

# Lasersicherheit

Lasersicherheit, Dipl.-Ing. Falk Florschütz

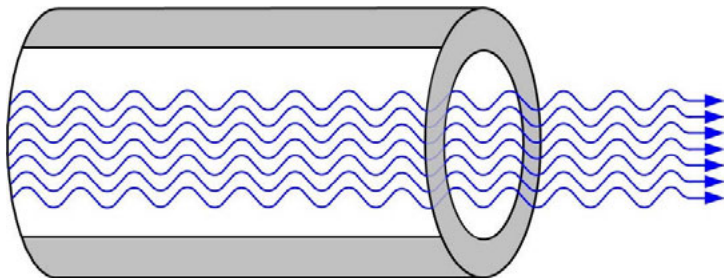
02.10.2014

**Laserstrahlung** im Sinne dieser Unfallverhütungsvorschrift ist jede elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im Bereich zwischen 100 nm und 1 mm, die als Ergebnis kontrollierter stimulierter Emission entsteht. (Definition nach §2 Abs.2 der BGV B2, entspricht auch den Anwendungsbereich der TROS-Laserstrahlung)

**Laser** Akronym für engl.

**Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

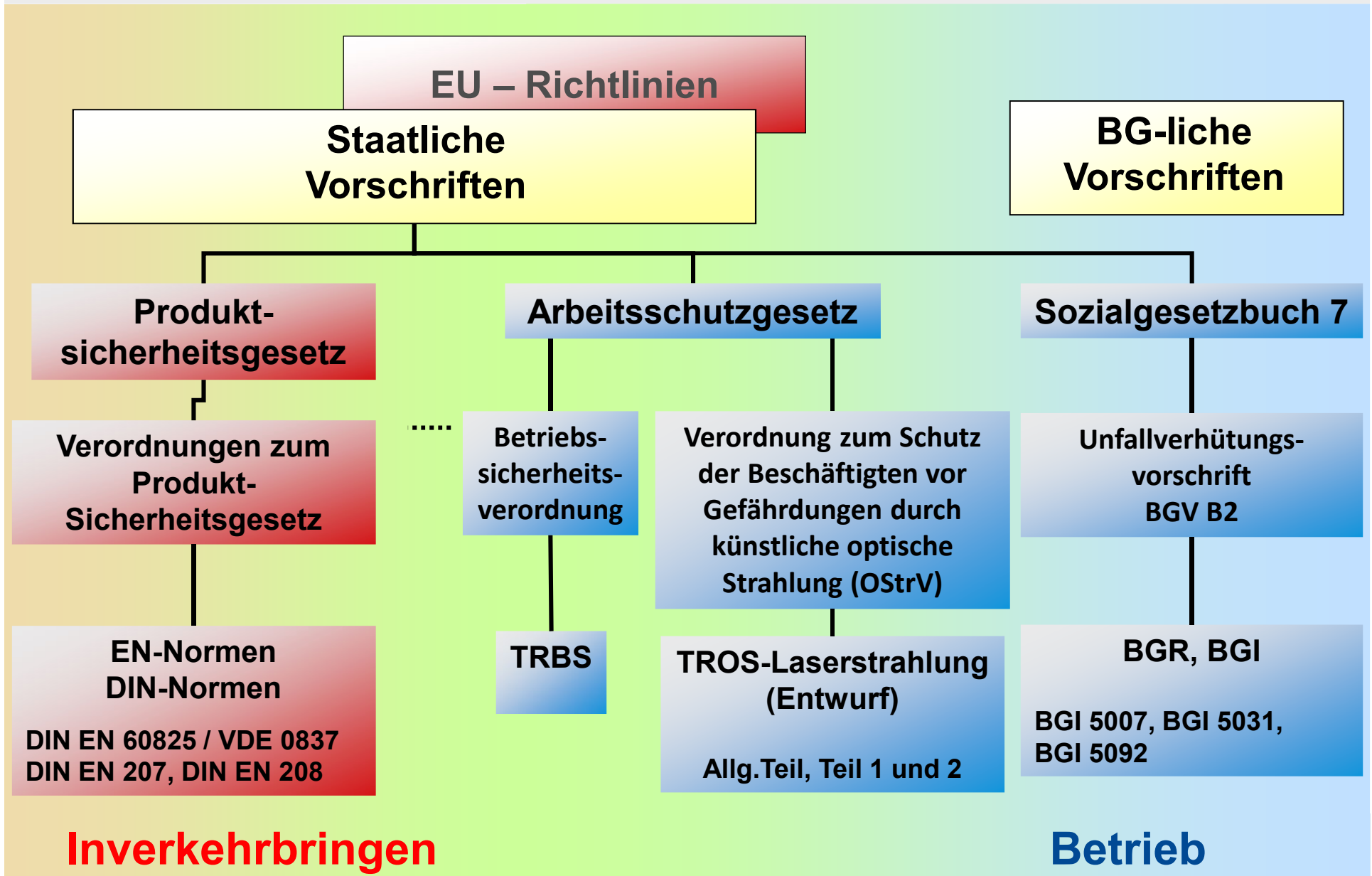
„Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung“, ist ein Begriff aus der Physik. Er bezeichnet sowohl den physikalischen Effekt als auch das Gerät, mit dem Laserstrahlen erzeugt werden. (Definition nach Wikipedia)



**Elektromagnetische Strahlung (Wellen) im sichtbaren und nahe sichtbaren Bereich mit:**

- gleicher Richtung (Parallelität)
- gleicher Wellenlänge (Monochromasie)
- gleicher Phasenlage (Kohärenz)

# Übersicht der Regelwerke Lasersicherheit



# Übersicht der Regelwerke Lasersicherheit

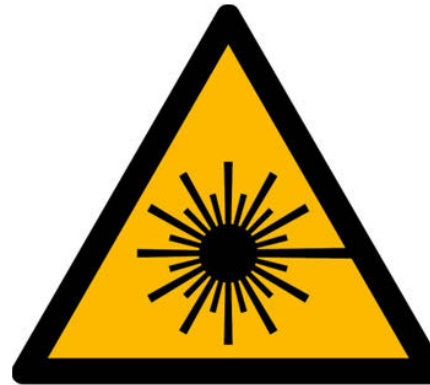


| Bezeichnung   | Titel   | Fundstelle   |
|---|---|--|
| <b>OStrV</b>  | Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - OStrV) – 19.07. 2010 | <a href="http://www.bundesrecht.juris.de">www.bundesrecht.juris.de</a> ,<br><a href="http://www.baua.de">www.baua.de</a> |
| <b>TROS-Laserstrahlung (Entwurf) Allg. Teil, Teil 1 und 2</b> | Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung  | <a href="http://www.baua.de">www.baua.de</a>   |
| <b>BGV B2</b>   | Laserstrahlung (2007 aktualisiert, veraltet)  | <a href="http://www.bgetem.de">www.bgetem.de</a> , <a href="http://www.dguv.de">www.dguv.de</a>                          |
| <b>BGI 5007</b>   | Laser-Einrichtungen für Show- oder Projektionszwecke  | <a href="http://www.bgetem.de">www.bgetem.de</a> , <a href="http://www.dguv.de">www.dguv.de</a>                          |
| <b>BGI 5031</b>   | Umgang mit Lichtwellenleiter-Kommunikations-Systemen  | <a href="http://www.bgetem.de">www.bgetem.de</a> , <a href="http://www.dguv.de">www.dguv.de</a>                          |
| <b>BGI 5092</b>   | Auswahl und Benutzung von Laser-Schutz- und Justierbrillen  | <a href="http://www.bgetem.de">www.bgetem.de</a> , <a href="http://www.dguv.de">www.dguv.de</a>                          |
| <b>DIN EN 60825 / VDE 0837</b>                                | Sicherheit von Lasereinrichtungen (Normenreihe, bestehend aus mehreren Teilen)  | <a href="http://www.beuth.de">www.beuth.de</a> ,<br><a href="http://www.vde.com">www.vde.com</a>                         |
| <b>DIN EN 207</b>   | Persönlicher Augenschutz - Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen)   | <a href="http://www.beuth.de">www.beuth.de</a>   |
| <b>DIN EN 208</b>   | Persönlicher Augenschutz - Augenschutzgeräte für Justierarbeiten an Lasern und Laseraufbauten (Laser-Justierbrillen)  | <a href="http://www.beuth.de">www.beuth.de</a>   |

|   |   |
|---|---|
| <b>Klasse 1</b>                                 | Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich oder der Laser ist in einem geschlossenen Gehäuse.  |
| <b>Klasse 1M</b>                                | Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich, solange keine optischen Instrumente, wie Lupen oder Ferngläser verwendet werden.   |
| <b>Klasse 1C</b><br><small>im Entstehen</small> |   |
| <b>Klasse 2</b>                                 | Die zugängliche Laserstrahlung liegt nur im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) auch für das Auge ungefährlich.   |
| <b>Klasse 2M</b>                                | Wie Klasse 2, solange keine optischen Instrumente, wie Lupen oder Ferngläser, verwendet werden.   |
| <b>Klasse 3R</b>                                | Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge.   |
| <b>Klasse 3B</b>                                | Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen auch für die Haut. Diffuses Streulicht ist in der Regel ungefährlich.   |
| <b>Klasse 4</b>                                 | Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Beim Einsatz dieser Laserstrahlung besteht Brand- oder Explosionsgefahr. |

# Was kann man von den Laserklassen ableiten

- Einfaches Erkennungsmerkmal für die Gefährlichkeit von Lasern



Beispiele für die Kennzeichnung von Lasern DIN EN 60825-1:2008-05

- man kann entscheiden ob eine ausführliche eigenständige Gefährdungsbeurteilung notwendig ist oder ob die Gefährdungsbeurteilung anhand der Gebrauchsanleitung durchzuführen ist.

Eine Gefährdungsbeurteilung anhand der Gebrauchsanleitung ist in der Regel bei den Laserklassen 1 und 2 mit Klassifizierung nach DIN EN 60825 / VDE 0837-1:2008-5 möglich.

Bei Lasern der Klasse 1 mit Klassifizierung nach IEC 60825-1, Version, Ed 3.0, 2014 können die Expositionsgrenzwerte der Richtlinie 2006/25/EG deutlich überschritten werden. Deshalb ist eine Bewertung der Exposition notwendig.

- Die Notwendigkeit eines **Laserschutzbeauftragten (LSB)**  
Für die **Laserklassen 3R, 3B und 4** wird ein sachkundiger Laserschutzbeauftragter gefordert (OSTRV §5, BGV B2 §6).



## Anforderungen und Aufgaben des LSB gemäß TROS-Laserstrahlung:

- abgeschlossene technische, naturwissenschaftliche, medizinische oder kosmetische Berufsausbildung + zwei Jahre Berufserfahrung
- verfügt über entsprechenden Lehrgang mit Nachweis über die erfolgreiche Teilnahme
- ist schriftlich bestellt
- unterstützt den Arbeitgeber oder die **fachkundige Person** bei der Gefährdungsbeurteilung und hat für den sicheren Betrieb der genannten Lasereinrichtungen zu sorgen
- arbeitet mit der Fachkraft für Arbeitssicherheit und dem Betriebsarzt zusammen
- Kennt bezogen auf den Anwendungsbereich Gefährdungen, Schutzmaßnahmen und Regelwerke
- unterstützt den Arbeitgeber bei der Unterweisung der Beschäftigten

# Fachkundige für die Gefährdungsbeurteilung (§ 5 OSTRV)



Die Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung verlangt Kenntnisse über:

1. der Rechtsgrundlagen,
2. zu den physikalischen Grundlagen der Laserstrahlung,
3. der geeigneten Informationsquellen,
4. zum für die Beurteilung notwendigen Stand der Technik,
5. der Wirkungen von Laserstrahlung (auf die Augen, Haut und Materialien),
6. des Vorgehens bei der Beurteilung von Wechsel- oder Kombinationswirkungen von verschiedenen Laserquellen,
7. zu den Tätigkeiten im Betrieb mit Exposition von Laserstrahlung
8. der technischen, organisatorischen und personenbezogenen Schutzmaßnahmen (insbesondere Berechnung und Auswahl der Laser-Schutzbrillen, Laser-Justierbrillen und Schutzeinhausungen),
9. der alternativen Arbeitsverfahren,
10. der Überprüfung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen und
11. der Dokumentation der Gefährdungsbeurteilung

(siehe TROS-Laserstrahlung Teil1 Pkt. 3.4)





# Fachkundige für Messungen und Berechnungen (§ 5 OStrV)



**Kenntnisse können u.a. durch Fortbildungsveranstaltung von Technischen Akademien, Unfallversicherungsträgern oder ähnlichen Institutionen erworben und aufgefrischt werden.**  
(TROS-Laserstrahlung Teil 1 Pkt.3.5)



Es ist möglich, dass die Funktionen des Fach- und Sachkundigen in einer Person vereint sind.

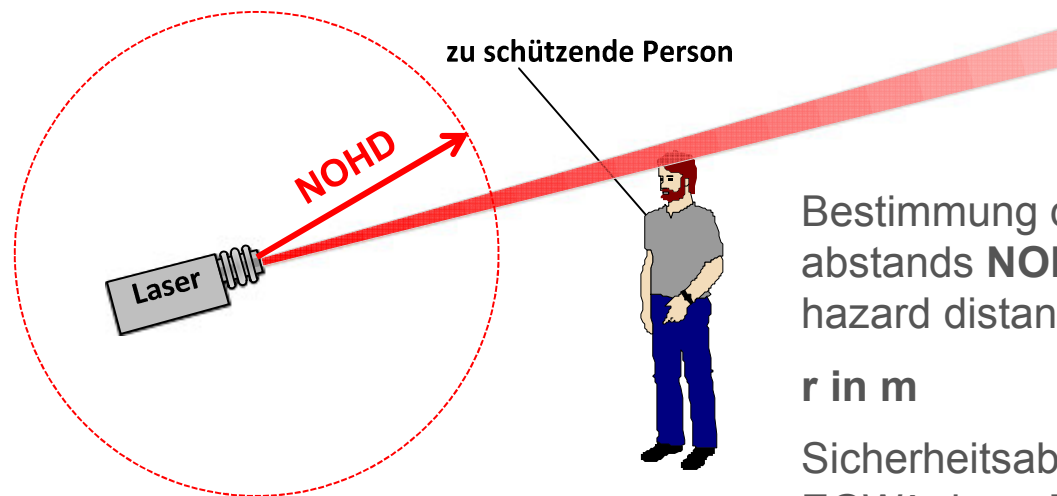
# Beispiele für die Notwendigkeit der Fachkunde

Bestimmung des Grenzwertes der zugänglichen Strahlung (**GZS**) und somit Bestimmung der Laserklasse gemäß **DIN EN 60825 / VDE 0837**

$P_{GZS}$  in W

Bestimmung der Expositionsgrenzwerte (**EGW**) gemäß **TROS-Laserstrahlung Teil 2** oder der maximal zulässigen Bestrahlung (**MZB**) gemäß **DIN EN 60825 / VDE 0837** für die Exposition des Auges und der Haut

$E$  in  $W/m^2$  oder  $H$  in  $J/m^2$

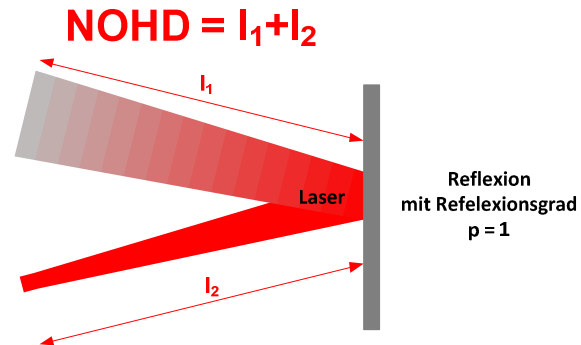


Bestimmung des Augensicherheitsabstands **NOHD** (engl.: nominal ocular hazard distance)

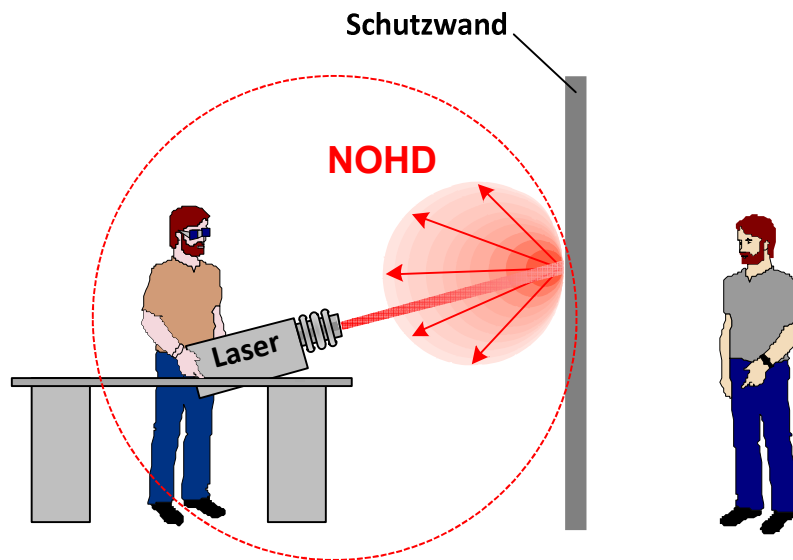
$r$  in m

Sicherheitsabstand zur Einhaltung der EGW's bzw. MZB's

# Beispiele für die Notwendigkeit der Fachkunde



Bestimmung des Augensicherheitsabstands **NOHD** bei direkter Reflexion



Bestimmung des Augensicherheitsabstands **NOHD** bei diffuser Reflexion

# Berechnungsbeispiel EGW-Wert für das Auge

Geg.: He:Ne-Dauerstrichlaser

Wellenlänge  $\lambda$  = 633 nm

Einwirkungszeit  $t$  = 0,25 sec

Strahldurchmesser  $d_{63}$  = 3,5 mm

Laserleistung  $P$  = 1 mW

Strahlendivergenz kann vernachlässigt werden

Betrachtung von kleinen Quellen  $\alpha < \alpha_{\min}$

$$E = P/A \text{ Wm}^{-2} = P / (\pi/4 d_{63}^2) \text{ Wm}^{-2}$$

$$E = 1 \cdot 10^{-3} / (\pi/4 \cdot 0,007^2) \text{ Wm}^{-2}$$

$$E = 25,98 \text{ Wm}^{-2} \approx 26 \text{ Wm}^{-2}$$

$$H_{\text{EGW}} = 18 \cdot t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2} \rightarrow E_{\text{EGW}} = H_{\text{EGW}} / t \text{ Wm}^{-2}$$

$$H_{\text{EGW}} = 18 \cdot 0,25^{0,75} \cdot \text{Jm}^{-2} \quad E_{\text{EGW}} = 6,4 \text{ Jm}^{-2} / 0,25 \text{ s}$$

$$H_{\text{EGW}} = 6,4 \text{ Jm}^{-2} \quad E_{\text{EGW}} = 25,6 \text{ Wm}^{-2} \approx 26 \text{ Wm}^{-2}$$

| Wellenlänge $\lambda$ / nm<br>(siehe a) |             | Durchmesser der Messblende D | $5 \cdot 10^{-5}$                                     | $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$ | $10^{-3} - 10$ |
|---|-------------|------------------------------|---|-----------------------------|----------------|
| Sichtbar und IR-A                       | 400 - 700   | 7 mm                         | $H = 18 t^{0,75} \cdot C_E \text{ Jm}^{-2}$           |                             |                |
|   | 700 - 1050  |                              | $H = 18 t^{0,75} \cdot C_A \cdot C_E \text{ Jm}^{-2}$ |                             |                |
|   | 1050 - 1400 |                              | $H = 90 t^{0,75} \cdot C_C \cdot C_E \text{ Jm}^{-2}$ |                             |                |
|   | 1400 - 1500 |                              | $H = 5,6 \cdot 10^3 t^{0,25} \text{ Jm}^{-2}$         |                             |                |

| Parameter | Winkelausdehnung / mrad           | Wert  |
|-----------|-----------------------------------|---|
| $C_E$     | $\alpha \leq \alpha_{\min}$       | 1   |
|           | $\alpha_{\min} < \alpha \leq 100$ | $\alpha / \alpha_{\min}$  |
|           | $\alpha > 100$                    | $\alpha_{\max} / \alpha_{\min}$<br>bei $\alpha_{\max} = 100 \text{ mrad}$ |

$E = E_{\text{EGW}} \rightarrow$  Grenzwerteinhaltung

Für gepulste Laser müssen unter Umständen 3 unterschiedliche Betrachtungsfälle ermittelt werden.

# Auszug Tab. A4.3 TROS-Laserstrahlung Teil 2

## Expositionsgrenzwerte für das Auge

| Wellenlänge λ / nm<br>(siehe a) |                         | Durchmesser der Messblende D | Expositionsdauer t / s   |  |  |  |   |  |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|--|--|--|--|---|--|
|                                 |                         |                              | 10 <sup>-13</sup> - 10 <sup>-11</sup>                                      | 10 <sup>-11</sup> - 10 <sup>-9</sup>   | 10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-7</sup>                                      | 10 <sup>-7</sup> - 1,8·10 <sup>-5</sup>                      | 1,8·10 <sup>-5</sup> - 5·10 <sup>-5</sup>                                 | 5·10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-3</sup>                        |
| Sichtbar und IR-A               | 400 - 700               | 7 mm                         | H = 1,5·10 <sup>-4</sup> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup>                 | H = 2,7·10 <sup>4</sup> ·t <sup>0,75</sup> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup>                 | H = 5·10 <sup>-3</sup> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup>                 |  | H = 18t <sup>0,75</sup> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup>                 |  |
|                                 | 700 - 1 050             |                              | H = 1,5·10 <sup>-4</sup> ·C <sub>A</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> | H = 2,7·10 <sup>4</sup> ·t <sup>0,75</sup> ·C <sub>A</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> | H = 5·10 <sup>-3</sup> ·C <sub>A</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> |  | H = 18t <sup>0,75</sup> ·C <sub>A</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> |  |
|                                 | 1 050 - 1 400           |                              | H = 1,5·10 <sup>-3</sup> ·C <sub>C</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> | H = 2,7·10 <sup>5</sup> ·t <sup>0,75</sup> ·C <sub>C</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> | H = 5·10 <sup>-2</sup> ·C <sub>C</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> |  | H = 90t <sup>0,75</sup> ·C <sub>C</sub> ·C <sub>E</sub> J·m <sup>-2</sup> |  |
| IR-B und IR-C                   | 1 400 - 1 500           | siehe c                      | E = 10 <sup>12</sup> W·m <sup>-2</sup>                                     |  | H = 10 <sup>3</sup> J·m <sup>-2</sup>                                    |  |   | H = 5,6·10 <sup>3</sup> ·t <sup>0,25</sup> J·m <sup>-2</sup> |
|                                 | 1 500 - 1 800           |                              | E = 10 <sup>13</sup> W·m <sup>-2</sup>                                     |  | H = 10 <sup>4</sup> J·m <sup>-2</sup>                                    |  |   |  |
|                                 | 1 800 - 2 600           |                              | E = 10 <sup>12</sup> W·m <sup>-2</sup>                                     |  | H = 10 <sup>3</sup> J·m <sup>-2</sup>                                    |  |   | H = 5,6·10 <sup>3</sup> ·t <sup>0,25</sup> J·m <sup>-2</sup> |
|                                 | 2 600 - 10 <sup>6</sup> |                              | E = 10 <sup>11</sup> W·m <sup>-2</sup>                                     |  | H = 100 J·m <sup>-2</sup>  | H = 5,6·10 <sup>3</sup> ·t <sup>0,25</sup> J·m <sup>-2</sup> |   |  |

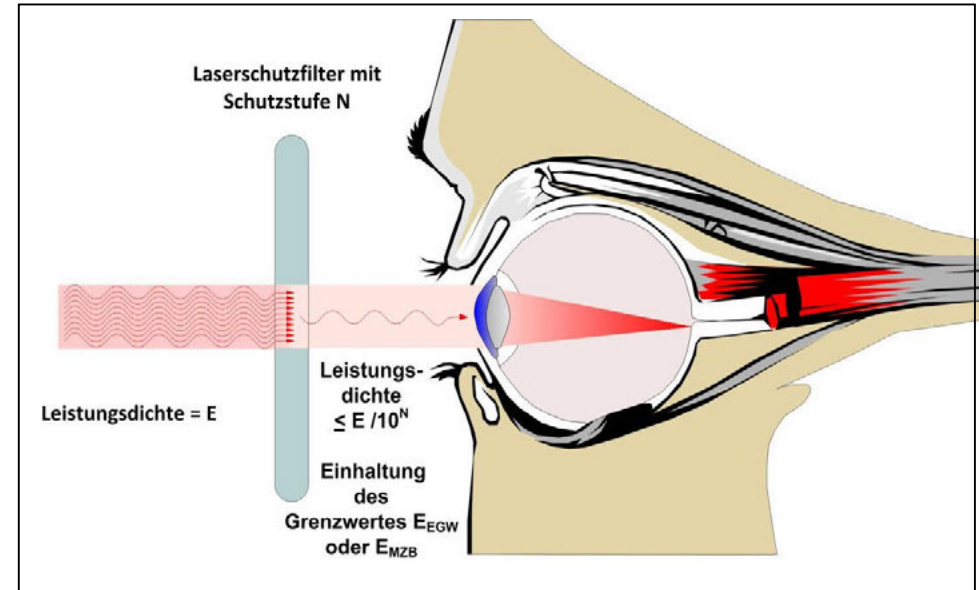
**a** Sind für eine Wellenlänge zwei Expositionsgrenzwerte aufgeführt, so ist unter Einbeziehung der zugeordneten Messverfahren das Ergebnis anzuwenden, welches den strengereren Wert darstellt.  
Expositionsgrenzwerte für Zeiten unterhalb 10<sup>-13</sup> s werden dem jeweiligen Expositionsgrenzwert bei 10<sup>-13</sup> s, ausgedrückt in Einheiten der Bestrahlungsstärke, gleichgesetzt.

**b** Die in der Tabelle angegebenen Werte gelten für einzelne Laserimpulse. Bei mehrfachen Laserimpulsen müssen die Laserimpulsdauern, die innerhalb der Expositionsdauer t liegen, addiert werden. Die daraus resultierende Expositionsdauer muss in die Formel  $H = 5,6 \cdot 10^3 \cdot t^{0,25}$  für t eingesetzt werden.

**c** Wenn  $1\,400\text{ nm} \leq \lambda < 10^5\text{ nm}$ , dann gilt:  
- für  $t \leq 0,35\text{ s}$ <sup>3)</sup>, D = 1 mm  
- für  $0,35\text{ s} < t < 10\text{ s}$ ,  $D = 1,5 \cdot t^{0,375}\text{ mm}$ .  
Wenn  $10^5\text{ nm} \leq \lambda < 10^6\text{ nm}$ , dann ist D = 11 mm.

# Beispiele für die Notwendigkeit der Fachkunde bei der Auswahl von Laserschutzbrillen

- Die Bestimmung von Laserschutzbrillen erfolgt gemäß der Norm **DIN EN 207 (04/2012)** oder BGI 5092 (10/2007)
- Hierbei werden mit komplexen Auswahl- und Berechnungsverfahren Schutzstufen für Einwirkungen von Dauerstrichlasern und gepulsten Lasern ermittelt.
- Beispiel Kennzeichnung von Laserschutzbrillen:



**1064 D LB8 + I LB9 X S**

Wellenlänge  
in nm (1064 nm)

Schutzstufe für Dauerstrichlaser LB8

Schutzstufe für gepulste Laser LB9  
(I → Impuls, weitere mögliche  
Abkürzungen R, M, F)

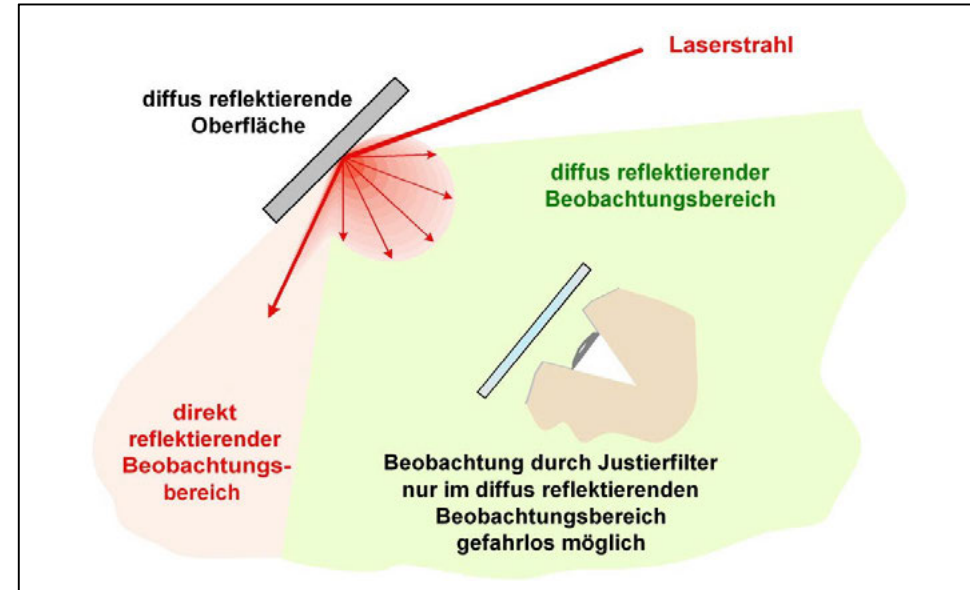
Kennbuchstabe (n) des Herstellers

Kennzeichen für mechanische Festigkeit  
(falls zutreffend), hier: Grad S, Erhöhte  
Festigkeit nach DIN EN 166



# Beispiele für die Notwendigkeit der Fachkunde bei der Auswahl von Laser-Justierbrillen

- Die Bestimmung von Laser-Justierbrillen erfolgt gemäß der Norm **DIN EN 208 (04/2010)** oder BGI 5092 (10/2007)
- Hierbei werden mit komplexen Auswahl- und Berechnungsverfahren Schutzstufen für Einwirkungen von Dauerstrichlasern und gepulsten Lasern ermittelt.
- Beispiel der Kennzeichnung von Laser-Justierbrillen:



1W 2·10<sup>-4</sup> 515 RB3 X ZZ S

Max. Laserleistung ←  
Max. Impulsenergie in J ←  
Wellenlänge in nm ←  
Schutzstufe RB3 ←  
Kennbuchstabe (n) des Herstellers ←  
Zertifizierungszeichen der Prüfstelle ←  
Kennzeichen für mechanische Festigkeit ←

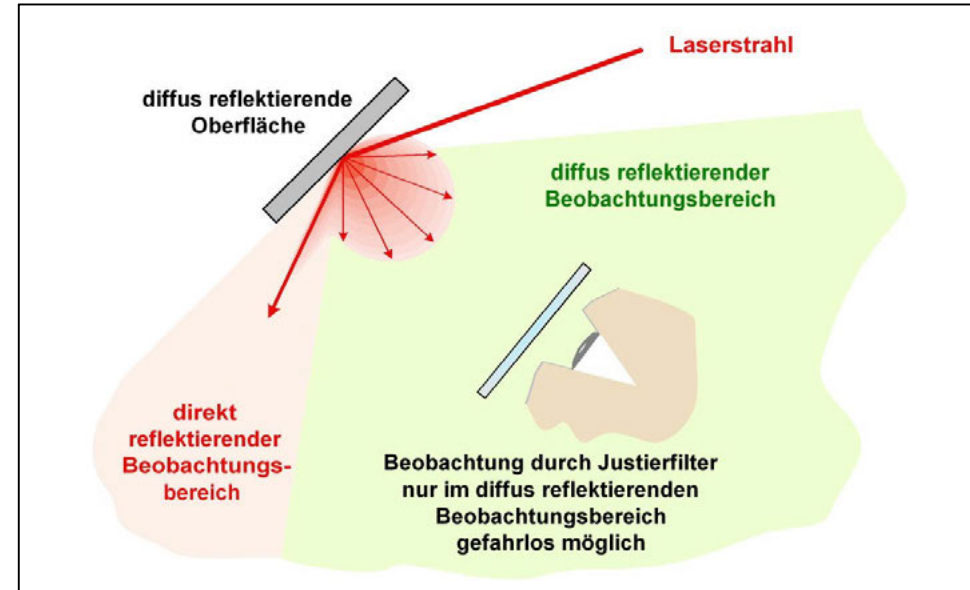


## Hinweis für die Benutzung von Laser-Justierbrillen

Laser-Justierbrillen sind so ausgelegt, dass die Strahlungsleistung auf Werte unter 1 mW reduzieren (Grenzwert der Laser Klasse 2).

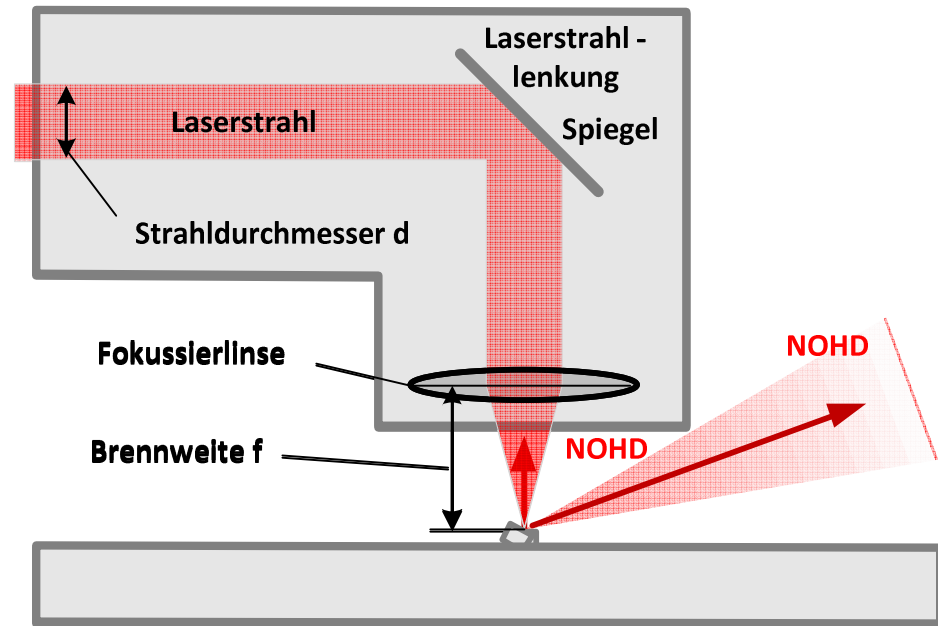
Deshalb ist ein Blick in den direkten Strahl bzw. in den direkt reflektierten Strahl zu vermeiden.

Beim versehentlichen Hineinsehen ist eine Abwendung vom Laserstrahl notwendig.

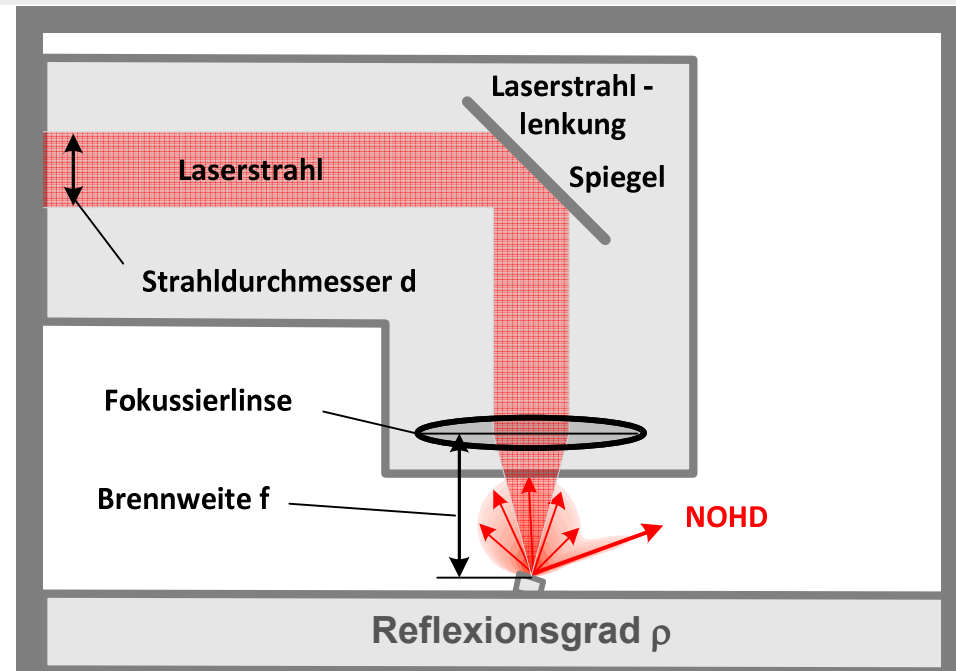




- Bei Materialbearbeitungslasern werden in der Regel stark fokussierte Laserstrahlen erzeugt. Direkte Reflektionen werden schon durch die Auswahl und Konstruktion der Maschine vermieden, da die Bearbeitungsenergie hierdurch vom Material abgeleitet wird.

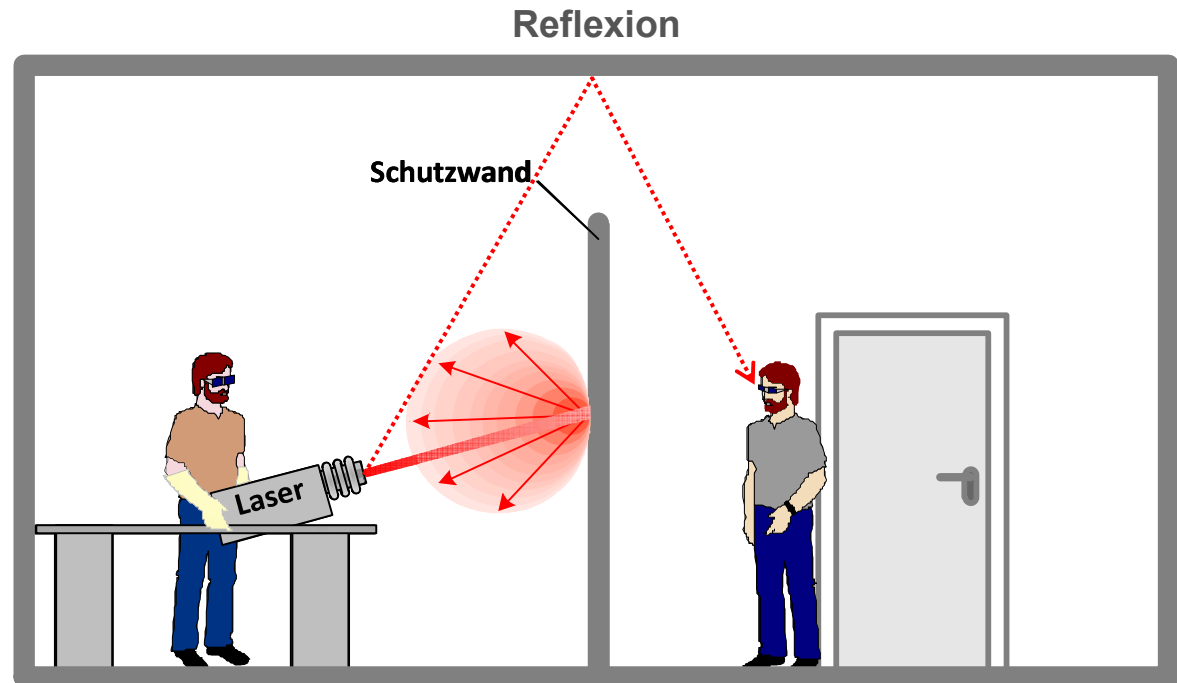


- Bei Materialbearbeitungslasern werden in der Regel stark fokussierte Laserstrahlen erzeugt. Direkte Reflektionen werden schon durch die Auswahl und Konstruktion der Maschine vermieden, da die Bearbeitungsenergie hierdurch vom Material abgeleitet wird.
- Im Regelfall liegt eine diffuse Reflexion mit möglichst niedrigem Reflexionsgraden vor.
- Der Hersteller hat vorrangig technische Schutzmaßnahmen wie, Schutzeinhausungen (ggf. mit Sichtfenstern) einzusetzen, so dass im Normalbetrieb die Schutzklasse 1 vorliegt.
- Andernfalls ist zu ermitteln, welche Körperteile bzw. Gliedmaßen in den Bearbeitungsbereich eindringen können und welche Schutzmittel bzw. welche PSA zum Einsatz kommen.



# Beispiele Einrichten eines Laserbereiches

- möglichst technische Schutzmaßnahmen einsetzen
- andernfalls Benutzung von PSA z.B. in Form von Laserschutzbrillen
- Benutzung von Schutzwänden oder Schutzvorhängen
- Einrichten von Laserbereichen in separaten Räumen mit optischer Signalisierung des Laserbetriebs
- Beachtung von möglichen Auskoppelungen der Laserstrahlung aufgrund Reflexionen durch spiegelnde Oberflächen oder Gegenständen und Auskoppelungen durch Fenster

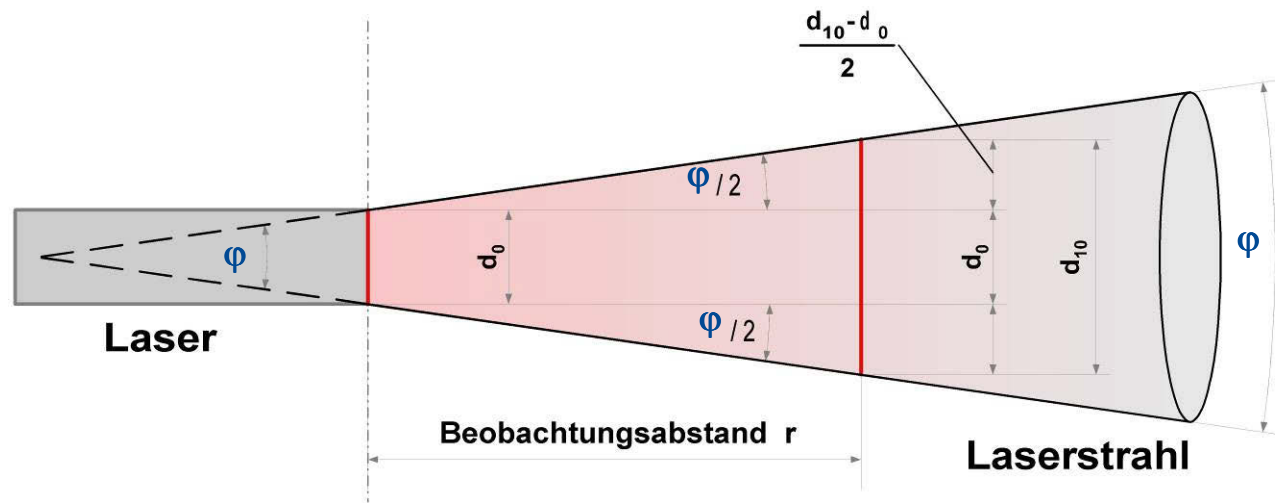


Der Arbeitgeber hat Beschäftigten nach § 11 ArbSchG bzw. § 5a ArbMedVV arbeitsmedizinische Vorsorge zu ermöglichen, sofern ein Gesundheitsschaden im Zusammenhang mit der Tätigkeit nicht ausgeschlossen werden kann (Wunschvorsorge). Pflicht- oder Angebotsuntersuchungen sind für Laserstrahlungsexponierte nicht vorgeschrieben.

| Wellenlängenbereich | Auge   | Haut   | TROS-Laserstrahlung<br>Allg. Teil<br>Tab. A3.1 Mögliche<br>Auswirkungen von<br>optischer Strahlung<br>auf Auge und Haut |
|---------------------|--|--|---|
| UV-C                | Fotokeratitis<br>Fotokonjunktivitis                            | Erythem<br>Präkanzerosen<br>Karzinome  |   |
| UV-B                | Fotokeratitis<br>Fotokonjunktivitis<br>Katarakt                | Verstärkte Pigmentierung (Spätpigmentierung)<br>Beschleunigte Prozesse der Hautalterung<br>Erythem<br>Präkanzerosen<br>Karzinome |   |
| UV-A                | Katarakt   | Bräunung (Sofortpigmentierung)<br>Beschleunigte Prozesse der Hautalterung<br>Verbrennung der Haut<br>Karzinome                   |   |
| Sichtbare Strahlung | Fotochemische und<br>fotothermische Schädigung<br>der Netzhaut | Fotosensitive Reaktionen<br>Thermische Schädigung der Haut   |   |
| IR-A                | Katarakt<br>Thermische Schädigung der Netzhaut                 | Thermische Schädigung der Haut   |   |
| IR-B                | Katarakt<br>Thermische Schädigung der Hornhaut                 | Thermische Schädigung der Haut<br>Blasenbildung auf der Haut   |   |
| IR-C                | Thermische Schädigung der Hornhaut                             | Thermische Schädigung der Haut   |   |

# Ende

# Strahldivergenz – Öffnungswinkel – Numerische Apertur



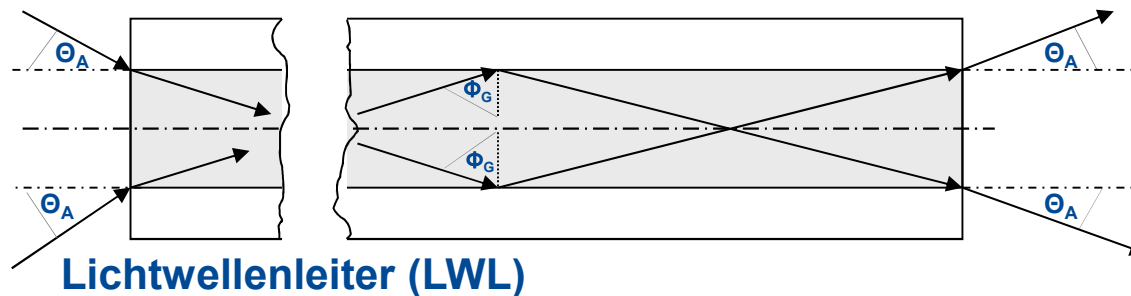
$$\varphi = 2 \arctan \frac{d_{10} - d_0}{2 r}$$

$\varphi$  – Strahldivergenz

$r$  – Beobachtungsabstand

$d_0$  – Strahldurchmesser ( $d'_{63}$ )  
an der Austrittsstelle

$d_{10}$  – Strahldurchmesser ( $d_{63}$ )  
am Beobachtungsort



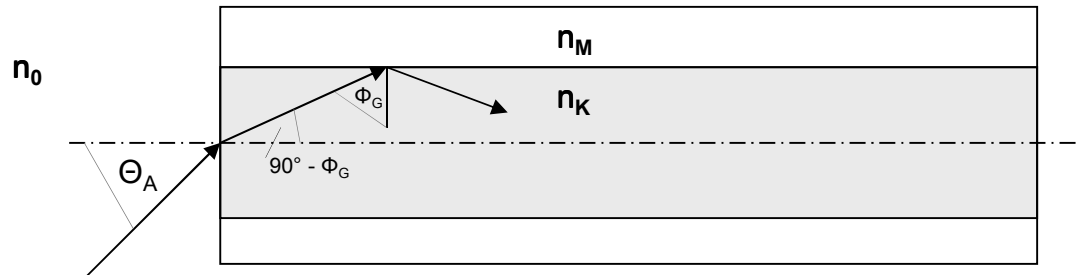
$$\Theta_A = \arcsin N_A$$

$\Theta_A$  – Akzeptanzwinkel

$N_A$  – Numerische Apertur

Die Strahldivergenz  $\varphi$  entspricht dem ganzen Öffnungswinkel und somit dem Zweifachen des Akzeptanzwinkels  $\Theta_A$  der Numerischen Apertur beim LWL.

# Herleitung des Akzeptanzwinkels



$$n_0 \sin \Theta_A = n_K \sin (90^\circ - \Phi_G)$$

Brechungsgesetz

$$\sin (90^\circ - \Phi_G) = \cos (\Phi_G)$$

$$n_0 \sin \Theta_A = n_K \cos \Phi_G$$

$$n_0 \sin \Theta_A = n_K \frac{\sqrt{(n_K^2 - n_M^2)}}{n_K}$$

$$n_0 \sin \Theta_A = \sqrt{(n_K^2 - n_M^2)}$$

mit  $n_0 = 1$

$$\sin \Phi_G = \frac{n_M}{n_K} \quad \text{Reflexion}$$

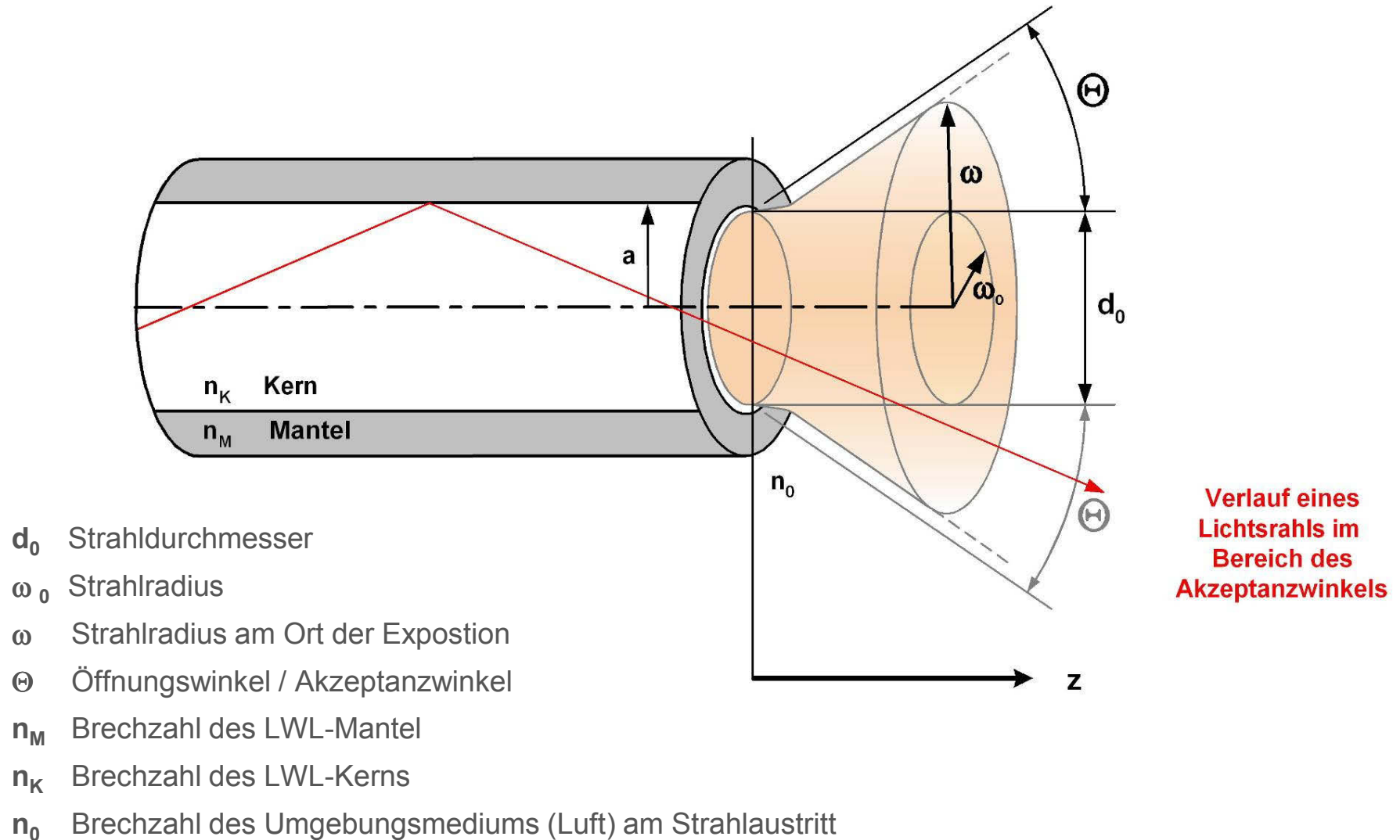
$$\sin \Phi_G = \frac{n_M}{n_K} = \frac{\text{Gegenkathete (GK)}}{\text{Hypothenuse (HY)}}$$

$$\cos \Phi_G = \frac{\text{Ankathete (AK)}}{\text{Hypothenuse (HY)}} = \frac{\sqrt{(n_K^2 - n_M^2)}}{n_K}$$

Pythagoras:

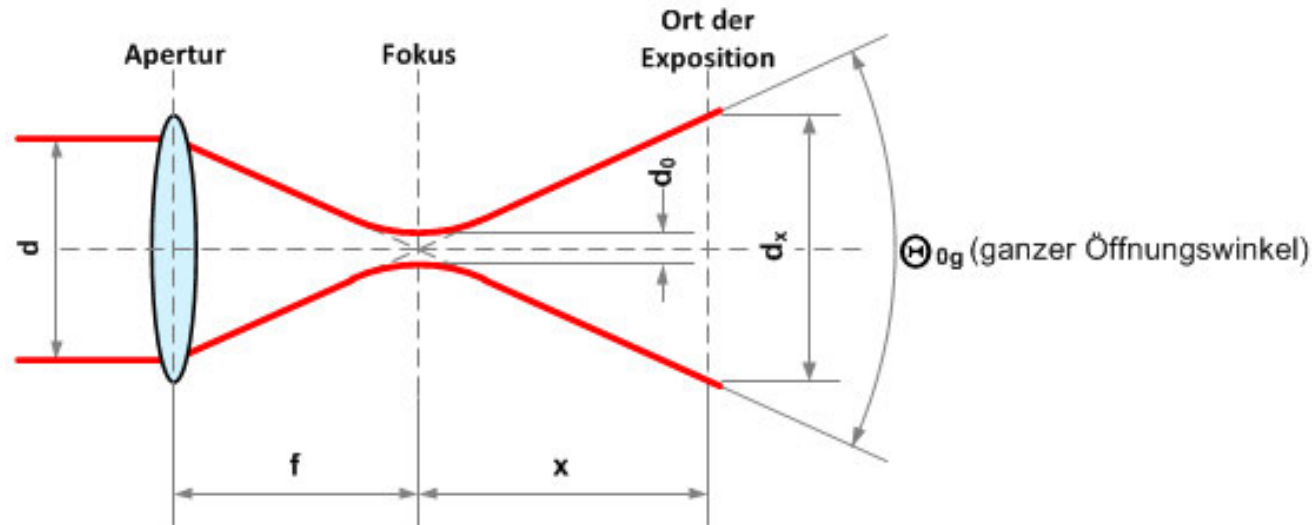
$$HY^2 = AK^2 + GK^2 \rightarrow AK = \sqrt{(HY^2 - GK^2)} \rightarrow AK = \sqrt{(n_K^2 - n_M^2)}$$

# Lichtaustritt am Lichtwellenleiter (LWL)





# Berechnung des Strahldurchmessers in der Strahlentalje bei fokussiertem Strahlengang



$\lambda$  Wellenlänge

$d$  Strahldurchmesser der Strahlungsquelle

$d_0$  Strahldurchmesser im Fokus bzw. in der Strahltaille

$d_x$  Strahldurchmesser am Ort der Exposition

$f$  Brennweite des Objektivs

$x$  Abstand zwischen dem Fokus und den Ort der Exposition

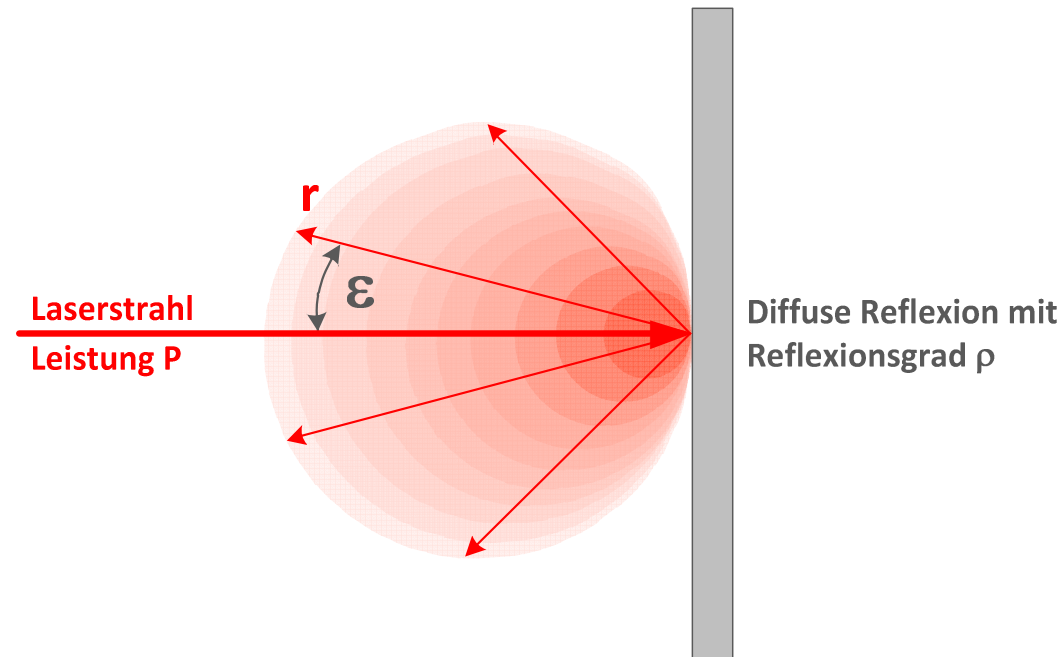
$\Theta_{0g}$  Öffnungswinkel (ganzer Öffnungswinkel)

$\omega_0$  Strahlradius im Fokus bzw. in der Strahltaille

$$d_0 = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot \Theta_{0g}}$$

$$\Theta_{0g} \approx \frac{d}{f}$$

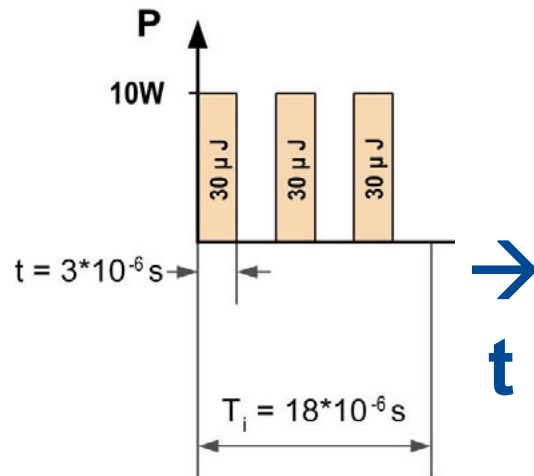
# Bestimmung des Augensicherheitsabstands NOHD bei diffuser Reflexion



- $r$  NOHD
- $\varepsilon$  Winkel gegen die Flächennormale
- $\rho$  Reflexionsgrad
- $P$  Laserleistung
- $E_{EGW}$  Expositionsgrenzwert

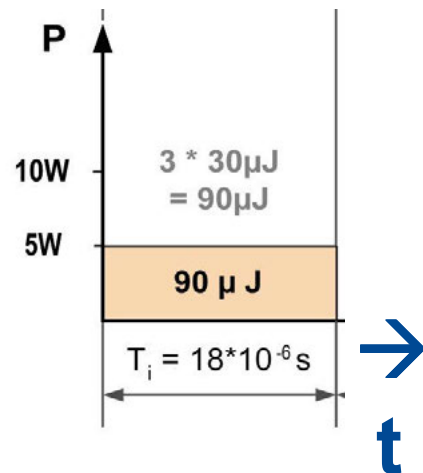
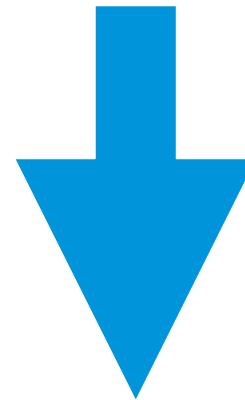
$$r = \sqrt{\rho \frac{\cos \varepsilon}{\pi} \cdot \frac{P}{E_{EGW}}}$$

# Beispiel Impulsgruppensummierung



$$\nu = 167\text{ kHz}$$

$$T = 1/167\text{kHz} = 6 \cdot 10^{-6}\text{s}$$



$$\nu = \nu_{\text{max}} = 1 / 18 \cdot 10^{-6}\text{s} = 55\text{ kHz}$$