Wasser ist eine auf dieser Welt einzigartige chemische Verbindung, denn sie kommt in der Natur in allen drei Aggregatzuständen – flüssig, fest und gasförmig – vor. Die Wechselwirkungen der verschiedenen Laser mit diesem Element, aus dem der Mensch zu etwa 70 Prozent besteht, sind hingegen vielfältig. Für den medizinischen Einsatz von Lasern in der täglichen Praxis ist es daher sinnvoll, den Effekt der einzelnen Laserarten auf die wasserhaltigen biologischen Gewebe richtig verstehen und einschätzen zu können.

Prof. Dr. Axel Donges
[Infos zum Autor]

Literatur

Die Wechselwirkung eines Er:YAG-Laserstrahls mit Wasser

Prof. Dr. Axel Donges

Der Er:YAG-Laser ist ein Festkörperlaser. Wie der Name besagt, wird zur Lichtverstärkung ein mit Erbium-Ionen dotierter YAG-Kristall (YAG = Yttrium-Aluminium-Granat = $Y_3Al_5O_{12}$) verwendet. Mithilfe von Licht (z.B. Blitzlampe, Laserdiode) werden die dreifach positiv geladenen Erbium-Ionen angeregt. Bei dem sich anschließenden Übergang vom oberen Laserniveau $^4I_{11/2}$ zum unteren Laserniveau $^4I_{13/2}$ wird infrarote Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von λ = 2,94 µm frei. Die Lebensdauer des unteren Laserniveaus ist fast um eine Größenordnung höher als die des oberen. Aus diesem Grunde können Er:YAG-Laser nur im Pulsbetrieb arbeiten (Selbstterminierung). Mit kommerziellen Systemen werden Pulsenergien bis 10 J, Pulsdauern bis 300 µs und Repetitionsraten bis 50 Hz erreicht.

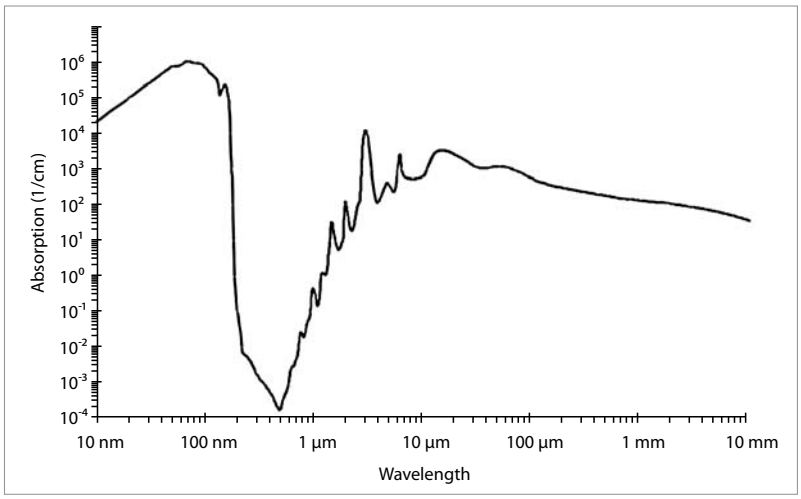

Abb. 1: Absorption von Wasser in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichts.

Die Wechselwirkung mit Wasser

Das Absorptionsspektrum von reinem Wasser ist in Abbildung 1 über einen weiten Spektralbereich dargestellt. Die Wellenlänge des Er:YAG-Lasers (λ = 2,94 µm) liegt in einem lokalen Absorptionsmaximum des Wassers. Nur im UV-

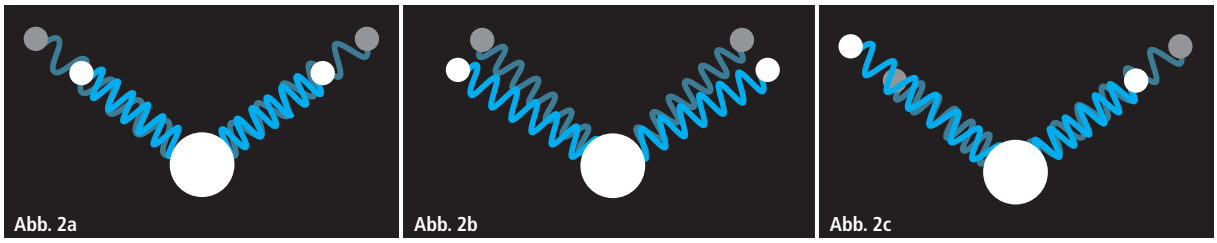

Abb. 2: Schematische Darstellung der Eigenschwingungen eines Wassermoleküls: **a)** symmetrische Streckschwingung, **b)** asymmetrische Biegeschwingungen und **c)** asymmetrische Streckschwingung.

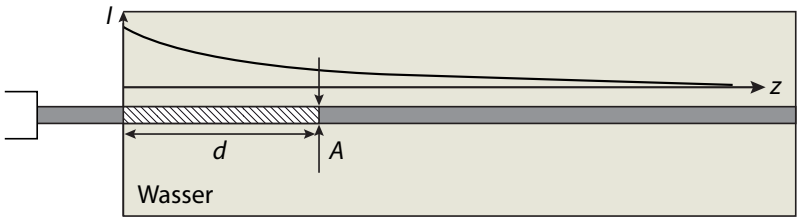

Abb. 3: Schematische Darstellung zur Absorption eines Laserstrahls in Wasser. 63 % der Energie eines Laserpulses werden in dem schraffierten Volumen *Ad* absorbiert.

Bereich bei Wellenlängen unter 180 nm ist das Absorptionsvermögen noch größer. Die Absorptionskoeffizienten α betragen für einige prominente Wellenlängen:

- α (Er:YAG-Laser: $\lambda = 2{,}94\,\mu m$) $= 1{,}2 \cdot 10^4/cm$
- α (CO_2-Laser: $\lambda = 10{,}6\,\mu m$) $= 1 \cdot 10^3/cm$
- α (Nd:YAG-Laser: $\lambda = 1{,}06\,\mu m$) $= 1 \cdot 10^{-1}/cm$ und
- α (frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser: $\lambda = 0{,}53\,\mu m$) $= 3 \cdot 10^{-4}/cm$

Die α-Werte verteilen sich über neun Zehnerpotenzen. Der Grund für das hohe Absorptionsvermögen des Wassers bei der Wellenlänge des Er:YAG-Lasers beruht auf der Tatsache, dass dessen Wellenlänge ($\lambda = 2{,}94\,\mu m$) sehr effizient Eigenschwingungen der Wassermoleküle anregen kann. Die chemischen Bindungen zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoffatomen wirken wie elastische Federn, sodass ein Wassermolekül als ein schwingungsfähiges Feder-Masse-System (bestehend aus zwei Federn und drei Massen) aufgefasst werden kann. Ein Wassermolekül kann verschiedenartige Schwingungen (symmetrische Streckschwingung, asymmetrische Biegeschwingung und asymmetrische Streckschwingung sowie deren Überlagerungen) ausführen (Abb. 2). Jeder Schwingungstyp hat eine ganz bestimmte, charakteristische Eigenfrequenz (symmetrische Streckschwingung: 110 THz, asymmetrische Biegeschwingung: 478 THz, asymmetrische Streckschwingung: 113 THz), wobei die Eigenfrequenzen durch mögliche Rotationen der Moleküle noch modifiziert werden. Stimmt eine Eigenfrequenz des Wassermoleküls mit der Laserfrequenz (102 THz im Fall des Er:YAG-Lasers) überein, so werden die Moleküle resonant zu Schwingungen und Rotationen angeregt, was letztlich zu einem Aufheizen des Wassers führt.

Absorption eines Laserstrahls

Die Intensität *I* eines Laserstrahls nimmt in einem absorbierenden Medium mit zunehmender Strecke *z* nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz

1. $I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$

ab. Der Kehrwert des Absorptionskoeffizienten α gibt anschaulich diejenige Strecke *d* an, innerhalb der die Intensität von dem Anfangswert (I_0) auf 37 % abfällt.

2. $d = 1/\alpha$

wird als Eindringtiefe des Laserstrahls bezeichnet. Für die vier zuvor genannten Wellenlängen berechnen sich mit den gegebenen Daten (Abb. 1) die Eindringtiefen zu

- *d* (frequenzverdoppelter Nd:YAG) = 33 m,
- *d* (Nd:YAG) = 10 cm,
- *d* (CO_2) = 10 µm und
- *d* (Er:YAG) = 0,83 µm.

Wasser ist für das Licht des CO_2- und Er:YAG-Lasers (IR) praktisch opak, während es für das Licht des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers (VIS) eine recht hohe Transparenz aufweist. Wir betrachten im Weiteren die Absorption eines einzelnen Laserpulses mit der Energie ΔW_L. 63 % (= 100–37 %) der Pulsenergie wird im Bereich $0 \leq z \leq d = 1/\alpha$, d.h. in dem Volumen *Ad*

ANZEIGE

Laser (Wellenlänge)	Indikation			
	Kariestherapie	Endodontie	Parodontologie	Oralchirurgie
Argon-Laser (0,488 bis 0,514 µm)	–	–	0	0
Dioden-Laser (0,81 µm)	–	0	0	0
Nd:YAG-Laser (1,06 µm)	–	0	0	0
Ho:YAG-Laser (2,1 µm)	–	–	–	0
Er:YAG-Laser (2,94 µm)	+	+	+	+
CO_2-Laser (9,6; 10,6 µm)	0	–	0	+
Eignung: + gut | 0 bedingt | – nicht				

Tab. 1: Eignung von verschiedenen Lasersystemen für die Zahnheilkunde.[2]

(Abb. 3), absorbiert (*A*: Laserstrahlquerschnitt). Die absorbierte Energie führt zu einem Temperaturanstieg des Wassers. Sofern keine Phasenumwandlung (Verdampfen) stattfindet und die Laserpulse so kurz sind, dass Wärmeleitungseffekte vernachlässigt werden können, gilt

3. $0{,}63\,\Delta W_L = c\rho A d \Delta T$ bzw.

4. $$\frac{\Delta W_L}{A\Delta T} = \frac{c\rho d}{0{,}63} = \frac{c\rho}{0{,}63\,\alpha}$$

Hierbei bedeuten $c = 4{,}2$ J/gK und $\rho = 1$ g/cm³ die spezifische Wärmekapazität bzw. die Massendichte des absorbierenden Wassers. Mit Gleichung 4 kann die erforderliche Pulsenergie pro Flächen- und Temperatureinheit berechnet werden, um das Wasser in dem Volumen *Ad* zu erwärmen. Für Wasser gilt für die wichtigsten Laser:

- Er:YAG: $\frac{\Delta W_L}{A\Delta T} = 556\ \frac{\mu J}{cm^2 K}$
- CO_2: $\frac{W_L}{\Delta T} = 6{,}7\ \frac{mJ}{cm^2 K}$
- Nd:YAG: $\frac{W_L}{\Delta T} = 67\ \frac{J}{cm^2 K}$
- frequenzverdoppelter Nd:YAG:

$$\frac{W_L}{\Delta T} = 22\ \frac{kJ}{cm^2 K}$$

Der Er:YAG-Laser braucht von allen Lasern die geringste Pulsenergie, um Wasser zu erwärmen. Beispiel: Ein frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser braucht eine 40-millionenfach größere Pulsenergie als ein Er:YAG-Laser, um bei gleicher Querschnittsfläche die gleiche Temperaturerhöhung in Wasser hervorzurufen.

Einsatz in der Medizin

Der Er:YAG-Laser besitzt mit Hinblick auf eine hohen Absorption in Wasser die optimale Wellenlänge. Bei einem Er:YAG-Laser benötigt man im Vergleich zu anderen Lasern die geringsten Pulsenergien, um Wasser aufzuheizen. Damit verbunden ist auch die kleinste Eindringtiefe in Wasser von knapp einem Mikrometer.
UV-Licht mit Wellenlängen unter 180 nm wird zwar noch stärker absorbiert, eignet sich aber nicht für den praktischen Einsatz. Unterhalb 200 nm wird UV-Strahlung durch molekularen Sauerstoff (O_2) der Luft absorbiert, wobei sich Ozon bildet. UV-Strahlung mit Wellenlängen $100\,nm < \lambda < 200\,nm$ kann sich daher nur unter Schutzgas ausbreiten. Noch kurzwelligere Anteile (unter 100 nm) können sich nur noch im Vakuum ausbreiten. UV-Laser sind daher keine Alternative.
Mit einem Er:YAG-Laserstrahl können alle wasserhaltigen Oberflächen „bearbeitet" werden. Er ist daher prädestiniert für Anwendungen in der Medizin (Tabelle 1), da biologisches Gewebe (z.B. Haut, Muskel, Knochen, Zähne) stets einen hohen Wassergehalt aufweist. Neben dem Er:YAG-Laser wird auch die IR-Strahlung des Er,Cr:YSGG-Lasers (Wellenlänge: 2,78 µm) in Wasser stark absorbiert. Allerdings wird ein nicht ganz so hoher Wert für die Absorption gemessen: α(Er:YSGG) = $4 \cdot 10^3$/cm (was eine Eindringtiefen von *d*(Er:YSGG) = 2,5 µm bedeutet). Er:YAG- und Er,Cr:YSGG-Laser sind die einzigen Laser, die wissenschaftlich abgesichert zur Zahnhartsubstanzbearbeitung geeignet sind.

Zusammenfassung

Das Licht eines Er:YAG-Lasers weist – verglichen mit allen anderen Lasern – für Wasser den größten Absorptionskoeffizienten und die geringste Eindringtiefe auf. Grund für dieses hohe Absorptionsvermögen bzw. die geringe Eindringtiefe sind Eigenschwingungen der Wassermoleküle, die durch die Er:YAG-Strahlung angeregt werden. Der Er:YAG-Laserstrahl ist daher prädestiniert, wasserhaltiges Gewebe (Hart- und Weichgewebe) zu bearbeiten. UV-Strahlung mit Wellenlängen unter 180 nm wird in Wasser noch stärker absorbiert, kann sich aber in Luft nicht ausbreiten. UV-Laser sind daher keine Alternative.

Kontakt
Prof. Dr. Axel Donges
Fachhochschule und Berufskollegs NTA
Seidenstraße 12–35
88316 Isny im Allgäu
donges@nta-isny.de