

# Augenchirurgie mit Laserlicht

## EIN ÜBERBLICK ÜBER ANWENDUNGEN UND THERAPIEMÖGLICHKEITEN

Laseranwendungen sind aus der

Augenheilkunde heute nicht mehr wegzudenken.

Sie ermöglichen Operationen,

die mit dem chirurgischen

Messer schwieriger oder über-

haupt nicht durchführbar sind.

Holger Lubatschowski vom

Laser Zentrum Hannover e.V.,

stellt das Einsatzspektrum

des Lasers vor.

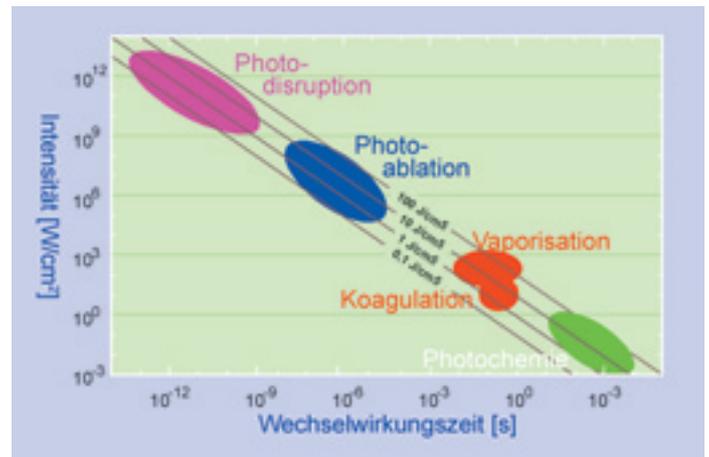
Das Auge ist ein optisches Organ und bietet sich in der Medizin hervorragend für therapeutische und diagnostische Anwendungen des Lichtes an. So ist es nicht verwunderlich, dass die Augenärzte schon immer als Vorreiter der Laseranwendung in der Medizin galten. Die so genannte Photo-koagulation (Veröden) der Netzhaut gehört mit zu den ersten therapeutischen Nutzungen des Lasers, und sie gehört auch heute noch zu den am häufigsten durchgeführten medizinischen Laseranwendungen.

Weit über die Koagulation hinaus erstreckt sich heute der Einsatz des Lasers in der Ophthalmologie (Augenheilkunde). Ein Ende dieser innovativen und rasanten Entwicklung ophthalmologischer Lasersysteme ist nicht abzusehen.

### Wechselwirkungsmechanismen

Der Effekt, den ein Laserstrahl am biologischen Gewebe erzielt, hängt neben der Wellenlänge und damit der Eindringtiefe der Strahlung stark von der Laserintensität und der Wechselwirkungsdauer ab (Abbildung 1).

In der Ophthalmologie werden relativ niedrige Lichtintensitäten zur Induktion photochemischer Reaktionen (ca. 1 Watt/cm<sup>2</sup>) genutzt. Bei Intensitäten oberhalb von ca. 100 W/cm<sup>2</sup> ist es möglich, das



Gewebe gezielt zu verkochen (koagulieren) bzw. zu verdampfen (vaporisieren). In den Bereichen oberhalb von 100.000 W/cm<sup>2</sup> kann das Zielgewebe mit Hilfe von sehr kurzen Laserpulsen schlagartig verdampfen ohne dabei das umgebende Gewebe thermisch zu schädigen. Diese Prozesse werden Photoablation beziehungsweise Photo-disruption genannt.

### Photodynamische Therapie

In der Photodynamischen Therapie (PDT) werden dem Patienten Farbstoffe (Photosensibilisatoren) verabreicht, die sich selektiv in einem bestimmten Gewebe anreichern. Bei Anregung der Farbstoffe mit Laserlicht übertragen diese ihre gespeicherte Energie unter anderem an den molekularen Sauerstoff innerhalb der Ge-

webezellen. Der dadurch entstehende Singulett-Sauerstoff ist in der Lage, über Radikalreaktionen lebenswichtige Zellstrukturen zu zerstören und damit die entsprechenden Zellen abzutöten.

Die PDT wurde vorwiegend für die Tumorthherapie entwickelt. Seit einigen Jahren hat sie sich aber auch in der Augenheilkunde zur Behandlung der so genannten altersbedingten Makuladegeneration (AMD) etabliert.

Die AMD gehört mit zu den häufigsten Erblindungsursachen in den Industrieländern, da sie noch nicht vollständig therapiert werden kann. Der Krankheitsverlauf zeigt sich in der Entwicklung neuer chorioidaler Blutgefäße. Die Gefäße können im Bereich der Makula (Gelber Fleck, Stelle des schärfsten Sehens, siehe Abbildung 2) brüchig werden. Eine Ansammlung von Exudaten

Abbildung 1  
Klassifizierung der Wechselwirkungsmechanismen zwischen Laserstrahlung und biologischem Gewebe

im Bereich der Makula führt zur Sehunschärfe bis hin zum völligen Verlust des zentralen Sehens. Bei der Behandlung der AMD mit Hilfe der PDT wird dem Patienten ein Farbstoff verabreicht, der sich in den neu gebildeten Blutgefäßen der Netzhaut anlagert. Durch Bestrahlen mit rotem Laserlicht geringer Intensität werden die Sehzellen der Makula geschont, die abnormen Blutgefäße der Aderhaut jedoch durch phototoxische Reaktionen zerstört.

Koagulationsherde rund um die Gefahrenstelle zu applizieren, um so eine lokale Narbenbildung hervorzurufen. Das neu gebildete Narbengewebe hält Netzhaut und Aderhaut fester zusammen. Zwar ähnelt dieses Verfahren dem Punktschweißen, hat mit dem eigentlichen Prozess des Schweißens aber nichts zu tun.

Bei den meisten Diabetikern ist mit zunehmendem Alter eine Veränderung des Augenhintergrundes zu beobachten (Diabetische Retino-

**Photoablation**

Der Begriff Photoablation steht für das Abtragen von Gewebe mit minimaler Traumatisierung des zurückbleibenden Gewebes durch den Laser. Erreicht wird diese Form der Gewebearbeitung mit Hilfe kurzer ( $10^{-9}$ – $10^{-6}$  sec) Laserpulse und mit einer Wellenlänge, bei der die optische Eindringtiefe der Laserstrahlung im Gewebe möglichst gering, d.h. in der Größenordnung von 1 µm oder darunter ist. In Frage kommen dafür hauptsächlich Laser, die im tiefen UV-Licht emittieren (ArF-Excimerlaser,  $\lambda = 193$  nm).

Eine ophthalmologische Laseranwendung, die einen enormen technologischen Schub in der Laserentwicklung in Gang gesetzt, die aber auch größte publizistische Aufmerksamkeit erfahren hat, ist die Korrektur von Fehlsichtigkeiten durch direkte Modellierung der Hornhautoberfläche. Das LASIK-Verfahren (Laser in Situ Keratomileusis) mit dem ArF-Excimerlaser hat sich in den vergangenen zehn Jahren zu einer wissenschaftlich anerkannten und sehr erfolgreichen klinischen Laseranwendung entwickelt.

Der Laser wird hierbei eingesetzt, um in der zentralen optischen Zone der Hornhaut die Krümmungsradien der Oberfläche zu ändern, um damit den entsprechenden Beitrag der Fehlsichtigkeit des Auges zu korrigieren. Bei der Kurzsichtigkeit (Myopie) wird die Hornhaut abgeflacht. Die Tiefe des zentralen Abtrages beträgt, je nach Größe der Bearbeitungszone, etwa acht bis zwölf µm pro korrigierter Dioptrie (Abbildung 4). Vor der eigentlichen Laserbehandlung präpariert der Chirurg mit Hilfe einer auf einem Schlitten geführten Klinge einen kornealen Lappen mit etwa 10–12 mm Durchmesser und einer Dicke von 150 µm. Dieser Lappen wird dabei nicht vollständig abgetrennt. An einer Seite verbleibt eine Art Aufhän-

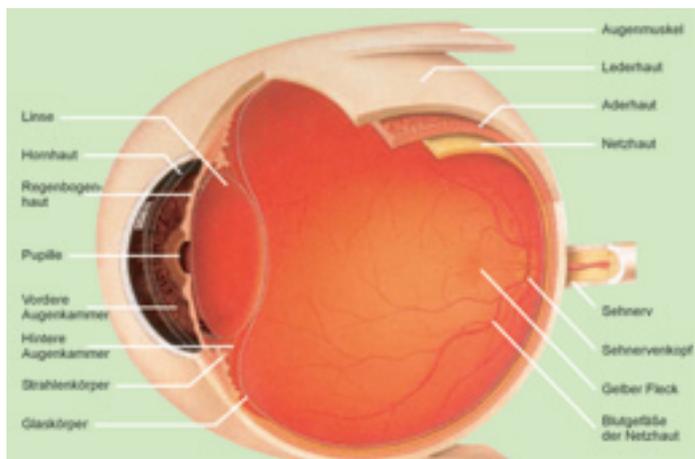


Abbildung 2 Schematische Übersicht zur Anatomie des Auges (nach Marzano-Patientenatlas)

**Laserkoagulation**

Ziel der Laserkoagulation ist es, bestimmte Gewebeareale, etwa in der Netzhaut, durch Einwirken von Hitze gezielt zu zerstören.

Das Licht wird auf der Netzhaut zu einem kleinen Fleck von wenigen 100 µm Durchmesser fokussiert. Der gewünschte biologische Effekt tritt bereits nach einer Temperaturerhöhung von wenigen Grad auf. Es kommt zum Erliegen der Enzymtätigkeiten, zur Denaturierung der Proteine und schließlich zur Blutgerinnung in den Gefäßen.

Eine der häufigsten Anwendungen der Laserkoagulation ist das volkstümlich als »Netzhautschweißen« bekannte Verfahren zur Anheftung der Netzhaut an den Augenhintergrund. Bei einer drohenden Netzhautablösung ist der behandelnde Arzt bestrebt,

pathie). Sie äußert sich in sackförmigen Ausweitungen kleiner Blutgefäße, Bildung von Ödemen und Neubildung von minderwertigen, brüchigen Gefäßen (Neovaskularisation). Mit fortschreitender Erkrankung ist eine zunehmende Sehverschlechterung bis hin zur völligen Erblindung zu beobachten. Der Schlüssel zur erfolgreichen Behandlung liegt hier in der Zerstörung eines großen Anteils der peripheren Photorezeptoren der Retina, die einen hohen Sauerstoffbedarf zeigen und damit als Stimulus der Neovaskularisation wirken (Abbildung 3).

Eine Einschränkung des peripheren Sehvermögens ist bei dieser Behandlungsmethode nicht zu erwarten. Selbst wenn ein Großteil des Netzhautareals koaguliert worden ist, setzt das Gehirn sich das Bild rasterförmig aus den übrig gebliebenen intakten Arealen wieder zusammen.

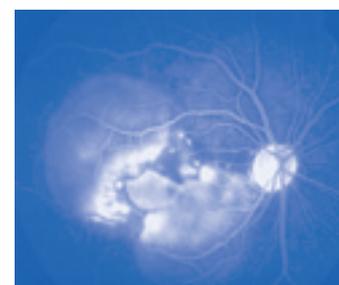


Abbildung 3 Augenhintergrund bei Diabetischer Retinopathie. Deutlich sind auf der linken Bildhälfte die sackförmigen Ausweitungen kleiner Blutgefäße und Neubildung von minderwertigen, brüchigen Gefäßen erkennbar.



**PD Dr. Holger Lubatschowski**  
 Jahrgang 1961. Studium der Physik und Promotion in Bonn, 1997 Wechsel an das LZH in Hannover. Derzeitiger Forschungsschwerpunkt: Entwicklung von Lasersystemen für die Mikrochirurgie des Auges; Anwendung ultrakurzer Laserpulse für Diagnostik und Manipulation biologischer Zellen und Zellverbände

gung, an der anschließend dieser Lappen aufgeklappt wird. Die Laser-Behandlung erfolgt nun direkt im Innern der aufgeklappten Hornhaut. Nach dem erfolgten Abtrag des Hornhautgewebes wird der Lappen wieder geschlossen. Zur Befestigung ist keine Naht vonnöten, da der Gewebelappen aufgrund von Adhäsion förmlich an das übrige Stroma gesaugt wird.

**Photodisruption**

Bei extremen Lichtintensitäten (einige GW/cm<sup>2</sup>) liegt das durch die fokussierte Laserstrahlung hervorgerufene elektrische Feld in der Größenordnung atomarer elektrischer Felder. Es kommt zur Ionisation des bestrahlten Gewebes und damit zur Bildung eines Plasmas. Dieser Effekt wird als optischer Durchbruch bezeichnet. Das Plasma absorbiert die weiter einfallende Laserenergie. Dies führt zu einer schlagartigen Aufheizung und Expansion des Plasmas. Es entstehen, lokal eng begrenzt, Temperaturen von über 15.000 K und Drücke von über 1000 bar. Der optische Durchbruch muss nicht zwingend an einer Oberfläche stattfinden, sondern kann auch bei starker Fokussierung des Laserstrahls in einem transparenten Medium im freien Raum erfolgen.

Diese Möglichkeit macht die Photodisruption für intraokulare Anwendungen sehr interessant.

Durchmesser fokussiert, beginnt schon bei Pulsenergien von nur wenigen µJ – oder darunter – der optische Durchbruch. Folglich sinken die thermischen und mechanischen Nebeneffekte dramatisch in ihrer Wirkung oder können gänzlich vernachlässigt werden.

Femtosekunden-Photodisruption eröffnet somit die Möglichkeit an der Hornhaut intrastromale Schnitte durchführen zu können, um beispielsweise linsenförmige Strukturen aus der Kornea zu entfernen und dadurch die Refraktion des Auges zu beeinflussen. Ein derartiger Eingriff, wie er derzeit am Laser Zentrum Hannover entwickelt wird, könnte analog der konventionellen LASIK durchgeführt werden, allerdings ohne Zuhilfenahme mechanischer Messer.

Das Prinzip dieser fs-LASIK ist in Abbildung 5 verdeut-

licht. In einem ersten Schritt wird ein lamellärer, intrastromaler Schnitt durchgeführt, der im wesentlichen dem Schnitt eines Mikrokeratoms entspricht. Mit einem darauf folgenden zweiten Schnitt wird ein intrastromales Lentikel präpariert, dessen Brechkraft der Fehlsichtigkeit des Patienten entspricht. Das Volumen dieses Lentikels stimmt mit dem Volumen des abgeladeten Stromas bei der Excimerlaserbehandlung überein.

Der Laser hat damit seine Aufgabe erfüllt und der frei präparierte korneale Lappen (Flap) kann gehoben und das darunter liegende Lentikel entfernt werden. Beim Schließen des Flaps wird sich, wie bei der konventionellen LASIK die Oberfläche der Hornhaut dem entfernten Stromavolumen anpassen und eine entsprechende Änderung in der Brechkraft hervorrufen.

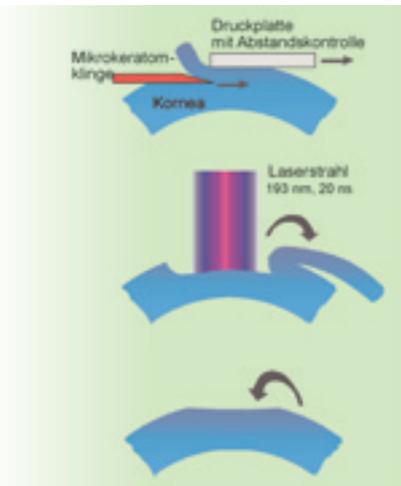


Abbildung 4  
 Schematischer Ablauf des LASIK-Verfahrens; oben: automatischer Mikrokeratom-Schnitt; Mitte: Aufklappen des Hornhautlappens und Laserbehandlung; unten: Schließen des Hornhautlappens

Gewebearbeitung mit Hilfe von ›ultrakurzen‹ Laserpulsen findet zunehmendes Interesse in der Mikrochirurgie. Dieses Schädigungspotenzial eines einzelnen Laserpulses skaliert jedoch mit der Pulsenergie. Je kürzer ein Puls, umso weniger Energie transportiert er bei gleicher Intensität.

Dank aktueller Forschungen stehen kompakte und leicht zu handhabende fs-Lasersysteme zur Verfügung. Wird deren Strahlung auf einen Fleck von einigen µm

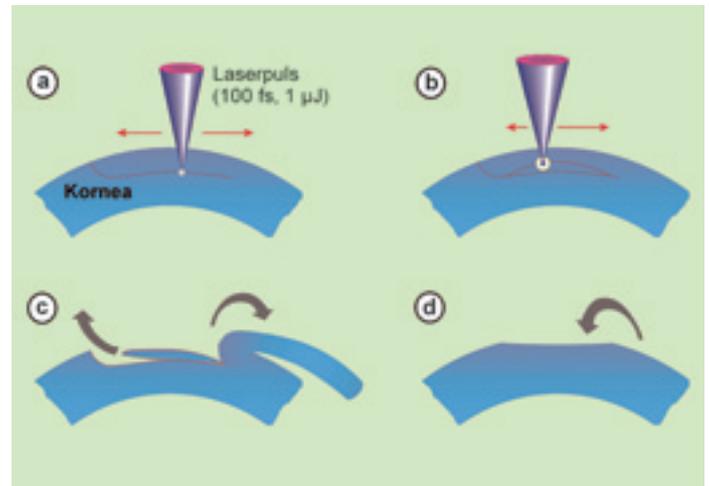


Abbildung 5  
 Prinzip der fs-LASIK. In einem ersten Schritt wird ein lamellärer, intrastromaler Schnitt durchgeführt, der im Wesentlichen dem Schnitt eines Mikrokeratoms entspricht (a). Mit einem darauf folgenden zweiten Schnitt wird ein intrastromales Lentikel präpariert, dessen Brechkraft der Fehlsichtigkeit des Patienten entspricht (b). Daraufhin kann der frei präparierte korneale Lappen (Flap) angehoben und das darunter liegende Lentikel entfernt werden (c). Beim Schließen des Flaps wird sich die Oberfläche der Hornhaut dem entfernten Stroma-Volumen anpassen und eine entsprechende Änderung in der Brechkraft hervorrufen (d).

»Der Laser« zeigt also ein vielseitiges Einsatzspektrum in der Augenchirurgie und ermöglicht Operationen, die mit dem chirurgischen Messer sehr viel schwieriger oder überhaupt nicht möglich wären.

Dennoch muss an dieser Stelle festgehalten werden:

Laser ist nicht gleich Laser. Mit einem im ultravioletten Spektralbereich emittierenden Excimer Laser kann nicht die Netzhaut koaguliert werden und ein Diodenlaser zeigt im nahen Infrarotbereich keine Wechselwirkung an der Hornhaut. Für fast jede Anwendung ist ein unterschiedliches

Lasersystem erforderlich. Die Anschaffungskosten für ein einzelnes System sind nicht unerheblich. So bleibt den Augenärzten oft nur die Möglichkeit, sich auf wenige Anwendungen zu spezialisieren. Den Universal-Laser für alle genannten Einsatzgebiete wird es nie geben.