

6 Biologische Wirkung optischer Strahlung

Hinsichtlich ihrer biologischen Wirkung unterscheiden sich inkohärente Strahlung und Laserstrahlung nicht grundsätzlich. Es war aber das große Gefährdungspotential der Laserstrahlung, das primär zur Entwicklung eines sehr differenzierten Grenzwertsystems geführt hat. Die wesentlichen Unterschiede zwischen Laserstrahlung und konventioneller Strahlung sind Kohärenz, Monochromasie und Bündelung. Von der örtlichen und zeitlichen Kohärenz der Laserstrahlung konnte nicht nachgewiesen werden, dass sie zu besonderen Schadensmechanismen beiträgt [6.1]. Die Monochromasie trägt zur Gefährdung nur unwesentlich bei. Sie bedingt zwar eine bessere Fokussierbarkeit der Strahlung, im Falle der Augengefährdung wird jedoch der Akkommodationszustand des Auges i. A. keine ideale Fokussierung erlauben. Von der dritten Eigenschaft der Laserstrahlung, deren meist gute Parallelität, geht die Hauptgefährdung aus. Auf Grund dieser guten Bündelung, d. h. deren geringen Divergenz, ändert sich der Strahldurchmesser eines Laserbündels bei der Ausbreitung nur wenig, und die Gefährdung bleibt über große Entfernungen bestehen (siehe Abschnitt 2.5). Weiterhin erlaubt die geringe Divergenz, die gesamte Leistung auf einen Fleck von einigen tausendstel Millimetern zu konzentrieren, und in diesem Punkt lassen sich daher sehr hohe Bestrahlungsstärken erzielen.

Der Schutz gegen optische Strahlung orientiert sich hinsichtlich der Grenzwerte an Bestrahlungsstärken, nach deren Einwirkung ein Schaden nachweisbar ist. Im Vordergrund steht dabei meist der Schutz des Auges. Schäden in der Nähe der Grenzwerte haben, insbesondere wenn sie nicht in der Makula auftreten, im Allgemeinen keinen Einfluss auf die Sehfunktion [6.2], da diese Stellen, insbesondere wenn sie durch Einwirkung von Laserstrahlung erzeugt wurden, meist sehr klein sind, so dass das Auge lernt, andere Stellen der Netzhaut für das Sehen zu benutzen. Andererseits kann es bei großflächiger Bestrahlung von Netzhautarealen auch schon unterhalb der Grenzwerte zu Beeinträchtigungen der Sehfunktion kommen [6.3]. Dies zeigen auch Erfahrungen bei amerikanischen Soldaten, die während des 2. Weltkrieges im Pazifik für lange Zeit hohen Leuchtdichten ausgesetzt waren [6.4]. Außerdem lässt sich der Einfluss niedriger Bestrahlungsstärken auf das Zellwachstum nachweisen [6.5].

Für den Schutz vor optischer Strahlung ist nur der Bereich von Bedeutung, in dem die Luft durchlässig ist, also von etwa 180 nm bis 1 000 μm . Dies ist ein Teil des optischen Spektralgebietes, das nach Norm bei 100 nm beginnt. Es gibt drei hauptsächliche Wirkungsmechanismen, die zu einem Schaden führen können. Diese haben unterschiedliche Abhängigkeiten von Wellenlänge, Impulsdauer, bestrahlter Fläche und weiteren Parametern. Im Folgenden werden nach einer kurzen Darstel-

lung der prinzipiellen Wirkungsmechanismen die wichtigsten Einflussgrößen einzeln diskutiert.

6.1 Wirkungsmechanismen

Die biologische Wirkung der Strahlung hängt wesentlich von deren Wellenlänge ab. Die besonderen Verhältnisse in den einzelnen Spektralgebieten enthält der Abschnitt 6.2, im vorliegenden Abschnitt werden die grundlegenden Mechanismen dargestellt.

6.1.1 Thermische Wirkung

Als Folge der Absorption von Strahlung im Gewebe entsteht Wärme, die, hauptsächlich durch Wärmeleitung, auch auf das umliegende Gewebe übertragen wird. Ein Schaden kann dann auf Grund der Temperaturerhöhung im Gewebe entstehen. Ist diese Temperaturerhöhung auf wenige Grad beschränkt, d. h. bleibt die Temperatur unterhalb von 41 °C bis 44 °C für einige zehn Minuten, dann werden im i. A. nur reversible Schäden entstehen (siehe auch **Bild 87**). Temperaturen zwischen 50°C und 100°C führen innerhalb von etwa einer Sekunde über eine Denaturierung von Eiweiß und Kollagen zu einem irreversiblen Schaden, einem Zelltod. Temperaturen über 100°C führen zu einer Verdampfung von Zellflüssigkeit und schließlich zu einer Karbonisierung des Gewebes. Zu diesen thermischen Wirkungen der

Tabelle 9 Abhängigkeit der Gewebereaktionen von der Temperatur

Reaktion des Gewebes	Gewebetemperatur
Enzymatische Veränderungen	40 °C - 50 °C
Proteindenaturierung, Koagulation	60 °C - 65 °C
Kollagendenaturierung	80 °C
Gewebeaustrocknung	90 °C - 100 °C
Verkohlung	> 300 °C

Strahlung gehören auch das Entstehen eines Grauen Stars und die thermische Schädigung der Netzhaut. Die Reaktionen des biologischen Gewebes sind in **Tabelle 9** nach [6.6] schematisch zusammengestellt.

Die Wirkung optischer Strahlung ist im längerwelligen sichtbaren und im infraroten

Spektralbereich hauptsächlich eine thermische. Bei kurzen Impulsen spielt die Wärmeleitung keine Rolle, d. h., die Reaktion des Gewebes ist auf den unmittelbaren Einwirkungsbereich beschränkt. Die Zeitkonstante ist für kleine Fokaldurchmesser, wie sie mit sichtbarer Laserstrahlung auf der Netzhaut erreicht werden können, größenordnungsmäßig $1,8 \cdot 10^{-5}$ s, bei Infrarotstrahlung $5 \cdot 10^{-5}$ s. Dies zeigt sich dann bei den Grenzwerten nach [6.7] (siehe **Bild 120**) als Knickstelle in der maximal zulässigen Bestrahlung. Im Falle großflächiger Bestrahlungen beträgt die Zeitkonstante etwa 1 s bis 3 s.

Obwohl die *photoablative Wirkung* eher für die photochemische Wirkung typisch ist, kann sie mit Lasern geringer Eindringtiefe, wie dem Erbiumlaser bei 2 900 nm, auch über die thermische Wirkung der Strahlung ausgelöst werden.

6.1.2 Photochemische Wirkung

Bei der photochemischen Wirkung löst die Strahlung – vorwiegend UV-Strahlung und kurzwellige sichtbare Strahlung – chemische Reaktionen aus, z. B. in den Photorezeptoren des Auges. Dabei können freie Radikale entstehen, die sehr reaktionsfreudig sind und Zellen destabilisieren können. Außerdem sensibilisiert eine Reihe von Medikamenten und chemischen Verbindungen (Photosensibilisatoren) biologisches Gewebe für die Wirkung von UV-Strahlung [6.8], so dass schon für Bestrahlungen, die weit unterhalb der sonst geltenden Grenzwerte liegen, starke biologische Reaktionen, sogenannte *phototoxische Reaktionen*, auftreten können. Die Reaktionen sind einem Sonnenbrand ähnlich, sie treten jedoch schneller und stärker auf. Da derartige Wirkungen oft sehr spezifisch sind und nicht der Reaktion des unbehandelten Gewebes entsprechen, bleiben sie in den folgenden Diskussionen unberücksichtigt. Sie sind ebensowenig wie die Wirkung sehr kleiner Leistungen in den Grenzwerten erfasst.

Den phototoxischen Reaktionen vergleichbare Mechanismen werden auch in der photodynamischen Therapie ausgenutzt, bei der Farbstoffe als Sensibilisatoren in den Körper eingebracht werden. Laserstrahlung, vorwiegend im Wellenlängenbereich zwischen 700 nm und 1 000 nm, wird von den Sensibilisatormolekülen absorbiert, die über Energie- und/oder Ladungstransferprozesse molekularen Sauerstoff im Singulett-Zustand erzeugen. Der Singulett-Sauerstoff führt zur Bildung von Hydroxylradikalen und anderen hochreaktiven Verbindungen, die in der Folge auf umgebende zelluläre Moleküle (DNA, Proteine usw.) schädigend einwirken können. Dieser Prozeß wird zu einer Schädigung von Krebszellen eingesetzt.

Weitere photochemische Wirkungen sind die *Hornhautentzündung* und die *Bindehautentzündung* des Auges, *Photo-Keratitis und Erythem*.

Ist die Wellenlänge der Strahlung kurz genug – meist handelt es sich um den Bereich zwischen 180 nm und 300 nm –, dann kann die Photonenenergie ausreichen, um chemische Bindungen aufzubrechen, und man beobachtet, da die Eindringtiefe der Strahlung klein ist, eine Abtragung von Gewebe von der Oberfläche, eine *photoablative Wirkung*.

6.1.3 Photomechanische Wirkung

Kurze Laserimpulse im Nano- Piko- und Femtosekundenbereich können über einen Lawinendurchbruch ein Plasma erzeugen oder über Verdampfungsprozesse Stoßwellen auslösen. Diese Stoßwellen breiten sich im Gewebe aus und können zu