

Sonderdruck

Nachdruck nur mit Genehmigung des Verlags gestattet

# Nichtionisierende Strahlung: Anwendung, Wirkungen, Schutzmaßnahmen

## Strahlenbelastung bei speziellen diagnostischen und therapeutischen Eingriffen

## Strahlenexposition bei der Computer- tomographie

20. Jahrestagung der Vereinigung Deutscher Strahlenschutzärzte e. V.,

5. Jahrestagung des Verbandes für medizinischen Strahlenschutz in Österreich  
in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung  
vom 8. bis 9. Juni 1979 in Neuherberg bei München

**Strahlenschutz in Forschung und Praxis · Band XX**

Herausgegeben von  
**Otfried Messerschmidt und Friedrich Olbert**

Mit Beiträgen von

H. Baumruck	M. Jonas	H. Pauly	H. Tronnier
J. Bernhardt	F. Kossel	W. Pietzsch	O. Vacariu
R. Birngruber	R. Kramer	G. Rey	N. Vana
A. Breit	K. Kubiena	U. Rohde	R. Veit
J. Buch	G. Lechner	W.-D. Sager	E. Vrana
G. Drexler	W. Leppin	Th. Schmidt	R. Waneck
K. E. Duftschmid	H. Mohr	G. Schneider	P. Weidinger
V.-P. Gabel	M. Nell	K. H. Schneider	
G. Hagmüller	I. Neumann	H. Spreizer	
G. Hinz	F. Olbert	F. E. Stieve	

168 Abbildungen und 68 Tabellen



1980

Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York

Richtlinie wird ein Expositionsgrenzwert, gemessen unter normalen Umgebungsbedingungen von  $10 \text{ mW/cm}^2$ , gemittelt über jeden Zeitraum von 0,1 h vorgeschrieben. Bei Flächenleistungsdichten, die kleiner sind als  $10 \text{ mW/cm}^2$ , gilt diese Regel für jede Zeitdauer. Bei Flächenenergieleistungen, die kleiner sind als  $1 \text{ mWh/cm}^2$  gilt diese Regelung für jeden Zeitraum von weniger als 0,1 h. Dies bedeutet im Grenzfall, d.h. für eine Zeit von 0,1 h den gleichen Expositionsgrenzwert von  $10 \text{ mW/cm}^2$ .

Höhere Expositionen für Beschäftigte sind zulässig, allerdings nur unter kompetenter ärztlicher Überwachung. Gleichfalls ist darauf zu achten, daß der Expositionsgrenzwert geringer gehalten wird, wenn die Exposition unter ungünstigen Umgebungsbedingungen, d.h. hohe Lufttemperatur und -feuchtigkeit stattfindet. Bei Flächenleistungsdichten, die größer sind als  $100 \text{ mW/cm}^2$ , ist das Tragen von Schutzkleidung nötig.

Diese Angaben aus dem Entwurf der Richtlinie der Europäischen Gemeinschaften genügen, um deutlich zu machen, daß hier ähnlich wie bei ionisierenden Strahlen ein dem Gefährdungsgrad angepaßtes Überwachungssystem aufgebaut werden soll, das höhere Expositionen nur unter Bedingungen zuläßt, die ärztlicher Kontrolle unterstehen. Es ist damit zu rechnen, daß diese Richtlinie noch im Laufe dieses Jahres 1979 den Mitgliedsstaaten zugeleitet wird. Vorgesehen ist, daß innerhalb eines Jahres nach Verabschiedung dieser Richtlinie in den Mitgliedsstaaten entsprechende gesetzliche Vorschriften geschaffen werden.

## Literatur

- |   |  |
|---|--|
| <p>1 Gesetz über den Betrieb von Hochfrequenzgeräten vom 9. August 1949 in der Fassung vom 1. Oktober 1968. Amtsblatt des Bundesministers für das Post- und Fernmeldewesen Ausgabe A (1969) S. 1047 ff</p> <p>2 Gesetz zur Neufassung der Gewerbeordnung vom 26. Juli 1900. BGBl III 7100–1, Titel II und VII, zuletzt geändert durch</p> | <p>Artikel 13 des Kostenermächtigungs-Änderungsgesetzes vom 23. Juni 1970. BGBl I S. 805 ff</p> <p>3 Gesetz über technische Arbeitsmittel vom 24. Juni 1968. BGBl. I S. 717–719</p> <p>4 J. Bernhardt: Biologische Wirkungen elektromagnetischer Felder. Tagung d. U.R.S.I. Landesausschusses (Oktober 1978)</p> |
|---|--|

## Probleme des Laserstrahlenschutzes

V.-P. GABEL und R. BIRNGRUBER

Die zunehmende Verbreitung von Lasern in Forschung, Industrie und Medizin und die von dieser neuen Lichtquelle ausgehenden Gefahren haben zu einem verstärkten Interesse an Schutzvorschriften für Laserstrahlen geführt. Diese Unfallverhütungsvorschriften sind für die Bundesrepublik Deutschland in der VBG 93 zusammengefaßt und enthalten einerseits technische Schutzmaßnahmen und schreiben andererseits medizinische – nämlich ophthalmologische – Untersuchungen vor. Es sei daher im folgenden kurz dargestellt, welche besonderen Eigenschaften Laserstrahlen aufweisen,

warum gerade die Augen besonders gefährdet sind, wie Schäden am Augenhintergrund aussehen, welche Untersuchungen in den Laserstrahlenschutzvorschriften gefordert werden, und wie diese zu bewerten sind.

Die wichtigsten Eigenschaften, die Laserlicht und Licht thermischer Lichtquellen unterscheidet, sind: Kohärenz, extreme Bündelung und Monochromasie. Entsprechend dem verwendeten Material, in dem das Licht angeregt wird, ändert sich die Wellenlänge des emittierten Lichts, und je nach Art der Anregung variieren die Emissionszeit von extrem kurzen Impulszeiten von  $10^{-12}$  s bis zur kontinuierlichen Abgabe und deren emittierte Leistung von  $10^{-6}$  W bis  $10^9$  W.

Dieser hohen Variationsbreite steht eine Vielfalt von Anwendungen des Lasers gegenüber. Einige Hauptanwendungsgebiete seien daher kurz skizziert. So eignet sich z.B. die *Kohärenz* für holographische Untersuchungen, während die schmale Bandbreite des *monochromatischen* Laserlichtes (es gibt auch Laser mit mehreren schmalen Banden) für spektroskopische Untersuchungen in Technik und Biologie ideale Voraussetzungen bieten. Die *extreme Bündelung*, d.h. geringe Aufweitung des Strahles, wird z.B. für Vermessungszwecke oder auch zur Nachrichtenübertragung über große Strecken (z.B. Erde-Mond) genutzt.

Aus der extrem guten Bündelung des Lichtes ergeben sich außerdem weitere Anwendungsgebiete durch die hiermit gegebene hohe Fokussierbarkeit. Damit ist es möglich, die transportierte Energie auf kleinstem Raum zu konzentrieren. So werden z.B. Laser für die Bearbeitung von Material oder auch zur Kernfusion verwendet.

Am Auge führt diese gute Fokussierbarkeit von Laserstrahlen in dem Transmissions- und Fokussierungsbereich der brechenden Medien dazu, daß am Augenhintergrund Energiedichtekonzentrationen bis zum Faktor  $10^5$  möglich sind (Abb. 1). Messungen haben ergeben (1), daß die brechenden Medien unter gewissen Bedingungen beugungsbegrenzt fokussieren können, d.h. minimale Fokusgrößen von ca.  $7 \mu\text{m}$   $\Phi$  entstehen können (Abb. 2). Berücksichtigt man, daß die Funktion des Auges von der intakten Struktur des Augenhintergrundes, der von dieser hohen Energiedichte getroffen wer-

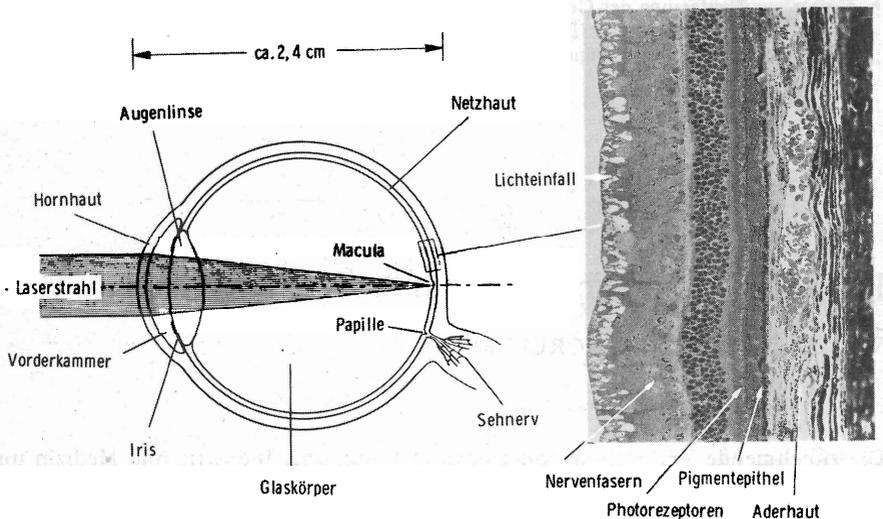


Abb. 1 Schematische Zeichnung vom Aufbau des Auges mit einfallendem Laserstrahl, rechts mikroskopische Aufnahme eines histologischen Schnitts der Netzhaut

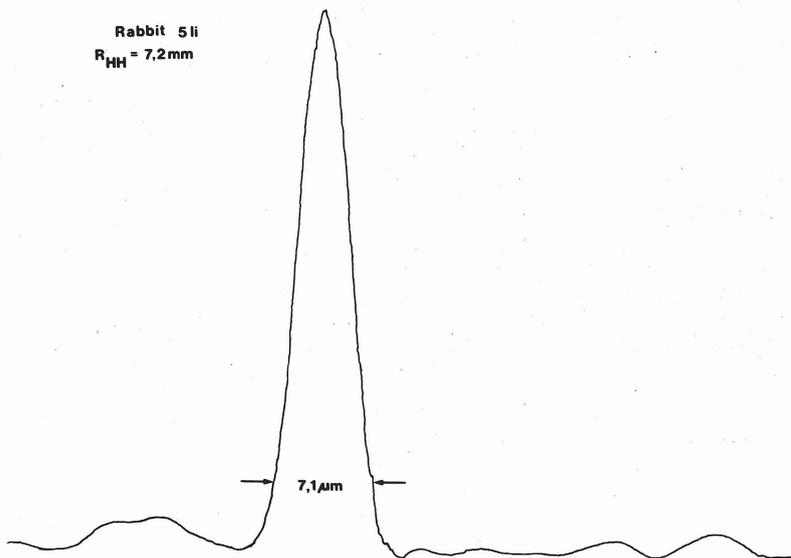


Abb. 2 Intensitätsverteilung eines Helium-Neon-Laserfokus, der von der Optik eines Kaninchenauges (100 dptr.) gebildet wurde

den kann, abhängt, und daß diese Strukturen einerseits besonders empfindlich und andererseits nicht regenerationsfähig sind, so wird die Gefährlichkeit der Laserstrahlen für das Auge offensichtlich.

Ein Schaden am Augenhintergrund entsteht durch Absorption des eingestrahlt Lichtes an pigmentierten Strukturen (Pigmentepithel und Aderhaut) (2), seiner Umwandlung in Wärme und somit durch thermische Schädigung dieser Strukturen und vor allem der darüber liegenden sensorischen Netzhaut. Die schwächsten ophthalmoskopisch sichtbaren Läsionen sind als zarte, grau bis weiß gefärbte runde Flecken am Augenhintergrund zu erkennen, bei stärkeren Expositionen bilden sich um diesen Flecken

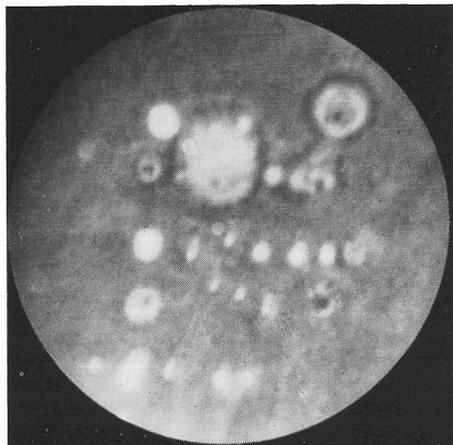


Abb. 3 Laserläsionen unterschiedlicher Stärke am Augenhintergrund eines Kaninchens bis hinab zur ophthalmoskopischen Sichtbarkeitsschwelle

ein oder mehrere verschieden helle Ringe, bis schließlich bei starken Expositionen eine mehr oder weniger ausgeprägte Blutung hinzukommt (Abb. 3). Eine Abheilung solcher Schäden ist nur durch die Bildung von unspezifischem Narbengewebe möglich, ein Vorgang, der bei der therapeutischen Anwendung des Lasers am Auge eine entscheidende Rolle spielt. Diese Netzhautnarben entstehen wenige Tage nach Exposition und zeigen unregelmäßige Pigmentierung. Sie sehen dann genauso aus wie viele andere abgeheilte Netzhautveränderungen und lassen sich kaum von spontan vorkommenden Pigmentirregularitäten unterscheiden.

Für den Laserstrahlenschutz ist es notwendig, die Grenzen der für das Auge noch tolerierbaren Strahlendosen zu kennen. Die Vielfalt der Laserparameter und die schwer abzuschätzende biologische Reaktion machte die Durchführung von zahlreichen Schädigungstests an Versuchstieren (Abb. 4) notwendig (3). Dabei konnten die wesentlichen Expositionsparameter, nämlich Energie, Zeit und Größe des bestrahlten Areal in weiten Bereichen variiert werden, um die Grenzen für minimal feststellbare Schädigungen in der Netzhaut festzulegen. Als Kriterium hierfür kann zunächst eine mit dem Augenspiegel gerade noch erkennbare Weißfärbung der Netzhaut gelten (ophthalmoskopisch sichtbarer Schaden), wie in Abb. 3 dargestellt.

Die histologische Untersuchung solcher Netzhautläsionen (Abb. 5) zeigt, daß selbst ophthalmoskopisch nicht mehr sichtbare Schäden (keine Weißfärbung) deutliche Läsionen an der Netzhaut aufweisen, die, da sie die Zellkerne der Photorezeptoren betreffen, einen irreversiblen Funktionsausfall bewirken (4). Das bedeutet, daß bei sichtbaren Schäden am Augenhintergrund stets ein irreversibler Netzhautschaden vorhanden ist, das Fehlen von ophthalmoskopisch sichtbaren Schäden am Augenhintergrund jedoch noch keinen Beweis für das Fehlen von funktionellen Netzhautschäden darstellt.

Das Ergebnis einer statistischen Auswertung von Schädigungstests läßt sich in Histogrammen darstellen, die abhängig von der Expositionsenergie die Schädigungswahrscheinlichkeit, z.B. nach dem Kriterium der ophthalmoskopischen Sichtbarkeit zeigen (Abb. 6a, b) (3). So zeigt z.B. die Abb. 6a bei Rhesusaffenaugen für Argonlaser und eine Expositionszeit von 150 msec. bei einer Schädigungswahrscheinlichkeit von 0,1% nach dem Kriterium der ophthalmoskopischen Sichtbarkeit an der unteren Konfidenzgrenze eine Leistung von 3 mW. Der histologisch feststellbare minimale Schaden liegt jedoch nach eigenen Untersuchungen (4) um den Faktor 3 niedriger, sodaß sich damit für die ungünstigste Unfallsituation als Sicherheitsschwellenwert eine Leistung von 1 mW ergibt (siehe auch [5]). Dabei ist allerdings Voraussetzung, daß die Expositionszeit, z.B. durch den Blinzelreflex, auf Zeiten unter 0,25 s begrenzt ist. Bei längeren Expositionszeiten hingegen liegt die noch tolerierbare Leistung wesentlich niedriger. Der Grenzwert für eine kontinuierliche Exposition ( $t = 1$  Arbeitstag) liegt bei ca. 1  $\mu$ W (5). Eine Anwendung des in drei Größenordnungen höher liegenden Grenzwertes von 1 mW erfordert daher eine entsprechende Aufklärung der im Laserbereich Arbeitenden, damit der bei Exposition des Auges natürlich einsetzende Blinzelreflex nicht absichtlich unterdrückt wird.

Ein weiterer wesentlicher Gesichtspunkt ist die Lage des getroffenen Netzhautareales. Wurde z.B. die Stelle des schärfsten Sehens (Fovea-Macula) einer überschwelligeren Laserstrahlendosis ausgesetzt, so werden bereits relativ schwache Läsionen eine erhebliche Reduzierung der Sehleistung verursachen, während umgekehrt auch relativ starke Läsionen in der Peripherie, soweit sie nicht zu größeren Blutungen geführt haben, wenig subjektive Sehstörungen bewirken.

Man kann also feststellen, daß schwache, ophthalmoskopisch nicht erkennbare Läsionen zu Funktionsausfällen führen können, daß starke Läsionen relativ gering in ihrer subjektiven Auswirkung bleiben können und daß wenige Tage nach Exposition durch Vernarbung diese Läsionen nur äußerst schwer von anderen Netzhautnarben oder natürlichen Pigmentunregelmäßigkeiten zu unterscheiden sind.

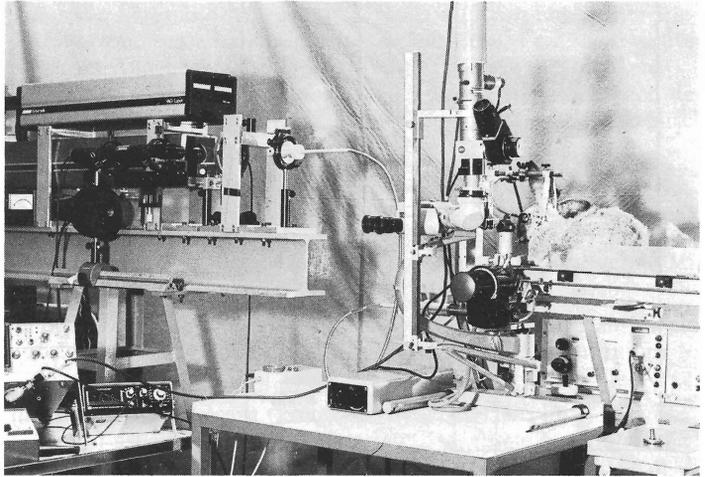


Abb. 4 Versuchsaufbau zur Durchführung von Laserschwellenwertexperimenten: links verschiedene ankoppelbare Lasersysteme, rechts Spaltlampen-Kontaktglasanordnung mit narkotisiertem Versuchstier in Spezialhalterung

Wie sind nun vor diesem Hintergrund die zur Zeit gültigen Unfallschutzvorschriften zu bewerten?

Die Unfallverhütungsvorschrift (UVV) (6) enthält in der VBG 93 technische Sicherheitsmaßnahmen und schreibt medizinische Vorsorgeuntersuchungen vor, die bei allen Personen, die im Laserbereich arbeiten, durchzuführen sind. Es sind allerdings Personen ausgeschlossen, die mit kontinuierlich emittierenden Lasern „geringer Leistung“ (kleiner als 10 mW) im sichtbaren Wellenlängenbereich unter gewissen Sicherheitsvorkehrungen arbeiten.

Diese medizinischen Untersuchungen müssen von ermächtigten Augenärzten durchgeführt werden und bestehen aus Erst- und Wiederholungsuntersuchungen. Sie sollen

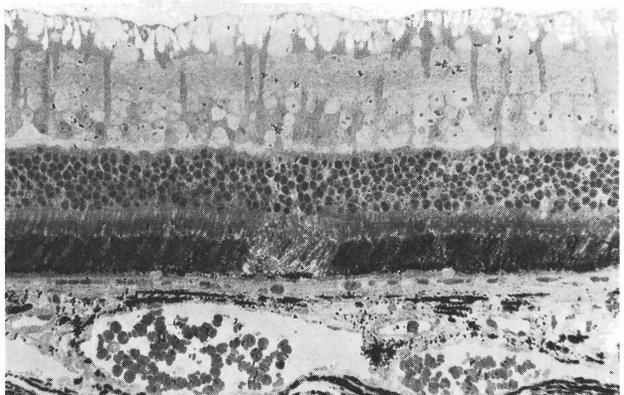


Abb. 5 Lichtmikroskopisches Bild eines histologischen Schnittes durch die Netzhaut eines Kaninchens mit einer Argon-Laser-Läsion. Der Schaden betrifft nur die äußere Netzhauthälfte bis einschließlich äußere Körnerschicht

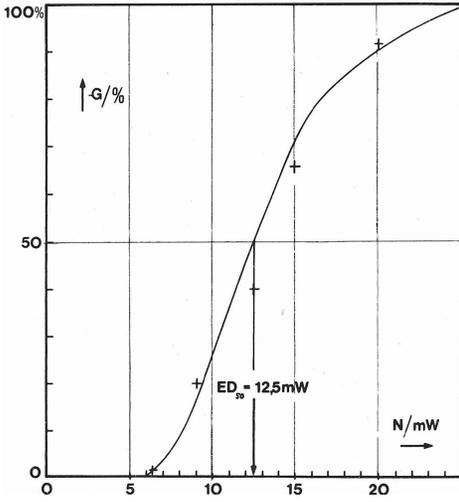


Abb. 6a

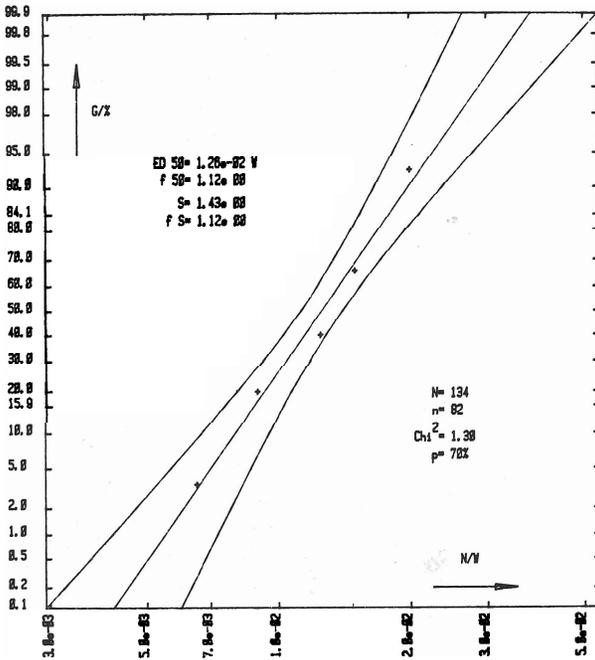


Abb. 6b

Abb. 6a, b Wahrscheinlichkeit  $G$  der ophthalmoskopischen Sichtbarkeit eines Schadens am Augenhintergrund in Abhängigkeit von der in das Auge eingestrahlten Laserstrahlleistung  $N$  (Argonlaser  $\lambda = 514 \text{ nm}$ , Expositionszeit 150 ms, Rhesusaffen). Abb. 6a zeigt diese Abhängigkeit in linearen Maßstäben aufgetragen, in Abb. 6b ist die Abszisse logarithmisch und die Ordinate nach der inversen Normalverteilungsfunktion geteilt; die Regressionsgerade und die 19/20-Konfidenzgrenzen sind eingetragen

einerseits die Eignung, im Laserbereich zu arbeiten, attestieren und sollen es andererseits ermöglichen, unbemerkte Laserläsionen festzustellen. Die Feststellung einer Eignung soll verhindern, daß Personen mit herabgesetztem Sehvermögen oder mit akuten, chronischen oder progressiven Augenerkrankungen dem Risiko einer zusätzlichen Schädigung durch Laserstrahlen ausgesetzt werden. Als nicht geeignet gelten nach den die UVV begleitenden „Berufsgenossenschaftlichen Grundsätze für Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen (G 19)“ (7) Personen:

- deren Sehschärfe geringer als 0,5 auf jedem Auge ist,
- denen das Stereosehen fehlt,
- die Erkrankungen bzw. Veränderungen der Augen, ihrer Anhangsorgane und des Augenhintergrunds unterschiedlicher Genese aufweisen, die eine entscheidende Minderung der Leistungsfähigkeit des Sehorgans bedingen oder erwarten lassen.

Eigene Erfahrungen bei der Ermittlung von Laserschwelldaten und langjährige gutachterliche Tätigkeit auf dem Gebiet des Laserstrahlenschutzes berechtigen uns zu folgenden kritischen Anmerkungen:

1. Für Personen, die mit bestimmten Lasern (kontinuierlicher Betrieb im sichtbaren Bereich kleiner als 10 mW) arbeiten, sieht eine Ausnahmeregelung eine Befreiung von medizinischen Untersuchungen vor, wenn für „ausreichende Schutzmaßnahmen“ gesorgt ist. Da aber, wie in Abb. 6b dargestellt mit 10 mW bereits mit 40%iger Wahrscheinlichkeit ein ophthalmoskopisch sichtbarer, also sicher irreversibler Funktionsausfall auftreten kann, kann von einer Gefährlosigkeit dieser Geräte in keinem Fall ausgegangen werden. Bestehen „ausreichende Schutzmaßnahmen“, so ist schwer einzusehen, warum diese nur für eine bestimmte Art von Laser „ausreichend“ sind, während bei anderen, ebenfalls gefährlichen Lasern, neben den „ausreichenden Schutzmaßnahmen“ auch medizinische Untersuchungen erforderlich sind.
2. Der Ausschluß von Personen im Laserbereich mit einem Sehvermögen von beidseits geringer 0,5 und von Personen ohne Stereosehen (das quantitativ nicht definiert ist) läuft darauf hinaus, daß Einäugige (auch funktionell einäugige) von der Arbeit mit Lasern ausgeschlossen werden sollen. Hiergegen ist einzuwenden, daß Einäugige prinzipiell einer höheren Gefährdung im Berufsleben ausgesetzt sind, daß sie sich deshalb sicher besonders vorsichtig verhalten werden und daß sie auch in anderen Berufen deshalb keiner Einschränkung unterliegen, auch wenn, wie z.B. bei Kraftfahrern, die Unfallhäufigkeit bezüglich Augenverletzungen um ein Vielfaches höher liegt als bei der Tätigkeit im Laserbereich.
3. Der Ausschluß von Personen mit bestimmten Erkrankungen des Auges erscheint uns ungerechtfertigt, wenn man bedenkt, daß keine Augenerkrankungen bekannt sind, die durch Laserstrahlen spezifisch verschlechtert werden können.
4. Die Schwierigkeit, nicht mehr frische Laserläsionen am Auge festzustellen, wurde bereits beschrieben. Es gibt keine spezifischen Kennzeichen von Lasernarben; Narben nach Erkrankungen, wie Retinopathia centralis serosa, verschiedenen Formen der Chorioretinitis oder auch nur die häufig vorkommenden Pflastersteindegenerationen haben ein sehr ähnliches ophthalmoskopisches Erscheinungsbild. Andererseits muß festgestellt werden, daß Funktionsausfälle auch durch Lasereexposition entstehen können, ohne daß ophthalmoskopisch sichtbare Läsionen vorhanden sein müssen. Es erscheint uns daher die retrospektive jährliche Untersuchung des Augenhintergrundes wenig geeignet, Laserläsionen festzustellen.

Unserer Ansicht nach ist es besonders wichtig, aber nicht in der VBG 93 festgelegt, daß Personen nach Eintreten einer Unfallsituation sofort, d.h. innerhalb von 24 Stunden intensiv ophthalmologisch untersucht werden. Es gelingt nämlich, unmittelbar nach dem Unfall, mittels der Fluoreszenzangiographie, einer Spezialkontrastfotografie des Augenhintergrundes, frische Läsionen zu identifizieren (8). Da aber dieses Verfahren, einerseits nur wenigen Augenärzten zur Verfügung steht, und andererseits

gerade im Hinblick auf Laserläsionen spezielle Erfahrungen bei der Auswertung vorliegen müssen, möchten wir vorschlagen, daß frisch Verunfallte möglichst rasch in einem der wenigen Zentren, die sich mit solchen Problemen beschäftigen, untersucht werden.

## Literatur

- 1 Birngruber, R., E. Drechsel, F. Hillenkamp, V.-P. Gabel: Minimal spot size on the retina formed by the optical system of the eye. *Int. Ophthalmol.* 1, 3 (1979) 175–178
- 2 Gabel, V.-P., R. Birngruber, F. Hillenkamp: Visible and Near Infrared Light Absorption in Pigment Epithelium and Choroid, in: *Int. Congress Series No. 450, XXIII Concilium Ophthalmologicum*, K. Shimizu ed., *Excerpta Medica*, Amsterdam–Oxford (1979) 658–662
- 3 Birngruber, R.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur thermischen Schädigung des Augenhintergrundes durch Laserstrahlung, Dissertation des Fachbereiches Physik der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt 1979
- 4 Wallow, I.H.L., R. Birngruber, V.-P. Gabel, F. Hillenkamp, O.-E. Lund: Netzhautreaktionen nach Intensivlichtbestrahlung Teil 1. *Adv. Ophthalmol.* 31 (1975) 159
- 5 American National Standard for the Safe Use of Lasers, ANSI Z 136 (1976) 1
- 6 Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlen“ (VBG 93) vom 1.4.1976. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Bonn
- 7 Berufsgenossenschaftliche Grundsätze für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen: Gefährdung durch Laserstrahlen, Fassung November 1973, 2. Ergänzung Juni 1974, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften e.V., Bonn
- 8 Marshall, J.: Retinal Injury from Chronic Exposure to Light and the Delayed Effects from Retinal Exposure to Intense Light Sources. In: *Current Concepts in Ergophthalmologia Internationalis 1978*, Karolinska Institute, Dep. of Ophthalmology, 10401 Stockholm 60