

Die Wechselwirkung von Licht mit Materie

Ein Überblick über die physikalischen Grundlagen

Laser werden seit vielen Jahrzehnten erfolgreich in der Medizin eingesetzt. Ihr Anwendungsspektrum ist zweigeteilt: Auf der einen Seite setzt man sie zur Diagnostik, auf der anderen Seite zu therapeutischen Zwecken ein. Alle, auch nichtmedizinische, Laseranwendungen beruhen auf den gleichen physikalischen Grundlagen, der Wechselwirkung von Licht mit Materie. In diesem Beitrag wird daher eine Übersicht über die wichtigsten elementaren Wechselwirkungsprozesse gegeben.

PROF. DR. AXEL DONGES/ISNY IM ALLGÄU

Wechselwirkungsprozesse

Reflexion und Brechung

Fällt Licht auf die Grenzfläche zwischen zwei Medien (z. B. Luft und Wasser), so wird an der Grenzfläche ein Teil des Lichts reflektiert (Abb. 1a). Der Reflexionsgrad R beschreibt das Verhältnis von reflektierter zu einfallender Lichtleistung. Er hängt von den physikalischen Eigenschaften der beiden Medien (z. B. Brechzahlen) und des Lichts (z. B. Wellenlänge, Einfall- und Polarisationsrichtung) ab. Das nichtreflektierte Licht dringt in das zweite

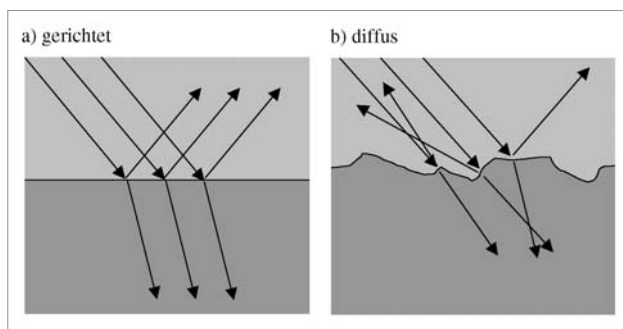


Abb. 1: Schematische Darstellung der gerichteten und diffusen Reflexion und Brechung.

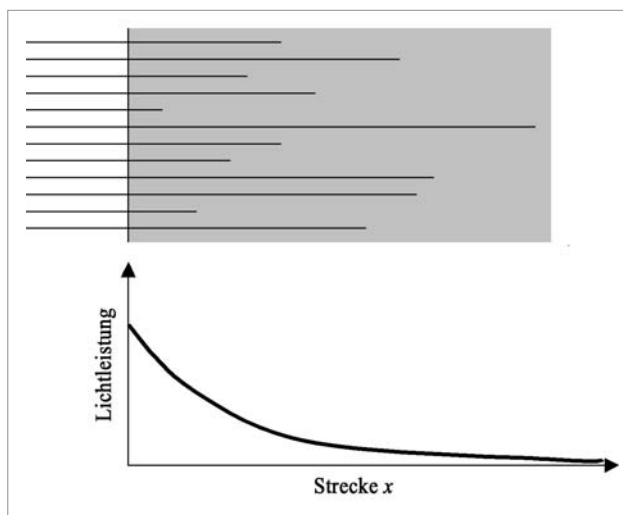


Abb. 2: Zur Absorption von Licht.

Medium ein und wird dabei gebrochen. Bei einer rauen Grenzfläche werden Reflexion und Brechung diffus (Abb. 1b).

Absorption

Breitet sich ein Lichtstrahl in einem Medium aus, so nimmt seine Leistung längs seines Weges ab. Im Teilchenbild des Lichts wird dies als eine Abnahme der Anzahl der Photonen interpretiert (Abb. 2). Die Materie „verschluckt“ Photonen und wandelt letztendlich deren Energie in innere Energie der Materie um. Mathematisch lässt sich die Abnahme der Anzahl der Photonen bzw. die Abnahme der Lichtleistung mit einer Exponentialfunktion, dem Lambert-Beerschen Gesetz,

$$P(x) = P_0 e^{-\mu_a x}$$

(P_0 : Leistung, μ_a : Absorptionskoeffizient und x : im absorbierenden Medium zurückgelegte Strecke) beschreiben. Der Absorptionskoeffizient zeigt im Allgemeinen eine starke Wellenlängenabhängigkeit. Den Kehrwert des Absorptionskoeffizienten bezeichnet man als mittlere Eindringtiefe (bzgl. Absorption). Die mittlere Eindringtiefe charakterisiert diejenige Strecke, entlang der die Lichtleistung (oder die Anzahl der Photonen) von 100 % auf 37 % abfällt. Anders ausgedrückt: 63 % der einfallenden Lichtleistung (bzw. Photonen) werden entlang der mittleren Eindringtiefe absorbiert. In der folgenden Tabelle sind mittlere Eindringtiefen (bzgl. Absorption) in

Wellenlänge	Laser	mittlere Eindringtiefe (bzgl. Absorption)
10.600 nm	CO ₂ -Laser	0,1 mm
2.940 nm	Er:YAG-Laser	0,01 mm
1.064 nm	Nd:YAG	8 mm
980 nm	Laser-Diode 980	4 mm
810 nm	Laser-Diode 810	5 mm
532 nm	Frequenzverdoppelter Nd:YAG	50.000 mm = 50 m

Mittlere Eindringtiefen (bzgl. Absorption) für verschiedene Wellenlängen.

Wasser für verschiedene Wellenlängen exemplarisch zusammengefasst.

Streuung

Licht wird an kleinen Strukturen (z. B. Atomen oder Nebeltröpfchen) reflektiert, gebrochen und gebeugt (Abb. 3). Man bezeichnet dies zusammenfassend als Streuung. Die Streuung führt ebenfalls zu einer Schwächung des ursprünglichen Lichtstrahls. Die vom Detektor nachgewiesene Lichtleistung (Abb. 3) nimmt ebenfalls exponentiell mit der Strecke x ab, obwohl keine Energie absorbiert wird.

$$P(x) = P_0 e^{-\mu_s x}$$

Der Streukoeffizient μ_s ist wie der Absorptionskoeffizient wellenlängenabhängig. $\frac{1}{\mu_s}$ ist die mittlere Eindringtiefe bezüglich Streuung.

Kombination der Effekte

Bei der Lichtausbreitung in Materie treten alle zuvor geschilderten Effekte auf. Für die am Detektor ankommende Leistung $P(x)$ gilt (siehe Abb. 4)

$$P(x) = (1 - R) P_0 e^{-(\mu_a + \mu_s)x}$$

(P_0 : Leistung des Laserstrahls vor dem Eintritt in die Materie, R : Reflexionsfaktor). Die mittlere Eindringtiefe (bzgl. Absorption und Streuung) ist der Kehrwert der Summe von Absorptions- und Streukoeffizient.

Wenn die Streuprozesse gegenüber der Absorption eine untergeordnete Rolle spielen, finden die Absorptionsprozesse in einem Volumen, dessen Querschnittsfläche durch die Querschnittsfläche des Laserstrahls und dessen Länge näherungsweise durch die mittlere Eindringtiefe (bzgl. Absorption) gegeben ist, statt (Abb. 5a). Im umgekehrten Fall (Streuprozesse dominieren) ergibt sich ein verbreitertes, aber verkürztes Volumen, in dem das Licht absorbiert wird (Abb. 5b).

Nur das absorbierte Licht kann die Materie erwärmen. Der reflektierte und gestreute Anteil spielt keine Rolle. In der Zeitspanne τ wird die Energie $E = 0,63 (1 - R) P_0 \tau$ bei Vernachlässigung der Streuung in einem Volumen der Größenordnung $V \approx \frac{1}{\mu_a} A$ (A : Querschnittsfläche des Laserstrahls, $\frac{1}{\mu_a}$: mittlere Eindringtiefe) absorbiert. Das bedeutet eine absorbierte Leistungsdichte von $\frac{E}{V\tau} \approx 0,63 \cdot (1 - R) \mu_a \frac{P_0}{A}$. Die absorbierte Leistungsdichte hängt von der Intensität $I = \frac{P_0}{A}$ des Laserstrahls und den Materialeigenschaften R (Reflexionsgrad) und μ_a (Absorptionskoeffizient) ab.

Wärmeleitung

Das im Absorptionsgebiet absorbierte Licht wird ganz oder teilweise in Wärmeenergie umgewandelt, d. h. je nach spezifischer Wärmekapazität steigt die Temperatur im Absorptionsgebiet an. Es bildet sich ein Temperaturgefälle aus, das je nach Wärmeleitfähigkeit einen mehr oder weniger großen Wärmestrom – weg vom Absorp-

ANZEIGE

LASERZAHNHEILKUNDE

Handbuch

'06

Mit dieser Publikation legt die Oemus Media AG ein aktuelles Kompendium zum Thema Laser in der Zahnarztpraxis vor. Im Handbuch Laserzahnheilkunde informieren renommierte Autoren aus Wissenschaft, Praxis und Industrie über die Grundlagen der Lasertechnologie und geben Tipps für den Einstieg in diesen Trendbereich der Zahnheilkunde sowie dessen wirtschaftlich sinnvolle



Integration in die tägliche Praxis. Zahlreiche Fallbeispiele und ca. 150 farbige Abbildungen dokumentieren die breite Einsatzmöglichkeit der Lasertechnologie.

Relevante Anbieter stellen ihr Produkt- und Servicekonzept vor. Thematische Marktübersichten ermöglichen die schnelle Information über CO₂-Laser, Er:YAG-Laser, Nd:YAG-Laser, Diodenlaser und Softlaser. Präsentiert werden bereits eingeführte Produkte sowie Neuentwicklungen, die neues Potenzial erschließen.

Das Kompendium wendet sich an Einsteiger und erfahrene Anwender, die in der Laserzahnheilkunde eine viel versprechende Chance sehen, ihr Leistungsspektrum zu erweitern und damit die Zukunft ihrer Existenz zu sichern.

50,00 € zzgl. MwSt. + Versand
ab sofort Faxbestellung unter 03 41/4 84 74-2 90

Verbindl. Bestellung (keine Rückgaberecht)

___ Exempl. Handbuch 2006 Laserzahnheilkunde

Stempel

Datum/Unterschrift

LJ 1/06

tionsgebiet – hervorruft. Deshalb kann mit dem Laserstrahl ein Volumen aufgeheizt werden, das deutlich größer als das in Abbildung 5 skizzierte Absorptionsgebiet ist. Beim Einsatz kurzgepulster Laserstrahlung wird der Bearbeitungsprozess dermaßen verkürzt, dass das (vergleichsweise langsame) Abfließen der Wärme und die damit verbundene Temperaturabsenkung für die Bearbeitung keine Rolle spielt. Die unterschiedliche Wirkung von kontinuierlicher und gepulster Laserstrahlung soll das folgende Beispiel verdeutlichen: „Die unterschiedliche Wirkung von kontinuierlicher und gepulster Laserstrahlung soll das folgende Beispiel verdeutlichen: Trifft ein sichtbarer Laserstrahl mit einer Intensität von 25 W/m^2 für $0,25 \text{ s}$ direkt auf ein menschliches Auge, so wird dies gerade noch als ungefährlich angesehen. Zum Vergleich betrachten wir einen ansonsten identischen, aber kurzgepulsten Laserstrahl gleicher mittlerer Intensität (ebenfalls 25 W/m^2), der pro Sekunde einen Puls mit einer Dauer von jeweils 1 ns emittiert. Ein einzelner Puls hat demnach eine auf den Strahlquerschnitt bezogene Energie von 25 J/m^2 , aber eine wesentlich höhere Spitzenintensität von 25 GW/m^2 . Eine laserschutzmedizinische Analyse ergibt, dass bei einem einzigen Puls die maximal zulässige Bestrahlung des Auges um den Faktor 5.000 überschritten wird, weshalb das Auge bereits während des ersten Pulses geschädigt wird. Dieses Beispiel zeigt: Die von den beiden Laserstrahlen ausgehende Gefährdung ist, obwohl sie die gleiche (!) mittlere Intensität haben, dramatisch unterschiedlich.

Die unterschiedliche Wechselwirkungsweise von gepulster und kontinuierlicher Laserstrahlung mit Materie ist jedoch nicht nur auf die Wärmeleitung zurückzuführen. Bei gepulster Laserstrahlung werden z.T. so hohe Intensitäten erreicht, dass nichtlineare Effekte (z.B. Multiphotonenabsorption) einsetzen.“

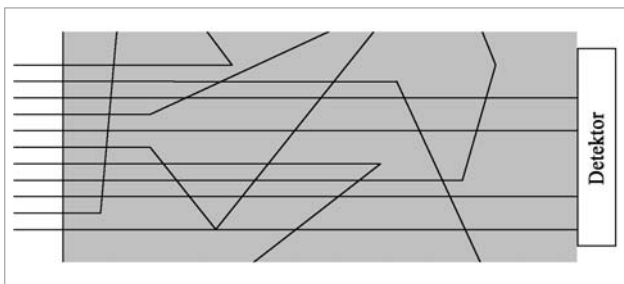


Abb. 3: Zur Streuung von Licht.

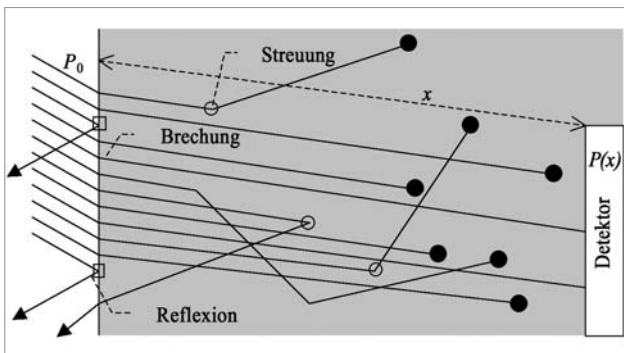


Abb. 4: Zur Reflexion, Brechung, Streuung und Absorption von Licht.

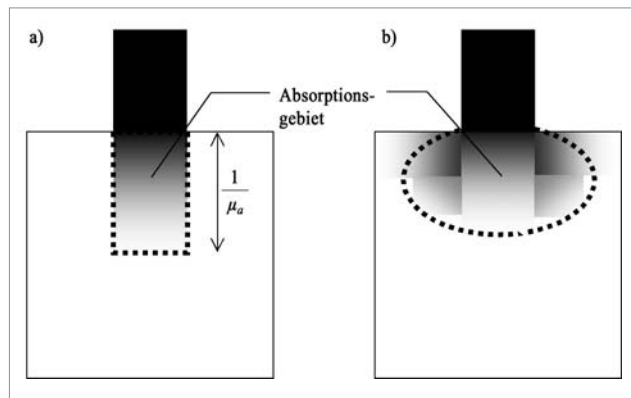


Abb. 5: Schematische Darstellung des Raumgebiets, in dem das Laserlicht absorbiert wird. a) Streuung vernachlässigbar; b) Streuung nicht vernachlässigbar.

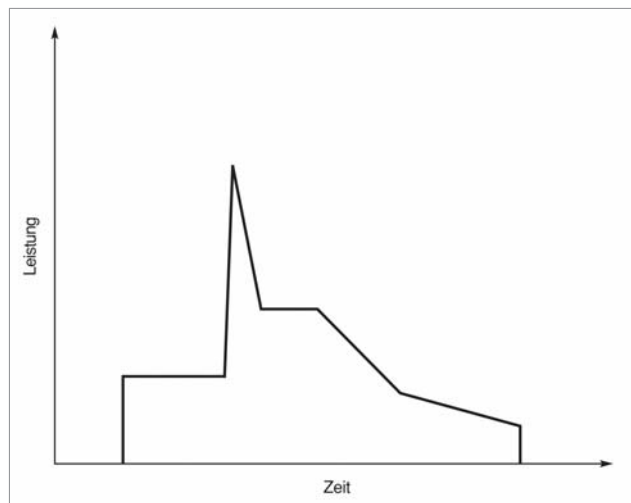


Abb. 6: Qualitativer Verlauf der Laserleistung. Das Bild zeigt eine Pulsform, die gerne beim Schweißen eingesetzt wird (Beispiele für gewählte Parameter: Repetitionsrate: 20 Hz , Pulsenergie: 2 J , Pulsdauer: 3 ms , Laserfleckdurchmesser: $0,3 \text{ mm}$).

Zusammenfassung

Bei der Lasermaterialbearbeitung (egal ob es sich um biologisches Gewebe oder Bleche im Automobilbau handelt) müssen, je nach Zielsetzung, die Eigenschaften des Laserstrahls und die Materialeigenschaften aufeinander angepasst sein, um ein optimales Bearbeitungsergebnis zu erzielen (Abb. 6).

- Die wichtigsten Laserstrahlparameter sind: Strahlprofil (im Wesentlichen: Strahldurchmesser), Wellenlänge sowie Intensität (Mittelwert und zeitlicher Verlauf).
- Die wichtigsten Eigenschaften der zu bearbeitenden Materie sind: Reflexionsgrad, Absorptions- und Streukoeffizient, Schmelz- und Siedetemperatur, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit.

Korrespondenzadresse:
 Prof. Dr. Axel Donges
 Fachhochschule und Berufskollegs NTA
 Seidenstr. 12–35, 88316 Isny im Allgäu