

# Anmerkung zum Laserstrahlenschutz von Klasse-2-Lasern

von  
Axel Donges

Fachhochschule und Berufskollegs NTA Prof. Dr. Grübler gGmbH,  
Seidenstraße 12-35, D-88316 Isny im Allgäu, eMail: [ADonges@web.de](mailto:ADonges@web.de)

erschienen in:

Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht 2/56 (2003) S. 84-86

## Zusammenfassung

Der Lidschlussreflex stellt keinen sicheren Schutz vor Laserstrahlung der Klasse 2 und 3A dar. Es ist daher zu erwarten, dass die bestehenden Laserstrahlenschutzvorschriften modifiziert werden.

### 1. Warum ist Laserstrahlung so gefährlich?

Die Gefahren, die von Lasern ausgehen, sind vielfältig<sup>1</sup>. Beschränken wir uns jedoch auf die für den Schulunterricht zugelassenen Laser (sichtbarer Spektralbereich, Leistung  $\leq 1$  mW), so reduziert sich das Gefahrenpotenzial im Wesentlichen auf eine mögliche Schädigung der Netzhaut des Auges.

Warum ist Laserstrahlung, im Vergleich zu thermischer Strahlung, so gefährlich für die Netzhaut? Zur Beantwortung dieser Frage berechnen wir zunächst die Energieflussdichte auf der Netzhaut des Auges, wenn eine kugelförmig angenommene thermische Lichtquelle (z.B. Glühlampe oder Sonne) betrachtet wird. Die Fläche des kreisförmigen Bild der thermischen Lichtquelle auf der Netzhaut berechnet sich mit den Gesetzen der geometrischen Optik zu

$$A_{therm} = \pi \left( \frac{fR}{g} \right)^2 \quad (1)$$

( $f$ : Brennweite des nicht-akkommodierten Auges = Bildweite,  $R$ : Radius der Lichtquelle,  $g$ : Abstand zwischen Lichtquelle

und Auge). Da auf die Netzhaut nur der Bruchteil

$$\frac{\pi \frac{D^2}{4}}{4\pi g^2} = \left( \frac{D}{4g} \right)^2 \quad (2)$$

( $D$ : Durchmesser der Pupillenöffnung des Auges) der isotrop emittierten Lichtleistung  $P_{therm}$  gelangt, berechnet sich die Energieflussdichte im Bereich des geometrisch-optischen Bildes zu

$$I_{therm} = \left( \frac{D}{4fR} \right)^2 \frac{P_{therm}}{\pi}. \quad (3)$$

Berechnen wir nun die entsprechenden Größen im Fall von kohärenter Laserstrahlung, wobei zur Vereinfachung angenommen wird, dass der Laserstrahldurchmesser dem Pupillendurchmesser entspricht (ungünstigster Fall<sup>2</sup>). Wird der Laserstrahl durch eine ebene Welle approximiert, so entsteht bei entspanntem Auge in der Netzhautenebene das FRAUNHOFER-Beugungsbild der Pupille, das näherungsweise durch

<sup>1</sup> Gefahr durch elektrischen Strom, Brand- und Verbrennungsgefahr, Gefahr durch Implosion oder Explosion der Laserröhre, Gefährdung durch Kühlmittel usw.

<sup>2</sup> Ist der Laserstrahldurchmesser größer als der Pupillendurchmesser, so gelangt ein Teil der Laserstrahlung nicht auf die Netzhaut. Ist der Laserstrahldurchmesser kleiner als der Pupillendurchmesser, so wird die Fläche des weiter unten berechneten Beugungsscheibchens (Gl.(4)) größer. Beides führt zu einer Verringerung der im Weiteren zu berechnenden Energieflussdichte.

einen kreisrunden Fleck (so genanntes Beugungsscheibchen) mit der Fläche

$$A_L = \pi \left( 1,22 \frac{\lambda f}{nD} \right)^2 \quad (4)$$

( $\lambda$ : Vakuumwellenlänge der Laserstrahlung,  $n$ : Brechzahl im Augeninnern) beschrieben werden kann [1]. Für die (über das Beugungsscheibchen gemittelte) Energieflussdichte gilt somit

$$I_L = \frac{P_L}{A_L} = \left( \frac{nD}{1,22\lambda f} \right)^2 \frac{P_L}{\pi} \quad (5)$$

( $P_L$ : Laserleistung). Beispiel: Mit  $\lambda = 633$  nm,  $f = 2,3$  cm,  $n = 1,34$ ,  $D = 7,0$  mm und  $P_L = 1,0$  mW berechnet sich die Fläche des Beugungsscheibchens zu  $1,1 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup> und die dazugehörige Energieflussdichte zu 89 MW/m<sup>2</sup>.

Das Verhältnis der Energieflussdichten  $I_L/I_{therm}$  auf der Netzhaut beträgt somit bei gleichen Strahlungsleistungen

$$\frac{I_L}{I_{therm}} = \frac{A_{therm}}{A_L} = \left( \frac{4nR}{1,22\lambda} \right)^2. \quad (6)$$

Mit realistischen Zahlenwerten ergibt sich stets  $I_L/I_{therm} \gg 1$  (Beispiel:  $R = 3,0$  cm,  $n = 1,34$  und  $\lambda = 633$  nm liefert  $I_L/I_{therm} = A_{therm}/A_L = 4,3 \cdot 10^{10}$ ). Damit wird der Grund für das hohe Gefährdungspotenzial der Laserstrahlung offensichtlich: die gute Fokussierbarkeit der Laserstrahlung.

## 2. Gefahrenklassen

Die Gefährlichkeit von Laserstrahlung wird durch ihre Gefahrenklasse zum Ausdruck gebracht. Zur Zeit unterscheidet man fünf Gefahrenklassen: 1, 2, 3A, 3B und 4<sup>3</sup> [2]. Das Gefahrenpotenzial steigt von 1 nach 4 an. Laser der Klasse 1 sind i.d.R. für den Unterricht ungeeignet, da sie eine zu geringe Ausgangsleistung haben oder die Laserstrahlung so abgeschirmt ist, dass sie einer Beobachtung nicht zugänglich ist. Laser der Klasse 3A, 3B und 4 dürfen im Schulunterricht nicht eingesetzt werden, da von ihnen eine zu große Gefahr ausgeht.

<sup>3</sup> Die neuen geplanten Laserklassen lauten (nach Basis-Norm EN 60825-1): 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B, 4.

Für den Schulunterricht kommen daher nur Laser der Klasse 2 in Betracht. Laser der Klasse 2 senden sichtbare Laserstrahlung im Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm aus. Ihre Ausgangsleistung darf im Dauerstrichbetrieb 1 mW nicht überschreiten<sup>4</sup>.

Beim Betrieb von Klasse-2-Lasern in der Schule sind eine ganze Reihe von Auflagen zu beachten [2]. So muss u.a. durch zusätzliche Leistungsbegrenzung dafür gesorgt werden, dass alle Versuche und Vorführungen mit der jeweils geringsten notwendigen Laserleistung durchgeführt werden.

## 3. Bedeutung des Lidschlussreflexes

Der Schutz vor Klasse-2-Laserstrahlung wird üblicherweise durch Abwendungsreaktionen einschließlich des Lidschlussreflexes bewirkt. Für die Berechnung der Maximalleistung eines Klasse-2-Lasers geht man davon aus, dass bei zufälligem, kurzzeitigen Hineinschauen in einen sichtbaren Laserstrahl der Lidschlussreflex nach spätestens 250 ms einsetzt und so das Auge vor einem Schaden bewahrt wird. Dies wird auch für Laser der Klasse 3A angenommen. Diese emittieren ebenfalls zwischen 400 und 700 nm. Sie dürfen jedoch im Dauerstrichbetrieb eine Ausgangsleistung bis 5 mW haben. Der Lidschlussreflex wird auch in diesem Fall zum Schutz des Auges als ausreichend angesehen, weil der Klasse-3A-Laserstrahl einen so großen Querschnitt aufweist, dass die Intensität einen kritischen Wert von 25 W/m<sup>2</sup> nicht überschreitet [2].

## 4. Untersuchungen zum Lidschlussreflex

Die Sicherheitsphilosophie der Laserklassen 2 und 3A beruht auf dem Lidschlussreflex, der nach spätestens 250 ms das Auge vor der Laserstrahlung schützen soll. Untersuchungen zum Lidschlussreflex wurden bisher nur in geringem Umfang veröffentlicht [3]. In einer 1953 veröffentlichten

<sup>4</sup> Unterhalb von 0,39  $\mu$ W geht ein Laser der Klasse 2 in einen Laser der Klasse 1 über.

Studie [4], die zu der damaligen Zeit mit inkohärentem Licht durchgeführt wurde, wurde berichtet, dass unter bestimmten Bedingungen nicht bei allen Testpersonen ein Lidschlussreflex auftrat.

In neuerer Zeit wurden mit kommerziellen Blitzlichtgeräten (ebenfalls inkohärente Strahlung) Untersuchungen zum Lidschlussreflex durchgeführt [5]. Die optische Stimulation entsprach dabei derjenigen eines Klasse-2-Lasers mit 1 mW Ausgangsleistung. Es zeigte sich, dass etwa 13 % der 55 Testpersonen, die leicht schräg von der Seite überraschend angeblitzt wurden, bei einer Pulsdauer von 250 ms keinen Lidschlussreflex zeigten. Wurden die Lichtblitze nach jeweils 30 s wiederholt, trat bei etwa 25 % der Probanden kein Lidschlussreflex auf. Wurde ein Lidschlussreflex ausgelöst, so setzte er nach etwa 80 bis 110 ms ein.

Untersuchungen des durch Laserstrahlung ausgelösten Lidschlussreflexes wurden erst kürzlich begonnen [6]. Ohne allzu sehr ins Detail zu gehen, ergaben sich bisher die folgenden Resultate, die mit gepulsten Lasern (Pulsdauer 250 ms) erzielt wurden [7, 8]:

- Bei insgesamt 4 getesteten Personen konnte bei keiner einzigen bei einer Wellenlänge von 670 nm und einer Leistung von 1 mW ein Lidschlussreflex ausgelöst werden.
- Mit einem anderen Laser (Wellenlänge 635 nm, Leistungen 0,8 mW bis 1 mW) ließ sich nur bei einem von 19 Probanden ein Lidschluss nachweisen<sup>5</sup>. Unterhalb von 0,8 mW konnte bei keiner getesteten Person (von insgesamt 12) ein Lidschlussreflex stimuliert werden.
- Bei Untersuchungen mit einem frequenzverdoppelten Nd-YAG-Laser (Wellenlänge 532 nm) ließen sich mit Laserleistungen von sowohl 0,8 (12 Probanden) als auch 1 mW (48 Probanden) nur bei jeweils ca. 17 % der Pro-

---

<sup>5</sup> Es konnte jedoch nicht definitiv festgestellt werden, ob es sich bei diesem Lidschluss um einen Lidschlussreflex handelte oder ob ein natürlicher Lidschlag vorlag.

banden Lidschlussreflexe auslösen. Dieser vergleichsweise hohe Wert - der für Schutzzwecke aber immer noch viel zu gering ist - ist auf die hohe spektrale Empfindlichkeit des Auges in diesem Wellenlängenbereich zurückzuführen.

## 5. Resümee

Der Lidschlussreflex lässt sich - entgegen der bisherigen Annahme - mit Lasern der Klasse 2 kaum oder nur viel zu selten auslösen. Gerade die in den Schulen weitverbreiteten HeNe-Laser (Wellenlänge 633 nm) führen fast nie zu einem rechtzeitigen Lidschlussreflex. Man muss daher davon ausgehen, dass der Lidschlussreflex bei einem Klasse-2- bzw. Klasse-3A-Laser erst dann ausgelöst wird, wenn der maximal zulässigen Bestrahlungswerte des Auges überschritten ist bzw. wenn die Netzhaut bereits geschädigt ist. Der Lidschlussreflex stellt somit keinen sicheren Schutzmechanismus dar! Es ist daher zu erwarten, dass die bestehenden Laserschutzvorschriften modifiziert werden. Für den Unterricht bedeutet dies, noch mehr als bisher, auf den Laserstrahlenschutz zu achten.

## 6. Literatur

- [1] Axel Donges, Reinhard Noll: Lasermeßtechnik. Grundlagen und Anwendungen. Heidelberg: Hüthig (1993), S. 37
- [2] Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ vom 1. Oktober 1988 i.d.F. vom 1. Januar 1997 mit Durchführungsanweisung vom Oktober 1995 (BGV B 2 bzw. GUV 2.20)
- [3] Hans-Dieter Reidenbach: Sicherer Umgang mit Laserstrahlung. Die BG – Fachzeitschrift für Arbeitssicherheit, Gesundheitsschutz und Unfallsicherung (November 2001), S. 588-592
- [4] Geratewohl, S.J., Strughold, H.: Motoric response of the eyes when exposed to light flashes of high intensities and short durations. Journal of Aviation Medicine 24 (1953), S. 200-207
- [5] Reidenbach, H.-D., Wagner, A.: Ein Beitrag zum Lidschlussreflex bei inkohärenter optischer Strahlung. 31. Jahrestag d.

Fachverbandes f. Strahlenschutz „NIR 99“, Band 2, Köln: TÜV-Verlag GmbH (1999), S. 935-946

[6] BAuA-Forschungsprojekt F 1775: Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund 2000

[7] Reidenbach, H.-D., Warmbold, H., Hofmann, J., Dollinger, K.: First Experimental Results on Eye Protection by the Blink Reflex for Laser Class 2. Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering 46 (2001), Ergänzungsband 1, S. 428-429

[8] Reidenbach, H.-D., Hofmann, J., Dollinger, K., Warmbold, H.: Umgang mit Lasern der Klasse 2: Wie sicher schützt der Lidschlussreflex? StrahlenschutzPRAXIS 7, H.3 (2001), S. 41-44

Zum Autor: Prof. Dr. Axel Donges studierte Physik an der TU Darmstadt. Seit 1985 unterrichtet er Physik an dem Berufskolleg für Physikalisch-technische Assistenten und an der Fachhochschule der NTA Prof. Dr. Grübler gGmbH in Isny im Allgäu.