auf einer Seite lesen

<https://www.heise.de/foto/artikel/Praxis-Schaerfen-in-Photoshop-und-Lightroom-3919084.html>

# 3. Bewegungsabbildung

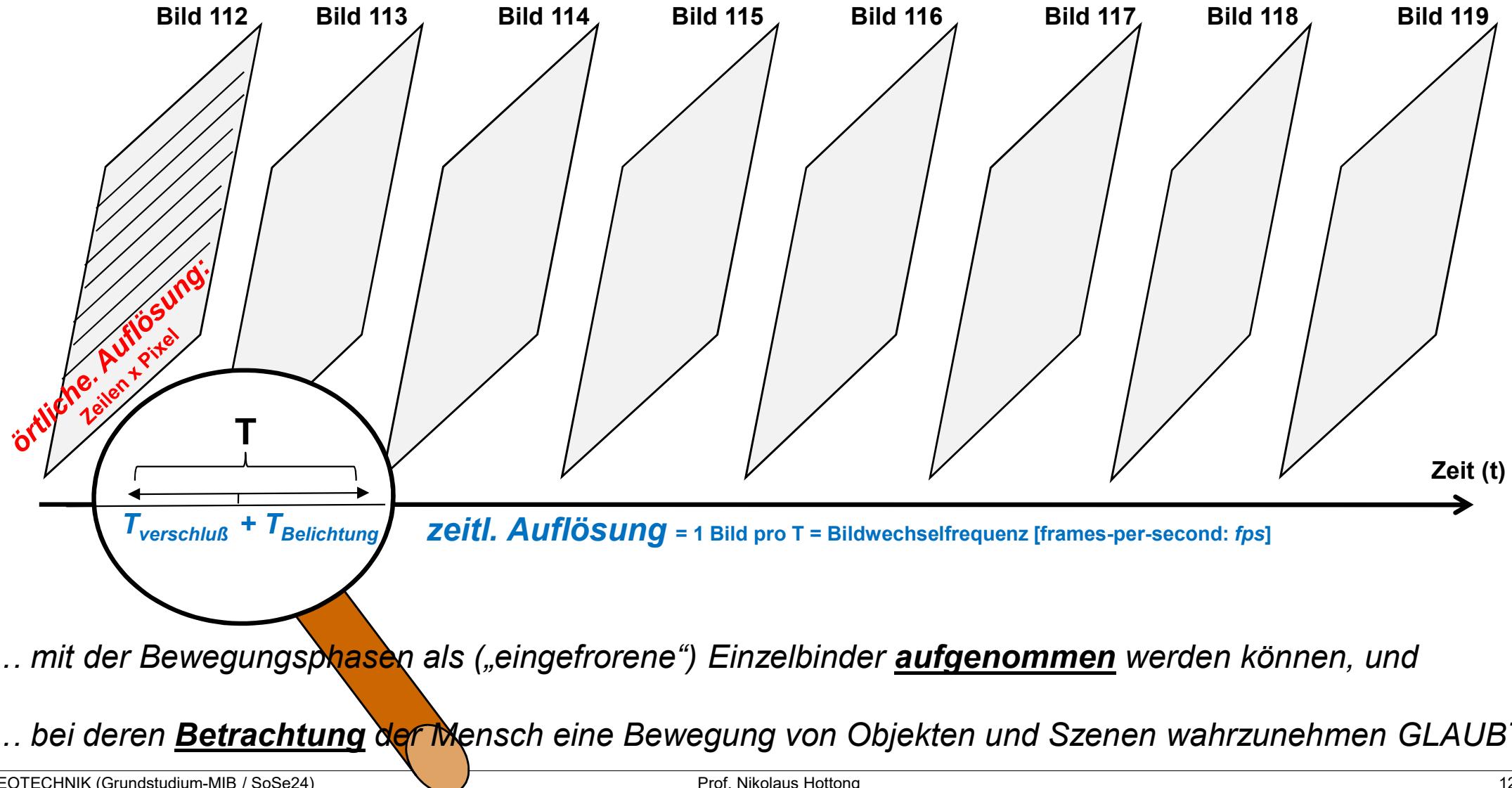
# Zur Erinnerung: „Motion-Pictures“



[http://de.wikipedia.org/wiki/Eadweard\\_Muybridge](http://de.wikipedia.org/wiki/Eadweard_Muybridge)

Video/Film ist ...

... eine Abfolge von einzelnen, definiert-großen (Leucht-)Bildern in einem festgelegten zeitlichen Abstand,



# Zeitl. Auflösung: Bewegungsabbildung & Bewegungsunschärfe

Auslesen Bildsensor: siehe auch Folien 219 (CCD) und 223 (CMOS)

Zur Erinnerung: Örtlich eingeschränkte (= fixierbare) Lichtimpulse verschmelzen neuronal schon bei Wechselfrequenzen zwischen 10 und 25Hz zu einer kontinuierlichen Bewegungswahrnehmung (→ **Bewegungsverschmelzungsfrequenz**), sofern uns die **Bewegungsphasen logisch/vorausschaubar/erfahrungsgemäß scheinen** (sonst höher).

## Praxisbeispiel SHUTTER-Funktion in elektronischen Kameras ...

$$\text{Verschlusszeit} + \text{Belichtungszeit} \approx \frac{1}{\text{Bildwechselfrequenz}}$$

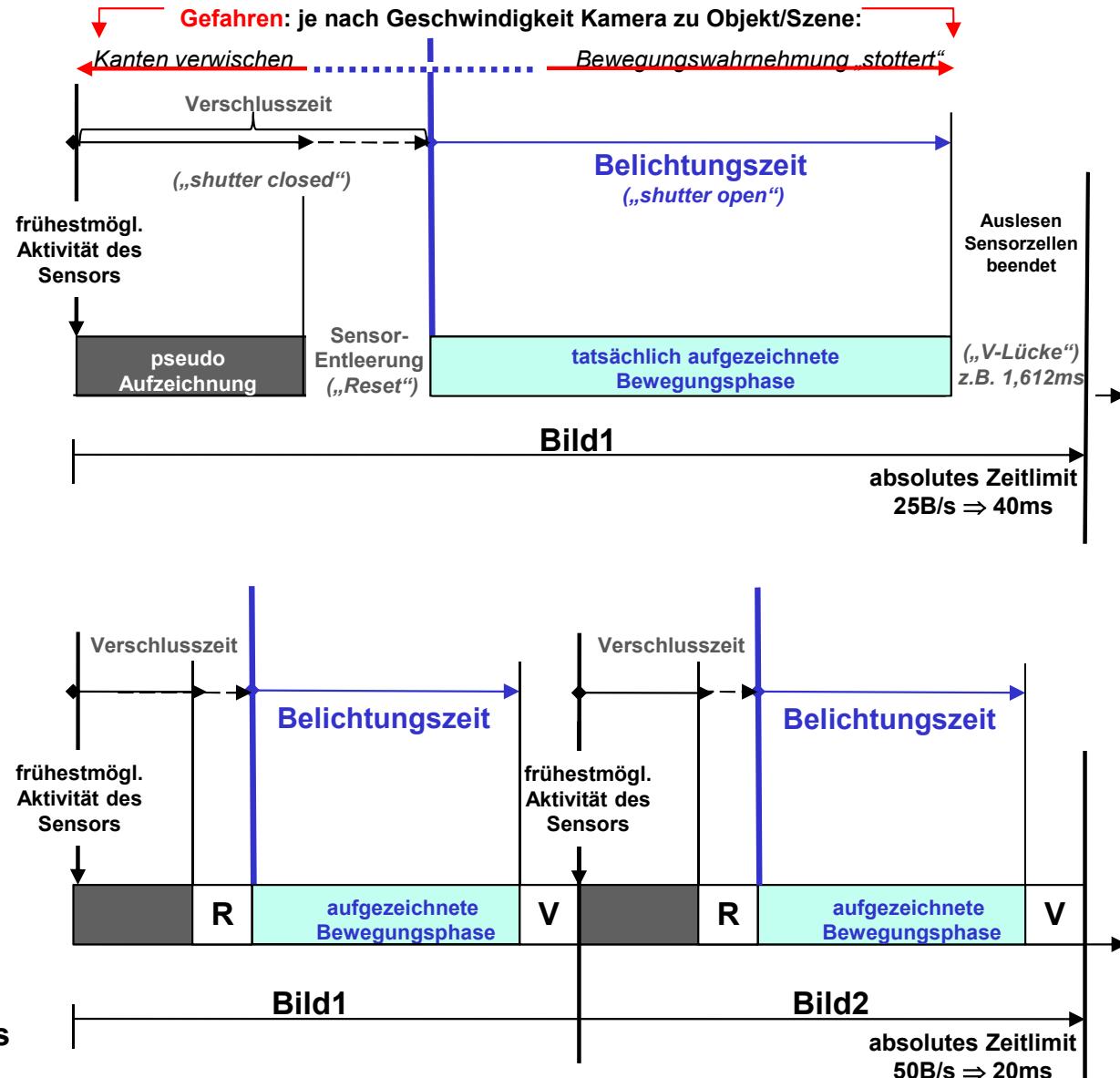
... bei Bildwechselfrequenz 25 Bilder/s



Kamerasensor

In der Kamera haben wir den Effekt, dass ein bewegendes Objekt während der Belichtungszeit mehrere Bildpunkte des Sensors überstreicht. Der sich bewegende Gegenstand verwischt und kann somit nicht mehr in der maximal erreichbaren örtlichen Auflösung dargestellt werden. Über eine Verkürzung der Belichtungszeit kann diesem Effekt gegengearbeitet werden, es entsteht aber die Gefahr, dass das visuelle System die kurzen Bewegungsphasen (und die langen Pausen dazwischen) nicht mehr zu einer kontinuierlichen Bewegung zusammensetzen vermag. In diesem Falle hilft nur eine gleichzeitige Erhöhung der Bildwechselfrequenz weiter.

... bei Bildwechselfrequenz 50 Bilder/s



# Aufnahmefehler: Bewegungsunschärfe vs. Bildruckeln bei 25fps

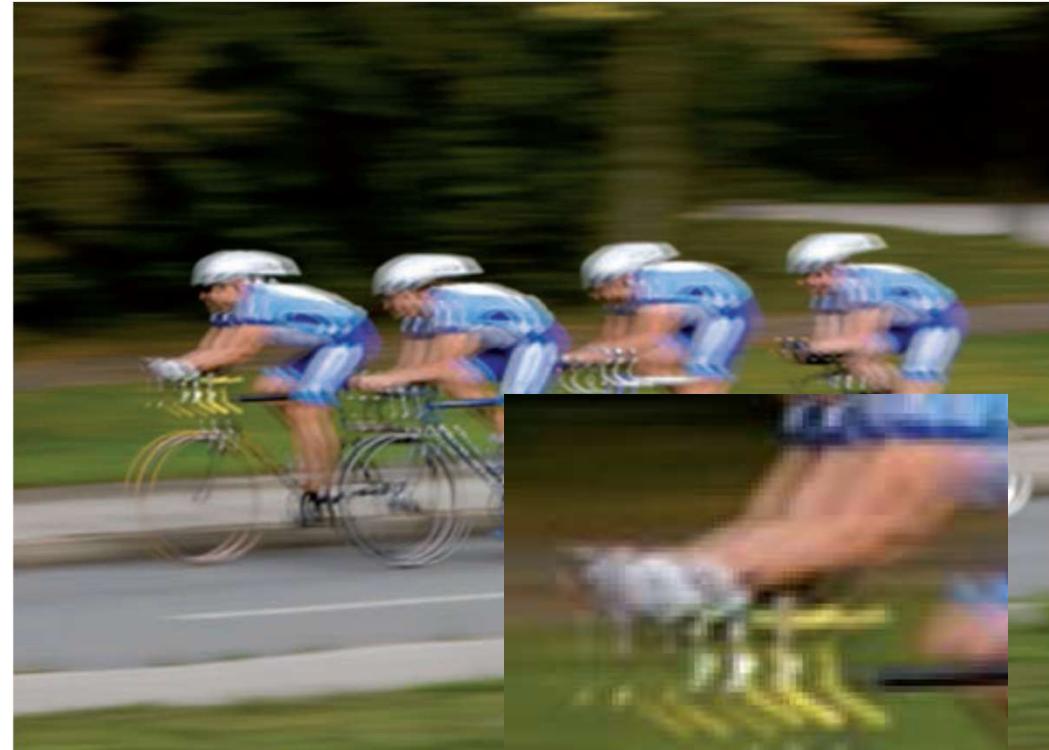
s.a. [https://www.youtube.com/watch?v=gw3T\\_UKTPJU](https://www.youtube.com/watch?v=gw3T_UKTPJU) und <https://www.youtube.com/watch?v=UPPSdCrqcFQ>



Bewegungsunschärfe  
(„Motion-Blur“)

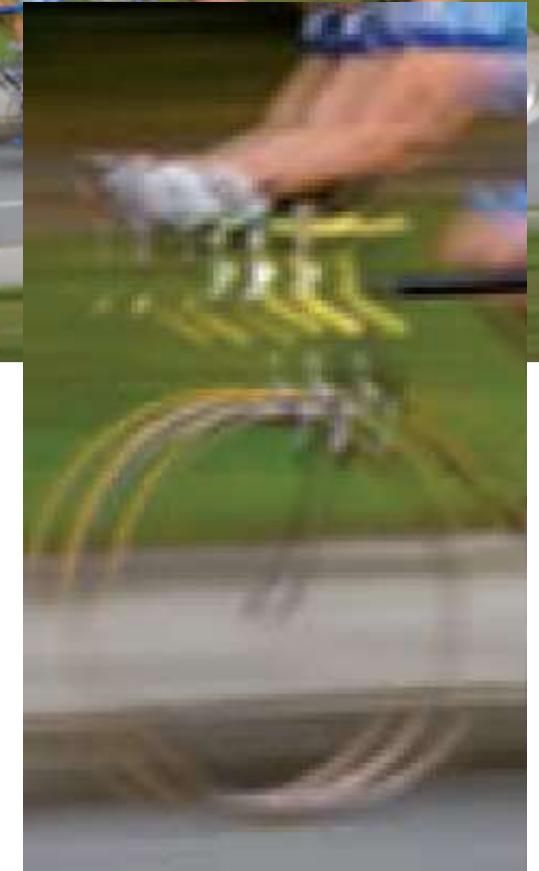
Grund: Belichtungszeit  
**zu lang**

Bildquelle: FKT 1-2/2016



Bildruckeln  
(„Judder“)

Grund: Belichtungszeit  
**zu kurz**



# Gruppenaufgaben: Handwerkliche Aspekte der Bewegungs(un)schärfe:

1. Der Mensch kennt in seiner natürlichen Wahrnehmung Bewegungsunschärfe nur bei *extrem* schnellen Bewegungen oder hohen Geschwindigkeiten. Motionblur im Bild/Rendering vermittelt visuell/konzeptionell also

.....

Ein Beispiel aus einem Computergame, wo dieser psychologische Effekt trickreich genutzt wird, ist .....

2. Beispiel Kameraschwenk auf Stativ: Von welchen Faktoren ist der Motionblur-Effekt in diesem Falle abhängig?

- Bildwechselrate → meine Regel: Je niedriger die Bildwechselrate, desto ....
- Schwenkgeschwindigkeit → meine Regel: Je schneller die Schwenkgeschwindigkeit, desto ....
- Abstand zum Motiv → meine Regel: Je kürzer der Motivabstand, desto ....
- Brennweite → meine Regel: Je länger die Brennweite, desto ....
- Focus → meine Regel: Je weiter die Einstellentfernung, desto ....
- Blende → meine Regel: Je geschlossener die Blende, desto ....

3. Je schärfer=kontrastreicher ein Kamerabild ist, desto größer fallen Zuschauern die Differenzen zwischen scharfen Standmotiv und „geblurter“ Kamerabewegung auf (z.B. Beginn, Bewegungsphase und Ende eines Kameraschwenks bei UHD/HDR-Sportübertragungen). In diesem Falle wären es sinnvoll,

Kameraeinstellung: .....fps , Belichtungszeit .....

Schwenkbewegung: .....

4. Die Schlachtsequenzen im Kinofilm "Der Soldat James Ryan" wurden mehrheitlich in 24 fps mit Belichtungszeiten von nur 5 - 10ms gedreht. In der Folge entstanden abgehackte, aber schärfere Einzelbilder. So erreichte man laut Kameramann Janusz Kamiński ein gewolltes Stakkato in den Bewegungen der Schauspieler und mehr Schärfe in den Explosionen, was sie realistischer macht.

## 4. Flimmerfreiheit

# Vorsicht Falle! Bildwechselfrequenz und Bildwiederholfrequenz

## Zur Erinnerung:

- Damit ein **Bewegungsablauf** vom menschlichen Auge ansatzweise als "gleichmäßig/flüssig" wahrgenommen wird, muß er mit *mindestens 15* unterschiedlichen *Bewegungsphasen* pro Sekunde dargestellt werden (→ Daumenkino). Das *Maximum* der menschlichen Wahrnehmung liegt bei etwa **60** unterschiedlichen Bewegungsphasen pro Sekunde.
- Dies bezeichnet man technisch als die **Bildwechselfrequenz** (engl. *frame rate*)
- Die **Bildwechselfrequenz** beschreibt also, wie oft in einem Bilderstrom tatsächlich eine **NEUE** Bildinformation enthalten sein muss, im Sinne von **aufgezeichneten Bewegungsphasen** oder **neu-gerenderten Bildinhalten** (Computergrafik).

**Internationale Festlegungen:** (s.a. Folie 186)

(**Bildwechselfrequenz**)

35mm - Film	→ 24 Bilder/s (HFR: 48 o. 120 Bilder/s)
TV (Europa/Asien)	→ 25 Bilder/s o. 50 Bilder/s
TV (Amerika, Japan)	→ 30 Bilder/s o. 60 Bilder/s
Computer	→ > 30 Bilder/s (je nach Grafikleistung)

Bei der **Betrachtung leuchtender Bilder durch Menschen** ist aber noch eine weitere biologische Größe zu beachten, nämlich die extrem bewegungssensitiven rezeptiven Felder im Außenbereich des Gesichtsfelds.

Um ein *Großflächenflimmern* bei der Wahrnehmung leuchtender Bilder zu vermeiden, muss daher die **Bildwiederholfrequenz**  $> 40$  Hz sein, in hellen Betrachtungsumgebungen sogar noch deutlich höher (80 - 120Hz) (s.Kap. visuelle Wahrnehmung / CFF).

Die **Bildwiederholfrequenz** (engl. *refresh rate*) beschreibt, wie oft in der Sekunde ein bilddarstellendes System (Display, Projektor, etc.) ein ganzes Bild zum Leuchten bringen muss, damit beim menschl. Betrachter kein Flimmereffekt (engl. „*flicker*“) am Rande seines Gesichtsfelds entsteht.

Idealerweise ist die **Bildwiederholfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Bildwechselfrequenz**, sonst kommt es zu Mikrorucklern!

## Exkurs: Historische Bildwechselfrequenzen

**Im Kino wird seit 1920, weltweit-einheitlich, mit 24fps als Bildwechselfrequenz produziert**  
(Anm.: oder ganzzahligen Vielfachen davon → HFR).

**Die TV-Systeme in Europa und USA orientierten sich in ihren Bildwechselfrequenzen ursprünglich an der Frequenzen ihrer Stromversorgung** (Europa: 50Hz → 25fps, USA: 60 Hz → 30fps)

**Mit der Einführung des analogen NTSC-Farbfernsehsystems (1953) in USA musste die ursprüngliche s/w-Bildwechselfrequenz von 30 fps etwas verringert werden, um bei der Ausstrahlung Interferenzen (gegenseitige Wechselwirkungen = Störungen) zwischen der Farbbild- und der parallelen Tonübertragung zu minimieren.**

**Statt 30.000 Bilder in 1000 Sekunden sendete NTSC 60.000 Halbbilder in 1001 Sek. aus, die Bildwechselfrequenz sank also de-facto auf  $30.000/1001 \text{ Hz} \approx 29,97 \text{ Hz}$ . Entsprechend wurden die Kameras schon bei der Aufnahme auf diese Framerate reduziert.**

**Dies ist bis heute in USA und Japan so geblieben. Selbst bei höheren Frameraten wie z.B. 60fps = 59,94fps<sub>eff</sub>**

**Die meisten Kameras, Monitore und Medioplayer unterscheiden heute aber bei der fps-Anzeige kaum mehr zwischen 29,97fps statt 30fps bzw. 59,94 statt 60fps.**

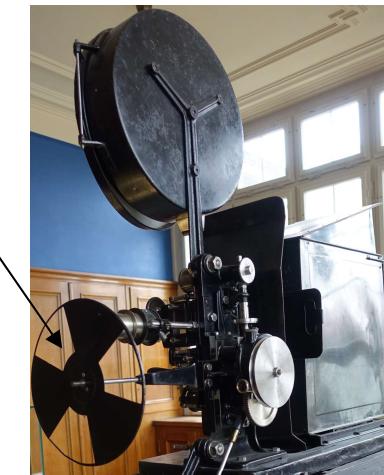
# Technische Lösungen zur Erhöhung der **Bildwiederholfrequenz**:

## Beispiel1: (Filmprojektor)

Film-Kameras zeichnen 24B/s auf. In der analogen Kinoprojektion wurde dann über eine Flügelblende im Projektor aber das stehende Bild 2x o. 3x schnell hintereinander projiziert, also mit 48/72 Hz Bild-Wiederholfrequenz (um Großflächenflimmern zu minimieren). Die Bilder enthalten weiterhin maximal 24 Bewegungsphasen/s - sie werden aber doppelt/dreifach so oft projiziert.



Quelle: www.kinoteam.de

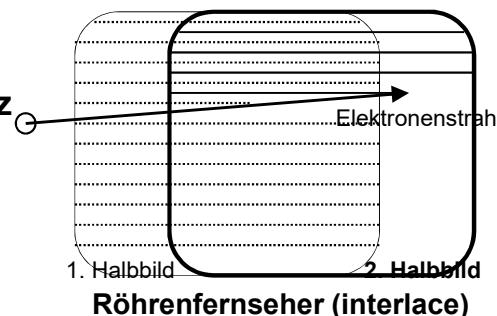


Ernemann „Imperator“ Projektor (1910)

## Beispiel2: (Röhrenmonitor)

Um Großflächenflimmern auf dem RÖHREN-Bildschirm zu vermeiden, wurden analoge TV-Bilder schon in der Kamera in zwei schnell aufeinanderfolgenden Halbbilder aufgenommen und auch so übertragen & gespeichert. Die Halbbilder werden folglich mit dem Zweifachen der Bildwechselrate (ineinandergeschoben) auf den Bildschirm geschrieben ( $\rightarrow$  Interlace-Verfahren).

Europa (PAL, Secam): 50 Halbbilder/s. USA (NTSC): 60 Halbbilder/s.

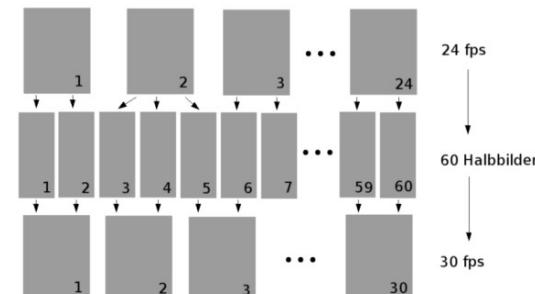


Zur Verdeutlichung sind in dieser Darstellung die Halbbilder räumlich auseinandergezogen!

## Beispiel3: (Kinofilme im TV)

Um Kinofilme (24B/s) im jeweiligen interlace-TV-System zu senden wurde ...

- in Europa einfach der Film auf 25B/s beschleunigt („Speed-up“) und in Halbbilder aufgeteilt.
- in USA in einem aufwändigen „3:2-Pulldown“-Verfahren ein 60-Halbbild/s-Signal generiert. Dabei kann es zu wahrnehmbaren Bildrucklern kommen. Ein ähnliches Problem hat man, wenn man einen BluRayDisc-Kinofilm (24p) auf einem 60 Hz-Monitor darstellen möchte.



# Technische Lösungen zur Erhöhung der **Bildwiederholfrequenz**:

## Beispiel4: (modernes TV)

Ein einfaches TV in 100Hz-Technik zeigt die einzelnen 25 Bilder/s der Videokamera einfach viermal so oft (4:1) → Großflächenflimmern ist eliminiert. Teure >100Hz-TV-Geräte berechnet pro 25B/s-Videoinput drei synthetische Zwischenbilder und präsentieren alle 4 Bilder mit 100Hz.

→ Vorteil: verbesserte (synthetische) Bewegungsauflösung

→ Nachteile: Rechenfehler führen zu Bildfehlern. Der „Kinolook“ von Spielfilmen kann durch die „scharfgezeichneten“, synthetischen Zwischenbilder zerstört werden („Soap-Effekt“). Deswegen wird für 4k/HDR-TVs oft zusätzlich der „Filmmaker-Modus“ angeboten, der auf jegliche Art *synthetischer* Zwischenbilder verzichtet.

**Alternativ können Displays mit dem schnellen Einfügen von Schwarzpausen (BFI-Black Frame Insertion) oder – falls LC-basiert – mit schnell wechselnder Panel-Beleuchtung (blinking backlight) arbeiten.** (s. Folie 172 und im Dateibereich:  
- ct\_Bildwdhfrequ\_und\_Zwischenbild.pdf  
- ct\_HFR-Daumenkino auf Speed.pdf)

## Beispiel5: (Videoausgang Grafikkarten) (s. z.B. die ersten 2 Minuten von: <https://www.youtube.com/watch?v=0b8ce30OII&list=PLWfDJ5nla8UpwShx-lzLJqcp575fKpsSO>)

Viele Grafikkarten können (bei maximaler Qualitätseinstellung), oft nur ca. 20 frames/sek neu in ihrer Render-Pipeline berechnen.

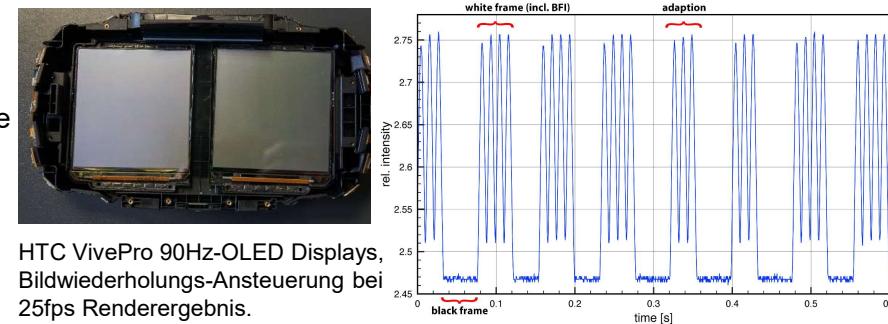
Um Großflächenflimmern zu vermeiden, steuert die Grafikkarte den Computermonitor gezielt durch Mehrfach-Auslesen ihres Bildpuffers 60 Mal/sek (alternativ 75, 120, 144 Hz) an. Ist das Verhältnis zwischen Renderergebnis (Bildwechselfrequenz) und Bildwiederholfrequenz des Monitors nicht ganzzahlig, kommt es zu Mikro-Rucklern in der Darstellung. Kann die Grafikkarte mehr frames/sek generieren als die Bildwiederholfrequenz des Monitors, kann sie über die Funktion *Vsync* auf die maximale Bildwiederholfrequenz des Monitors limitiert werden. Alternativ: der Monitor passt seine Bildwiederholfrequenz (oberhalb von 60Hz) live an die Renderrate der Grafikkarte an → Variable Refresh Rate (VRR), GSync, Freesync.

## Beispiel6: (VR-Headset)

Ein VR-Headset erzeugt ein, fast das gesamte Gesichtsfeld umfassendes, sehr helles Bild. Folglich sind die User sehr flimmerempfindlich (s. Folie95: Ferry-Porter-Gesetz + Granit-Harper-Gesetz). Hier muß der Videospeicher des Grafiksystems also entsprechend oft ausgelesen werden (> 80Hz). Damit Kopf- und Körperbewegungen in der VR bestmöglich visuell umgesetzt werden, sollte das Grafiksystem idealerweise eine identisch hohe Bildwechselfrequenz rendern können. Bei komplexen VR-Szenen (oder 360°-Video) ist dies aber oft nicht möglich.

Die Methoden Asynchronous SpaceWarp (ASW) von Oculus oder auch Motion Smoothing von HTC springen z.B. an, sobald die Bildrate unter 90 fps sinkt. In diesem Fall wird die Renderrate auf konstante 45 fps fixiert und künstliche Zwischenbilder berechnet. Dadurch soll stets eine flüssige und flimmerfreie Bildwiederholfrequenz von 90Hz gewährleistet sein.

Tatsächlich kommt es jedoch immer wieder zu Interpolationsfehlern, da auch die Position des Nutzers sowie die Lage von sich bewegenden Objekten für die Zwischenbildberechnung mit einbezogen werden müssen.



# Farbsehen und die zwei zentralen Farbräume der Bildverarbeitung

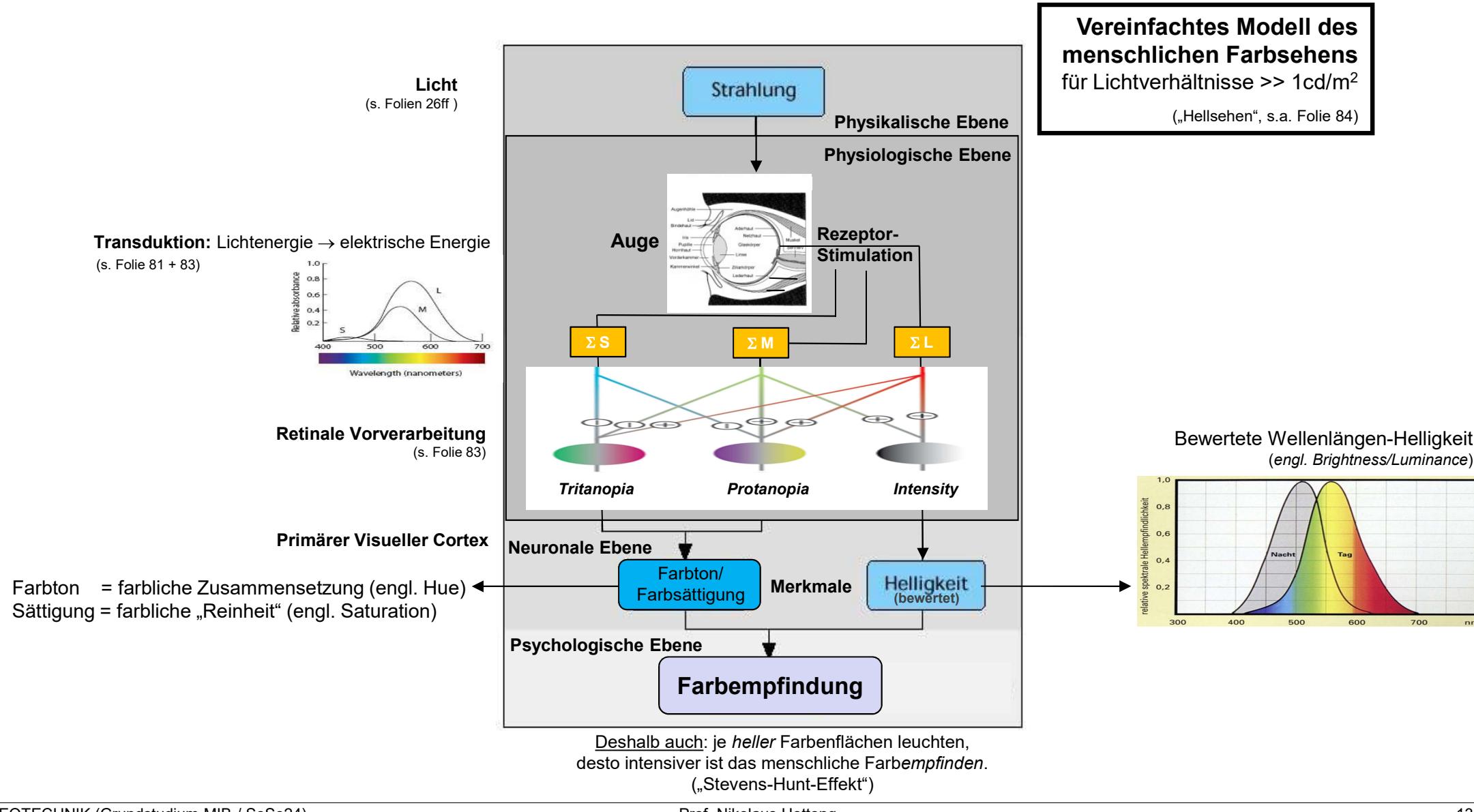
# Was wir in dieser Runde lernen:

- „Farbe“ ist eine visuelle Empfindung (engl. *sensation*) im Gehirn, kein Naturphänomen!  
Auslöser der Empfindung sind Spektralverteilungen im sichtbaren Bereich des Lichts.
- Die retinale Vorverarbeitung im Auge kann mathematisch gut nachmodelliert werden, so daß der von einem Lichtspektrum ausgelöste neuronale Gesamtrez zum Gehirn sich als x,y,z- Vektor beschreiben lässt (z.B. CIE-Modellierung oder  $I$ ,  $C_T$ ,  $C_P$ ).
- Die Gesamtempfindung „Farbe“ kann vom Menschen nochmals in die Teil-Empfindungen Farbton, Farbsättigung und Helligkeit unterschieden werden .
- Der Mensch kann kleine/mittlere Farbton-Unterschiede nicht *absolut* bestimmen (nur im direkten Vergleich). Technische *Farbreproduktionssysteme* machen sich diese „Defizit“ zu nutze.  
(→ vereinfachte Farbvalenz-Modelle).
- Was ist der konzeptionelle Unterschied zwischen additiven und subtraktiven technischen Farbreproduktions-Systemen?
- Farbvalenz-Modelle definieren sich über die Komponenten FarbRAUM und FarbMODELL
- Technische Geräte werden qualitativ über ihren ausfüllbaren FarbKÖRPER im Farbraum definiert.
- In der Videotechnik/Computergrafik wird meist mit den additiven *Signal-Farträumen* RBG oder YUV gearbeitet. Diese beinhalten meist schon eine wahrnehmungsrechte Gammakorrektur!
- Der Signal-Farbraum YUV (digital =  $YC_bC_r$ ) ermöglicht durch sog. *Chroma-Subsampling* eine deutliche Bandbreiten-Einsparung, OHNE visuellen Qualitätsverlust beim menschl. Betrachten.

# Farbsehen = Empfinden (Sinneswahrnehmung):

Farbe ist *kein physikalisches Naturphänomen*, sondern eine individuelle Reizauswertung („sensation“) der vorverarbeiteten Signale aus dem menschlichen Auge durch spezialisierte Gehirnzellen im visuellen Cortex.

⇒ Farben (in unserem Begriffssinn) existieren nur für Menschen!



# Einige „neuro - optische Effekte“ des Menschen bez. Farbwahrnehmung:

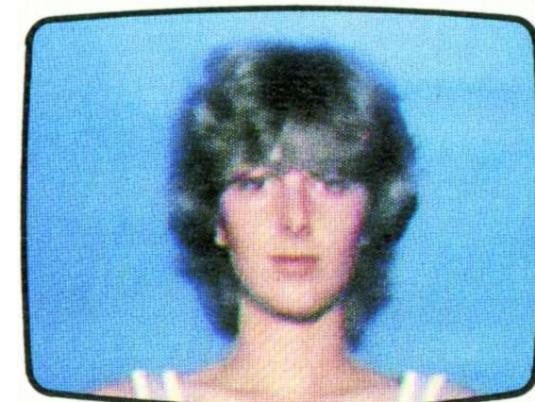
## *Farbkonstanz, chromatische Adaption und Metamerie*

Das *Natürliche Licht* verändert seinen „Wellenlängen-Mix“ je nach Tageszeit und Bewölkung.

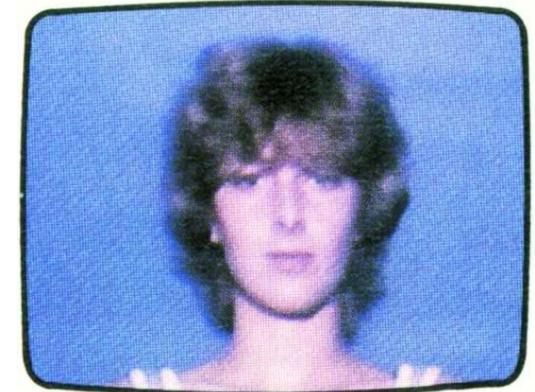
⇒ je nach Tageszeit und Bewölkung reflektieren *natürlich beleuchtete* Gegenstände unterschiedliche Spektren zurück.

Trotzdem empfinden wir IMMER eine Banane als gelb, eine Tomate als rot und ein leeres Blatt Papier als weiß! Diese evolutionäre Eigenschaft von Auge & Gehirn bezeichnet man als **Farbkonstanz**.

Biologische Erklärung: Wird eine Szene mit einem starken Farbstich betrachtet, werden die Zapfen eines Typs stärker gereizt als die anderen. Für Letztere erscheint die Szene dunkler, **weshalb diese sich nach geraumer Zeit empfindlicher adaptieren**. Das visuelle System balanciert sich damit auf die vorherrschende Beleuchtungssituation, womit die Wahrnehmung von Farben einer Szene für das menschliche Auge (nahezu) unabhängig vom Spektrum der Lichtquelle geschieht. (Reinhard, Erik et al. »Color Imaging: Fundamentals and Applications, S.532ff).



Welche Farbe haben die Träger des Kleides ?



### ERKENNTNIS:

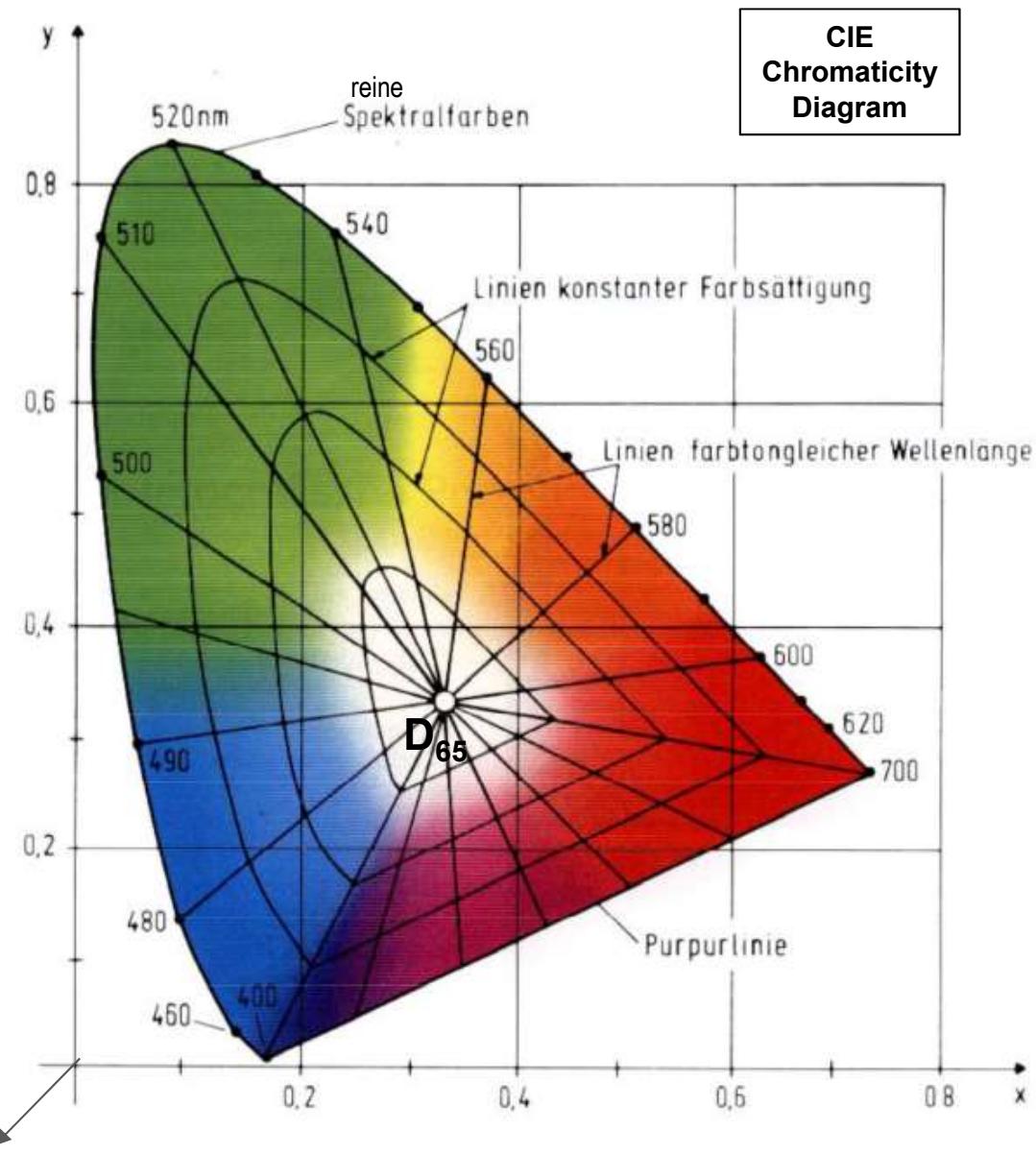
Lichtreize mit unterschiedlicher, spektraler Zusammensetzung rufen im Gehirn also die gleiche Farbempfindung (= Farbvalenz) hervor.

⇒ für den Menschen ist folglich der faktische Wellenlängenmix nicht die entscheidende Information, sondern die **Farbvalenz** = „Wie kommt mir das Licht vor“ (Anm.: Wellenlängen-Mixes unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung, die beim Menschen die gleiche Farbempfindung auslösen, bezeichnet man als **metamer** !)

⇒ Funktionierende Technische Farbsysteme (z.B. Video) müssen auf Basis der **Farbvalenz** arbeiten !

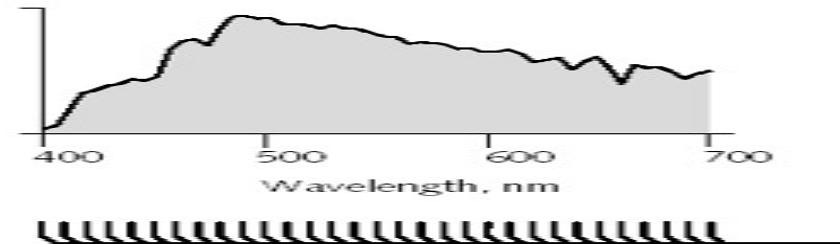
# CIE 1931: alle Lichtreize, die Menschen wahrnehmen können

CIE = Commission International de l'Eclairage

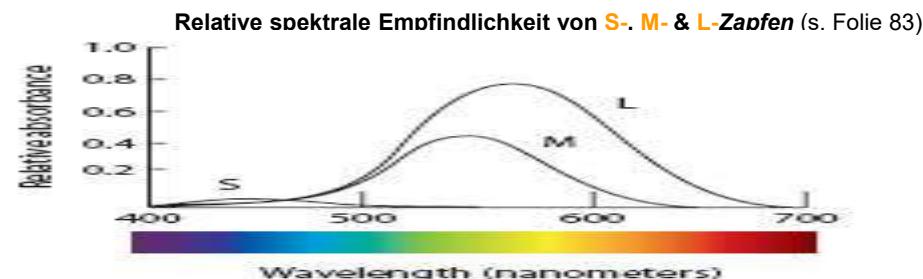


CIE  
Chromaticity  
Diagram

Ansatz: der für den Menschen mit den Augen wahrnehmbare Wellenlängenbereich (400 - 770nm) wird in 32 Einzelwellen unterteilt.



Diese 32 Einzelwellen werden schrittweise monochromatisch aufgerufen und über mathematische **Faltung mit den spektralen SML-Gewichtungen** der Zapfen zu  $x,y,(Y)$  - **Farbvektoren** (Farbvalenz) berechnet.



Das Ergebnis ist (zweidimensional gesehen - x,y) die äußere „Hufeisenform“. Die **Farbvalenz**-Punkte in der vom Hufeisen „umschlossenen“ **Fläche** ergeben sich nun als additives Misch-Ergebnis aller denkbar vorkommenden 32!- Wellenlängenkombinationen ( $= 2,63130836933693530167 \cdot 10^{35}$ ). Jede besitzt eine eindeutige x,-y -Koordinate.

Der „Schwerpunkt“ des Gebildes (an dem sich alle Wellenlängen gleichstark addieren) ist der WEISSSPUNKT „E“ oder alternativ der Punkt „D<sub>65</sub>“ („65“ verweist auf 6500 Kelvin als Farbtemperatur des „weißen“ Lichts)

D<sub>65</sub> - Koordinaten:  $x \approx 0,3 / y \approx 0,3$

# Farbsysteme / Farbmodelle:

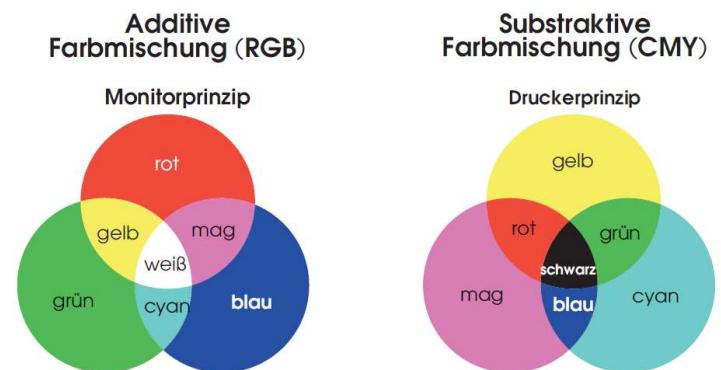
## FRAGE:

Wenn die Reizauswertung im visuellen Cortex ein individueller Vorgang ist, wie können sich dann Menschen möglichst objektiv über Farben verständigen und Farben einheitlich reproduzieren ?

## Antwort:

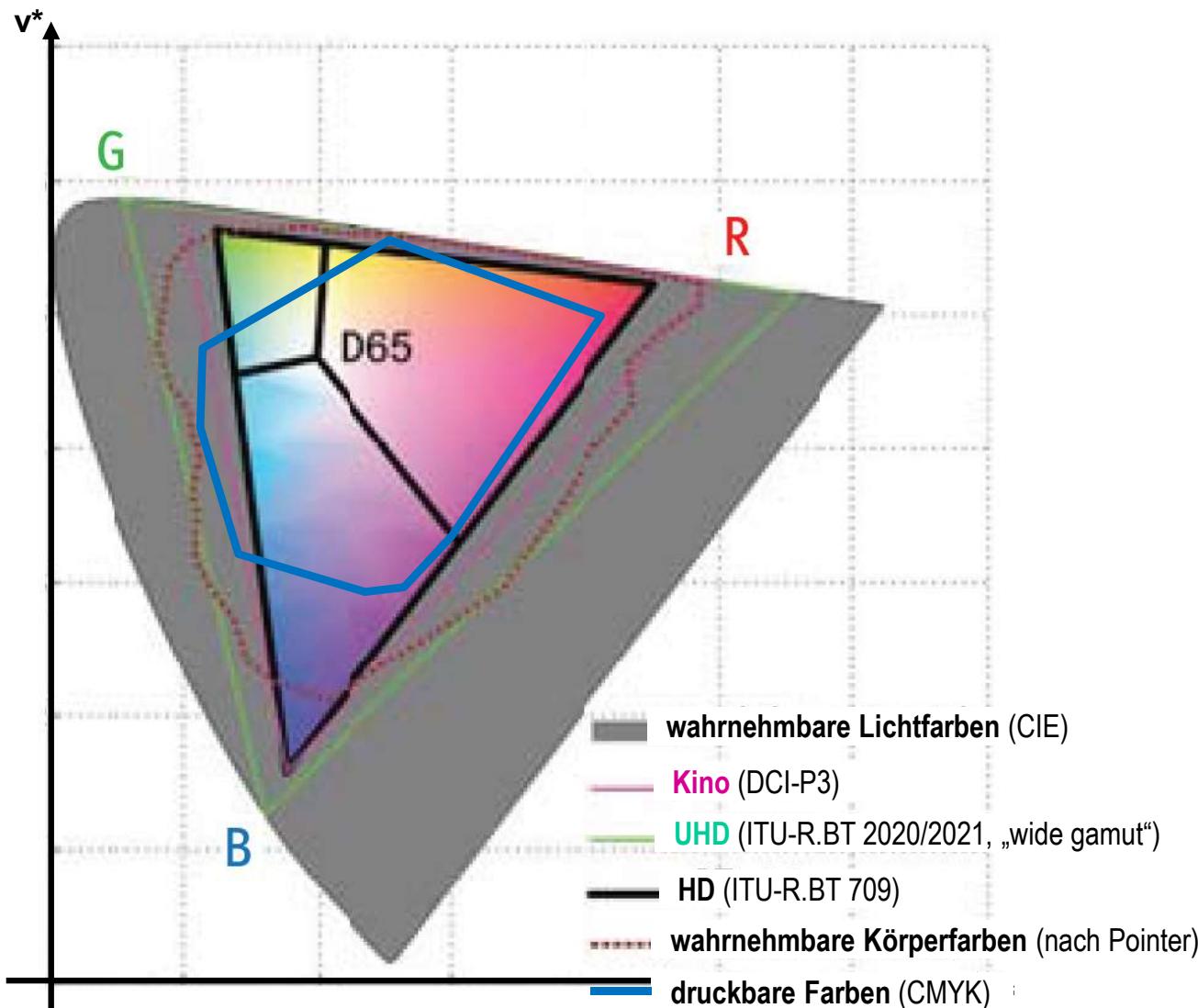
(durch vergleichende Farbkarten **oder**) durch vereinfachende Farb**valenz**-Modelle !

- Technischer Reproduktionsansatz1:  
additives Farbsystem **RGB** (→ Video)
- Technischer Reproduktionsansatz2:  
subtraktives Farbsystem **CMYK** (→ Drucktechnik)



# Technische Farbreproduktion:

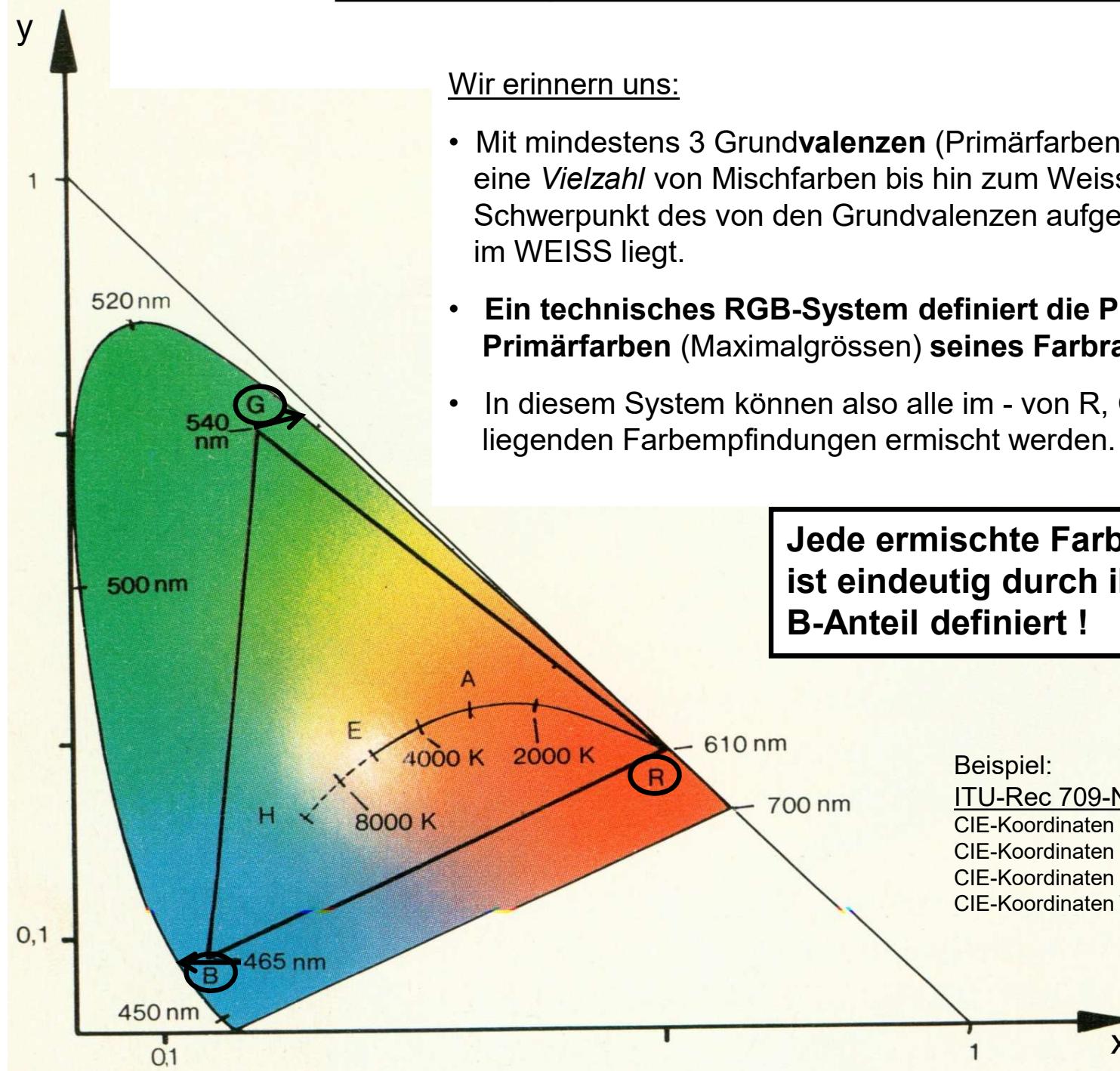
Da der Mensch evolutionär-bedingt nicht in der Lage ist Farben absolut zu bestimmen, kann für die technische Reproduktion mit einem kleineren Subset des CIE-Wahrnehmungsbereichs gearbeitet werden. Die Eckpunktwahl für die Primärvalezenzen bestimmen die technisch erzielbaren Farben des jeweiligen Systems



## Fragen:

- Was passiert mit den Farben, wenn Sie einen Kinofilm im Fernsehen zeigen wollen ?
- Was passiert, wenn Sie einen druckbaren, farbigen Flyer am Bildschirm erstellen möchten ?

# Grundlagen des RGB-Farbmodells:



# Definition FARBRAUM / FARBMODELL / FARBKÖRPER ?

## Definition: Farbraum

Ist ein Koordinatensystem, aufgespannt von den farb-beschreibenden Größen.

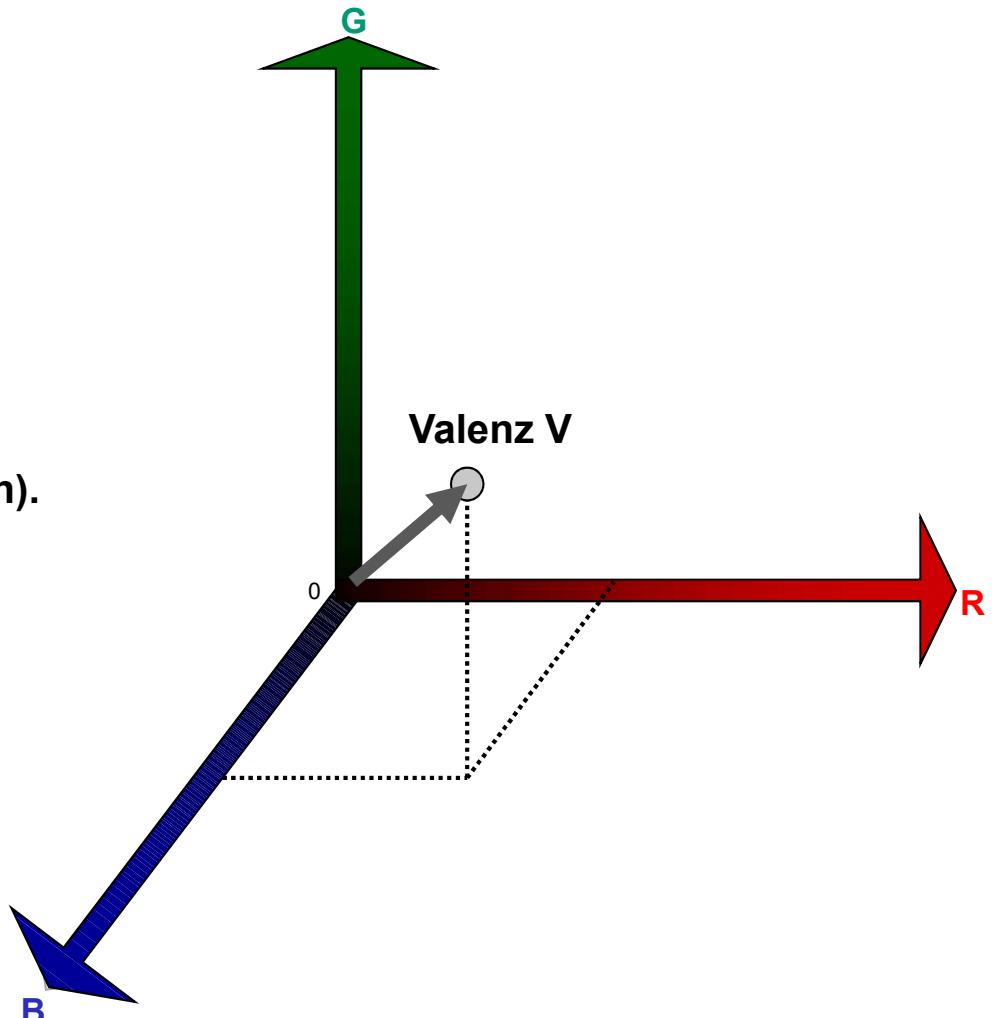
## Definition: Farbmodell

Ist die mathematische Logik, mit der eine Farbe („Farbort“) im Farbraum beschrieben werden kann (meist als Koordinaten).  
z. Bsp.:

$$V_{(\text{Valenz})} = \begin{pmatrix} \text{Anteil} \\ \text{Anteil} \\ \text{Anteil} \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} R_{\text{OT}} \\ G_{\text{RÜN}} \\ B_{\text{LAU}} \end{array}$$

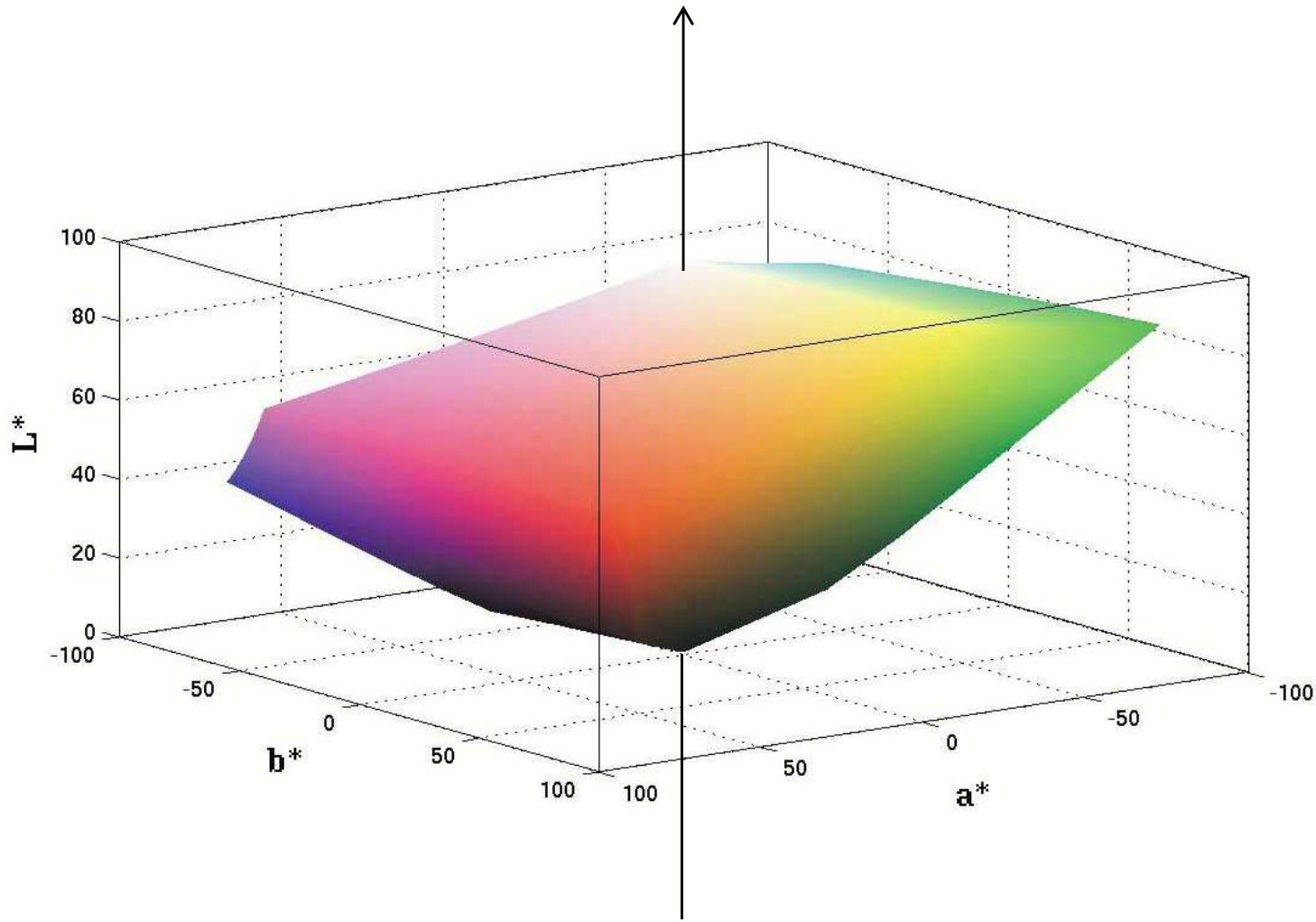
## Definition: Farbkörper

umfasst die *Summe aller Farborte V*, die ein *technisches Gerät* tatsächlich abbilden kann (engl. „gamut“)



Beispiel:

## Farbkörper eines Röhrenmonitors, dargestellt im CIE – L<sup>\*</sup>a<sup>\*</sup>b<sup>\*</sup> Metafarbraum

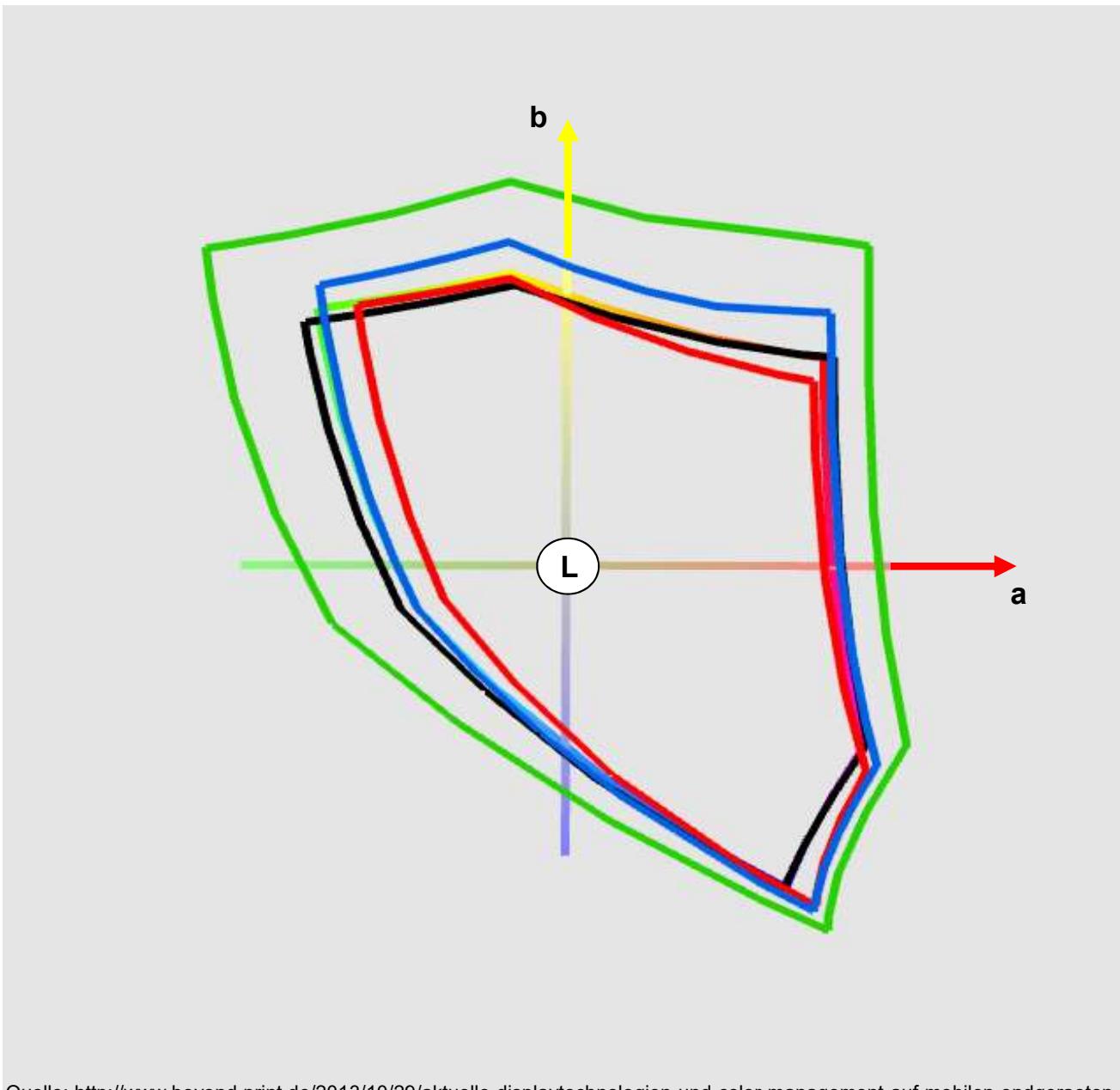


**Farbkörper** = die Summe aller Farborte, die ein **technisches Gerät** tatsächlich darstellen o. aufnehmen kann (engl. „gamut“)

Beispiel:

# Farbkörper typischer Smartphone-Displays

(2D-Aufsicht im CIE – L\*a\*b\* Metafarbraum)

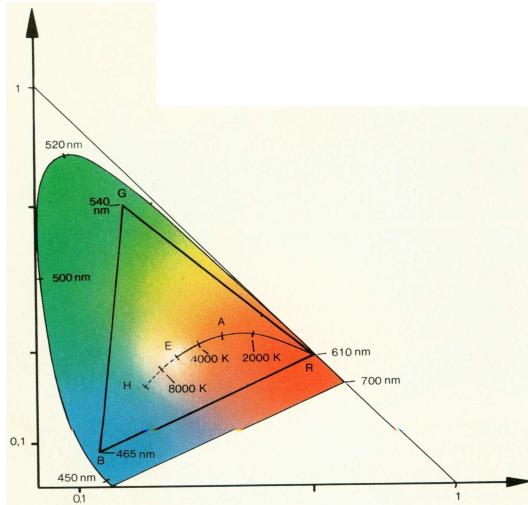


Farbkörper von

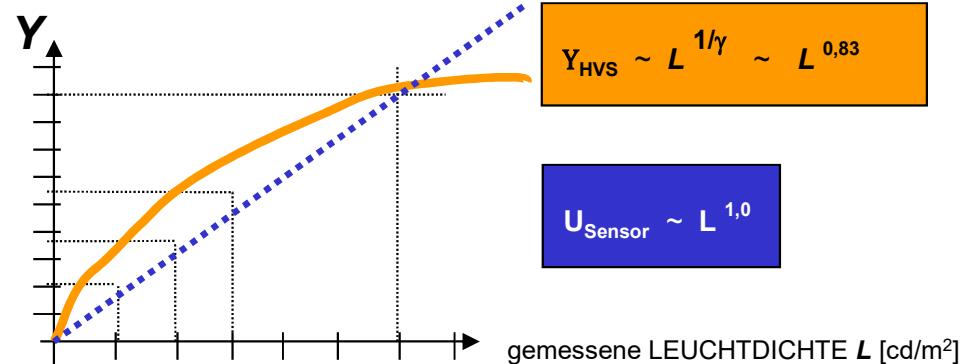
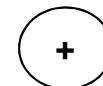
- iPhone 5 (schwarz),
  - Nexus 4 (rot),
  - Experia Z (blau),
  - Galaxy S4 (grün)
- im Vergleich zur sRGB-Empfehlung von Adobe  
( $\approx$  identisch mit schwarz).

Quelle: <http://www.beyond-print.de/2013/10/29/aktuelle-displaytechnologien-und-color-management-auf-mobilen-endgeraeten>

# Grundansätze der RGB-Signaltechnik:



- Ein technisches RGB-System definiert die Punkte „R“, „G“ und „B“ als die Primärfarben (Maximalgrößen) seines Farbraumes !



- Eine **wahrnehmungsbezogene Gammakorrektur** ist in allen Videoaufnahmesystemen implementiert, um das nichtlineare Kontrastempfinden des menschlichen Auges zu simulieren (s. Folie 109).

In der VideoSIGNAL-Ebene (Kabel, Aufzeichnung, Postpro, etc.) wird also - sprachlich korrekt - mit den *gammakorrigierten Signalen R', G' und B'* gearbeitet.

# Die Implikation von Gamma in RGB – Videosignalen:

Eine **wahrnehmungsbezogene Gammakorrektur** ist in allen Videoaufnahmesystemen implementiert, um das nichtlineare Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges zu simulieren (s. Folie 109).

$$\gamma_{\text{wahrnehmungsbezogen}} = 1,2 \text{ (Kehrwert } 0,83)$$

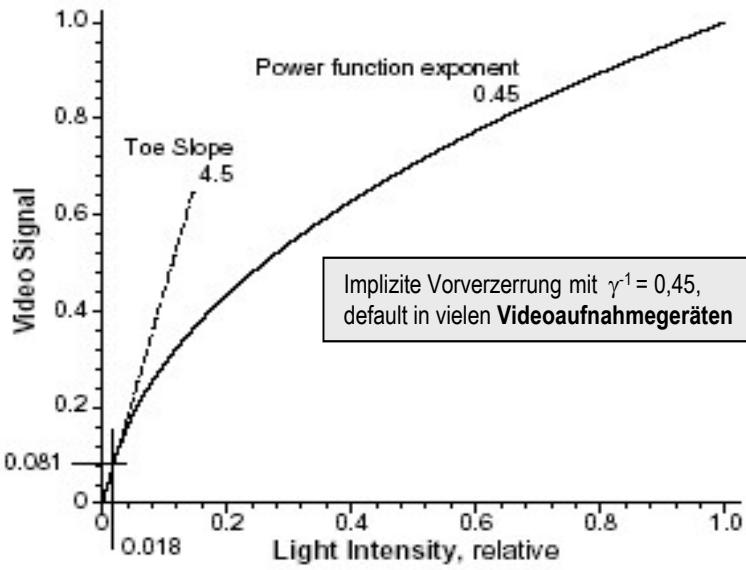
Aufgrund des nichtlinearen Leuchtverhaltens früherer Röhrenmonitore hat sich aber historisch eine **technische Gammakorrektur** entwickelt, welche *schon in der Kamera* sowohl das Helligkeitsempfinden des Auges **sowie** das ähnliche nichtlineare Leuchtverhalten der Displays mit berücksichtigt.

$$\gamma_{\text{SD\_gesamt}} = \gamma_{\text{wahrnehmungsbezogen}} + \gamma_{\text{Bildröhre}} = 1,2 + 1,0 = 2,2 \text{ (Kehrwert } 0,45)$$

Beachte : Zusammenfassung von potenzierenden Verarbeitungsschritten  
= Addition der Exponenten (Potenzgesetz).

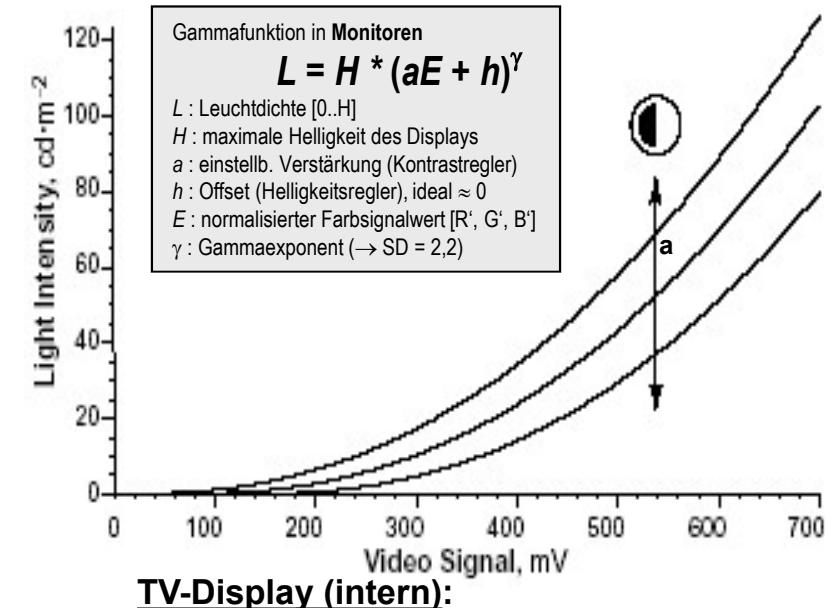
$$\gamma_{\text{HD\_gesamt}} = \gamma_{\text{wahrnehmungsbezogen}} + \gamma_{\text{HD flat panel display}} = 1,2 + 1,2 = 2,4 \text{ (Kehrwert } 0,417)$$

$$\gamma_{\text{Kino\_gesamt}} = \gamma_{\text{wahrnehmungsbezogen}} + \gamma_{\text{DCI-Projektor}} = 1,2 + 1,4 = 2,6 \text{ (Kehrwert } 0,385)$$



Kamera (intern):

$$\begin{aligned} \text{R'-Signal} &= R_{\text{SENSOR}} \text{ gammakorrigiert} &= R_{\text{Sensor}}^{0,45} \\ \text{G'-Signal} &= G_{\text{SENSOR}} \text{ gammakorrigiert} &= G_{\text{Sensor}}^{0,45} \\ \text{B'-Signal} &= B_{\text{SENSOR}} \text{ gammakorrigiert} &= B_{\text{Sensor}}^{0,45} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} R_{\text{dot}} &\approx \text{R'-Signal}^{2,2} \\ G_{\text{dot}} &\approx \text{G'-Signal}^{2,2} \\ B_{\text{dot}} &\approx \text{B'-Signal}^{2,2} \end{aligned}$$

# Exkurs: „Warum sieht mein Film am PC-Monitor so anders aus als am Fernseher?“

Hier einmal konkrete Gammawerte von typischen Computermonitoren:

Bsp.: Monitortest aus ct 02/2009

## Flachbildschirme mit LED-Backlight – weißes

## – farbiges

Produktbezeichnung	V22 Verilino	LED Cinema Display 24	EV2411WH	HL20	AL 2216WL bd
Hersteller	AOC	Apple	Eizo	Samsung	Acer
Garantie LCD / Backlight [Jahre]	3 / 3, inkl. Vor-Ort-Austauschservice	2/2	5 / 5, Vor-Ort-Austauschservice	3 / 3, Vor-Ort-Austauschservice	3 / 3, inkl. Vor-Ort-Austauschservice
max. Pixelfehler <sup>1</sup>	Klasse II	Klasse II	Klasse II	Klasse II	Klasse II
Panel / Größe / Typ / Hersteller	21,6" / TN / CPT	24" / IPS / k.A.	24" / TN / k.A.	20,1" / VA / Samsung	22" / TN / MO
Pixelgröße	0,277 mm (90 dpi)	0,27 mm (94 dpi)	0,27 mm (94 dpi)	0,255 mm (99,6 dpi)	0,282 mm (90 dpi)
Standardauflösung / Format	1680×1050 / 16:10	1920×1200 / 16:10	1920×1200 / 16:10	1600×1200 / 43	1680×1050 / 16:10
sichtbare Bildfläche / -diagonale	46,47 cm × 29,17 cm / 54,86 cm	51,84 cm × 32,4 cm / 61,1 cm	51,84 cm × 32,4 cm / 61,1 cm	40,8 cm × 30,6 cm / 51,1 cm	47,38 cm × 29,61 cm / 55,9 cm
Videoeingang	Sub-D, HDMI	MiniDisplayPort	Sub-D, DVI-D	DVI-D, DVI-I	Sub-D, DVI-I
HDCP an DVI / HDMI	✓	nicht messbar	✓	–	✓
Bildfrequenz zul./empf.	56–75 Hz analog / 60 Hz	k.A. / 60 Hz	55–76 Hz analog / 60 Hz	56–85 Hz / 60 Hz	56–76 Hz analog / 60 Hz
Zeilenfrequenz / Videobandbreite	30–80 kHz / 165 MHz	k.A. / k.A.	31–94 (analog); 31–76 (digital) kHz / 202,5 MHz	30–92 kHz / 162 MHz	30–82 kHz / 135 MHz
Farbmodi Preset / User	warm, normal, kalt, sRGB / ✓	keine	in 500-K-Schritten von 4000 bis 10000K / ✓	warm 1–5, kalt 1–6, sRGB / ✓	warm, kalt, ntsc / ✓
Bildpresets	Standard, Text, Internet, Film, Spiel, Sport	keine	sRGB, Text,picture, Movie, Custom	Benutzer, sRGB, AdobeRGB, Emulation, Kalibrierung	Text, Standard, Grafik, Film
Gammawert soll / ist <sup>2</sup>	2,2 / 2,05	✗ 1,82	2,2 / 1,86	2,2 / 1,88	2,2 / 1,78
Interpolation: abschaltbar / selektiv / Vollbild / Kantenglättung	– / ✓ / ✓ / –	– / – / ✓ / –	✓ / ✓ / ✓ / ✓ (5 Stufen)	– / – / ✓ / ✓ (13 Stufen)	– / – / ✓
LCD-dreh / höhenverstellbar / Portrait-Mod.	– / – / –	– / – / –	✓ / ✓ / ✓	✓ / ✓ / ✓	– / – / –
VESA-Halterung / Kensington-Lock	– / ✓	– / –	✓ (10 cm) / ✓	✓ (10 cm) / ✓	✓ (10 cm) / ✓
Rahmenbreite	seitl. 3 cm, oben 3,4 cm, unten 8,4 cm	seitlich und oben 2,5 cm, unten 3,2 cm	seitlich 2,2 cm, oben und unten 2 cm	seitlich und oben 1,8 cm, unten 3,2 cm	rundum 2 cm
weitere Ausstattung	Lautsprecher (2×1W), USB-Webcam	Lautsprecher (2×1W), Netzteil intern, USB-Webcam, USB-Hub (3 Ports)	Netzteil intern, Helligkeitssensor	USB-Hub (2 Ports), Netzteil intern, Colorimeter, Lichtschutzblenden	
Lieferumfang	Kabel: Sub-D, Netz; Netzadapter; Handbuch auf CD, Kurzanleitung	Kabel: Mini DisplayPort, USB, Netz; Handbuch, Handbuch auf CD, Kurzanleitung	Kabel: Sub-D, DVI, Audio, Netz; Handbuch auf CD, Kurzanleitung	Kabel: Sub-D-DVI, DVI, USB, Netz; Handbuch auf CD, Kurzanleitung, CD (Treiber, Monitorbild, Portrait-Software)	
Maße (B×H×T) / Gewicht	52,6 cm × 43,8 cm × 19 cm / 3,8 kg	57,3 cm × 47,8 cm × 19,7 cm / 9,4 kg	56,6 cm × 45,6–53,8 cm × 20,9 cm / 10,2 kg	44,8 cm × 39,1 cm × 22 cm / 7,6 kg	53,8 cm × 40,5 cm × 19,2 cm / 4,9 kg
Prüfzeichen	TÜV GS, ISO 13406-2	ISO 13406-2	TCO03, TÜV GS, TÜV Ergo, ISO 13406-2	TC099, ISO 13406-2	TC003, TÜV GS, TÜV Ergo, ISO 13406-2

Nachdenken:

Könnte es für einen LCD-Monitorhersteller von Vorteil sein, ab Werk den gamma-Wert etwas niedriger zu setzen?

**Konsequenz:** Für Film-/Videodarstellung muss Gamma nach-justiert werden (am einfachsten in der Lookup Table/LuT der Grafikkarte)

**Problematik Medienproduktion:** Bild-Begutachtung an Computermonitoren kann nur nach ausgiebiger Kalibration von Monitor+Graka stattfinden!

# Technische Grundlagen des RGB - Videosystems:

1. Jede ermischte Farbempfindung  $V$  ist eindeutig durch ihren R-Anteil, G-Anteil und B-Anteil (die sog. Farbwertanteile) definiert !

$$V(\text{alenz}) = \text{R-Anteil} + \text{G-Anteil} + \text{B-Anteil}$$

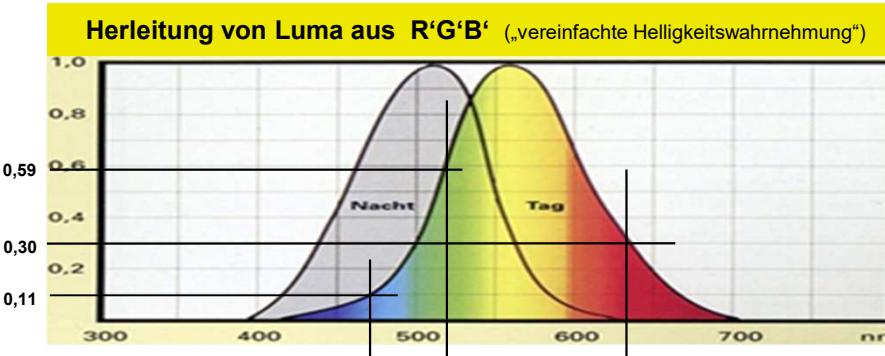
Reale Videosysteme ( $\rightarrow$  Gammakorektur):  $V = R' + G' + B'$

2. Selbst die Leuchtdichte (Luma)  $Y'$  eines Farbpunktes kann aus diesen Werten (aufgrund der Helligkeitsempfindlichkeit des Auges bezüglich  $\lambda_{\text{rot}}$ ,  $\lambda_{\text{grün}}$  und  $\lambda_{\text{blau}}$ ) abgeleitet werden !

$$Y' = 0,30 * R' + 0,59 * G' + 0,11 * B' \quad (\text{TV analog})$$

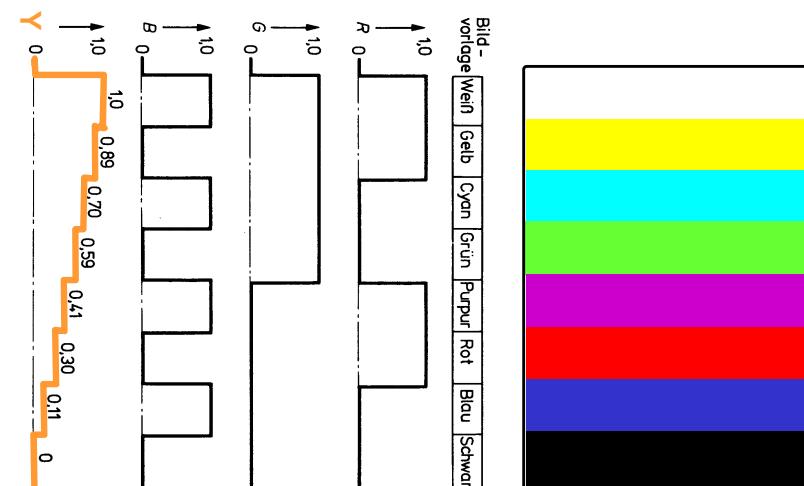
Historische Anpassungen:  $E'_Y = 0,299 E'_R + 0,587 E'_G + 0,114 E'_B$  (1981, ITU-R BT.601)

$E'_Y = 0,2126E'_R + 0,7152E'_G + 0,0722E'_B$  (1990, ITU-R BT.709)



## Technisches Beispiel: Farbwertanteile und Leuchtdichte der Normfarbbalkenfolge („Testbild“)

Bildvorlage	R'	G'	B'	Y'
Weiß	1	1	1	1,00
Gelb (Rot und Grün)	1	1	0	0,89
Cyan (Grün und Blau)	0	1	1	0,70
Grün	0	1	0	0,59
Purpur (Rot und Blau)	1	0	1	0,41
Rot	1	0	0	0,30
Blau	0	0	1	0,11
Schwarz	0	0	0	0



# Transformationscodierung: vom RGB- in den YUV- Farbraum

- Aufgrund der *historisch geforderten Kompatibilität von Schwarzweiß- und Farbfernsehen* wurde bei analogen VIDEOGERÄTEN intern schon früh mit dem **RGB-Differenzverfahren** (Chrominanzkomponenten) gearbeitet:

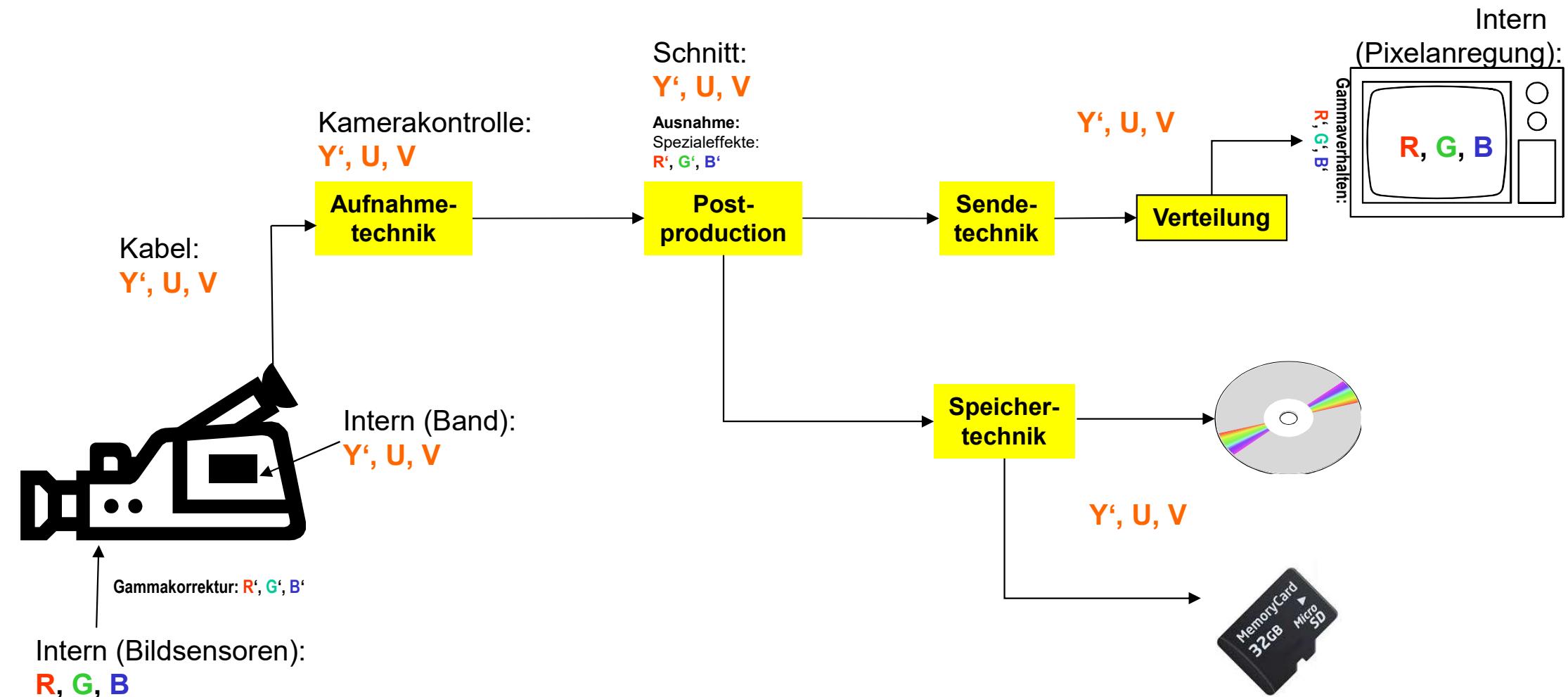
⇒ R', G', B' werden transformiert in  $Y'$  und  $B'-Y', R'-Y'$  und neu bezeichnet als

Video-**Helligkeit (Luma)** und Video-**Farbarten (Chroma)**  
 Abk.: **U**, **V**

- Zwischen Videogeräten fand die Bildübertragung dann mittels 1 x Luma- und 2 x Chroma-Signalen statt! Schwarzweiß-Geräte werten nur den Y'-Anteil aus. Farbgeräte alle Anteile und regenerieren sich daraus wieder die R', G' und B'-Komponenten (über die sog. G-Y - Matrix).
- Technischer Vorteil (noch heute!):**  
 Da der Mensch relativ unempfindlich gegen Chromawechsel in benachbarten Bildbereichen ist (→ siehe Folie 106), können die Chromasignale U,V mit wesentlich geringerer Bandbreite als das Helligkeitssignal Y' übertragen werden (ohne Qualitätsverluste in der menschl. Wahrnehmung)  
 → **Chroma-Subsampling** (wird daher konsequent genutzt - auch in der digitalen Videotechnik und Computergrafik)

# Beispiele: WO wird mit WELCHEM Farbraum gearbeitet?

(Zur Erinnerung: R, G, B bzw.  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  und  $Y'$ ,  $U$ ,  $V$  - Farbraum sind mathematisch jederzeit ineinander überführbar !)

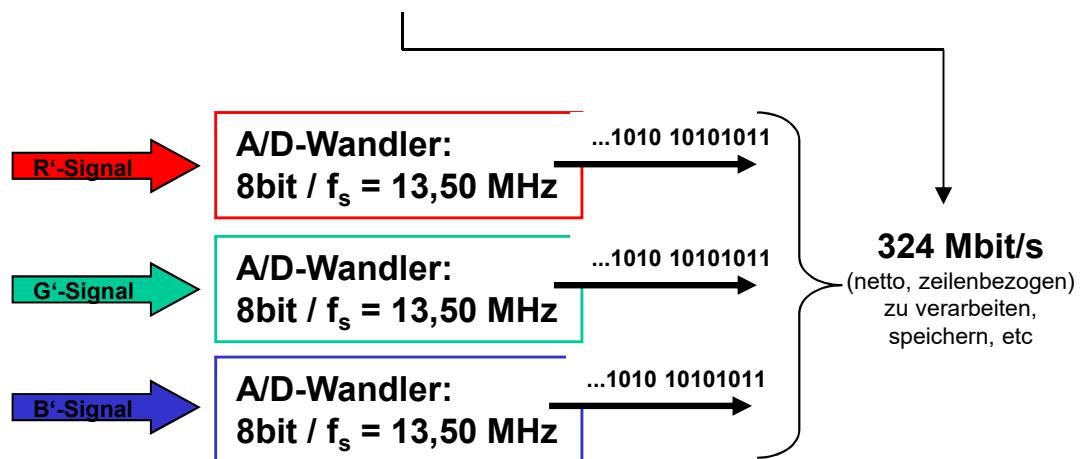


# Beispiel: Chroma-Subsampling bei 4:3-Digital Video Aufnahme

- Nur bei aufwendigen Videoeffekten digitalisiert man die ursprünglichen  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  - Signale; alle drei mit der gleichen Abtastrate  $f_{\text{sample}}$ .

Dies realisiert sehr gute Abbildungsqualität, führt aber zu enormen Datenmengen an den Ausgängen der A/D-Wandler.

Für Systeme mit höherer Pixel-Auflösung <sup>(HD)</sup> erhöht sich die Datenrate linear!!

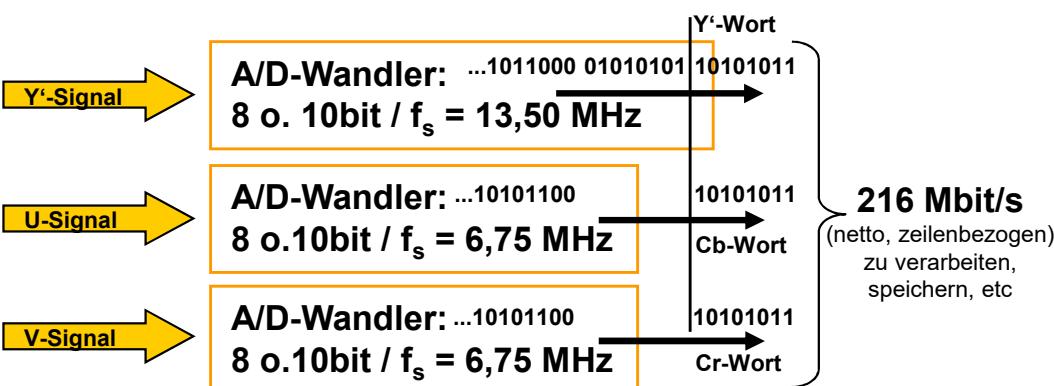


- Überwiegend digitalisiert man in der Videotechnik daher bevorzugt Luma- und Chroma-Signale .

Dabei wird von Beginn an berücksichtigt, dass das menschliche Auge örtl. Farbartunterschiede wesentlich unschärfer wahrnimmt als Helligkeitsunterschiede (siehe Folie 106).

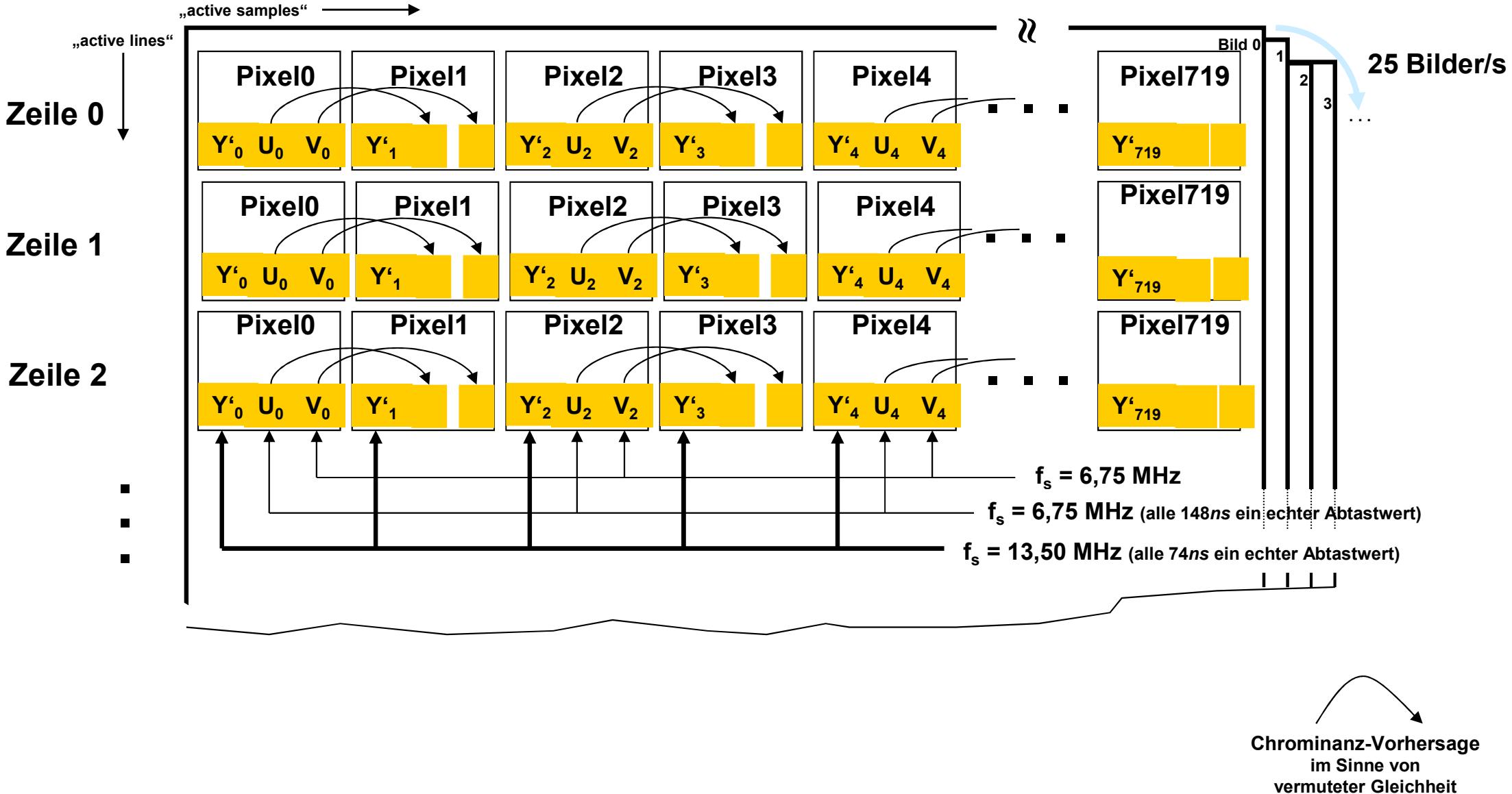
*Dies bedeutet, dass man sich bei der Abtastung von U und V (innerhalb einer Videozeile) auf die halbe Abtastrate von Y' beschränken kann.  
→ engl. Chroma-Subsampling*

Dieses Vorgehen stellt oft den besten Kompromiss aus Bildqualität und zu verarbeitender Datenmenge dar !



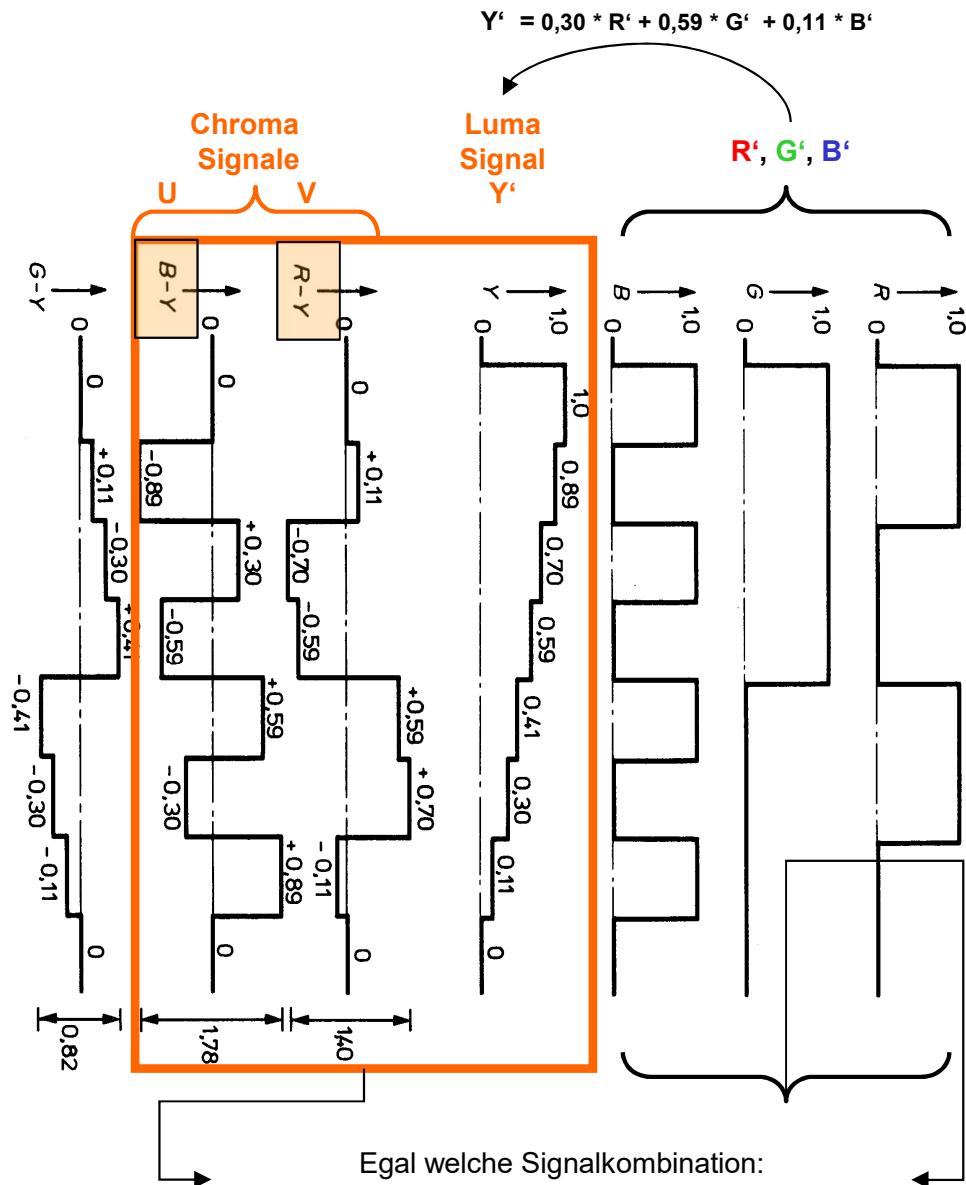
# Beispiel: Chroma-Subsampling in einer 4:3/SD-Darstellung

## Standard-Video (4:3 / 576 / p / 25) 4:2:2 - Chroma Subsampling



# Signalkombinationen zur Erzeugung gleicher Farbinformationen:

(Beispiel: Normfarbbalken-Folge)



## Internat. Definition der Video-Normfarbbalken-Folge

Bildvorlage	Y'	B'-Y'	R'-Y'
Weiß	1,00	0	0
Gelb	0,89	-0,89	+0,11
Cyan	0,70	+0,30	-0,70
Grün	0,59	-0,59	-0,59
Purpur	0,41	+0,59	+0,59
Rot	0,30	-0,30	+0,70
Blau	0,11	+0,89	-0,11
Schwarz	0	0	0

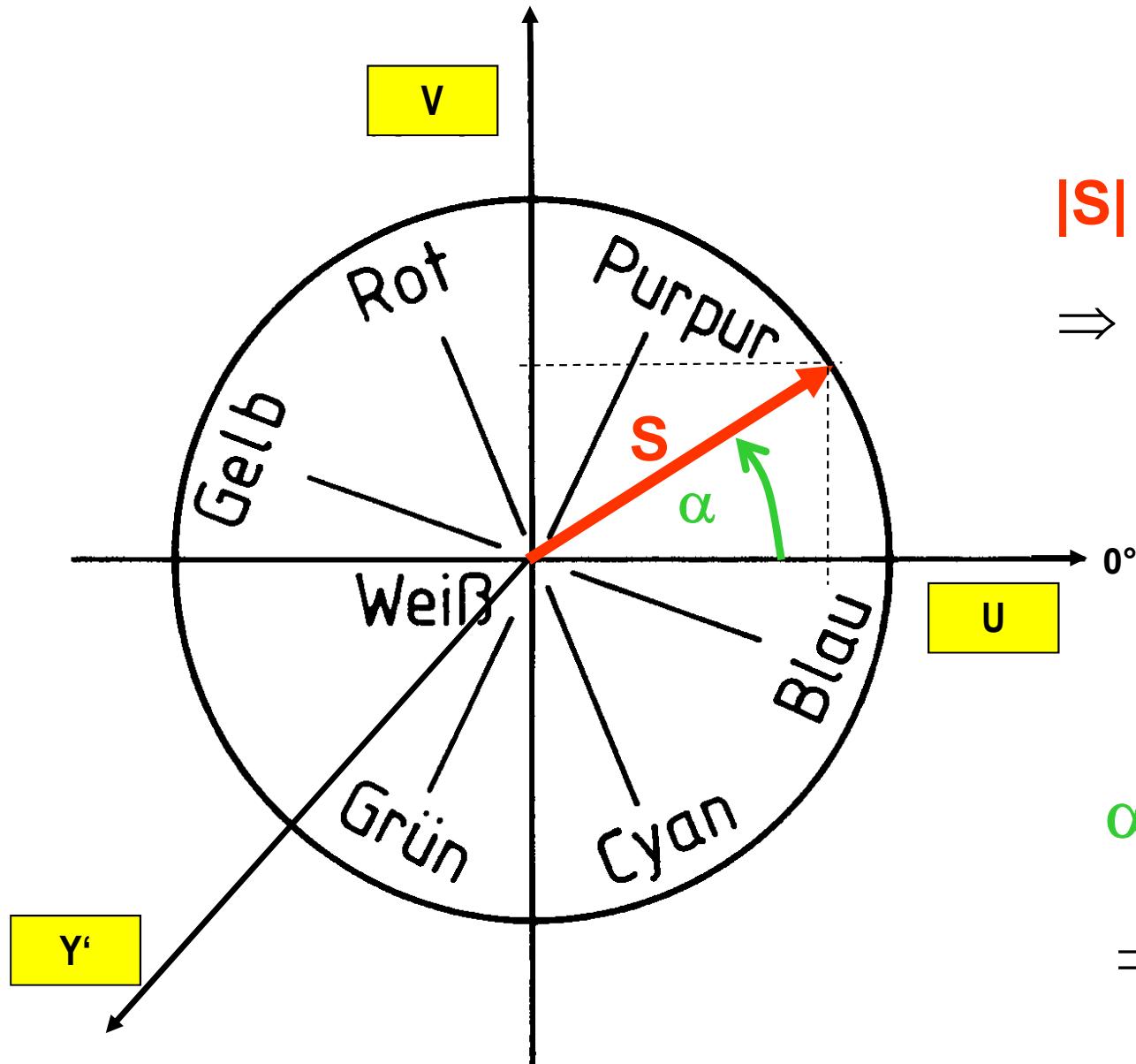
$$R' = (R'-Y') + Y'$$

$$G' = \frac{Y' - 0,3R' - 0,11B'}{0,59}$$

$$B' = (B'-Y') + Y'$$

# Farbmerkmale: Bestimmung im Y', U, V – Farbraum:

Farbwerte können (vereinfacht) als zweidimensionale VEKTOREN im U / V - Farbraum interpretiert werden



$$|S| = \sqrt{(R' - Y')^2 + (B' - Y')^2}$$

⇒ Merkmal **Farbsättigung**

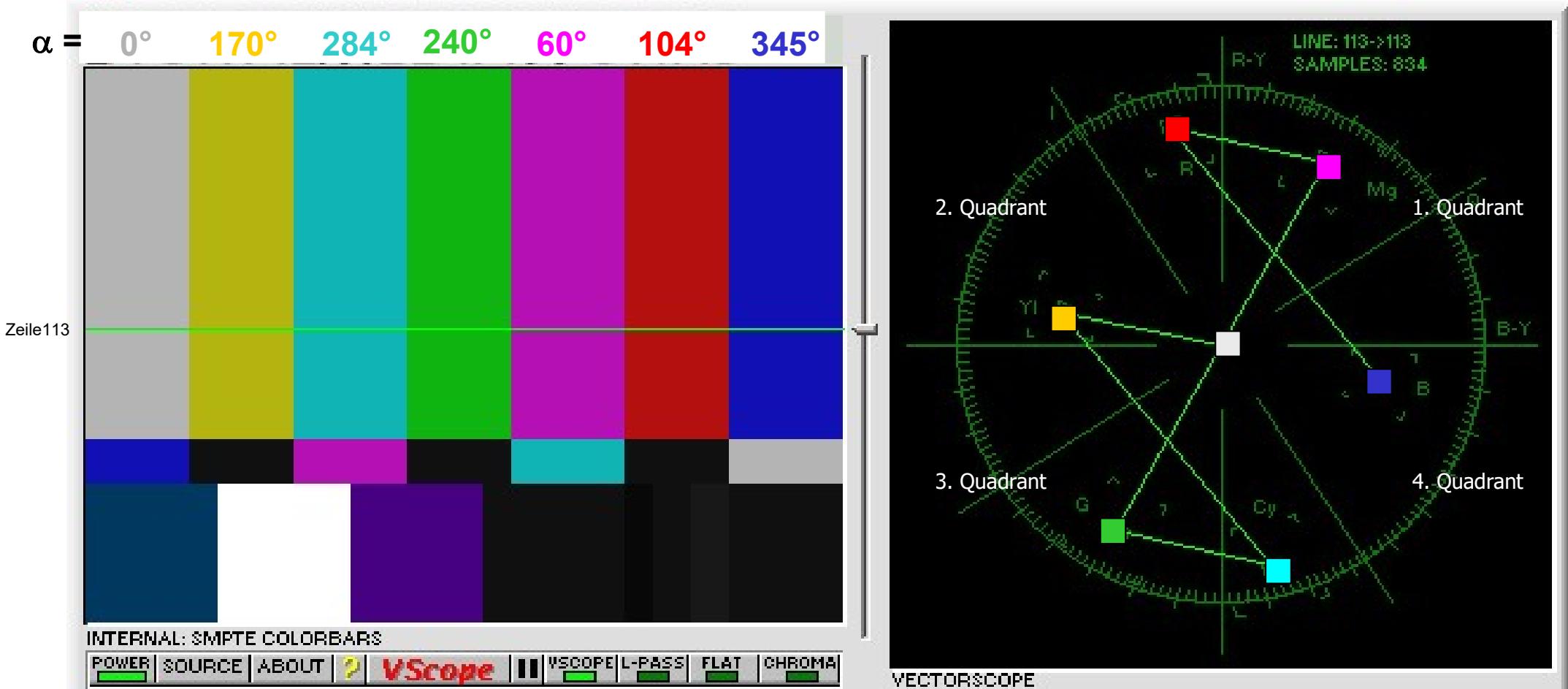
farbliche „Reinheit“ (engl. Saturation)

$$\alpha = \arctan [(R' - Y') / (B' - Y')]$$

⇒ Merkmal **Farnton**

farbliche Zusammensetzung (engl. Hue)

# Anwendung: Farbkontrollgerät „Vectorscope“



$$\alpha = \arctan [(V)/(U)]$$

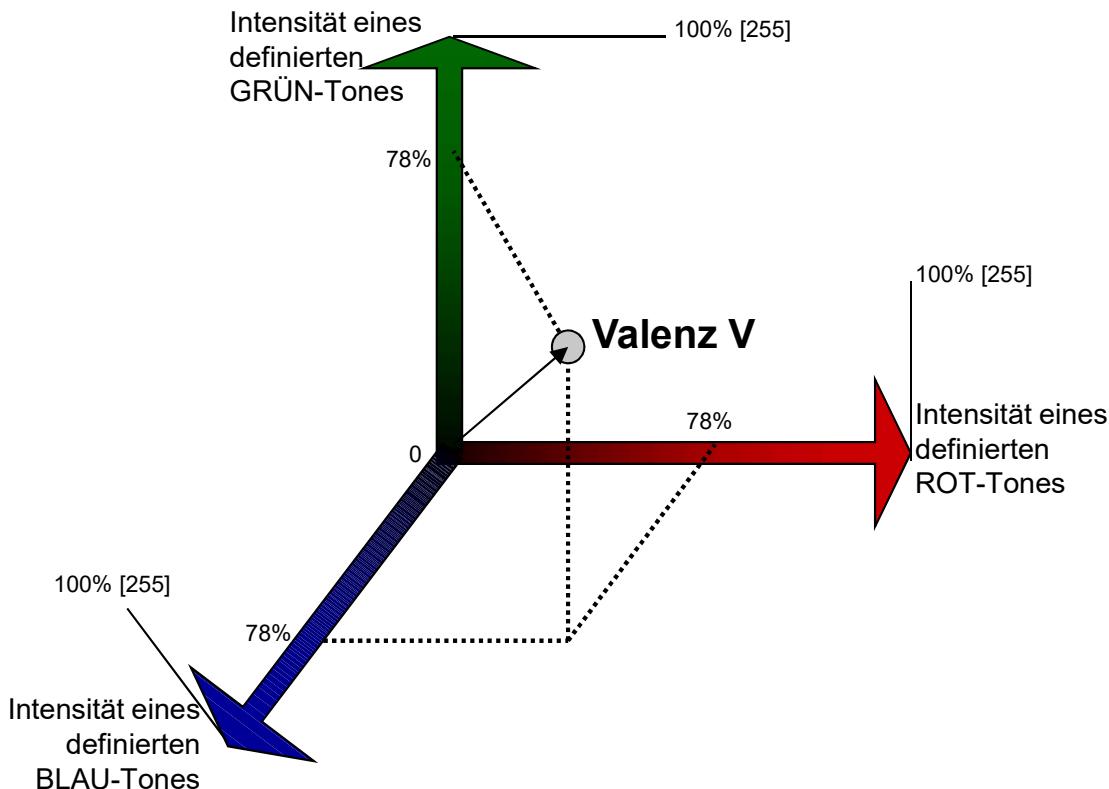
$\Rightarrow$  Farbton

$$|S| = \sqrt{(V)^2 + (U)^2}$$

$\Rightarrow$  Farbsättigung

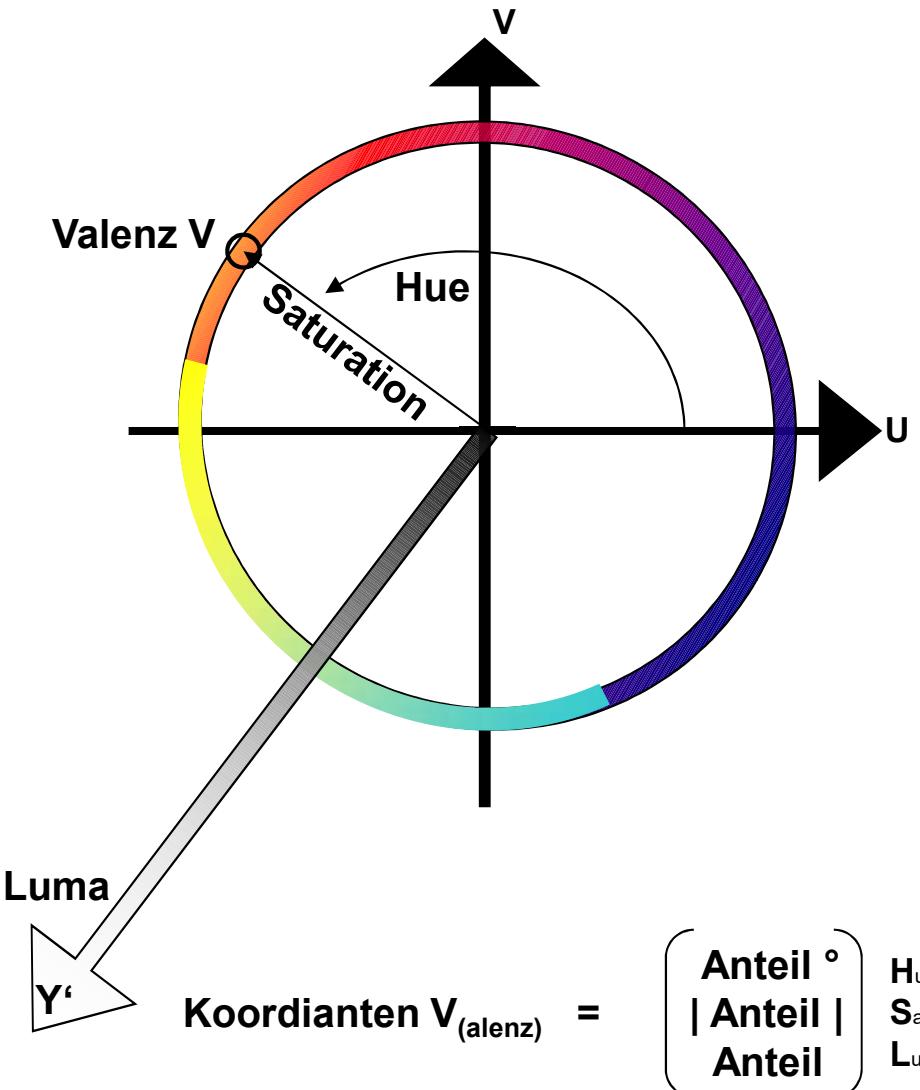
# Denksport:

Das **RGB-Farbmodell** verwendet den karthesischen **R',G',B'-Farbraum** !



$$\text{Koordinaten } V_{(\text{Valenz})} = \begin{pmatrix} \text{Anteil} \\ \text{Anteil} \\ \text{Anteil} \end{pmatrix} \begin{matrix} R'_{\text{OT}} \\ G'_{\text{RÜN}} \\ B'_{\text{LAU}} \end{matrix}$$

Welches **Farbmodell** verwendet den rotationssymmetrischen **Y', U, V – Farbraum** ?



Varianten, die sich nur in der Skalierung von Y' unterscheiden: HSI (I=Intensity) bzw. HSB (B=Brightness)

# Praxisaufgabe:

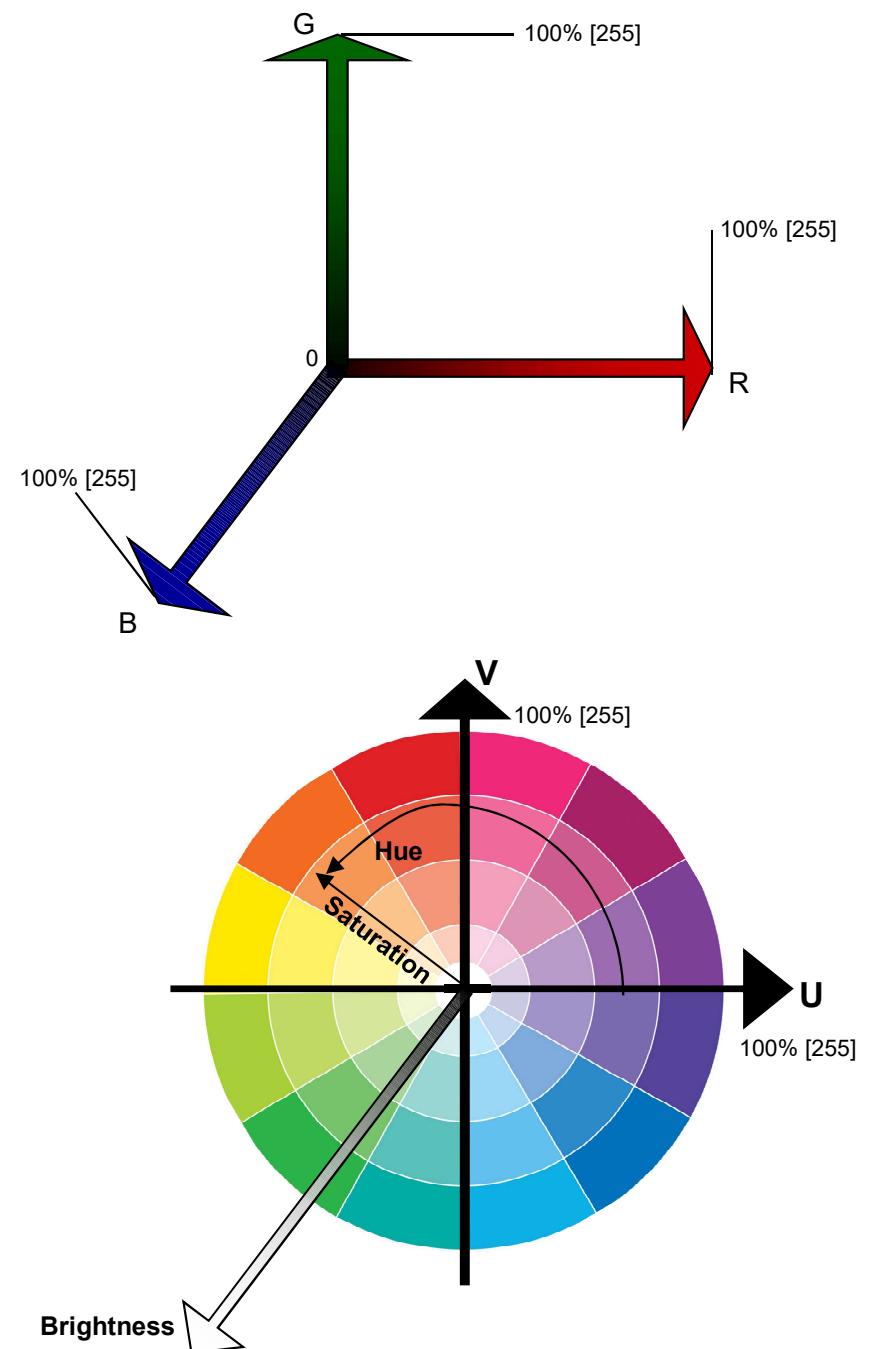
In Styleguide einer Android-App (hier: Ausriss) ist Folgendes vermerkt:

Styleguide

Farbpalette

	normal	on click	Akzente
	#3b355d / 59;53;93		
	#28214d / 40;33;77 (Logo)		
	#b9b9b9 / 185;185;185		
	#e5e8e9 / 229;232;233		
	#f9c442 / 249;196;64 (Sterne Europaflagge)		
	Dark Background HSB: 90° 3% 30% RGB: 76 77 75 Hex#: 4C4D4B		
	Typography HSB: 60° 1% 20% RGB: 51 51 50 Hex#: 333332		

Zeichnen Sie die Farborbe  $V_{DB}$  und  $V_A$  für „Dark Background“ - Elemente und „Akzente“ in die nebenstehenden Farbraüme ein.  
 (Tipp: der Farbort für „Akzente“ muss für das HSB-Modell neu berechnet werden)



# Grundlagen der Generierung leuchtender Bilder

## Was wir in dieser Runde lernen:

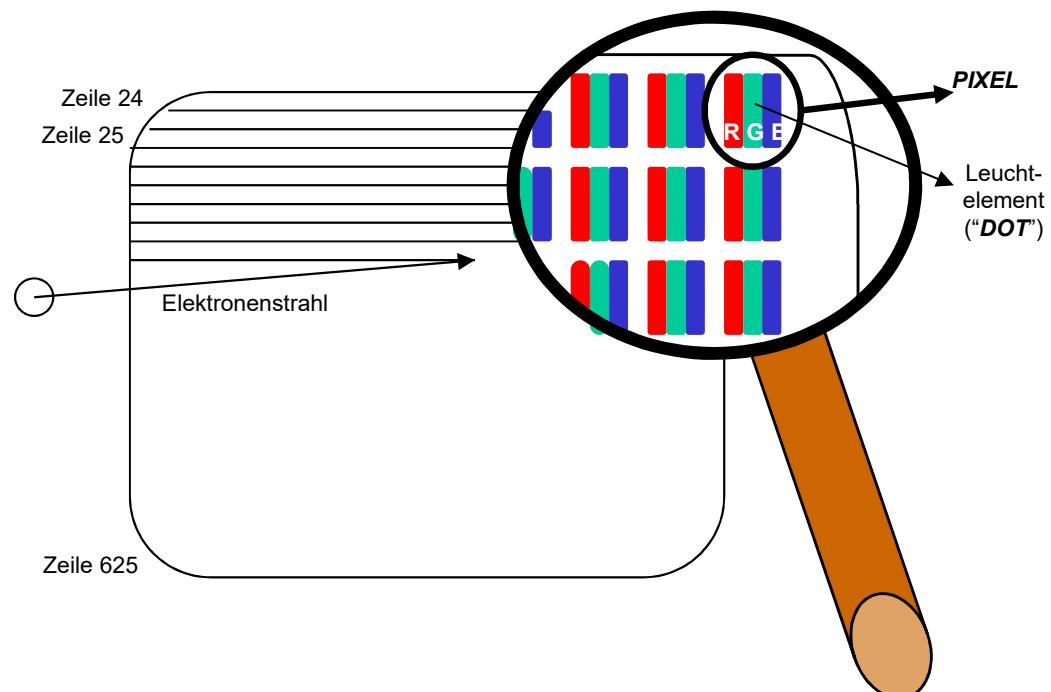
- Alle Leuchtbilder in Displays werden zeilenweise aufgebaut. Daher sind Videosignale auch zeilenweise organisiert.
- Das kleinste Bildelement (*picture element*) in einer Zeile wird abgekürzt als *pixel* bezeichnet. Pixel selbst bestehen wiederum aus zusammengepackten, primärfarbigen *dots / subpixels*.
- Displays werden grundsätzlich in aktive und passive Bauarten unterschieden?
- Wie funktionieren beispielhafte aktuelle Displaytechnologien? (inkl. Stärken & Schwächen)
- Wie funktionieren High Dynamik Range Displays (HDR)?
- Es gibt wichtige, „technologie-freie“ Kennwerte, welche Displays grundsätzlich einhalten sollten z.B. *dotpitch*, *Horizontalfrequenz* und *Pixeltakt(dauer)*.

# Wie kommt das Bild auf den Monitor ?

Antwort: *immer zeilenweise - aber so schnell, dass ein gleichmäßiger Bildeindruck entsteht.*

## Beispiel: traditioneller Röhrenmonitor

- Die Darstellung jedes einzelnen Bildes erfolgt auf dem Röhren-Bildschirm mittels eines wandernden Elektronenstrahls in mikroskopisch kleinen Zeilen von oben/links nach unten/rechts.
- Der Elektronenstrahl bringt auf der Glaswand aufgebrachte chemische Elemente (Phosphorverbindungen) zum leuchten (**DOT's**).
- Der Eindruck eines farbigen Bildpunktes wird durch die definierte Erregung von roten, grünen und blauen Leuchtelelementen (unterschiedliche Phosphorverbindungen) erzeugt.



- Je ein rotes, grünes und blaues Leuchtelelement\* bilden einen Bildpunkt (picture Element = **PIXEL**).
- Jede sichtbare Zeile besteht aus einer definierten Anzahl von sichtbaren Bildpunkten, z.B.

4:3 – SD / Europa:

4:3 – SD / USA:

16:9 HD "S1"

16:9 HD "S2/S3/S4"

16:9 UHD

720 Pixel x 576 (sichtbare) Zeilen

720 Pixel x 486 (sichtbare) Zeilen

1280 Pixel x 720 (sichtbare) Zeilen

1920 Pixel x 1080 (sichtbare) Zeilen

3840 Pixel x 2160 (sichtbare) Zeilen

(weitere typ. „örtliche Auflösungen“ siehe Folie 186ff)

\*Anm: Leuchtelemete/Dots werden in der Literatur manchmal auch als "Subpixel" bezeichnet

# **Eine kleine Wanderung durch aktuelle Display-TECHNOLOGIEN**

# Gebräuchliche Display-Technologien der letzten Jahrzehnte:

## Displaytechnologien

### AKTIVE Displays

elektronisch  
gesteuerte Lichterzeugung

### PASSIVE Displays

elektronisch  
gesteuerte Lichttransmission  
bzw. -reflexion

Umgangssprachlich:  
„Röhrenmonitor“

Kathodolumineszenz, insb.  
Kathodenstrahlröhren

- Bauformen:
  - Schlitzmasken-Röhre
  - Trinitron
- ...

Umgangssprachlich:  
„LCD/TFT-Monitor“

LCD-Bildschirm mit Transistor-  
matrix-Steuerung

- LCD-Bildschirm mit Laser-  
steuerung und Projektion
- Ölfilm mit Schlierenoptik

Umgangssprachlich:  
„Plasma-TV“

Plasma-Bildschirm

Eine exakte Beschreibung der wesentlichen  
Funktionsweisen finden Sie im Dateibereich  
Videotechnik unter:  
„Übersicht Flachbildschirme.pdf“

Umgangssprachlich:  
„OLED-Display“

LED-Bildschirm

- Bauformen:
  - Anorganische Leuchtdioden
  - Organische Leuchtdioden (OLED)
- ...

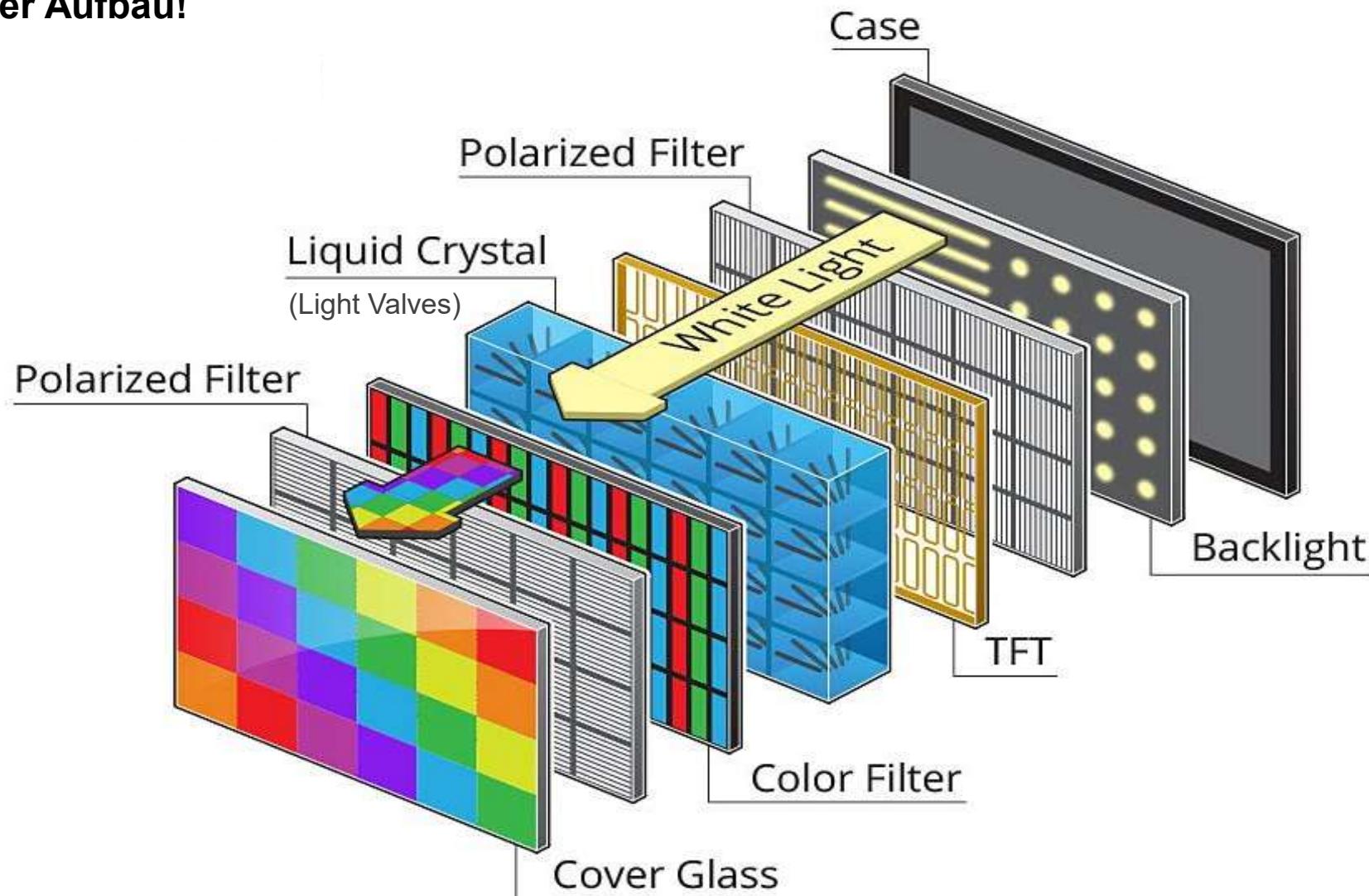
Achtung !  
Alle Flachdisplays arbeiten  
intern PROGRESSIV !!!

# Flachbildschirme: Leuchterregungs-Methoden (I)

siehe z.B. auch: <https://www.youtube.com/watch?v=1albYPL9Cfg&list=PLWfDJ5nla8UpwShx-lzLJqcp575fKpsSO>

## Liquid Crystal Display (LCD):

Prinzipieller Aufbau!



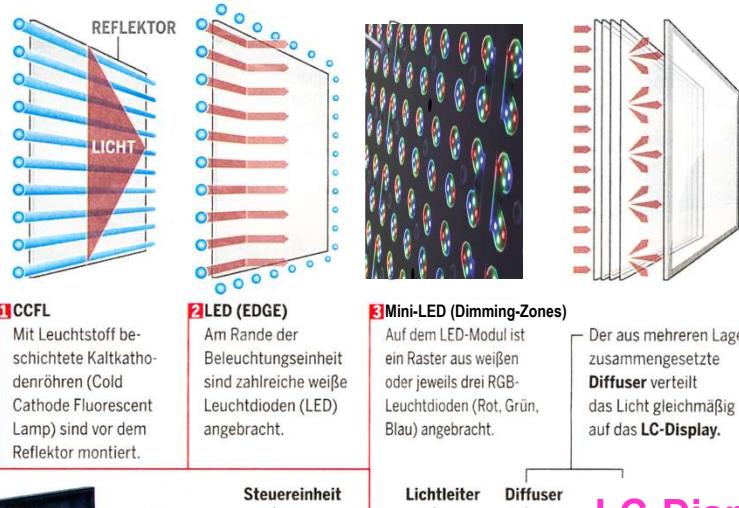
Quelle: <https://www.sears.com/articles/tvs-electronics/televisions/the-evolution-of-display-technology.html>

# LCD-Flachbildschirm im Detail

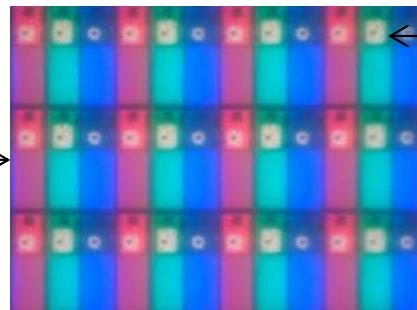
Eine exakte Beschreibung der Funktionsweise finden Sie im Dateibereich Videotechnik unter „Übersicht Flachbildschirme.pdf“

## Liquid Crystal Display (LCD):

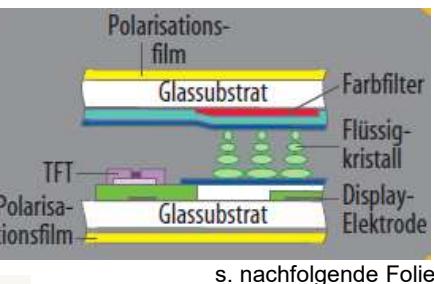
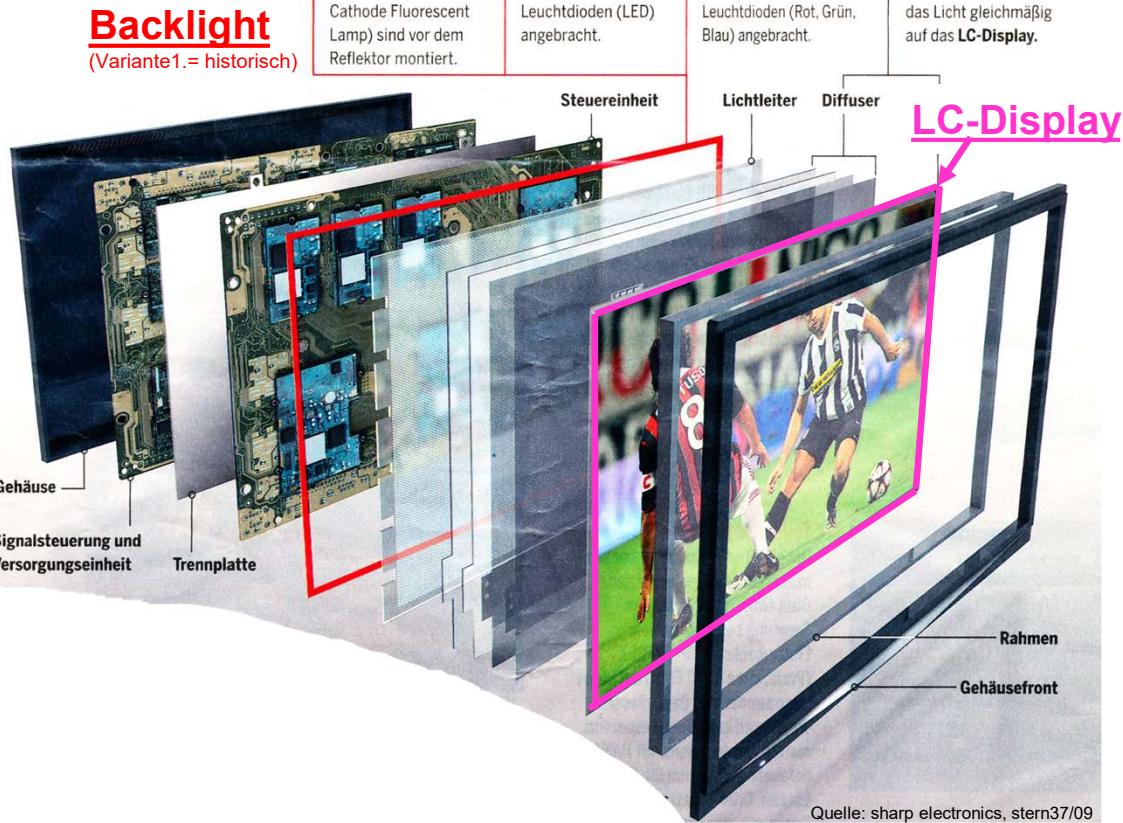
### Varianten Hintergrundbeleuchtung:



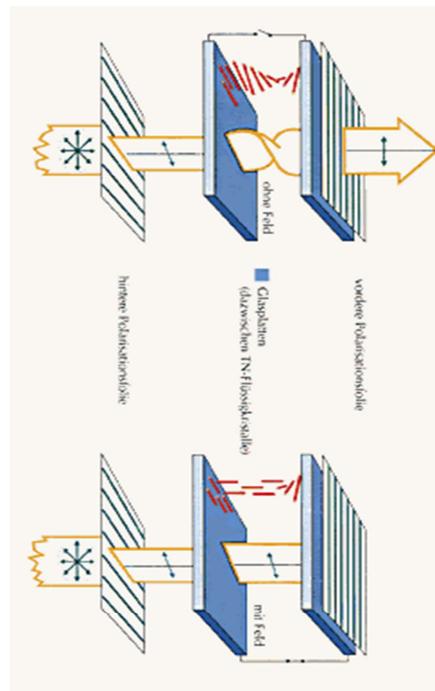
Dot-Zellen gefüllt mit flüssigen Kristallen + aufgesetztem, transparentem Farbfilter



Thin Film Transistor (TFT) zur Ansteuerung der flüssigen Kristalle



s. nachfolgende Folie



Flüssigkeitskristalle in der dot-Zelle fungieren als spannungsgesteuertes **Lichtventil**

Spannung ein = undurchlässig  
Spannung aus = durchlässig

**Achtung !**  
Alle Flachdisplays arbeiten intern PROGRESSIV !!!

# LCD-Geschmacksvarianten: IPS | FFS | VA | TN-TFT

3D-Animationen unter [http://cc-special.merck.de/lcd\\_explorer\\_DE/](http://cc-special.merck.de/lcd_explorer_DE/)

PERFORMANCE MATERIALS

MERCK

Merck-Gruppe • English • Impressum • Allgemeine Nutzungsbedingungen • Datenschutzerklärung

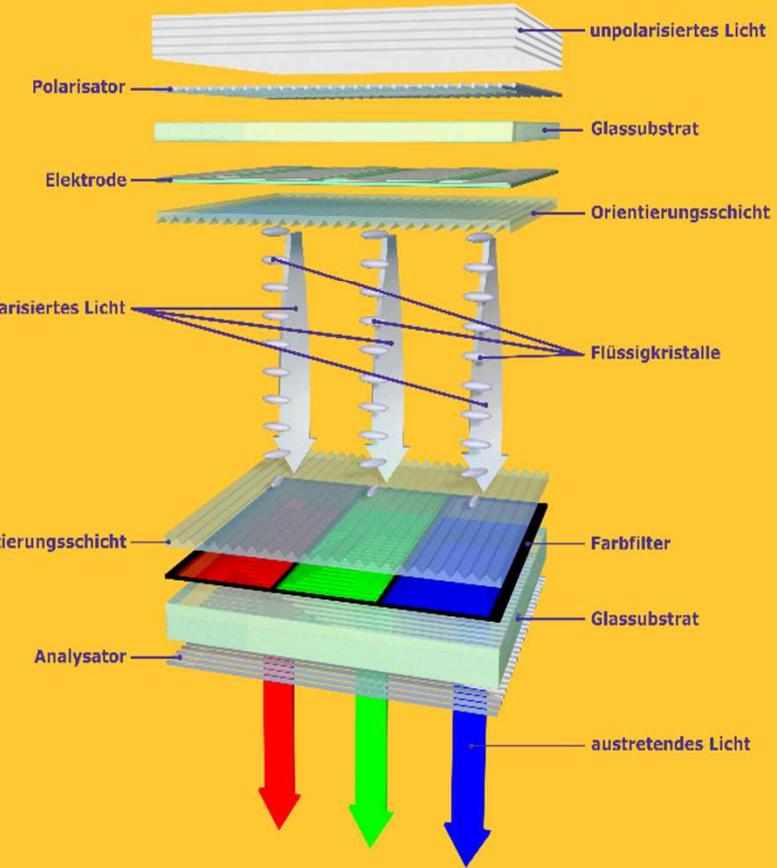


**IPS** | FFS / UB-FFS | VA | TN-TFT | Blaue Phase

InPlane Switching LC-Display

## pixelquerschnitt

- ▶ Displayaufbau
- ▶ Pixelquerschnitt
- ▶ Funktionsweise
- ▶ Vergleich



Fakten

### Schon gewusst?

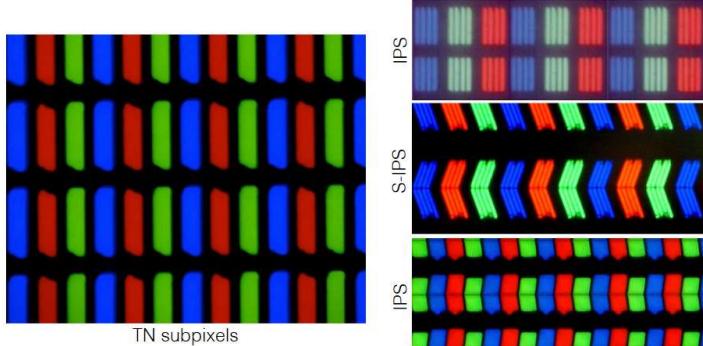
Erfunden 1990, Markteinführung 1995

Verbessert den vertikalen und horizontalen Betrachtungswinkel auf bis zu 170 Grad. Damals war dies eine Sensation, da solch ein breiter Betrachtungswinkel nur mit herkömmlichen Bildröhrenmonitoren erreicht werden konnte.

Ein weiteres Merkmal der IPS-Zelle ist die einzigartige Anordnung der Elektroden und Orientierungsschichten.

Die verbesserte Blickwinkelabhängigkeit wird ohne zusätzlichen Kompensationsfolien erreicht.

### Typische Mikroskop-Aufnahmen der LCD-Varianten:



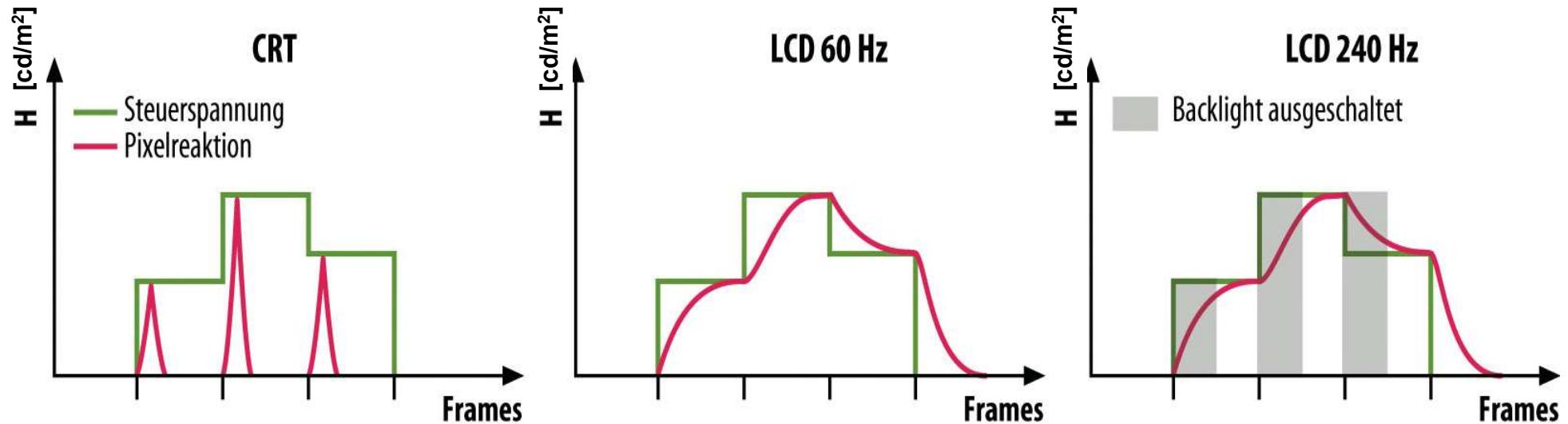
wikipedia

© Merck KGaA, Darmstadt Deutschland

# Konzeptbedingte Probleme von LC-Displays:

## 1. Die Trägheit der Flüssigkristalle:

Beobachtung des Reaktionsverhalten EINES Pixels (identische Pixelposition) bei wechselnden Bildinhalten



Bildquelle: ct 10/2017

## 2. Die Durchlässigkeit der „Lichtventile“:

- Selbst bei Ansteuerung mit Maximalspannung sickert noch etwas Backlight durch das Ventil → Problem Schwarzdarstellung
- Beim Durchgang des Backlight über das (voll geöffnete) Lichtventil + Farbfilterschicht tritt ein Leuchtdichteeverlust von bis zu 90% auf („Transmissionsgrad“  $\approx 0,1$ )  
→ Ansteuerung des Backlight muß diesen Verlust durch erhöhte Grundhelligkeit vorkompensieren,  
→ Energieverbrauch des LCD-Backlights limitiert die maximal realisierbare Bildhelligkeit.

## 3. Blickwinkel-Stabilität: (s.a Folie 179)

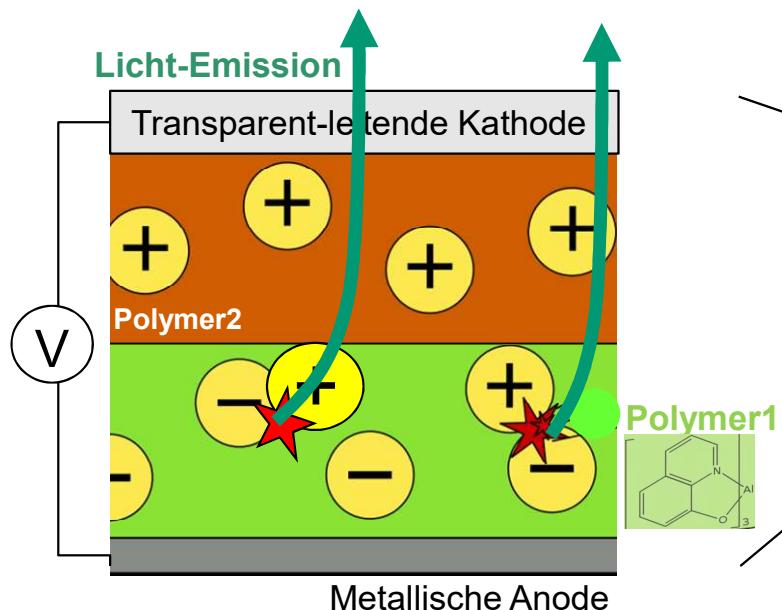
Je schräger man auf das Display schaut, desto geringer wirkt die Leuchtkraft der Pixel. Bilder werden kontrastärmer („flauer“).

# Flachbildschirme: Leuchterregungs-Methoden (II)

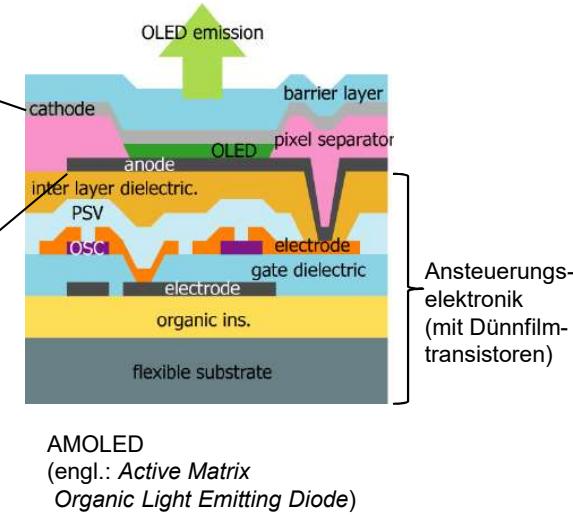
siehe z.B. auch: <https://www.youtube.com/watch?v=0b8ce30OIIA&list=PLWfDJ5nla8UpwShx-lzLJqcp575fKpsSO>

## Organisches Leuchtdioden Panel (OLED):

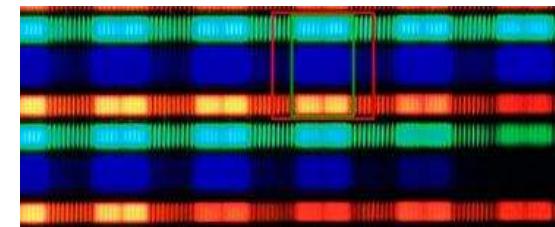
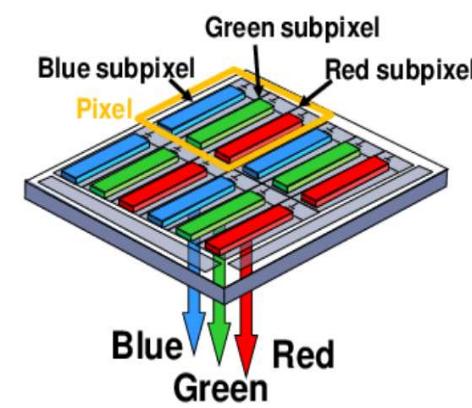
Prinzipielle Wirkungsweise (Labor):



→ Realer Aufbau eines Dots:



→ Realer Aufbau Pixelraster:



Bei der Rekombination („Vereinigung“) von Elektronen (-) und Löchern (+) in halbleitenden Polymeren entsteht Licht im sichtbaren Bereich → **Elektroluminiszenz**  
(Wellenlängen je nach Polymer-Kombination).

### Konzeptbedingte OLED-Vorteile:

- Absolute Kontraste bis 10.000:1 möglich
- Sehr hohe on/off Schaltgeschwindigkeiten
- Großer, farbstabiler Blickwinkelbereich (→ Folie179)

### Konzeptbedingte OLED-Nachteil:

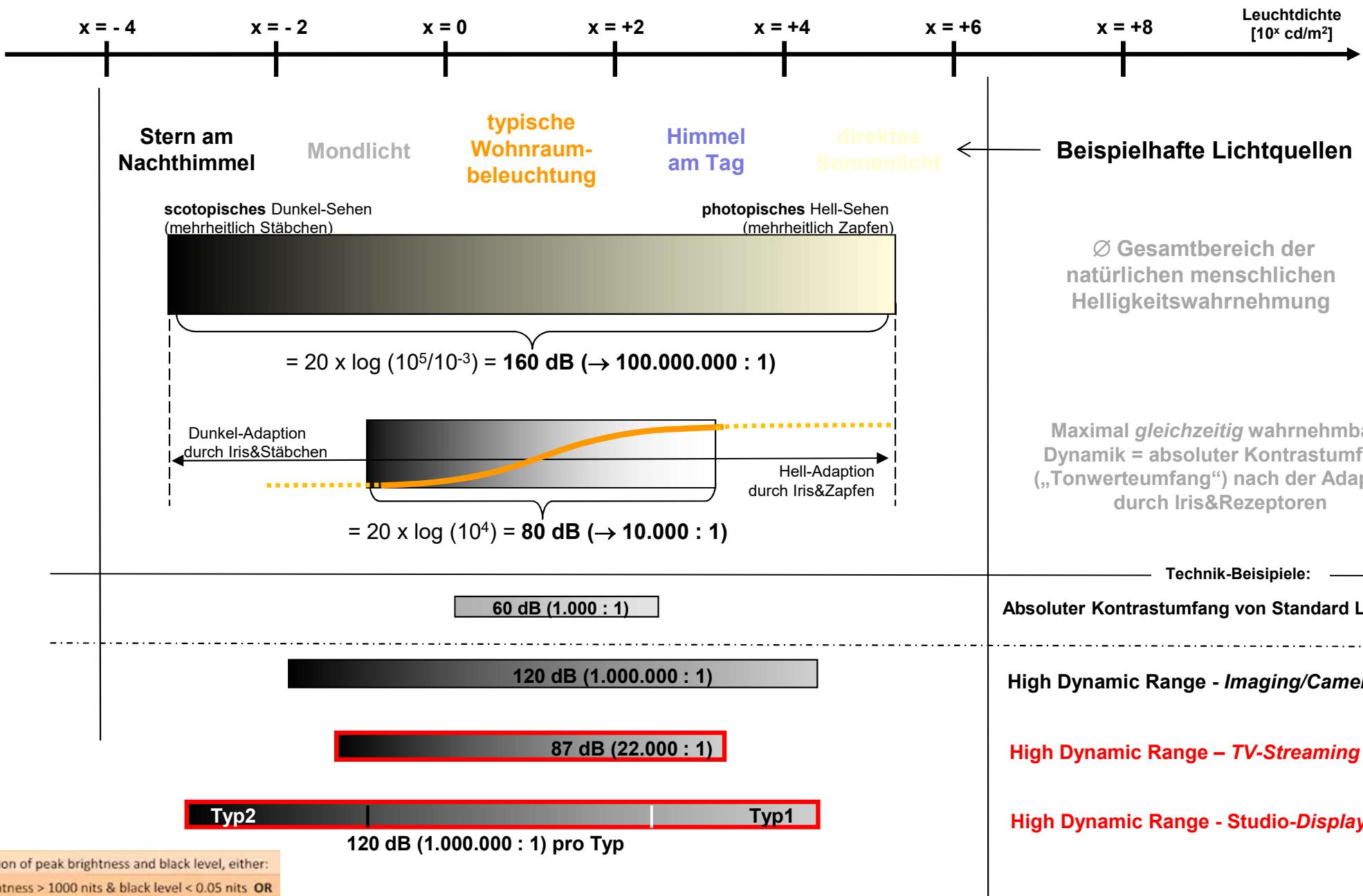
- langsames „Abbrennen“ der Polymerschichten über die Lebensdauer (insbes. die Polymerkombination für blaues Licht)

# **High Dynamic Range (HDR) Displays**

**HDR-Monitore können derzeit auf Basis LCD oder OLED produziert werden.**

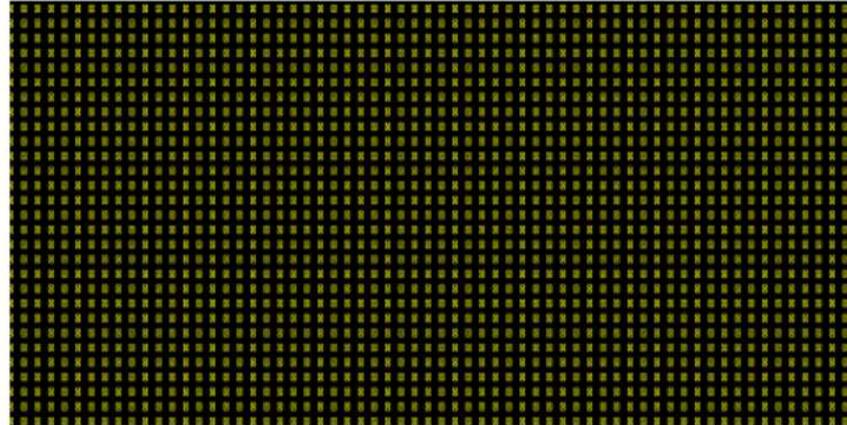
# Zur Erinnerung: Dynamikbereich des menschlichen Sehapparats bez. Helligkeit:

(s. Folie 107)

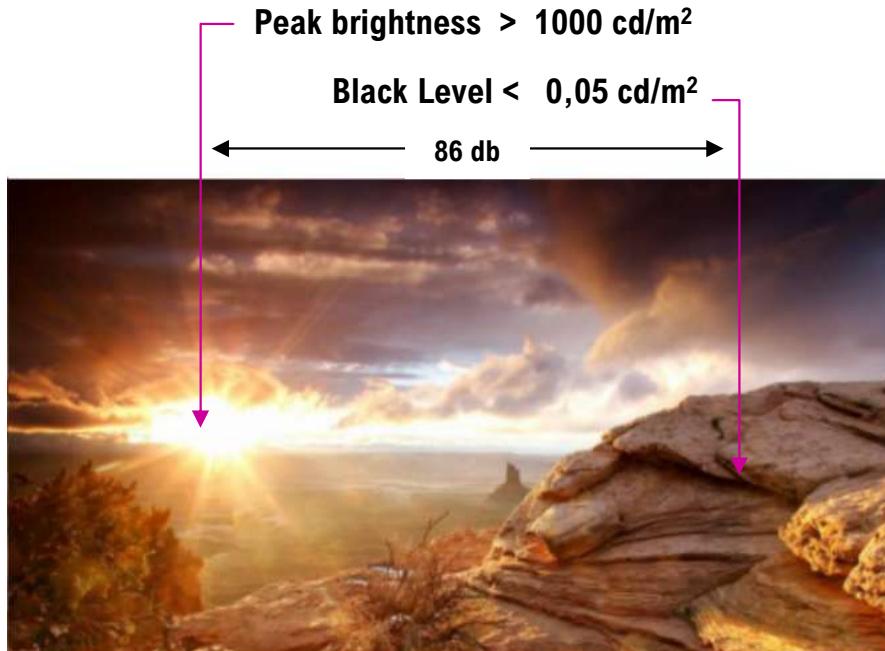


# Umsetzung eines HDR-Displays am Beispiel LCD + Local Dimming

Hintergrundbeleuchtung mit Local Dimming und 2048 LEDs (Beispiel)



Steuerung der Hintergrundbeleuchtung mit Local Dimming (Leuchtdichteabbild)



Höhere Leuchtdichte und Kontrast aus Betrachtungsperspektive

# Wichtige „Technologie-freie“, *Kennwerte* von Displays

User Experience (UX) → Technische Parameter:

Flimmerfreiheit → Realisierbare Bildwiederhoffrequenzen (*refresh rate*)

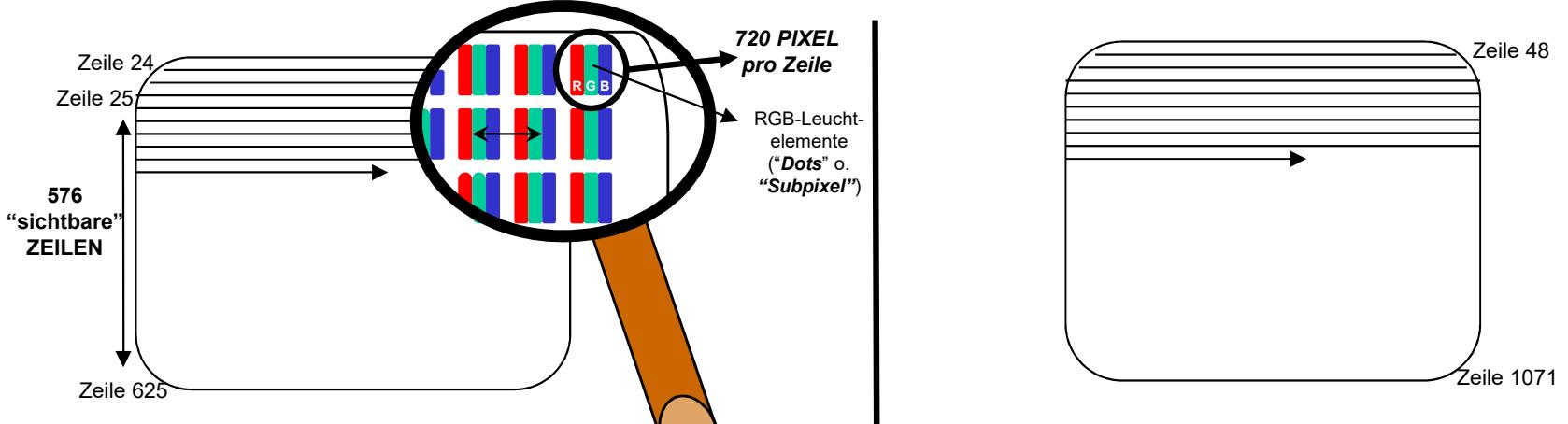
„Schärfe“ → Realisierte örtliche Bilddauflösung auf Displayfläche (px x px; dotpitch)  
Realisierter **absoluter Kontrast**, realisierbarer Kontrasthub an Kanten.

Gute Bewegungsdarstellung → Pixeltakt / max. Videosignalfrequenz (*benachbarte Pixel*)  
Geringe Schaltzeiten (*Helligkeitswechsel identischer Pixelpositionen*)

Ergonomie → **Blickwinkelstabilität,**  
**Homogene („fleckenfreie“) Ausleuchtung der Displayfläche.**

# Beispiel: Fernsehdisplay vs. gleichgroßer Computermonitor

**Hinweis:**  
„@xyHz“ meint:  
Bildwiederholfrequenz  
(refresh rate)



## Technische Kennwerte

4:3-Fernseher (720x576@50 Hz, *interlace*),  
45cm Bildschirmdiagonale = 36cm Bildbreite

19"-PC-Monitor (1280x1024@85 Hz, *progressive*),  
45cm Bildschirmdiagonale = 36cm Bildbreite

**„Dotpitch“**  
Mindestabstand zweier  
gleichfarbiger Leuchtelemente („dot“)  
zur physikalischen Realisierung  
der maximalen Bildauflösung

$$720 \text{ dots} / 36 \text{ cm} = 2 \text{ dots/mm}$$

$$\rightarrow \text{Dotpitch}_{\min} = 0,50 \text{ mm}$$

$$1280 \text{ dots} / 36 \text{ cm} = 3,5 \text{ dots/mm}$$

$$\rightarrow \text{Dotpitch}_{\min} = 0,28 \text{ mm}$$

**„Horizontalfrequenz“**  
Benötigte Zeilen-Schreib-  
geschwindigkeit in Zeilen/Sekunde  
(in Abh. von der Bildwdh.-Frequenz)

$$f_{z \min.} = 25 \text{ Bilder/s} \times 625 \text{ Zeilen}$$

$$= 15.625 \text{ Z/s} [15,6 \text{ kHz}]$$

$$f_{z \min.} = 85 \text{ Bilder/s} \times 1072 \text{ Zeilen}$$

$$= 91.120 \text{ Z/s} [91,1 \text{ kHz}]$$

**„Pixeltakt(dauer)“**  
Zeitraum, welcher dem Grafiksystem in Abh.  
von Bildwiederholfrequenz und örtl. Auflösung  
für die Leuchterregung eines Pixels bleibt

$$T_{px \ min.} = 0,0889 \mu\text{s}$$

[ 1 Zeile ≈ 64μs für 720 Pixel ] [korr. 52μs]\*

[ 1 Zeile ≈ 11μs für 1280 Pixel ]

$$T_{px \ min.} = 0,0086 \mu\text{s}$$

**„Videosignalfrequenz<sub>max</sub>“**  
Kehrwert der kleinsten möglichen  
Signalperiode  $T_{w-s}$   
(schwarzer Pixel folgt direkt auf weißen Pixel)

$$f_{\max.} = 1 / T_{w-s} = 5,6 \text{ MHz}$$

[  $T_{w-s} = 2 \times T_{px \ min} = 0,1778 \mu\text{s}$  ] \* siehe Folie 193

[korr. 6,9MHz]\*

[  $T_{w-s} = 2 \times T_{px \ min} = 0,0172 \mu\text{s}$  ]

$$f_{\max.} = 1 / T_{w-s} = 58 \text{ MHz}$$

# Display-Praxiswerte:

1 in := 0,0254 m = 2,54 cm = 25,4 mm

Pixeldichte					Pixeldichte				
Gerät	Größe [Zoll]	Auflösung [Pixel]	Pixeldichte [ppi]	→ Dot-pitches	Gerät	Größe [Zoll]	Auflösung [Pixel]	Pixeldichte [ppi]	→ Dot-pitches
iPhone 3	3,5	480 × 320	163	0,156mm	Monitor	36,4	4096 × 2160	127	
iPhone 4S	3,5	960 × 640	326	0,078mm	HD-TV	42	1920 × 1080	52	0,488mm
iPad 2	10	1024 × 768	132		UHD-TV	42	3840 × 2160	104	
iPad	10	2048 × 1536	264		HD-TV	55	1920 × 1080	40	
MacBook Pro	15	1440 × 900	110		UHD-TV	55	3840 × 2160	80	
MB Pro Retina	15	2880 × 1800	220		HD-TV	70	1920 × 1080	31	0,82mm
Monitor	23,6	1920 × 1080	93		UHD-TV	70	3840 × 2160	63	
Monitor	20	3840 × 2160	220		HD-TV	80	1920 × 1080	27	0,941mm
HD-TV	37	1920 × 1080	60		UHD-TV	84	3840 × 2160	52	0,488mm

Quelle: heise, c't 21/2012

Display-Technik / -Größe

Apple iPhone 5

IPS / 5 cm × 8,9 cm (4 Zoll)

Auflösung / Format

640 × 1136 (325 dpi) / 16:9

min ... max. Helligkeit / Ausleuchtung

4 ... 456 cd/m<sup>2</sup> / 91 %

mittlerer Kontrast (minimales Sichtfeld<sup>1</sup>)

1189:1

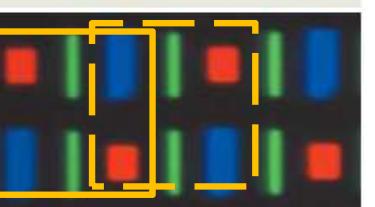
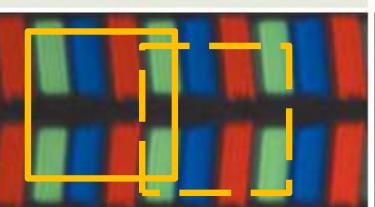
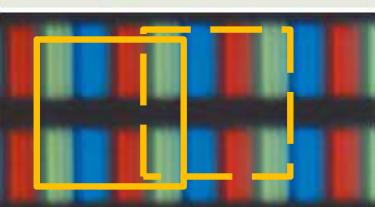
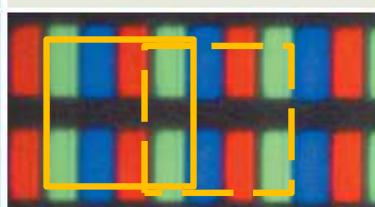
Die runden Diagramme geben die Winkelabhängigkeit des Kontrasts wieder. Blaue und grüne Farbanteile stehen für niedrigere, rötliche für hohe Kontraste. Kreise markieren die Blickwinkel in 20-Grad-Schritten. Im Idealfall ist das ganze Bild pink.

winkelabhängiger Kontrast:



Pixelstruktur

Ein (quadratischer) Bildpunkt  
Besteht aus sechs bis acht  
(rechteckigen) Dots/Subpixeln



<sup>1</sup> Das minimale Sichtfeld umfasst alle Einblickwinkel, unter denen ein Betrachter das Bild sieht, wenn er aus 60 cm Entfernung frontal auf die Schirmmitte schaut; die Bildecken sieht er dabei unter dem größten Winkel.

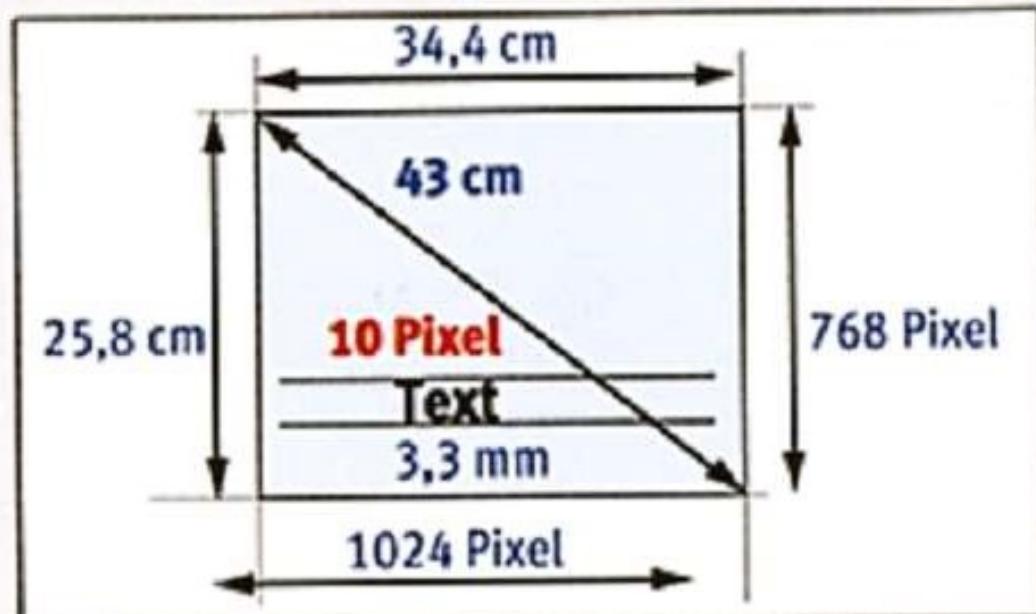
„pen/tile order“  
(Stift/Ziegel-Anordnung)

AM-OLED (engl.:  
Active Matrix  
Organic Light  
Emitting Diode)

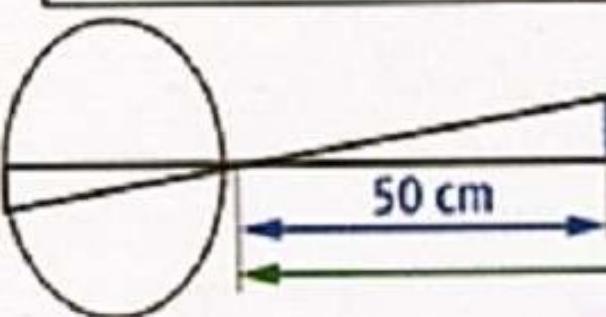
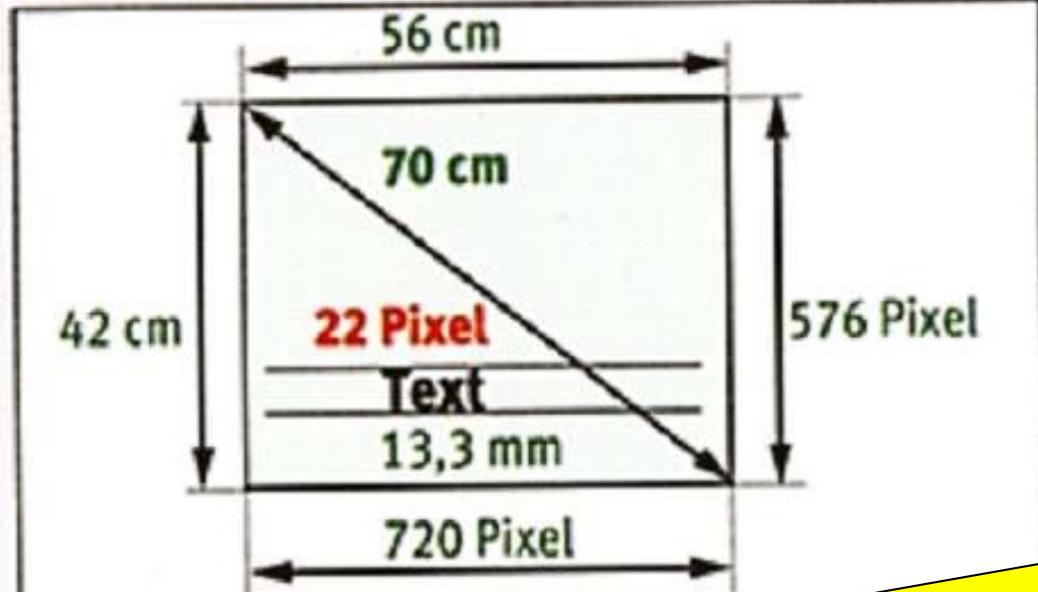
IPS =  
LCD mit  
In-Plane Switching

# Exkurs: Gestaltungs- & Rezeptions-Unterschiede

17-inch-(43-cm-) Computermonitor



70-cm-Fernsehgerät



- Textfonts TV > 22
- Möglichst keine Serifen
- Ergebnis von Schnitt- & Postpro-Prozessen immer
  - am TV-Monitor kontrollieren (für TV-Produktion)!
  - am PC-Monitor kontrollieren (für PC-Produktion)!

Rezeptionsverhalten: „Lean Forward“

Rezeptionsverhalten: „Lean Back“

# Rechnen & Nachdenken:

- Ein Bildschirmpixel leuchtet mit voller Sättigung GELB. Welche RGB-Dots erzeugen diese Pixel-Farbe? Welchen Helligkeitswert Y' hat der Gelb-Pixel im Vergleich zu einem benachbarten, vollausgesteuerten weißen Pixel? [%]
- Das 4“-Display eines iPhone5 ist 8,9 x 5 cm groß, hat 1136 x 640 Pixel und wird progressiv mit 60Hz Bildwiederholfrequenz betrieben.

Berechnen Sie den benötigten *Dotpitch* des Displays sowie die *Horizontalfrequenz*, die *min. Pixeltaktdauer* und die *max. Videosignalfrequenz*, welche die iPhone-Displayansteuerung realisieren muss, um ein optimales visuelles Bildergebnis im Querformat („*landscape*“) zu erzielen. (Anm. alle Rechnungen auf Basis der sichtbaren Zeilen)

- Wie oft muss - theoretisch- eine (feste) Pixelposition auf dem Bildschirm ihre (Farb-)Inhalt wechseln können?

Display: 800x400 @60Hz (Mobile Device) →

Display: 720 / p / @50Hz (TV) →

Display: 1080 / p / @144Hz (Mon.) →

- Was passiert, wenn die Display-Technologie die obigen Werte nicht einhalten kann?

- Schauen Sie sich nochmals Folie 135/Beispiel4 an und lesen Sie im Dateibereich die zwei Artikel
  - Übersicht \_Flachbildschirme.pdf und
  - ct\_Bildwdhfrequ\_und\_Zwischenbild.pdf / Jenseits des Flimmerns / „Wie die Hersteller ihren TVs Beine machen“

Warum gibt es heute LCDs mit (angeblich) Bildwiederholfrequenzen >> 100Hz?

# Video-Formate

## Was wir in dieser Runde lernen:

- Nach welchen grundsätzlichen Eigenschaften werden heute (die vielen) Videoformate für TV, Kino und Computer unterschieden?
- Typische Kennwerte für heutige Digitale Video-, Kino- und Computerformate ...
- ... und ihre international gebräuchliche Notation  
(Zeilenanzahl/Zeilenaufbau/Bildwechselfrequenz)

# Motion-Pictures:

Video ist ...

... eine Abfolge von einzelnen, definiert-großen Bildern in einem festgelegten zeitlichen Abstand.



Video besitzt folglich immer ein charakteristisches örtliches (spatiales) und zeitliches (temporales)  
AUFLÖSUNGsvermögen !

# Allgemeine Kennwerte für Video-Formate:

*Jedes Videoformat ist grundlegend\* beschrieben durch folgende Kenngrößen:*

\* Beachte: grundlegend < vollständig

- **Pixelraster,** (örtliche Auflösung, inkl. Pixel Aspect Ratio)
- **Zeilenaufbau,** (interlace oder progressive)
- **Bildwechselfrequenz,** (temporale Auflösung)

internationale Notation: → sichtbare Zeilenzahl / Zeilenaufbau / Frame-Rate

Beispiele:	720	/	p	/	50
	1080	/	i	/	30

# Typische Kennwert-Kombinationen für Digitale Medien:

## Video:

SD (720 x 576)	HD (1280 x 720)	Full HD (1920 x 1080)
Quad HD (3840 x 2160)		

Gebräuchliche Bezeichnung	Pixelraster (px x Zeilen), örtliche Auflösung	Bildseiten-verhältnis	Zeilenaufbau i / p	Typische Bildwechselfrequenzen [Hz] Beispiel Gesamtnotation
<b>SD-Standard Definition (EU)</b>	720 x 576	4:3 (non-square pix)	i	25 576 / i / 25
<b>SD-Standard Definition (US)</b>	720 x 480	4:3 (non-square pix)	i	30 (29,98) 480 / i / 30
<b>HD-High Definition / S1</b>	1280 x 720	16:9 (square pix)	p	50, (60) 720 / p / 50
<b>HD-High Definition / S2-4</b> (Volksmund: „Full HD“)	1920 x 1080	16:9 (square pix)	i oder p	25, 30, 50, 60 z.B. 1080 / i / 25
<b>Ultra High Definition</b> („Quad HD“)	3840 x 2160	16:9 (square pix)	p	25, 30, 50, 60, 100, 120 z.B. 2160 / p / 50
<b>8k UHD</b>	7680 x 4320	16:9 (square pix)	p	25, 30, 50, 60, 100, 120 z.B. 4320 / p / 60

## Digitales Kino:

Gebräuchliche Bezeichnung	Pixelraster (px x Zeilen), örtliche Auflösung	Bildseiten-verhältnis	Zeilenaufbau + / p	Typische Bildwechselfrequenzen [Hz]
<b>2k flat</b>	1998 x 1080	1 : 1,85	p	24,
<b>4k flat</b>	3996 x 2160	(square pix)		(48, 120 = High Frame Rate/3D-HFR)
<b>2k scope</b>	2048 x 858	1 : 2,38	p	24,
<b>4k scope</b>	4096 x 1716	(square pix)		(48, 120 = High Frame Rate/3D-HFR)

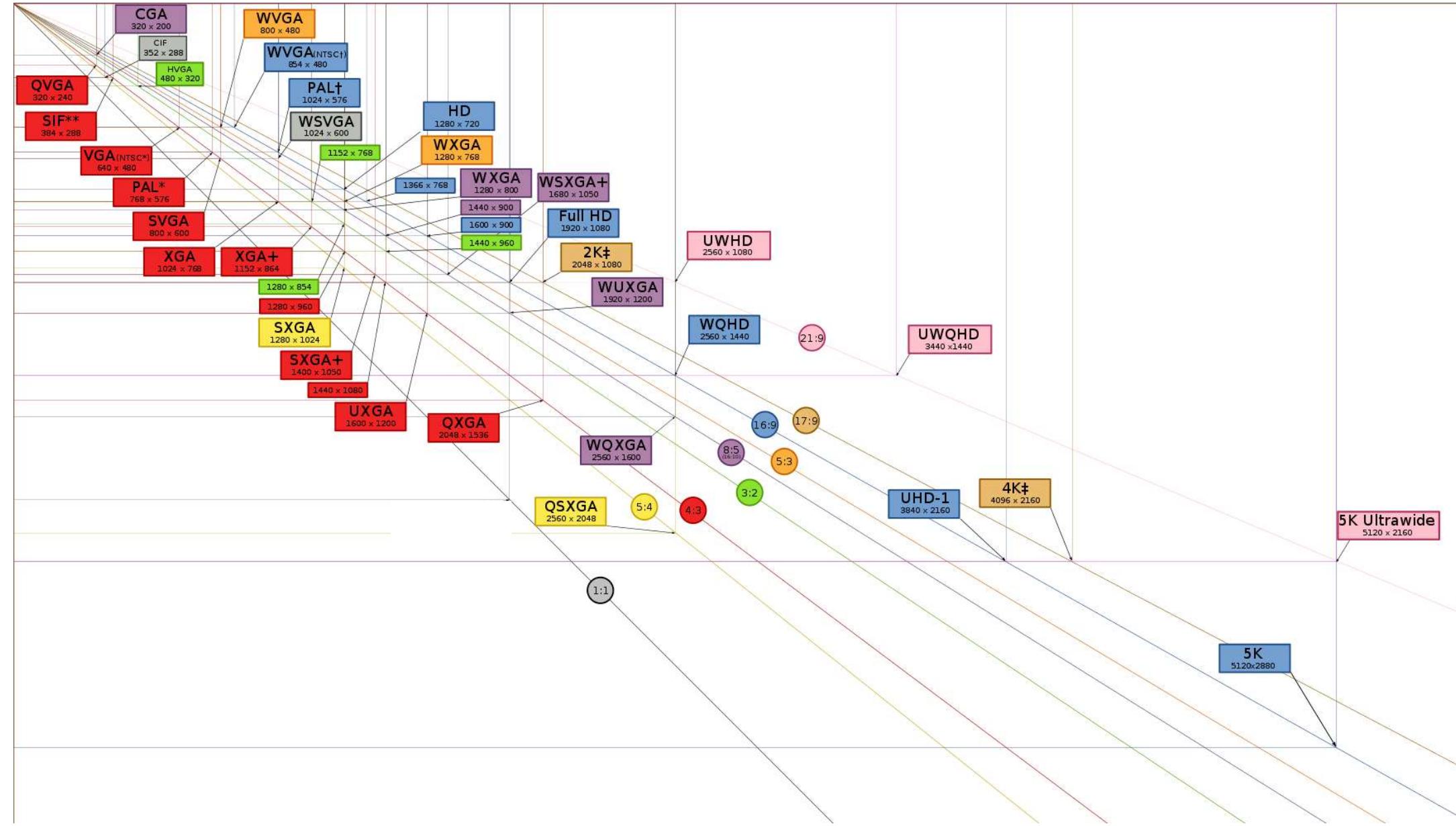
## PC/Tablet/ Smartphone:

Gebräuchliche Bezeichnung	Pixelraster (px x Zeilen), örtliche Auflösung	Bildseiten-verhältnis	Zeilenaufbau + / p	Typische Bildwechselfrequenzen [Hz]
<b>nGA (n x VGA), Video Graphics Array</b>	n x 640x480, n ∈ $\mathbb{Q}_+$ (square pix)  s. nachfolgende Folie	5:4 - 21:9  s. nachfolgende Folie	p	min: 30fps  max: je nach Komplexität der Szene und Renderleistung der Grafikkarte

# Komplettübersicht: Computer-Pixelraster

> 30 Bilder/s, progressive

Horizontale Pixelanzahl →



Bildquelle: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Vector\\_Video\\_Standards8-it.svg/4098px-Vector\\_Video\\_Standards8-it.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Vector_Video_Standards8-it.svg/4098px-Vector_Video_Standards8-it.svg.png)

# Zulässige HD-Parameter für internationale Produktionen

\* 30/60Hz basierte Systeme (z.B. USA) unterscheiden sich in den Specs nur noch durch die Framerate (und damit auch in einer höheren Netto-image-bitrate).

EBU System	Nomenclature and abbreviation [samples horiz. x active lines/ Scanning/ frame rate]	Luma or R'G'B' Samples per active line (S/A/L)	Active lines per frame (picture) (AL/F)	Frame rate, Hz	Luma or R'G'B' sampling <sup>3</sup> frequency (fs), MHz	Luma sample periods per total line (S/TL)	Total lines per frame	Net image Bit Rate (4:2:2, 10 bit) [Mbit/s]	Corresponding SMPTE system nomenclature
S1	1280x720/P/50 (abbreviated: <u>720/P/50</u> )	1280	720	50	74.25	1980	750	921.6	Corresponds to SMPTE 296M System 3
S2	1920 x 1080/I/25 (abbreviated: <u>1080/I/25</u> )	1920	1080	25 (50Hz field rate)	74.25	2640	1125	1036.8	Corresponds to SMPTE 274 System 6
S3	1920 x 1080/P/25 (abbreviated: <u>1080/P/25</u> )	1920	1080	25	74.25	2640	1125	1036.8	Corresponds to SMPTE 274 System 9
S4	1920 x 1080/P/50 (abbreviated: <u>1080/P/50</u> )	1920	1080	50	148.5	2640	1125	2073.6	Corresponds to SMPTE 274 System 3

Table 1: HDTV Systems 1 to 4

The digital representation shall employ eight or ten bits per sample in its uniformly quantized (linear) PCM coded form.

The image aspect ratio for system 1 to 4 shall be 16 x 9, and the sample 'aspect ratio'<sup>45</sup> shall be 1x1 ("square pixels").

# Exkurs in's reale Leben

Media Markt – Aktion: „Beim Preis hört die Verarsche auf“, Herbst 2004

Leuchtkraft und das ersichtlich aus jedem Betrachtungswinkel. Endlich ist es möglich, Fernseher auch an die Wand zu hängen.

**Plasma**

5000:1 Kontrastverhältnis

Bild-in-Bild –  
2 Tuner mit Bild-in-Bild-Funktion

**2149,-**

Auflösung 852 x 480 Pixel.

**16:9**

**106 cm**  
**Plasma-TV**

Groß & flach.

**HDTV**  
HIGH DEFINITION TELEVISION  
**Schärfer, größer, schöner.**

HDTV (High Definition Television) ist das Fernsehen von morgen. Gestochen scharfe und plastische Bilder – 5 x schärfer als normales Fernsehen (PAL) & bombastischer Sound, dank digitaler Übertragung.

Erleben Sie das Fernsehen von morgen.  
Jetzt in Ihrem Media Markt.

Mehr Info's unter  
[www.mediamarkt.de](http://www.mediamarkt.de)

RZ 42 PX 10 Plasma-TV-Gerät  
42 Zoll Plasma-TV mit 106 cm Bildschirmdiagonale.  
XD Engine DCDI Bildverbesserungssystem, 16,7 Mio. Farben, Auflösung 852 x 480 Pixel, Sichtwinkel über 160°, 2 Tuner, 2400 Seiten Videotext, 5000:1 Kontrast, Helligkeit 1500 cd/m<sup>2</sup>, inkl. Tischfuß, Fernbedienung.  
Art.Nr.: 172 0572

# Videosignale

# Was wir in dieser Runde lernen:

- Da alle Leuchtbilder in Displays zeilenweise aufgebaut werden, sind Videosignale zeilenweise organisiert.
- Videosignale müssen folglich ...
  - *Timing-Informationen* (*Zeilenende, Bildende*) **UND**
  - *Leuchterregungs-Informationen* (*Pixelfarbwerte*) enthalten.
- Einfache Beispiel für analoge und digitale Videosignale („Waveform“)
- Wichtige Übung: die Video-Waveform aus dem Zeileninhalt ableiten (und umgekehrt).
- Welcher grundsätzliche Zusammenhang besteht zwischen Bildinhalt und der Frequenz des Videosignals?

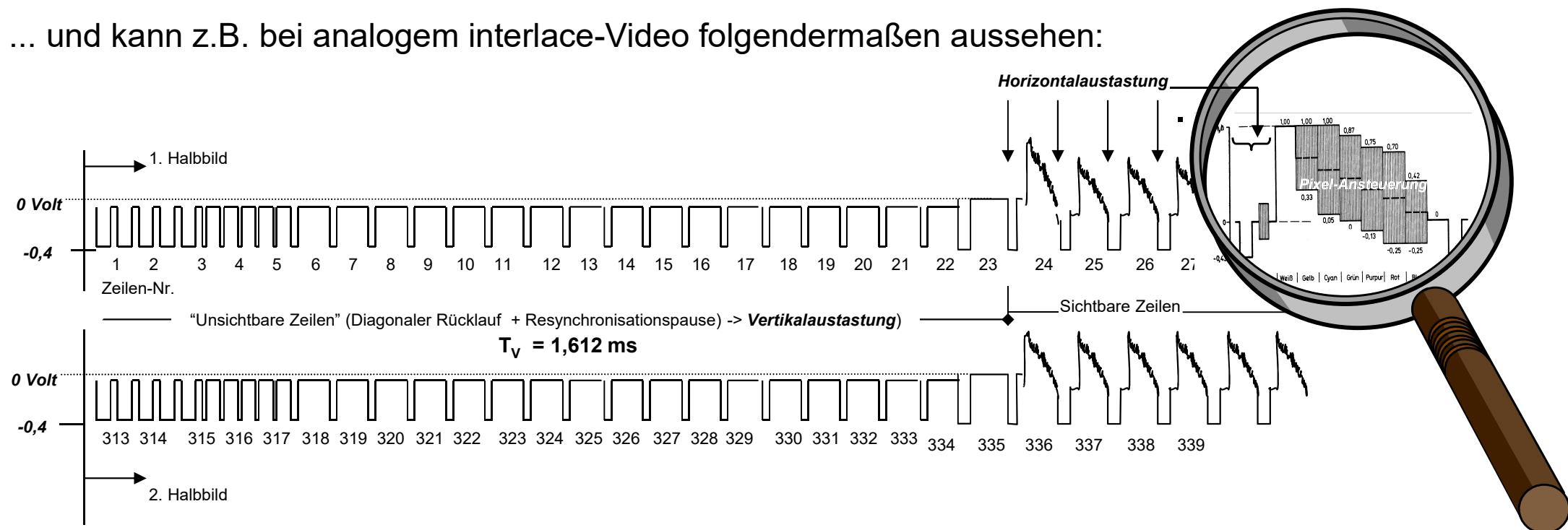
# Ein Signal, welches einen Bildschirm ansteuert, muß folgende Grundfunktionen besitzen ...

- Zeitsteuerung: Ende jeder Zeile  $\Rightarrow$  horizontaler Rücksprung + Beginn nächste Zeile  $\Rightarrow$  **Horizontalaustastung**  
Ende Bild1  $\Rightarrow$  diagonaler Rücksprung + Beginn Bild2  $\Rightarrow$  **Vertikalaustastung**

+

- Leuchterregung der Pixel in der jeweiligen Zeile (mit R', G', B' bzw. Y', R'-Y', B'-Y')

... und kann z.B. bei analogem interlace-Video folgendermaßen aussehen:



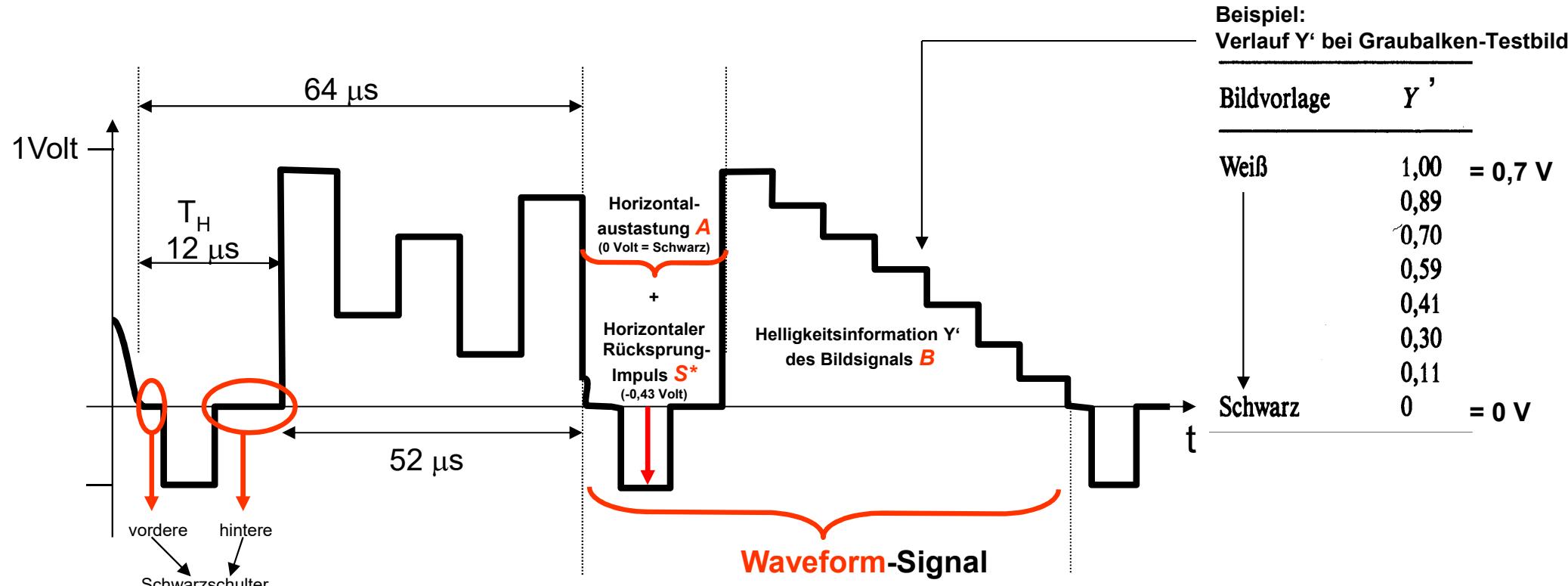
# Pixelinformationen und horizontale Zeilensprung-Steuerung zusammengefasst → „Waveform“:

Die Übertragung der Pixelinformation **einer sichtbaren Zeile** (Pixelansteuerung) erfolgt mittels

- des Lumasignals  $Y'$ ,
- und der Chromasignale (U) & (V)

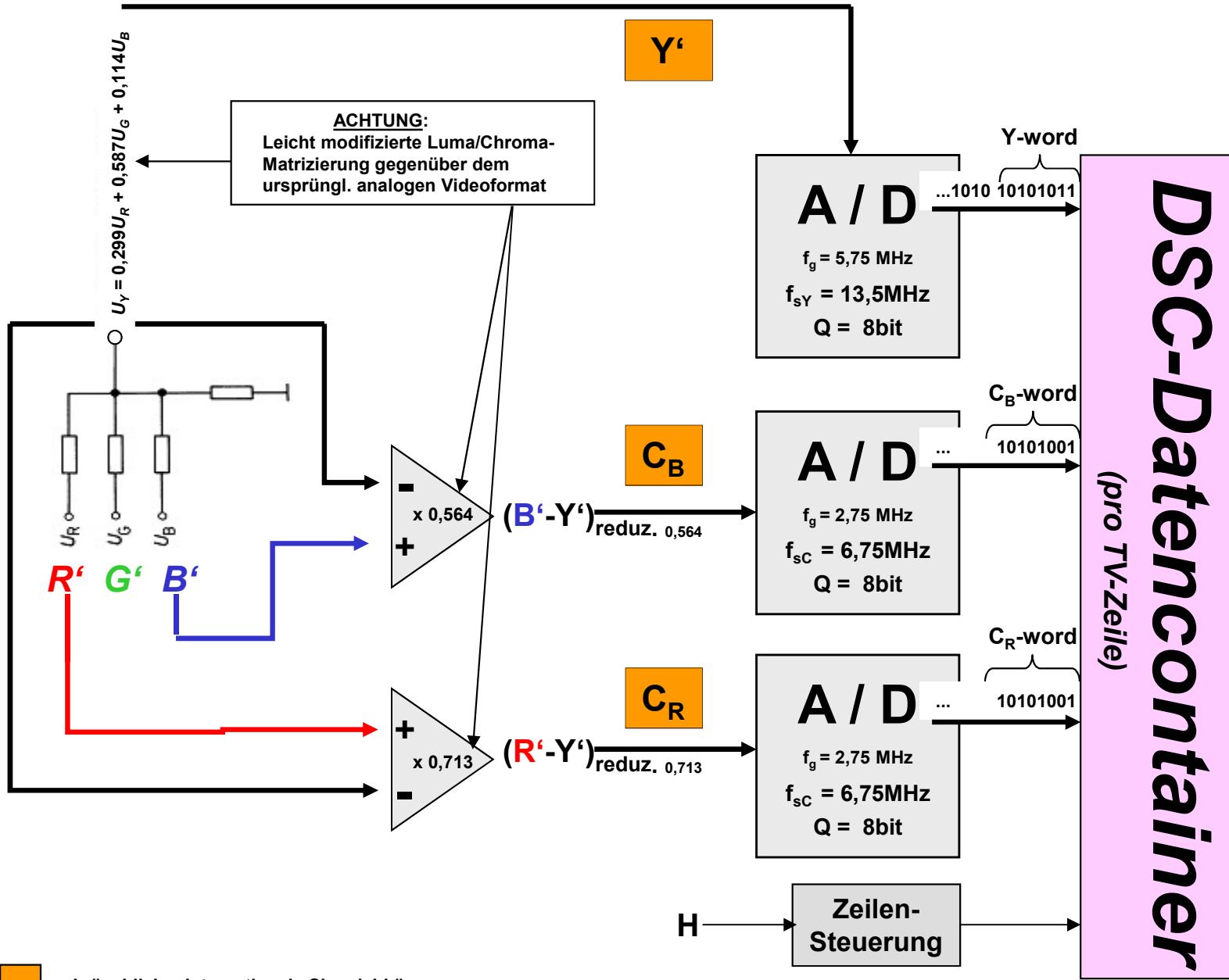
**Bsp.: Waveform des Lumasignals  $Y'$  für die Dauer einer Zeile!**

(Schwarz = 0,3 Volt, Weiss = 1 Volt).



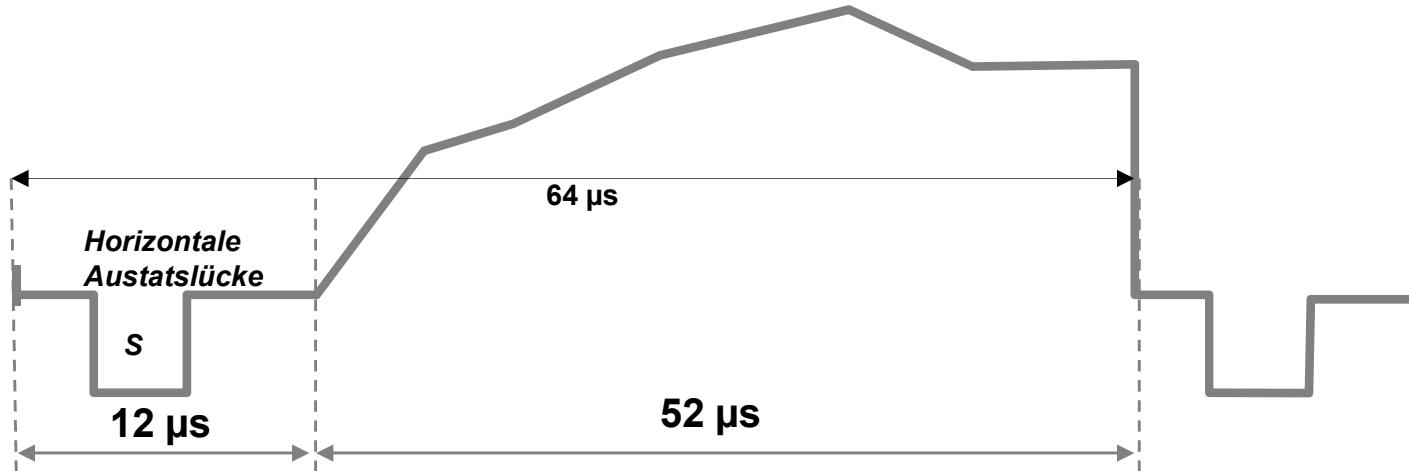
# Digital VIDEO-Interface in der TV - Studiotechnik:

(ITU-R BT.601, Digital Serial Components 4:3 → 720 Pixel pro Zeile, 4:2:2-Raster, interlace, Q wahlweise 8bit o. 10bit)

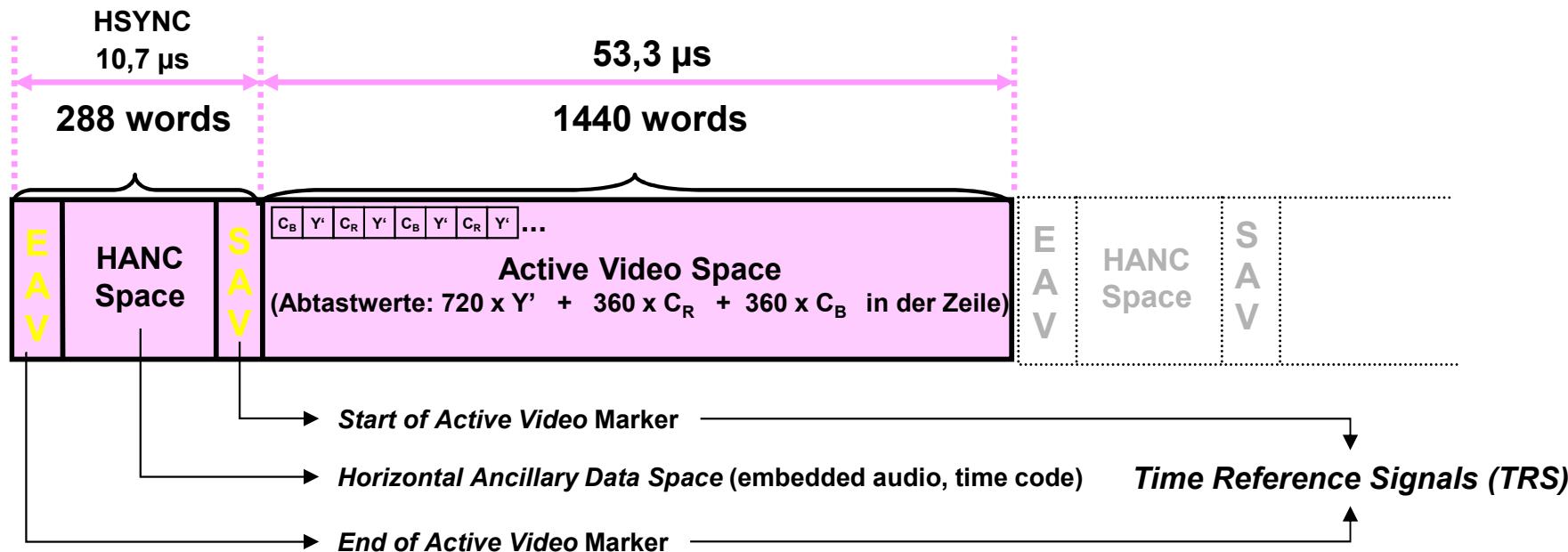


# Serial Digital Interface = Synchrone Überspielung des DSC - Datencontainers über serielle Schnittstelle

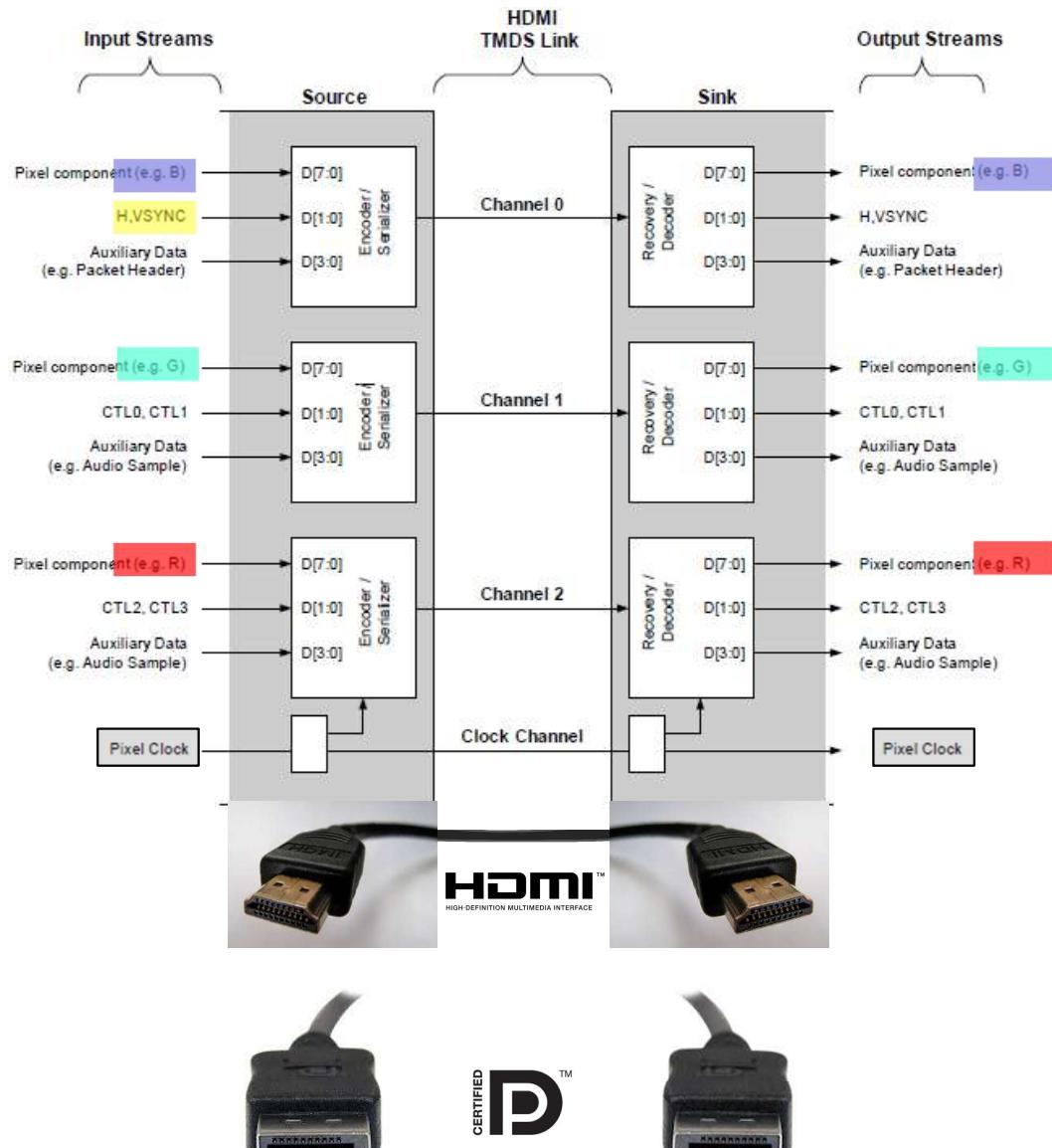
**Analoges Zeilen-Timing**  
(Beispiel: 625Z@25 Hz)



**DSC-4:2:2 Datencontainer**  
720/p/25  
(1 word = 8bit o. 10bit)

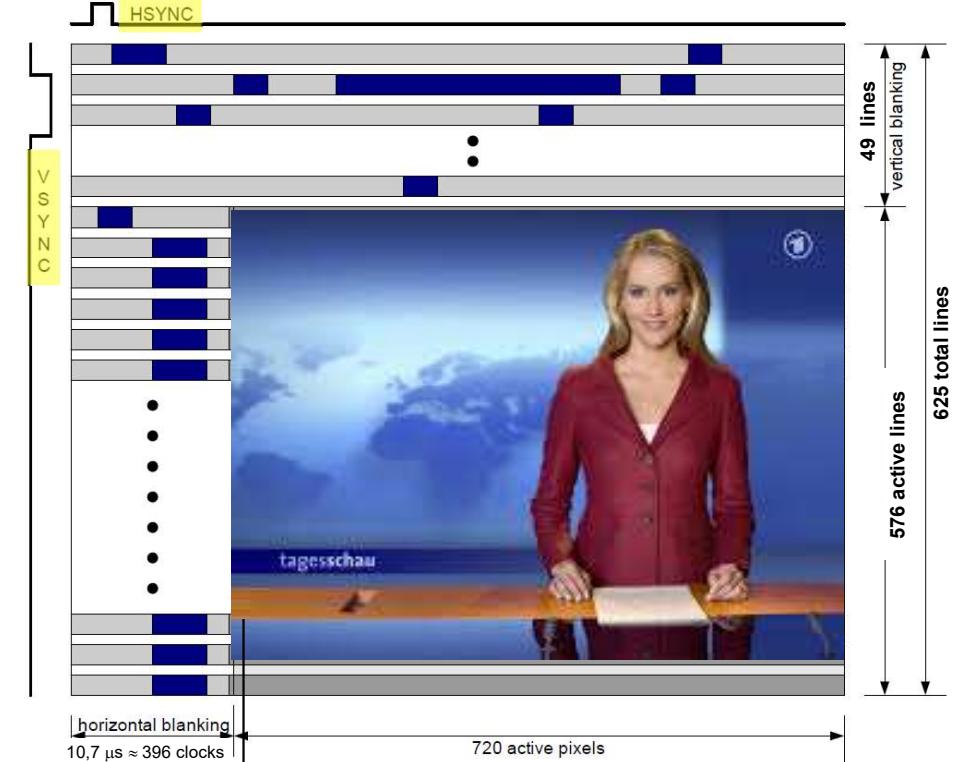


# Praxisbeispiel: Ansteuerung+Timing bei HDMI & Displayport

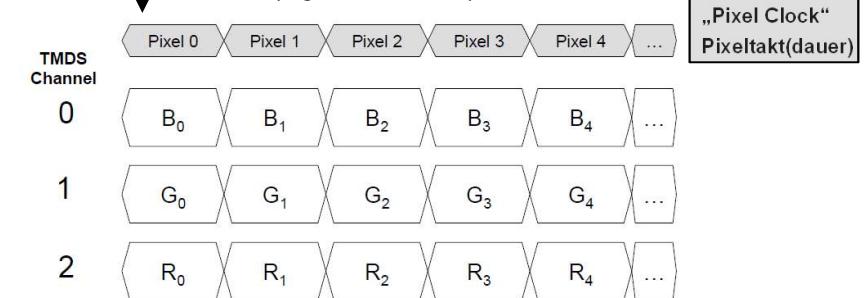


Auxiliary Data = eingebettete Zusatzinformationen (Videotext, Audio, etc.)

## am Beispiel 720x576@25p

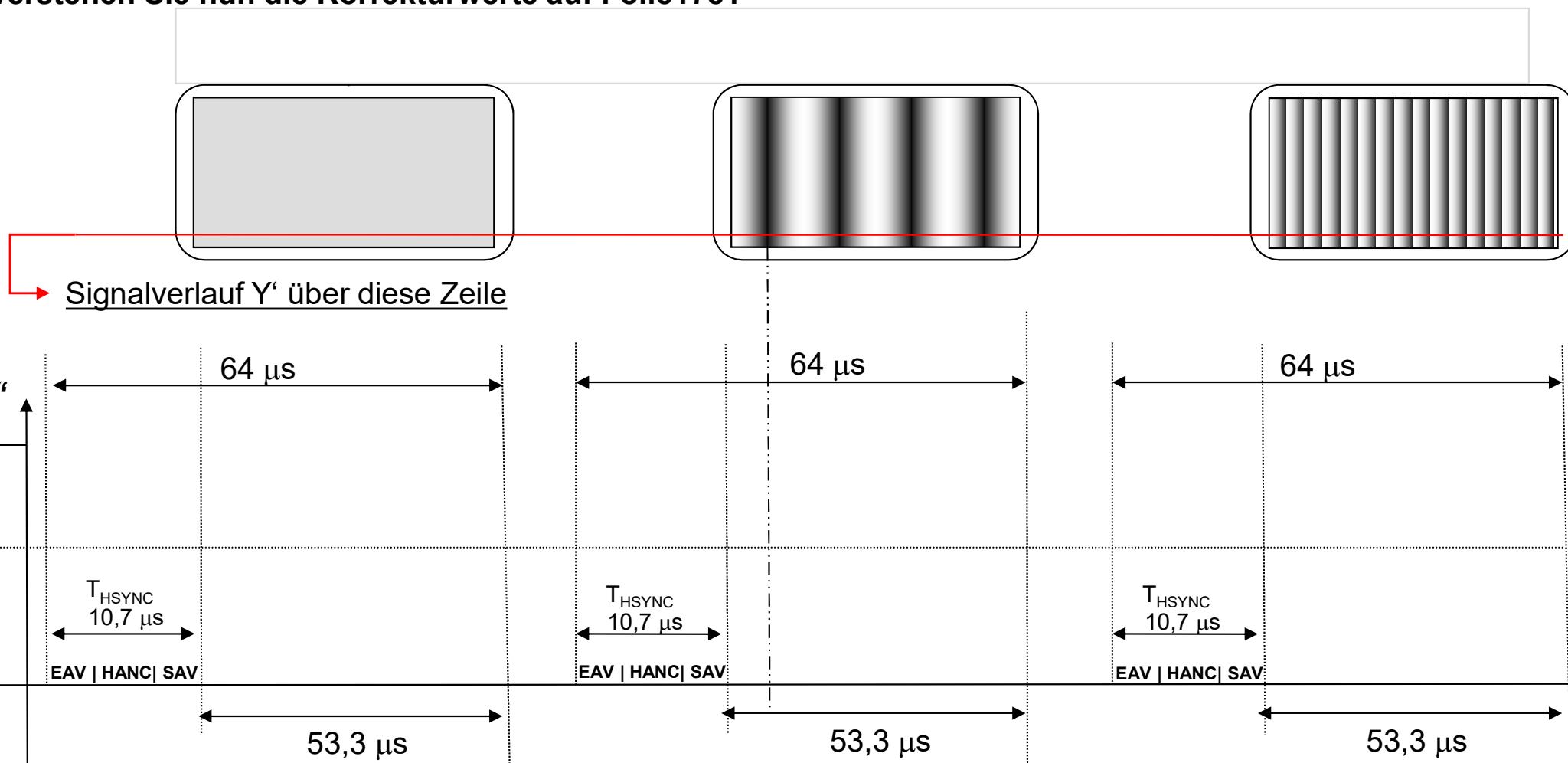


Zoom auf eine Zeile (digital waveform)



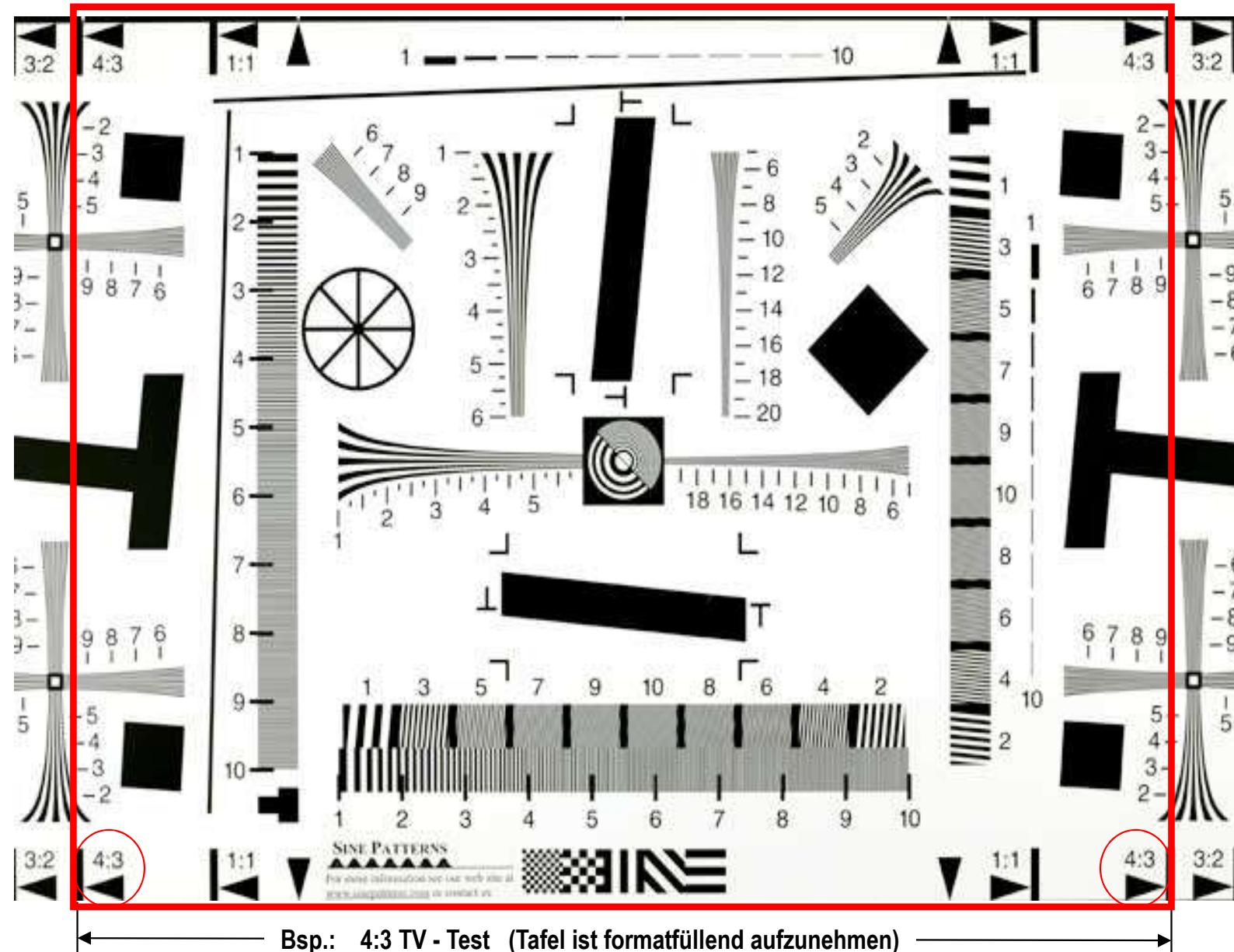
# Übungsaufgabe Bildinhalt vs. Videosignalfrequenz:

- Rechnen Sie zur Vorbereitung nochmals die Übungsaufgabe auf Folien 20/21!
  - Zeichen Sie den hor. Werteverlauf der Pixelhelligkeit  $Y'$  (waveform) für die verschiedenen Testmuster!
  - Berechnen Sie die horizontale Signalfrequenz  $f$  des Helligkeitssignals  $Y'$  in der jeweiligen Zeile!
  - Welche Bildinhalte erzeugen niedrfrequente Videosignale?
  - Welche Bildinhalte erzeugen hochfrequente Videosignale?
  - Verstehen Sie nun die Korrekturwerte auf Folie 178?
- Wichtig zum Verständnis der Arbeitsweise von Videocodecs (JPEG, H.264, etc.)



# Welcher Bildinhalt erzeugt welche Signalfrequenz?

Testbild



Die Muster testen das Frequenzverhalten eines Videosystems (z.B. Kamera, Monitor, etc.). Seitlich der Muster sind MHz-Angaben angebracht, an denen man die vom Muster erzeugte Signalfrequenz ablesen kann. **Hohe Signalfrequenz = feine Bilddetails, niedrige Signalfrequenz = flächige Bildinhalte!** Bis zu welcher Zahl sind die Linien noch klar abgrenzbar (und was hat das mit dem Begriff MTF zu tun? :)

# Typ. Videosignal-Messmöglichkeiten:



„Waveform“

Anzeige des zeitl. Verlaufs von  $Y'$  (Luma) in einer ausgewählten Zeile des Bildes (hier alternativ: alle Zeilen).



„Parade“

Anzeige des zeitl. Verlaufs von  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  in einer ausgewählten Zeile des Bildes (hier alternativ: alle Zeilen).



„Vector“

Anzeige der Chromawerte aller Pixel des aktuellen Bildes als Punktfolke (= Vektoren spitzen im HSL-Farbmodell).



„Histogramm“

Statistische Darstellung („Häufigkeit“) aller vorkommenden  $Y'$ -Werte im gesamten Bild.

von links:  $Y' = 0$

bis rechts:  $Y' = \text{max.}$

(Die horizontale Achse verweist folglich auf den absoluten Kontrastumfang des Bildes)  
siehe Folie 114

# Die wichtigsten Videosignal-Begriffe der Vorlesung verstanden?

Versuchen Sie nochmals folgende - irgendwie ähnlich lautende - Begriffe zu verstehen und miteinander in Beziehung zu setzen bzw. voneinander abzugrenzen:

- **Bildwechselfrequenz** →
- **Bildwiederholfrequenz** →
- **Videosignalfrequenz<sub>max</sub> (horiz.)** →
- **Pixeltakt(dauer)** →
- **Chroma-Subsampling** →
- **Kontrasthub** →
- **Modulationtransfer-Kurve** →

# Abschließende Übungsaufgabe zu Videosystemen:

Anbei sehen Sie einen Original-Auszug aus der internationalen Spezifikation für HD-Signale (Standard: ITU-R.BT 709). Versuchen Sie die Tabelle zu verstehen und ordnen Sie jeder Item-Nummer zu, in welcher Folie wir das behandelt haben!

Item	Parameter	System Values																	
		60/P	30/P	30/PsF	60/I	50/P	25/P	25/PsF	50/I	24/P	24/PsF								
1.1	Opto-electronic transfer characteristics before non-linear pre-correction	Assumed linear																	
1.2	Overall opto-electronic transfer characteristics at source	$V = 1.099 L^{0.45} - 0.099$ for $1 \geq L \geq 0.018$ $V = 4.500 L$ for $0.018 > L \geq 0$ where: $L$ : luminance of the image $0 \leq L \leq 1$ $V$ : corresponding electrical signal																	
1.3	Chromaticity coordinates (CIE, 1931)	$x$		$y$															
	Primary	Primary		Primary															
	- Red ( $R$ )	0.640		0.330															
	- Green ( $G$ )	0.300		0.600															
	- Blue ( $B$ )	0.150		0.060															
1.4	Assumed chromaticity for equal primary signals (Reference white)	$D_{65}$																	
		$x$		$y$															
	$E_R = E_G = E_B$	0.3127		0.3290															
3.2	Derivation of luminance signal $E'_Y$	$E'_Y = 0.2126 E'_R + 0.7152 E'_G + 0.0722 E'_B$																	
5.5	Coding format	Linear 8 or 10 bits/component																	
5.6	Quantization levels	8-bit coding				10-bit coding				{									
	- Black level $R, G, B, Y$	16				64				}									
	- Achromatic $C_B, C_R$	128				512				}									
	- Nominal peak $- R, G, B, Y$ $- C_B, C_R$	235 16 and 240				940 64 and 960				}									

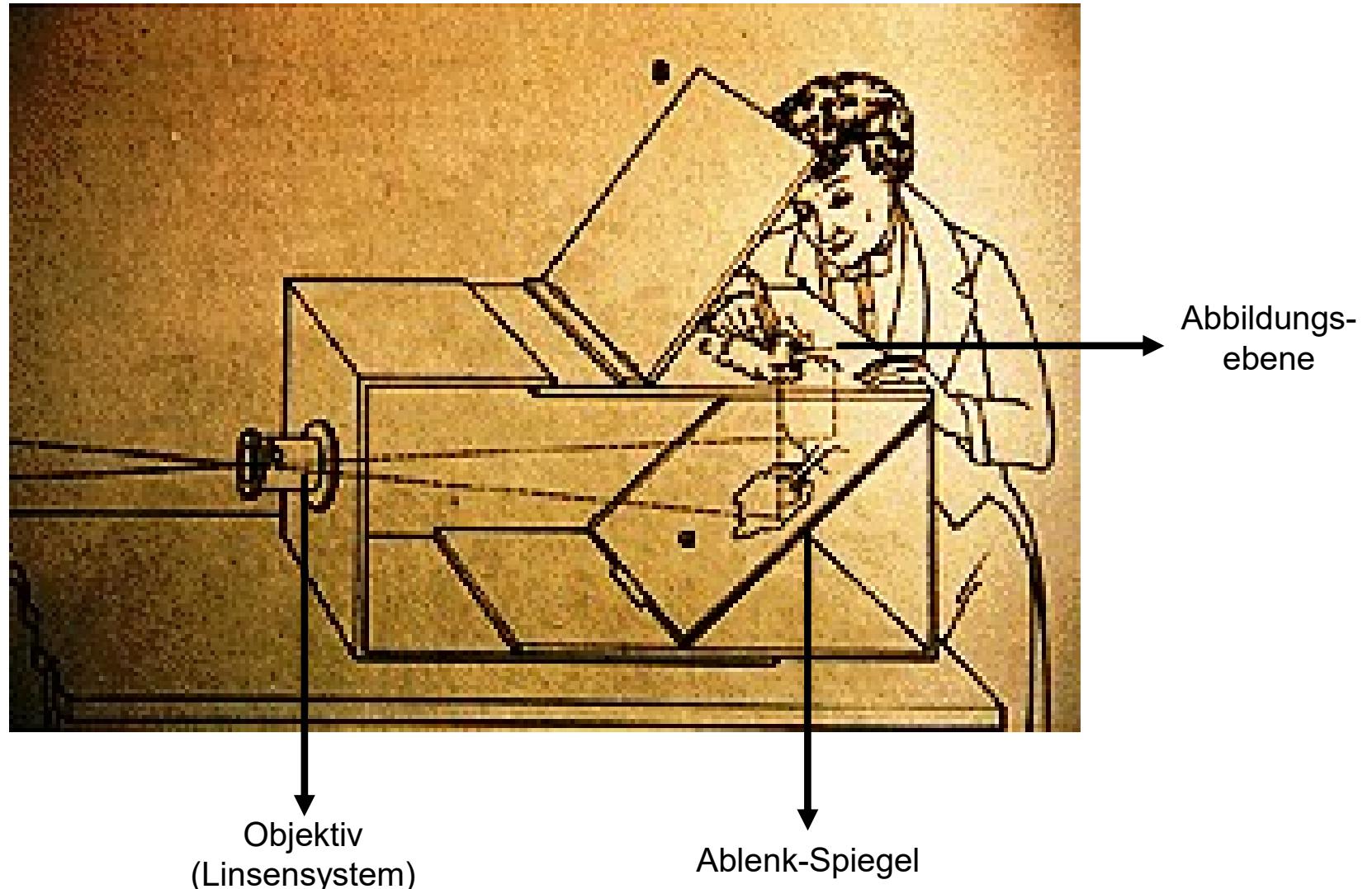
# Elektronische Bildaufnahme

[www.explodedview.dm.hs-furtwangen.de !!](http://www.explodedview.dm.hs-furtwangen.de !!)

## Was wir in dieser Runde lernen:

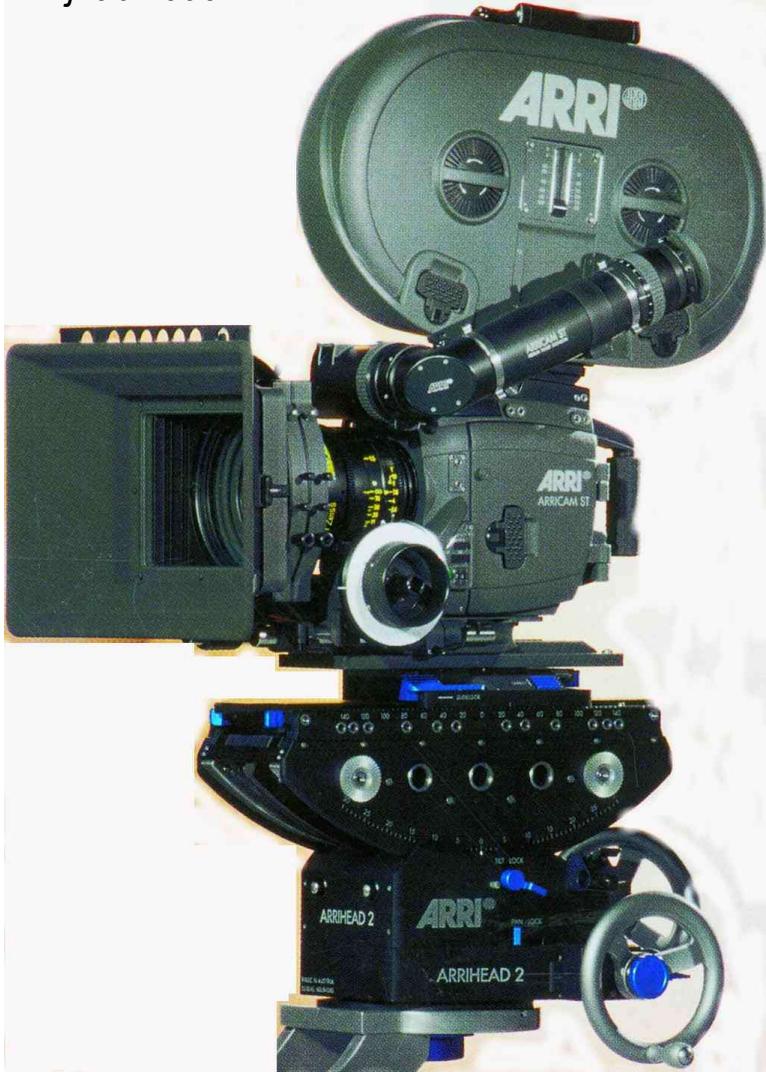
- Welches sind die prinzipiellen *mechanischen Baugruppen* einer Kamera / eines Camcorders?
- Welches sind die *grundlegenden internen Prozess-Schritte* in JEDEM Kamerakopf?
  - Worum geht es beim *optischen* Processing in Kameras?
  - Worum geht es beim *sensor-spezifischen* Processing in Kameras?
  - Worum geht es beim *video-spezifischen* Processing in Kameras?
- Wie werden Sensorgrößen spezifiziert?
- Welche Sensortypen/Ausleseverfahren gibt es (CCD vs. CMOS)? Stärken und Schwächen.
- Welches sind spezifische Sensor-Bildfehler? (in Extremsituationen)
- Nach welchen *technischen Kriterien* kann man Kameratypen schnell voneinander unterscheiden?

# Camera Obscura: (*lat. „Das dunkle Zimmer“*)



# Professionelle FILMkameras

hier: analoge ARRICAM, ST / 35mm,  
Bj. ab 2006



hier: elektronische ARRI ALEXA 35,  
Bj. ab 2018

Elektronische Cine-Kamera  
mit 4,6K Sensor bis 120 fps  
und SSD-Festplattenaufzeichnung



Aufzeichnbare Bildformate s. Folie 186 / Digitales Kino

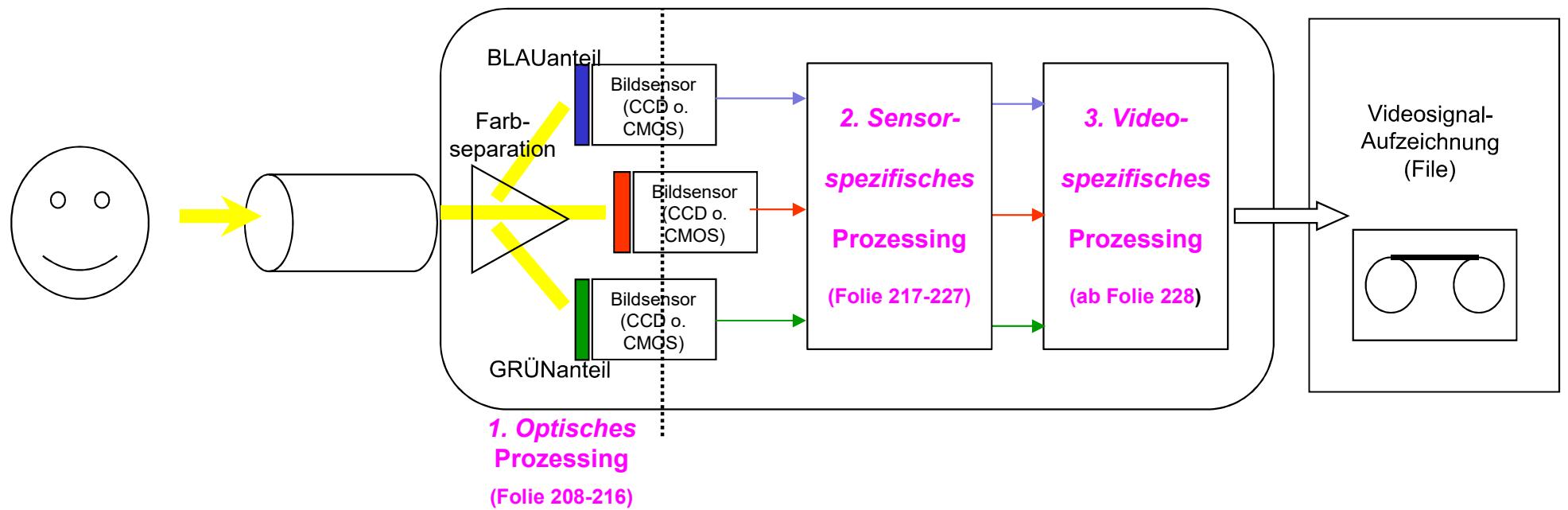
# Prinzipielle Baugruppen einer professionellen Kamera:



Objektiv

Kamerakopf

Recorderteil



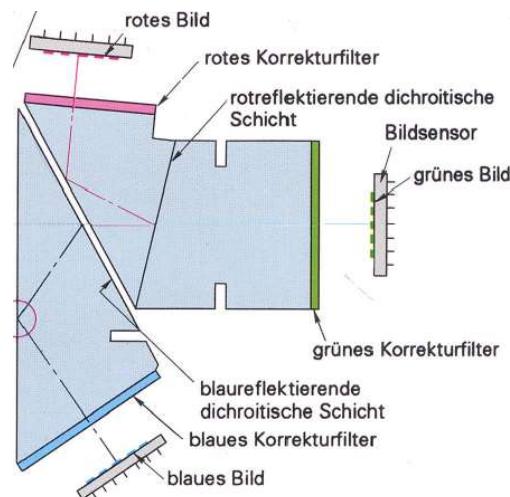
**Optisches**  
**Prozessing**  
**in elektronischen Kameras**

# Prinzipien der Primärfarben-Separation in Kameras:

## Zur Erinnerung: Die Grundregeln des farbigen Lichtsehens:

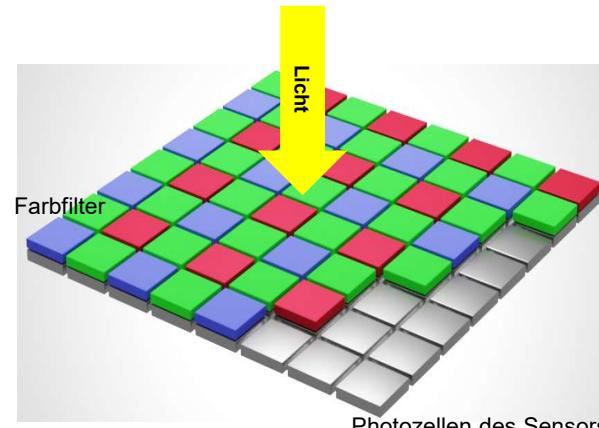
- Jeder Körper oder Fläche strahlt Licht ab.
- Jedes Licht-Bild kann in viele kleine, Bild-Punkte abgetastet werden (Picture Element = Pixel).
- **Jeder Bild-Punkt kann bezüglich seiner auslösenden Farbempfindung (relativ) vollständig durch eine Kombination der Primärvalenzen ROT, GRÜN und BLAU beschrieben werden.**

Dichroitischer\* Prismenblock



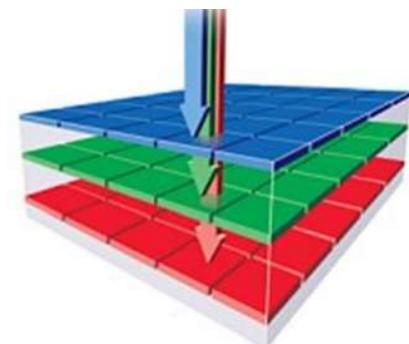
Mosaik-Filter (Bayer-Matrix)

nach Bryce E. Bayer - 1976



Eindringungsséparation

z.B. Sigma Foveon X3-Sensor,  
ähnlich analoger Filmemulsion



\* als griech. „dichroos“ = zweifarbig werden Filter bezeichnet, die - abhängig vom Auftrittswinkel - bestimmte Wellenbereiche durchlassen und andere reflektieren.

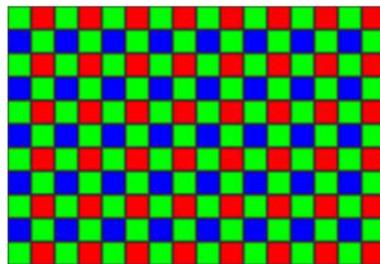
# Demosaicing: Aus Dots werden Pixel

## Zur Erinnerung: Die Grundregeln des farbigen Lichtsehens:

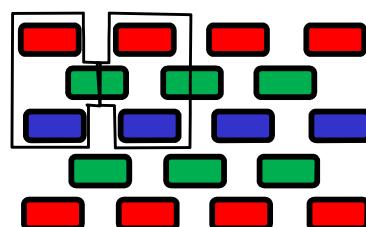
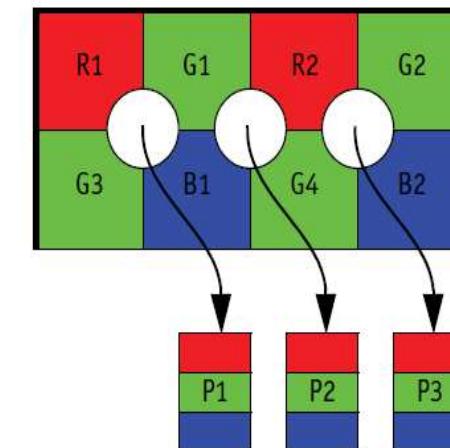
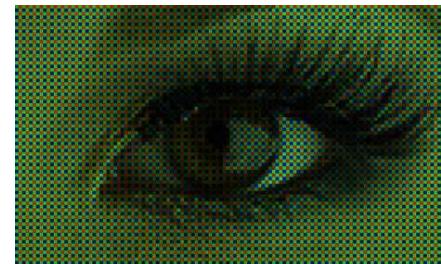
- Jeder Körper oder Fläche strahlt Licht ab.
- Jedes Licht-Bild kann in viele kleine, Bild-Punkte abgetastet werden (Picture Element = Pixel).
- Jeder Bild-Punkt kann bezüglich seiner auslösenden Farbempfindung durch eine Kombination der Primärvalenzen ROT, GRÜN und BLAU beschrieben werden.

Bsp.: örtliche Rasterung

1 Chip Sensor



RAW-Bild auf Sensor



Bsp.: örtliche Rasterung  
3 Chip Sensor

Example:  
Simple „demosaicing“ over a 2 x 2 Kernel  
(Superpixel Method)

$$P_{1\text{ red}} = R_1$$

$$P_{2\text{ red}} = R_2$$

$$P_{3\text{ red}} = R_2$$

$$P_{1\text{ green}} = \frac{G_1 + G_3}{2}$$

$$P_{2\text{ green}} = \frac{G_1 + G_4}{2}$$

$$P_{3\text{ green}} = \frac{G_2 + G_4}{2}$$

$$P_{1\text{ blue}} = B_1$$

$$P_{2\text{ blue}} = B_1$$

$$P_{3\text{ blue}} = B_2$$

# Schnellüberblick: Pixel & Dots(Subpixel)

## Film („Hollywood“):

Optische Horizontal-Auflösung (statisch) in der Kamera entspricht ca. **4000 Farbpixel pro Bildbreite** (4k-Horizontalauflösung). In der Projektionsebene (Kino) verbleiben davon oft meist nur ca. **2000 Pixel** (2k-Horizontalauflösung). Grund: Bearbeitungs- und Projektionsverluste

## Digitale Photokameras: (meist *Ein-Chip*-Systeme mit Mosaik-Filter, räuml. Auflösungsverlust ca. 30%)

„8 Megapixel-Typ“: opt. Auflösung ca. **5,6 Megapixel**, beworbene Zahl oft = Summe R,G,B - dots

„20 Megapixel-Typ“: opt. Auflösung ca. **13,3 Megapixel**, beworbene Zahl oft = Summe R,G,B - dots

## Videokameras:

UHD, 16:9,

**3840 x 2160 Pixel**

HD, 16:9

**1920 x 1080 Pixel**

SD, 4:3

**720 x 576 Pixel**

## ACHTUNG !

**DOT ≠ PIXEL**

Gilt für Videotechnik (**R,G,B-Farbsystem**) und Drucktechnik (**C,M,Y,K-Farbsystem**)

**Faustregel: jeweils 3-4 farbige dots oder subpixel ergeben einen farbigen Pixel**

Beachte ABER: Unterschiedliche technische Realisierung additives und subtraktives Farbsystem !

RGB: drei Licht-dots werden eng *nebeneinander* gesetzt, um in entsprechender Entfernung additiv einen Farbeindruck zu erzeugen !

CMYK: drei Tinten-dots werden (fast) *übereinander gedruckt*, um in subtraktiver Mischung (auf der Basis „Filterung des weißen Papiers“) einen Farbeindruck zu erzeugen !

„Unter der Auflösungsangabe **DOTS per Inch (dpi)** versteht man im Farbdruck die Anzahl an primärfarbigen Druckpunkten (dots), die der Drucker auf einer Strecke von einem Inch (=2,54 cm) ausdrucken kann“ (aus: Kompendium der Mediengestaltung, 2002)

# Sensor-spezifisches Prozessing in elektronischen Kameras

# Bildsensorgrößen professioneller Film-Kameras



**Die Bildsensorgröße beeinflusst maßgeblich ...**

- das Rauschverhalten der Kamera bei schwachem Licht, in Bezug zu ihrer (örtlichen) Auflösungsfähigkeit**

(je größer der Sensor desto besser die Ausbeute an Lichtenergie, desto rauschfreiere, hochauflöste Bilder)

- das gestalterische (selektive) Tiefenschärfeverhalten der Kamera**

(je größer der Sensor desto geringer die Tiefenschärfe, s.a. Folien 68ff)

[zum Vergleich: Analogfilm](#)



[zum Vergleich: Smartphone-Kameras](#)

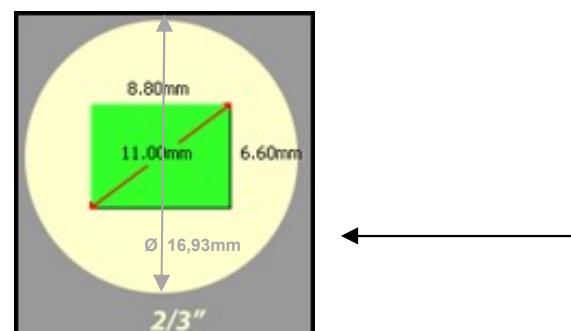
Modell	iPhone 11 Pro Max	Huawei P30 Pro	Xiaomi 13 Pro
Sensor	Sony IMX 503	Sony IMX6004	Sony IMX989
Sensorklasse	1/1,233 Zoll	1/1,72 Zoll	1 Zoll
Sensorgröße ca.	4,24 x 5,65 mm (24 mm <sup>2</sup> )	5,53 x 7,37 mm (41 mm <sup>2</sup> )	12,8 x 9,6 mm (122mm <sup>2</sup> )

Quelle: Fletcher Comparison Chart 2018

# Sensor-Zollbezeichnungen & tatsächliche Bildsensorgröße

Neben der direkten metrischen Angabe der aktiven Sensorfläche hat sich im Bildsensorbau eine Tradition aus der Zeit der Bildaufnahmeröhren erhalten, in der der mechanische Außendurchmesser des Glaskolbens (in Zoll) zur Größenangabe verwendet wurde. Allerdings war die **lichtempfindliche Aufnahmefläche** der Röhren deutlich kleiner als der Außendurchmesser ihres Glaskolbens: So hatte beispielsweise eine 2/3"-Röhre nur eine aktive Aufnahmefläche von ca. 11 mm Bilddiagonalen.

Ein heutiger 4:3-Bildsensor-Chip *Typ 2/3"* hat also die gleiche aktive Aufnahmediagonale wie eine ehemalige 2/3"-Röhre (Glaskolbendurchmesser metrisch: 16,93 mm), nämlich 11mm bzw. eine **lichtempfindliche Aufnahmefläche** von 6,6mm x 8,8mm.



Lichtempfindliche Fläche ehemalige Aufn.-Röhre Ø 2/3"

8,8 x 6,6 mm

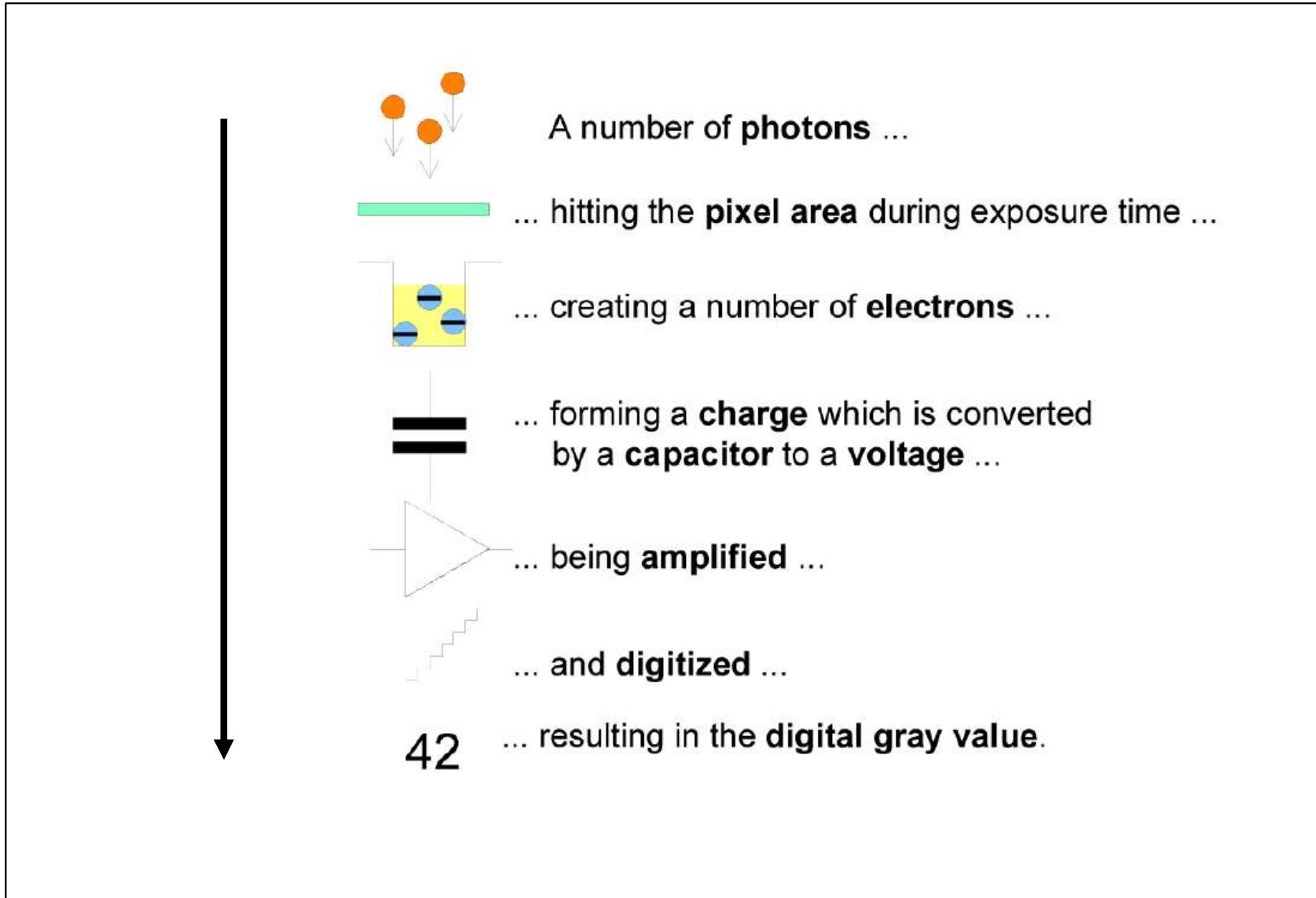
Type	Aspect Ratio	Dia. (mm)	Sensor (mm)		
			Diagonal	Width	Height
1/3.6"	4:3	7.056	5.000	4.000	3.000
1/3.2"	4:3	7.938	5.680	4.536	3.416
1/3"	4:3	8.467	6.000	4.800	3.600
1/2.7"	4:3	9.407	6.721	5.371	4.035
1/2.5"	4:3	10.160	7.182	5.760	4.290
1/2.3"	4:3	11.044	7.70	6.16	4.62
1/2"	4:3	12.700	8.000	6.400	4.800
1/1.8"	4:3	14.111	8.933	7.176	5.319
1/1.7"	4:3	14.941	9.500	7.600	5.700
2/3"	4:3	16.933	11.000	8.800	6.600
1"	4:3	25.400	16.000	12.800	9.600
4/3"	4:3	33.867	22.500	18.000	13.500
1.8" (*)	3:2	45.720	28.400	23.700	15.700
35 mm film	3:2	n/a	43.300	36.000	24.000

Bildquelle: [http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera\\_System/sensor\\_sizes\\_01.htm](http://www.dpreview.com/learn/?/Glossary/Camera_System/sensor_sizes_01.htm)

= Lichtempfindliche Fläche Bildsensor-Chip **Typ 2/3"** (oder Sensorklasse 2/3")

# Opto-elektronische Umwandlung – alles ganz einfach ;>):

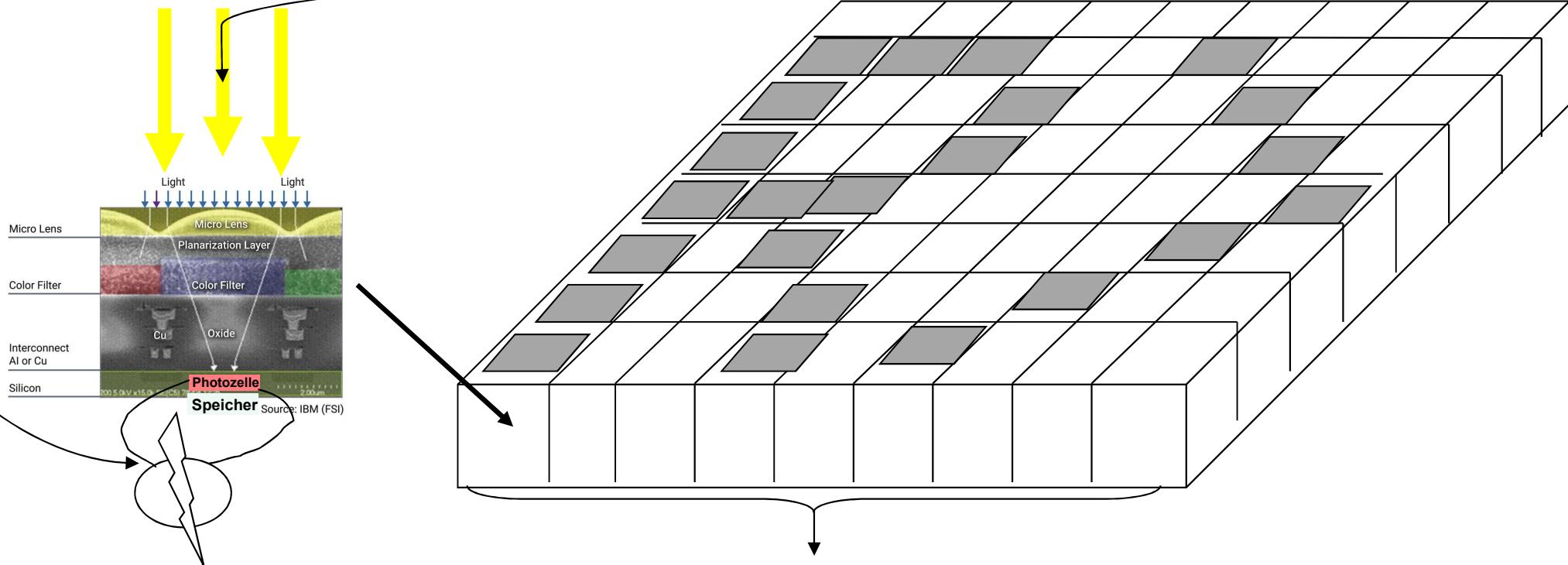
„Physical model of a sensor/camera“ gemäß internationalem Standard **EMVA 1288** (European Machine Vision Association)



# Photoelektrischer Effekt im Detail: Optisch/elektrische Bildwandlung

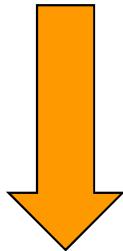
## Physikalisches Grundprinzip:

- Einfallendes Licht kann mittels seiner Strahlungsenergie und Belichtungsdauer elektrische Ladungen auf einer Photodiode auslösen.
- Diese „freien“ Elektronen werden durch eine Spannungsdifferenz in einen Speicher hinein gesaugt.
- Die Höhe des fließenden Stromes ist direkt proportional zur Intensität des Lichtes.



- Photodiode und Speicherbereich bilden ein sogenanntes *Sub-Picture-Element* (Subpixel).
- Viele einzelne Subpixel werden zu einem *Bildsensor-Array* zusammengefasst.
- Das Array wird *zeilenweise* ausgelesen („Eimerkette“ oder „x-y-adressiert“) und das entsprechende elektrische *Bildzeilensignal* generiert.
- Die derzeit kleinste, herstellbare Pixelgröße liegt bei  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ,
- bei professionellen Videokameras variiert die Pixelgröße zwischen 5 und  $10\mu\text{m}$  Kantenlänge.

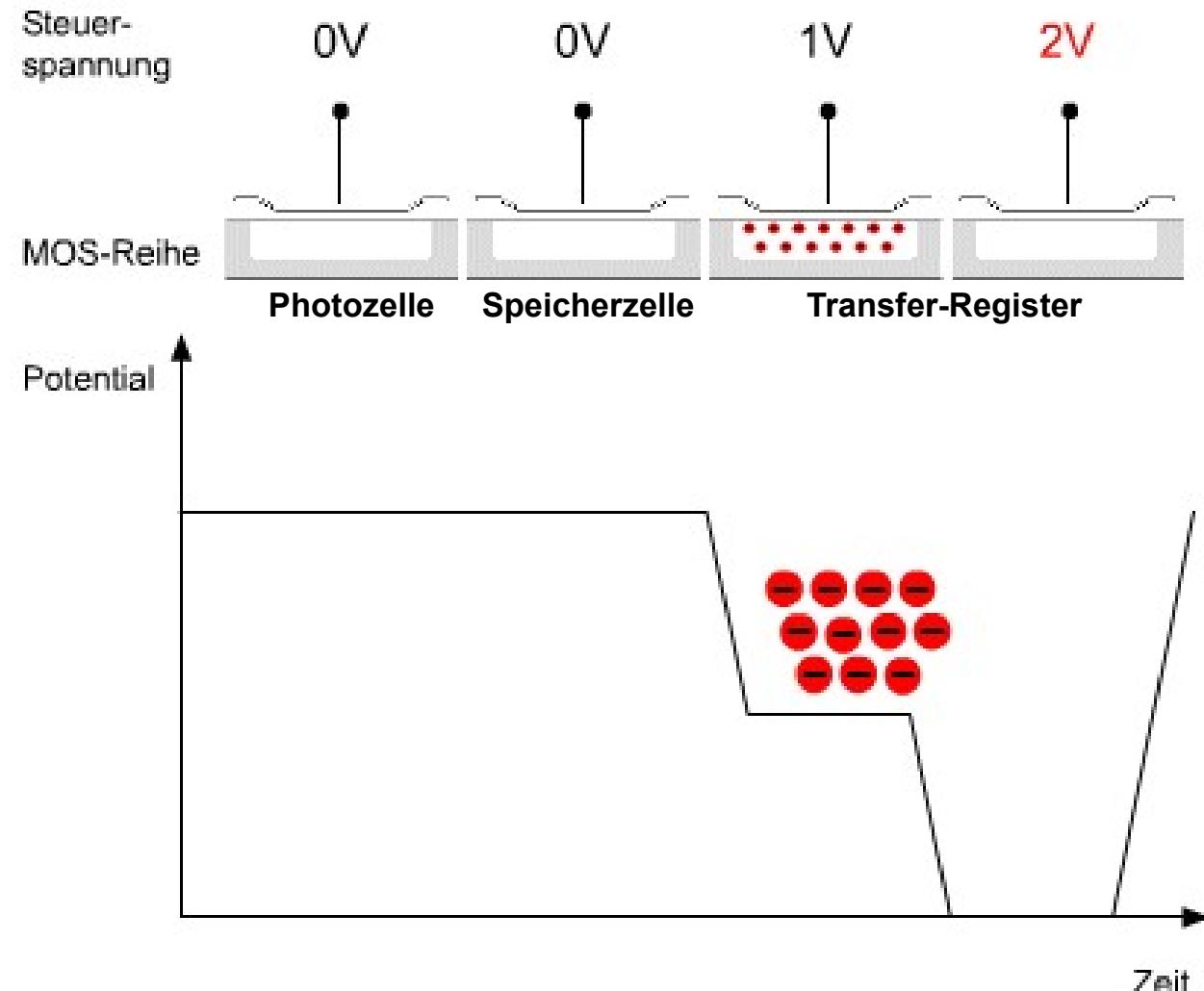
**Wenn alle Bildsensoren nach dem  
photo-elektrischen Effekt arbeiten,  
*wie unterscheiden sich dann die  
Sensortechnologien (CCD, CMOS) überhaupt noch?***



**Im Wesentlichen durch den  
Ausleseprozess der Sensorzellen!**

# Ladungstransport durch „Eimerketten-Prinzip“

\*(CCD-Charge Coupled Device = Ladungs-gekoppeltes-(Sensor)Element)



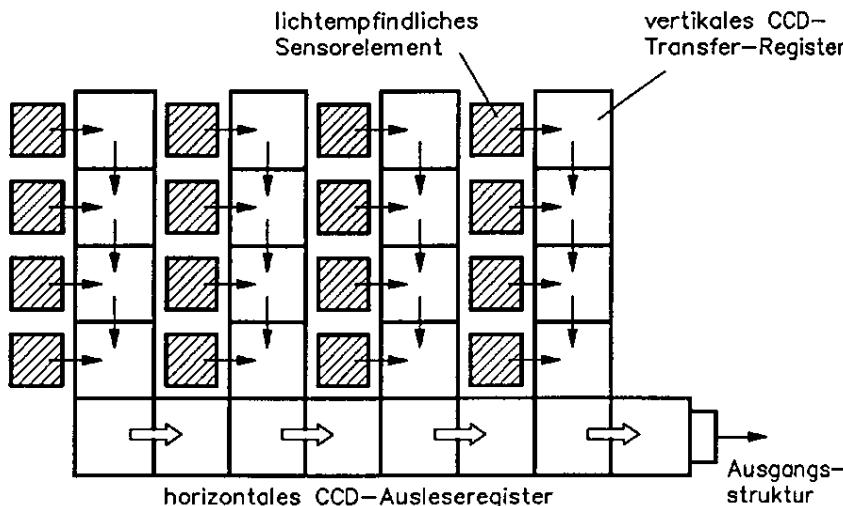
Schauen Sie sich dazu unbedingt die Animationen im Dateibereich und in ExplodedView an !!!



Ccd-chip.swf

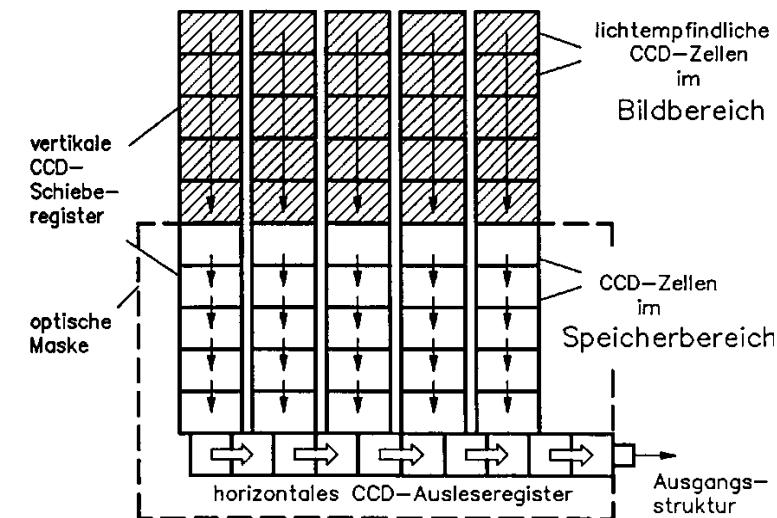
# Varianten des Auslesen der Ladungsinformation aus den

## CCD – Sensoren:

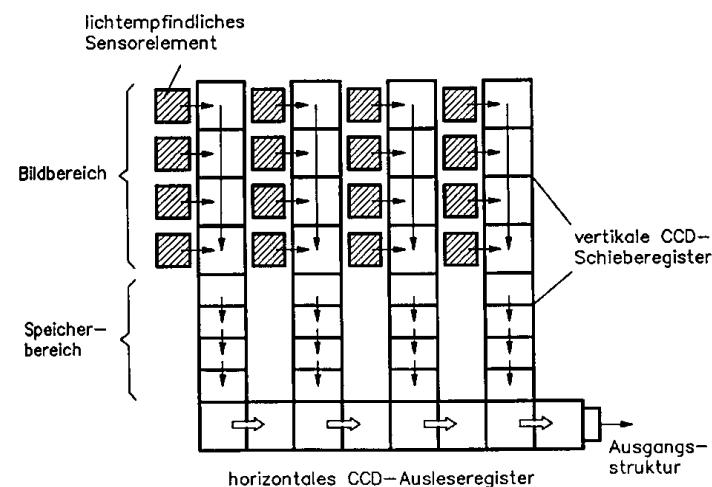
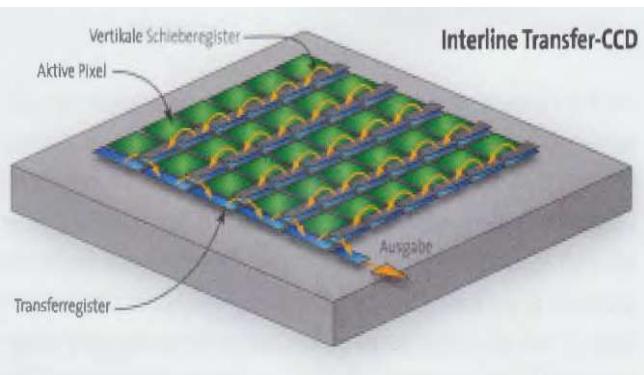


**Interline Transfer (IT)**

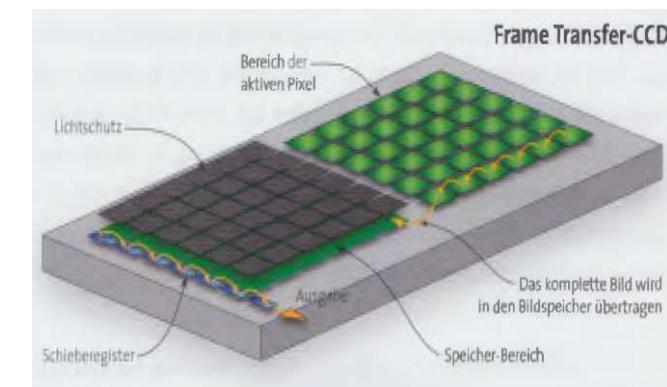
**Achtung:**  
Der komplette Abtransport aller Sensorwerte muss spätestens bis zur vertikalen Austastlücke / „V-Lücke“ erfolgen sein (Folien 192, 225), = Beginn des nächsten Frames



**Frame Transfer (FT)**



**Frame-Interline Transfer (FIT)**



## → Blooming, Smear

Bildbeispiel s. nächste Seite

- Durch die räumliche Nähe der Photodioden auf dem Sensor können bei extrem starken Lichtern im Bildmotiv (oder hell strahlenden Motiven → Schnee, Sonnenschein) Elektronen von einer Photozelle in die andere „überschwappen“. Dieser Effekt wird als „blooming“ bezeichnet.
- Insbesondere bei IT-Chips kann - bei schrägem Lichteinfall - noch ein anderer Effekt auftreten: das *Eindringen von Photonen in den Speicherbereich während des vertikalen Auslesevorgangs*. Im Ergebnis zieht sich ein heller vertikaler Streifen durch das ganze Bild. Man nennt diesen Effekt daher *vertikales Schmieren* (engl. „**vertical smear**“). Er ist aber heute durch verbessertes CCD-Chipdesign (fokussierende Mikrolinsen über den Photozellen, gute Photo-Shieldings der Speicherzellen und kamerainterne Bildkorrektur) möglich, diesen Effekt deutlich zu reduzieren.

## Spezifische CCD-Bildfehlerbeispiele (in Extremsituationen):

- **Blooming**

Elektronen in überbelichteten Zellen schwappen in benachbarte Zellen über



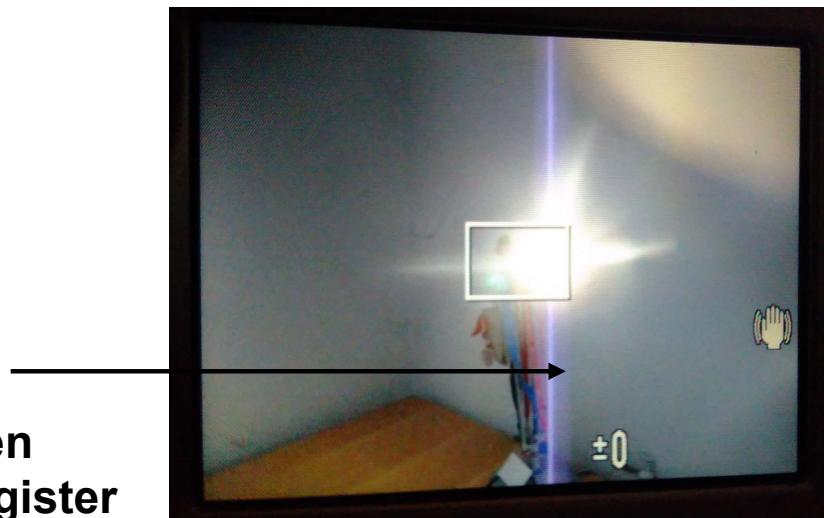
- **Thermisches Rauschen**

Temperatureffekte der Halbleiterschaltungen des Sensors

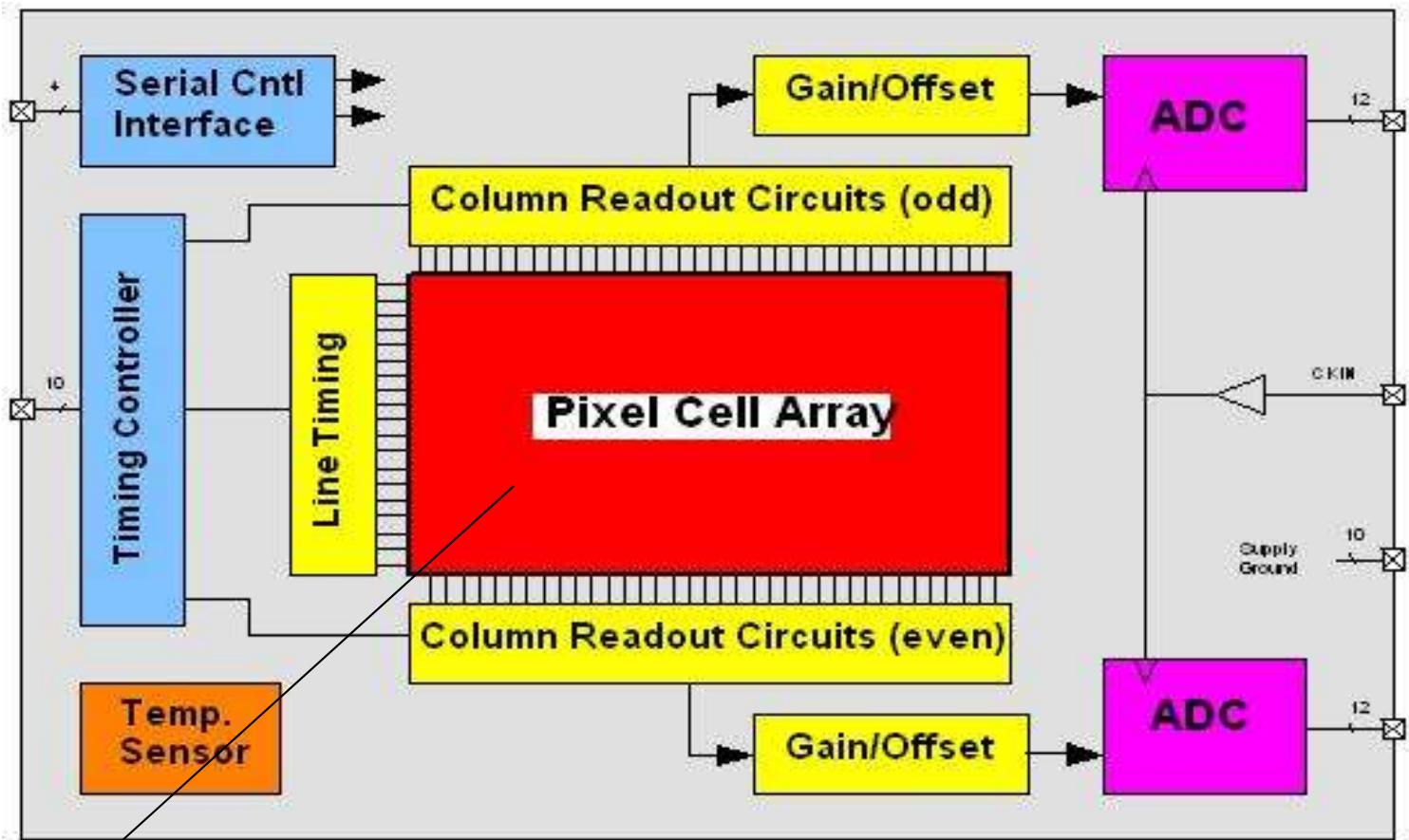


- **(vertical) Smear**

Während des Abtransports schwappen weitere Elektronen in die Transportregister

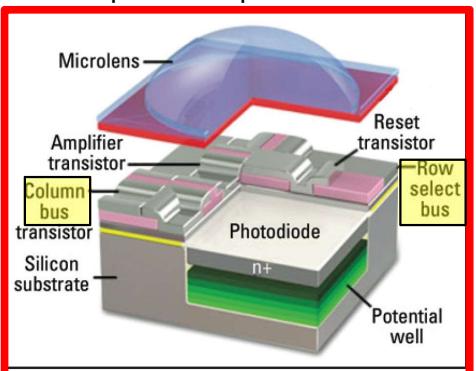


# Ladungstransport durch „x-y-Adressierung“



Aufbau CMOS Sensor einer HD-Kamera (2009), Quelle: Thomson

Ein Subpixel:  $5 \times 5 \mu\text{m}$



Jedes der 6,3 Mio. CMOS-Subpixel im Cell Array besteht aus einer **Photodiode mit angekoppeltem Verstärker** („Amplifier transistor“) und wird im x-y-Ausleseverfahren angesteuert (Colum+Row-Bus).

# CMOS-Sensor (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

CMOS-Bildwandler unterscheiden sich von CCD-Bildwandlern im Wesentlichen dadurch, wie die ausgelösten Ladungen umgewandelt und abtransportiert werden. Während CCD-Speicher nach dem „Eimerkettenprinzip“ ausgelesen werden, sind die Subpixel in CMOS-Bildwandlern einzeln **x-y adressierbar** („column-row-readout“) und ihr Inhalt gezielt getaktet auslesbar (z.B. auch während der ersten 10% Belichtung und dann nochmals bei 90%-Belichtung → *dual slope* Verfahren oder das selektive Auslesen von bestimmten region-of-interest/ROI auf dem Sensor).

Da jede CMOS-Photozelle direkt mit einem Verstärker versehen ist, wird auch oft von „Active Pixel“-Systemen (APS) gesprochen wird (→ hohe Lichtempfindlichkeit).

Vertical smear tritt bei CMOS systembedingt kaum mehr auf.

Desweiteren ist der Energiebedarf/ Stromverbrauch (bei gleicher Sensorgröße) geringer und aufgrund von APS können deutlich höhere Frameraten beim Auslesen erzielt werden (vorteilhaft für Highspeed/ SlowMotion).

## Systembedingte CMOS-Probleme:

- Rolling-Shutter (→ nächste Folie)  
(je nach Transistor- Design)
- Fixed Pattern Noise  
(muss hinter Sensor herausgefiltert werden!)
- CMOS Sensoren weisen meist eine deutlich erhöhte Anzahl defekter Pixel als CCD auf  
(muss kameraintern korrigiert werden  
→ Defect Pixel Management)

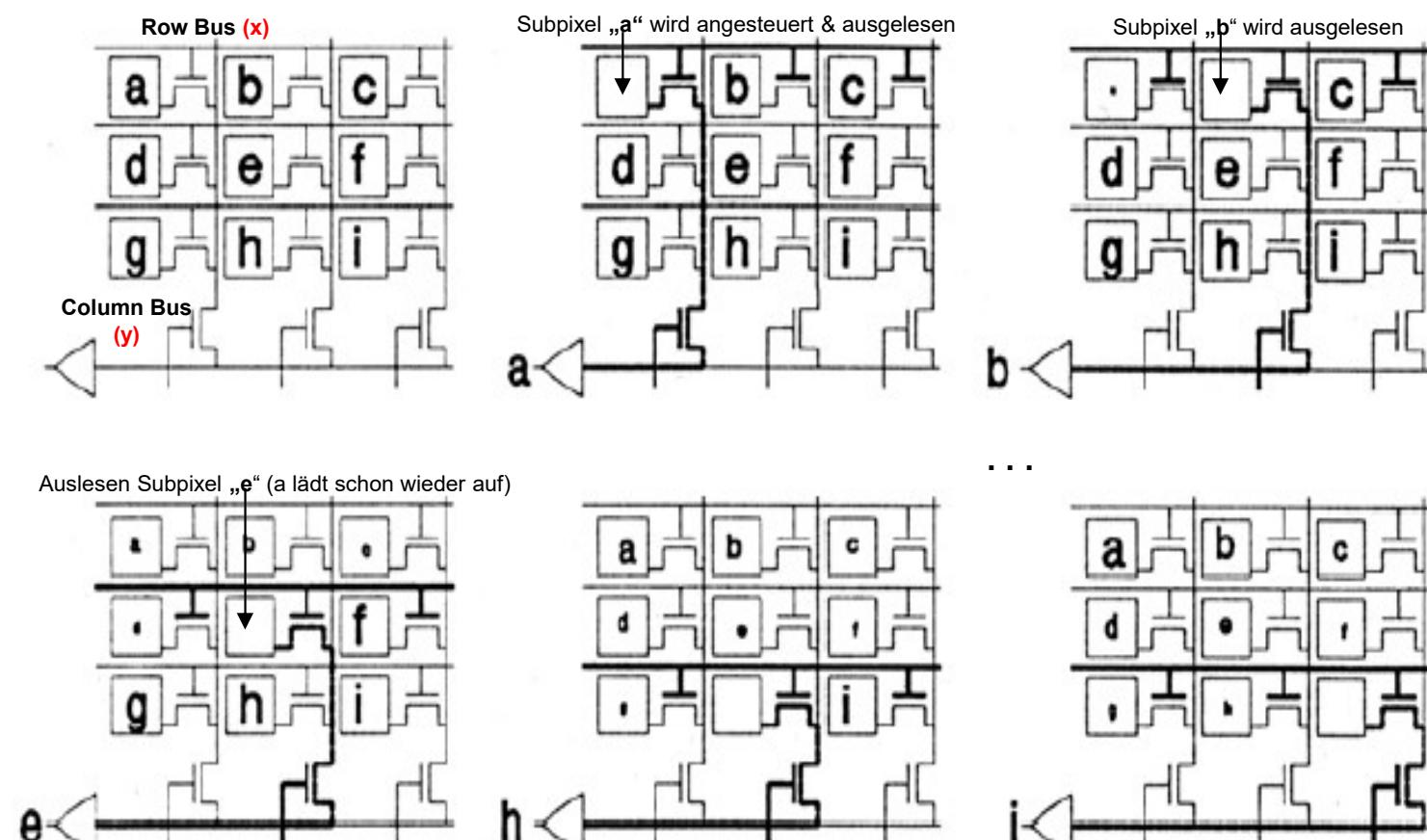


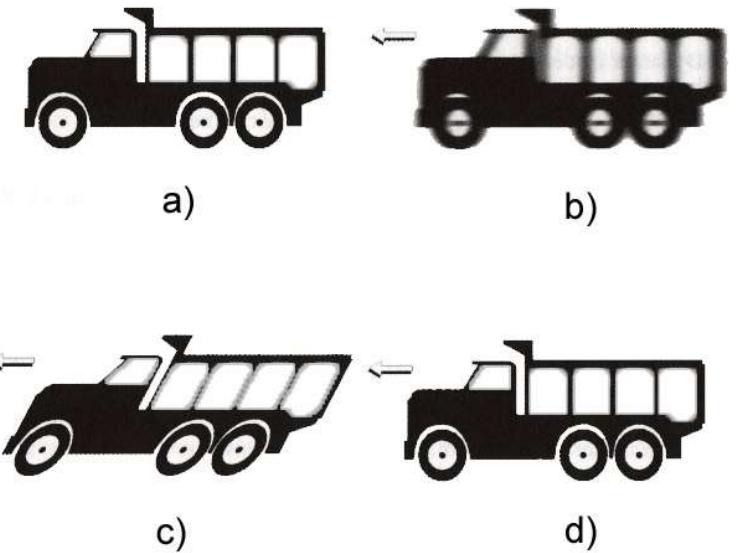
Bild: Prinzip des x-y-Auslesevorgang bei CMOS-Bildwandlern (nach: Theuwissen)

# Besonderheit des CMOS x-y-Ausleseverfahrens: Bewegungsabbildung: „Rolling Shutter“ vs. „Global Shutter“

s. Beispielvideo <https://www.youtube.com/watch?v=RPKf7l1EhTl>

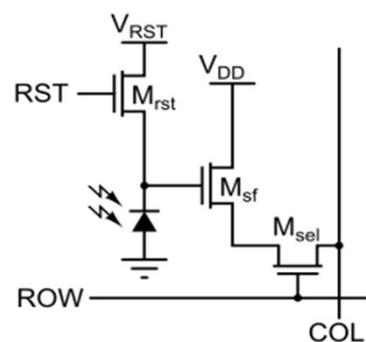
aus: Ulrich Schmidt, Professionelle Videotechnik

Während CCD-Sensoren immer einen Speicherbereich beinhalten, der gewährleistet, dass der Ladungssammel- vom Auslesevorgang getrennt ist, ist dies bei CMOS nicht selbstverständlich. Um hier zu gewährleisten, dass alle ausgegebenen Ladungen aus dem selben Zeitbereich stammen, müssen die Ladungen auch zwischengespeichert werden. Diese als Synchronous Shutter bezeichnete Funktion ist mit einem hohen Signalverarbeitungsaufwand sowie vielen Transistoren auf dem Chip verbunden und bei den meisten Kameras bisher nicht implementiert. Sie arbeiten statt dessen mit dem so genannten Rolling Shutter, d. h., dass eine Zeile ausgelesen wird, während die Nachbarzeile gerade Ladung sammelt. Die Zeilen stammen damit aus unterschiedlichen Belichtungsphasen, was bei hohen Geschwindigkeiten im Motiv oder schnellen Kamereschwenk Bildverzerrungen bewirken kann. Horizontale Bewegungen führen dazu, dass vertikale Strukturen schräg abgebildet werden. Bei schnellen vertikalen Bewegungen können Bildteile in die Länge gezogen werden, wenn sie sich in Richtung des Auslesevorgangs bewegen.

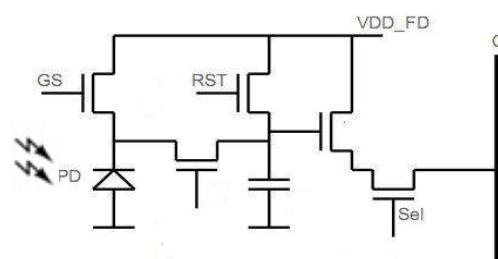


a) ohne Bewegung  
c) Rolling Shutter

b) Bewegungsunschärfe ohne Shutter  
d) Synchroner (Global) Shutter



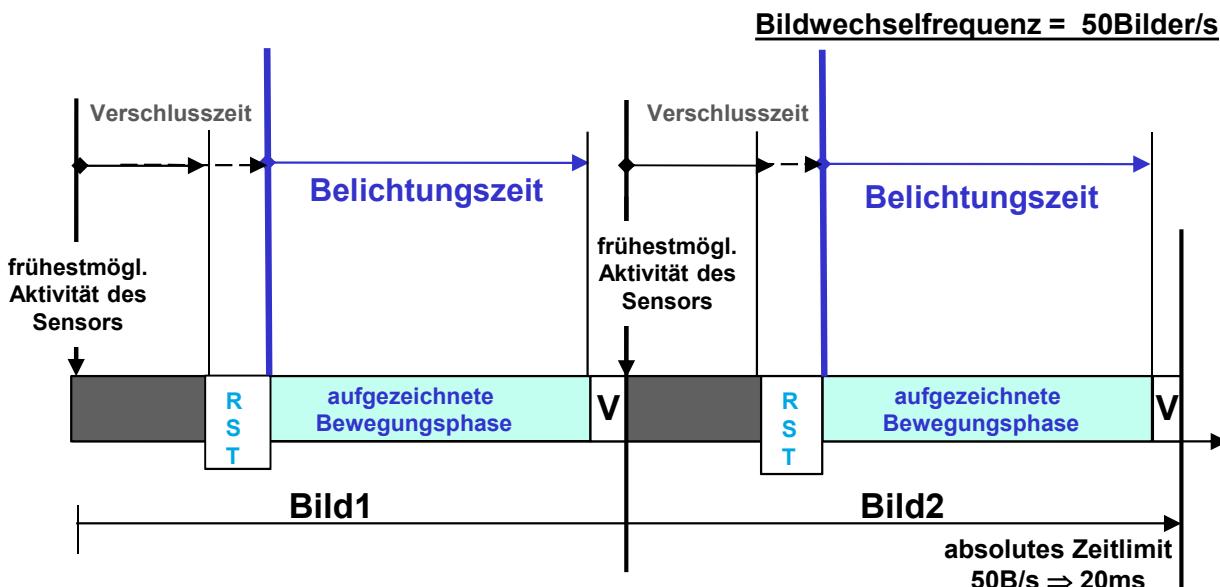
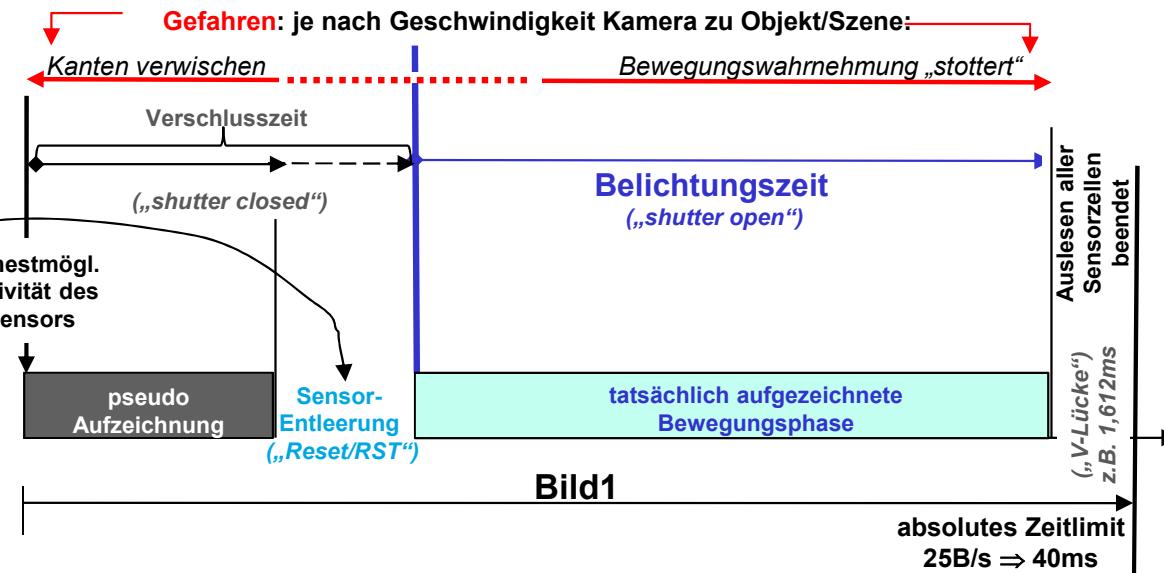
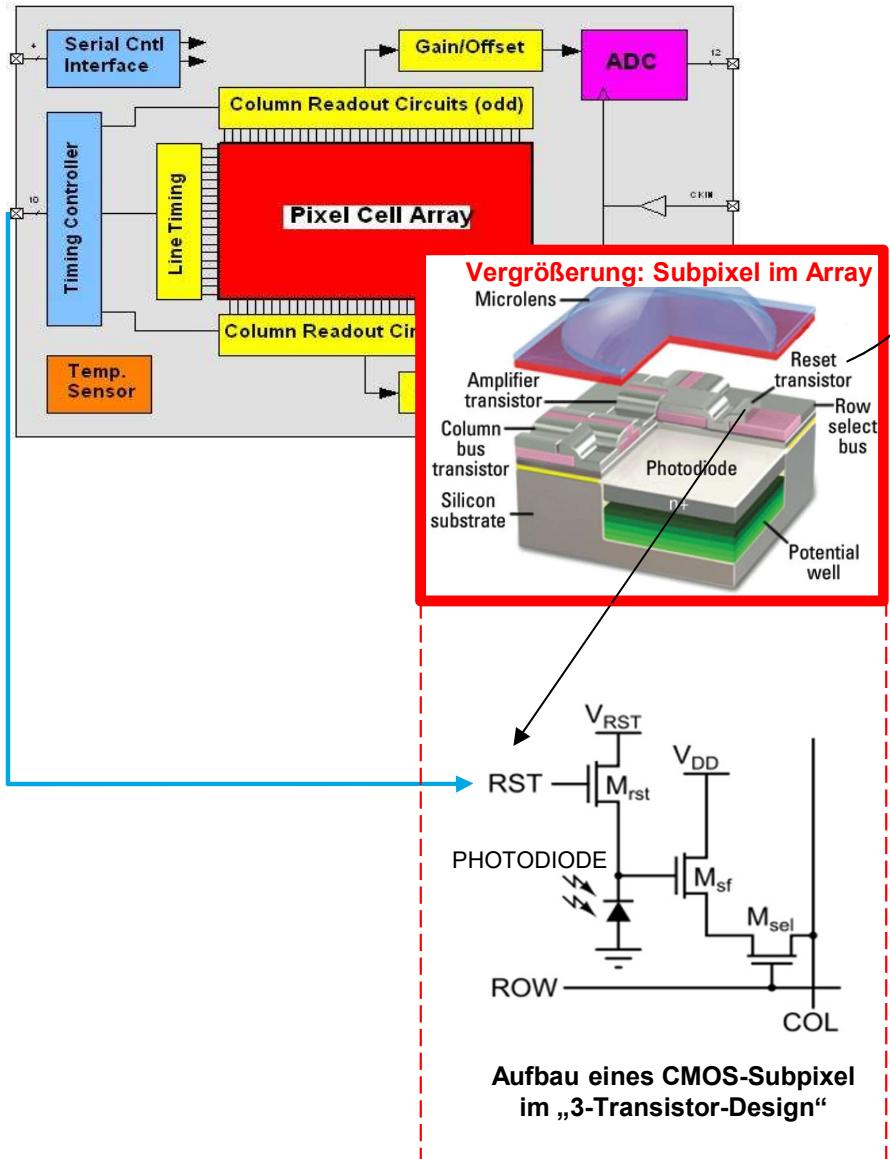
CMOS-Subpixel: 3-Transistor-Design (rolling shutter)



CMOS-Subpixel: 5-Transistor-Design (für synchronous/global shutter)

# Elektronischer Camera-shutter am Beispiel CMOS-Sensor:

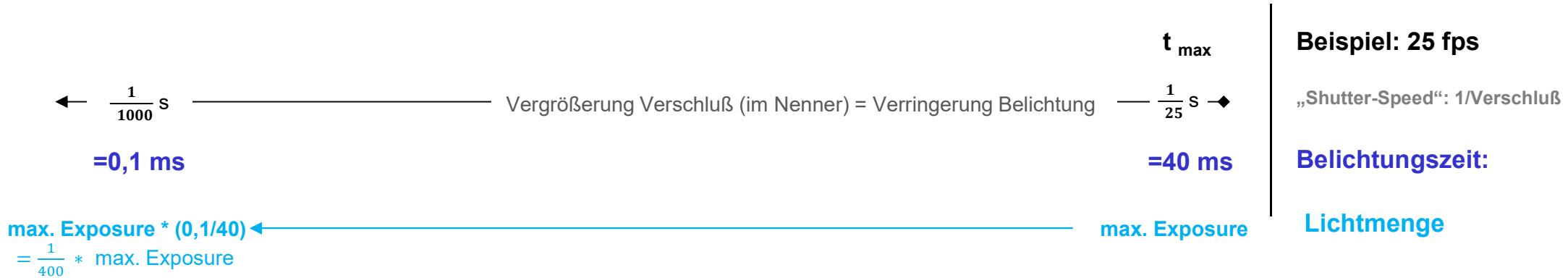
siehe nochmals Folien 127-129



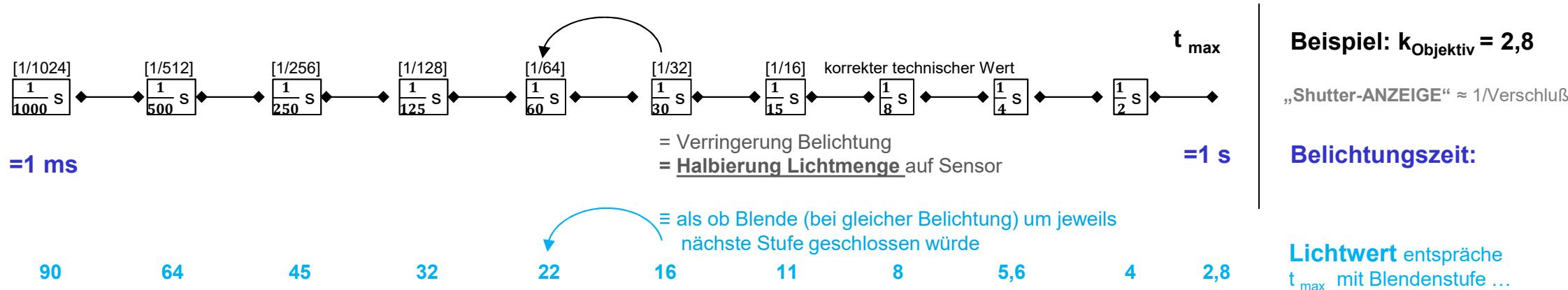
# Um wieviel dunkler wird das Bild beim „shuttern“?

Photographie: s.a. Folie 58

**VIDEO:** variabel, in Abhängigkeit von der verwendeten Bildwechselfrequenz und der stufenlos wählbaren Belichtungszeit:



**PHOTOGRAPHIE:** schrittweise, immer mit Bezug zu den Lichtwerten der Blendenzahlreihe des Objektivs

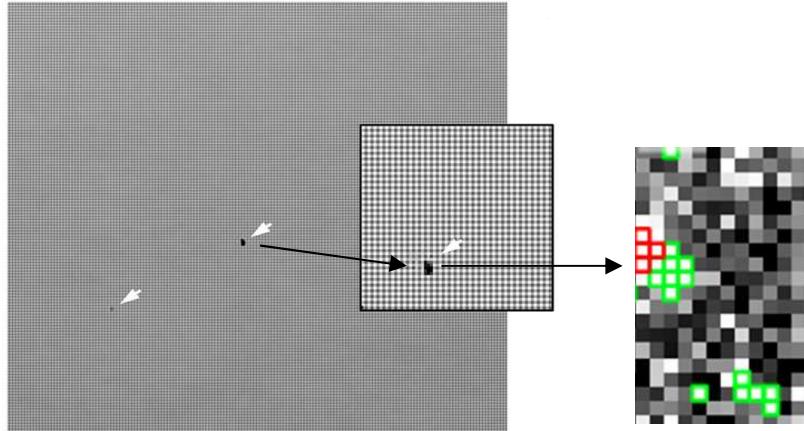


$k_{\text{Objektiv}}=2,8$  und Verschlußzeit  $1/30 \text{ [s]}$  ergibt die gleiche Lichtmenge am Sensor wie  $k_{\text{Objektiv}}=8$  und Verschlußzeit  $1/4 \text{ [s]}$  ABER NICHT DEN GLEICHEN „LOOK“ BEZ. TIEFENSCHÄRFE UND MOTIONBLUR!!

# Spezifische CMOS-Bildfehlerbeispiele:

Hauptproblem aller CMOS-Bildsensoren ist die niemals zu gewährleistende konstante Qualität ALLER Nanometer-großen Bauelemente der Subpixel (Zur Verdeutlichung HD-Bayer-Sensor: 6,3 Mio. Subpixel x min. 4 Bauelemente = min. 25 Mio. Bauelemente auf 23x13mm)

- **Defekte Pixel auf dem Sensor (unkorrigiert)**



Pixelfehler können als „tote“ Bildpunkte, welche einen konstanten Spannungswert abgeben (im Bild = grün-markiert) oder als blinkende Bildpunkte auftreten, die wechselnde, nicht mit dem Bildinhalt korrelierende Spannungswerte abgeben (im Bild = rot-markiert)

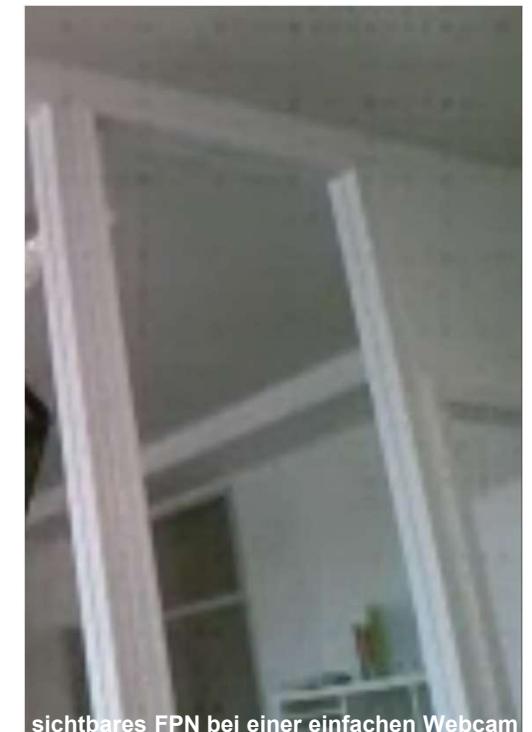
Berdeu et al.: PIC: a data reduction algorithm for integral field spectrographs und Afanasyev, P., Ravelli, R., Matadeen, R. et al. A posteriori correction of camera characteristics from large image data sets. Sci Rep 5, 10317 (2015)

- **Fixed-Pattern-Noise / FPN (unkorrigiert)**

Ursache: Wirkungsgrad der einzelnen APS-Transistoren kann (herstellungstechnisch) nie absolut identisch sein. Ergebnis: festes, örtliches Helligkeitsmuster im Sensor-Bild.



(Vergrößerte Darstellung, Bildquelle: Fa. CRSiiMotion/VS)



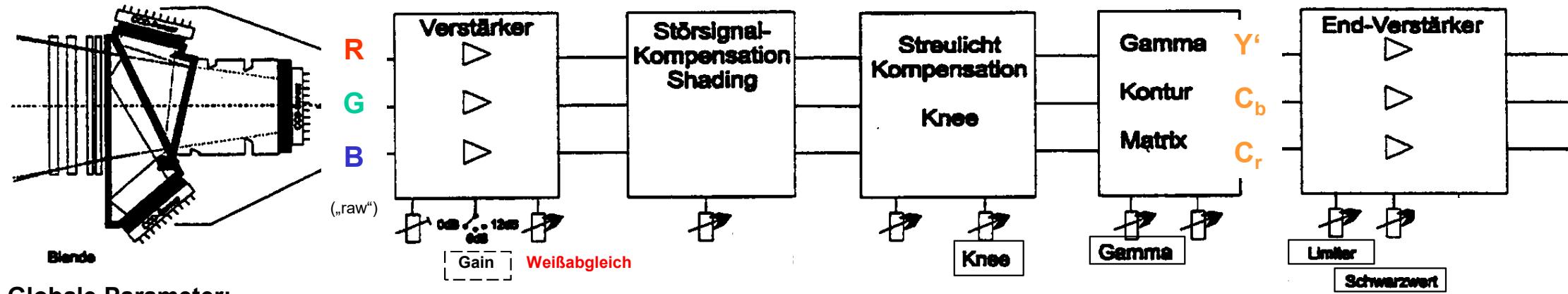
sichtbares FPN bei einer einfachen Webcam

... deshalb müssen CMOS-Kameras in der Medienproduktion diese Fehler intern IMMER als erstes durch softwarebasierte Bildverarbeitung korrigieren! (Defect Pixel Management, Fixed Pattern Denoising, etc.)

# **Video-spezifisches** **Prozessing** **in elektronischen Kameras**

# Videospezifisches Prozessing → Ergebnis: „Kamerakennlinie“ (OECF)

OECF: engl. Opto-Electronic Conversion Function



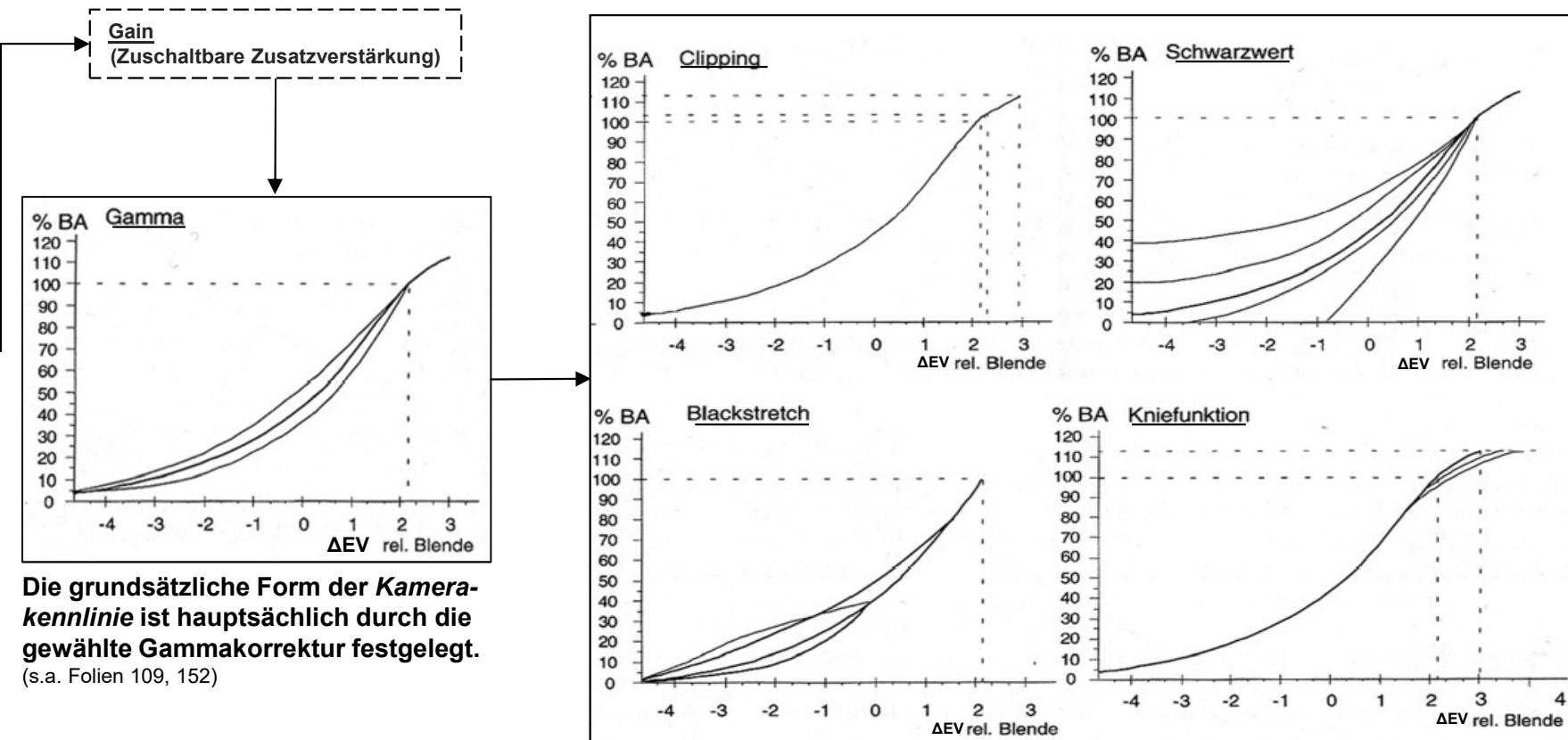
## Globale Parameter:

- Belichtungsstärke (lux)
- Blende+ND (Lichteinlass)



## Sensor Parameter:

- Optical Processing
- Ausleseverfahren
- Sensorempfindlichkeit (ISO)
- Shutter (Belichtungszeit)

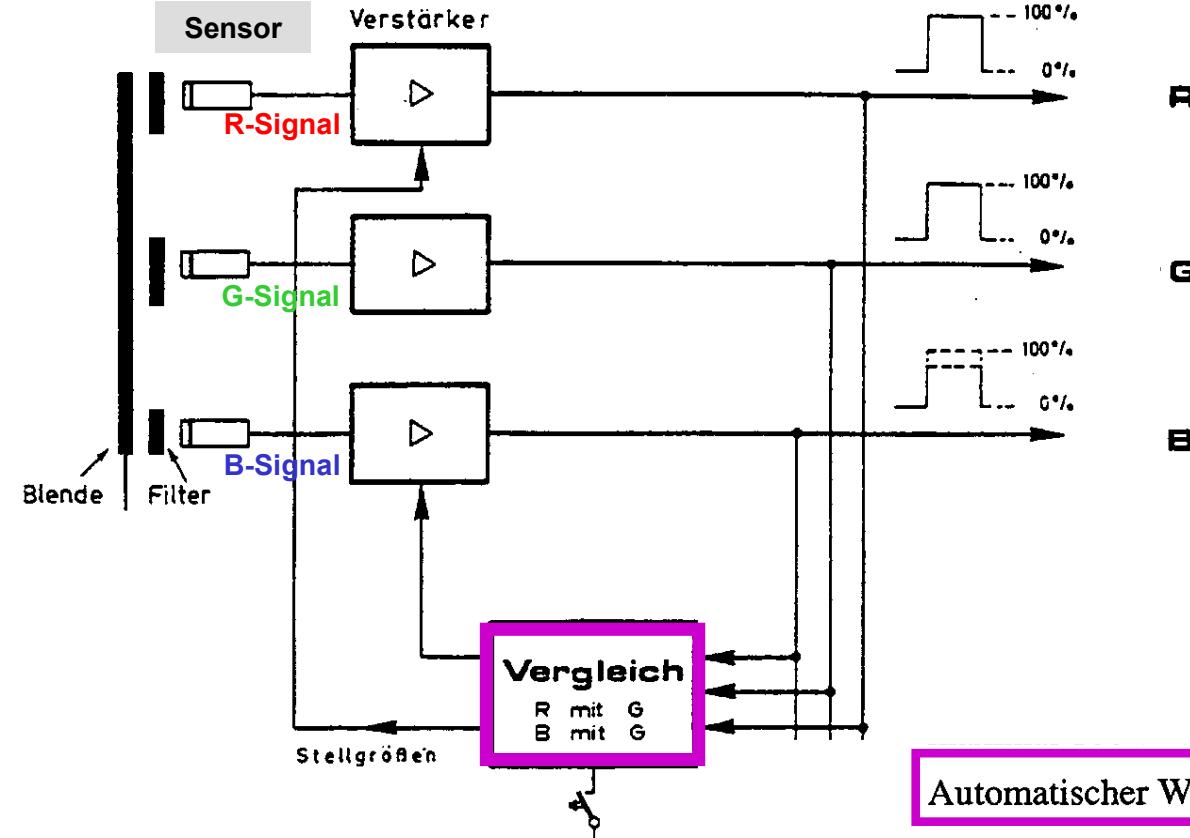


Die grundsätzliche Form der Kamerakennlinie ist hauptsächlich durch die gewählte Gammakorrektur festgelegt.  
(s.a. Folien 109, 152)

Zusätzlich sind in vielen Kameras oft situationsbezogene Anpassungen möglich:

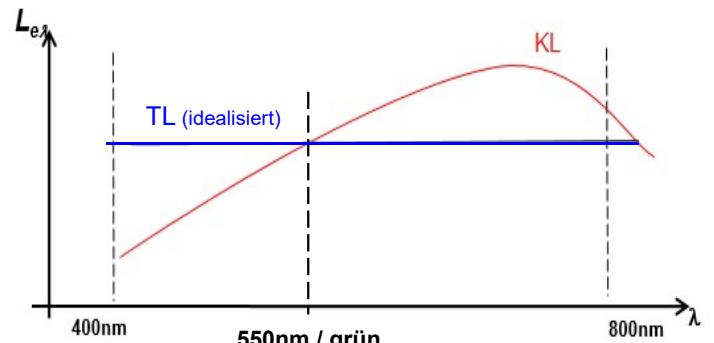
# Prozessing für Weiß- (und Schwarz-) Abgleich:

Weißabgleich aus Sicht Kameraoperator: „Die Kamera wird an unterschiedliche spektrale Lichtverhältnisse angepasst“



## Kameraintern:

Beim Weißabgleich wird der **grüne** Farbkanal als BEZUG/REFRENZ ausgewählt, da das menschliche Auge **im RGB-System** für grün die größte Helligkeitsempfindlichkeit aufweist, insbesondere aber, da Lichtänderungen z.B. Tages- (TL) auf Kunstlicht (KL) meist zu Spektralverschiebungen im roten oder blauen Wellenlängenbereich führen.



## Automatischer Weißabgleich (Auto White Balance, AWB):

Bei unbunter Bildvorlage (Weiß) werden die Farbwertsignale verglichen und eine Stellgröße abgeleitet, die über eine kontinuierliche Verstärkungsregelung dafür sorgt, daß die Farbwertsignale R, B in ihrer Amplitude dem G-Signal so angepaßt werden, daß sich Weißsignal ergibt.

## Automatischer Schwarzabgleich (Auto Black):

Bei geschlossenem Objektiv (Lenscap) lassen sich die Minimalwerte in den drei Kanälen automatisch auf einen vorgegebenen Wert (Sollwert) angleichen.

Findet meist automatisch beim Einschalten der Kamera statt.

# Aufgaben zum Nachdenken!

1. Ihr Aufnahmemotiv lautet „Strahlender Schneetag im Schwarzwald“. Sie arbeiten mit einer CCD-Kamera !

- Welche Störeffekte könnten im Bild auftreten und warum ?
- Benennen Sie Gute Gegenmaßnahmen – Schlechte Gegenmaßnahmen (GGSG)
- Um einen „Film-Look“ zu erzielen möchten Sie mit möglichst geringer Tiefenschärfe arbeiten. Welche Gegenmaßnahmen bleiben übrig ?

2. Folgende Einstellung steht auf dem Drehplan:

*"Fahrt im offenen Cabrio durch eine Allee. Blick durch die Äste/Blätter in die Sonne"*

Ihre Kamerafrau möchte aus Konzentrationsgründen (Gleichgewicht halten beim Fahren) die Hilfsfunktion AUTO-IRIS an der Kamera einschalten.

Wie lautet ihre Entscheidung ? (Recherche und kurze Begründung)

3. Welches ist bei elektronischen Kameras das kritischere (kaum mehr nachträglich-korrigierbare) Motiv ?

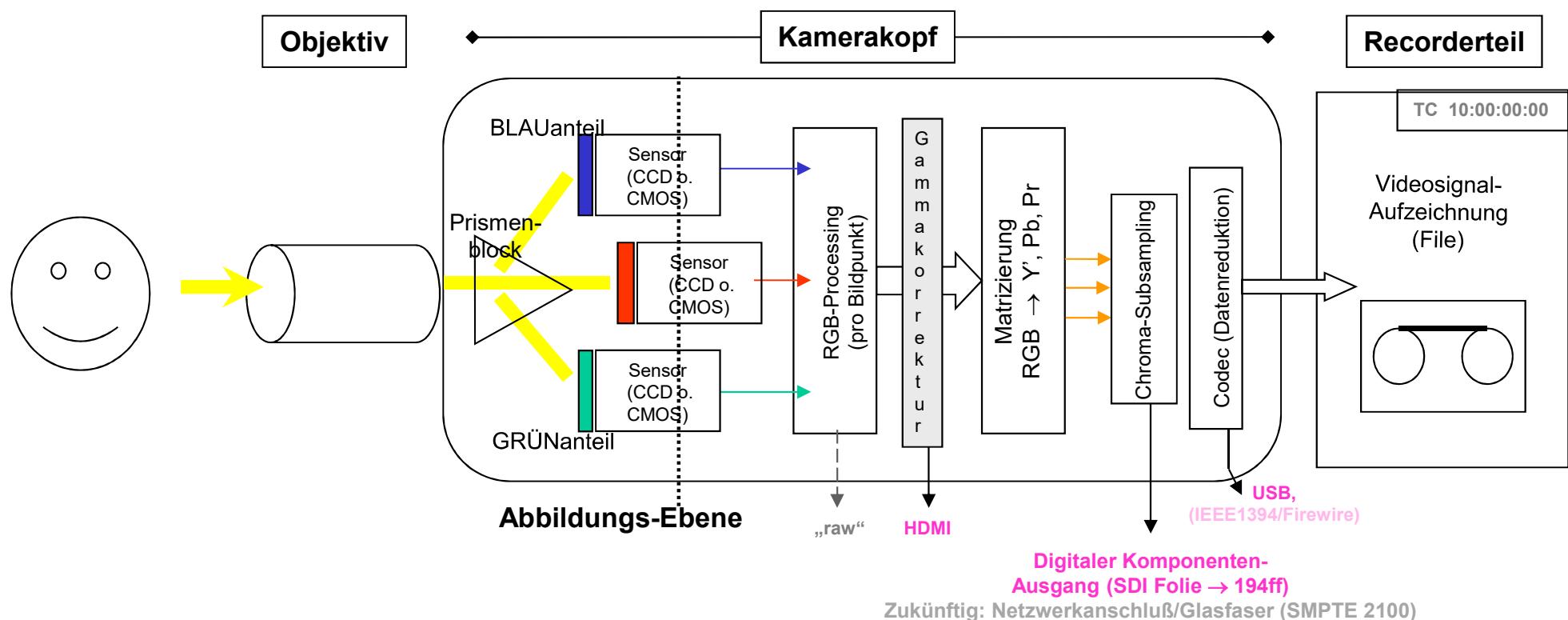
- zu dunkel („abgesoffen“)
- zu hell („überstrahlt“)

Wieso kann ihnen die „Zebrafunktion“ an der Kamera bei der Aufnahme helfen ? (→ Tipp: ExplodedView)

# Kamera-Basisfunktionen und ihre Anwendung:

Eingriff	helles Motiv	dunkles Motiv	Gefahr
<b><i>Blende</i></b>			
<b><i>ND-Filter</i></b>			
<b><i>Shutter-Speed</i></b>			
<b><i>Gain</i></b>			

# Videokameras: Typische Signal-Interfaces



# Zusammenfassung: Kamera - Klassifizierungen (VIDEO):

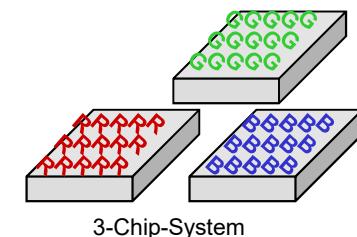
## Heutige, elektronische Videokameras unterscheiden sich im wesentlichen:

- **durch die Art und Anzahl der Bildaufnahme-Sensoren**

- CCD / Typ IT oder FIT bzw. CMOS / global- oder rolling-shutter
- Sensorgröße\*, Anzahl der Pixel\*\*, Typ des Objektivanschluß („Mount“)
- Farbseparation: Ein-Chip-System mit Mosaik-Filter („Bayer-Filter“),  
Drei-Chip-Systeme mit RGB-Einzelfilter („Beamsplitter“).



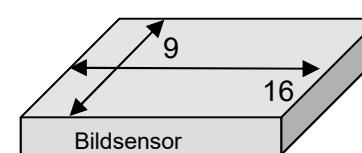
1-Chip-Sensor mit Bayer-Mosaikfilter



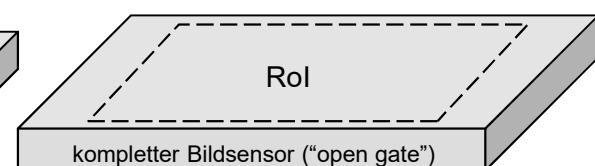
3-Chip-System

- **durch das aufnehmbare Bildformat (Framing)**

- Bildseitenverhältnis 4:3,
- Bildseitenverhältnis 16:9,
- „Open-Gate“ mit freier Definition einer Region of Interest (RoI)



Bildsensor



kompletter Bildsensor ("open gate")

- **durch das Scanverfahren**

- interlace oder progressive
- mit variablen oder festen Bildwechselsequenzen (Framerate)

- **durch Variabilität der Gammakorrektur**

- Gamma-Normkurven gem. Standards der ITU-RBT
- variable, Sensor-optimierte Gammakurven

- **durch den abbildbaren Dyamikbereich**

- Standard Dynamic Range (SDR) oder High Dynamic Range (HDR)

## **und falls mit Rekorderteil versehen .... (dann genannt CAMCORDER)**

- **durch das Aufzeichnungsformat (= Video-Signalformat + Aufzeichnungsmedium), „digital sample on recorded media“**

- digital und datenreduziert nach M-JPEG2000-Norm
- digital und datenreduziert nach IEC-Norm (AVC, DNxHR, ProRes, etc.)
- digital und datenreduziert nach MPEG-Norm  
(IMX, HDV, HDCAM, H.264, H.265, etc.)
- RAW

- Festplatte
- optischer Speicher (z.B. XDCAM)
- FlashRAM / Solid State Disk

} Fileformat ?!

\* Siehe dazu Folie 213/214

\*\* Für evtl. Bildstabilisierungs- oder Photo-Funktionen kann die Anzahl der Pixel gegenüber der Videoauflösung deutlich erhöht sein !

# Professioneller- und Consumer- SD-Camcorder

AJ-D900W

3M-FIT-CCD 2/3"-Camcorder mit 50/25 Mbps-Aufzeichnung (16:9/4:3)

DVCPRO 50



AG-EZ15

1IT-CCD 1/4"-DV-Camcorder mit digitaler Komponententechnik

DV



# Professioneller und semiprofessioneller HD-Camcorder



**SONY: HDW-F900**

1920 x 1080 – HDCAM-Laufwerk (185 Mbps)  
 3 x FIT-CCD (HAD), vertical smear -125 dB  
 Interne A/D-Wandlung: 12Bit / Videosignal: Q=8 bit  
 Framing: variabel von 4:3 bis C-scope  
 Aufnahmemodi: progressive single Frame (psF), interlace  
 Aufzeichnungsmodi: 24p, 25p, 30p, 50i, 60i

**Sony: HVR-Z1E**

1440 x 1080 HDVCAM mit MiniDV-Laufwerk (25Mbps)  
 3-Chip-FIT-CCDs (1/3“),  
 Interne A/D-Wandlung: 14Bit / Videosignal: Q =8 bit  
 Framing: 16:9 / 4:3  
 Aufnahmemodi: 1080/50i, 1080/60i, 576/50i, 480/60i  
 Aufzeichnungsmodi: 1080/50i, 1080/60i, 576/50i, 480/60i,  
 576/50p, 480/60p  
 Datenreduktion Video: HD → MPEG2-MP@H14L oder SD → DV  
 Datenreduktion Audio: im HD Betrieb → mp2,  
 im SD-Betrieb → keine



# Professionelle System-/Studiokameras

AK-HC3800

2/3-type 2.2-megapixel 3CCD HD studio camera

U.S. List Price: \$30,500.00

(ohne Objektiv und Zubehör)

**Panasonic**

Pick-up Device:: 2/3-type 2.2 million pixel IT, CCD x 3

System: GBR pickup system

Color Separation Optical System: f/1.4 prism

Optical Filter: ND: Clear, 1/4, 1/16, 1/64

Gain Selection<sup>\*1</sup>: LOW, MID, HIGHOutput Selection<sup>\*1</sup>: CAM, BAR, TESTWhite Balance Mode<sup>\*1</sup>: A, B, presetShutter Speed Selection<sup>\*1</sup>: 1/100, 1/120, 1/125, 1/250, 1/500, 1/1000, 1/1500, 1/1/2000

- Switchable between 1080/59.94i and 1080/50i HD formats for worldwide use

HDC-5500

Leistungsstarke, tragbare Systemkamera mit drei 2/3"-4K-CMOS-Sensoren und direkter 4K-Ausgabe

**SONY**

## Sensor

Sensor 2/3"-CMOS-Sensor mit Global Shutter

Methode 3-CMOS, RGB

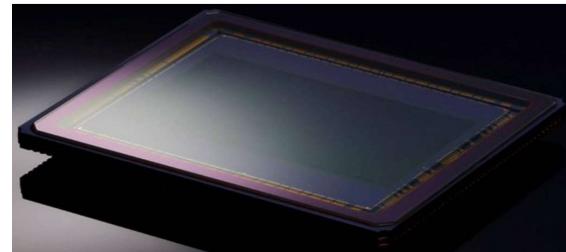
Effektive Auflösung (H x V) QFHD: 3840 x 2160  
HD: 1920 x 1080

## Elektrische Eigenschaften

## Optische Systemdaten

Spektralsystem F1,4 Prisma

# Professioneller 4k- Camcorder



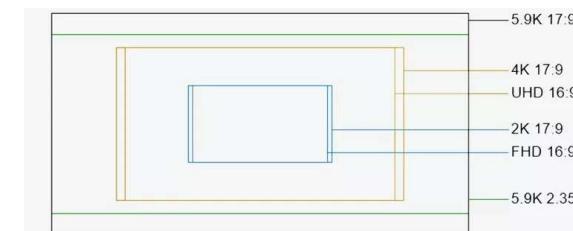
Vollformat-CMOS-Sensor (38,1 x 20,1 mm),  
auf Kundenwunsch in **global-shutter** Ausführung



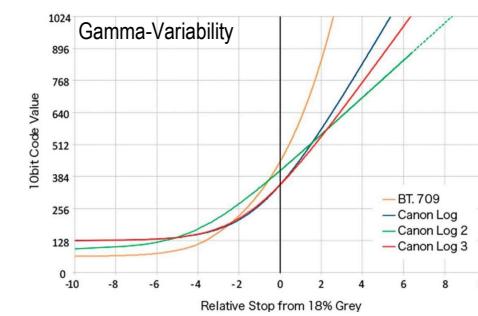
**Canon EOS C700 FF**



Speicherkarte (SSD)



1 - 168 fps, abhängig von Aufnahmemodus/Auflösung  
Belichtungszeit: 1/1 bis 1/2.000 je nach Bildrate



# 4k - Kamera (24p-60p) mit RAW\*-Aufzeichnung



- raw (engl. roh) = Ausgabe/Aufzeichnung der „echten“ Photozellenwerte (z.B. in Bayer-Muster-Abfolge), 12bit pro Farbkanal (R,G,B) ohne Gammakorrektur und ohne jegliche Datenreduktion (kein Codec)  $\approx$  3,9 Gbit/sec.

## Beispiel: Arri ALEXA Studio, Fa. Arnold&Richter

Camera Type	35 format film-style digital camera with optical viewfinder, rotating mirror shutter, integrated shoulder arch, built-in support for the ARRI Wireless Remote System (WRS), cmotion evolution lens control system and ARRI Lens Data System (LDS).
Sensor	35 format ALEV III CMOS sensor with Dual Gain Architecture (DGA) and Bayer pattern color filter array. 1.5x oversampling for 1920 x 1080 outputs.
Photosites	16:9 sensor mode: 2880 x 1620 for ARRIRAW, 2880 x 1620 down sampled to 1920 x 1080 for HD video, ProRes and DNxHD 4:3 sensor mode: 2880 x 2160 for ARRIRAW, 2880 x 2160 down sampled to 1440 x 1080 (pillar box) for monitoring in EVF-1 and HD video (MON OUT only)
Operating Modes	Mirror shutter on or off. Switching takes approximately 3 seconds through camera display.  16:9 or 4:3 sensor mode. Switching takes approximately 15 minutes (currently update to a different SUP necessary). 4:3 is currently only available for ARRIRAW; a pillar box format is used for 16:9 EVF-1 as well as HD-SDI MON OUT; ProRes or DNxHD recording is currently not supported.  Regular or High Speed mode. High Speed mode requires license purchase. Switching takes approximately 40 seconds. 4:3 High Speed mode currently limited to 16:9.
Filter	Sealed behind-the-lens motorized filter mechanism provides optical flat or ND 1.3 (4 1/3 stops)
Frame Rate	16:9, mirror shutter off: 0.75 - 120 fps 16:9, mirror shutter on: 0.75 - 60 fps; 4:3, mirror shutter off or on: 0.75 - 48 fps Frame rate setting precision: 1/1000 fps
Shutter	Rotating mirror shutter (11.2° - 180.0°) or electronic rolling shutter (0.75 - 60 fps; 5.0° - 358.0°; 60 - 120 fps; 356°). Shutter angle setting precision: 1/10 degree. At some frame rates mirror shutter needs to be less than 180°.
Exposure Latitude	14 stops for all sensitivity settings from EI 160 to EI 3200, as measured with the ARRI Dynamic Range Test Chart (DRTC)
Exposure Index	EI 160 <sup>+5.0</sup> <sub>-9.0</sub> EI 200 <sup>+5.3</sup> <sub>-8.7</sub> EI 400 <sup>+6.3</sup> <sub>-7.7</sub> EI 800 <sup>+7.4</sup> <sub>-6.6</sub> EI 1600 <sup>+8.4</sup> <sub>-5.6</sub> EI 3200 <sup>+9.4</sup> <sub>-4.6</sub>
	Values behind the exposure index are the number of stops above and below 18% grey. These values are for Log C. Rec 709 and DCI P3 are the same except for 0.5 stops fewer in the low end at EI 160, 0.4 stops fewer in the low end at EI 200 and 0.2 stops fewer in the low end at EI 400.
White Balance	Separate white balance (red/blue) and color correction (green/magenta) adjustment through Auto or manual setting. Red/blue: 2000 to 11000 Kelvin, adjustable in 100 K steps, with presets of 3200 (tungsten), 4300 (fluorescent), 5600 (daylight) and 7000 (daylight cool). Green/magenta: -8 to +8 color correction (CC), 1 CC = 035 Kodak CC values or 1/8 Rosco values.

# Übungsaufgabe: „Kameras lesen“

Versuchen Sie ihr erworbenes Wissen aus diesem Kapitel auf folgende tabellarische Übersicht professioneller Kameras aus dem Dateibereich der Veranstaltung anzuwenden.

## FletcherCameraComparisionChart2011.pdf

2011 DIGITAL CAMERA COMPARISON CHART										CHICAGO 312-932-2700 - DETROIT 248-471-9906		
		Imager (Actual Size)	Lens Mount	Base ISO	Latitude	Frame Rates	Digital Sampling on Recorded Media	Recorded Bit Depth Format & Time	Weight (Body Only)	Highlighted Positives	Notable Credits	AVERAGE NATIONAL Daily Rental
	<a href="#">Arri Alexa Plus</a>	<b>CMOS</b> 27.2mm Ø 23.8x 13.4mm	PL	800	14 Stops	.75-60 fps @ 1920x1080 120 fps Coming Fall	1920 x 1080 2880 x 1620 ARRIRAW Codex	10 Bit ProRes 4:2:2 40 min (2) 32GB SxS Cards 12 Bit Uncompressed - ARRIRAW	13.8 lbs.	Low Light Performance Wide Latitude Cost Effective Workflow Bright EVF w/ Overscan Great Color Separation	"Anonymous" "Law & Order LA" "Now" "The Chicago Code" "The Invention of Hugo Cabaret"	\$1900 Plus \$1500 EV with (2) 32GB SXS Cards
	<a href="#">Sony F35</a>	<b>CCD</b> 27.1mm Ø 23.6x 13.3mm	PL	320	12 Stops	1-50 fps @ 1920x1080	1920 x 1080	10 Bit HDCAM SR Tape 50 Min 10 Bit Uncompressed 12 Bit - Coming w/ SRMemory	24 lbs. w/ SRW1	4:4:4 Recording Established HDCAM SR Workflow	"Tron Legacy" "Red Tails" "Law & Order: Criminal Intent"	\$3250 with SRW-1 & SRPC-1
	<a href="#">Red Epic</a>	<b>CMOS</b> 31.4mm Ø 27.7x 14.6mm	PL PV Nikon Canon	800	12+ Stops 16-18 Stops with HDRX	1-120 fps @ 5K 1-150 fps @ 4K 1-200 fps @ 3K 1-300fps @ 2K	5K 4.5K 4K 3K 2K 1920 x 1080	12 Bit R3D File (5K @ 5.1) 64GB SSD 15 min 128GB SSD 30 min 256GB SSD 60 min	5 lbs.	Small - Ideal for 3D HDRx High Dynamic Range Touchscreen LCD Established R3D workflow EVF with overscan 12-14bit REDCODE	"Spiderman 4" "Hobbit" "Jack the Giant Killer" "Prometheus" (Alien Prequel)	\$2700 with (2) 128GB SSD
							2K	10 Bit		Low Light Performance	"The Social"	\$1200

Wer sich tiefer dafür interessiert kann sich auch gerne mal die offiziellen Kameraempfehlungen für Produktionspartner von Netflix anschauen:

<https://partnerhelp.netflixstudios.com/hc/en-us/articles/360000579527-Cameras-Image-Capture-Requirements-and-Best-Practices>