

# Einsatzmöglichkeiten der Laserchirurgie in der Tiermedizin\*

## Teil 1: Grundlagen

K. Weigand, H. Gerhards

Aus der Chirurgischen Tierklinik der Ludwig-Maximilians-Universität München,  
Lehrstuhl für Pferdechirurgie (Vorstand: Prof. Dr. H. Gerhards)

### Schlüsselwörter: Laser – physikalische Grundlagen – Wirkungsprinzip – Licht

**Zusammenfassung:** Die vorliegende Arbeit umreißt die Grundzüge der Physik der medizinischen Laser. Die physikalischen Grundlagen des Lasers gehen zurück bis zum Jahr 1914 und dem Prinzip der stimulierten Photonenemission in Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie.

Wechselt ein Atom von einem angeregten Zustand in einen energetisch niedrigeren Zustand, so wird Energie in Form eines Photons freigesetzt. Trifft dieses Photon nun auf ein angeregtes Atom, dann wird es die Freisetzung eines weiteren Photons erzeugen. Bei diesem Vorgang entstehen zwei gleichartige Photonen.

Zur Erzeugung leistungsfähiger Laserstrahlungen ist, neben der Eignung des Lasermediums zur Elektronenanregung und Photonenemission, ein optischer Verstärker nötig. Das hierbei ausgestrahlte Licht unterscheidet sich in drei wesentlichen Eigenschaften von Sonnenlicht oder den konventionellen Lichtquellen. Diese sind die Kohärenz, Kollimation und Monochromasie.

### Key words: Laser – Physical fundamentals – Mode of action – Light

#### Summary: The application of laser assisted surgery in veterinary medicine. Part 1: Fundamentals

This article will outline the key words of laser physics. Albert Einstein set the basics of laser physics by characterizing the principles of stimulated emission of radiation in 1914.

An excited atom can change from these excited energy level to a lower level by emitting energy in form of photons. If this photon strikes another excited atom, it will stimulate emission of another photon. By these action two identical photons will emerge.

An optical resonator is used to amplify the stimulated light emission coming from a laser medium. Laser differs from other light sources in three important properties: coherence, collimation, and monochromasia.

## Geschichte des Lasers

Die Möglichkeit einen Laser herzustellen wurde erstmals 1951 von den zwei nordamerikanischen Wissenschaftlern C. H. Towns und A. L. Shalows und gleichzeitig in der UdSSR von G. Basow und A. M. Projorow dargestellt (1, 2). Obwohl die erste Publikation über die Realisierung eines Lasers durch Theodore Maiman im Jahre 1960 (3) von der Fachwelt scheinbar ignoriert wurde, begannen nur wenige Monate später Untersuchungen über eine mögliche medizinische Nutzung dieser neuen Licht-

quelle. Besonders die beiden Fachdisziplinen Ophthalmologie und Dermatologie, die Licht als Therapeutikum schon lange zuvor einsetzten, trieben die Entwicklung der medizinisch genutzten Laserarten voran. So wurde der von Maiman entwickelte Rubinestkörperlaser 1961 von Campell in die Augenheilkunde und 1963 von Goldman in die Dermatologie eingeführt. 1964 berichteten Stern und Sognnaes über die ersten erfolgreichen Abtragungsversuche von Schmelz und Dentin mit einem Rubinlaser. Nur ein Jahr später fanden die ersten Versuche mit einem Kohlendioxid-Laser – auch Lichtskalpell genannt – durch Polanyi und später durch Kaplan statt. So hat sich der Laser seit der ersten Realisierung durch Maiman einen festen Platz in der Medizin gesichert (1, 2, 4, 6).

\* Herrn Professor Dr. DDr. h.c. G. Dirksen zum 70. Geburtstag gewidmet.

## Physikalische Grundlagen

Voraussetzung für den Einsatz des Lasers in den verschiedenen Disziplinen der Medizin ist ein fundiertes Wissen um die Grundlagen der Laserstrahlung. Denn in weiten Wellenlängenbereichen entzieht sich der Laser allen unseren Sinneswahrnehmungen und ist kaum mit den uns vertrauten Lichtarten vergleichbar.

Laser können aufgrund der Wellenlänge (Farbe), bei der sie Licht emittieren, der pulsierenden oder kontinuierlichen Arbeitsweise sowie der Lichtleistung und Lichtenergie unterschieden werden. Die Wirkungsweise eines Laserstrahls auf Materie ist von der Wellenlänge seines Lichtes abhängig. Diese wiederum wird vom verwendeten Lasermedium – nach dem der Laser seinen Namen erhält – bestimmt (1, 2).

Die kleinsten kompletten Bausteine der Materie, die Atome ( $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  = unteilbar), bestehen im Kern aus komprimierten Protonen und Neutronen, um die sich in sehr großem Abstand die Elektronen auf Bahnen bewegen. Nach den Erkenntnissen von Bohr sind folgende Bedingungen erfüllt:

- Die Elektronen bewegen sich nur auf bestimmten, festen Bahnen.
  - Wechseln Elektronen auf diesen Bahnen hin und her, so müssen sie Energie in Form von Strahlung entweder abgeben (»Emission«) oder aufnehmen (»Absorption«).
- Die weiter außen gelegenen Bahnen haben ein höheres Energieniveau. So muß ein Elektron aus einer energetisch tieferen Bahn (mit der Energie » $E_b$ «) die Energie » $V_{ab}$ « in Form eines Photons aufnehmen (»Absorption«), um dann den energetisch höheren Zustand (mit der Energie » $E_a$ «) zu erreichen.

Da der angeregte Zustand » $E_a$ « jedoch nicht stabil ist, fällt das Elektron spontan wieder auf die tiefere Bahn, dem stabilen Grundzustand, zurück. Hierbei gibt das Elektron dieselbe Energiemenge » $V_{ab}$ « in Form von elektro-

magnetischer Strahlung, also als Photon, ab (»spontane Emission«).

Beschleunigt wird die Rückkehr in den stabilen Grundzustand, wenn das angeregte Elektron ( $E_a$ ) von einer elektromagnetischen Welle (»Photon«) mit genau der Energie » $V_{ab}$ « getroffen wird. Bei diesem Vorgang bleibt das induzierende Photon erhalten, ferner wird die Energiedifferenz der beiden Bahnen, » $V_{ab}$ «, als eine elektromagnetische Strahlung abgegeben (»induzierte Emission«) (Abb. 1). Die beiden bei der induzierten Emission abgegebenen Photonen haben die gleiche Phase und Wellenlänge, d. h. es entsteht eine kohärente Welle (1, 2, 8, 9).

### Wirkungsprinzip eines Lasers

Die induzierte Emission ist ein Verstärkungsprozeß für Photonen. Durch die Zurückführung eines Teils des Ausgangssignals in den Eingang eines Verstärkers kann die ursprüngliche Leistung vervielfacht werden. Hierfür ist im Falle des Lasers – neben einem Lasermedium, bei dem die induzierte Emission eine genügende Verstärkung liefert – eine effiziente Rückreflektion des aus dem Lasermedium strahlenden Lichtes über eine spezielle Spiegelanordnung (»Resonator«) in das Lasermedium nötig (1). So steht die Bezeichnung »Laser« für »Light amplification by stimulated emission of radiation« – also Lichtverstärkung durch angeregte Strahlungsaussendung (2).

Voraussetzung für die Nutzung der induzierten Emission als Grundlage der Laserverstärkung ist, daß sich genügend viele Elektronen im angeregten Zustand befinden. Um einen ausreichenden Laserverstärkungseffekt erzeugen zu können, muß hierbei die Zahl der angeregten Elektronen im Lasermedium größer gehalten werden als die Besetzungszahl des niedrigeren Laserniveaus (»Besetzungsinversion«). Nur so führt die Zufuhr von Energie zu einer maximalen Photonenverstärkung und nicht nur zu einer gleichmäßigen Besetzung des unteren und oberen Energieniveaus (1, 4, 5, 7).

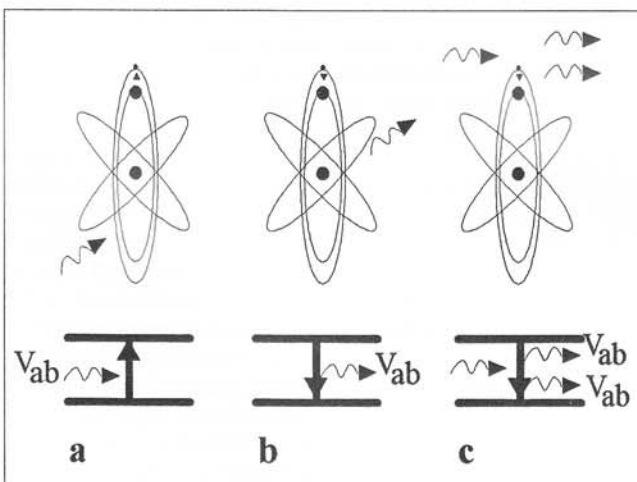


Abb. 1 Emissionsarten: a = Darstellung eines angeregten Atomes – ein Elektron steigt in eine energetisch höhere Bahn; b = Darstellung der spontanen Emission – ein Elektron fällt in eine energetisch niedrigere Bahn; c = Darstellung der induzierten Emission – ein auftreffendes Photon induziert den Zerfall eines angeregten Energieniveaus; hierbei entstehen zwei Photonen gleicher Phase und Wellenlänge.

### Lasermedien und deren Anregung

Als Lasermedien kommen nur Stoffe in Betracht, bei denen eine Besetzungsinversion erzeugt werden kann. Dennoch ist die Zahl der möglichen Medien (auch der menschliche Atem und einige Sorten von Dry-Gin wurden bereits zum Lasern gebracht) mittlerweile immens, wie auch die Anzahl der einzelnen Laserübergänge. Allein beim Neon gibt es um die 200 verschiedenen Laserübergänge. Aufgrund der genau definierten Energieniveaus dieser Laserübergänge besitzen die meisten Laser diskrete Laserstrahlungslinien. Die größte Ausnahme hiervon stellen die Farbstofflaser dar. Ihre Emissionswellenlängen sind – durch Veränderung ihrer Zusammensetzung – über größere Spektralbereiche weitgehend kontinuierlich veränderlich (1).

Die gebräuchlichsten Medien medizinisch genutzter Laser sind:

- Atome oder Ionen eingebaut in einem Festkörper (Rubin-Laser, Neodym-YAG-Laser, Holmium- und Erbium-YAG-Laser)
- Freie Atome, Ionen, Moleküle oder Molekülionen in Gasen oder Dämpfen (Argon- und Krypton-Ionen-Laser, Helium-Neon-Laser, Kohlendioxid-Laser, Excimer-Laser)

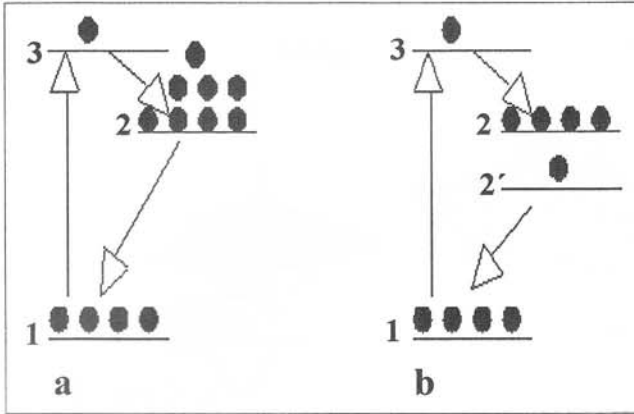


Abb. 2 Niveau-Lasersysteme: 1 = Grundzustand; 2 = langlebiger Zustand; 2' und 3 = kurzlebiger Zustand; a = »3-Niveau-Laser«: Laserübergang zwischen Niveau 2 und 1; b = »4-Niveau-Laser«: Laserübergang zwischen Niveau 2 und 2'.

– Farbstoffmoleküle gelöst in Flüssigkeiten (Rhodamin 6G-Laser)

In diesen Lasermedien muß durch geeignete Anregungsmechanismen eine Besetzungsinversion zweier Energieniveaus erzeugt werden. Als die wesentlichen Verfahren der Zufuhr von Energie in geeigneter Form konnten sich zwei Techniken etablieren:

- Gasentladungen
- optisches Pumpen

Gasentladungen als Form der Energiezufuhr finden bei gas- oder dampfförmigen Lasermedien Verwendung. Während der Gasentladung (hierfür werden zwei Elektroden in das Gas gebracht und eine Spannung von einigen kV erzeugt) zerfällt das neutrale Gas in Ionen und Elektronen (die sich mit sehr hoher Geschwindigkeit von der negativen zur positiven Elektrode bewegen), welche beim Zusammenstoß mit Atomen des Lasermediums ihre kinetische Energie auf den Stoßpartner übertragen und die Elektronen anregen.

Beim optischen Pumpen wird das Lasermedium durch Bestrahlung mit sehr intensivem Licht angeregt. Als Lichtquellen werden meist Blitzlampen (Maiman verwendete 1960 eine Xenon-Blitzlichtlampe) oder aber Laser (sogenannte Pumpelaser; hierfür wird z.B. ein Argon-Laser eingesetzt) verwendet.

Nach physikalischen Grundregeln kann jedoch beim Einstrahlen von Licht in ein System von nur zwei Energieniveaus auch bei noch so großer Pumpintensität nur eine gleichmäßige Besetzung dieser beiden Niveaus erreicht werden. Der Grund hierfür ist, daß die eingestrahlte Energie zu genauso vielen induzierten Emissionen (Abregungen) wie Absorptionen (Anregungen) führt.

Unter diesen Verhältnissen kann also die für die Lasertätigkeit notwendige Besetzungsinversion nicht erzeugt werden. Um die Voraussetzungen einer Lasertätigkeit dennoch zu erreichen, bedient man sich der Mehrniveau-Systeme (Abb. 2). So werden bei einem System von drei Energieniveaus die Elektronen aus dem Niveau »eins« in das Energieniveau »drei« angeregt. Bei den nun folgenden spontanen Emissionen kommt es neben einem Rückfall in den Grundzustand zu einer Besetzung des Niveaus »zwei«. Ist dieser energetische Zustand langlebig, so erhöht sich mit der Zeit die Besetzungszahl dieses Energie-

niveaus, und bei starker Energiezufuhr kann eine Besetzungsinversion zwischen dem Niveau »eins« und »zwei« erreicht werden. Da die Pumpleistung in den meisten Fällen nicht ausreicht, diese Besetzungsinversion während der Lasertätigkeit aufrecht zu erhalten, sind »drei-Niveau-Laser« immer gepulste Laser, d.h. im Gegensatz zum »Continuous-wave-Laser« werden hier Einzelimpulse mit Frequenzen von meist bis zu 15 Hertz aneinandergereiht.

Wird das System um ein weiteres Energieniveau erweitert und liegt dieses Niveau energetisch zwischen dem Grundzustand und dem Niveau »zwei« und ist zudem noch sehr kurzlebig, so kann eine ständige Besetzungsinversion mit nur geringer Pumpleistung aufrechterhalten werden. »Vier-Niveau-Laser« sind somit in der Lage, im *Continuous-wave*-Betrieb, d.h. mit kontinuierlicher Laserstrahlung, zu arbeiten (1, 2, 9).

### Resonator

Die Spiegel (optische Resonatoren), die einen Teil der Ausgangsenergie wieder in das Lasermedium zurückführen, sind meist zwei parallel angeordnete konfokale Hohlspiegel. Dieser konfokale Resonatortyp zeichnet sich durch die geringsten Beugungsverluste aus. Verwendet wird ein Resonatorgehäuse, welches in seiner Länge dem Krümmungsradius der beiden Hohlspiegel genau entspricht. Somit fallen die Brennpunkte beider Resonatorspiegel zusammen (= konfokal), da die Brennweite von Hohlspiegeln entsprechend physikalischer Gesetzmäßigkeiten dem halben Krümmungsradius entspricht (1, 9). Die Spiegel legen die Richtung fest, in der stimulierte Emission möglich sein wird. Nur Lichtwellen, die senkrecht auf die Spiegelfläche auftreffen, werden in gleicher Richtung reflektiert. Die so reflektierten Photonen durchlaufen erneut das Lasermedium, werden durch induzierte Emission verstärkt und vom anderen Spiegel reflektiert, wonach sich der Vorgang wiederholt. Entlang der Achse entsteht ein sich selbst fortwährend verstärkendes Lichtbündel (Abb.3). Ein schräg zum Spiegel auftreffender Strahl wird nach einer oder mehreren Reflektionen den

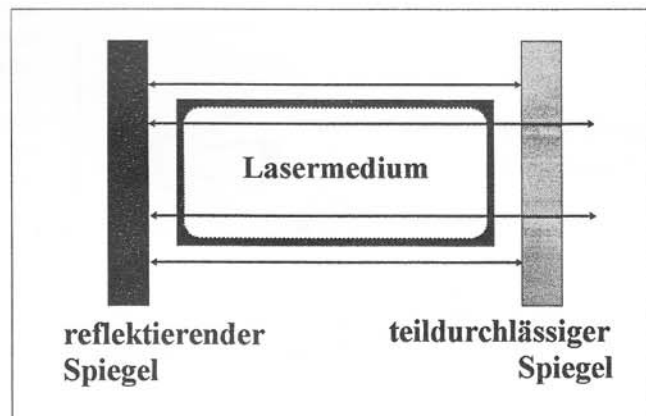


Abb. 3 Resonator: Das Laserlicht wird zwischen zwei Spiegeln reflektiert. Infolge der induzierten Emissionen beim Bestrahlen des Lasermediums wird die ursprüngliche Laserstrahlung vervielfältigt. Durch einen teildurchlässigen Spiegel kann ein Teil der Strahlung für die Nutzung des Laserlichtes aus dem Resonator ausgekoppelt werden.

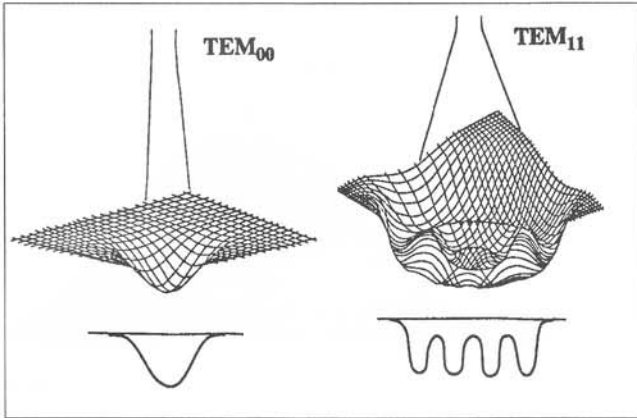


Abb. 4 Transversale Moden:  $TEM_{00}$  = Grundmode: Energieverteilung in jedem Querschnitt des Strahlenganges gleicht einer Gaußschen Kurve;  $TEM_{11}$  = Mode höherer Ordnung: Aufspaltung der Gesamtenergie in mehrere Energiespitzen bei gleicher Gesamtenergie (aus Berlien 1989).

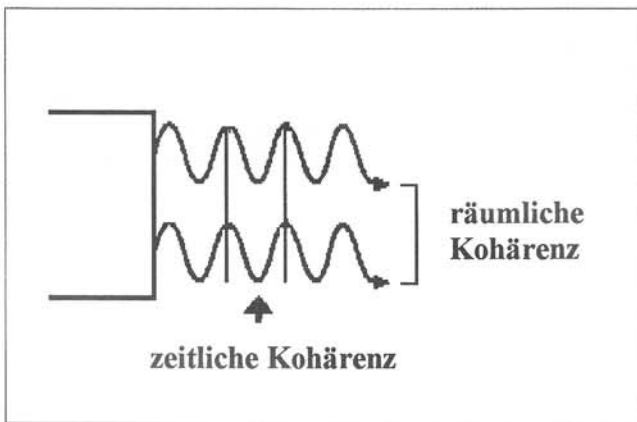


Abb. 5 Kohärenz: Alle Wellenzüge des Lasers haben identische räumliche und zeitliche Eigenschaften (nach Berlien 1989).

Laser verlassen. Er nimmt somit am Prozeß der Verstärkung nicht mehr teil und trägt zum Energieverlust des Lasers bei. Die parallel zur Achse reflektierten Wellen begegnen den auf den Spiegel zulaufenden Wellen. Lichtwellen können einander, ebenso wie zwei Schallwellen der gleichen Frequenz, verstärken, abschwächen oder auslöschen. Nur wenn die reflektierte Welle mit der ursprünglichen Welle in Phase läuft, tritt positive Interferenz auf und die Welle kann weiterbestehen (2).

Um die Laserstrahlung im Resonator zu erfassen, bedient man sich zweier Moden, d.h. der Ausbildung von Eigenschwingungen der elektromagnetischen Wellen im Resonator. Die longitudinalen Moden geben die wellenlängenabhängige Intensitätsverteilung wieder und werden durch den Abstand der Spiegel des Resonators bestimmt. So werden nur solche Laserwellen verstärkt, deren Vielfaches der halben Wellenlänge genau den Abstand der beiden Resonatorspiegel zueinander ergibt.

Die **transversalen Moden, TEM** (»transverse electromagnetic mode«), bestimmen die geometrische Intensitätsverteilung der Strahlung im Resonator. Sie stellen somit die Moden der Lichtstrahlung, die im Resonator

aufzutreten und nicht parallel zur optischen Achse schwingen, dar. Im einfachsten Fall stellt das transversale Moden das Grundmoden dar. Die Feldverteilung des Strahlverlaufes wird hierbei durch eine einfache Gauß-Funktion beschrieben.

Da der Laserstrahl in den transversalen Moden des Resonators emittiert wird, besitzt er im Grundmoden an jeder Stelle ein Intensitätsprofil wie eine Gaußsche Kurve. Das bedeutet, daß sich in der Mitte des Laserstrahles ein Intensitätsmaximum befindet, welches zum Strahlenrand hin glockenförmig abnimmt. Ist im Resonator jedoch keine feste Vorzugsrichtung vorgegeben, d.h. es liegt ein Moden höherer Ordnung vor, so erhält auch der Laserstrahl eine ganz andere Intensitätsverteilung (Abb. 4). Hierbei spaltet sich die Gesamtintensität in eine Vielzahl von Teilstrahlen auf, ohne den Gesamtwert der Strahlung zu verändern (1, 2, 4).

### Laserstrahlung

Drei wesentliche Merkmale – welche jeweils nur einzeln auch mit anderen Lichtquellen erreicht werden können – charakterisieren den Laserstrahl:

- Kohärenz (cohaerere, verbunden sein)
- Kollimation (colligare, zusammenbinden)
- Monochromasie ( $\mu\omicron\nu\omicron\text{-}\chi\rho\omega\mu\alpha$ , einfarbig)

Die **Kohärenz** besagt, daß sich alle Wellenzüge genau in zeitlicher und auch räumlicher Phase zueinander befinden, d.h. alle Wellen verlaufen mit der gleichen Schwingungsperiode (zeitliche Kohärenz) und zwei Punkte der gleichen Wellenfront haben eine Phasendifferenz gleich null (räumliche Kohärenz) (Abb. 5).

Die **Kollimation** drückt aus, daß das Strahlenbündel fast parallel ist und mit der Wegstrecke nur gering an Durchmesser zunimmt (Abb. 6).

Die **Monochromasie** bedeutet, daß alle Wellenzüge die gleiche Wellenlänge, Frequenz und Energie besitzen (Abb. 7). So erzeugt der Laser Licht einer einzigen Wellenlänge (Farbe) im Gegensatz zu Sonnen- und Lampenlicht, das ein Farbenspektrum enthält.

Eine weitere sehr wichtige Eigenschaft des Lasers ist seine sehr hohe Leistungsintensität. So arbeiten medizi-

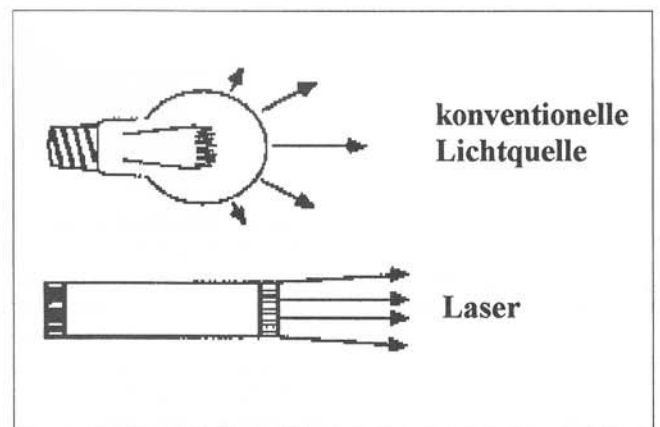


Abb. 6 Kollimation: Im Gegensatz zu konventionellen Lichtquellen emittiert das Lasermedium fast parallele Lichtbündel. Erst durch im Strahlengang eingebaute Linsen werden eine Fokussierung der Laserstrahlung sowie Bündelung und Streuung erreicht (nach Berlien 1989).

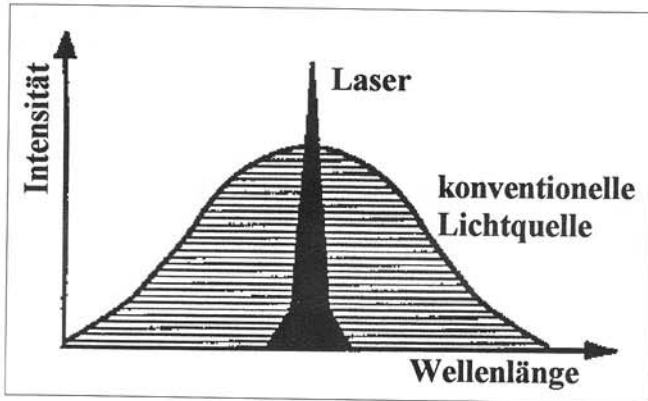


Abb. 7 Monochromasie: Während konventionelle Lichtquellen ein Spektrum von Wellenlängen erzeugen, besteht die Laserstrahlung im Prinzip nur aus einer einzigen Wellenlänge. Diese kann im sichtbaren Wellenlängenbereich oder im ultravioletten bzw. infraroten Bereich liegen (nach Berlien 1989).

#### LITERATUR

1. Berlien HP, Müller GJ. Angewandte Lasermedizin/Lehr- und Handbuch für Praxis und Klinik. Landsberg: ecomed, 1989.
2. Danhof G. Lasertherapie in der Allgemeinmedizin. Schorndorf: WBV Biologisch-Medizinische Verlagsgesellschaft, 1991.
3. Maiman TH. Stimulated optical radiation in ruby. Nature 1960; 187: 493-494.
4. Müller GJ, Berlien HP. Der Laser in der Medizin. Laser Med Chir 1986; 2: 26-30.
5. Palmer SE. Surgery with lasers. Handout at 33rd Annual Congress of BEVA Dublin 1994.
6. Pausewang H. Laser in der Medizin/Status und Perspektiven der Lasermedizin in der Bundesrepublik Deutschland. Laser Optoelekt 1991; 23: 44-49.
7. Polangi TG. Laser physics. Otolaryngologic Clinics of North America 1983; 16: 753-774.
8. Scholz C. Neue Verfahren der Bearbeitung von Hartgewebe in der Medizin mit dem Laser. Landsberg: ecomed, 1992.
9. Trautwein A, Kreibitz U, Oberhausen E. Physik für Mediziner, Biologen, Pharmazeuten. Berlin, New York: de Gruyter, 1986.

nisch genutzte Laser oft mit Leistungen bis zu 100 Watt, fokussiert ergibt dies Leistungsdichten um  $4 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ . Doch selbst ein Laser, der nur wenige mWatt abstrahlt, kann aufgrund des Querschnitts seines Strahlenbündels von weniger als einem Millimeter eine sehr hohe Intensität haben (1, 2, 4).

Prof. Dr. H. Gerhards  
Lehrstuhl für Pferdechirurgie  
der Ludwig-Maximilians-Universität München  
Veterinärstraße 13  
D-80539 München

## Der klinische Fall

### Cockerspaniel, weiblich, 12 Jahre alt

#### Vorbericht

Seit zwei Monaten zunehmend Lethargie, gelegentlich Anorexie, geringgradige Polydypsie und Polyurie. Jetzt Kotabsatzprobleme mit Tenesmus und hartem Kot.

#### Klinische Untersuchung

Allgemeinbefinden geringgradig gestört. Ernährungszustand etwas reduziert. Pflegezustand gut. Körpertemperatur  $38,6^\circ \text{C}$ . Atmungsparameter im Normalbereich. Herz: II/VI systolisches Herzgeräusch mit PMI an der linken Thoraxwand (Mitralpunkt). Puls kräftig.

Rektale Untersuchung: Analtonus und -reflex, sowie rechter Analbeutel o. B. Im linken Analbeutel eine circa kirschgroße Umfangsvermehrung, von außen nicht sichtbar, rund, mäßig gut umschrieben und nicht schmerzhaft. Die darüber befindliche Haut ist verschieblich und nicht alteriert. Sublumbal befindet sich eine zweite, rektal mit der Fingerspitze gerade noch zu erreichende Umfangsvermehrung, die das Lumen des Rektums auf etwa die Hälfte einengt. Der Kot ist von normaler Farbe, jedoch von sehr fester Konsistenz.

Wie würden Sie weiter vorgehen? (s. S. 521)