

**NIR 2004 Tagungsbericht**

# Generelles Konzept zur Gefährdungsbeurteilung und zur Bestimmung der scheinbaren Quelle bei Laser und optischer Strahlung

Karl Schulmeister, Sandra Althaus, Ulfried Grabner und Georg Vees

Bitte melden Sie sich für unseren **Laser, LED & Lampen-Sicherheit NEWSLETTER**  
(ca. 4 mal pro Jahr) an, um Infos über neue Downloads zu erhalten:  
<http://laser-led-lamp-safety.seibersdorf-laboratories.at/newsletter>

Diese Veröffentlichung wird als PDF-Datei von der Seibersdorf Labor GmbH mit der Erlaubnis der TÜV Media GmbH zur Verfügung gestellt.

Die Weitergabe an Dritte ist nicht gestattet.

Die PDF-Datei kann von <http://laser-led-lamp-safety.seibersdorf-laboratories.at> heruntergeladen werden.

## Quelleninformation

Titel: *Generelles Konzept zur Gefährdungsbeurteilung und zur Bestimmung der scheinbaren Quelle bei Laser und optischer Strahlung*

Autoren: *Schulmeister K, Althaus S, Grabner U, Vees G*

Tagungsbericht NIR 2004, Herausgeber: Hans-Dieter Reidenbach, Klaus Dollinger, Joachim Hofmann  
TÜV-Verlag GmbH, Köln, 2004  
Seiten 783-792

# GENERELLES KONZEPT ZUR GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG UND ZUR BESTIMMUNG DER SCHEINBAREN QUELLE BEI LASER UND OPTISCHER STRAHLUNG

## GENERAL HAZARD ANALYSIS CONCEPT AND DETERMINATION OF THE APPARENT SOURCE FOR LASER AND OPTICAL RADIATION

Karl Schulmeister, Sandra Althaus, Ulfried Grabner und Georg Veas

ARC Seibersdorf research, Seibersdorf, AUSTRIA

**Zusammenfassung** — Derzeitige Messvorschriften für die Klassifizierung von Lasergeräten geben die Anordnung der Messblende in einem Abstand relativ zum Ort der scheinbaren Quelle an. Es wird gezeigt, dass dieses Konzept in sich nicht schlüssig ist, da der Ort der scheinbaren Quelle für Laserstrahlen für verschiedene Positionen im Strahl unterschiedlich ist. Für das vorgestellte generelle Konzept ist der Ort der scheinbaren Quelle nicht relevant, da die zugängliche Strahlung und der Grenzwert für die zugängliche Strahlung für verschiedene Punkte im Strahl bestimmt wird und die Klassifizierung bzw. die MZB-Gefährdungsanalyse am Ort der größten Gefahr durchgeführt wird. Dies ist besonders bei Grenzwerten zur thermischen Schädigung der Netzhaut relevant, da die Größe der scheinbaren Quelle mit dem Abstand zur Strahltaile abnimmt, sodass der Grenzwert bei größeren Abständen kleiner wird. Das prinzipielle Verfahren ist sowohl für Laserstrahlung als auch für Breitbandstrahlung gültig. Die in der aktuellen Fassung der internationalen Lasersicherheitsnorm vorgesehenen Messabstände (10 cm von der scheinbaren Quelle für das freie Auge) können für Laserstrahlen mit Divergenzen kleiner als 100 mrad einen um bis zu 3,5-fach überhöhten Grenzwert ergeben, d.h. die mögliche Gefährdung unterschätzen.

**Summary** – Current measurement and test requirements for the classification of laser products specify the location of the measurement aperture relative to the location of the apparent source. We show that this concept can not be applied to laser radiation, as the location of the apparent source is different for different positions of the eye in the beam. For the general concept as discussed, the location of the apparent source is not relevant, as the accessible emission level and the accessible emission limits are determined for different positions along the beam and the comparison of emission level and emission limit is done at the “most hazardous position”. This is particularly relevant for the retinal thermal hazard, as the angular subtense of the apparent source decreases with increasing distance to the beam waist, reducing the emission limit. The principle can be applied not only to laser radiation but also to LED and broadband incoherent radiation. A measurement distance for the naked eye of 10 cm can result in values for the angular subtense of the apparent source which is up to a factor of up 3,5 too high, i.e. underestimates the risk in comparison to the most hazardous position.

**Schlüsselwörter** — Laser, scheinbare Quelle, Klassifizierung, Gefährdung, Messung  
**Keywords** — Laser, apparent source, classification, hazard, measurement

## 1. Einleitung

Sowohl für die Klassifizierung von Lasergeräten nach IEC 60825-1 wie auch für eine Gefährdungsanalyse einer bestimmten Bestrahlung des Auges oder der Haut werden gemessene oder berechnete Emissions- bzw. Bestrahlungsniveaus mit dem jeweiligen Grenzwert verglichen:

Bestrahlung (Emission) < Grenzwert? (1)

Bei der Klassifizierung wird die zugängliche Strahlung (Emission) bestimmt und mit den Grenzwerten für die zugängliche Strahlung (GZS) der verschiedenen Klassen verglichen. Die zugängliche Strahlung wird hierbei als Leistung oder Energiewert, der durch eine Blende mit vorgegebenem Durchmesser tritt, bestimmt. Wenn der Strahldurchmesser am Ort der Messblende größer ist als der Durchmesser der Messblende, ist die zugängliche Strahlung kleiner als die Leistung des Laserstrahls. Für eine Gefährdungsanalyse wird die Exposition am Ort der Bestrahlung (des Auges oder Haut) bestimmt und mit den maximal zulässigen Bestrahlungswerten (MZB-Werten) für die angenommene Bestrahlungsdauer verglichen. Dieses Prinzip des Vergleichs von Bestrahlungs- bzw. Emissionswerten mit entsprechenden Grenzwerten kann auch auf Breitbandstrahlung angewendet werden.

In diesem Beitrag soll vor allem die thermische Gefährdung der Netzhaut behandelt werden. Dabei repräsentiert die mit der Messblende mit einem Durchmesser von 7 mm bestimmte zugängliche Strahlung vom Prinzip her die in das Auge eintretende Strahlung, die dann mit dem entsprechenden Grenzwert verglichen wird. Wenn man die MZB-Werte mit der Fläche der 7-mm Blende multipliziert, kann man diese Werte, die nun in Watt oder Joule gegeben sind, mit dem durch die Blende tretenden Leistungs- bzw. Energiewert vergleichen, sodass das vorgestellte geometrische Messprinzip nicht nur für die Klassifizierung von Produkten sondern auch für MZB-Wert Analysen angewendet werden kann, wenn die Fragestellung ist, ob der MZB-Wert irgendwo im Strahl überschritten werden kann.

## 2. Ausdehnung und Ort der scheinbaren Quelle

Für die thermische Schädigung der Netzhaut sind der MZB-Wert wie auch die GZS-Werte für Klasse 1, 1M, 2, 2M und 3R direkt linear von der Winkelausdehnung der scheinbaren Quelle  $\alpha$  (in mrad) abhängig (für Hintergrundinformation siehe z.B. [1]). Der Korrekturparameter der thermischen Grenzwerte  $C_6 = \alpha/1,5$  mrad beschreibt die Erhöhung des thermischen Grenzwertes relativ zum Grenzwert, der für den minimalen Winkel von 1,5 mrad gilt – wenn die in das Auge eintretende Leistung über eine größere Fläche auf der Netzhaut verteilt wird, ist sie weniger gefährlich als wenn sie auf einen minimalen Punkt konzentriert ist. Der Korrekturparameter  $C_6$  kann Werte bis zu einem maximalen Erhöhungsfaktor von 66 annehmen (für  $\alpha > 100$  mrad, wobei auch der Empfangswinkel des Messgerätes auf 100 mrad zu beschränken ist, was hier nicht weiter diskutiert wird). Die Bezeichnung des Parameters  $\alpha$  als „Ausdehnung der scheinbaren Quelle“ hat historische Gründe; was damit eigentlich beschrieben werden soll, ist der Einfluss der Ausdehnung des Netzhaut-Bestrahlungsprofils auf die Grenzwerte für die thermische Schädigung der Netzhaut. Der Parameter  $\alpha$  ist daher kein optischer Strahldurchmesser, sondern ein „thermisch effektiver“ Durchmesser der Abbildung, wie weiter unten diskutiert wird.

Da zum Zeitpunkt der Bestrahlung das menschliche Auge im Allgemeinen verschiedene Akkomodationszustände aufweisen kann, muss für die Bestimmung von  $\alpha$  (für eine bestimmte gegebene Position des Auges im Strahl) jener Akkomodationszustand berücksichtigt bzw. gefunden werden, bei dem der Durchmesser des Flecks auf der Netzhaut am kleinsten ist (siehe Abb. 1.), bzw. bei komplexeren Quellen, jener Akkomodationszustand, der das gefährlichste Abbildungsmuster erzeugt (immer bei gleicher in das Auge eintretender Leistung, die durch den Ort der Messblende im Strahl gegeben ist). Es wird dabei üblicherweise angenommen, dass das Auge im Bereich von Unendlich bis 10 cm (der Nahpunkt) akkomodieren kann. Für einen bestimmten Ort des Auges im Strahl ergibt sich bei Annahme der Variation der Brennweite  $f$  des Hornhaut-Linsen-Systems ein bestimmter Wert für  $\alpha$ , der den Winkel angibt, den die *kleinste* durch Akkomodation erreichbare Abbildung auf der Netzhaut aufspannt, der erreicht wird, wenn  $f$  einen bestimmten Wert  $f_\alpha$  annimmt. Die scheinbare Quelle ist dann dort platziert, wohin das Auge akkomodiert, um diesen minimalen Spot auf der Netzhaut zu erzeugen, und kann mit der Linsengleichung gefunden werden (die Bildweite ist der Abstand zwischen Netzhaut und Hauptebene des Auges, die mit  $f_\alpha$  berechnete Gegenstandsweite ist der Abstand der scheinbaren Quelle zum Auge). Die Betrachtungsweise, dass die scheinbare Quelle die Konjugierte zur kleinsten (gefährlichsten) Abbildung auf der Netzhaut darstellt, ist absichtlich abstrakt gewählt, da die scheinbare Quelle bei Lasern nichts mit dem physikalischen Ort der Erzeugung der Strahlung zu tun hat.

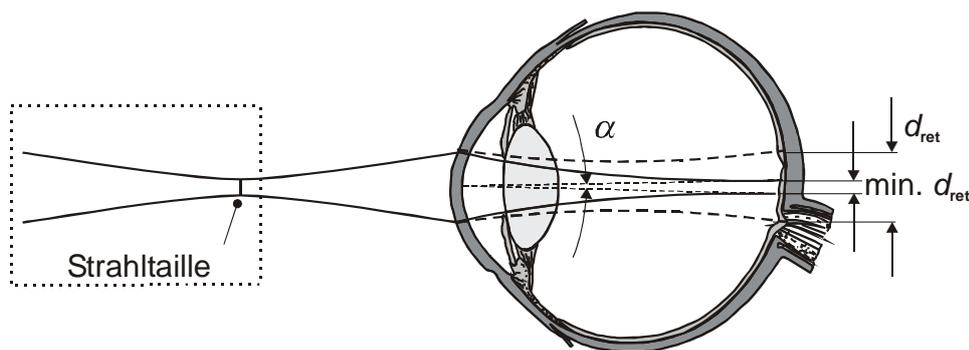


Abb. 1: Für einen gegebenen Strahl und eine bestimmte Position des Auges im Strahl ist  $\alpha$  der Winkel der kleinsten bzw. gefährlichsten Abbildung auf der Netzhaut, die durch Akkomodation erreichbar ist.

Die Bestimmung des wirklichen Bestrahlungsprofils auf der Netzhaut ist natürlich nicht möglich, kann aber entweder modelliert werden (siehe die beiden folgenden Beiträge in diesem Tagungsband) oder mit einer Linse und einer Matrixabbildung (z.B. CCD Kamera) gemessen werden, wobei die Simulation von verschiedenen Akkomodationszuständen (die Änderung der Brechkraft der Linse) durch die Änderung des Abstandes der Kamera zur Linse erfolgt. Die Position der Linse im Strahl entspricht dann der Position des Auges.

Es ist hierbei wichtig zu berücksichtigen, dass der Ort und die Größe der scheinbaren Quelle davon abhängt, wo sich das Auge befindet. Für einen gegebenen Laserstrahl ist die Strahltaille, d.h. die Stelle des Strahls, wo der Strahldurchmesser am geringsten ist, der sinnvollste Referenzpunkt. Bei Strahlen, die von der Austrittsöffnung weg divergieren, d.h. keine externe Strahltaille aufweisen, kann mit dem gegebenen Strahl trotzdem eine ‚hinter‘ dem Laser liegende imaginäre Strahltaille in Verbindung gebracht werden. In [2] wurde gezeigt, dass für Gaußsche Strahlen ( $TEM_{00}$ ) der Ort der scheinbaren Quelle dort ist, wo sich der Ursprung der Wellenfront befindet, die am Auge auftrifft, siehe Abbildung 2.

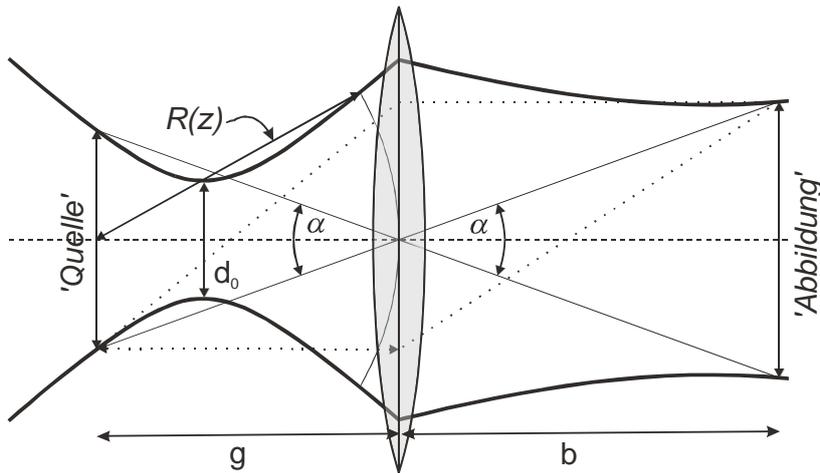


Abb. 2: Für Gaußsche Strahlen kann der (scheinbare) Ursprung der Wellenfront die auf das Auge auftrifft als Ort der scheinbaren Quelle angesehen werden (d.h. der Krümmungsradius  $R(z_1)$  der Wellenfront am Ort des Auges ist der Abstand des Auges zur scheinbaren Quelle) und der Strahldurchmesser am Ort der scheinbaren Quelle ergibt dann auch die Ausdehnung der scheinbaren Quelle (als Winkel)  $\alpha$ .

Befindet sich das Auge weit genug von der Strahltaile entfernt (außerhalb der Rayleighlänge), kann die Strahltaile als Ort der scheinbaren Quelle angesehen werden (siehe Abb. 3). Es gilt auch ferner, dass das Strahlprofil auf der Netzhaut dem Strahlprofil, welches am Ort der scheinbaren Quelle herrscht, entspricht (bei Vernachlässigung des Effektes der Pupille auf den Strahl), d.h. für den Fall dass sich das Auge genügend weit außerhalb der Rayleighlänge befindet, ist der Winkel, den der Tailendurchmesser  $d_0$  aufspannt gleich dem Winkel, den die Abbildung der scheinbaren Quelle auf der Netzhaut aufspannt, sodass  $\alpha = d_0/p$  wenn  $p$  der Abstand zwischen Strahltaile und Auge ist. Je näher das Auge zur Strahltaile rückt, desto flacher wird die Wellenfront, die auf das Auge auftrifft, und desto weiter hinten (von der Taile weg) liegt der „scheinbare Ursprung“ der Wellenfront. Dies bedeutet, dass für die Position des Auges in der Strahltaile, wo die Wellenfront eben ist und der Krümmungsradius deshalb unendlich ist, der Ort der scheinbaren Quelle im unendlichen liegt (das Auge ist entspannt, um den kleinsten bzw. gefährlichsten Fleck auf der Netzhaut zu erzeugen). Für den letzteren Fall ist  $\alpha$  gleich der Divergenz, was den größtmöglichen Winkel von  $\alpha$  darstellt –  $\alpha$  ist immer kleiner als die Divergenz, wenn das Auge akkomodieren kann und sich nicht in der Strahltaile bzw. ‚links‘ von der Strahltaile befindet! Wenn also fälschlicherweise die Divergenz für die Ausdehnung der scheinbaren Quelle verwendet wird, was immer wieder der Fall ist, dann stellt das eine Unterbewertung der Gefahr dar!

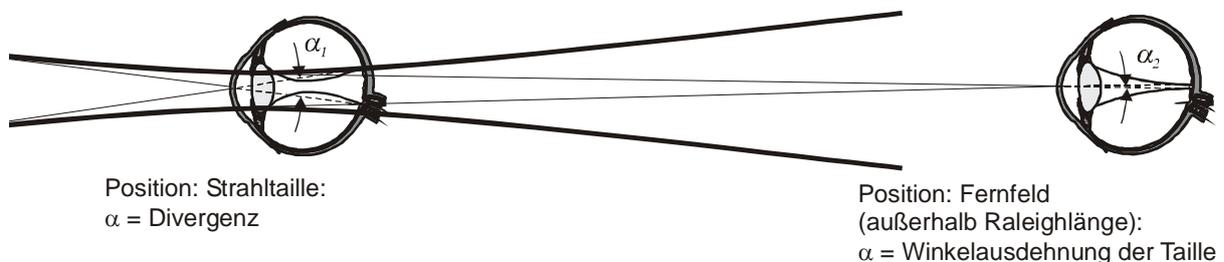


Abb. 3: Wenn sich das Auge in der Strahltaile befindet, ist  $\alpha$  gleich der Divergenz des Strahls, die scheinbare Quelle liegt im Unendlichen; für eine Position des Auges im Fernfeld kann die Strahltaile in guter Näherung als scheinbare Quelle angesehen werden, und  $\alpha$  ist entsprechend kleiner als die Divergenz.

Aufgrund der Abhängigkeit des Ortes der scheinbaren Quelle vom Bestimmungsort (vom Ort des Auges) ist eine Messvorschrift wie z.B. „die Ausdehnung der scheinbaren Quelle ist in einem Abstand von 10 cm von der scheinbaren Quelle zu bestimmen“, wie sie zur Zeit in IEC 60825-1 angegeben ist, für Laserstrahlen nicht umsetzbar bzw. nicht sinnvoll: bestimmt man den Ort der scheinbaren Quelle im Fernfeld, erhält man als Ort der scheinbaren Quelle die Strahltaille. Laut IEC 60825-1 würde man also die Größe der scheinbaren Quelle in einem Abstand von 10 cm vom Ort der Strahltaille zu bestimmen haben, und würde folgend der ersten Messung im Fernfeld die Bestimmung von  $\alpha$  in 10 cm von der Strahltaille durchführen. An dieser Position überschätzt man aber einerseits die Größe der scheinbaren Quelle, und andererseits ist in 10 cm Entfernung von der Taille der Ort der scheinbaren Quelle für die meisten Strahlen (Divergenzen  $< 100$  mrad) nicht mehr die Strahltaille. Ein in sich schlüssiges Konzept kann daher den Ort der Bestimmung der Leistung, die durch eine Blende tritt, und den Ort der Bestimmung der Ausdehnung der scheinbaren Quelle nicht relativ zum Ort der scheinbaren Quelle angeben. Bei worst-case Annahmen, z.B. dass  $C_6 = 1$  ist (unabhängig davon, wie groß  $\alpha$  wirklich ist), kann die Bestimmung der Leistung, die durch eine Blende tritt, in einem fixen Abstand zur Strahltaille erfolgen, oder einem anderen Referenzpunkt, der leicht bestimmbar ist. Wenn ein Wert von  $C_6 > 1$  verwendet werden soll, sollte die Bestimmung am Ort der größten Gefahr stattfinden, wie im folgenden Abschnitt beschrieben.

### 3. Ort der größten Gefahr

Die Leistung  $P(z)$ , die durch die 7 mm Blende tritt, und die Größe der scheinbaren Quelle  $\alpha(z)$  (von der der Grenzwert abhängt) hängen beide (in verschiedener Weise) vom Ort der Bestimmung  $z$  (d.h. vom Ort des ‚Auges‘ im Strahl) ab. Daher kann der Ort der größten Gefahr definiert werden, als der Ort im Strahl, bei dem das Verhältnis von ‚Bestrahlung‘ und ‚Grenzwert‘ maximal ist, was von Gleichung 1 abgeleitet werden kann. Die Maximierung ist von der Wellenlänge und von der zeitlichen Abgabe der Strahlung (Pulsmuster) unabhängig und betrifft rein die geometrisch vom Ort im Strahl abhängigen Größen „Leistung durch 7 mm Blende“<sup>1</sup> und  $\alpha$ . Die Maximierung durch Variation der Auswertungsposition im Laserstrahl kann angeschrieben werden als:

$$\text{Max} \left( \frac{P(z)}{\alpha(z)} \right) \rightarrow \text{Ort der größten Gefahr (maximum hazard position, MHP)} \quad (2)$$

wie schematisch in Abbildung 4 dargestellt:

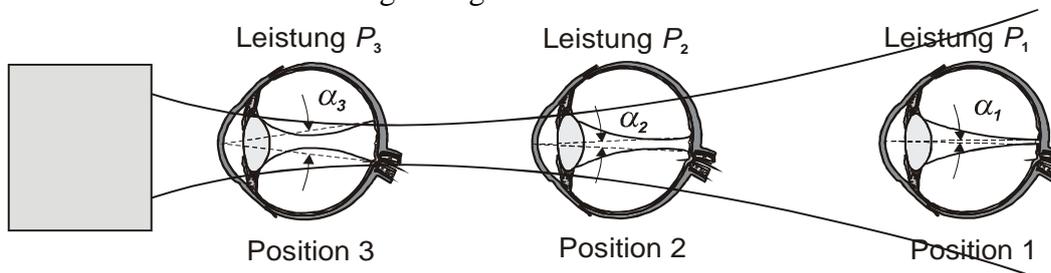


Abb. 4: Sowohl die Leistung, die durch die Messblende tritt, wie auch die Größe der scheinbaren Quelle (und deshalb der Grenzwert) hängt vom Ort der Auswertung ab. Der Ort der größten Gefahr ist dort gegeben, wo das Verhältnis von Leistung und Grenzwert am höchsten ist.

<sup>1</sup> Für große Quellen, d.h. für  $\alpha > 100$  mrad ist auch der Empfangswinkel der Leistungsbestimmung auf 100 mrad einzuschränken.

Der Vergleich der zugänglichen Strahlung mit dem Grenzwert für die Klassifizierung eines Produktes sollte am Ort der größten Gefahr durchgeführt werden. Äquivalentes gilt für eine Sicherheitsanalyse für den Vergleich der potentiellen Bestrahlung mit dem MZB Wert des Auges unter Annahme einer bestimmten Bestrahlungsdauer. Das hier diskutierte Verfahren hat den Vorteil, dass der „Ort der scheinbaren Quelle“ nicht relevant ist und nicht bestimmt werden muss – wie angemerkt, ist es nicht möglich, einem bestimmten Laserstrahl *einen* bestimmten Ort der scheinbaren Quelle zuzuordnen, d.h. die eigentlich nicht zu beantwortende Frage nach *dem Ort* der scheinbaren Quelle stellt sich nicht.

Für Gausstrahlen können die entsprechenden Parameter berechnet werden (siehe folgende Beiträge in diesem Band), für allgemeine Strahlen wird aber eine experimentelle Bestimmung notwendig sein. Diese kann z.B. durch Verwendung einer Linse und einer CCD Kamera erfolgen, wobei die Variation des Abstandes der CCD Kamera zur Linse den Akkomodationsbereich des Auges simuliert, sowie die Position der 7 mm Blende plus Linse im Strahl die Position des Auges im Strahl.

Wenn der Strahltaillendurchmesser kleiner ist als 7 mm, so dass praktisch die ganze Strahlleistung durch 7 mm tritt und die Divergenz nicht größer als ca. 100 mrad ist, ist das Prinzip relativ einfach: da bei Strahldurchmesser  $< 7$  mm die zugängliche Leistung mit größerem Abstand von der Taille nicht oder nur wenig abnimmt, die Ausdehnung der scheinbaren Quelle jedoch mit größerem Abstand von der Strahltaille (und damit der Grenzwert) deutlich stärker abnimmt, ist der Ort der größten Gefahr dort, wo der Strahldurchmesser so groß geworden ist, dass die durch die 7 mm Blende abgeschnittene Leistung das Gefahrenpotential stärker reduziert als der größere Abstand eine Reduktion von  $\alpha$  ergibt. Daher ist der Ort der größten Gefahr bei sonst gleich bleibenden Parametern von der Strahldivergenz abhängig: je geringer die Divergenz, desto weiter weg ist der Ort der größten Gefahr und desto kleiner ist auch  $\alpha$  am Ort der größten Gefahr (MHP), d.h. desto größer wird die relative Gefahr.

Vergleicht man den Wert von  $\alpha$  und der zugänglichen Strahlung, die sich bei einem Messabstand von 10 cm von der Strahltaille, wie derzeit in IEC 60825-1 gefordert, ergeben, mit den Werten die sich am MHP ergeben, so sieht man, dass in einem Abstand von 10 cm die Gefahr um bis zu einen Faktor von 3,5 unterbewertet werden kann (Abb. 5).

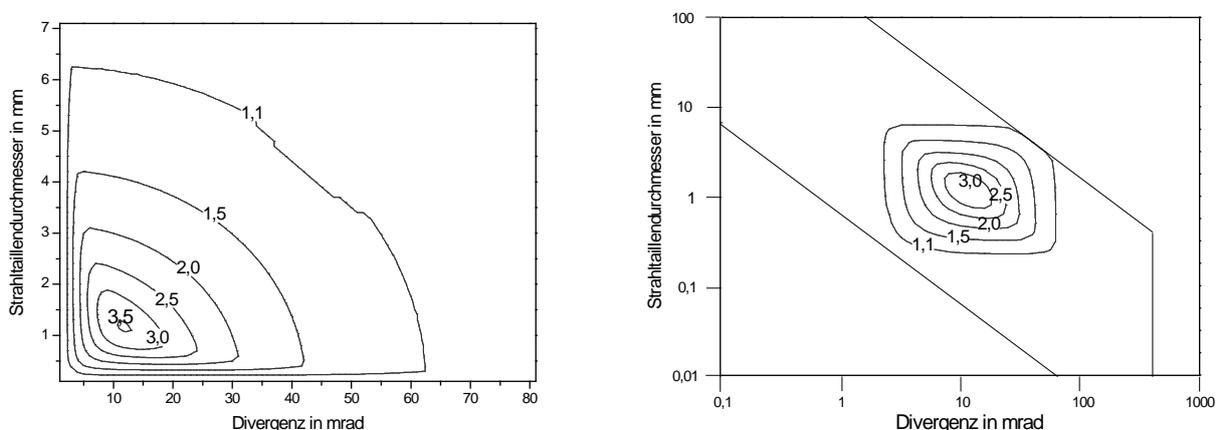


Abb. 5. Vergleich des Gefährdungsgrades bei einer Bestimmung in 10 cm Entfernung von der Taille und bei einer Bestimmung am Ort der größten Gefahr. Am Ort der größten Gefahr ist der Gefährdungsgrad bis zu einem Faktor 3,5 größer als beim derzeit in der Norm IEC 60825-1 angegebenen Abstand von 10 cm.

#### 4. Kriterium für die Bestimmung von $\alpha$ für ein gegebenes Bild

Es muss betont werden, dass es zur Zeit leider kein allgemein gültiges und exaktes Verfahren für die Bestimmung von  $\alpha$  für eine gegebene Bestrahlungsstärkeverteilung auf der Netzhaut (oder auf der CCD Kamera bei experimenteller Bestimmung) gibt. Oftmals wird die Definition des optischen Strahldurchmessers, die in IEC 60825-1 angegeben ist, für die Bestimmung von  $\alpha$  verwendet. Diese Definition des optischen Strahldurchmessers  $d_{63}$ , nämlich jene Kreisfläche, die 63 % der Gesamtleistung im Strahl enthält, hat jedoch ihren Ursprung und ihre Anwendbarkeit bei der Berechnung der maximalen Bestrahlungsstärke des Profils: bei einem Gaussprofil ergibt sich bei dieser Durchmesserdefinition die maximale Bestrahlungsstärke im Zentrum des Profils, wenn man die Gesamtleistung im Strahl durch die Fläche  $A_{63} = d_{63}^2 \pi/4$  dividiert. Diese Definition des optischen Strahldurchmessers ist in IEC 60825-1 gegeben, um damit die Gefahrenabstände (NOHD) zu berechnen, wo auch in der Norm IEC 60825-1 wieder der Parameter  $d_{63}$  verwendet wird (im NOHD Beispiel im Anhang). Diese Definition hat jedoch nicht direkt etwas mit dem Parameter  $\alpha$  zu tun. Wendet man z.B. den  $d_{63}$  Durchmesser auf ein Bild an, das einer Top-Hat Verteilung entspricht, so ergibt sich ein Durchmesser, der kleiner ist als der Durchmesser des Top-Hat, was dann überkritisch erscheint (da eine Top-Hat Verteilung eigentlich die einzige Verteilung ist, bei der die Durchmesserdefinition offensichtlich ist).

Der Parameter  $\alpha$  beschreibt, um wie viel weniger ‚gefährlich‘ eine gegebene Verteilung (um wie viel höher der Schädigungsschwellwert) im Vergleich zur minimalen Fleckgröße ist. Zur genaueren Festlegung eines Kriteriums für  $\alpha$  wären thermische Modellierung und experimentelle Untersuchungen der Schädigungsschwellen für verschiedene Abbildungsprofile auf der Netzhaut notwendig.

Eine praktikable Vorgehensweise, einer willkürlichen Verteilung einen „thermischen Durchmesser“ zuzuordnen, kann von der derzeitigen Fassung der IEC 60825-1 jedoch abgeleitet werden. Im Abschnitt über die Beurteilung von multiplen Quellen wird angegeben, dass Teile der Quelle genauso wie die gesamte Quelle analysiert werden soll, und A.2-4 gibt dazu auch ein Beispiel: das Prinzip ist, die Teilleistung zu bestimmen, die in einem bestimmten Bereich des Bildes liegt: es geht ja immer um die Verteilung der Leistung, die in das Auge eintritt, über die Netzhaut. Wird diese Leistung über mehrere ‚Punkte‘ verteilt, kann man jedem Punkt eine gewisse Leistung zuordnen (als Teilleistung von der gesamten ins Auge eintretenden Leistung). Dies lässt sich direkt auf CCD Kameras übertragen, wo jedes Pixel eine gewisse Fläche hat und der Messwert einer gewissen Leistung entspricht, die auf das Pixel trifft. Summiert man die Leistung über einen Bereich von Pixeln auf, ergibt sich die Teilleistung  $P_i$ , die auf diesen Teilbereich auftrifft. Summiert (oder integriert) man über die gesamte Abbildung auf, ergibt sich die Leistung, die in das Auge eintritt. Bei CCD Kameras werden sich Integrationsbereiche anbieten, der rechteckig ist (im Vergleich zu elliptischen Bereichen). Man kann nun jedem Integrationsbereich, über den man die Teilleistung bestimmt, auch einen ‚Durchmesser‘  $\delta_i$  zuordnen, der bei nicht-quadratischen Integrationsbereichen der Mittelwert aus Breite und Höhe ist, wie in IEC 60825-1 beschrieben. Die Größe und Lage des Integrationsbereiches wird nun in vollem Ausmaß variiert, d.h. bezüglich der Größe von einem minimalen Integrationsbereich der einen Winkel von 1,5 mrad aufspannt, bis zu einem maximalen der 100 mrad entspricht, und bezüglich der Lage überall im Bild, vom Rand bis zum Zentrum. Der kritischste Integrationsbereich ist nun jener, bei dem das Verhältnis aus  $P_i/\delta_i$  maximal ist. Den entsprechenden Wert von  $\delta_i$  verwendet man nun als thermisch relevanter Durchmesser bzw. Winkelausdehnung für die

gegebene Abbildung, und den entsprechenden Wert von  $P_i$  verwendet man zum Vergleich mit dem Grenzwert. Dies ist ein verallgemeinertes Verfahren wie es in IEC 60825-1 für mehrfache Quellen angeführt ist, und welches auf jegliche beliebige Abbildungen angewendet werden kann. Wendet man das Verfahren z.B. auf Top-Hat Verteilungen an, ergibt sich der Top-Hat Durchmesser als kritischer Durchmesser und dementsprechend die Gesamtleistung als Leistung, mit der der Grenzwert verglichen wird. Wendet man das Verfahren auf Gausstrahlen an, ergibt sich ein Durchmesser, der 72% der Gesamtleistung einschließt (also etwas größer als der  $d_{63}$  Durchmesser). Das Verfahren ist leider trotzdem nicht allgemein gültig, wie experimentelle Schädigungsschwellwerte für ringförmige Abbildungen zeigen [3]. Bei gleichem Außendurchmesser weist eine ringförmige Abbildung einen geringeren Schädigungsschwellwert (wenn er als „Leistung durch 7 mm Pupille“ gegeben ist) auf als eine Top-Hat Verteilung. Dies ist zu erwarten, da bei einem Ring die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut größer ist als wenn man die Leistung, die in das Auge eintritt, gleichmäßig über eine Kreisfläche verteilt. Relativ gesehen zu einer Top Hat Verteilung mit einem bestimmten  $\alpha$  muss also das  $\alpha$  für einen Ring (mit gleichem Außendurchmesser) kleiner sein, um die höhere Gefährlichkeit (den niedrigeren Schädigungsschwellwert) korrekt auszudrücken. Anwendung des oben beschriebenen Maximierungsverfahrens liefert für Ringe als kritischen Wert auch den Außendurchmesser, was nicht korrekt ist. Man wird also für die Auswertung von ringförmigen Abbildungen ein Verfahren verwenden müssen, welche die Dicke des Ringes berücksichtigt.

Das hier beschriebene Verfahren zur Zuweisung eines kritischen Winkels  $\delta$  und der entsprechenden Leistung ergibt für das analysierte Bild einen Parameter, den man „Relative Thermal Hazard“ (RTH) nennen könnte, und welcher von Bild zu Bild verglichen werden kann, z.B. wenn es darum geht, den kritischen Akkomodationszustand zu finden (da ja jeder Akkomodationszustand eine andere Abbildung auf der Netzhaut liefert). Jenes Bild, welches den größten RTH liefert, entspricht dann (für die gegebene Position des Auges im Strahl) der Abbildung der scheinbaren Quelle. Dieses Prinzip sei in der Abbildung 6 beispielhaft für eine Leuchtdiode zu sehen, bei der das „Auge“ 7,5 cm von der Kapsel der LED entfernt war, und zwei verschiedene Akkomodationszustände gezeigt sind: einmal der angenommene Nahpunkt, nämlich  $g = 10$  cm Gegenstandsweite, und einmal ein entspanntes Auge wo sich das CCD Array in der Brennebene befindet und die Gegenstandsweite unendlich ist.

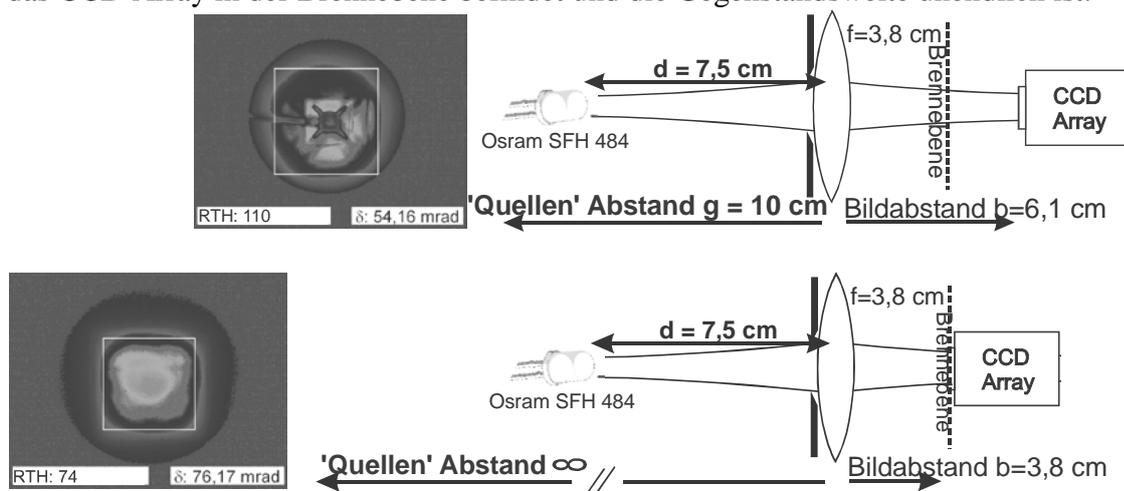


Abb. 6: Simulation zweier verschiedene Akkomodationszustände des Auges, für einen bestimmten Abstand des Auges zur LED. Für beide Abbildungen kann der RTH verglichen werden, um zu beurteilen, welcher der beiden Akkomodationszustände der kritischere ist, d.h. welcher das ‚gefährlichere‘ Abbild auf der Netzhaut erzeugt.

Es sei noch erwähnt, dass die Definition des Strahldurchmessers nach ISO 11146 (second moment diameter [4]) kein Kandidat für eine allgemeine Definition des „thermischen Durchmessers“ einer Abbildung sein wird. Die Durchmesserdefinition nach ISO 11146 hat zwar den Vorteil, dass sich jeder Strahl (d.h. auch ein weit von einem Gaussprofil entfernter Strahl mit großem Strahlparameterprodukt  $M^2$ ) von der Fortpflanzung (z.B. durch optische Systeme) her wie ein Gausstrahl verhält, wenn man den Durchmesser mit der second moment Methode bestimmt, jedoch ist der Nachteil der Definition, dass außenliegende Teile viel zu stark gewichtet werden, um z.B. als relevant für die thermische Schädigung der Netzhaut zu gelten. Als Extrembeispiel ist in Abbildung 7 ein Abbildungsprofil gezeigt, welches sich ergibt wenn man im Fernfeld eines instabilen Resonators (der im Nahfeld ein Ringprofil aufweist) bestrahlt wird und ein entspanntes Auge hat. Das second moment (2nd Moment) Verfahren nach ISO 11146 liefert einen viel zu großen Durchmesser, im Vergleich zu einem realistischeren Durchmesser der mit dem 63 % Kriterium und mit dem oben beschriebenen Maximierungskriterium berechnet wird, welches in der Graphik RTHmax genannt wird (Faktor 19 Unterschied zu 2nd Moment). Man erkennt, dass der  $d_{63}$  Durchmesser etwas größer ist als der RTHmax Durchmesser, jedoch kann der Vergleich nicht direkt erfolgen, sondern es muss berücksichtigt werden, dass beim RTHmax Verfahren nur die Leistung innerhalb des Integrationsbereiches mit dem Grenzwert verglichen wird, beim üblichen 63 % Kriterium aber normalerweise die gesamte Leistung, die durch die 7 mm Blende tritt, sodass beide Kriterien ungefähr das gleiche Verhältnis von Leistung und Grenzwert liefern.

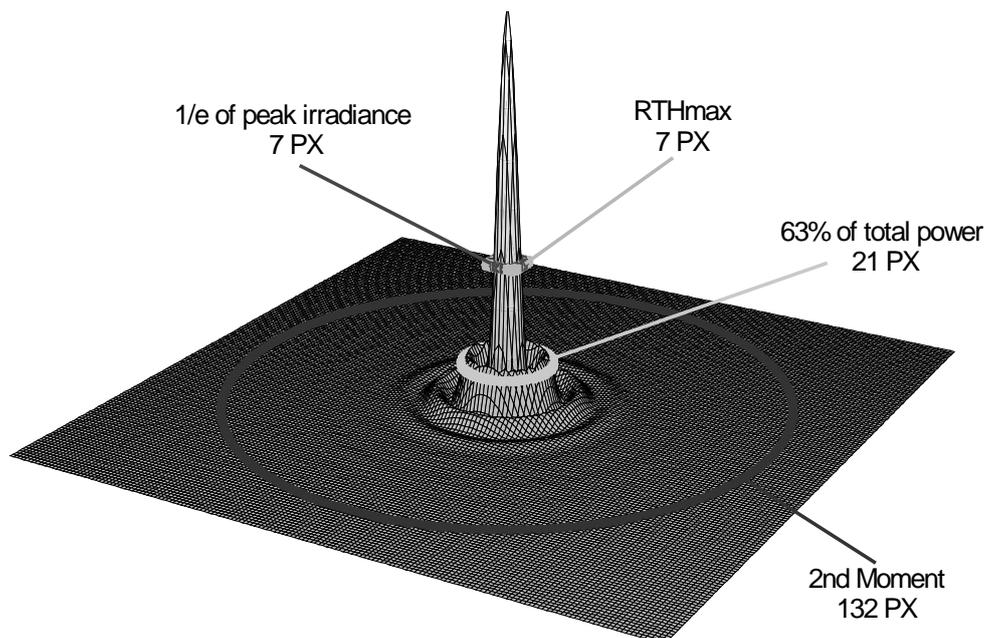


Abb. 7. Anwendung verschiedener „Durchmesser“ Kriterien auf das Fernfeldprofil eines inhomogenen Resonators. (Daten erhalten von Bernd Eppich, TU Berlin).

## 5. Schlussfolgerungen

Es wurde ein allgemeines Konzept zur Bestimmung des Parameters „Ausdehnung der scheinbaren Quelle“ und der Klassifizierung eines Laserproduktes an der Stelle der größten Gefahr für eine thermischen Netzhautgefährdung vorgestellt. Derzeitige Messvorschriften nach IEC 60825-1 haben das Problem, relativ zum Ort der scheinbaren Quelle spezifiziert zu sein, was bei Laserstrahlen nicht eindeutig ist, da der Ort der scheinbaren Quelle vom

Betrachtungsort (Ort des Auges im Strahl) abhängt. Ferner kann bei Anwendung der derzeitigen Vorgaben der Norm im Vergleich zur Auswertung am Ort der größten Gefahr die Gefährdung um bis zu einen Faktor 3,5 unterschätzt werden.

Die derzeitige Fassung der IEC 60825-1 enthält keine dezidierten Angaben, wie der Parameter  $\alpha$  für beliebige Abbildungen (Bestrahlungsstärkeverteilungen) bestimmt werden soll. Es wurde ein Konzept zur Auswertung von beliebigen Abbildungen vorgestellt, welches laut IEC 60825-1 für mehrfache Quellen anzuwenden ist, welches aber laut Meinung der Autoren auch generell für inhomogene Bestrahlungsstärkeverteilungen in der Bildebene angewendet werden kann (Ringprofile können nicht mit dem Verfahren analysiert werden), solange keine genaueren oder allgemeinere Verfahren definiert werden.

## 6. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Bernd Eppich für fachliche Informationen zum Thema Strahlausbreitung und Durchmesserdefinition.

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Henderson R and Schulmeister K, *Laser Safety*, IOPP Bristol 2004
- [2] Galbiati E Evaluation of the apparent source in laser safety *Journal of Laser Application* 13 141-149 (2001)
- [3] Kennedy P, Zuclich JA, Lund DJ, Edsall PR, Stephen T, Stuck BE, Hollins R, *Laser induced retinal damage thresholds for annular retinal beam profiles*, to be published in "Laser Tissue Interaction" Proceedings of Bios 2004, SPIE (2004).
- [4] ISO 11146 *Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser widths, divergence angle and beam propagation factor*, ISO, Geneva (2003)