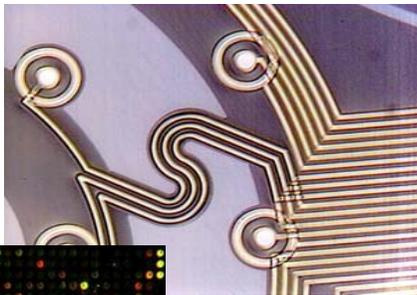


Mikrosensorik

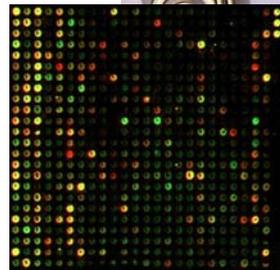
Prof. Karsten König

Lehrstuhl für Mikrosensorik & AVT

Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät II: Physik und Mechatronik



Polyimide-Retinaimplantat



DNA chip

Dr. Velten, Dr. Ruf, Dr. Anhut

Schwerpunkte

Nano- und Mikrostrukturierungsverfahren und Analysetechniken

Lithographie, additive Schichtverfahren, Micromachining

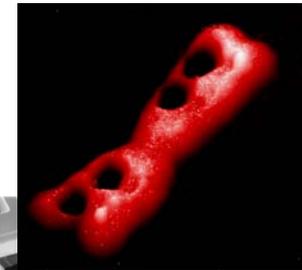
Lasermikroskopie, AFM, EM

Mechanische Mikrosensoren

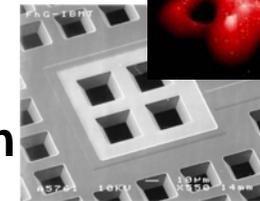
Mikrosensoren für Druck, Beschleunigung, Volumenfluß, Drehrate

Optische Sensoren / Biosensoren

DNA-Chip, Protein-Chip, Biozell-Chip, evaneszenter Biochip, optische
Temperatur- und Kraftmesser



Chromosom



Siebelektrode aus Silizium

(Elektro-) Optische Sensorsysteme

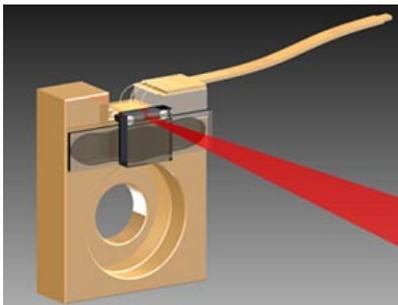
Strahlquelle

natürlich: Sonne

Lampen

Laser:

Strahlquelle für Herstellung
(Excimerlaser-Lithographie)
und Bestandteil EO-Sensorsystem
(Radarsysteme, Medizintechnik)

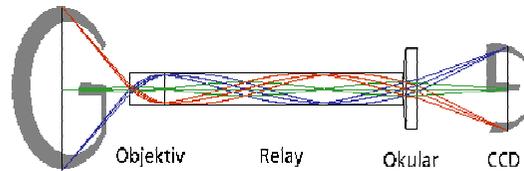


Strahlführung

Lichtleiter

Miniaturoptik (Grin-Linsen)

Integrierte Wellenleiter



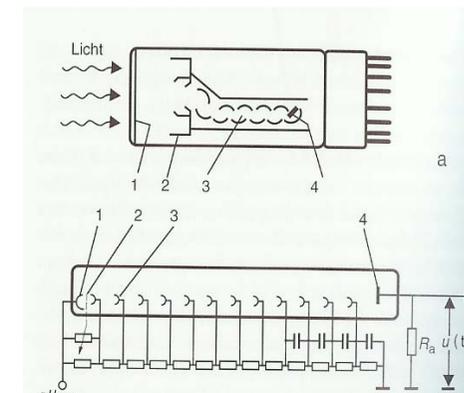
Photodetektoren

CCD-Kamera (PMT)

Handy-Markt

Überwachung

Bio- und Chemosensoren



Miniaturisierte Sensorsysteme

Laser (Laserdiodenabmessung $<500 \mu\text{m}$, Bestrahlungsspot $<400 \text{ nm}$)

Strahlführung (evaneszente Wellen: $d < 100 \text{ nm}$, Lichtleiter: $5 \mu\text{m}$)

Photodetektoren (Si-CCD-chip)

Outline

1. definition EO sensor system
2. optics basics
3. technology basics
 - 3.1. light sources
 - 3.2. light transmission systems
 - 3.3. photodetectors
4. system design

requirements

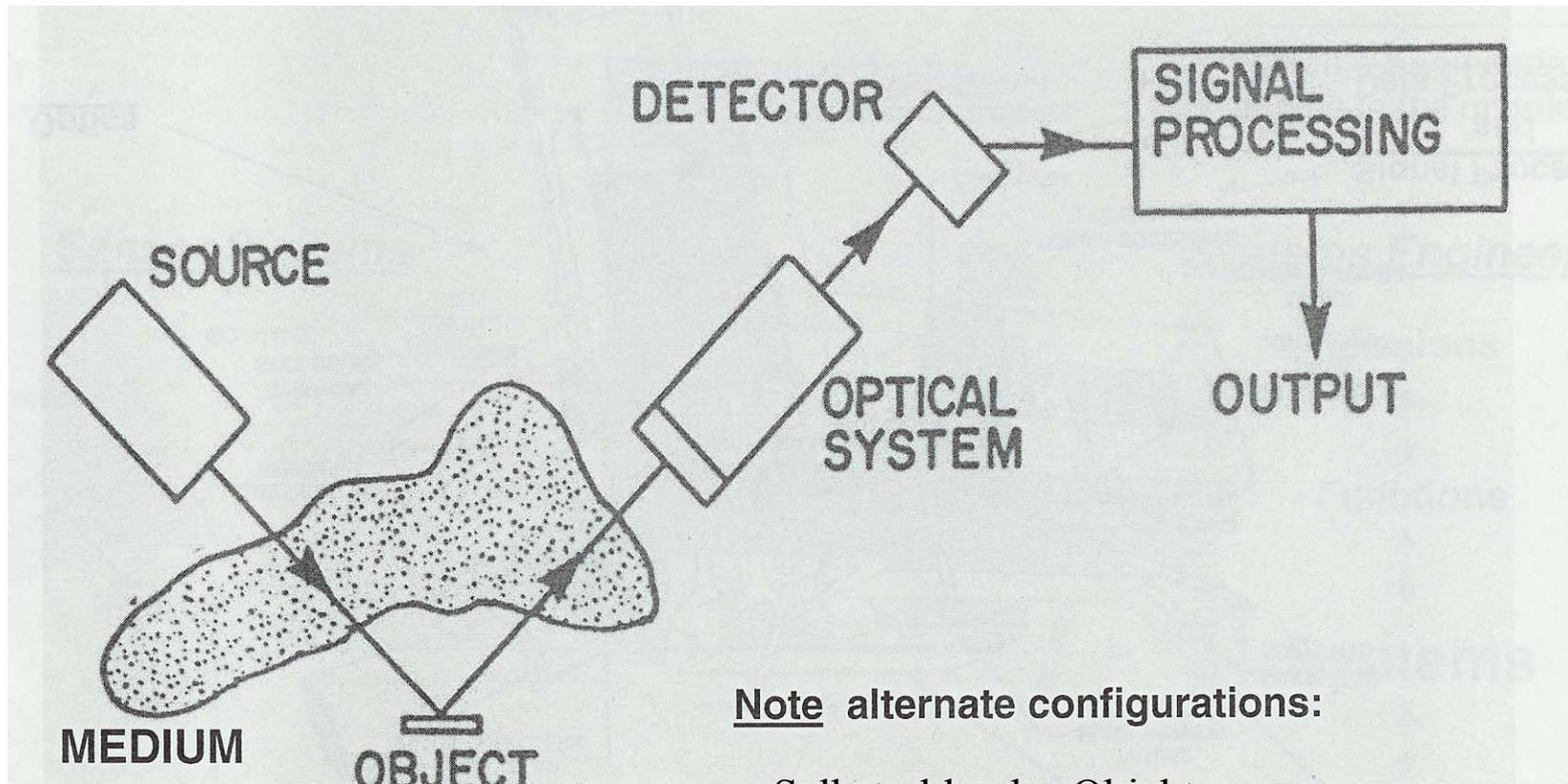
applications

1. EO Sensorsystem

Elektrooptische Sensorsysteme sind:

- integrierte Kombination von optischen, elektro-optischen und elektronischen Subsystemen
- nutzt die Wechselwirkung elektromagnetischer Felder / Strahlungsenergie mit Materie im UV/VIS/IR Spektralbereich
- stellt Informationen über Lichtquellen, Targets, Transmissionsmedium und Komponenten bereit

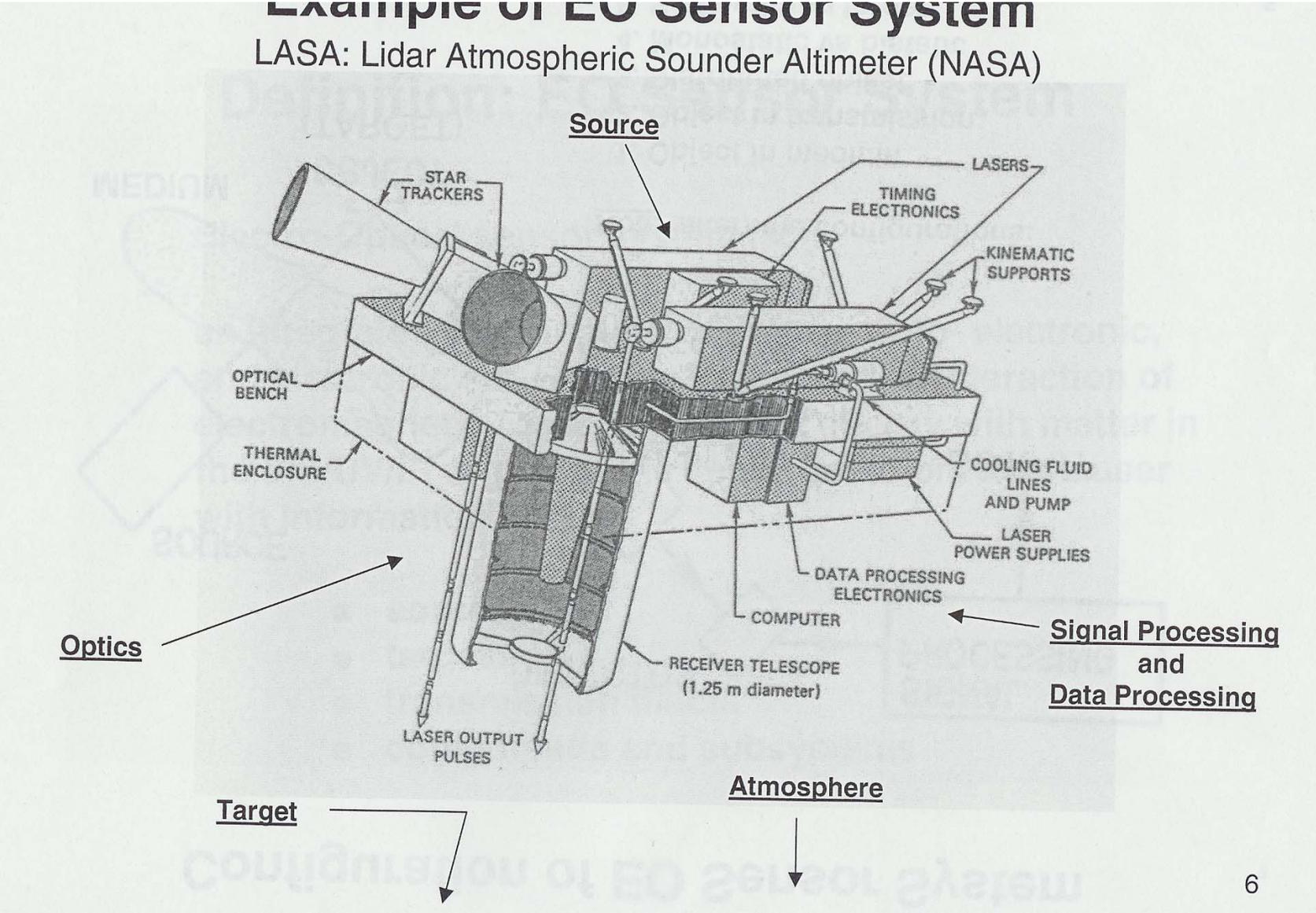
Konfiguration



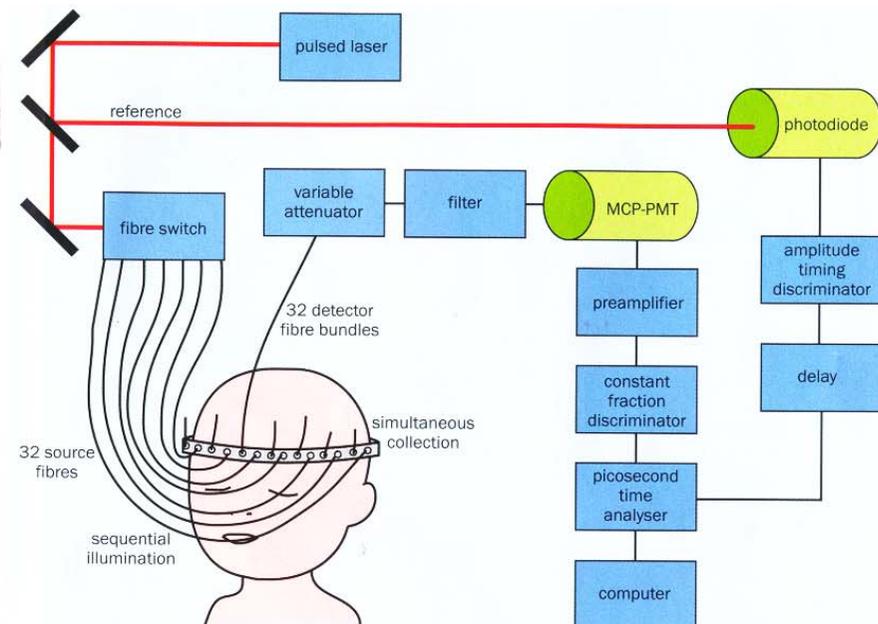
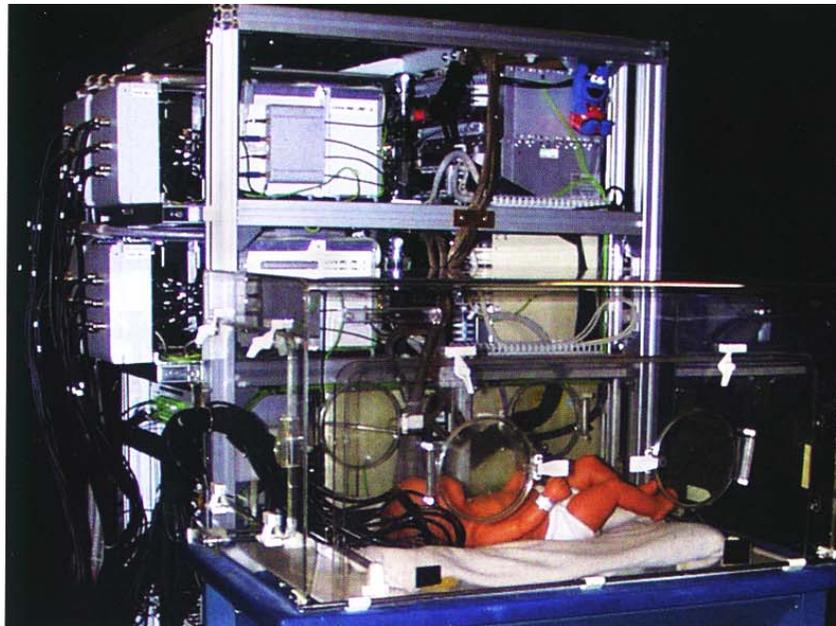
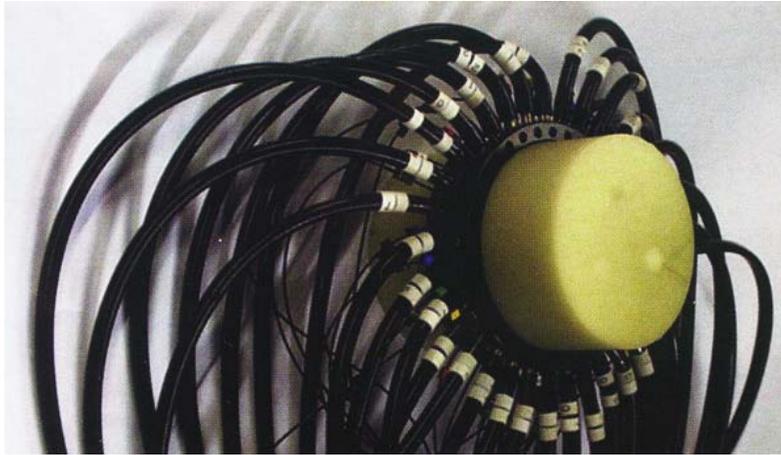
Note alternate configurations:

- Selbstrahlendes Objekt
- Objekt in Transmission
- Objekt im Medium

Beispiel 1: Weltraum LIDAR



Beispiel 2: Tumordiagnostik und Nichtinvasives Sauerstoff-Imaging im Gehirn Neugeborener



Beispiel 3: Nachweis toxischer Substanzen in der Luft



UVSentry

bis 850 m Reichweite

Sensitivität: parts-per-trillion (Hg, SO₂, NO_x, Formaldehyd etc.)

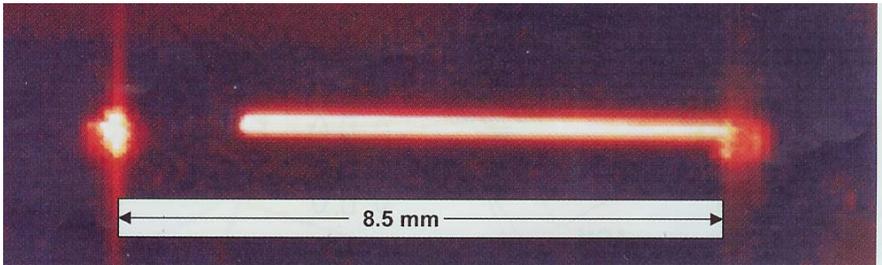
180 nm - 230 nm spectrometer

4. Biomikrosensor basierend auf evaneszenten Wellen

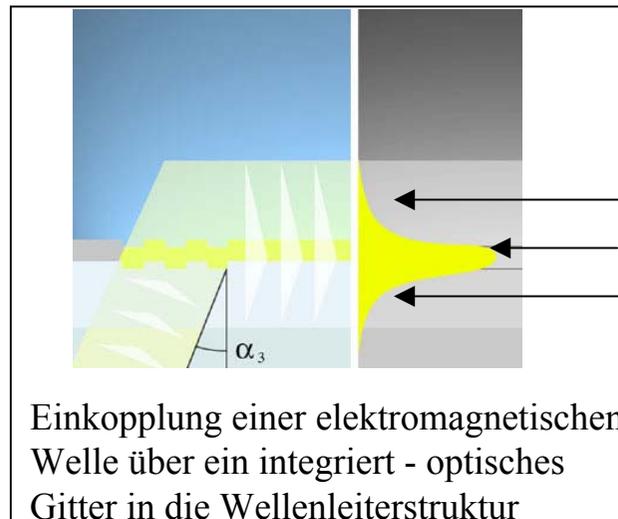
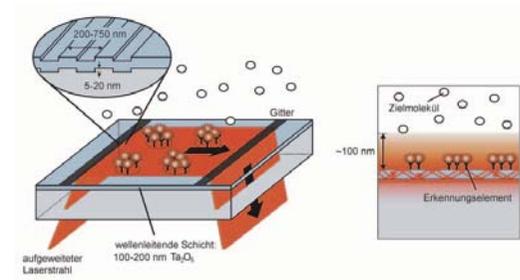
planarer Zweiphotonen-Wellenleiter

Zeptosens AG, CH

Biosensor&Bioelectronics Award 2003



150 nm Ta₂O₅-Schicht (n=2.092) auf AF45 Glass (1.496)



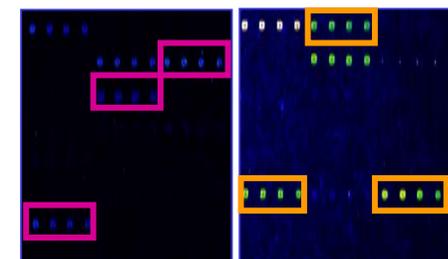
Evaneszente Welle in der Lösung
 Geführte Welle im Wellenleiter (TM₀₀)
 Evaneszente Welle im Glasträger

Einkopplung einer elektromagnetischen Welle über ein integriert - optisches Gitter in die Wellenleiterstruktur

Lichtquelle: Laser

Photonendetektor:

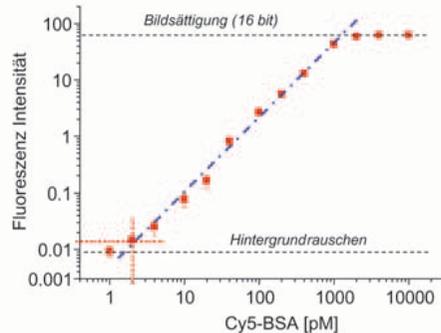
CCD-Kamera
 PMT (konfokal)



Ps. aeruginosa

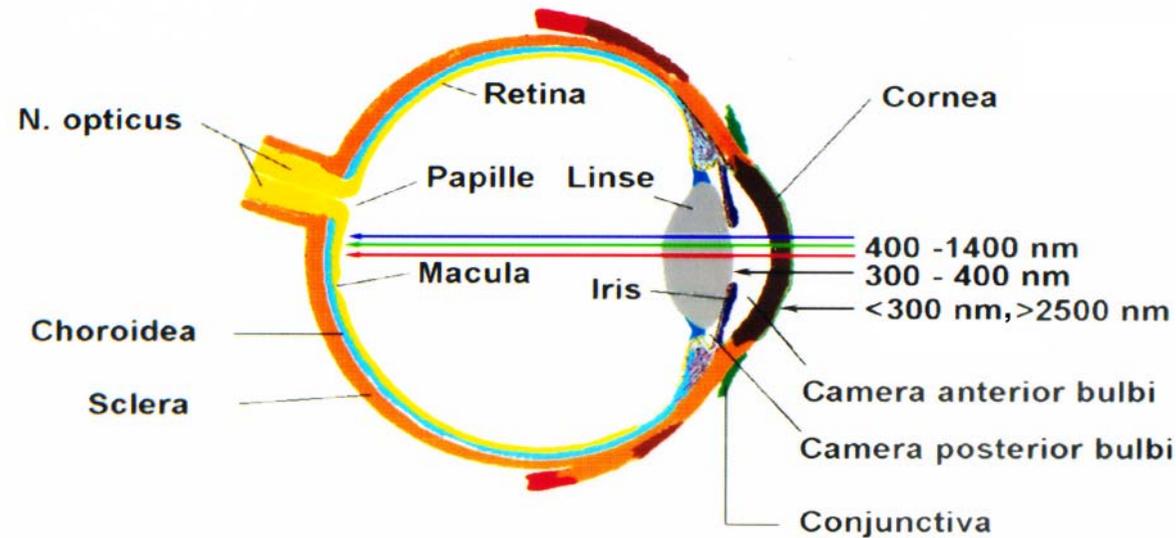
S. aureus

Verdünnungsserie



➔ LOD = 1 Zeptomol (600 Proteine) / Spot

Sensorsystem Auge



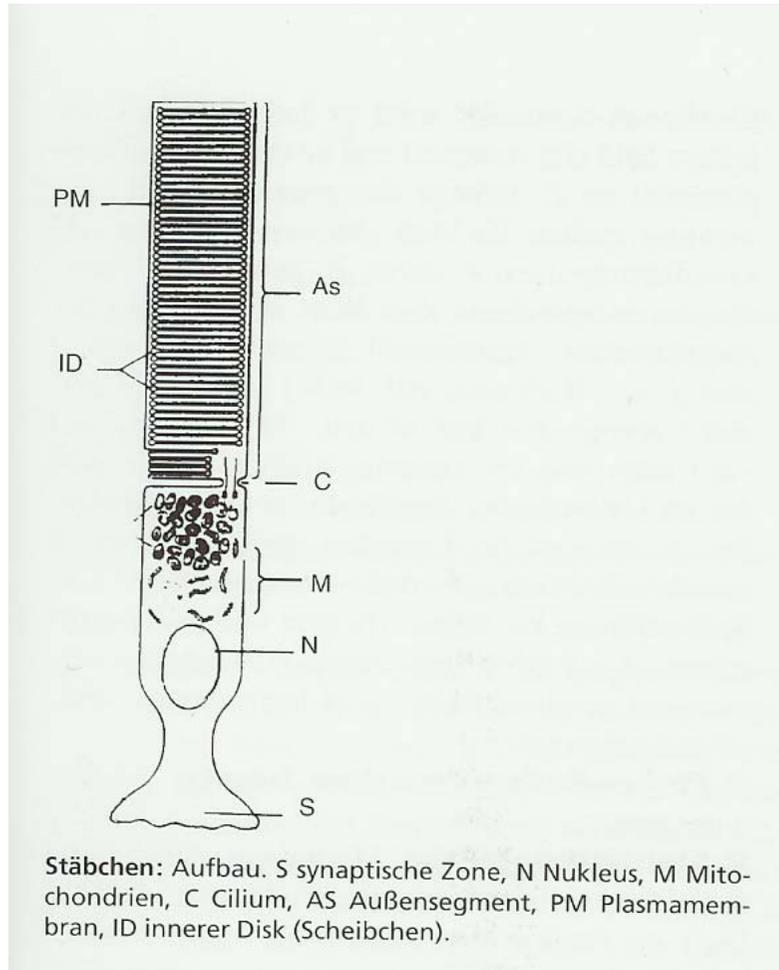
$f=16.7 \text{ mm}$

Maße des Augapfels:	Äußerer Bulbusdurchmesser	24,0 mm
	Innerer Bulbusdurchmesser	22,5 mm
	Dicke der Cornea	0,5 mm
	Tiefe der vorderen Augenkammer	3,6 mm
	Dicke der Linse	3,6 mm
	Abstand zwischen Linse und Netzhaut	15,6 mm
	Dicke der Netzhaut	0,1 - 0.6 mm
	Brechwert des gesamten Auges	59 Dioptrien (Fernsicht)
	Brechwert der Cornea	43 Dioptrien
	Brechwert der Linse	19 Dioptrien (Fernsicht)
	Abstand beider Pupillen	61-69 mm

$1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$

Photosensoren

Stäbchen



120 Mio/Retina
160.000/mm² im Gebiet maximaler Konzentration (Foveola: 0)
ID enthält Rhodopsin, Photoaktivierung induziert elektr. Signal
Schwachlichtsehen

Zapfen

ca. 5 Mio/Retina (200.000/mm² maximal, Foveola)

RGB Bild:

S-Zapfen: 440 nm Absorptionsmaximum

M-Zapfen: 535 nm, L-Zapfen: 565 nm

Farbsehen

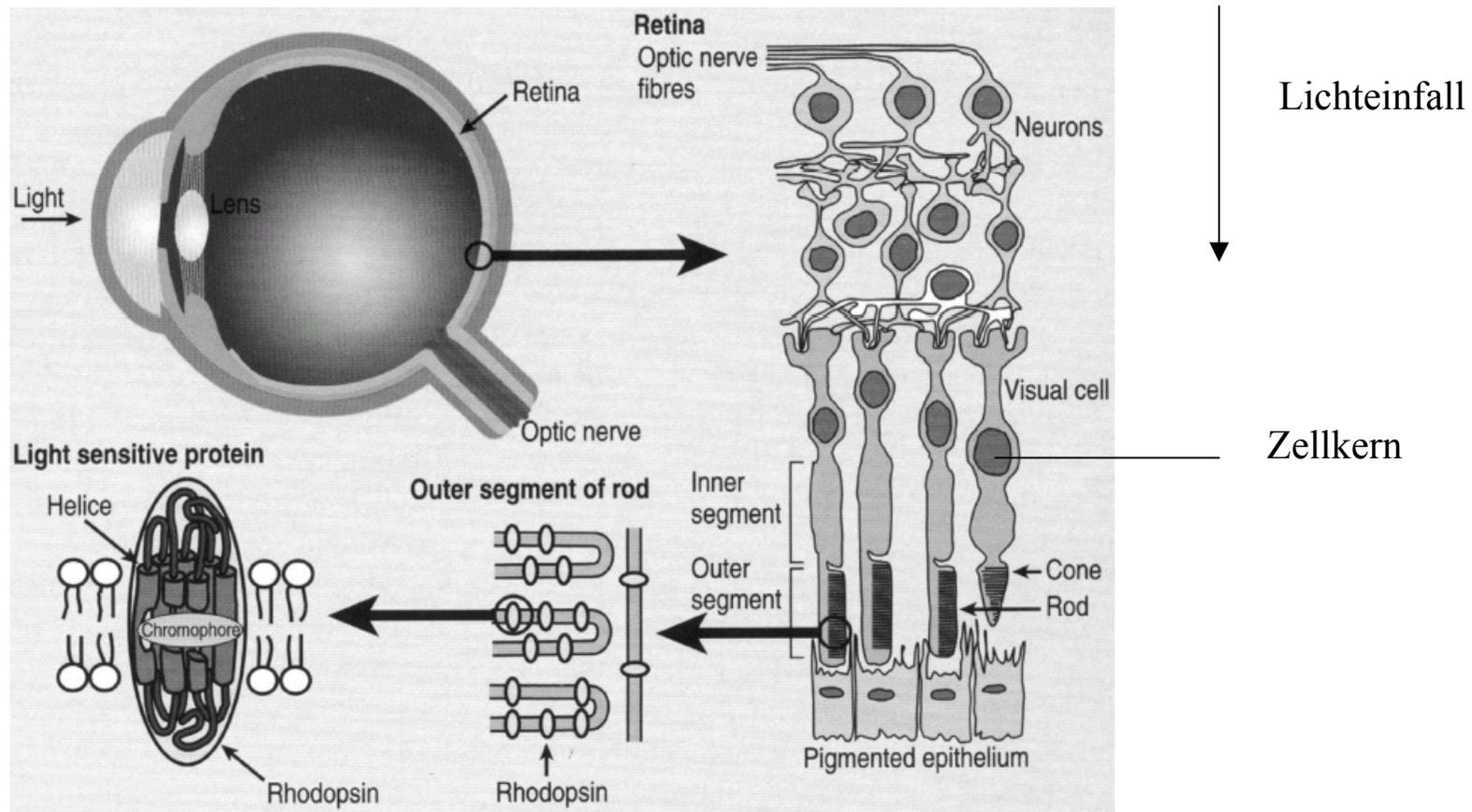
Photozeptor-Molekül: Rhodopsin ("Sehpurpur")

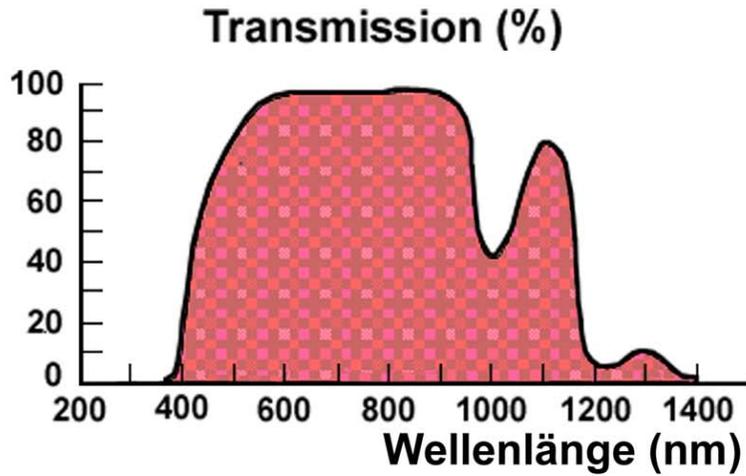
Chromophore Gruppe: Retinal

Farbsehen: mehrere Zapfentypen (mindestens 3) mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima

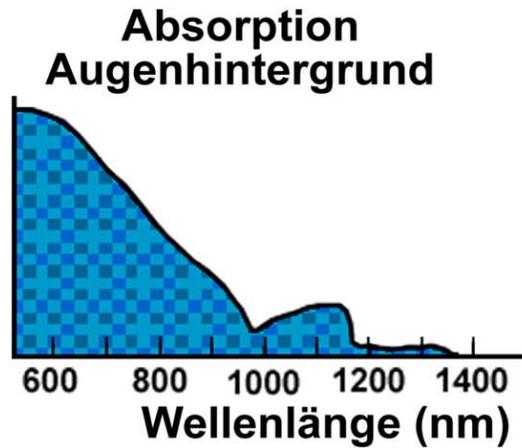
Mensch: 440 nm, 530 nm, 570 nm

Licht muss entwicklungsbedingt zunächst Schicht der Ganglienzellen, Bipolaren, Horizontalen und die Innensegmente durchdringen, bis es vom lichtempfindlichen Aussensegment aufgenommen wird
Zahlreiche photoinduzierte Zwischenprodukte induzieren schliesslich Potentialänderungen

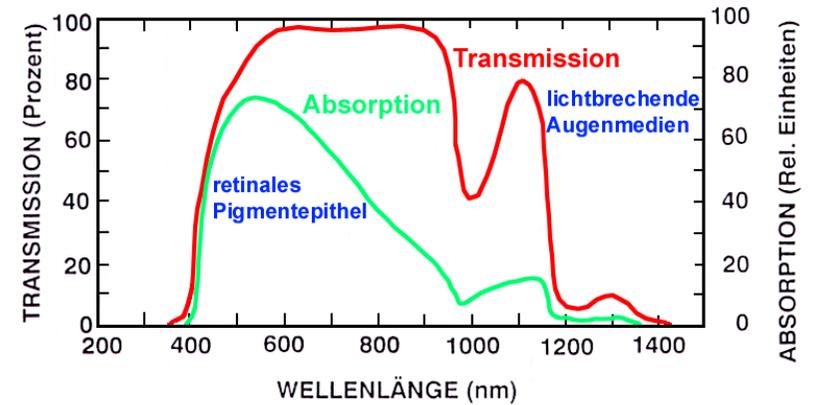
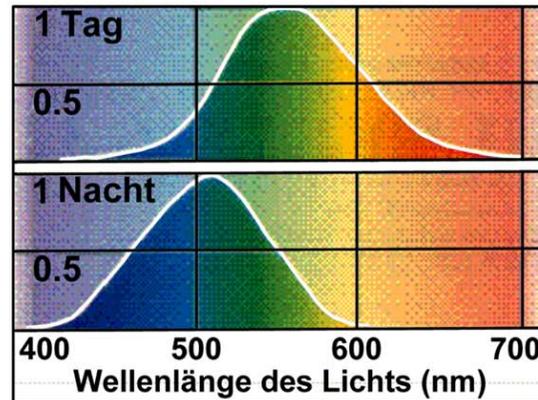




Absorber:
 Melanin
 Hb
 Xanthophyll
 Rhodopsin
 Lipofuszin



spektrale Empfindlichkeit:



Lasertherapie

Brechkraftkorrektur durch Cornea- Bearbeitung

1983: erster Lasereinsatz (Trokel, Srinivasan, Braren)

1987: kommerzieller Corneachirurgie-Laser (>2 Mio Patienten jährlich)

direkter Cornea-Abtrag (Keratotomie)

bevorzugt Excimer-Laser bei 193 nm

($E_{193} = 6.4 \text{ eV}$, $E_{\text{bonds}} = 3.5 \text{ eV}$)

Photodekomposition

Präzision: < 0.5 μm , typische Abtragungstiefe ca 100 μm

Problem: geringe Eindringtiefe der UV-Strahlung

Änderung der Cornea- Biomechanik durch Kollagenschrumpfung

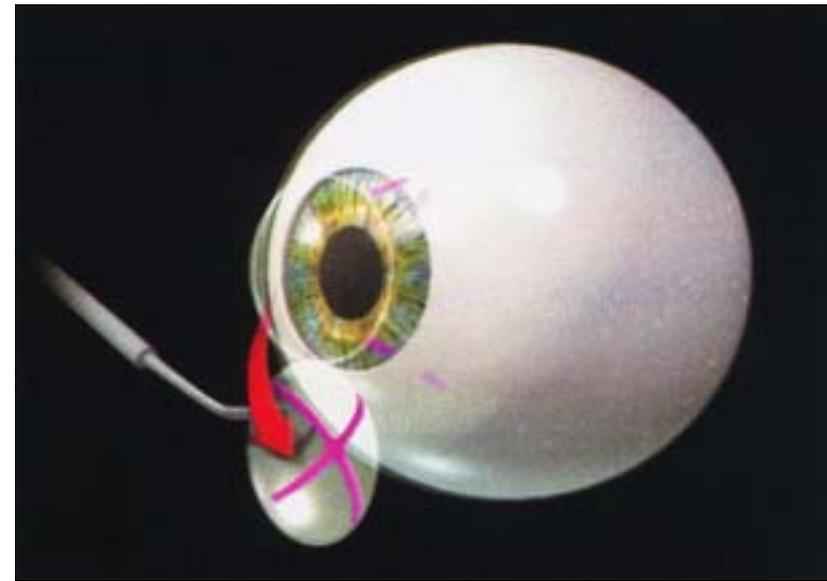
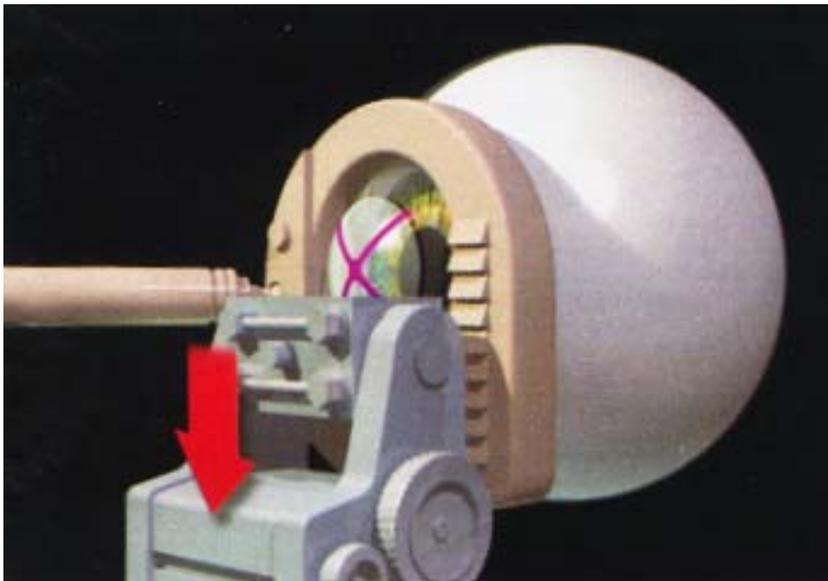
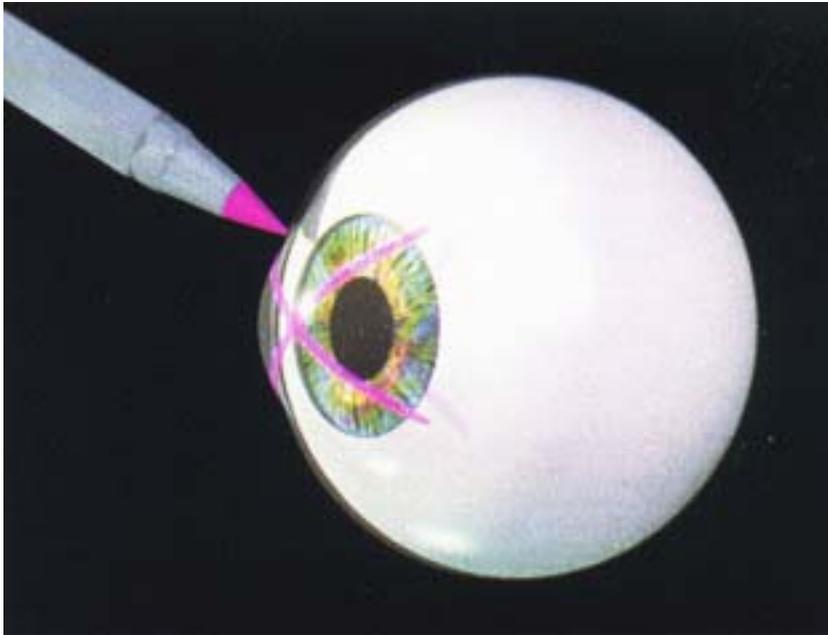
bevorzugt Ho:YAG-Laser (2.1 μm)

Aufheizung des Kollagens auf 50-55°C

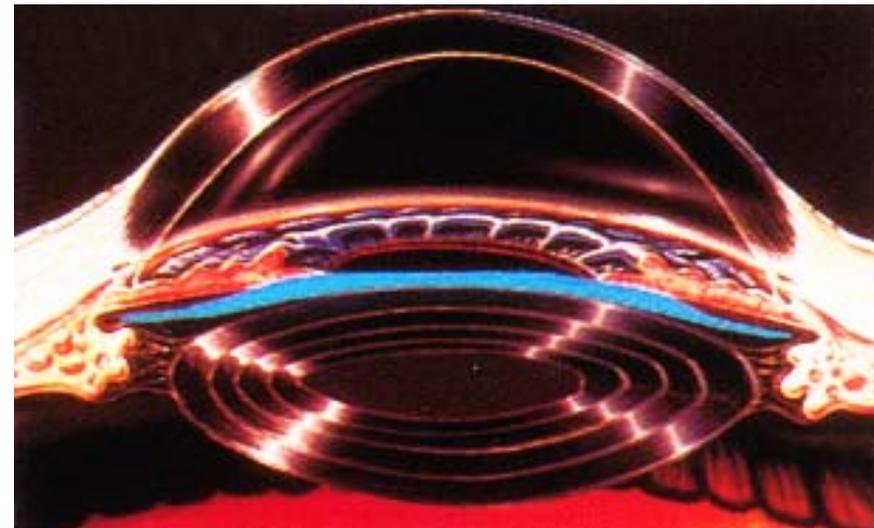
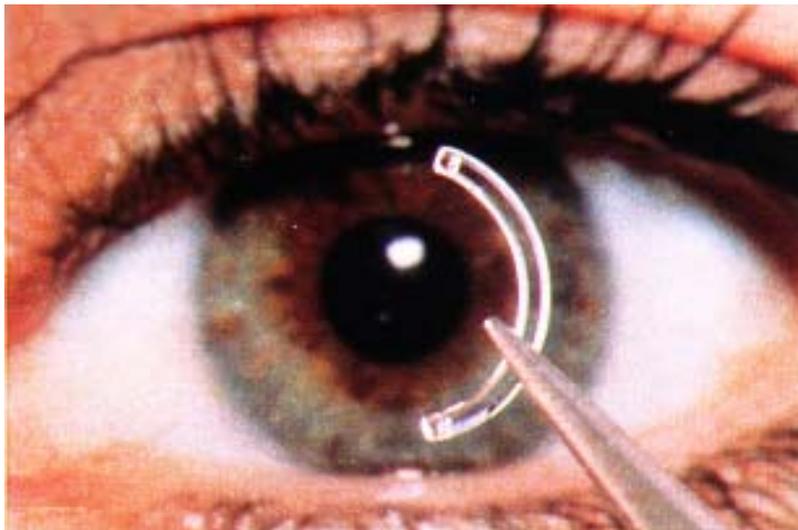
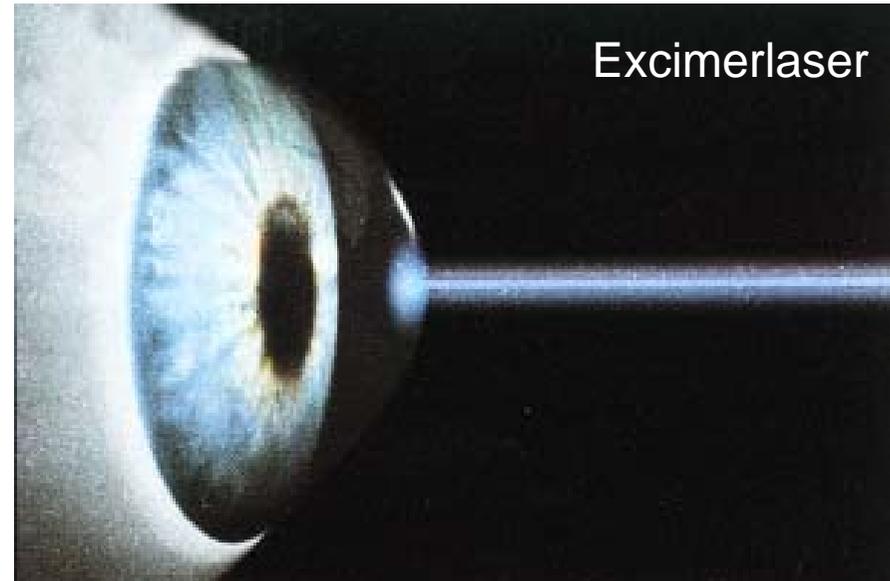
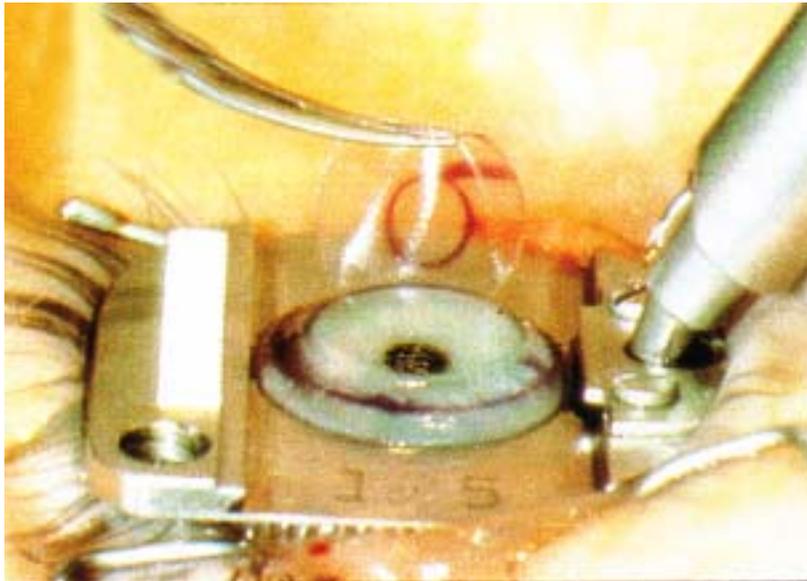
Schrumpfung auf 1/3

Photothermische Keratoplastie

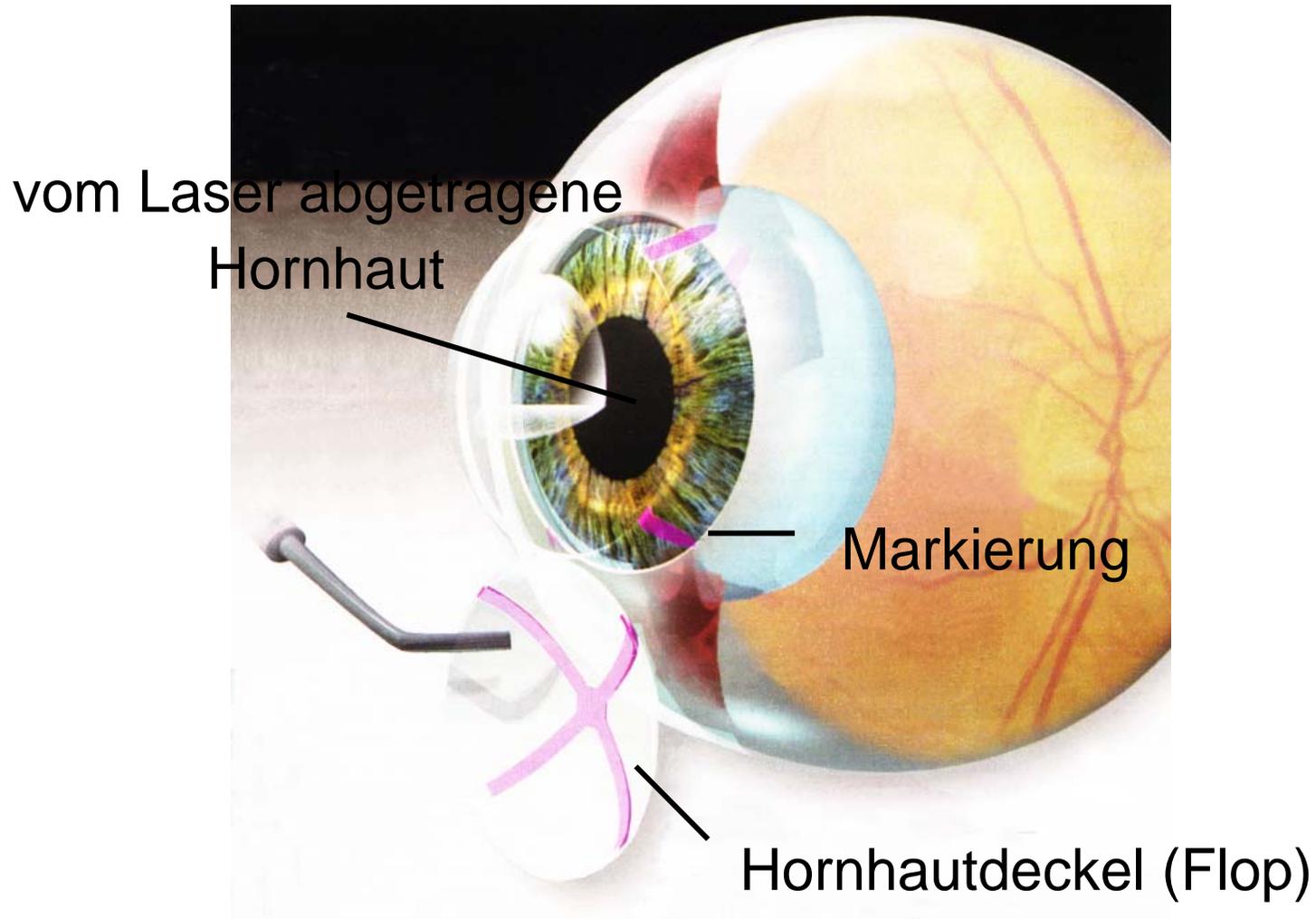
Einsatz mechanischer Werkzeuge zur Entfernung der Epithelschicht (Flap-Generation)



LASIK-Methode



LASIK



LASIK mit dem Excimerlaser

Physik

Beugung
Streuung
Absorption
Reflexion
Brechung

Technologie

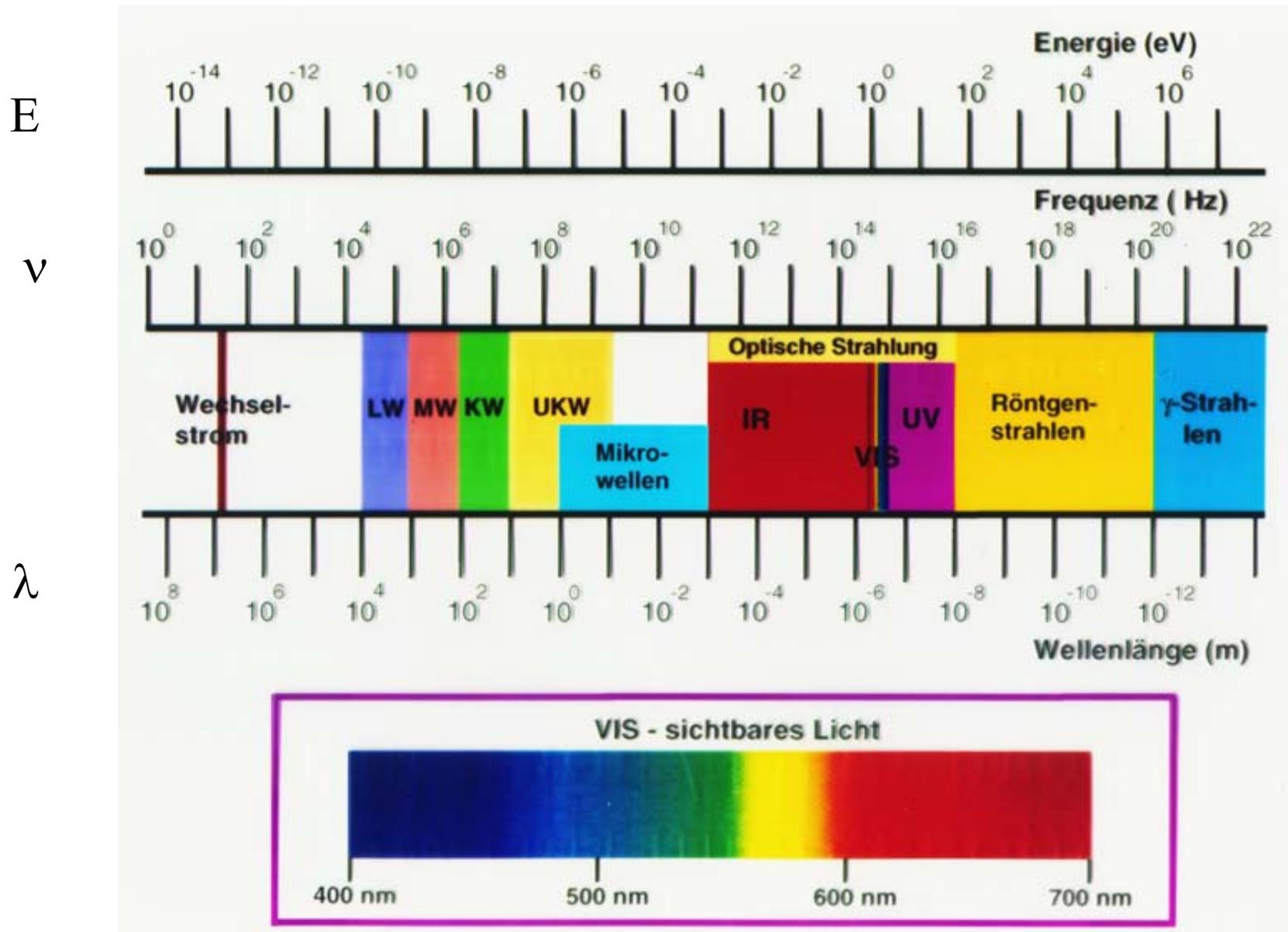
Laser
optische Komponenten
Detektoren

System Engineering

Komponenten
Subsysteme
Systeme
Funktionalität
Mission



2. Optics Basics



$$E = h\nu \text{ (Teilchennatur)} \quad c = \lambda\nu \text{ (Wellennatur)}$$

Thermische Strahlungssensoren

Berührungslose Messung der von der Körperoberfläche emittierten Wärmestrahlung

Spektrum = f(T)

NIR:	0,7 - 1,5 μm
MIR:	1,5 - 6,0 μm
FIR:	6,0 - 40 μm
Ultrafernes IR:	> 60 μm

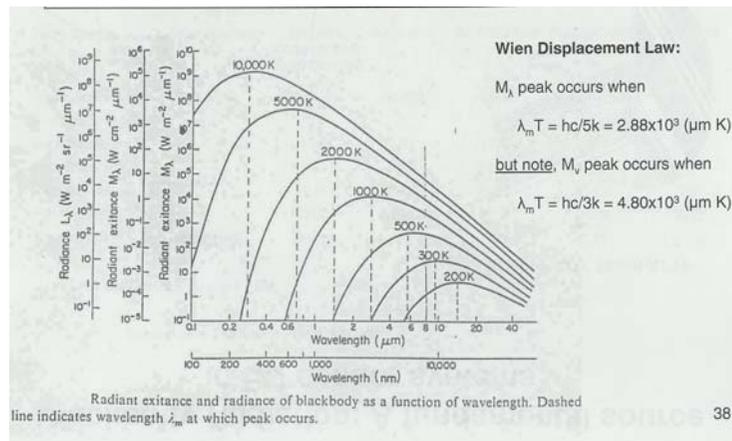
Plancksches Strahlungsgesetz

$$L = 2\pi hc^2 / \lambda^5 (1 / \exp(hc / (\lambda k T)) - 1)$$

Temperaturstrahler

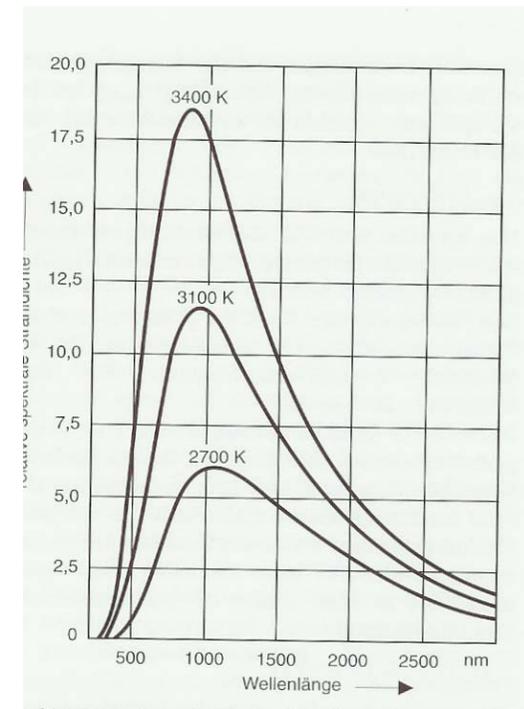
Sonne

"Glühlampe" (Wirkungsgrad Lichtproduktion <5%)



Blackbody-Strahler

(Wiensches Verschiebungsgesetz)



Strahlungsfluss $\Phi = dE/dt = \text{Strahlungsleistung}$

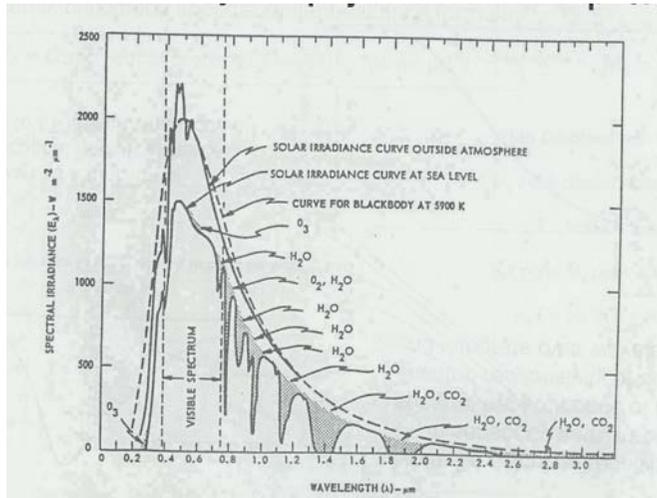
Spezifische Ausstrahlung $M = d\Phi/dA$ A: Flächenelement

Strahlaustrittsraumwinkel $d\Omega$ in sr

Strahlendichte L (Strahlungsfluss Φ auf "gesehene" Fläche $\cos\alpha dA$ und $d\Omega$) = $d^2\Phi / (\cos\alpha dA d\Omega)$

Sonnenspektrum

Sonne: wichtige Quelle in passiven Sensorsystemen



bezogen auf Temperatur eines schwarzen Strahlers:

VIS: 6000 K (460 - 500 nm) 150 μm : 4400 K UKW: 10⁶ K

Solarkonstante: 1350 W/m² extraterritoriale Strahlung (stellt Jahresmittelwert da)

VIS: 50%, UV: 8%, IR:42%

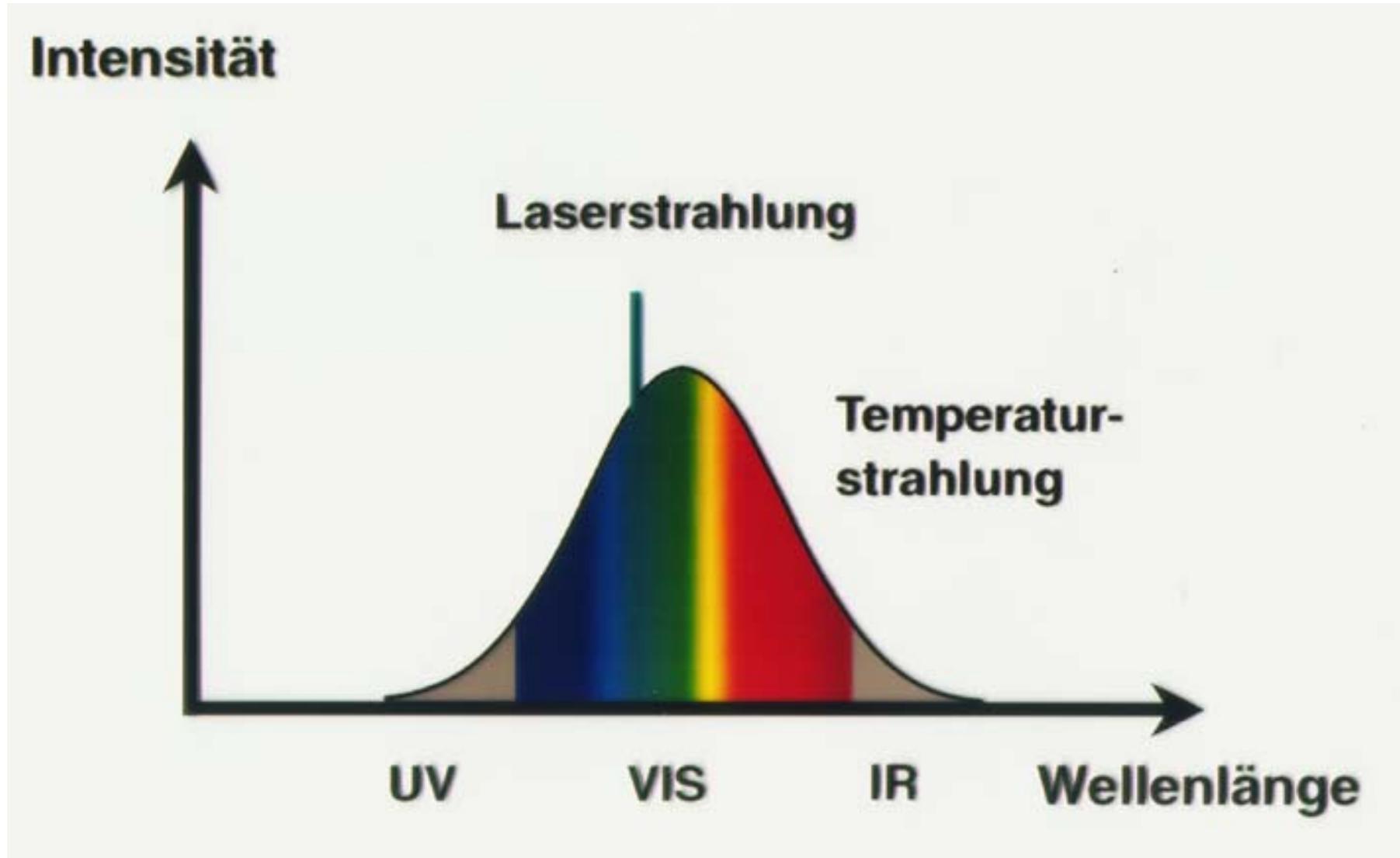
Januar: 1410 W/m²

Juli: 1310 W/m² (längerer Abstand Erde-Sonne)

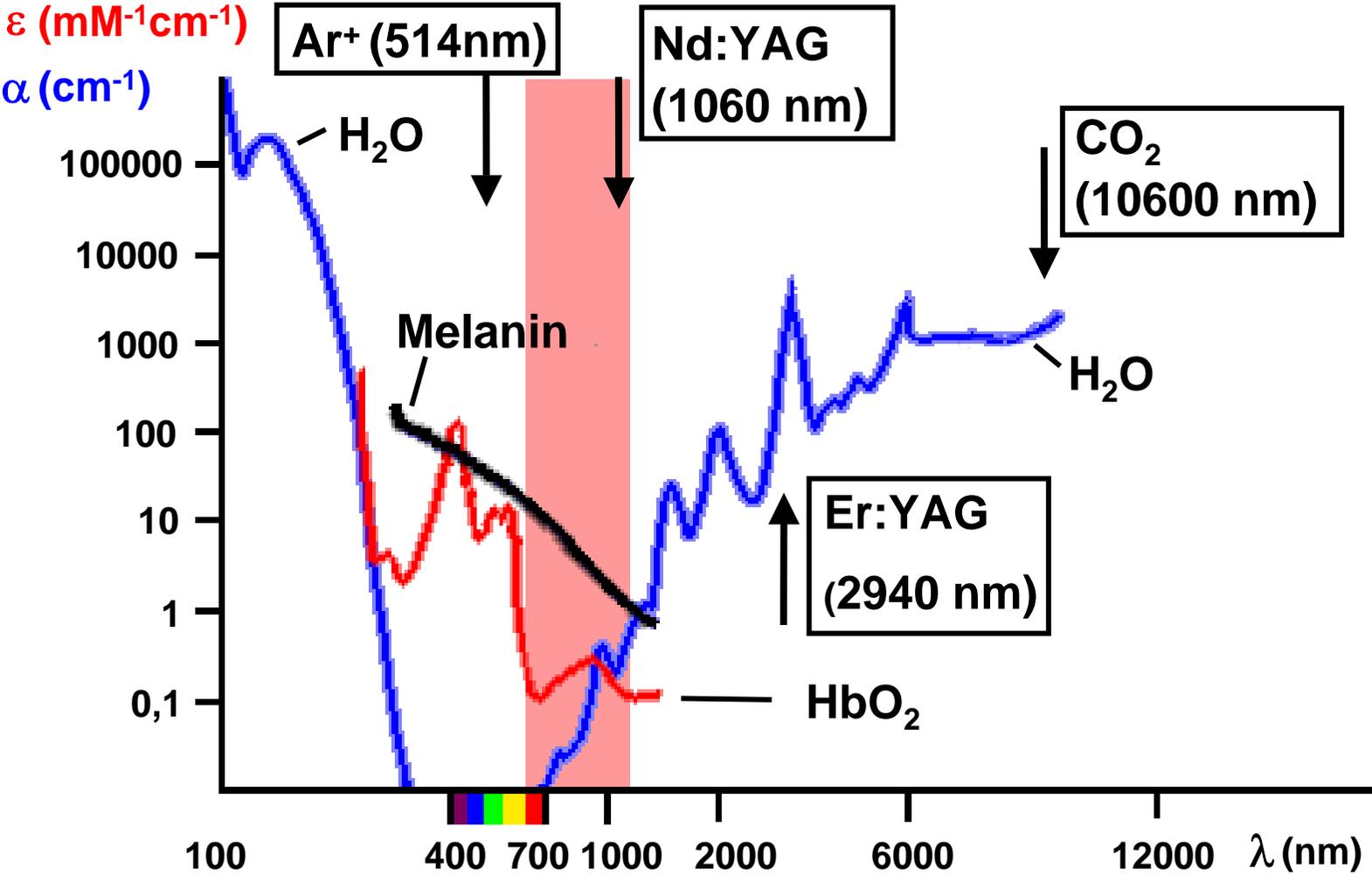
Globalstrahlung: auf die Erde auftreffende Strahlung (direkt+ gestreut)

(UVB: nur 23%, UVA: nur 72%, VIS: 91% der extraterr. Strahlung)

Monochromasie



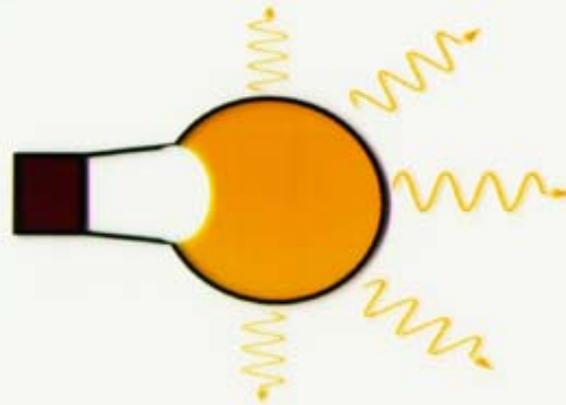
Optisches Fenster von Zellen und Geweben



Divergenz

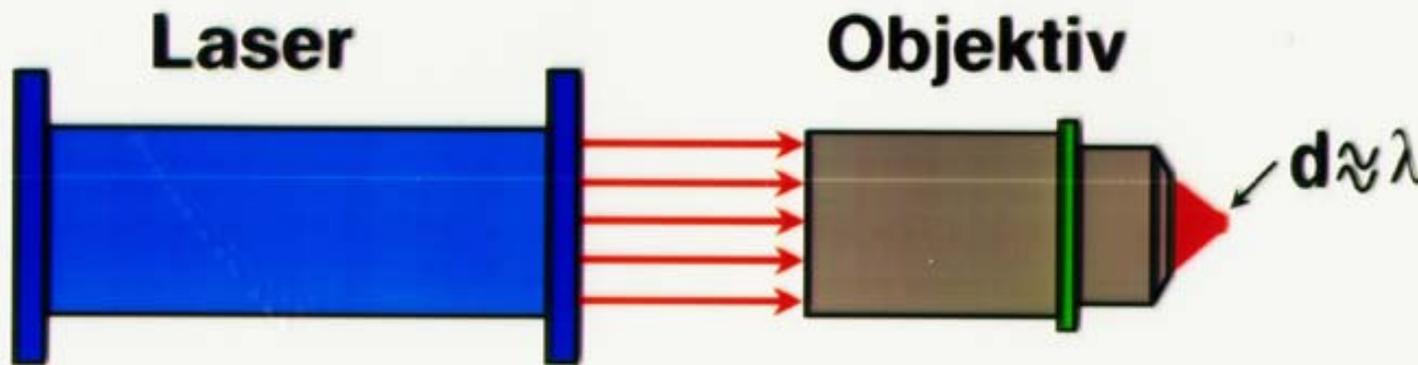
0,1 mrad (0.0057°):
nach 1 km hat sich 1 mm Strahl
auf 10 cm vergrößert

Temperaturstrahler



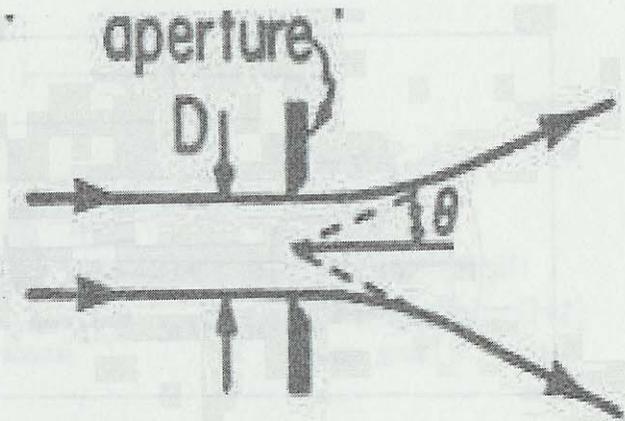
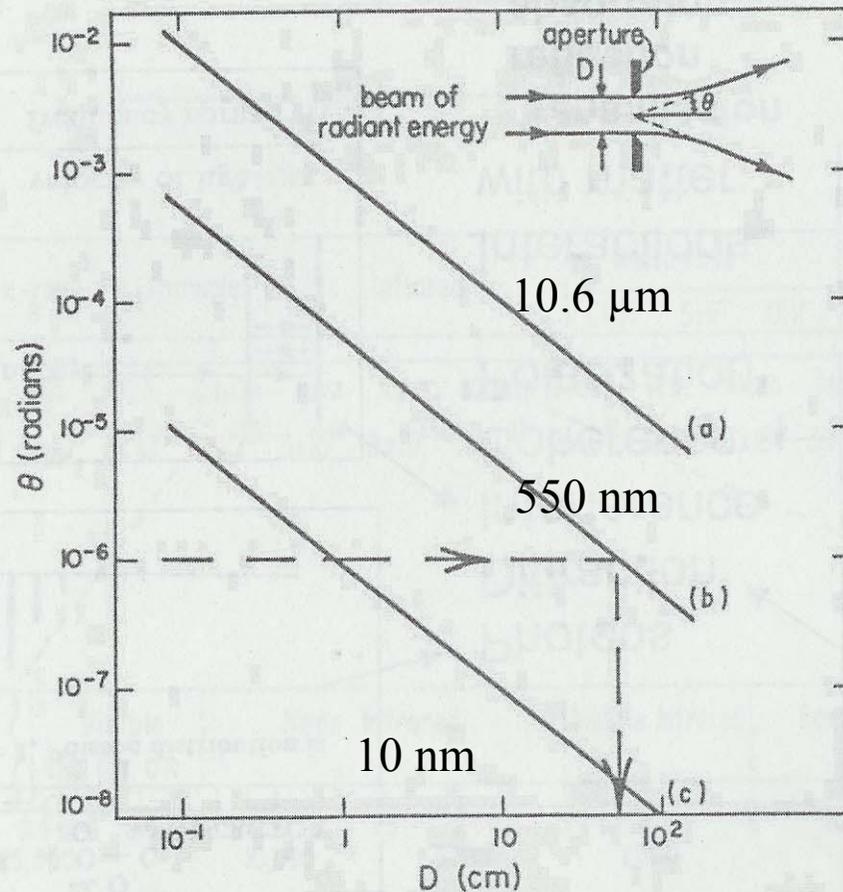
0,01 mrad:
Mond: 3 km Spot

Erzeugung von
Sub-Mikrometer
Beleuchtungspots



Radiation interacting with matter diffracts. The smaller the size of features the larger the angle of diffraction.

Diffraction



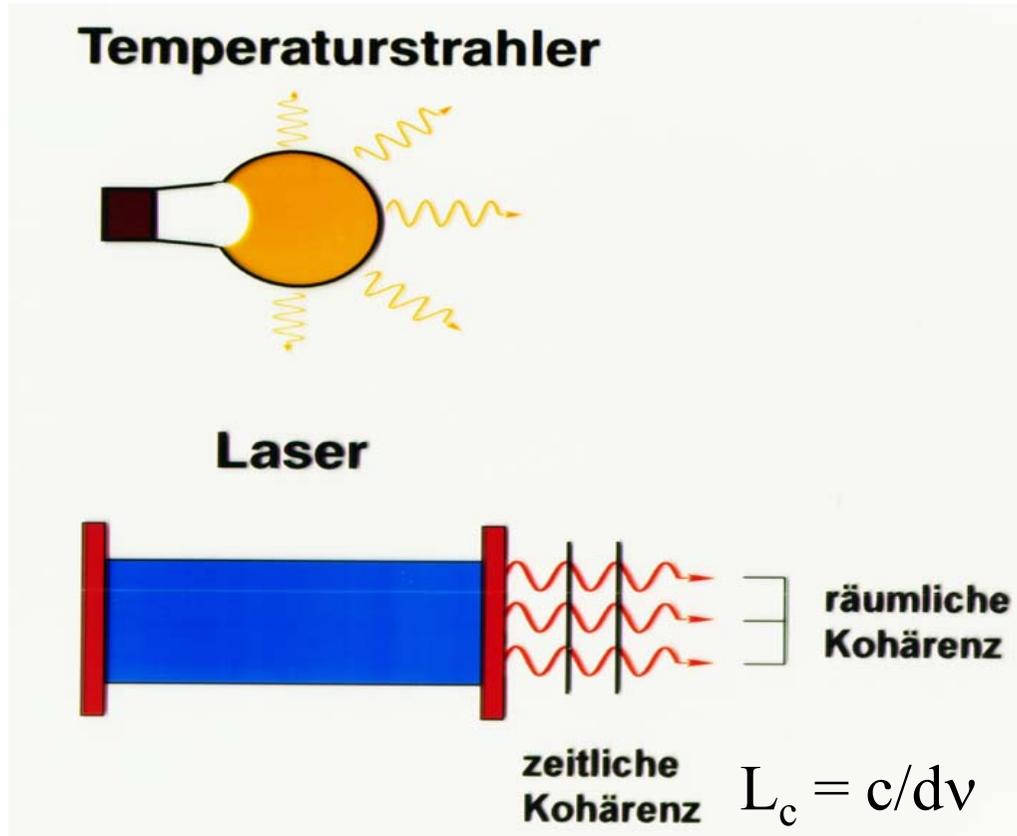
$$\theta \sim \lambda/D$$

Detektor mit Durchmesser
 $a = 2.44 \cdot f \cdot \lambda/D$
erfasst 80% der Lichtleistung
(f: Fokusslänge der Fokussieroptik)

Beugung

$$1 \text{ mrad} = 0.057^\circ$$

Kohärenz



Kohärenzvolumen einer
inkohärenten Lichtquelle

Kohärentes Licht ist interferenzfähig.

Dies äussert sich als ungleichmässige Ausleuchtung (Laserspeckle)

Und muss bei der Standortwahl des Detektors beachtet werden (Interferenzmaxima, -minima)

Erzeugung kurzer Laserpulse

Prinzip	Pulsdauer	Pulsenergie	Pulsleistung
Shutter (chopper)	ms - s	nJ - mJ	mW- W
Relaxationsoszillation	μ s	μ J mJ	kW
Güteschaltung (Q-switch)	ns	mJ J	MW
Modenkopplung (mode-locked)	fs, ps	nJ mJ	kW ... PW

kürzeste Laserpulse: ca. 3 fs (NIR)
Attosekunden (X-ray)

$$s = ct = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 3 \times 10^{-15} \text{ s} = 900 \text{ nm}$$

Bestrahlungsparameter

Laser-Parameter

	Symbol	Einheit
Wellenlänge (wavelength)	λ	nm, μm
Strahldurchmesser	d	mm
Pulsdauer (pulse width)	τ	fs, ps, ns, μs
Pulsfolgefrequenz (repetition frequency)	f	Hz
mittlere Leistung (mean power)	P	mW, W, kW
Pulsleistung (peak power)	P_{Peak}	W, kW, MW, GW, TW
Pulsenergie (pulse energy)	$E = P_{\text{Peak}} \tau$	pJ, nJ, μJ , mJ

Bestrahlungs-Parameter

	Symbol	Einheit
Bestrahlungsdauer	t	μs , ms, s, min
Spotgröße (irradiation area)	A	cm^2
Intensität (intensity)	$I = P/A$	mW/cm^2 - TW/cm^2
Energiedichte, Dosis (energy density, fluence)	$E/A = It$	mJ/cm^2 - GJ/cm^2

Intensität $I = P/A$

Laserpointer

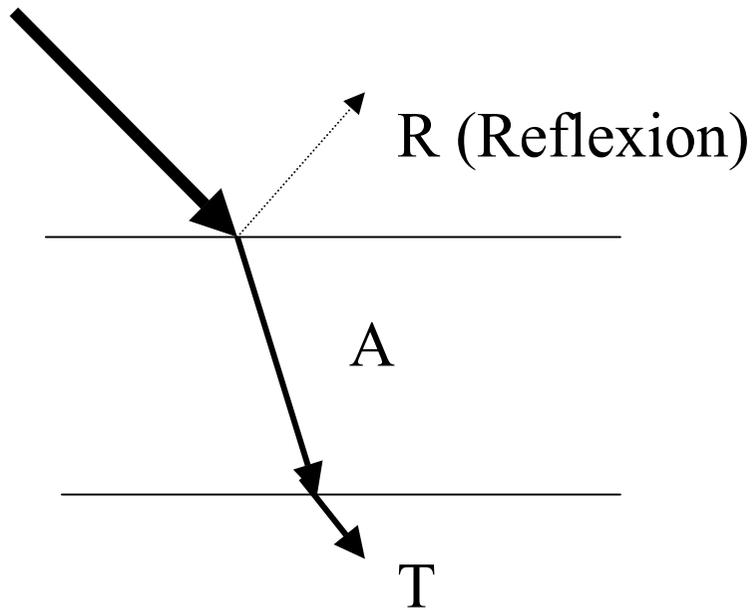
Betriebsart	P	d	A	I
freilaufend	1 mW	1 mm	$\sim 1 \text{ mm}^2$	100 mW/cm ²
fokussiert (Objektiv)	1 mW	0.5 μm	0.25 μm^2	400 kW/cm ²

Lichtquelle

	P (W)	I (W/cm ²)		
		ohne Fokussierung	Netzhaut	Objektiv
Sonne	4×10^{26}	0.1 (Erde)	10	500
Laserpointer	0.001	0.1	1300	400000
Nd:YAG-Laser	100	10000		4×10^9
Ti:Sa Laser	$>10^{13}$	$>10^{15}$		$>10^{20}$

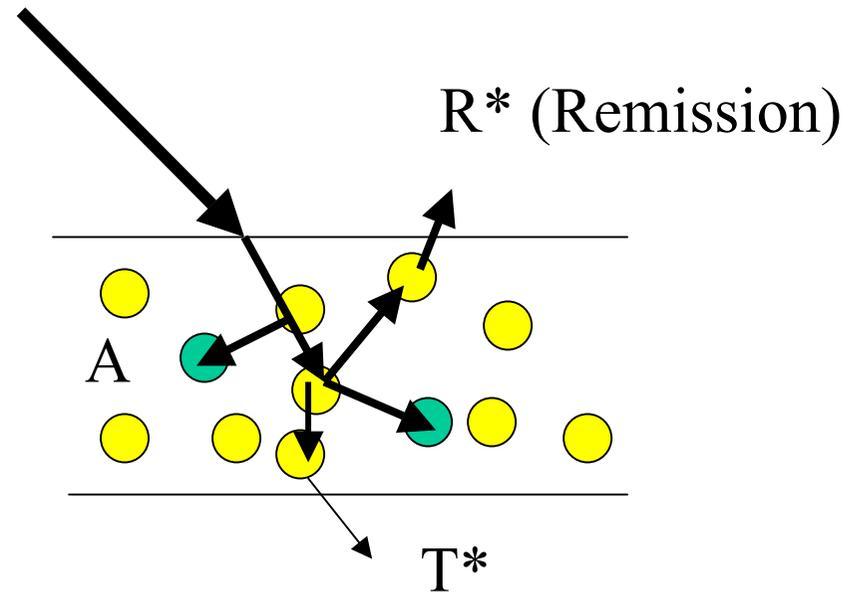
Laser - Materie - Wechselwirkung

streuungsfreies Medium



$$R + A + T = 1$$

Gewebe (Mehrfachstreuer)



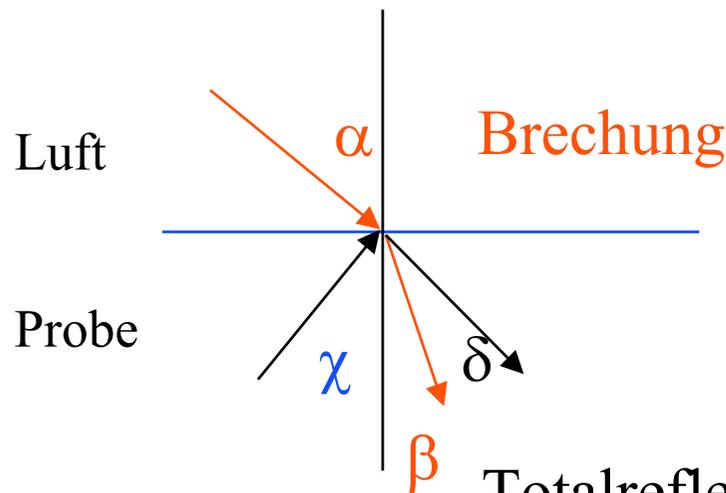
$$R^* + A + T^* = 1$$

Optische Parameter

- - Brechzahl, Brechungsindex n
- - Absorptionskoeffizient μ_a
- - Streukoeffizient μ_s
- - Anisotropie-Faktor g

Brechzahl n

- $n(\lambda) = c_0 / c(\lambda) = c_L / c(\lambda) = \sin \alpha / \sin \beta(\lambda)$



n (589 nm)

Wasser	1,33
Hornhaut	1,5
Augenlinse	1,42-1,47
Epidermis	1,45
Dermis	1,40
Blut	1,35
Olivenöl	1,48
Plexiglas	1,49
BK7	1,52
Flintglas SF4	1,75
Diamant	2,42
Immersionöl	1,52

BK7 (852nm) 1,51

BK7 (365nm) 1,54

Totalreflexion

$$\chi = \delta$$

$$\chi > \chi_G \text{ mit } \sin \chi_G = 1/n$$

$$\sin 41,8^\circ = 1/1.5$$

Absorptionskoeffizient μ_a

- $T = e^{-\mu_a L}$ L: durch Streuprozesse ungerade Wegstrecke
- mittlerer freier Weg MFW zwischen Absorptionsereignissen: $\text{MFW} = 1 / \mu_a$
- Blutleere Dermis, 577 nm: $\mu_a = 2 \text{ cm}^{-1}$
- Atmosphäre 10,591 μm (CO_2) = 0.3636 km^{-1}

Lambert-Beer Gesetz (dünne Flüssigkeiten):

$$I = I_0 e^{-\epsilon cd}$$

Streukoeffizient μ_s

- $T = e^{-\mu_s L}$ (keine Absorption)
- mittlerer freier Weg MFW zwischen Streuereignissen: $MFW = 1 / \mu_s$
- Blutleere Dermis, 577 nm: $\mu_s = 200 \text{ cm}^{-1}$
- Atmosphäre 10,591 μm (CO_2) = 0.00465 km^{-1}

Anisotropie-Faktor g

- charakterisiert Streurichtung
 - $g = \langle \cos\theta \rangle$ θ : Streuwinkel
- $g = 0$ orientierungslos, Gedächtnisverlust, zufälliger Weg, isotrop
- $g = -1$ totale Rückstreuung
- $g = +1$ keine Streuung

- Gewebe:
 - $g = 0.8 - 1.0$ Vorwärtstreuung, $\theta = 37^\circ - 0^\circ$
 - Dermis, $g(577\text{nm}) = 0.8$
 - nach 5 Streuereignissen orientierungslos, nach 95 weiteren absorbiert

- $1/(1-g)$ Streuereignisse: Orientierungsverlust
- $\mu_s (1-g) = \mu_s'$ reduzierter Streukoeffizient

Eindringtiefe

- Mehrere Definitionen

- $d(\lambda) = 1/(3\mu_a^2 + 3\mu_a\mu_s')^{1/2}$

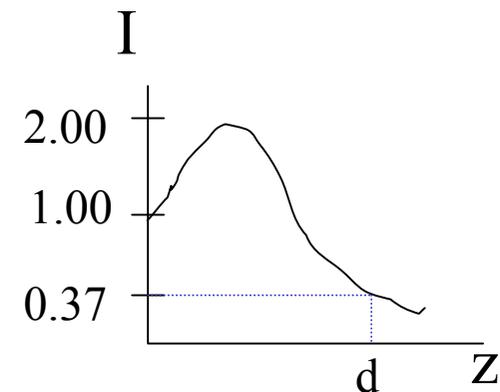
- $d(\lambda): I(d) = 0.37 I_0$

- $\lambda < 500 \text{ nm}: d < 1 \text{ mm}, \lambda = 600-1000 \text{ nm}: d = 1-5 \text{ mm}$

- Lichtintensität im Gewebe

- $I = I_0 \cdot k \cdot \exp(-z/d')$

– $k=1-3$, „Rückstreu-Parameter“



Lasereinteilung

Lasermodus	cw (continuous wave) oder gepulst
Pulsdauer	z.B. Femtosekundenlaser
Art der Pulsherstellung	freilaufend / gütegeschaltet (Q-switch) / modensynchronisiert
LasermEDIUM	z.B. Farbstofflaser
Lasерwellenlänge	z.B. UV-Laser

Lasertypen

ArF Excimerlaser	Gaslaser	193
XeCl Excimerlaser	Gaslaser	308
He-Cd Laser	Gaslaser	325
Stickstofflaser	Gaslaser	337
XeF Excimerlaser	Gaslaser	351
Argonionen-Laser	Gaslaser	351, 364, 488, 514
Kryptonionen-Laser	Gaslaser	407
He-Cd-Laser	Gaslaser	442
OPSL	Festkörperlaser	460, 488
He-Ne	Gaslaser	543, 633, 1152, 3391
Cu	Metалldampf	578
Au	Metалldampf	628
Rubinlaser	Festkörperlaser	628, 694
Laserdioden	Halbleiterlaser	450 - 1000
Farbstofflaser	Farbstofflaser	400 – 1000
Alexandritlaser	Festkörperlaser	750
Ti:Saphir Laser	Festkörperlaser	700 – 1000
OPSL	Festkörperlaser	980
Nd:YAG Laser	Festkörperlaser	1060
Holium-Laser	Festkörperlaser	2060
Erbium YAG Laser	Festkörperlaser	2936
CO ₂ Laser	Gaslaser	10600

UV-Laser

VIS-Laser

IR-Laser

Laserdioden: kleinste Laser (Abmessungen <500 μm möglich)

3.2. Übertragungssysteme

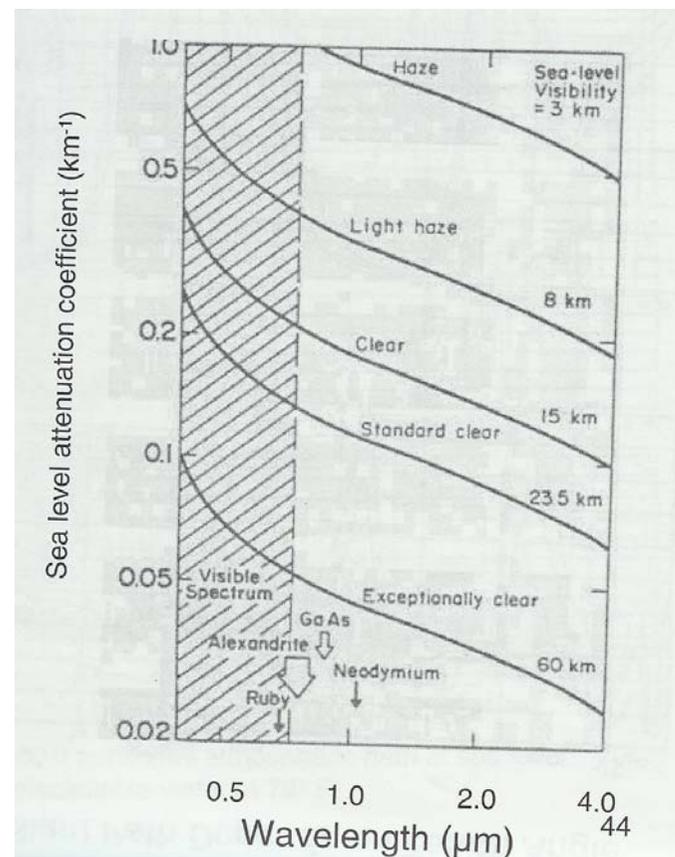
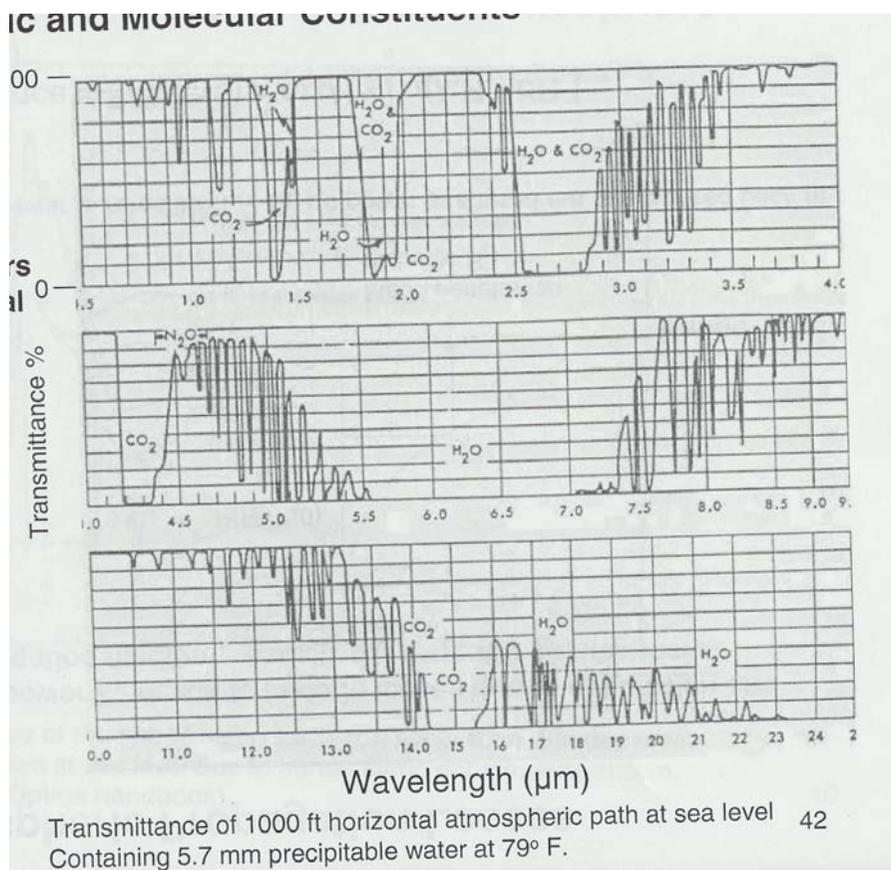
Transmission durch Atmosphäre

$$\lambda = 10.6 \mu\text{m}$$

$$\mu_a = 0.3636 \text{ km}^{-1}$$

$$\mu_s = 0.00465 \text{ km}^{-1}$$

$$\mu_a + \mu_s = 0.3682 \text{ km}^{-1} \text{ (1.58 dB/km)}$$



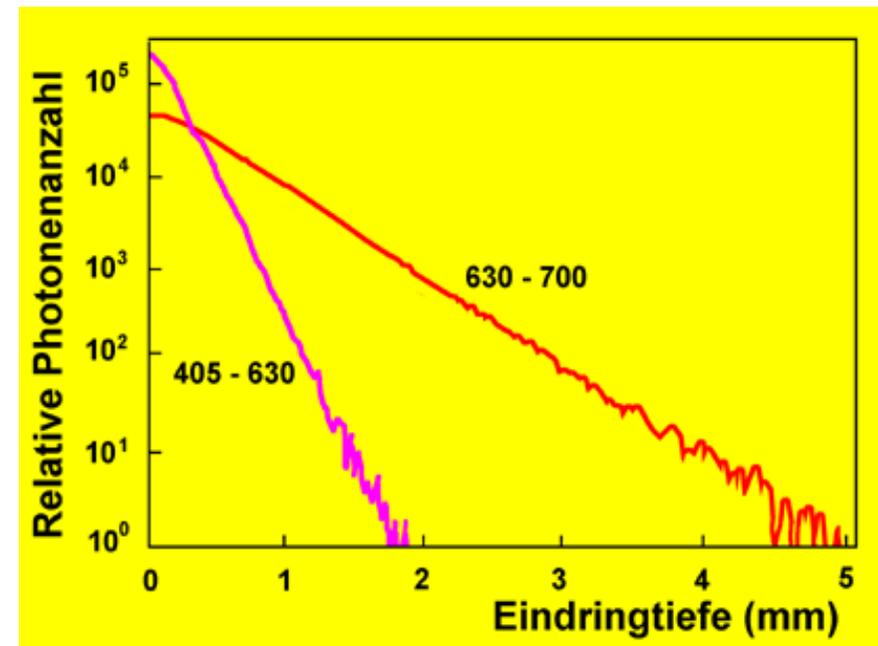
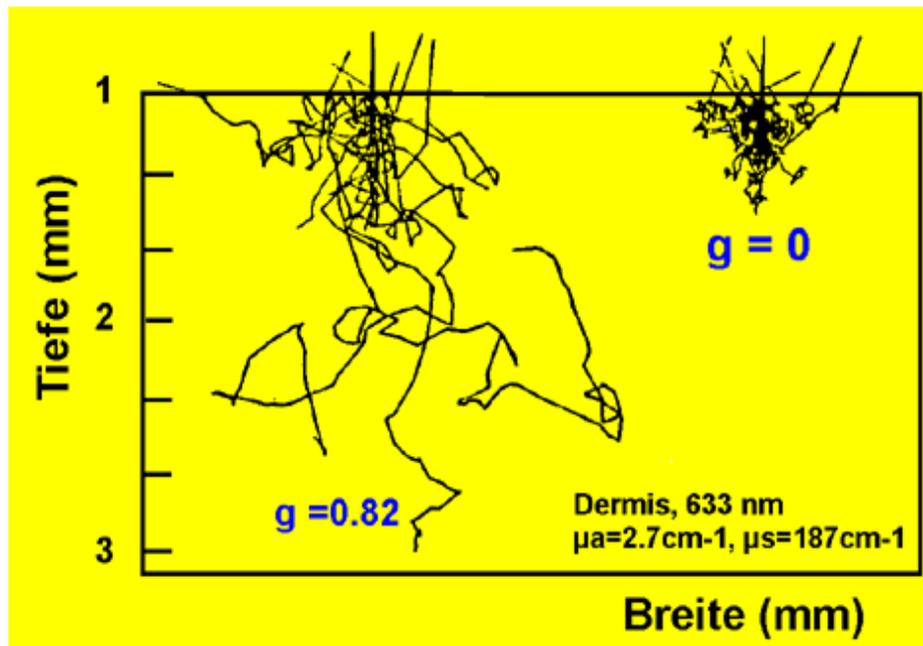
EO Sensor Design:

terrestrisch/extraterrestrisch

Vorhandensein von Aerosol

Mehrfachstreuung bei hohen Konzentrationen

Monte Carlo Simulation der Photonenbewegung optischer Transport im Gewebe



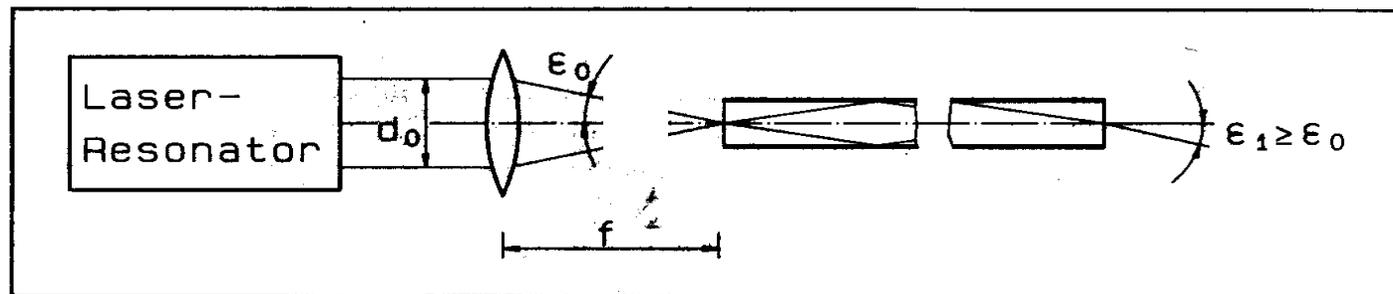
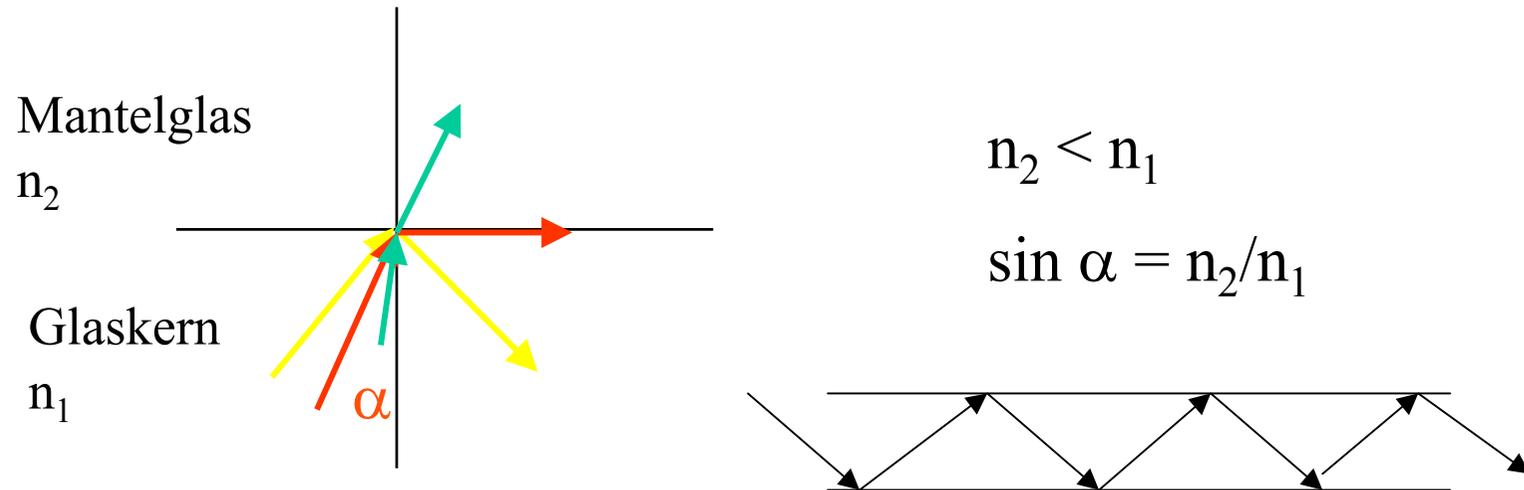
Transmission durch Gewebe wird bestimmt durch Streuung und Absorption

Lichtübertragungssysteme: Lichtleiter

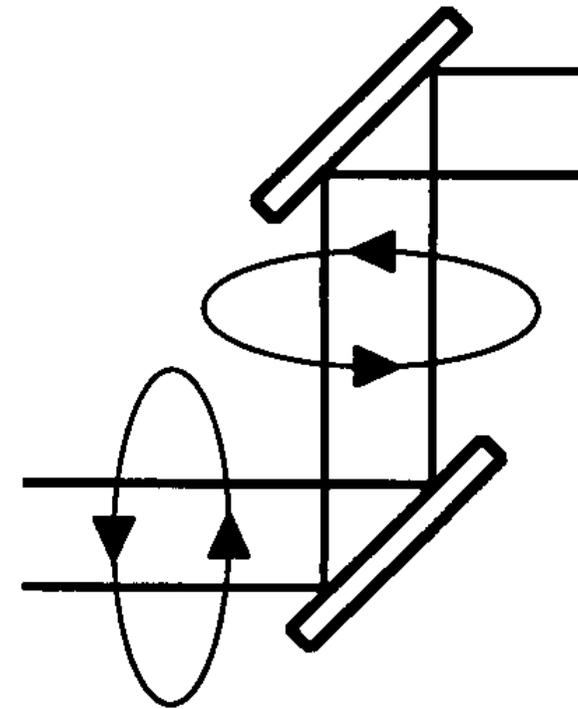
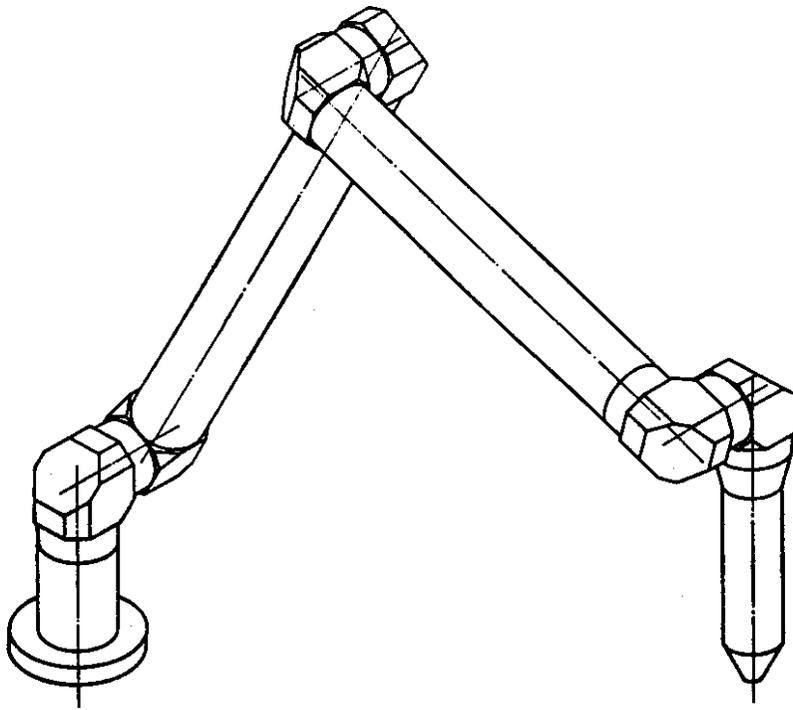
Monomode-Lichtleiter (5 μm Durchmesser)

Multimode-Lichtleiter (50 - 600 μm)

Stufenindex-LL / Gradientenlichtleiter

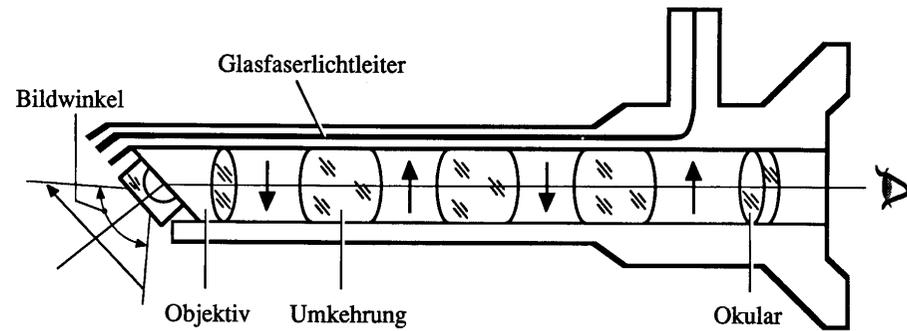
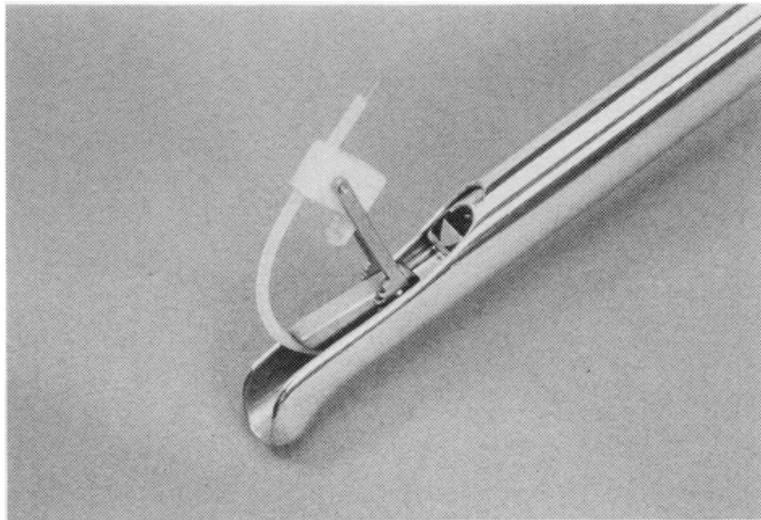


Optischer Gelenkarm / Mikromanipulator-Handstück

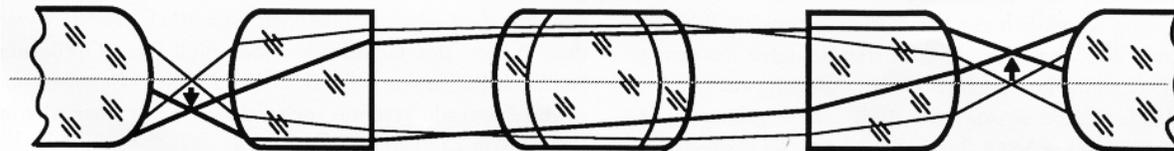


Endoskope

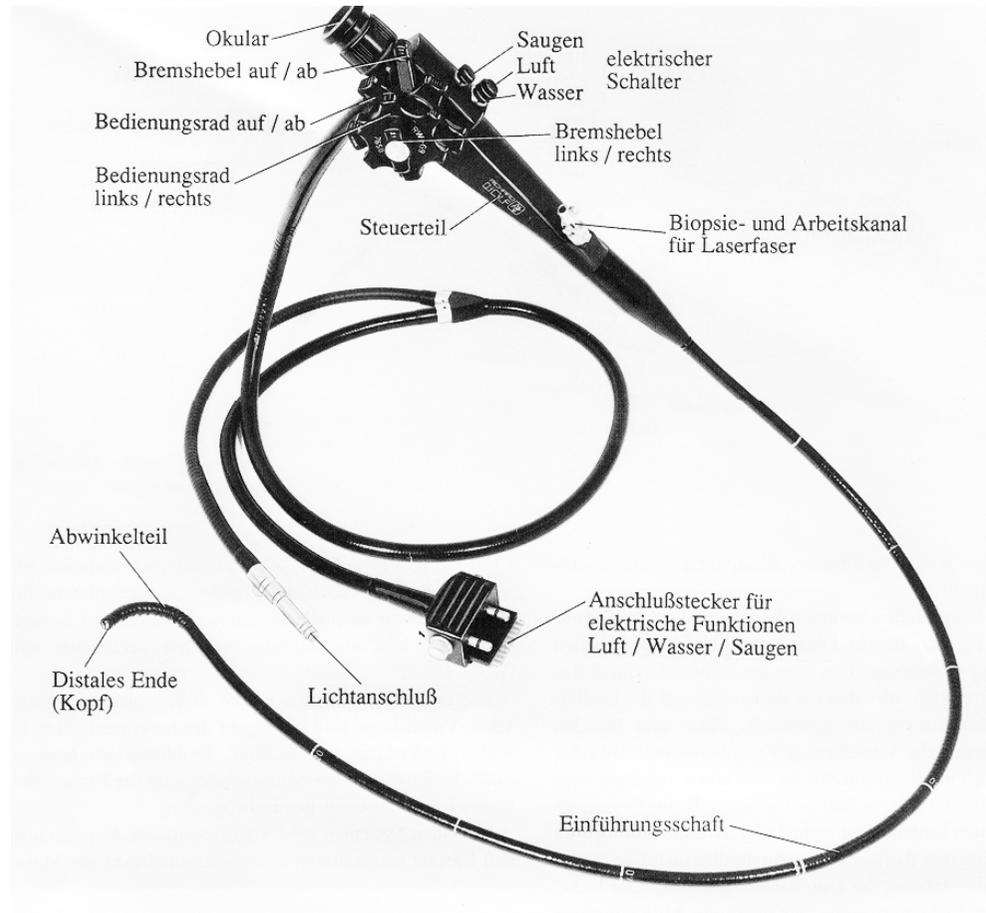
starre Endoskope



Stablinsen Umkehrsystem



Flexible Endoskope



flexible bildübertragende Endoskope

Ausnutzung von Lichtleitern für die Laseranregung

Ausnutzung weiterer Lichtleiter für die optische Detektion

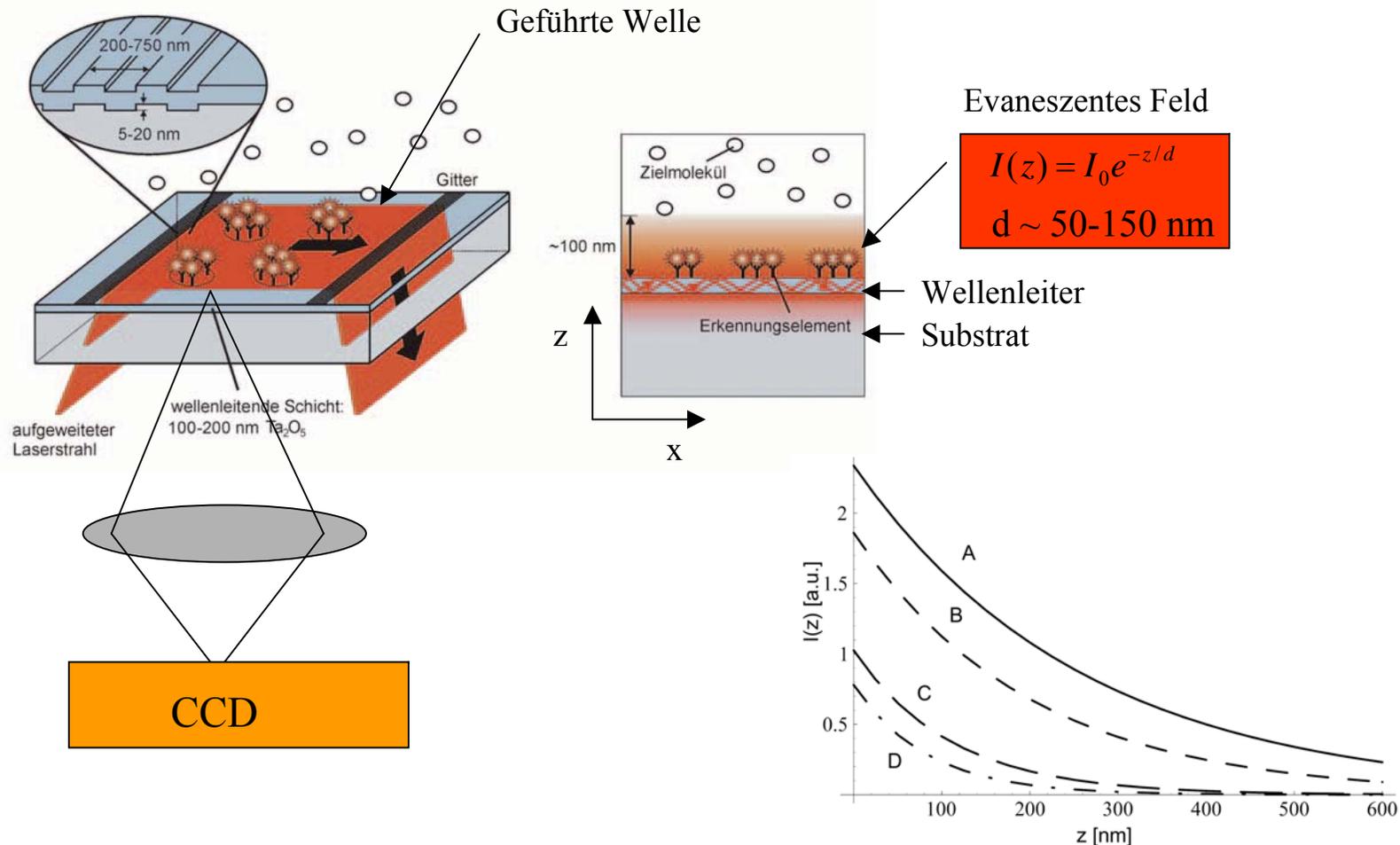
Fiberoptik

bis zu 100000 Einzelfasern (10 - 80 μm Kern, 1 - 2 μm Mantel)

T = 20 - 50%

Evaneszente (gedämpfte) Wellen

Lichteinkopplung in den Wellenleiter über Gitter (integrierte Optik)



Problem:
Streuung an Oberflächenunebenheiten

Evolution of the evanescent wave intensity versus the distance from the interface for different refractive index pairs. A: 1.46/1.33 B: 1.50/1.33 C: 1.7/1.33 D: 1.9/1.33, with $\theta_i=71.6$ degree for all curves.

Optische Komponenten

Objektiv

$$NA = n \sin \alpha$$

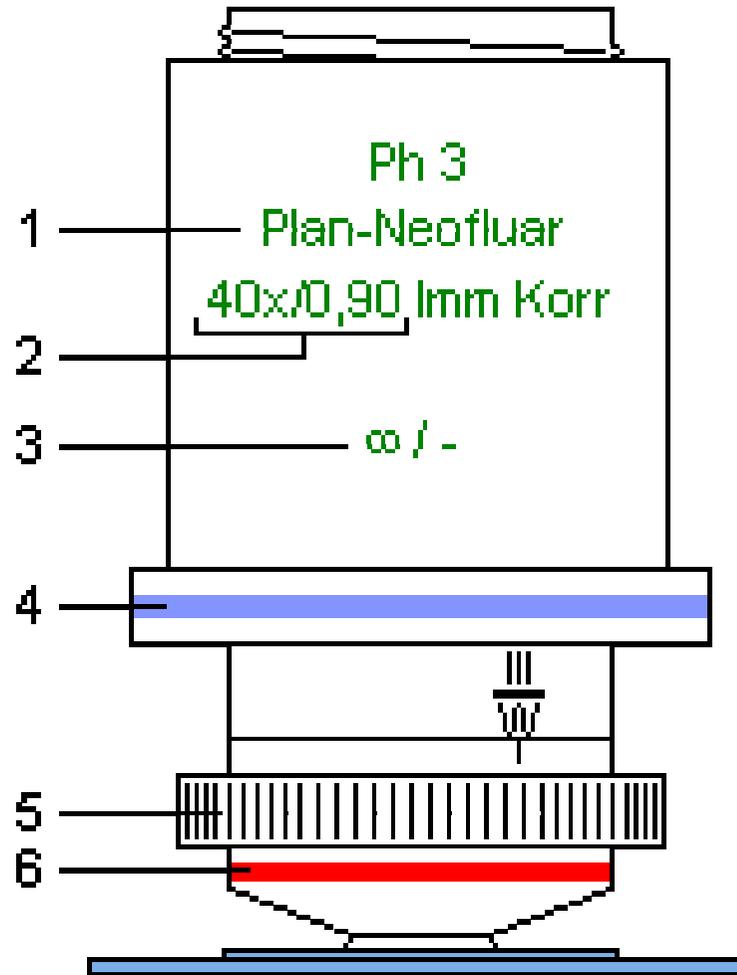
40x, oil, NA = 1.3

oil: 1,518

$\alpha = 58,9^\circ$

Detektion aus 120° möglich

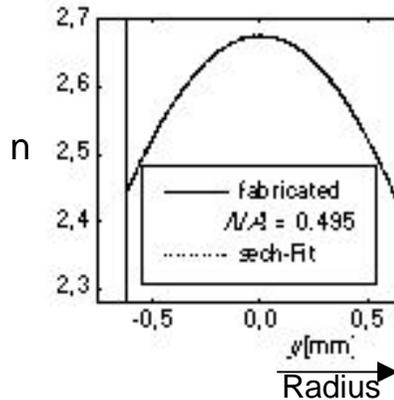
- schwarz: Öl
- weiß: Wasser
- orange: Glycerin
- rot: variabel



GRIN-Linsen

Gradientenindex-Linsen:

Brechungsindex n ist nicht homogen, sondern hat radiale Verteilung:

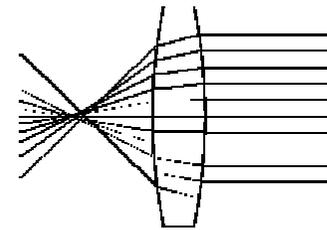


Bsp.: Objektivlinse:

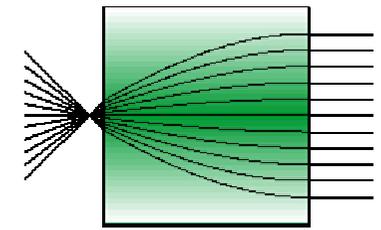
$$n(r) = n_0 \operatorname{sech}(gr)$$

$$P = 2\pi/g$$

g Herstellungsparameter



Strahlengang einer normalen Linse

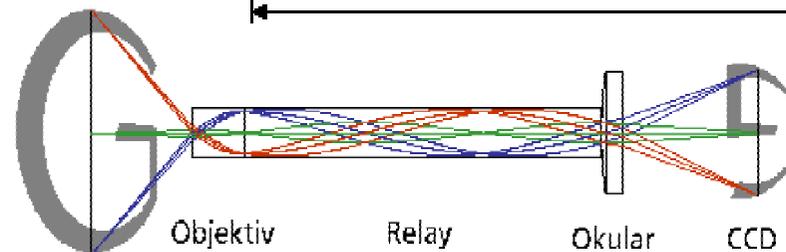
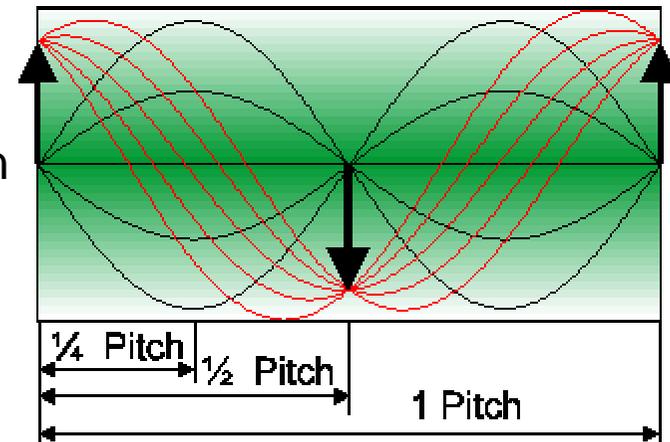


Strahlengang einer GRIN-Linse



Typ. Durchmesser: 0,25-2 mm
 Typ. Längen: 1-4 mm,
 bei Stablinse 1,23-10,33 mm

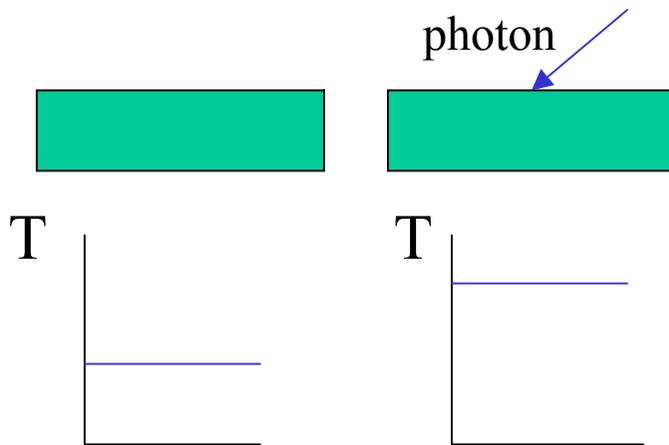
Sinusförmiger Verlauf der Strahlen in langer Linse mit Periodendauer „Pitch“ P



Strahlengang eines GRIN-Endoskopes

3.3. Detektoren

a) Thermische Detektoren



Pyroelektrischer Detektoren
Bolometer
Thermosäule (Thermoelement)
Kalorimeter

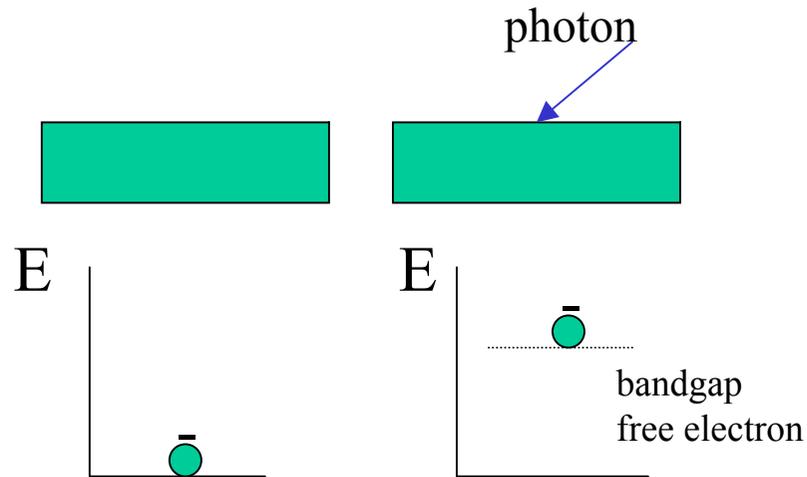
Geringe Sensitivität (high NEP)

Spektral unabhängig

Slow ms response, Ausnahme: pyroel. D.)

Oftmals Ein-Sensor-Element

b) Photonendetektoren



PMT / SEV
Si Photodioden
CCD Kamera
MCP

photoelektrischer Effekt

innerer: Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren (HL, Isolatoren)

äusserer: Erzeugung von freien Elektronen (Export) unter Aufwendung
von Austrittsarbeit ($E_{\text{kin}} = h\nu - A$)

Hohe Sensitivität (single photon counting, low NEP)

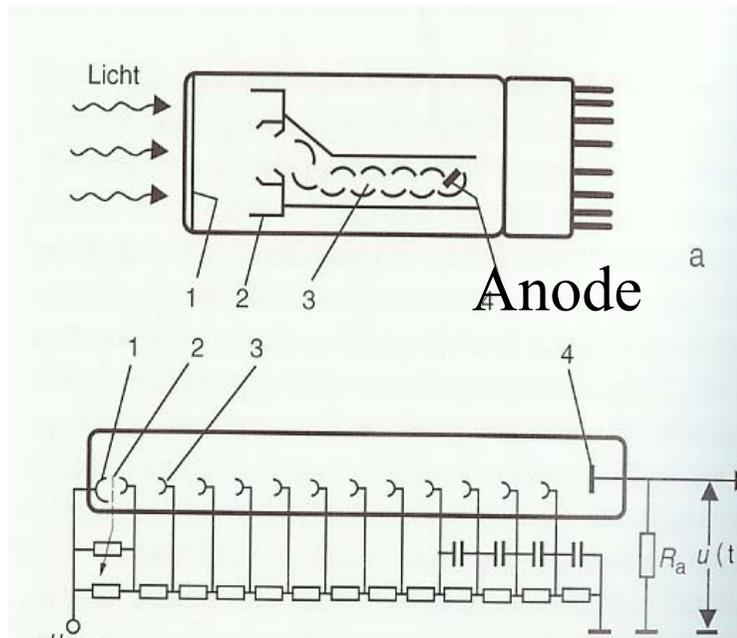
Wellenlängenabhängig

Fast response (Spezial-PMT: <100 ps)

FPA-Technologie (focal plane arrays)

PMT - SEV

photon - electron - electron amplification (internal gain) - current/voltage



- 1 Photokatode
- 2 Fokussierelektrode
- 3 Dynoden

Side on PMT
End on PMT
MCP

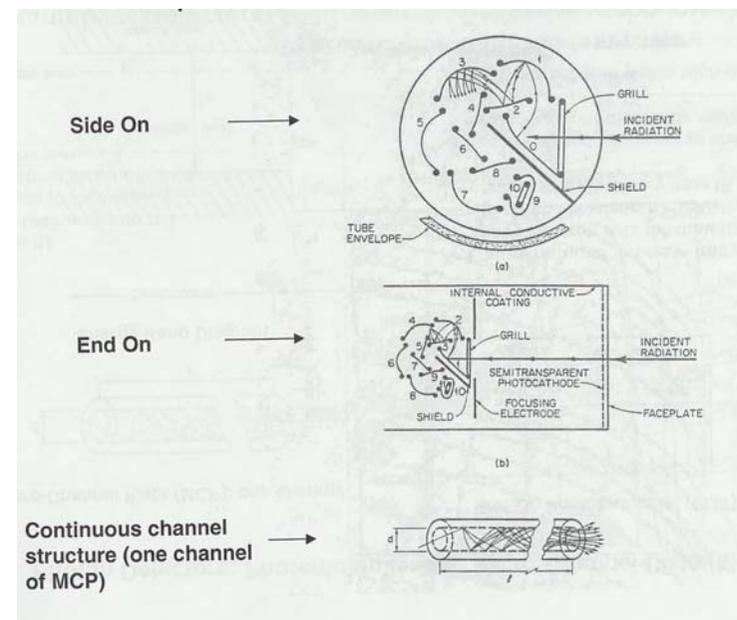
Vakuumphotoempfänger

Photoelektrode (Auslösung Elektronen)

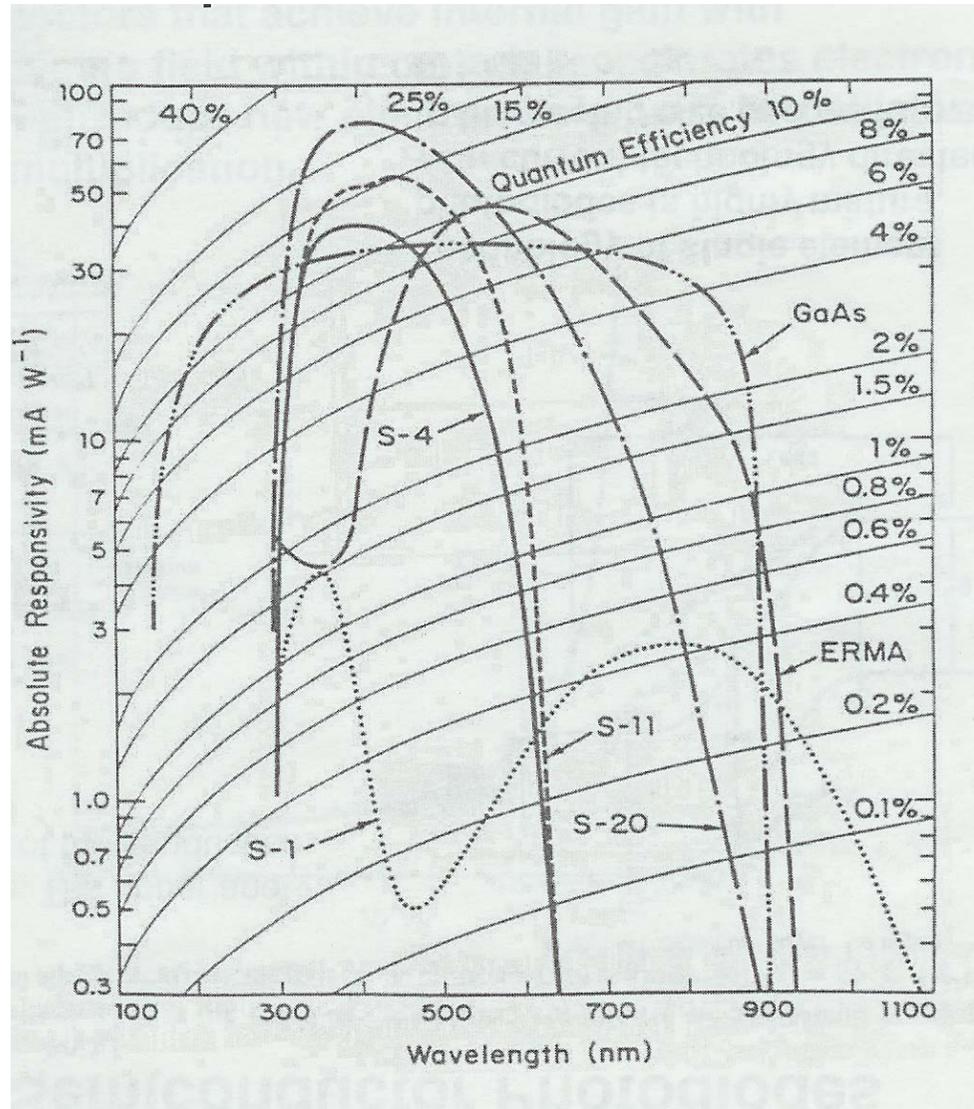
Beschleunigung auf einige 100 eV

Herauslösen von Sekundärelektronen an Dynode
10- 16 Dynoden (Verstärkung 10^4 - 10^6)

1 kV Betriebsspannung



Material der Photokatode bestimmt spektrale Empfindlichkeit



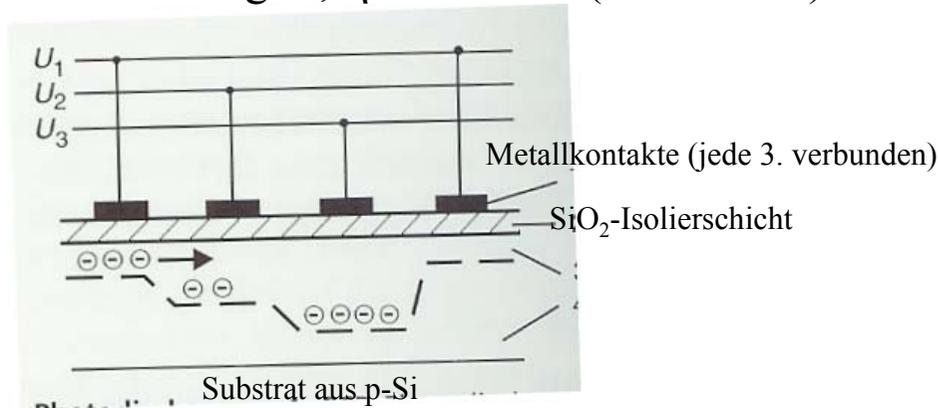
CCD: charge coupled device

CID: charge injection device

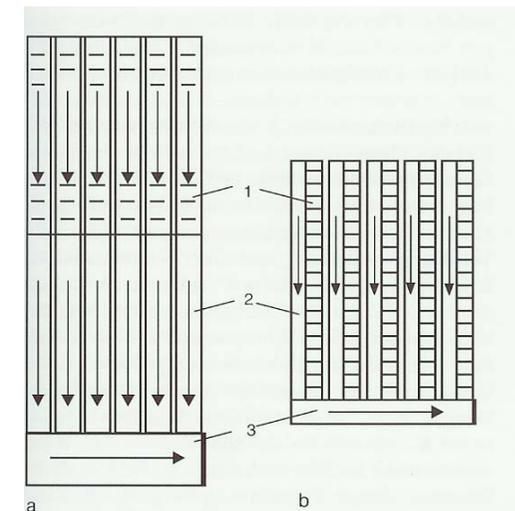
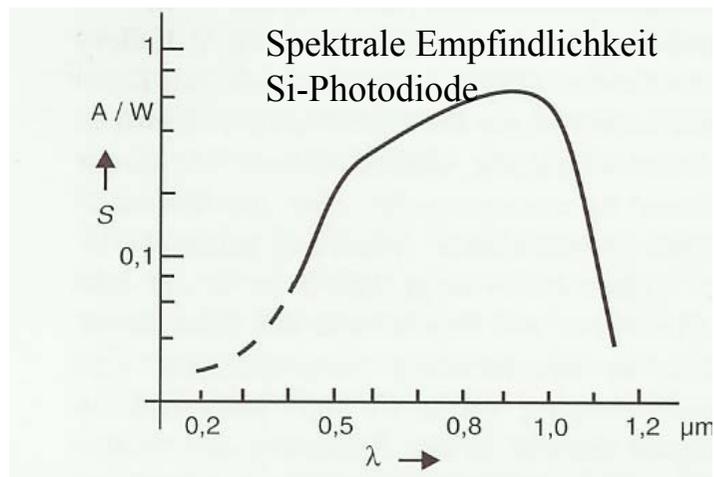
In Matrix (128x128 bis 4096x4096) angeordnete Sensorelemente ($6.5 \times 6.5 \mu\text{m}^2$ - $30 \times 30 \mu\text{m}^2$,
Mittenabstand: 10 - 30 μm) auf vorwiegend Si-Basis (IR: HgCdTe, PbSnTe)

Ladungsträger werden je nach Spannung paketweise verschoben (5 - 20 MHz)

Innere Verstärkung: 1, $\eta = 50-80\%$ (Film: $<1\%$)



2-Megapixel-Sensor
mit Autofokus
für Mobiltelefon



Photodiodenarray 2: Betrieb von CCD-Bildsensoren (Matrizen). a) Bildorganisierter Betrieb (frame transfer), b) Zwischenspaltenbetrieb (interline transfer). 1 Sensorteil, 2 Speicherteil, 3 Ausleseteil.

Detektorparameter

Parameter	Symbol	Definition	Einheit
Quanteneffizienz	η	n_{el}/n_{abs}	-
Spektrale Empfindlichkeit (spectral responsivity)	$R(\lambda)$	$i_{\lambda}/\Phi_{\lambda}$	A/W
Totale Empfindlichkeit (total responsivity)	R	i/Φ	A/W
Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio)	SNR	$i_s/(i_n^2)^{0.5}$	-
Noise equivalent power	NEP(λ)	P(SNR=1)	W
Detectivity	D(λ)	1/NEP(λ)	1/W
Normalized detectivity	D*(λ)	(AB) ^{0.5} /NEP	cmHz ^{0.5} /W

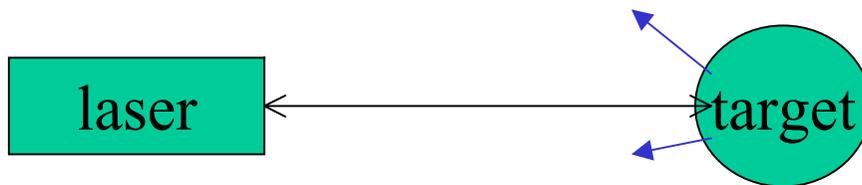
A: detector active area
B: noise bandwidth

Noise:

background photons, dark current, thermal (Johnson), amplifier, 1/f, readout, ...

4. System Design

Radargleichung für erkanntes Objekt
(gesamter Strahl auf Target gerichtet)



$$P_R = P_T \times T_1(\lambda_1) \times \varphi_B / R^2 \times T_2(\lambda_2) \times A_E$$

Power Received Power transmitted transmittance atmosphere target reflectance reradiation receiver active area

Aus welcher Entfernung kann Target maximal erkannt werden?

$$P_R = S_{\min}: R_{\max} = (P_T \times T_1(\lambda_1) \times \varphi_B \times T_2(\lambda_2) \times A_E / S_{\min})^{0.5}$$

z.B. $P_T = 100 \text{ mW}$, $\varphi_B = \pi$, $\lambda = 870 \text{ nm}$, $A_E = 100 \text{ cm}^2 \times \pi/4$, $T = 1$, $B = 10 \text{ MHz}$, $\eta = 1$, $S_{\min} = 10hcB/(\lambda\eta)$
 $R_{\max} = 3.3 \text{ km}$

Example of Passive Sensor System: NASA HIRIS

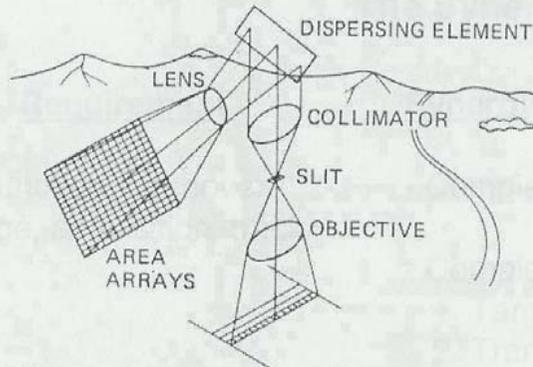


Figure 33. Imaging spectrometer concept using area-array detectors.

Table 10. Optical System Parameters

IFOV	0.036 mrad
Aperture	37.6 cm
Focal ratio	f/3.8
Instrument EFL	142.8 cm
Fore-optics EFL	157.7 cm
Spectrometer	
Collimator EFL	43.0 cm
Camera EFL	40.0 cm
Magnification	0.931
Field-of-view	2.1°



Table 8. HIRIS Functional Parameters

Nominal altitude	824 km
GIFOV	30 m
Swath width	30.0 km
Spectral coverage	0.4–2.5 μm
Average spectral sample interval	
0.4–1 μm	9.4 nm
1–2.5 μm	11.7 nm
Pointing	
Down-track	+ 60°/–30°
Cross-track	+ 24°/–24°
Encoding	12 bits/pixel
Maximum internal data rate	512 Mbits/sec
Maximum output data rate	300 Mbits/sec
Image motion compensation	Gain states of 1 (off), 2, 4, and 8

Table 11. VNIR Detector Parameters

Image format	
Spatial	1,000 pixels
Spectral	128 rows (64 in imaging section, and 64 in storage section)
Pixel size	52 \times 52 μm
Full well capacity (FWC)	
Parallel	2.5×10^6 electrons
Serial register	5×10^6 electrons
Quantum efficiency	>40%, 400–800 nm; >20%, 800–900 nm; >10%, 900–1,000 nm
Readout noise	<300 electrons rms
Linearity	<1% departure from linearity up to 90% of FWC
Resolution	MTF response >42% at the Nyquist frequency
Dark current	Negligible
Vertical transfer rate	>1 Mpixels/sec

Note: Detector parameters are expressed in terms of electrons of signal (or noise). The quantum efficiency is the ratio of the number of electrons of signal to the number of input photons to the detector.