

# Elektronische Displays: Anforderungen und Beschaffenheit

## Schärfe (MTF) Grauwerterfassung (Dynamik)

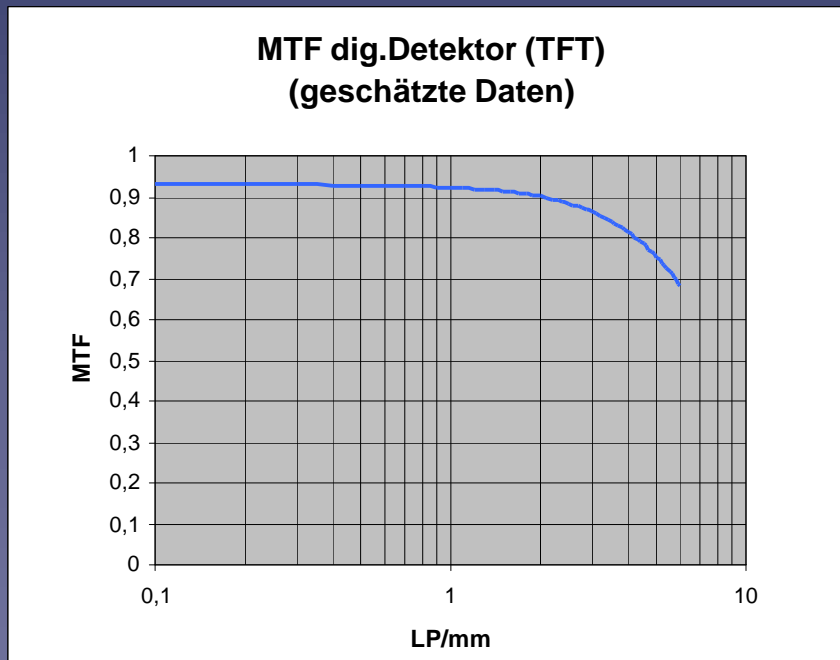


# Schärfe (MTF)

## digitaler Detektor:

$$MTF_{Geo} = \frac{\sin\left(\frac{p \cdot \Delta x \cdot f_{Sig}}{2 \cdot P \cdot f_N}\right)}{\left(\frac{p \cdot \Delta x \cdot f_{Sig}}{2 \cdot P \cdot f_N}\right)}$$

$\Delta x$  = Pixelbreite  
 $P$  = Pixelpitch



$MTF_T$  = unvollständiger Ladungstransport  
 $MTF_D$  = Diffusionsbeitrag Elektronen  
 $MTF_{BW}$  = Bildwandlersystem (Leuchtschicht): CsJ /  $Gd_2O_2S:Tb$

$$MTF_{dig.Det.} = MTF_{Geo} \times MTF_T \times MTF_D \times MTF_{BW}$$



# Schärfe (MTF)

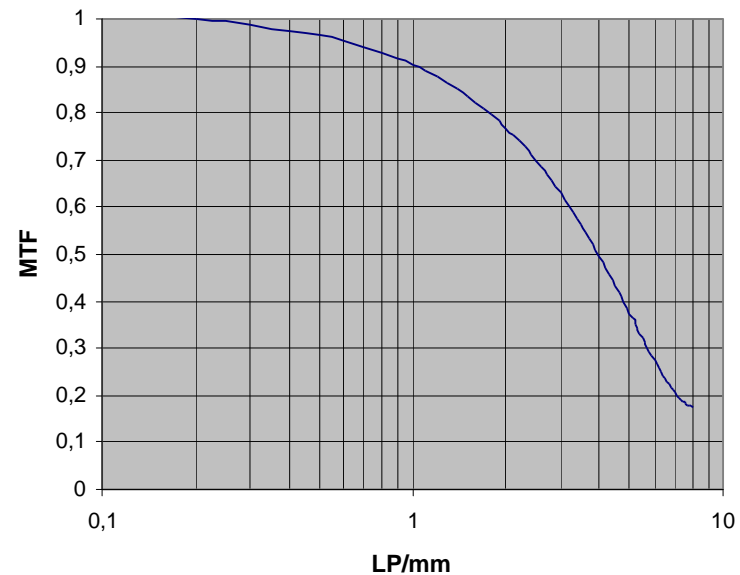
## Film - Folien - System

$MTF_{\text{Film}}$ : Streuprozesse in der Emulsion

$MTF_{\text{Folie}}$ : Streuprozesse in der Leuchtschicht  
Geometrische Anordnung (back / front)  
usw.

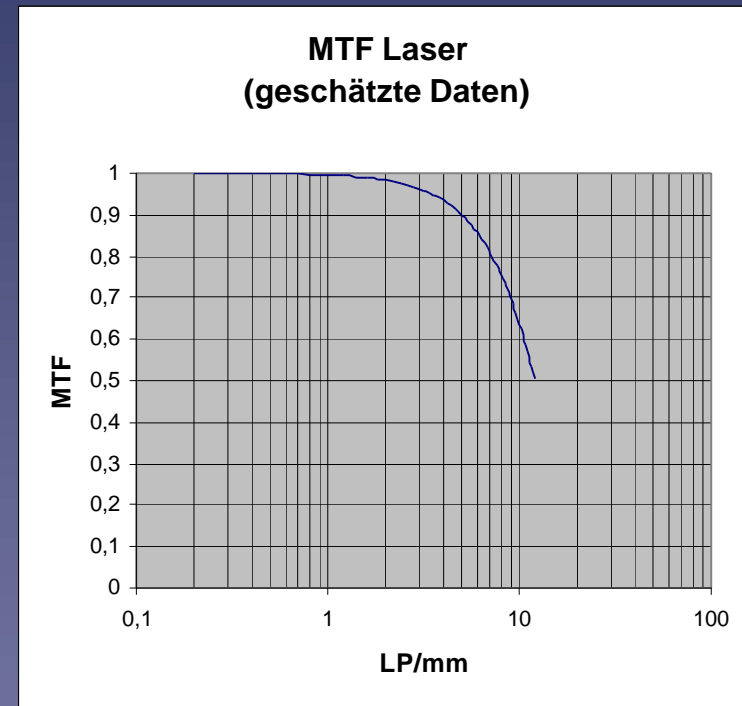
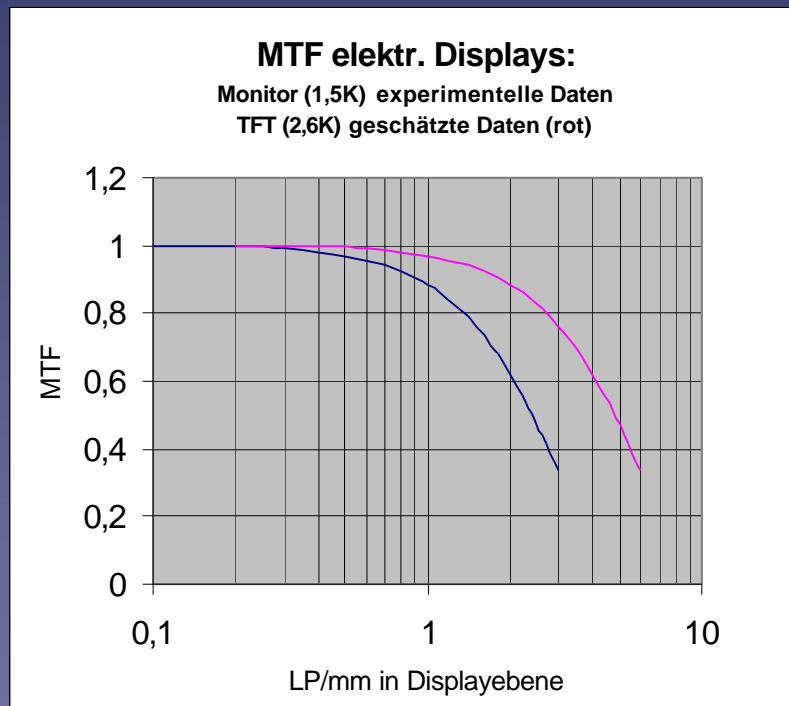
$$MTF_{\text{FFS}} = MTF_{\text{Fo}} \cdot MTF_{\text{Fi}}$$

**MTF Film-Folien-System Mammographie  
(exp. Daten)**



# Schärfe (MTF)

## Wiedergabe-System



# Schärfe (MTF)

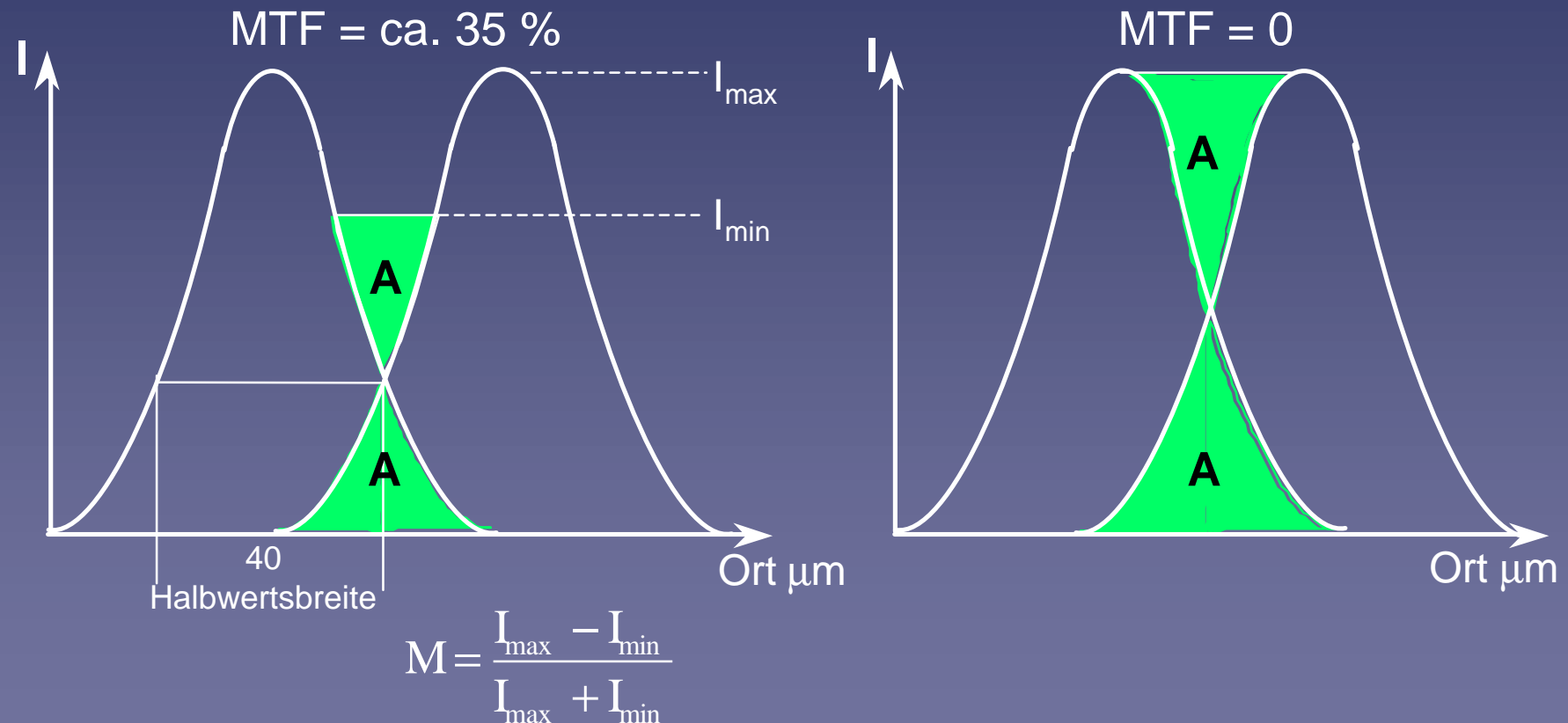
## Wiedergabe-System

	<b>CRT</b>	<b>TFT</b>	<b>Laser</b>
Nenngröße	17"	15"	35 x 43 (cm)
Matrixgröße	1249 (Zeilen) x 1672 (~ 1,5 K-Monitor)	2250 x 3000 (2,6 K-Display)	8512 x 10348 (9,4 K)
Nutzfläche (mm)	239 x 320	ca. 240 x 320	340 x 413
Spotdurchmesser ( $\mu\text{m}$ )	191	ca. 100 x 100	40
Nennauflösung (LP/mm)	2,62	4,7	12,5
bit-Tiefe	8	8	12 aus 16



# Schärfe (MTF)

## Laser-Imager x Film



# Schärfe (MTF)

Übertragungsbedingungen dig. Detektorsysteme auf elektr.

Displays: **1. Aufnahmematrix = Displaymatrix**

**2. Bildgröße = Detektorgröße**

Bsp.: dig. Detektor: 6 LP/mm / 83µm Pixel bei 18 x 24 Feld

Matrix 2250 x 3000 : 6,75 Mbyte/Bild

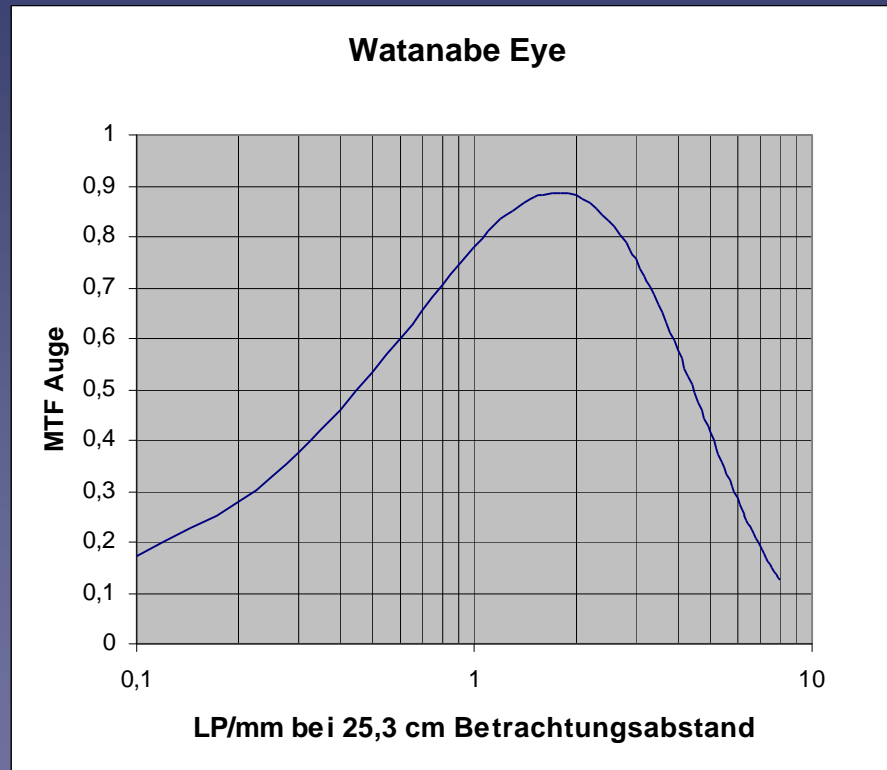
	Nenngröße	aktive Fläche	Spotdurchmesser (µm)	Grenzauflösung in Displayebene (LP/mm)	Vergrößerungsfaktor
elektr. Display	21"	296 x 395	130	~ 3,8	1,64
	17"	239 x 320	94	~ 5,3	1,33
	13"	193 x 259	83	~ 6	1,00
Laserimager	35 x 43	9 x 12	40	12,5	0,5
		18 x 24	80*	6,2	1,0

\* 4 "Laserpixel" = 1 "Detektorpixel"



# Schärfe (MTF)

## Visuelles System



$$MTF_{\text{vis}} = 2,6 \cdot \left[ 0,0192 + \left( \frac{f \cdot d}{503} \right) \right] \cdot e^{-\left( \frac{f \cdot d}{503} \right)^{1,1}}$$

$f = \text{LP/mm}$

$d = \text{Betrachtungsabstand in mm}$

$$MTF_{\text{vis}} = MTF_{\text{Linse}} \cdot MTF_{\text{Mach-Effekt}}$$

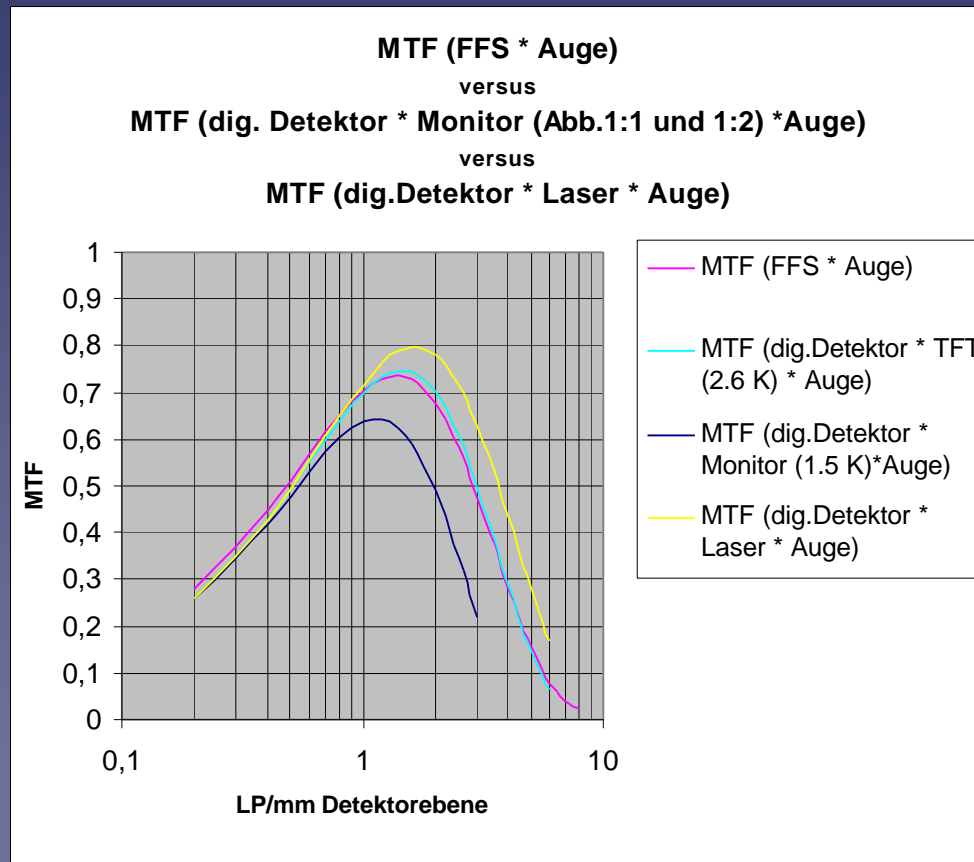
Mach-Effekt: neurale Hemmung von Nachbarzapfen bei Erregung von beleuchteten Zapfen (Kanteneffekt) durch Bipolarzellen





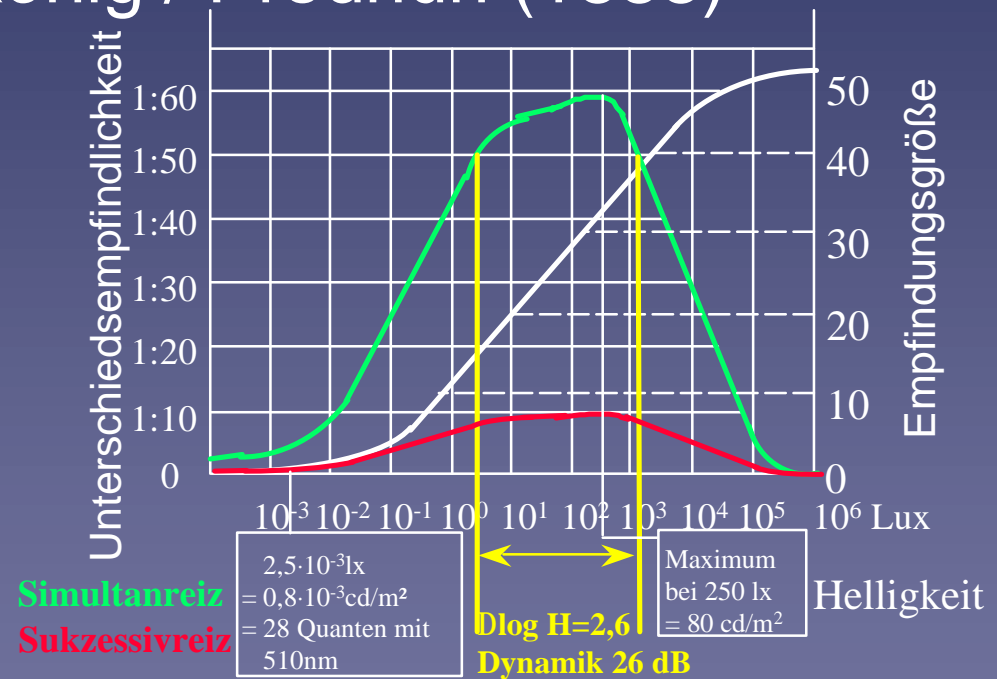
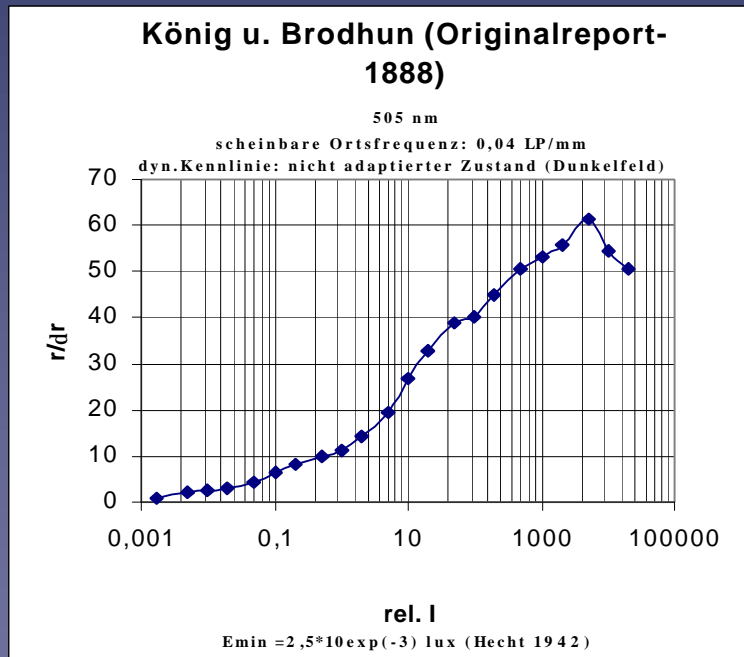
# Schärfe (MTF)

Vergleich wirksame MTF =  $MTF_{\text{Auge}} \cdot MTF_{\text{Det}} \cdot MTF_{\text{Display-System}}$



# Grauwertterfassung (Dynamik)

dyn. Unterschiedsempfindlichkeit im nicht adaptierten Zustand: König / Prodhun (1888)



Weber-Fechner-Bereich ca. 2,6 lgH

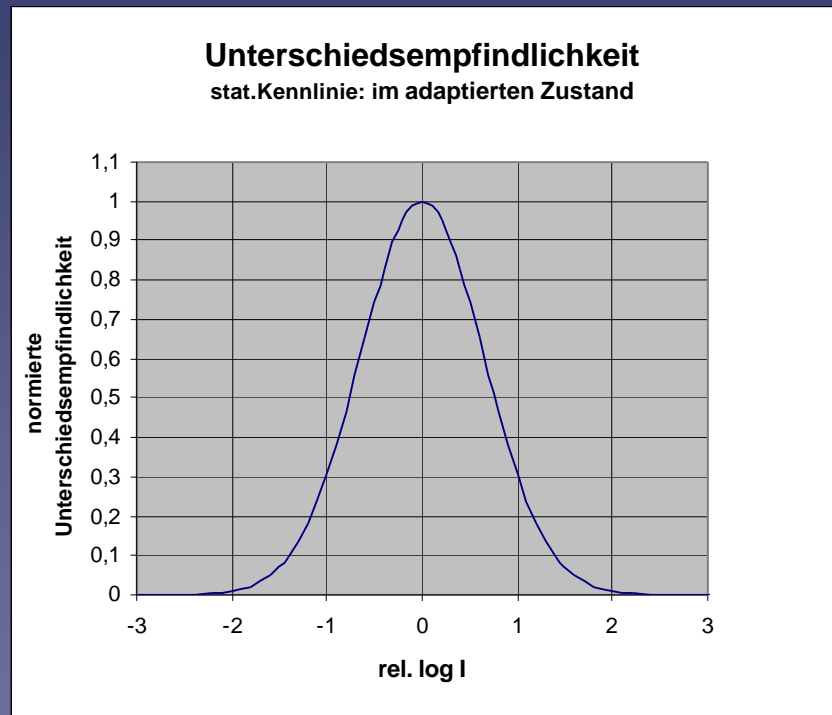
$$E = k \cdot \ln \frac{R}{R_0}$$

$R_0$  = ursprüngliche Reizstärke



# Grauwertverarbeitung (Dynamik)

stat. Unterschiedsempfindlichkeit im adaptierten Zustand



Adaptation durch:

· langsame neurale Umstimmung:

- Senkung der Impulsfrequenz bei langen Betrachtungszeiten
- Dämpfung der Zapfenempfindlichkeit
- Aktivierung des neuronalen Hemmungsringes

· schnelle Pupillenreaktion

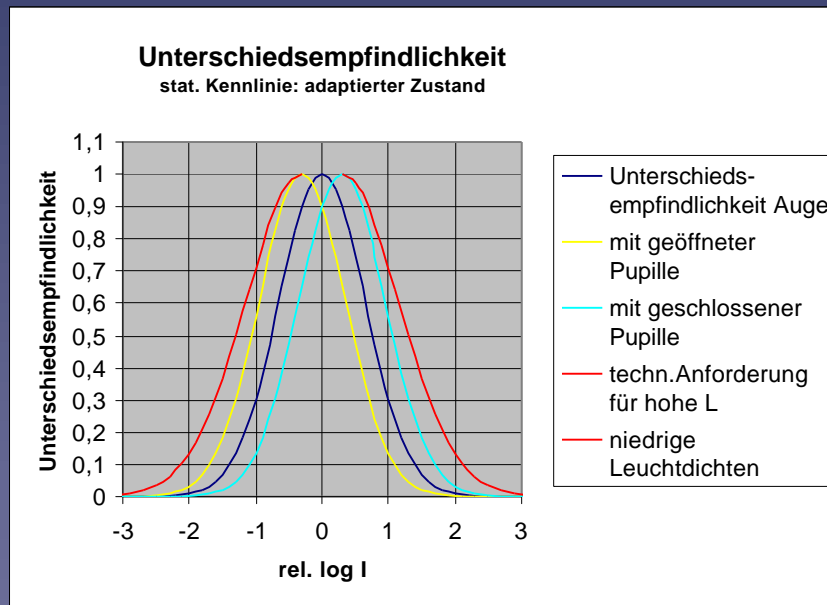
$$E_{\text{Retina}} = \frac{p}{4} \cdot L \cdot \left( \frac{d}{f} \right)^2 \quad \text{mit} \quad d = \frac{1}{2,5} > \frac{d}{f} > \frac{1}{10}$$

Adaptation: Umfeld ca. 20 cm bei 50 cm Betrachtungsabstand  
Sehfeld ca. 2 cm bei 50 cm Betrachtungsabstand



# Grauwertterfassung (Dynamik)

## Unterschiedsempfindlichkeit bei 35%



Unterschiedsempfindlichkeit	Dynamik	Ig Dyn.
· Sehphysiologie	1 : 80	1,9
· max. Empf. durch Pupillenreaktion	1 : 4	0,6
· Sehphysiologie mit Pupillenreaktion	1 : 320	1,9+0,6=2,5
· techn. Anforderung: CRT	1 : 1250	2,5+0,6=3,1
TFT	1 : 500	2,5+0,2=2,7



# Grauwert erfassung (Dynamik)

## Simultankontrast

$$\Delta L/L = 0,004 \quad \text{bei } L \text{ ca.: } 20 \text{ cd/m}^2$$

$$\text{Anzahl Graustufen} = \frac{\lg \text{Dynamik}}{\lg \left( 1 + \frac{\Delta L}{L} \right)}$$

Bereich	Anzahl Graustufen
· Optimal-Bereich (Pupillenreaktion)	$\frac{0,6}{0,002} \approx 300$
· Bereiche abnehmender Unterschiedsempf.	$\frac{1,9}{\lg(1+0,02)} \approx 220$
· Gesamtbereich	$\approx 520$



$H_0 = \text{variabel}$   
Faktor 4

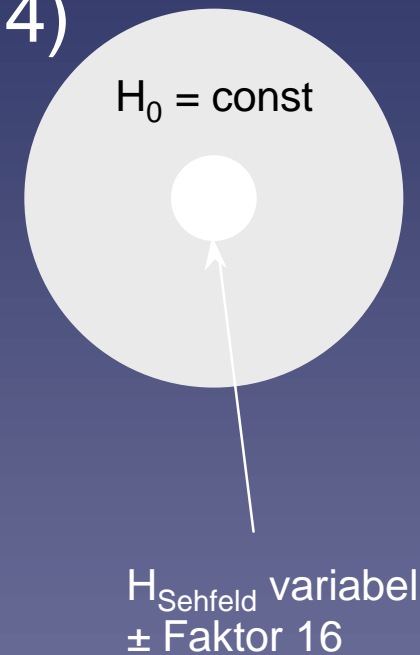
$H_{\text{Sehfeld}} \text{ variabel}$   
 $\pm \text{Faktor } 9$



# Grauwertterfassung (Dynamik)

DICOM (Dynamik 1:240 / lg Dyn = 2,4)

$L_{\min}$	$L_{\max}$	ca $\bar{L}^*$	JND	lg JND	$\Delta \lg \text{JND}$
0,5	120	10	450	2,65	-
1,0	240	16	550	2,74	9
2	480	22	600	2,78	4
5	1200	35	680	2,83	5
10	2400	50	730	2,86	3



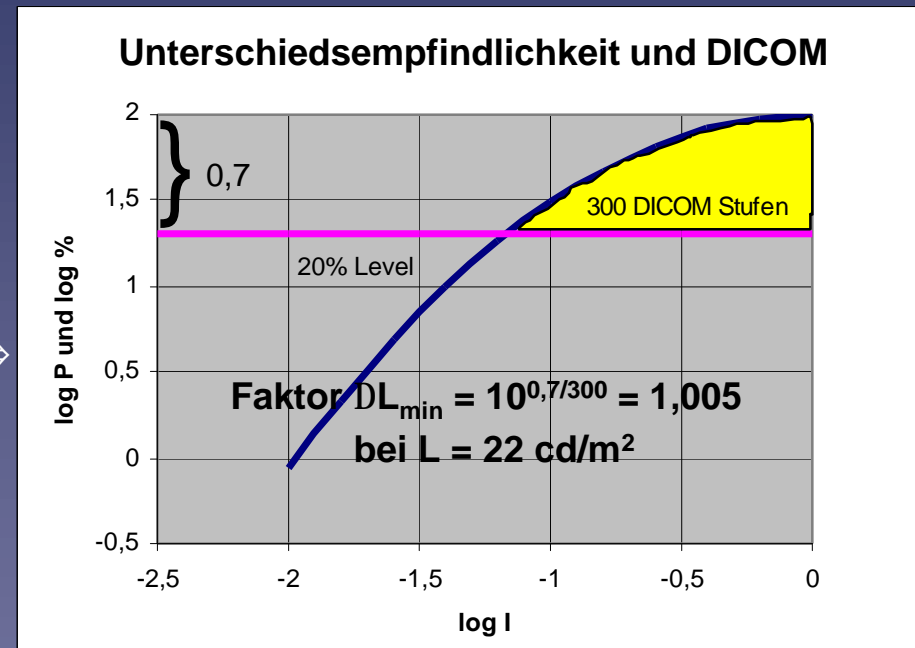
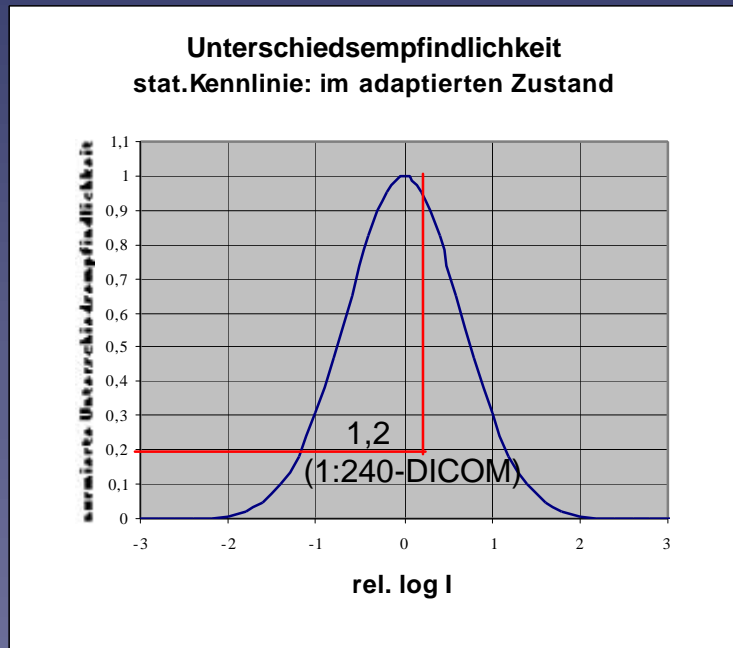
$$* \lg \bar{L} = \frac{\lg L_{\max}}{256} \cdot 128$$

$\text{JND}_{\max}$  bei  $\bar{L}$  ca. 70 cd/m<sup>2</sup>



# Grauwert erfassung (Dynamik)

## Unterschiedsempfindlichkeit und DICOM



$$\Delta L_{\min} = 0,1 \text{ cd/m}^2 \text{ bei } \bar{L} = 22 \text{ cd/m}^2$$



# Grauwert erfassung (Dynamik)

## Display-Dynamik: CRT / TFT-LCD / Laser-Film / Auge

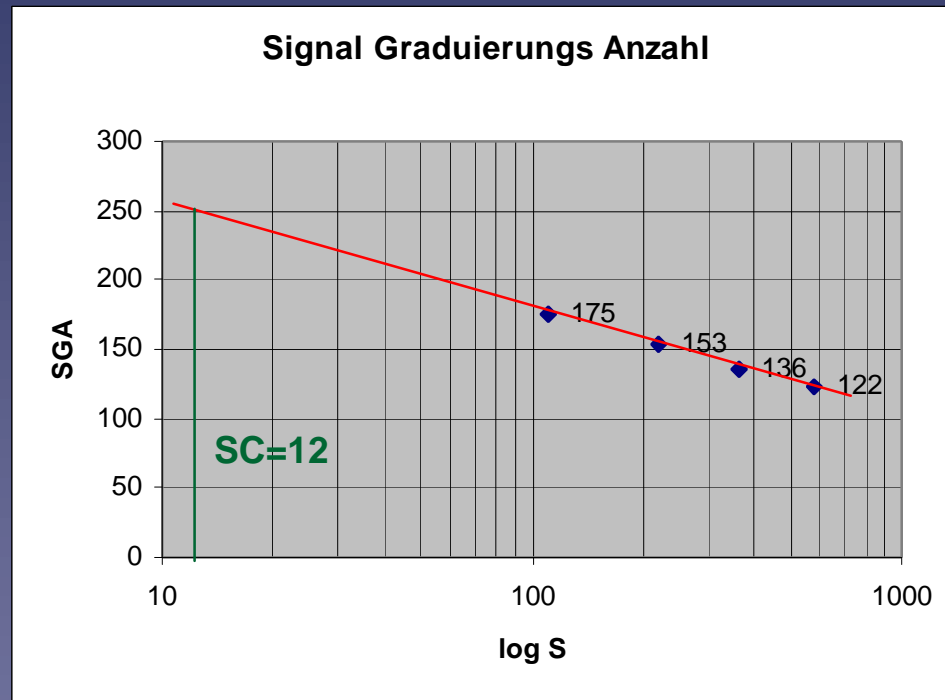
	CRT	TFT/LCD	Laser-Film	Auge (35%)
Überstrahlverhältnis	$\leq 1:400$ (2,6)	$\leq 1:800$ (2,9)	1:1000 ( $\geq 3,0$ )	1:320 (2,5)
<u>Streulichteinfluss:</u>				
Refl. Faktor %	8	2	4	-
"Schleierleuchtdichte: 100 lx"	2,5	0,6	1,3	-
Streulicht red. Dynamik	$\frac{400}{1+2,5} = 114$ (2,05)	$\frac{800}{1+0,6} = 500$ (2,7)	$\frac{1000}{1+1,3} = 430$ ( $\approx 2,6$ )	-
<u>MTF-Einfluss</u>				
% MTF bei Grenzfrequenz	0,6	0,8	0,9	
Dynamik-Reduktion	(2 x 0,2)	(2 x 0,1)	(2 x 0,05)	
Nutzbare Dynamik (bei Grenzfrequenz)	2,05-0,4= <b>1,65</b>	2,7-0,2= <b>2,5</b>	2,6-0,1= <b>2,5</b>	<b>2,5</b>
Bit-Tiefe	256 - 1024 (8-10)	256 (8)	1024 - 4096 (10-12)	600 ( $\approx 9$ )





# Grauwert erfassung (Dynamik)

## Film - Folien - Systeme (Stand der Technik 1992)



SGA = Signal Graduierungs Anzahl = JND

C. Blendl, H. Kierdorf et al., akt. Rad. (4) 3 (1993) 219-225  
"Signal-Rausch-Verhältnis bzw. Anzahl wahrnehmbarer Graustufen im Röntgenbild"

