

# Lasertechnik VL-12

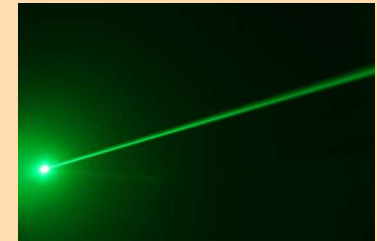
05.07.2023

**Mechatronik 4.tes Semester**

**Vorlesung Sommersemester 2023**

**VL: Prof. Dr. Thomas Hebert ([thebert@fb2.fra-uas.de](mailto:thebert@fb2.fra-uas.de))**

**Labor: Hans-Peter Tögel, Lutz Zimmermann, Prof. Kurt Jansen**



**Fachbereich 2** Informatik und Ingenieurwissenschaften

hu

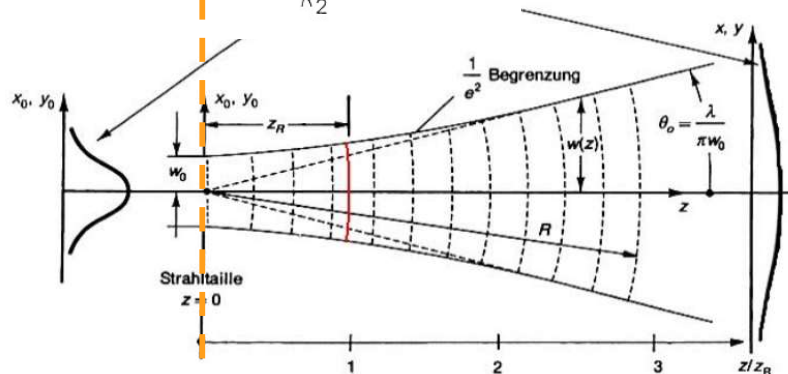
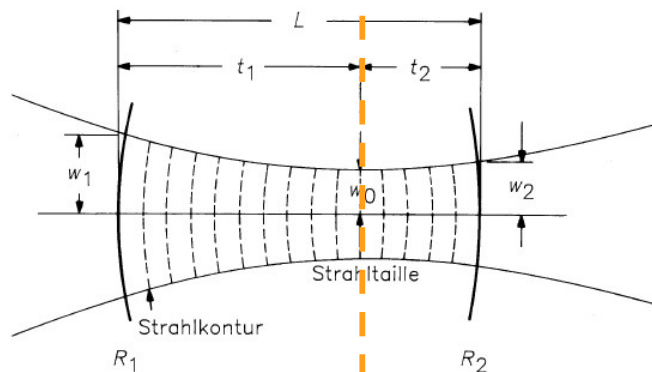
# Divergenz des Laserstrahls

# Für Gauss'sche Strahlen innerhalb und außerhalb des Resonators kann man folgende Gleichungen ableiten

Abkürzung: Resonator Parameter  $g_{1,2} = 1 - \frac{L}{R_{1,2}}$

mit L = Spiegelabstand

$R_1, R_2$  = Krümmungsradien der Spiegel 1,2



## Formeln für die Strahlgeometrie im Gauß-Mode

Strahltaille:  $w_0 = \left( \frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left( \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} \right)^{1/4}$

Strahlradien: (definiert durch Intensitätsabfall auf  $1/e^2$ )

$$w_1 = \left( \frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left( \frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{1}{1 - g_1 g_2} \right)^{1/4}$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \cdot w_1$$

Taillenlage:  $t_1 = \frac{g_2 (1 - g_1) L}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2}$ ,  $t_2 = L - t_1$

Divergenzwinkel:  $\Theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$ ,  $tg(\Theta) = \frac{\Delta R}{s}$

Rayleighlänge:  $z_r = \frac{w_0^2 \cdot \pi}{\lambda}$

Def.  $z_R$ :  
Strahlradius Faktor  
 $\sqrt{2}$  größer als  $w_0$

Strahlaufweitung:  $w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_r^2}}$

## Dimensionen des Laserstrahls in großer Entfernung

Divergenz  $\theta$ , Tailenradius  $w_0$  und Maßzahl  $M$  eines Laserstrahls werden oft als technische Daten eines Lasers genannt

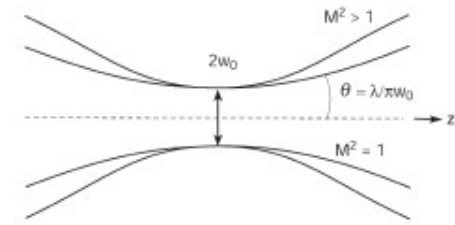
Divergenzwinkel eines Laserstrahls im  $TEM_{00}$  ist gegeben durch:

$$\theta = \frac{M^2 \lambda}{\pi * w_0}$$

Oft auch als SPP (Strahlparameterprodukt) angegeben:

$$SPP = \theta w_0 = \frac{M^2 \lambda}{\pi}$$

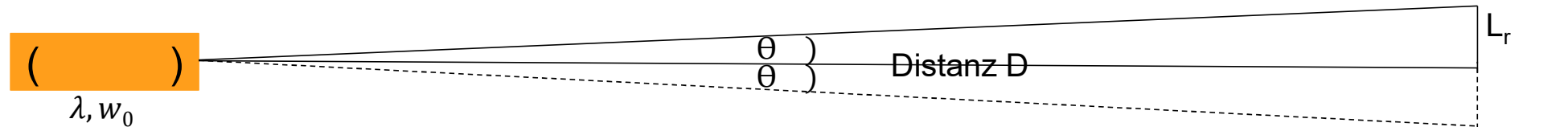
$M^2$  ist die sog. Beugungsmaßzahl.  $M^2 = 1$  für reinen  $TEM_{00}$  und  $M^2 > 1$  für nicht ganz ideale  $TEM_{00}$  Strahlen



Beispiel: (mit  $M = 1$ )

HeNe Laser:  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $w_0 = 0,3 \text{ mm}$ ,  $TEM_{00}$

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi * w_0} = 632,8 * 10^{-9} \text{ m} / (3,14 * 3 * 10^{-4} \text{ m}) = 6,7 * 10^{-4} \text{ rad}$$



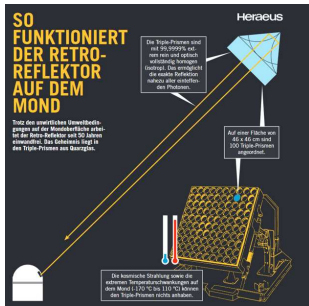
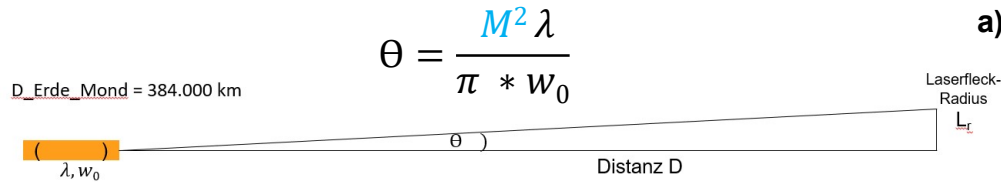
Wie groß ist der Laserfleck eines HeNe Lasers in der Distanz  $D = 500 \text{ m}$  ?

$$L_r = D * \tan \theta \sim D * \theta = 500 \text{ m} * 6,7 * 10^{-4} = 0,33 \text{ m}$$

$$\text{Durchmesser des Laserflecks} = 2 * L_r = 66 \text{ cm}$$

mit  $\tan \theta \sim \theta$  für kleine Winkel

# Erde-Mond-Erde



Annahme:  $M^2 = 1$

$D_{\text{Erde\_Mond}} = 384.000 \text{ km}$

$\lambda = 532 \text{ nm}$

$w_0 = 1 \text{ mm}$

- $2 L_r = ??$  (Strahldurchmesser auf dem Mond)?
- Wieviele Photonen treffen auf den Reflektor ( $40 \times 40 \text{ cm}^2$ ), Pulsenergie  $150 \text{ mJ}$ ?
- Wieviele reflektierte Photonen kommen zurück und treffen auf den Detektor auf der Erde (Fläche  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ )?
- Was kann man tun um mehr Photonen zu erhalten?

## a) Divergenzwinkel ausrechnen

$$\theta = \frac{M^2 \lambda}{\pi * w_0} = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m} / (3.14 * 0,001 \text{ m}) = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

Laserfleck Radius auf dem Mond bestimmen

$$L_r = D_{\text{erde\_mond}} * \tan \theta \sim D_{\text{erde\_mond}} * \theta \sim 65 \text{ km}$$

Durchmesser  $D_r = 2 L_r \sim 130 \text{ km}$

## c) Anzahl Photonen eines Pulses bestimmen

$$N_{\text{Phot}} = E_{\text{Puls}} / E_{\text{Phot}}$$

$$E_{\text{Puls}} = 150 \text{ mJ}$$

$$E_{\text{Phot}} = h * c / \lambda = 6,62 * 10^{-34} \text{ Js} * 2,998 * 10^8 \text{ m/s} / 532 * 10^{-9} \text{ m} = 3,73 * 10^{-19} \text{ J}$$

$$N_{\text{Phot}} = 150 \cdot 10^{-3} / 3,73 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,02 * 10^{17} \text{ Photonen pro Puls}$$

## Wieviele Photonen treffen den Reflektor auf dem Mond?

$$N_{\text{Refl}} = N_{\text{Phot}} * A_{\text{Refl}} / A_{\text{Laser}}$$

$$A_{\text{Refl}} = 0,4 * 0,4 \text{ m}^2 = 0,16 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Laser}} = \pi * L_r^2 = 3,14 * 65000 * 65000 \text{ m}^2 = 1,33 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$$

$$N_{\text{Refl}} \sim 4,84 * 10^6 \text{ Photonen / Puls}$$

## d) Wieviele zurückreflektierte Photonen misst der Detektor auf der Erde??

Annahme: Strahldivergenz  $\theta$  für Hin- und Rückweg gleich

$$A_{\text{detektor}} = 4 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$N_{\text{Detektor}} = N_{\text{Phot}} * A_{\text{Reflektor}} / A_{\text{Laser}} * A_{\text{Detektor}} / A_{\text{Laser}} =$$

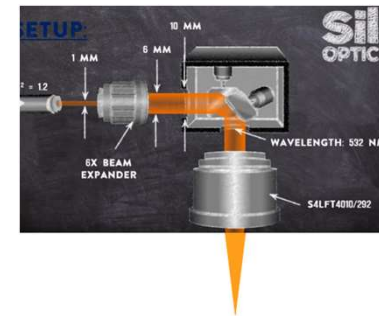
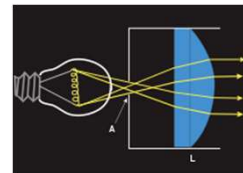
$$4,02 * 10^{17} * 0,16 \text{ m}^2 / 1,33 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 * 4 * 10^{-4} \text{ m}^2 / 1,33 \cdot 10^{10}$$

$$\sim 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ pro Puls} \rightarrow \text{So praktisch nicht messbar}$$

# Abbildungen mit Linsen/Linsensystemen

## Ziele

- Kleinen Fokus erzeugen
- Strahlaufweitung (Divergenz verringern)
- Kollimator (einen stark divergenten Strahl parallel machen)



# Gauss Strahl und Linsen I

Laser- bzw. Gauss-Strahlen können mit Linsen (und/oder Hohlspiegeln;  $f = R/2$ ) abgebildet werden.

Startpunkt: klassische Linsengleichungen:  $\frac{1}{a} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{f}$ ;  $\beta = B/G = a'/a$

$f$  = Brennweite,  $a$  = Gegenstandsweite,  $a'$  = Bildweite,  $B$  = Bildgröße,  $G$  = Gegenstandsgröße,  $\beta$  = Abbildungsverhältnis

Theoretische Herleitung: Kugelwelle mit imaginärem Ursprung

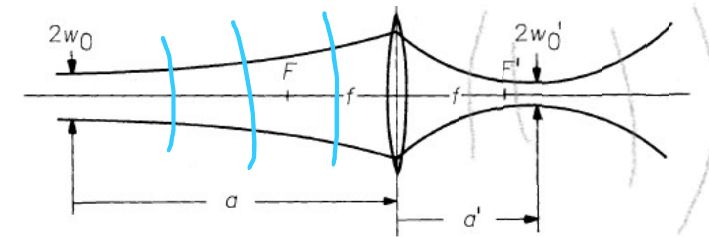
Komplexe Strahlparameter:  $q_1 = a + i z_R$   
 $q_2 = a' + i z'_R$

Liefert „Linsengleichungen für Gauss Strahlen“:

$$a' = -f + \frac{f^2(f - a)}{(f - a)^2 + z_R^2} \quad \text{und} \quad (12.33)$$

$$w'_0/w_0 = f / \sqrt{(a - f)^2 + z_R^2}, \quad \text{mit} \quad z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (12.34)$$

Quelle: Eichler, Kap 12.3.3



Sonderfall:  $a = f$

Aus 12.33:  $a' = -f$

Aus 12.34:  $\frac{w'_0}{w_0} = \frac{f}{z_R} = \frac{f \lambda}{\pi w_0^2}$

## Gauss-Strahl und Linsen II

Es ergibt sich für die Strahltaile hinter der Linse:

$$w'_0 = \frac{\lambda f}{\pi w_0}$$

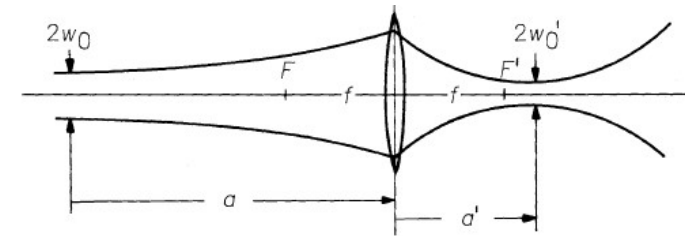
**Fokus  $w'_0$  wird kleiner wenn:**

1. „ $\lambda$  kleiner“
  - Ggf. durch Laserauswahl, Freq. Verdopplung (Stichwort: BlueRay Disc)
2. „ $f$  kleiner“
  - Kompromiss nötig:  $f$  darf nicht zu klein werden, da sonst Abbildungsfehler zu stark in Erscheinung treten
3. „ $w_0$  größer“
  - Kann durch Strahlaufweitung mit vorgeschalteter Linse/Objektiv erreicht werden

Es gibt auch weitere Limits, z.B. sollte stets  $D > 2w_0$  erfüllt sein, um den Strahl nicht beschneiden

- ➔ Kleinst möglicher Laserfokus:

$$w_{0\min} > \frac{2f\lambda}{\pi D}$$



Quelle: Eichler, Kap 12.3.3

$w_0$	1,00E-03 m
$\lambda$	5,32E-07 m
$f$	1,00E-01 m
$w'_0$	1,69E-05 m

Wichtige Grenzgröße, z.B. in der Materialbearbeitung.



# In der Praxis werden noch Faktoren für Strahlqualität und Strahlbegrenzungen berücksichtigt: $M^2$ und APO Faktor

**FORMULA:**

**Sill OPTICS**

WAVELENGTH      FOCAL LENGTH      APODISATION FACTOR       $M^2$  VALUE OF THE LASER

$$d_f = \frac{\lambda \cdot f \cdot APO \cdot M^2}{d_L}$$

MIN. FOCAL SPOT DIAMETER      ENTRANCE BEAM DIAMETER

**SETUP:**

**Sill OPTICS**

$M^2 = 1.2$

1 MM      6 MM      10 MM

6X BEAM EXPANDER

WAVELENGTH: 532 NM

S4LFT4010/292

Quelle:  
<https://www.silloptics.de/produkte/sill-technikon/optische-verguetungen>

**$M^2$ :**  
 Divergenzfaktor zur Berücksichtigung von Abweichungen vom idealen Gauss Strahl

**Apodisationsfaktor (APO):**  
 berücksichtigt die Beschneidung des Laserstrahls durch Abmessung der Linse/des Objektivs

Lambda	5,32E-07 m	df = Lambda * f * APO * M2 / dL =	1,42E-05 m
APO	1,33		= 14,2 mue
M2	1,2		
dL	6,00E-03 m		
f	1,00E-01 m		

## Geringere Divergenzwinkel durch Strahlaufweitung

Mit Hilfe eines Kepler Fernrohrs (2x Linsensystem) kann ein Laserstrahl aufgeweitet und damit seine Divergenz verkleinert werden.

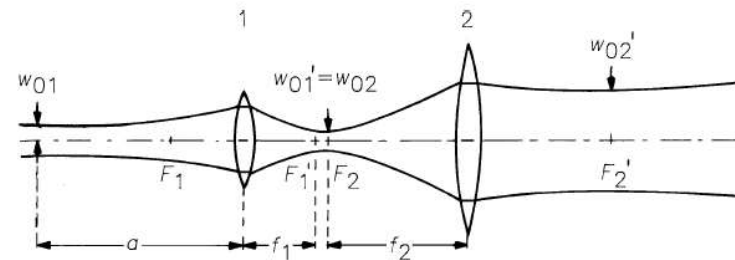


Abb. 12.8 Strahlaufweiter für Gauß-Strahlen

$$w'_{02} = w_{01} \frac{f_2}{f_1} \quad \text{für } a = f_1.$$

$$f_2 > f_1$$

$w'_{02} > w_{01}$   
Strahl „dicker“



Über große Distanzen kommen mehr Photonen pro Fläche am Ziel an.

Für die Divergenzwinkel der Strahlung vor und nach der Aufweitung gilt da

$$\theta_2 = \theta_1 \frac{f_1}{f_2},$$

$\theta_2 < \theta_1$   
Strahl „paralleler“

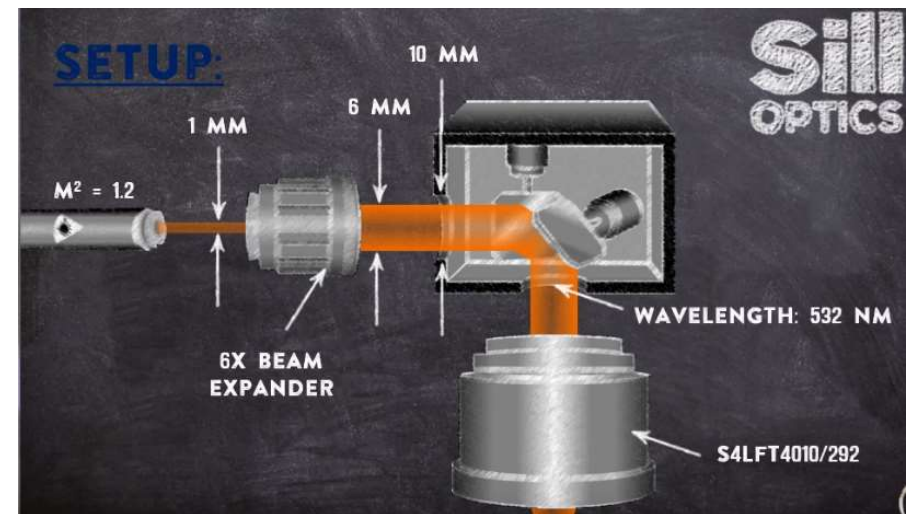
d. h. die Divergenz wird durch die Aufweitung verkleinert.

Eichler\_1\_2015\_Book\_Eichl  
er\_Laser\_Bauformen-  
Strahlführung-Anwendungen

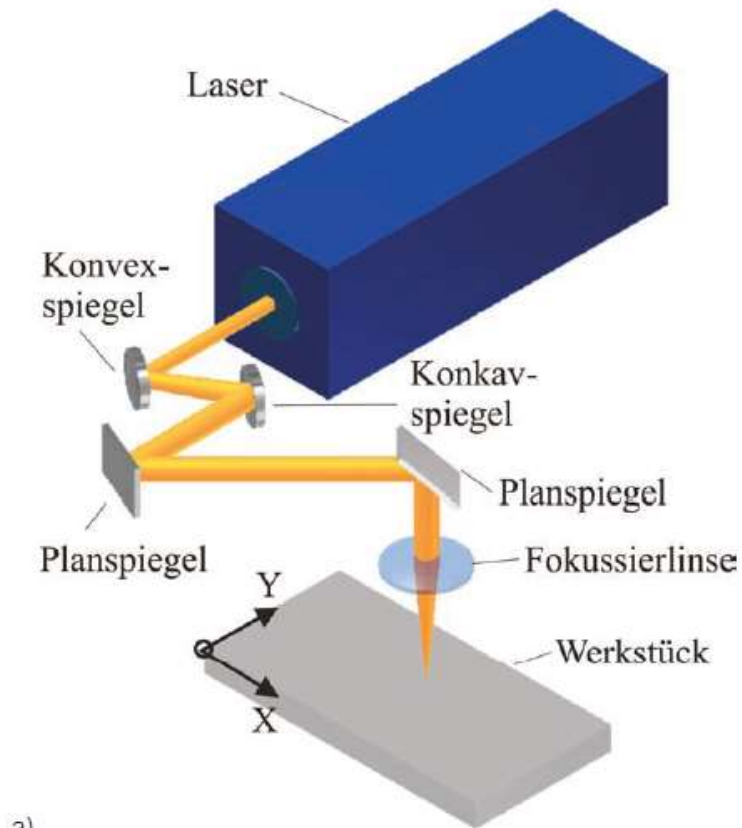
## Fazit:

Strahlaufweitung wird für viele optische Abbildungen eingesetzt:

1. Kleinerer Fokus bei Abbildung mit weiteren Linsen möglich
2. Strahldivergenz kann reduziert werden (Strahl weitet sich weniger auf)

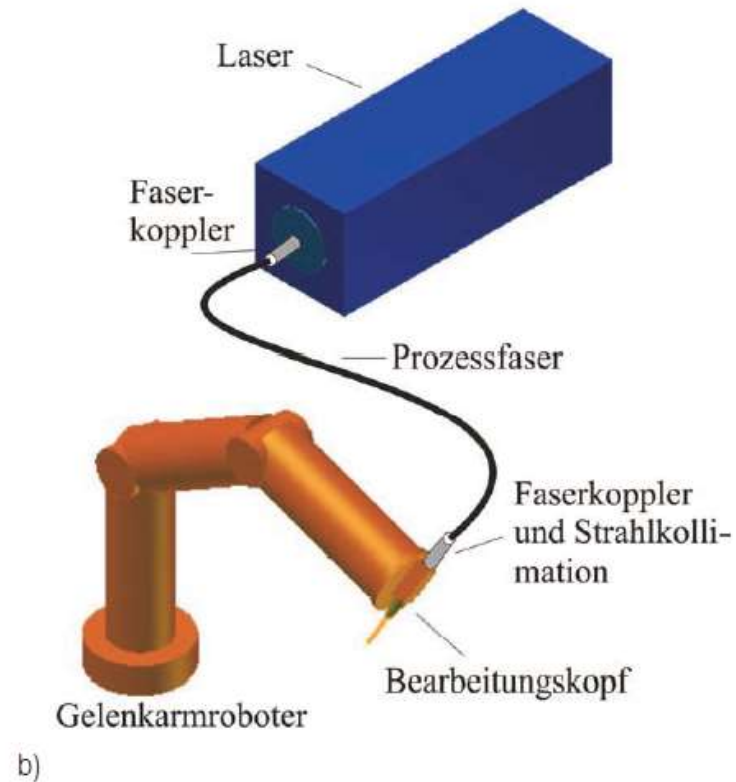


# Typische Setups für Materialbearbeitung



a)

Quelle:  
Blietner\_Laser\_Ma-  
terialbearbeitung

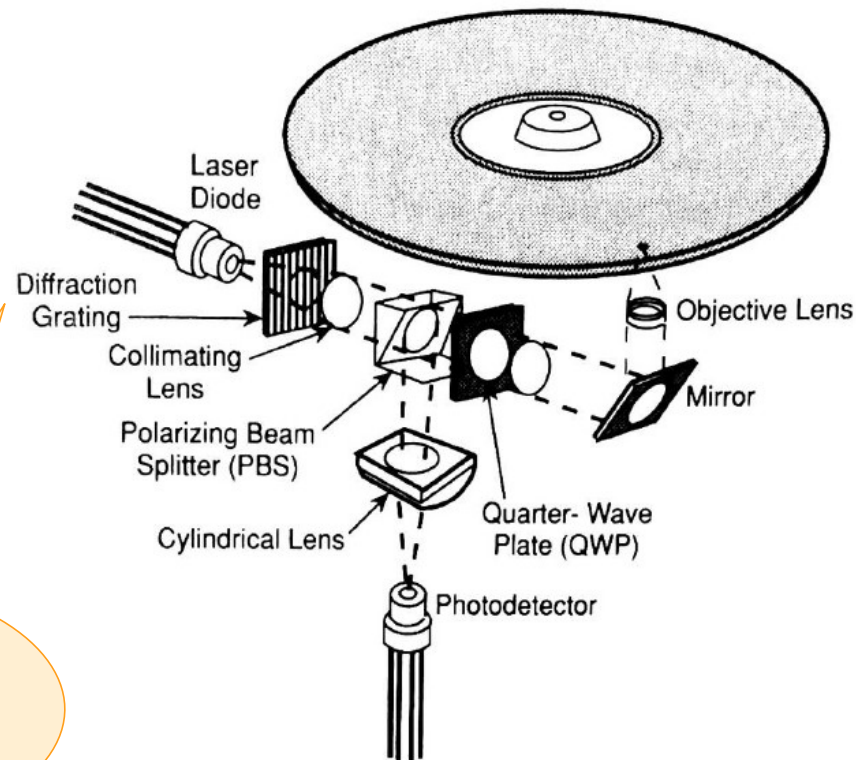


b)

**Bild 6.14** Grundanordnungen der Strahlübertragung.  
a) mit Spiegelanordnung, b) mit Prozessfaser

# Typischer Setup für CD / DVD Laufwerke

Quelle: Advanced  
Digital Audio, Ken  
C. Pohlmann,  
SAMS, 1991



0.te Beugungsordnung ist  
der Hauptstrahl zum Lesen  
und Schreiben der Daten

1te Beugungsordnung wird  
für das Spur-Tracking  
verwendet

**Figure 8.** The compact disc three-beam optical system.

## BluRay Disc:

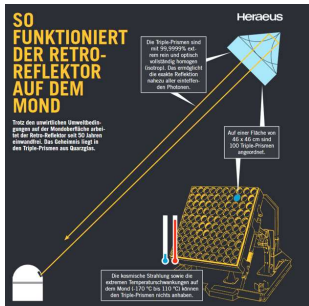
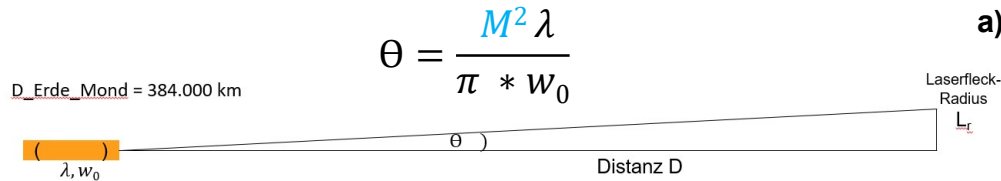
- $\lambda \sim 400\text{nm}$  anstatt  $800\text{nm}$
- $w_0$  reduziert sich auf 50% (bei gleicher Linse und Geometrie)
- Fläche Laserspot auf Disc dann nur 25%
- → Speicherkapazität x4 höher

$$w_{0\min} > \frac{2f\lambda}{\pi D}$$

## Kapazitäten CD/DVD (ca. Angaben)

- CD: 700 MB Platz
- Single Layer DVD: 4,7 GB
- Dual Layer DVD: 8,5 GB
- BluRay Disc
  - 25 GB (Single Layer),
  - 50 GB (Dual Layer)
  - 100 GB / 128 GB (3 bzw. 4 Layer)

# Erde-Mond-Erde



Annahme:  $M^2 = 1$

$D_{\text{Erde\_Mond}} = 384.000 \text{ km}$

$\lambda = 532 \text{ nm}$

$w_0 = 1 \text{ mm}$

- $2 L_r = ??$  (Strahldurchmesser auf dem Mond)?
- Wieviele Photonen treffen auf den Reflektor ( $40 \times 40 \text{ cm}^2$ ), **Pulsenergie 150mJ?**
- Wieviele reflektierte Photonen kommen zurück und treffen auf den Detektor auf der Erde (Fläche  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ )?
- Was kann man tun um mehr Photonen zu erhalten?

## a) Divergenzwinkel ausrechnen

$$\theta = \frac{M^2 \lambda}{\pi * w_0} = 532 \cdot 10^{-9} \text{ m} / (3.14 * 0,001 \text{ m}) = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$$

Laserfleck Radius auf dem Mond bestimmen

$$L_r = D_{\text{erde\_mond}} * \tan \theta \sim D_{\text{erde\_mond}} * \theta \sim 65 \text{ km}$$

Durchmesser  $D_r = 2 L_r \sim 130 \text{ km}$

## c) Anzahl Photonen eines Pulses bestimmen

$$N_{\text{Phot}} = E_{\text{Puls}} / E_{\text{Phot}}$$

$$E_{\text{Puls}} = 150 \text{ mJ}$$

$$E_{\text{Phot}} = h * c / \lambda = 6,62 * 10^{-34} \text{ Js} * 2,998 * 10^8 \text{ m/s} / 532 * 10^{-9} \text{ m} = 3,73 * 10^{-19} \text{ J}$$

$$N_{\text{Phot}} = 150 \cdot 10^{-3} / 3,73 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,02 * 10^{17} \text{ Photonen pro Puls}$$

## Wieviele Photonen treffen den Reflektor auf dem Mond?

$$N_{\text{Refl}} = N_{\text{Phot}} * A_{\text{Refl}} / A_{\text{Laser}}$$

$$A_{\text{Refl}} = 0,4 * 0,4 \text{ m}^2 = 0,16 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Laser}} = \pi * L_r^2 = 3,14 * 65000 * 65000 \text{ m}^2 = 1,33 \cdot 10^{10} \text{ m}^2$$

$$N_{\text{Refl}} \sim 4,84 * 10^6 \text{ Photonen / Puls}$$

## d) Wieviele zurückreflektierte Photonen misst der Detektor auf der Erde??

Annahme: Strahldivergenz  $\theta$  für Hin- und Rückweg gleich

$$A_{\text{detektor}} = 4 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$N_{\text{Detektor}} = N_{\text{Phot}} * A_{\text{Reflektor}} / A_{\text{Laser}} * A_{\text{Detektor}} / A_{\text{Laser}} =$$

$$4,02 * 10^{17} * 0,16 \text{ m}^2 / 1,33 \cdot 10^{10} \text{ m}^2 * 4 * 10^{-4} \text{ m}^2 / 1,33 \cdot 10^{10}$$

$$\sim 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ pro Puls} \rightarrow \text{So praktisch nicht messbar}$$

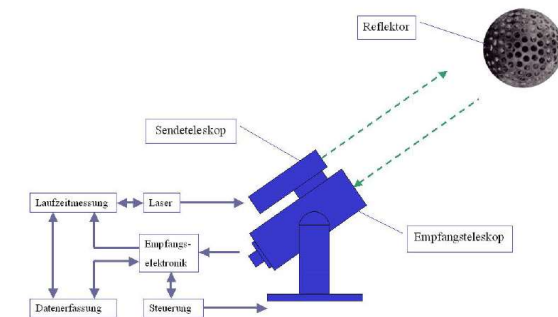


# Unser Beispiel mit Strahlaufweitung auf R=75mm

<b>Divergenz</b>									
	$\text{PHI} * w_0 = M^2 * \text{Lambda} / \text{Pi}$	$\text{Lambda} =$	532 nm =	5,32E-07 m					
		$w_0 =$	75 mm =	7,50E-02 m					
		$M^2$	1						
		$\text{PHI} = M^2 * \text{Lambda} / (\text{Pi} * w_0) =$		2,26E-06 rad					
<b>Strahlfleck in Entfernung D</b>									
	$\text{RMond} = \text{Dist} * \tan(\text{PHI}) \sim \text{Dist} * \text{PHI}$		$\text{Dist\_ErdeMond} =$	3,84E+08 m					
			$\text{RMond} =$	8,67E+02 m bzw.	1 km				
			$\text{A\_LaserMond} =$	2,36E+06 m**2					
<b>Laserleistung</b>									
	Pulsdauer	75 ps	7,50E-11 s	$\text{E\_Photon} = h * f = h*c/\text{Lambda} =$	3,73E-19 J				
	Pulsenergie	150 mJ	1,50E-01 J	$\text{E\_Puls} =$	1,50E-01 J				
	Leistung /Puls		2,00E+09 W	$\text{N\_Phot} = \text{E\_Puls} / \text{E\_Photon} =$	4,02E+17				
	Pulsrate	2 Hz							
	Average Leistung	3,00E-01 W	300 mW						
<b>Reflektor</b>									
	$\text{A\_Reflekt} = a^2$								
	$a =$	0,4 m							
	Anteil der reflektierenden Fläche		1						
	$\text{Fläche\_Reflektor} =$	0,16 m**2							
	$\text{A\_LaserMond} =$	2,36E+06 m**2							
				$\text{N\_Refl} = \text{N\_Phot} * \text{A\_Reflekt} / \text{A\_LaserMond}$	2,72E+10				
<b>Rückweg</b>									
	$\text{A\_LaserMond} =$			9,45E+06 m**2					
	Detektor Durchmesser =		0,02 m => Fläche =						
	$\text{A\_Detektor} =$		4,00E-04 m**2						
	Annahme Strahlaufweitung auf Rückweg gleich wie Hinweg								
	Aber: es zählen nur die Photonen, die Detektor getroffen haben								
<b>Photonen auf Detektor</b>									
				$\text{Photonen auf Detektor} = \text{N\_Phot} * \text{A\_Reflekt}/\text{A\_LaserMond} * \text{A\_Detektor} / \text{A\_LaserMond}$	4,61E+00				

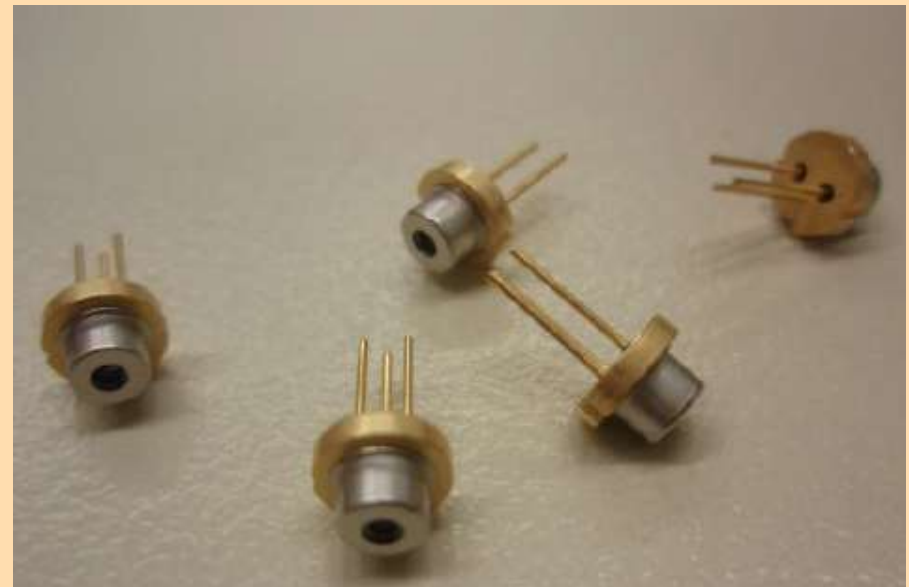
Laufzeitmessung

Detektorfassung



Quelle:  
Ein lasergestütztes  
Messsystem zur  
Entfernungsbestimmung von  
Mond und Satelliten  
nach dem Puls-Echo-  
Verfahren, Manuel Kremer,  
Fachhochschule Gießen-  
Friedberg, 2004

# Halbleiterlaser Bzw. Diodenlaser





# Diodenlaser sind heutzutage ein verbreitetes Standardprodukt

1 - 30 von 620 Ergebnissen Beste Ergebnisse ▼

---

**IMM Photonics Laserdiode Rot 655 nm 5 mW QL65D5SA**

★★★★★ (2)





Abb. ähnlich

Bestell-Nr.: 187540 - 62 Hst.-Teile-Nr.: DL-3147-011 EAN: 4016138139075

Conrad Electronic SE 

8,01 €  
inkl. MwSt., zzgl. Versand

Nur solange der Vorrat reicht (15 Stück)  
Lieferung: 06.07. bis 08.07.2021


+ Weitere Produktinfos

1 Stück


---

**Laser Components Laserdiode Rot 635 nm 5 mW ADL-63054TL**

★★★★★ (0)



Bestell-Nr.: 1782886 - 62 Hst.-Teile-Nr.: 2008351 EAN: 2050005638966

Conrad Electronic SE 

9,31 €  
inkl. MwSt., zzgl. Versand


Online verfügbar (8 Stück)  
Lieferung: 06.07. bis 08.07.2021

1 Stück


---

**Laser Components Laserdiode Rot 650 nm 7 mW ADL-65075TA4**

★★★★★ (0)



Bestell-Nr.: 1782888 - 62 Hst.-Teile-Nr.: 3024138 EAN: 2050005638980

Conrad Electronic SE 

3,72 €  
inkl. MwSt., zzgl. Versand

Online verfügbar (105 Stück)  
Lieferung: 06.07. bis 08.07.2021

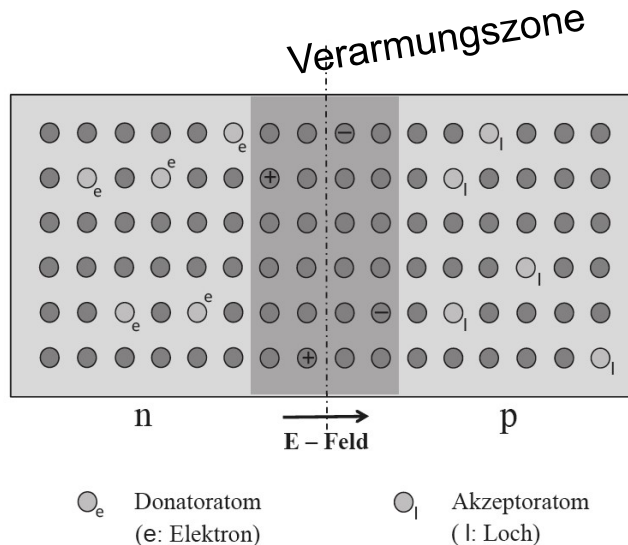
Modelle mit höherer Leistung  
und anderen Wellenlängen  
verfügbar

Preisrange 3€ - >1000€

<https://www.conrad.de/de/search.html?search=diodenlaser>

# Elektronische Bauelemente (Dioden, Transistoren) basieren auf dem pn-Übergang

DOHL\_LAS2015:  
Lasertechnik, R.  
Dohlus, 2015 De  
Gruyter, e-ISBN  
(PDF) 978-3-11-  
035140-8

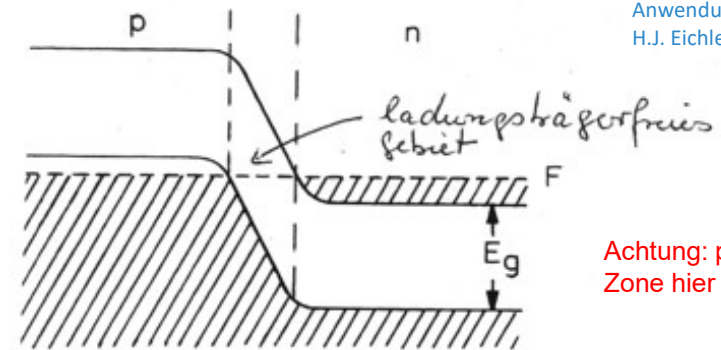


In der Grenzschicht können sich Elektronen aus dem n-Bereich mit Löchern aus dem p-Bereich ausgleichen.

Im grauen Bereich entsteht eine Verarmungszone (arm an Elektronen und Löchern)

Zwischen den Grenzen der Verarmungsschicht bildet sich ein E-Feld

p-n-Übergang ohne angelegte Spannung



EICH\_LAS2015: Laser –  
Baupformen,  
Strahlführung,  
Anwendungen, J. Eichler,  
H.J. Eichler

Achtung: p- und n-  
Zone hier vertauscht

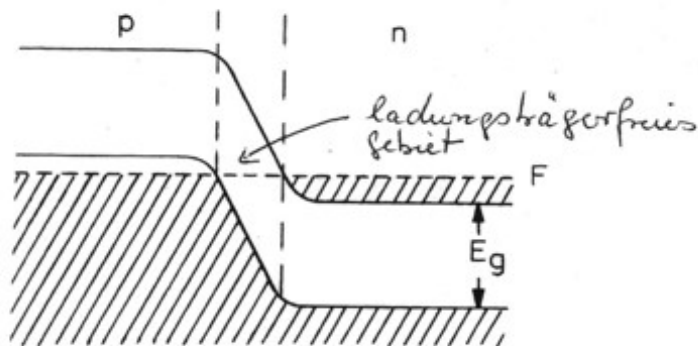
Hier der pn-Übergang im Bändermodell dargestellt.

Das E-Feld führt zur „Verbiegung“ der Bänder

Die Verarmungszone (linkes Bild) ist hier als „Ladungsträgerfreies Gebiet“ markiert.

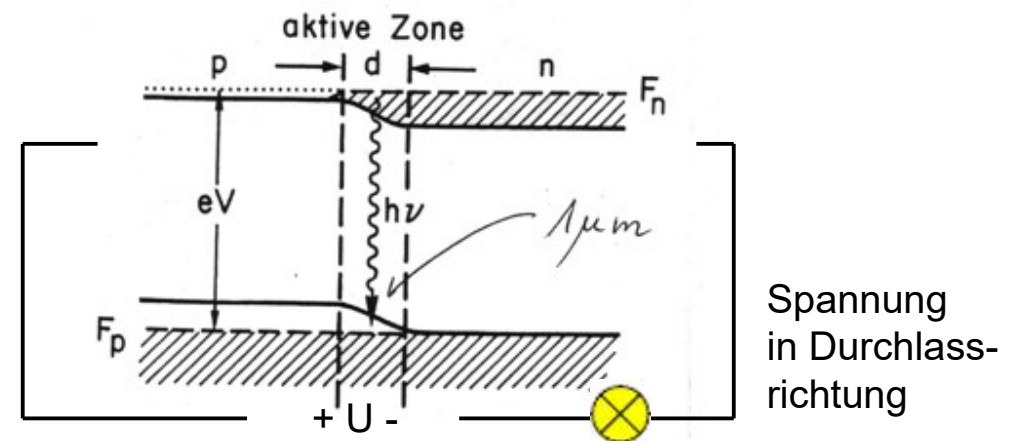
# pn-Übergang „ohne“ (links) und „mit“ (rechts) angelegter Spannung

p-n-Übergang ohne angelegte Spannung



EICH\_LAS2015: Laser – Bauformen,  
Strahlführung, Anwendungen, J.  
Eichler, H.J. Eichler

p-n-Übergang mit angelegter  
Spannung  $V$  in Durchlaßrichtung.



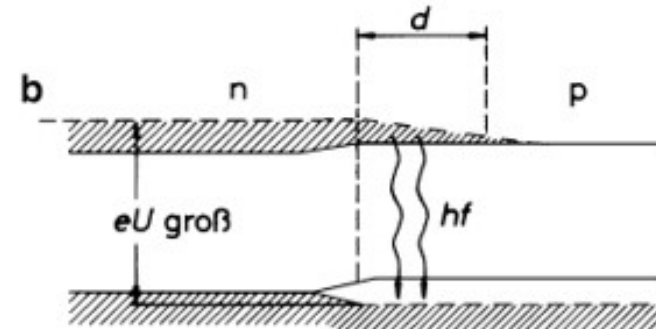
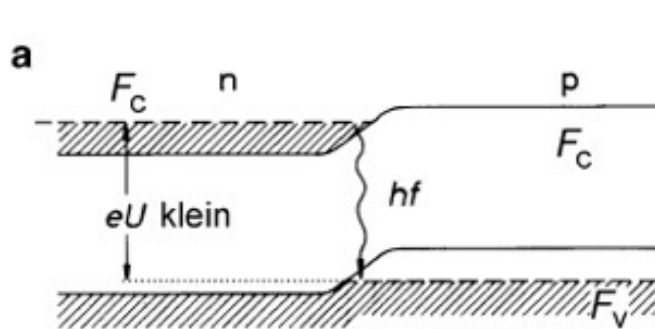
Durch die angelegte Spannung werden Ladungsträger in das vorher Ladungsträgerfreie Gebiet gepumpt.

Elektron-Loch-Paare können sich auslöschen. Dabei werden Photonen der Energie  $E = h \cdot \nu$  mit  $E = F_n - F_p$  freigesetzt.

**Das ist das Prinzip der Photodiode (LED) und des Halbleiter Lasers.**

## Leuchtdiode versus Diodenlaser

- Spannung bzw. Potential  $eU$  kann pn Potentialdifferenz etwas verringern
- Einige Elektron-Loch Rekombinationen und entspr. Einige Photonen → **Leuchtdiode**
- Spannung bzw. Potential  $eU$  jetzt so groß, daß Elektronen nur eine geringe Schwelle zum p Bereich überwinden müssen
- Mehr Elektron-Loch Rekombinationen
- Viele Photonen → Laserstrahlung → **Diodenlaser**

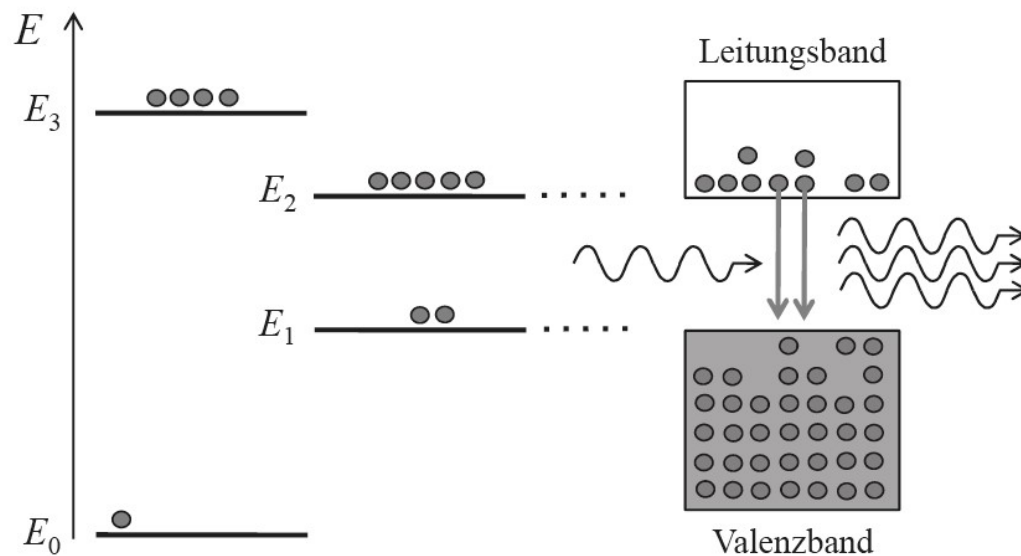


**Abb. 10.4** Entstehung von Strahlung (Photonen mit der Energie  $hf$ ) im Diodenlaser durch Rekombination von Elektronen mit Löchern bei Anlegen einer Spannung  $U$  in Durchlassrichtung. Die Spannung vermindert die Potenzialdifferenz zwischen n- und p-Gebiet. **a** Kleine Spannung ergibt nur schwache Lichtemission **b** größere Spannung erzeugt intensivere Strahlung. (Der Abstand der Fermi-niveaus wird durch die äußere Spannung  $U$  bestimmt:  $eU = F_C - F_V$ )

Achtung: p- und n-Zone hier vertauscht gegenüber der letzten Folie

EICH\_LAS2015:  
Laser –  
Bauformen,  
Strahlführung,  
Anwendungen,  
J. Eichler, H.J.  
Eichler

## Halbleiterlaser ist im Prinzip ein 4-Niveaulaser



**Abb. 1.28:** Bei der Laserdiode handelt es sich de facto um ein Vier-Niveau-System. Innerhalb des Leitungsbandes relaxieren die Elektronen schnell in den niedrigstmöglichen Energiezustand. Dieser ist damit stärker besetzt als der höchste Energiezustand im Valenzband und die Besetzungsinversion ist hergestellt.

Laserwellenlänge  
und  
Laserleistung  
können beeinflusst  
werden durch

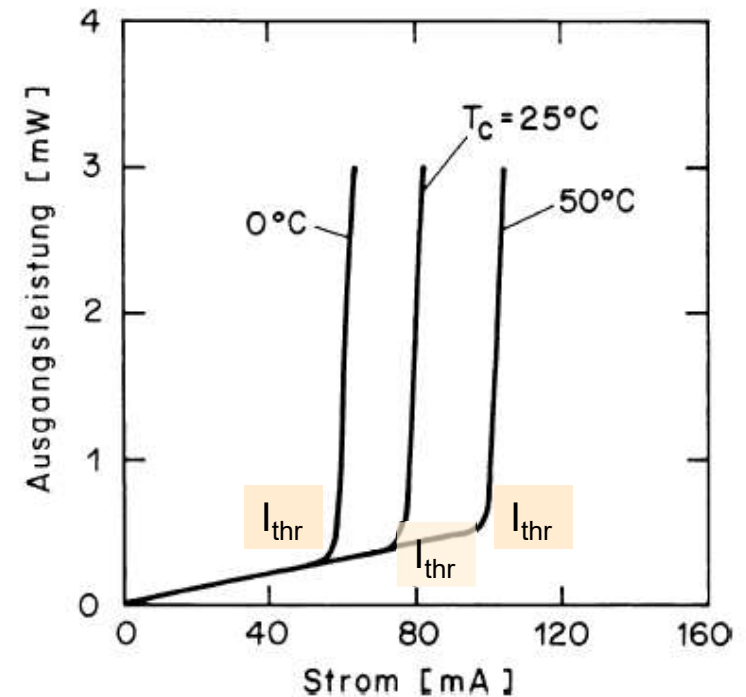
- Stromstärke  $I$
- Temperatur  $T$

EICH\_LAS2015: Laser – Bauformen,  
Strahlführung, Anwendungen, J.  
Eichler, H.J. Eichler

# Zusammenhang zwischen Laser-Ausgangsleistung, Schwellstrom $I_{thr}$ und Betriebstemperatur

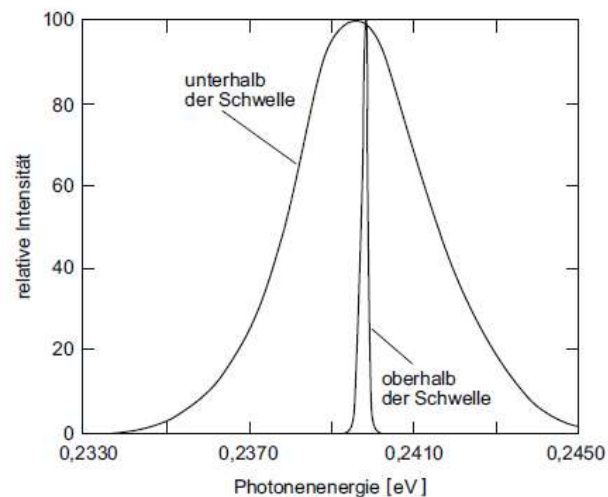
**Abb. 15.7** Abhängigkeit der Laserleistung vom Injektionsstrom und von der Temperatur für einen modernen Diodenlaser

Unterhalb des Schwellstroms  $I_{thr}$  Licht durch spontane Emission

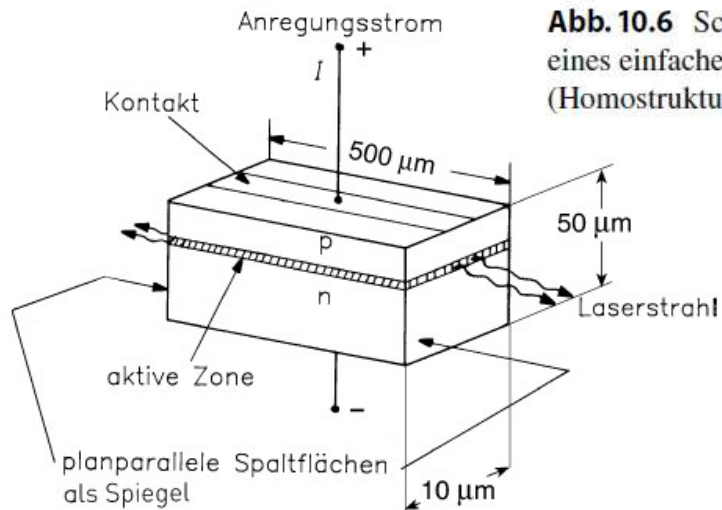


SIGR\_LAS2018: Laser: Theorie, Typen und Anwendungen, M.W. Sigrist, Springer, 8. Auflage 2018, ISBN 978-3-662-57515-4 (eBook)

**Abb. 15.8** Emissionsspektrum einer InSb-Diode bei  $T = 1,7$  K für einen Injektionsstrom oberhalb und unterhalb der Schwelle (Phelan et al. 1963)



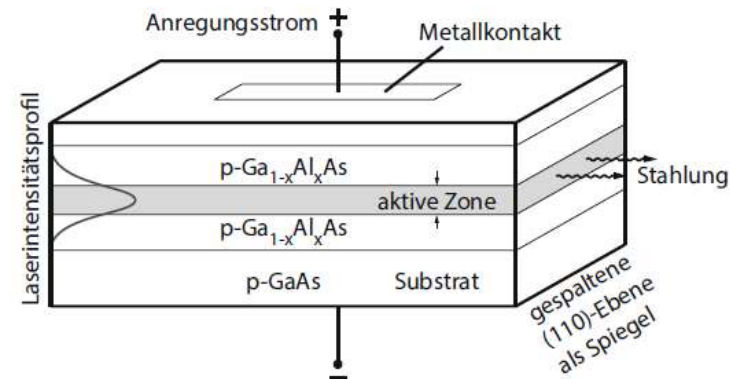
# Aufbau typischer Halbleiterlaser



**Abb. 10.6** Schicht-Aufbau eines einfachen Diodenlasers (Homostruktur)

- Hoher Brechungsindex  $n_{\text{GaAs}} = 3,6$
- **Endflächen = Resonatorspiegel**
  - **Reflektionsgrad der Endflächen**  

$$R = [(n_{\text{GaAs}} - n_{\text{Luft}}) / (n_{\text{GaAs}} + n_{\text{Luft}})]^2 = (2,6/4,6)^2 = 0,31 \sim 31\%$$
- Resonatorlänge = Kristalllänge  $\sim 500\mu\text{m}$
- Schwellstromdichte  $\sim 100 \text{ kA/cm}^2$



**Abb. 10.7** Aufbau eines Diodenlasers mit Doppel-Heterostruktur. Die aktive Zone ist oft nicht homogen, sondern besteht aus Quantengraben (quantum well)-Schichten, siehe Abb. 10.24

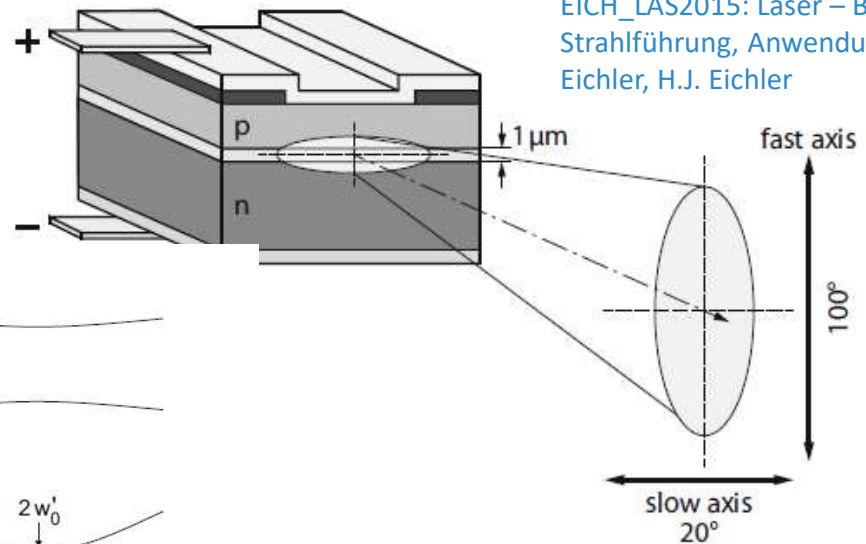
- Doppel-Heterostruktur
- Aktive Schicht wird durch Brechungsindexwechsel begrenzt
- Dadurch geringere Schwellstromdichte  $\sim 1 \text{ kA/cm}^2$

EICH\_LAS2015: Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen,  
J. Eichler, H.J. Eichler



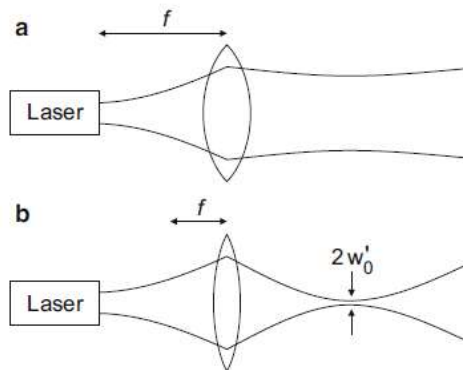
# Strahlcharakteristik eines Halbleiterlasers

**Abb. 10.10** Diodenlaser mit transversalem Monomodebetrieb



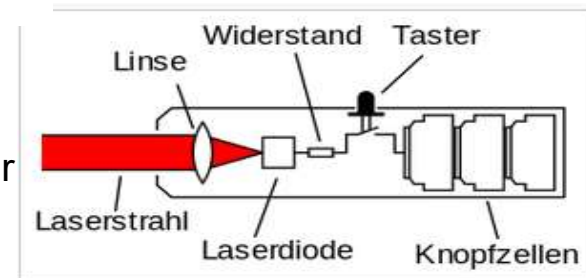
EICH\_LAS2015: Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen, J. Eichler, H.J. Eichler

**Abb. 10.21** Transformation von Diodenlaser-Strahlung durch eine Linse: a Kollimierung bzw. b Fokussierung



Strahlungsprofil eines Halbleiters wird in vielen Anwendungen mit Hilfe von Linsen optimiert

Laserpointer





## Weitere Bauarten für höhere Laserleistungen: Diodenlaser-Arrays und -Stapel

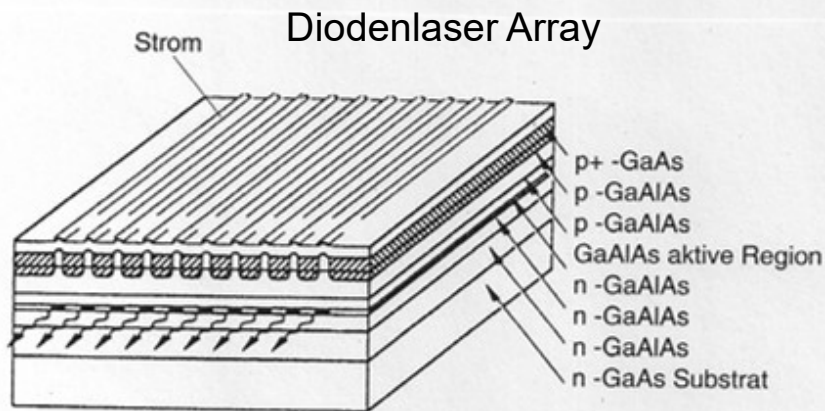
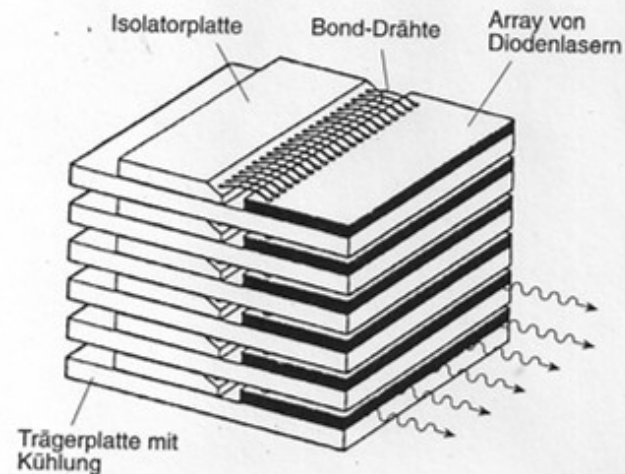


Bild 10.9. Diodenlaser-Array aus mehreren parallel angeordneten Laserdioden-Streifen („multi-stripe gain-guided array“)

EICH\_LAS2015: Laser – Bauformen, Strahlführung, Anwendungen, J. Eichler, H.J. Eichler



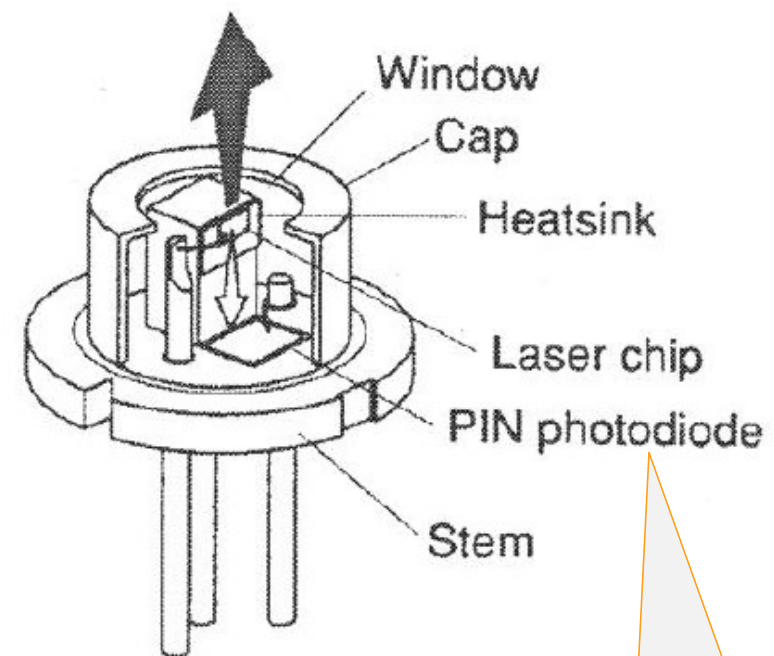
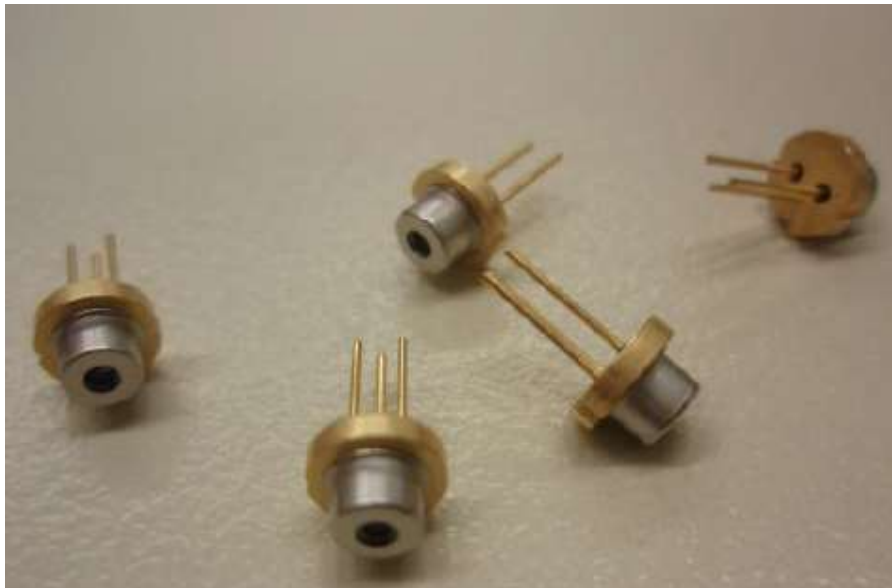
Stapel mehrerer Arrays

Bild 10.10. Stapel oder Stack von Laserarrays (nach Peuser, Fa. Daimler-Benz, Ottobrunn)

### Typische Laserleistungen:

- Eine einzelne Laserdiode ~ 200mW
- Diodenlaser Array ~ bis zu 100 W
- Stapel mehrerer Arrays ~ einige kW

## Einige Halbleiterlaser Dioden & Aufbau



Misst die  
Ausgangsleistung

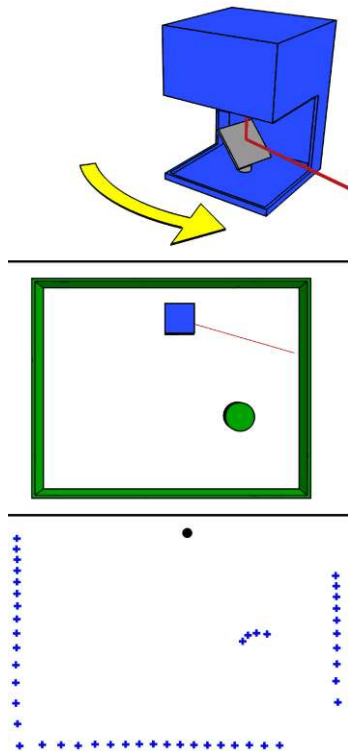
Noch eine heutzutage wichtige Laser Anwendung

# LIDAR



# LIDAR = Light Detection and Ranging

## Entfernungsmessung mit Laserlicht



<https://de.wikipedia.org/wiki/Lidar#/media/Datei:LIDAR-scanned-SICK-LMS-animation.gif>

Der Begriff fasst verschiedene Techniken zusammen

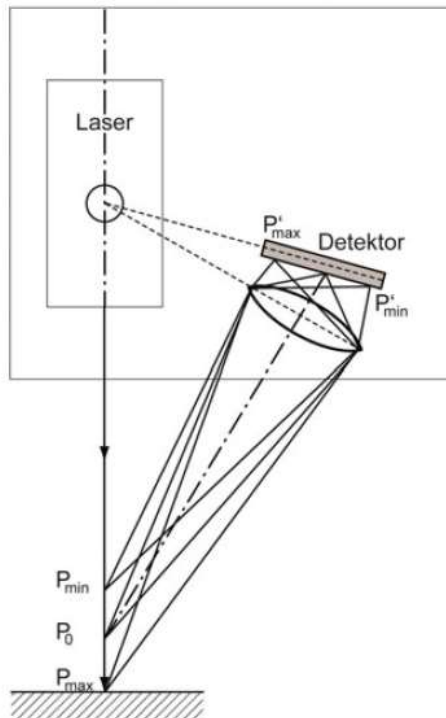
- **Laufzeitmessung (Lichtpuls) – Time of Flight ToF**
- **Phasenmodulation** – Amplitude des Laserlichts wird mit einer Frequenz moduliert und der Phasenwinkel des rückgestreuten Lichts und damit die Entfernung wird aus einem Interferenzsignal ermittelt
- **Interferometrie** – (meist kleine) Längenänderungen werden direkt aus Verschiebung von Interferenzmaxima ermittelt (sh. Michelson Interferometer)
- **Triangulation** – Entfernungsmessung im Dreieck „Laser – Objekt –

[

	Messbereich	Kommentar
<i>Laufzeitmessung</i>	3 Zentimeter <sup>[3]</sup> – 40 Kilometer <sup>[4]</sup>	kurze Messzeit, kein Aperturwinkel
<i>Phasenmodulation</i>	frequenzabhängig max. 200 Meter	niedrige Fabrikationskosten
<i>Interferometrie</i>	10 Nanometer – 20 Meter	höhere Kosten, hohe Auflösung
<i>Triangulation</i>	einige Millimeter – 100 Meter	abhängig von Oberfläche, kostengünstig, robust

[https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrooptische\\_Entfernungsmessung](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrooptische_Entfernungsmessung)

# LIDAR mit Triangulation



**Bild 20-1**  
Prinzipieller Aufbau eines Triangulationssensors

Quelle: Löffler-Mang\_2012\_Book\_OptischeSensorik

## Triangulation: Laser Messverfahren zur Entfernungsmessung

1. Laserfleck wird auf zu messender Oberfläche im Abstand  $d$  abgebildet
2. Streulicht des Flecks wird unter definiertem Winkel auf einem CCD Detektor abgebildet
3. Je nach Abstand  $d$  (Laser  $\leftrightarrow$  Oberfläche) verändert sich die Geometrie des Dreicks „Laser-Laserfleck-Bildpunkt“
4. Aus der Position des Bildpunkts auf dem Detektor kann (nach vorheriger Eichung) der Abstand  $d$  errechnet werden
5. Je nach Abmessungen des Detektors ergibt sich ein Messbereich zwischen Abständen  $P_{\min} < d < P_{\max}$
6. Voraussetzung ist eine matte Oberfläche mit diffusen Streueigenschaften (sonst zu wenig Signal auf Detektor); d.h. Abstandsmessung zu einem Spiegel wäre mit Triangulation nicht möglich

# LIDAR Triangulation / Zahlenbeispiel mit CCD Sensorelement

Beispiel:

- Sensor besteht aus einer CCD Zeile mit 2048 Pixeln auf einer Länge von 20 mm
- Die Bildpunkte  $P'_{\min}$  und  $P'_{\max}$  können diesen Bereich überstreichen
- Auflösung auf dem Detektor 0,1 mm



CCD Streifen Sensor

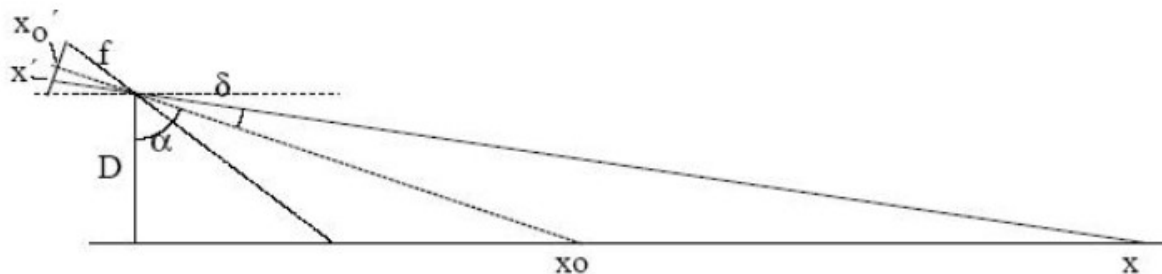
$P'_{\min}$

- 100mm

$P'_{\max}$

+ 100mm

- Entfernung Laser – P0 (Messpunkt) durch Eichung und/oder Rechnung



$$\tan \delta = \frac{x' - x'_0}{f} \rightarrow \tan \alpha = \frac{x_0}{D}$$

$$x = D \cdot \tan(\alpha + \delta) = D \cdot \frac{\tan \alpha + \tan \delta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \delta}$$

$$x = D \cdot \frac{\frac{x_0}{D} + \frac{x' - x'_0}{f}}{1 - \frac{x_0}{D} \cdot \frac{x' - x'_0}{f}}$$



# LIDAR Sensor in der Robotik – Hindernisse erkennen

## Mechanism

RPLIDAR is based on laser triangulation ranging principle and uses high-speed vision acquisition and processing hardware developed by RoboPeak. The system measures distance data in more than 2000 times' per second and with high resolution distance output (<1% of the distance).

## Optical Specification

- For Model A1M1 only

Item	Unit	Min	Typical	Max	Comments
Laser wavelength	Nanometer(nm)	775	785	795	Infrared Light Band
Laser power	Milliwatt (mW)	TBD	3	5	Peak power
Pulse length	Microsecond(us)	TBD	110	300	

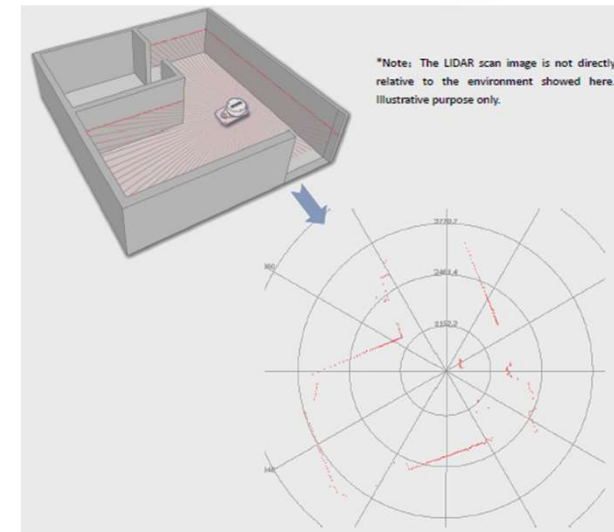
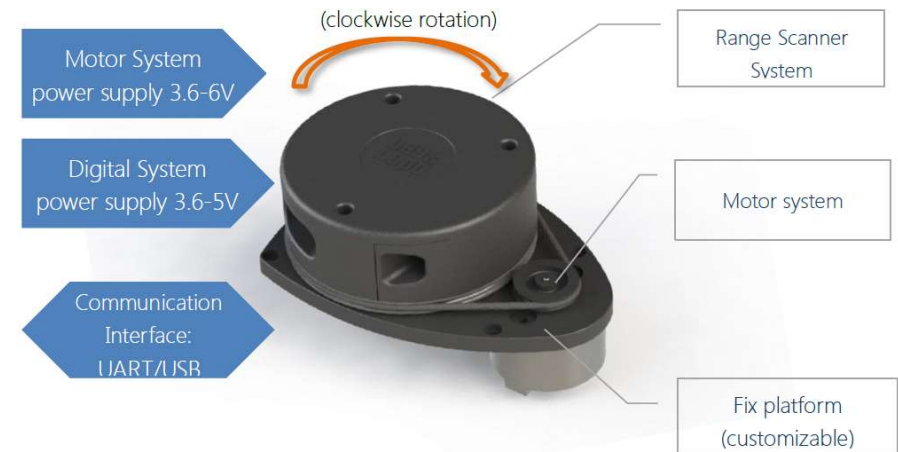
## Safety and Scope



Class I

RPLIDAR system use a low power (<5mW) infrared laser as its light source, and drives it using modulated pulse. The laser emits in a very short time frame which can make sure its safety to human and pet and reach Class I laser safety standard.

The modulated laser can effectively prevent ambient light and sunlight during ranging



Abstands- und  
Geschwindigkeits-  
sensoren auf  
autonomen  
Fahrzeugen, z.B.  
dem ROVER des  
U A S FROST  
Teams





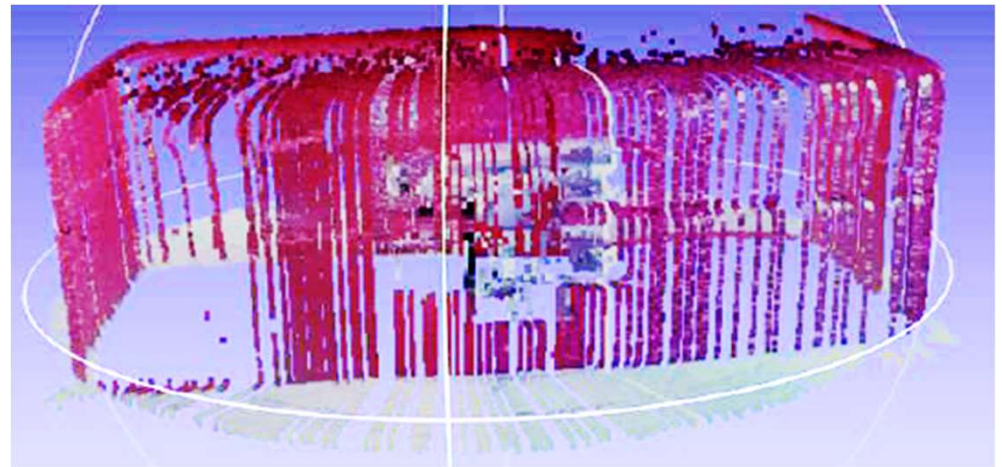
# Weitere LIDAR Anwendung – 3dScanner: Aktuelle UAS

## Projektarbeit – Aufbau des Fabscan 3d-Scanner Bausatz mit RaspberryPI (WS2021/22:

Sophie Frerk, Luca Prämassing, MeRo)



- Mit einem 2048 x 2048 Pixel CCD Kamera Element kann mit einer Aufnahme nicht nur ein Bildpunkt sondern eine komplette Linie von Bildpunkten aufgenommen werden
- So kann ein 3-d Objekt gescannt werden



Scan Rohdaten vor der Weiterverarbeitung mit Meshlab

# LIDAR – sehr viele Anwendungen z.b. Vermessungen aus der Luft oder aus dem Erdorbit

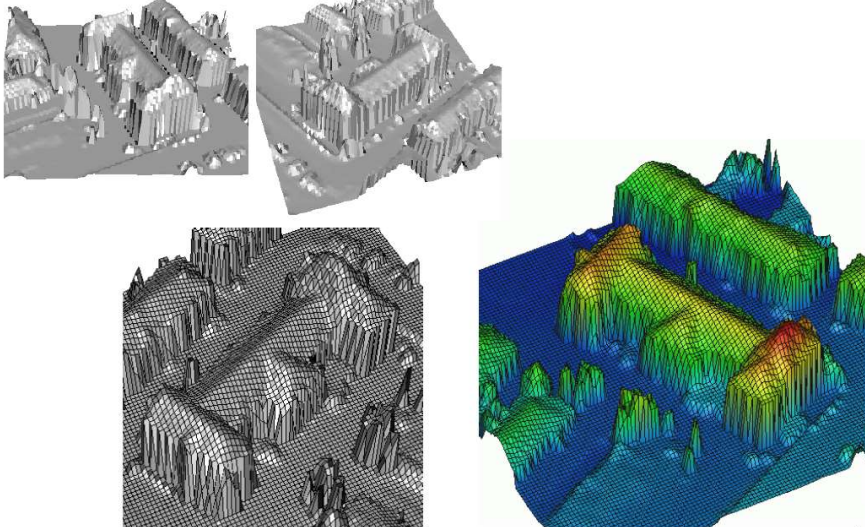
ETH  
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

isprs

Commission VI Special Interest Group "Technology Transfer Caravan"



Example laser scan data



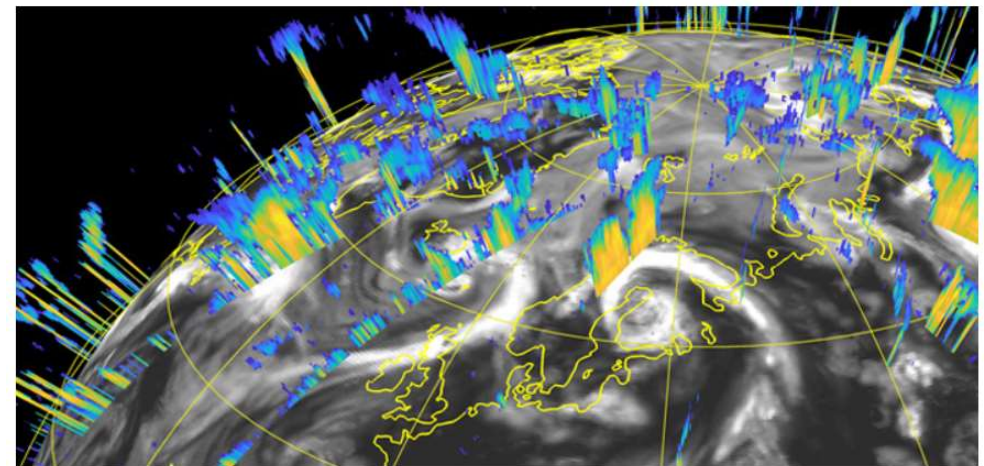
International Summer School "Digital Recording and 3D Modeling", Aghios Nikolaos, Crete, Greece, 24-29 April 2006



## Radar and lidar data improve weather forecasts



By JAMES MUIR — February 4, 2020 No Comments



# Aufgepasst: hier eine weitere LIDAR Anwendung



The screenshot displays the Vitronic website interface. The top navigation bar includes the Vitronic logo, links for 'Lösungen', 'Service', and 'Unternehmen', and a 'DE' language selector. Below this, a dark blue header features 'GESCHWINDIGKEITSÜBERWACHUNG', 'Übersicht', 'Technische Daten', and a 'Kontaktieren Sie uns' button. The main content area has a bright blue background with the headline 'Runter vom Gas!' and the subtext 'Bessere Messtechnik für sichere Straßen'. On the right side of this area is a vertical image of a black and white striped speed measurement pole. An orange L-shaped graphic element is positioned at the bottom right corner of the page.

VITRONIC

Lösungen Service Unternehmen

DE

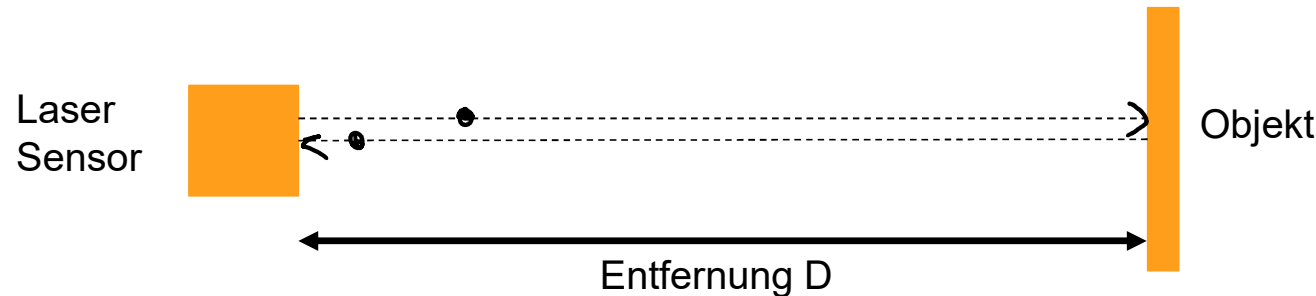
GESCHWINDIGKEITSÜBERWACHUNG Übersicht Technische Daten

Kontaktieren Sie uns→

## Runter vom Gas!

Bessere Messtechnik für sichere Straßen

# Time-of-Flight-Methode: Zeitdifferenzen messen und in Entfernungen umrechnen



Flugzeit des Photons:  $c = 2 D / t \rightarrow t = \frac{2 D}{c}$







$D_1 = 3 \text{ m} \rightarrow t_1 = 2 * 10^{-8} \text{ s} = 20 \text{ ns}$

$D_2 = 3 \text{ cm} \rightarrow t_2 = 2 * 10^{-10} \text{ s} = 0,2 \text{ ns} = 200 \text{ ps}$

Mit Oszilloskop wäre jetzt ein Gerät mit Zeitablenkung >5GHz nötig  $\rightarrow$  Messung im 200 ps Bereich ist „tricky“

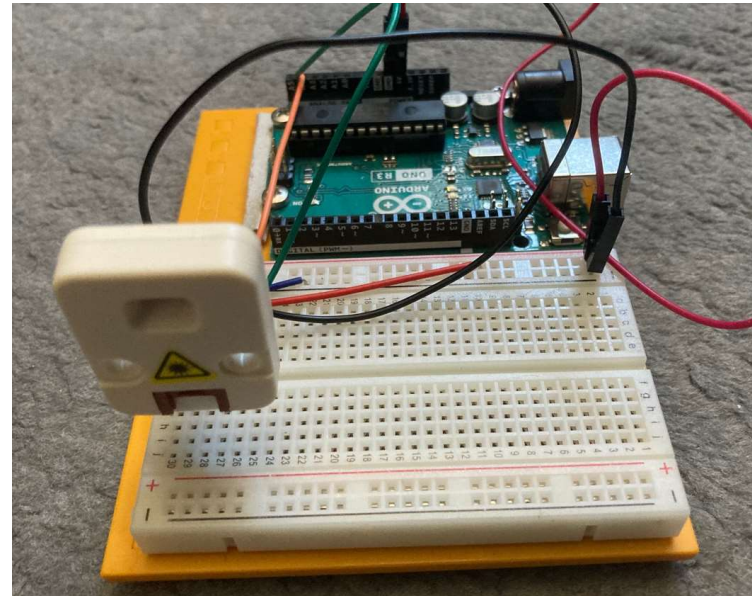
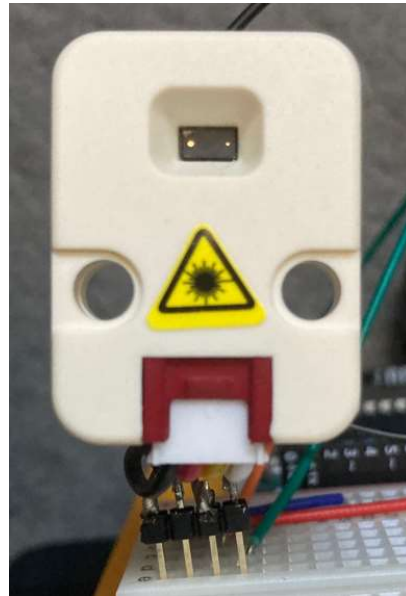
350 MHz

2 GHz

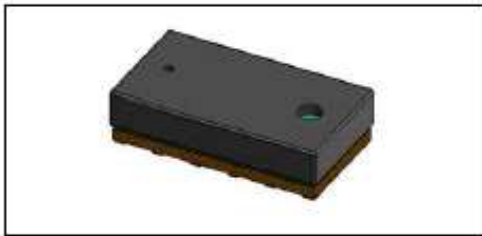
					
RS PRO - Oszilloskop -...	RS PRO - Oszilloskop -...	Oszilloskop - Siglent...	Rohde & Schwarz Tisc...	Siglent - Oszilloskop -...	
2.220,16 €	1.890,02 €	1.069,81 €	49.373,10 €	1.344,44 €	
RS Deutschlan	RS Deutschlan	meilhaus.de	RS Deutschlan	meilhaus.de	
Kostenloser ...	Kostenloser ...	Kostenloser ...	Kostenloser ...	Kostenloser ...	
Von smec	Von smec	Von Suchhel...	Von smec	Von Suchhel...	



## Time-of-Flight (TOF) Sensor VL53L0X (für <15€) und Arduino Uno; Messbereich ca. 2 – 180 cm



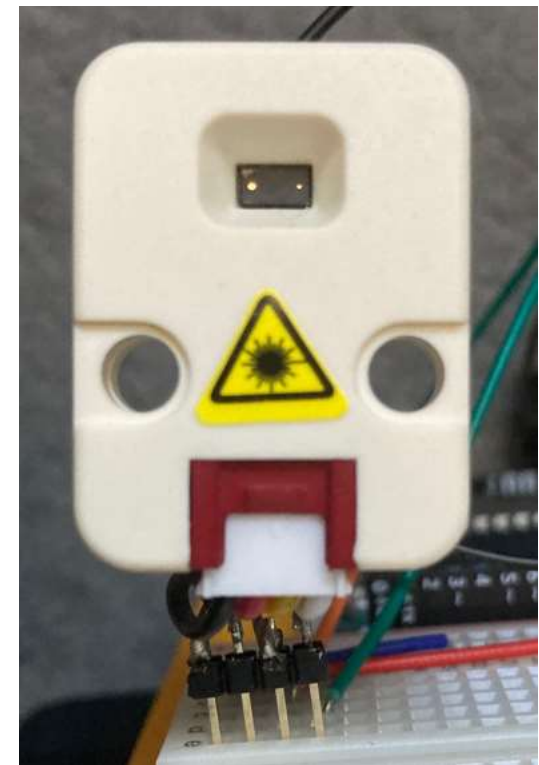
## ST Microelectronics – TOF Sensor VL53L0X



### Features

- Fully integrated miniature module
  - 940 nm laser VCSEL
  - VCSEL driver
  - Ranging sensor with advanced embedded micro controller
  - 4.4 x 2.4 x 1.0 mm
- Fast, accurate distance ranging
  - Measures absolute range up to 2 m
  - Reported range is independent of the target reflectance
  - Advanced embedded optical cross-talk compensation to simplify cover glass selection

- Laser 940 nm
  - Photodetektor
  - Auswertungselektronik
- 
- → Alles vereint auf einem Chip mit Gesamtabmessung 4.4 x 2.4 x 1.0 mm



Laser hier ist ein sog. **VCSE-Laser** (von englisch *vertical-cavity surface-emitting laser*) oder „Oberflächenemitter-Laser“

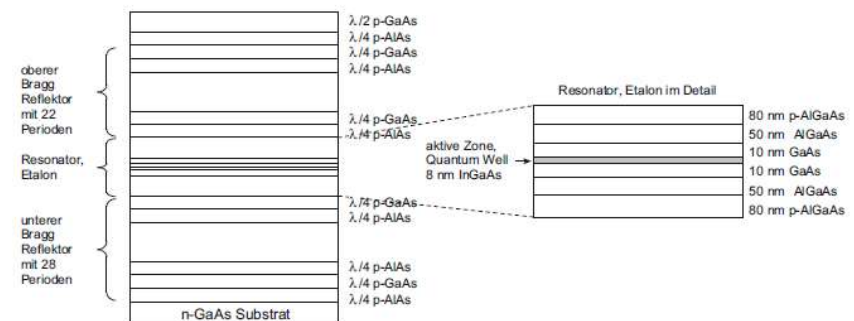
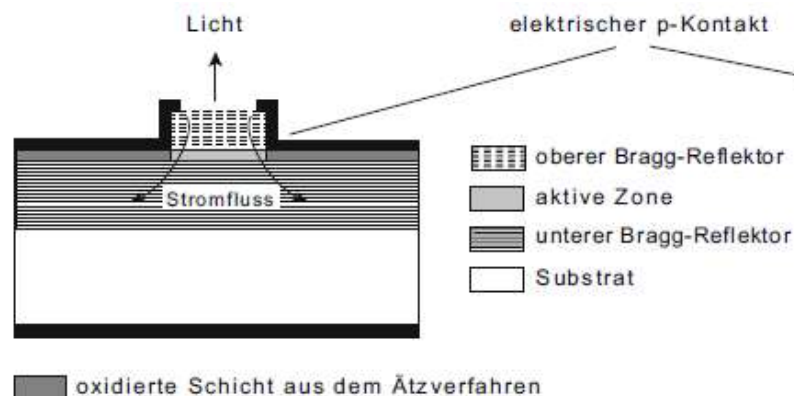



Abb. 10.37 Aufbau eines exemplarischen VCSELs. Die Schichten außerhalb der aktiven Zone im Resonator dienen zur Anpassung der Resonatorlänge an die Wellenlänge

- Aktives Medium ist eine ~ 8 nm Dicke InGaAs Schicht
- Laserlicht wird nach „oben“ emittiert.
- Resonator wird durch eine Serie von P-dotierten GaAs Schichten verschiedener Dicke oberhalb und unterhalb der aktiven Schicht

- Vorteile
  - Kann sehr gut miniaturisiert werden
  - Geringer Schwellstrom / Gute Quantenausbeute
  - Massenherstellung einfach / preisgünstig
  - Optimal für Sensoren



life.augmented

## VL6180X FlightSense Time-of-Flight Sensor

### MODULE

- Introduction
- FlightSense Technology**
- Conventional IR vs VL6180X Ranging
- VL6180X Overview
- Specifications
- Drawing
- Block Diagram
- Application Schematic
- Firmware
- Architecture Comparison
- Evaluation Kits
- Market Segments and Applications
- FDA Status
- Summary

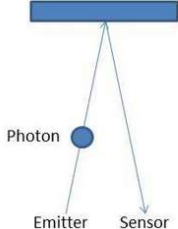
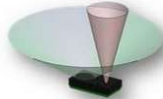
### PRODUCT LIST

3 of 27

0:01 / 0:36

### VL6180X with FlightSense Time-of-Flight Technology

- ST has developed and industrialized a unique technology
  - Count photons
  - Measure photon Time-of-Flight
- 6+ years R&D
  - Key device and innovative architecture patents held by ST
  - Engineering samples demonstrated
  - Standard imager process
- Technology being industrialized
  - Time-of-Flight **P**roximity **S**ensor (PS)
  - /Ambient **L**ight **S**ensor (ALS) Module



Photon

Emitter

Sensor

**Single photon travel time**

#### Fundamental Technology Advantage

Photon travel time NOT affected by target reflectance

ST has been working on Time-of-Flight technology for approximately six years-plus now. There are two features this technology brings to the VL6180X device: counting photons and measuring the photon time of flight. The VL6180X measures the exact time the photon leaves the emitter, and the time it hits the sensor. The



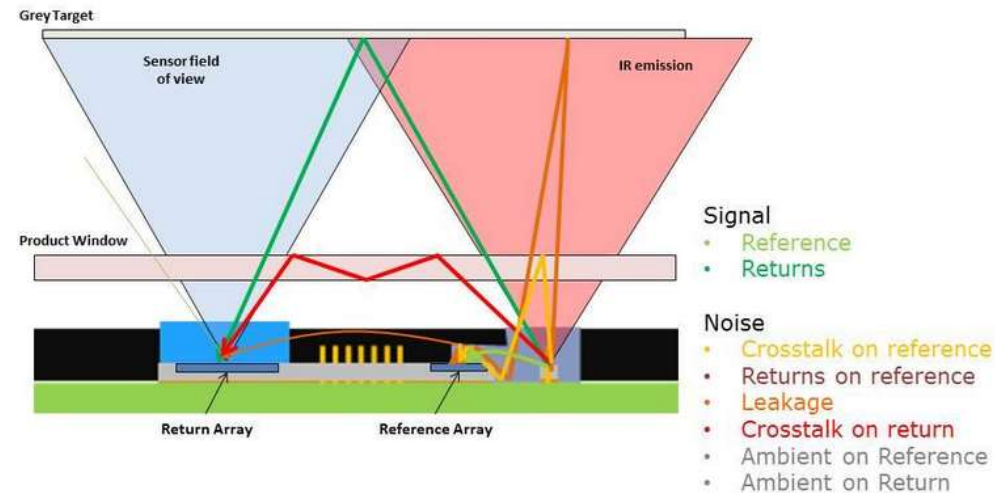
## MODULE

Introduction  
FlightSense Technology  
Conventional IR vs VL6180X Ranging  
**VL6180X Overview**  
Specifications  
Drawing  
Block Diagram  
Application Schematic  
Firmware  
Architecture Comparison  
Evaluation Kits  
Market Segments and Applications  
FDA Status  
Summary

## PRODUCT LIST



## VL6180X PS Module and Optical Paths



Shown here is a cross-section of the ST VL6180X and how it works. The picture shown on the right is the laser emitter and on the left side is the sensor which receives the photons back. Additionally, there is a reference sensor right next to the laser. The light green arrow is the reference array path that measures the time the laser turns on. The dark green line represents the photons traveling from the laser reflecting from the target and coming back to VL6180X sensor. The other lines represent sources of noise that are always present. In most applications, a cover glass is used over the device, the red line shows how a photon can hit the top of the cover glass, bounce off the bottom of the cover glass and keep bouncing back. This travel path can make the measurements inaccurate. There is a built-in compensator for photons from ambient light or noise to ensure accurate readings.

# Zeitmessung wird hier indirekt über die Entladung von Kondensatoren durchgeführt

(71) Applicants:

- **STMicroelectronics (Research & Development) Limited**  
**Buckinghamshire SL7 1EY (GB)**



(11) **EP 2 728 373 A1**

(12) **EUROPEAN PATENT APPLICATION**

(43) Date of publication:  
07.05.2014 Bulletin 2014/19

(51) Int Cl.:  
*G01S 7/486* (2006.01)  
*G01S 17/10* (2006.01)  
*G01S 17/89* (2006.01)  
*H04N 5/3745* (2011.01)

(21) Application number: 13275258.5

(22) Date of filing: 28.10.2013

(57) Disclosed is a pixel circuit comprising a single photon avalanche diode (SPAD) and a measurement circuit comprising a capacitance. The SPAD detects a photon incident on said SPAD; and the measurement circuit discharges the capacitance at a known rate during a discharge time period. The length of the discharge time pe-

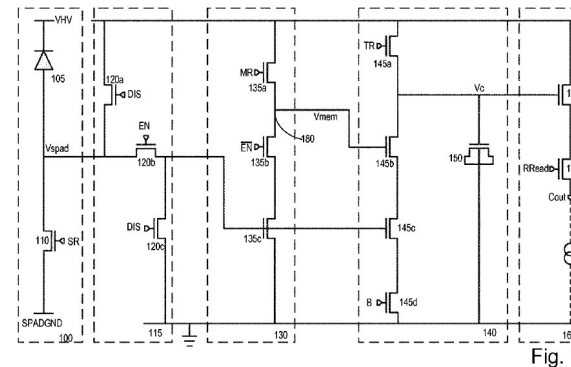


Fig. 1



## Features

- Fully integrated miniature module:
  - 840 nm laser VCSEL
  - VCSEL driver
  - Ranging sensor with advanced embedded micro controller
  - 4.4 x 2.4 x 1.0 mm
- Fast, accurate distance ranging:
  - Measures absolute range up to 2 m
  - Reported range is independent of the target reflectance
  - Advanced embedded optical cross-talk compensation to simplify cover glass selection

riod is determined by the time of detection of the photon, such that the final amount of charge on the capacitance corresponds to the time of flight of the photon. Also disclosed is a time resolved imaging apparatus comprising an array of such pixel circuits, and a corresponding method of measuring the time of flight of a photon.

- Das Alles passiert auf EINEM Microchip
- Im gleichen Patent wird ebenfalls ein Array von TOF Sensoren angemeldet

### MODULE

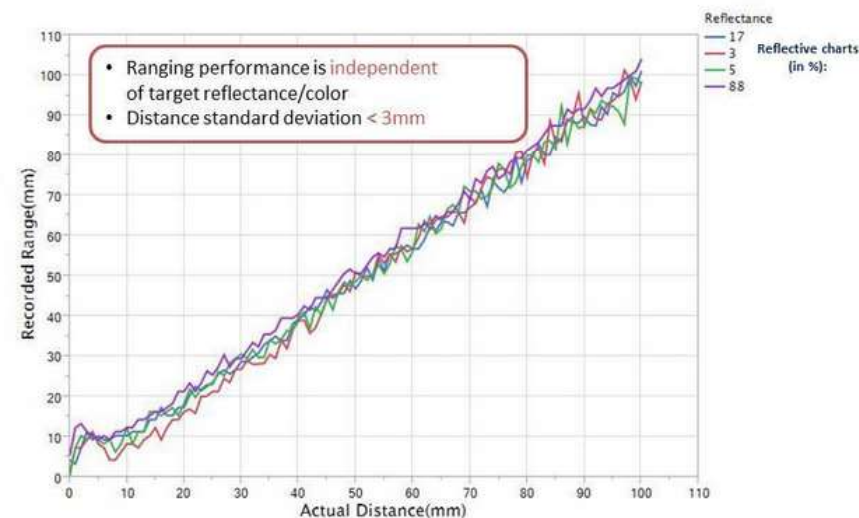
Introduction  
FlightSense Technology  
Conventional IR vs VL6180X Ranging  
**VL6180X Overview**  
Specifications  
Drawing  
Block Diagram  
Application Schematic  
Firmware  
Architecture Comparison  
Evaluation Kits  
Market Segments and Applications  
FDA Status  
Summary

### PRODUCT LIST



## VL6180X Ranging Performance

10x measurements per chart, 10mm step, in the dark, 0.2mm air-gap, no gasket, Oval artwork (75% > 800nm)

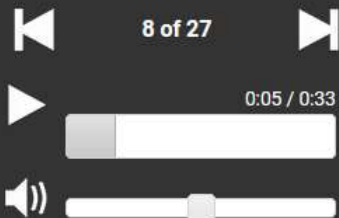


The above graph shows the ranging performance of the VL6180X device, the y-axis shows the measured distance from the device and the x-axis shows the actual distance. The data shows a linear curve. There are four curves being plotted - a reflectance of 3 %, which is a flat black, a reflectance of 5 %, which is close to black, a reflectance of 17 %, which is medium gray, and then a reflectance of 88 % which is similar to a white piece of paper in reflectance. The graph shows that the travel time is not affected by the target reflectance.

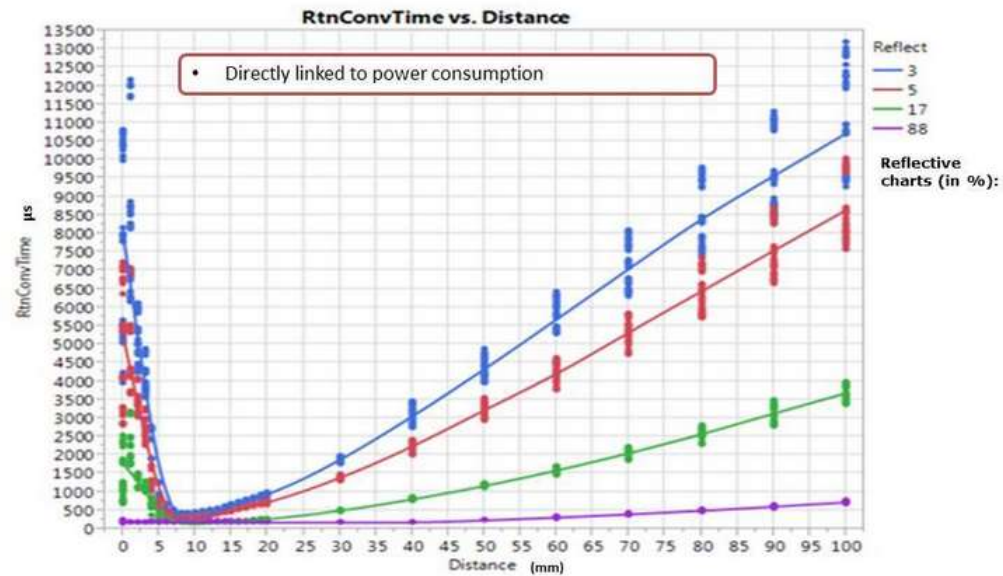
## MODULE

Introduction  
FlightSense Technology  
Conventional IR vs VL6180X Ranging  
**VL6180X Overview**  
Specifications  
Drawing  
Block Diagram  
Application Schematic  
Firmware  
Architecture Comparison  
Evaluation Kits  
Market Segments and Applications  
FDA Status  
Summary

## PRODUCT LIST



## VL6180X Convergence Time on Different Materials



The time required for the VL6180X to calculate an accurate distance is called the convergence time. The reflectance of the target material affects the convergence time. The reflectance reduces the number of reflected photons; therefore it takes a little longer to measure numbers of photons to make sure there is an accurate distance measurement. This graph shows that with a 3 % reflective target, at 10 centimeters, convergence time is below 10 milliseconds. With a white reflective target, the measurements are below 1 millisecond. Note: the numbers on the left side of the graph are in microseconds.

Lasertechnik, Prof. Dr. T. Hebert, SoSe 2023

# END FOR TODAY

## NÄCHSTE WOCHE:

## Wiederholung & Aufgaben