

Technische Information

Laserbearbeitung

YAG-Laser

Ausgabe: **9/94**

Bestellinformationen

Bitte geben Sie den Titel des Dokuments, die gewünschte Sprache und das Datum der Ausgabe an.

TRUMPF GmbH + Co
D-71257 Ditzingen
Johann-Maus-Straße 2
Telefon (0 71 56) 303-0
Telefax (0 71 56) 303-309, Telex 7245201

*Dieses Dokument wurde in der **Technischen Dokumentation** der Firma TRUMPF GmbH + Co verfaßt.*

Alle Rechte an dieser Dokumentation, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung bei TRUMPF GmbH + Co., auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Kein Teil der Dokumentation darf in irgendeiner Form ohne vorherige schriftliche Zustimmung der TRUMPF GmbH + Co reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Irrtum und technische Änderungen vorbehalten.

© TRUMPF GmbH + Co

TRUMPF GmbH + Co. haftet nicht für etwaige Fehler in dieser Dokumentation. Eine Haftung für mittelbare und unmittelbare Schäden, die im Zusammenhang mit der Lieferung oder dem Gebrauch dieser Dokumentation entstehen, ist ausgeschlossen, soweit dies gesetzlich zulässig ist.

Inhaltsverzeichnis

Laser: Das Wichtigste in Kürze

Kapitel 1 Nd:YAG-Laser

1. Komponenten	1-2
1.1 Lasermedium: Nd:YAG	1-2
Anregung	1-3
1.2 Pumpquelle: Lampe	1-4
1.3 Resonator: Spiegel.	1-4
2. Aufbau eines Nd:YAG-Lasers	1-5
Wärmebelastung des Laserstabs	1-6
3. Merkmale der Nd:YAG-Laser	1-7
Sicherheitstechnische Aspekte.	1-9

Kapitel 2 Nd:YAG-Laser von HAAS LASER

1. Aufbau	2-3
2. Die Komponenten.	2-4
Kavität.	2-4
Nd:YAG-Stab	2-5
Resonator.	2-6
Lampen	2-6
Leistungsregelung	2-7
Nd:YAG-Laser von HAAS LASER mit hoher Leistung: Multirod-Systeme	2-8
3. Strahlführung	2-9
Laserlichtkabel	2-10

4.	Sicherheitstechnische Maßnahmen	2-13
5.	Leistungsmerkmale	2-14
	Hohe Strahlqualität	2-14
	Laserleistungen bis 2 kW.	2-14
	Leistungsunabhängige Intensitätsverteilung	2-15
	Kein Warmlaufverhalten	2-15
	Beliebig modulierbar	2-15
	Reproduzierbare Laserparameter	2-16
	Hohe Wirtschaftlichkeit.	2-16
6.	Im Vergleich: Nd:YAG-Laser und CO2-Laser	2-17

Kapitel 3 **Laser: Die Grundlagen**

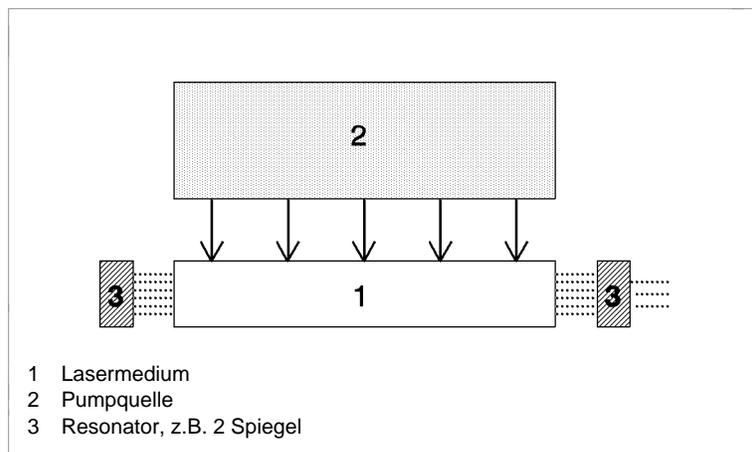
1.	Was ist ein Laser?	3-3
2.	Das Prinzip	3-4
3.	Die wichtigsten Komponenten	3-6
3.1	Lasermedien und Pumpquellen	3-7
3.2	Resonatoren	3-8
	Was geschieht im Resonator?	3-8
	Aufbau von Resonatoren.	3-10
	Schwingungszustände im Resonator: Moden.	3-11
4.	Die wichtigsten Eigenschaften der Laserstrahlung	3-12
5.	Strahlqualität	3-15
6.	Betriebsarten eines Lasers	3-17
	CW-Betrieb (Dauerstrichbetrieb)	3-17
	Pulsbetrieb	3-18
7.	Externe Optik: Strahlführung	3-19

Laser: Das Wichtigste in Kürze

Ein Laser ist eine Lichtquelle. Das Licht, das ein Laser aussendet, hat besondere Eigenschaften, die es vom Licht der Sonne oder einer Glühlampe unterscheiden:

- Das Licht, das ein Laser aussendet, ist nahezu parallel und sehr stark gebündelt. Das heißt: die gesamte Laserleistung kann auf einen sehr kleinen Punkt konzentriert werden. Diese Eigenschaft macht den Laser für die Materialbearbeitung interessant.
- Jeder Laser sendet Licht einer einzigen, für ihn spezifischen Wellenlänge aus. Dieses Licht kann für das Auge sichtbar oder auch unsichtbar sein.

Komponenten eines Lasers Zur Erzeugung von Laserlicht müssen grundsätzlich drei Komponenten vorhanden sein:



Komponenten eines Lasers

Fig. 9582

Lasermedium: Das Lasermedium ist die Stelle, an der das Laserlicht entsteht. Das Lasermedium kann ein Gas sein (z.B. CO_2), ein Kristall (z.B. Nd:YAG^{*)}) oder eine Flüssigkeit (z.B. ein Farbstoff).

Pumpquelle: Die Pumpquelle ist eine sehr starke Energiequelle, die Energie in das Lasermedium "pumpt". Diese Energie wird zur Erzeugung des Laserlichts benötigt. Die Pumpquelle kann z.B. eine starke Lampe sein.

Resonator: Der Resonator sorgt dafür, daß das Laserlicht nahezu parallel und sehr stark gebündelt ist. Der Resonator eines Lasers wird in der Regel durch Spiegel gebildet.



Ausführliche Informationen zum Thema "Grundlagen des Lasers" finden Sie im dritten Kapitel dieser Technischen Information.

*) Nd:YAG ist das Lasermedium des Nd:YAG-Lasers. "Nd:YAG-Laser" wird in der Praxis häufig durch "YAG-Laser" abgekürzt.

Kapitel 1

In der Praxis wird der Ausdruck Nd:YAG-Laser ("Neodym-YAG-Laser") häufig durch "YAG-Laser" abgekürzt.

Nd:YAG-Laser

1.	Komponenten	1-2
1.1	Lasermedium: Nd:YAG	1-2
	Anregung	1-3
1.2	Pumpquelle: Lampe	1-4
1.3	Resonator: Spiegel.	1-4
2.	Aufbau eines Nd:YAG-Lasers	1-5
	Wärmebelastung des Laserstabs	1-6
3.	Merkmale der Nd:YAG-Laser	1-7
	Sicherheitstechnische Aspekte.	1-9

1. Komponenten

1.1 Lasermedium: Nd:YAG

Das Lasermedium eines Lasers ist die Stelle, an der das Laserlicht entsteht. Das Lasermedium eines Nd:YAG-Lasers ist ein künstlich hergestellter Einkristall, **Yttrium-Aluminium-Granat** (YAG), in dem ein kleiner Teil der Yttrium-Ionen durch Ionen des Elements Neodym ersetzt sind.

Dotierung Die Konzentration der Nd-Atome im YAG-Kristall (=die Dotierung) liegt in der Regel zwischen 1% und 1.5%. Sind zu wenig Nd-Ionen im YAG-Kristall vorhanden, ist der Lasereffekt zu schwach. Sind zu viele Nd-Ionen im YAG-Kristall vorhanden, kommen sich die Nd-Ionen im Kristall zu nahe. Die Strahlqualität wird schlechter.

Abmessungen des Laserstabs Die Abmessungen des Laserstabs können aus verschiedenen Gründen nicht beliebig gewählt werden.

- Wird der Kristall zu dick, kann das Anregungslicht nicht mehr homogen in den ganzen Kristall eingebracht werden.
- Wärme: Die strahlungslosen Prozesse im Nd:YAG-Stab setzen sehr viel Wärme frei. Der Kristall dehnt sich aus. Das führt zu verschiedenen Schwierigkeiten, die bei der Dimensionierung des Laserstabes berücksichtigt werden müssen (siehe S.1-6).
- Die Laserkristalle können nicht in beliebiger Größe hergestellt werden.

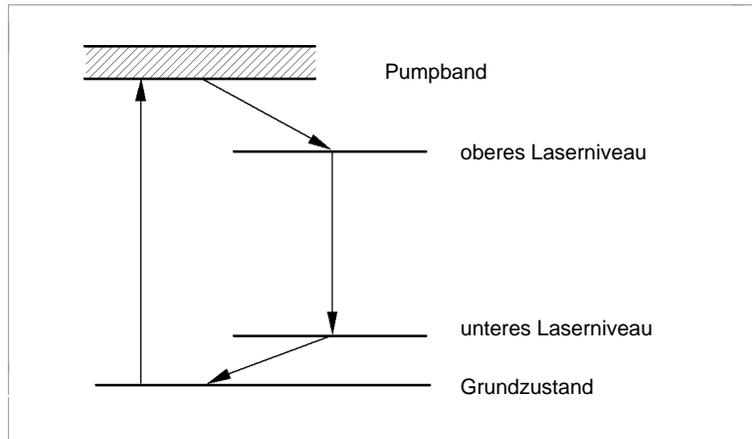
Ausführung Nd:YAG-Laserstäbe werden in zwei verschiedenen Formen eingesetzt:

- Als sogenannte "Rod-Laser": Der Laserstab ist dann zylinderförmig. Alle Ausführungen in dieser Technischen Information gehen von diesem Lasertyp aus.
- Als sogenannte "Slab-Laser": Der Querschnitt des Laserstabs ist dann rechteckig; die Enden des Stabes sind schräg geschliffen. Die Herstellung solcher Laser ist derzeit jedoch technisch so aufwendig und kostenintensiv, daß ein Einsatz in der Materialbearbeitung nicht wirtschaftlich ist.

Wellenlänge Nd:YAG-Laser emittieren unsichtbares Licht der Wellenlänge 1,06µm. Diese Wellenlänge liegt im nahen Infrarot, sehr nahe am sichtbaren Wellenlängenbereich.

Anregung

Das vereinfachte Energietermschema des Nd:YAG-Kristalls zeigt eine Reihe von scharfen Niveaus, denen sich breite Energiebänder überlagern*).



Energiediagramm Nd:YAG (vereinfacht)

Fig. 9711

Die Anregung beim Nd:YAG-Laser erfolgt über ein Energieband, das Pumpband. Durch strahlungslose Prozesse (Wärme) geht das System in das obere Laserniveau über. Dieser Zustand ist durch einen starken optischen Übergang mit dem unteren Laserniveau gekoppelt. Das untere Laserniveau entleert sich sehr schnell strahlungslos in den Grundzustand.

Beim Nd:YAG-Laser sind vier Energieniveaus am Laserprozeß beteiligt. Es handelt sich also um ein Vierniveau-System. Das ist für die Erzeugung der notwendigen Besetzungsinversion und damit für die erreichbaren Leistungen des Lasers günstig.

*) Energiebänder entstehen durch sehr viele sehr nahe beieinanderliegende Energieniveaus

1.2 Pumpquelle: Lampe

Lampen Damit ein Laser Licht emittieren kann, muß ihm zuvor Energie zugeführt werden. Die Energiequelle eines Lasers wird als "Pumpquelle" bezeichnet, weil durch sie Energie in das System "gepumpt" wird.

Nd:YAG-Laser werden optisch - das heißt: mit Licht - gepumpt. Für den kontinuierlichen CW-Betrieb werden Krypton-Bogenlampen oder Halogenlampen eingesetzt. Für Nd:YAG-Laser, die ausschließlich im Pulsbetrieb arbeiten sollen, dienen Xenon-Blitzlampen als Pumpquelle.

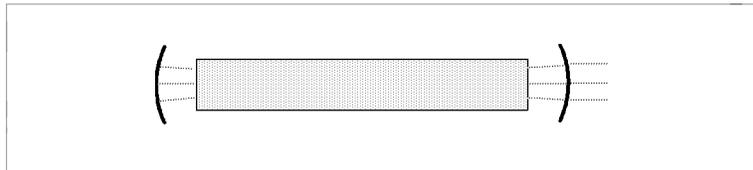
Diese Lampen senden Licht in einem breiten Wellenlängenbereich aus. Zur Anregung wird aber nur ein schmaler Wellenlängenbereich benötigt. Das bedeutet:

- Der Wirkungsgrad eines mit Lampen gepumpten Nd:YAG-Lasers ist grundsätzlich relativ gering.
- Das "überflüssige" Licht kann zu einer zusätzlichen unerwünschten Erwärmung des Laserstabs führen. Die Strahlqualität wird dadurch schlechter (siehe S. 1-6).

Halbleiterlaser Seit einiger Zeit gibt es auch Nd:YAG-Laser, die mit Halbleiterlasern gepumpt werden. Diese Laser können jedoch bisher zur Materialbearbeitung nicht wirtschaftlich eingesetzt werden.

1.3 Resonator: Spiegel

Der Laserresonator eines Nd:YAG-Lasers wird in der Regel durch 2 Spiegel in justierbaren Halterungen gebildet:

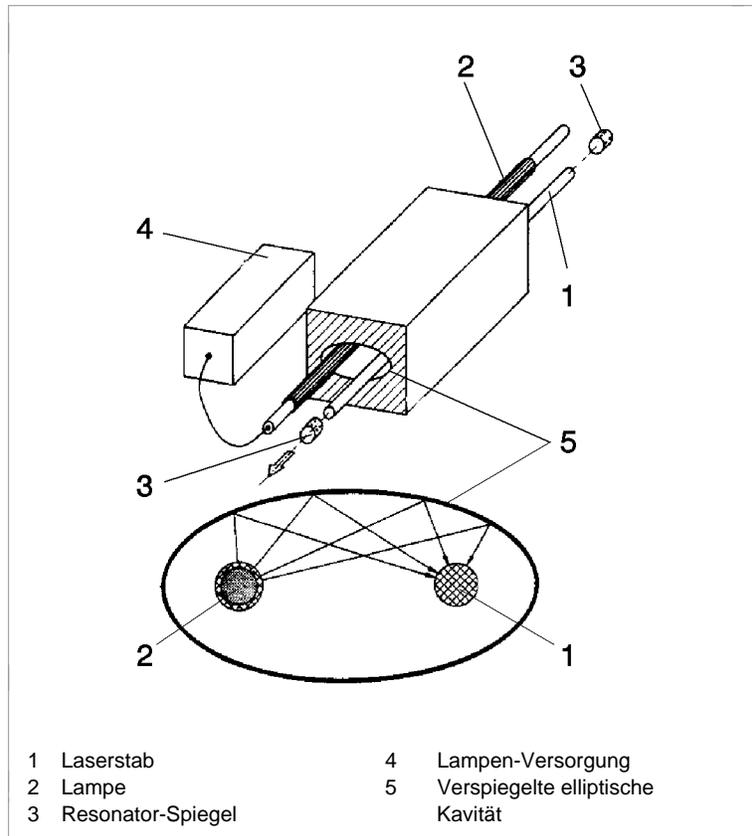


Beispiel: Resonator mit konkaven Spiegeln
(schematische Darstellung)

Fig. 9583

Die Auslegung des Resonators hat entscheidenden Einfluß auf die Laserparameter (vor allem auf die Strahlqualität). Sie muß vom Laser-Hersteller durch umfangreiche Rechnungen bestimmt werden. Die Wärmebelastung des Laserstabs muß bei diesen Rechnungen besonders berücksichtigt werden (siehe S.6).

2. Aufbau eines Nd:YAG-Lasers



Nd:YAG-Laser: typische Anordnung

Fig. 9729

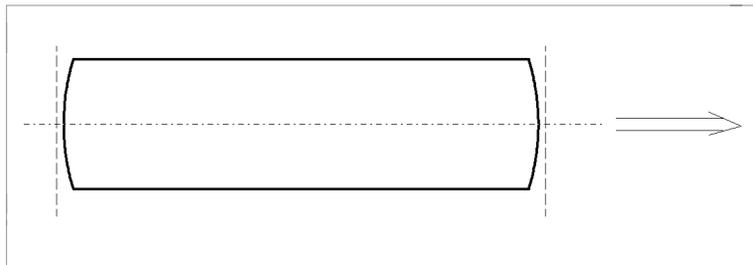
Der Nd:YAG-Stab und die Pumplampe (eine Leuchtstoffröhre) sind parallel in einem hochreflektierenden Gehäuse (der "Kavität") angeordnet. Dieses Gehäuse kann z.B. als elliptischer Zylinderspiegel geformt sein. Wenn sich der Laserstab und die Pumplampe an den beiden Brennpunkten des Gehäuses befinden, wird die Pumplichtenergie besonders gut in den Nd:YAG-Stab eingebracht.

Kühlung Durch das optische Pumpen wird das Lasermaterial erwärmt und muß gekühlt werden. Das geschieht in der Regel durch Kühlwasser, das den Nd:YAG-Stab in sogenannten "Flow-tubes" umspült.

Wärmebelastung des Laserstabs

Die strahlungslosen Prozesse im Nd:YAG-Stab setzen sehr viel Wärme frei. Der Nd:YAG-Stab wird heiß. Die Temperatur und die Temperaturverteilung beeinflussen das Verhalten des Lasers:

- Die Temperaturdifferenz zwischen Materialmitte und Oberfläche des Lasermaterials darf einen Maximalwert nicht überschreiten, sonst werden die Spannungen im Material zu groß, der Laserstab kann zerplatzen. Dadurch wird auch die maximale Ausgangsleistung eines Laserstabes begrenzt.
- Die Temperaturunterschiede im Innern des Materials führen während des Laserbetriebs zu einer Linsenwirkung im Resonator, die berücksichtigt werden muß:



Linsenwirkung des Nd:YAG-Stabs

Fig. 9712

Dieser Effekt wird als "Thermische Linse" bezeichnet.

- Wird das Lasermedium zu heiß, ist die notwendige Besetzungsinversion schwieriger zu erzeugen (siehe Kapitel 1. Laser: Das Prinzip). Die maximal erreichbare Ausgangsleistung sinkt.

3. Merkmale der Nd:YAG-Laser

Wellenlänge

Nd:YAG-Laser senden Licht im nahen infraroten Bereich aus. Die Wellenlänge beträgt $1,06\mu\text{m}$. Das heißt: Ein Nd:YAG-Laser sendet Licht, das beinahe im sichtbaren Bereich liegt.

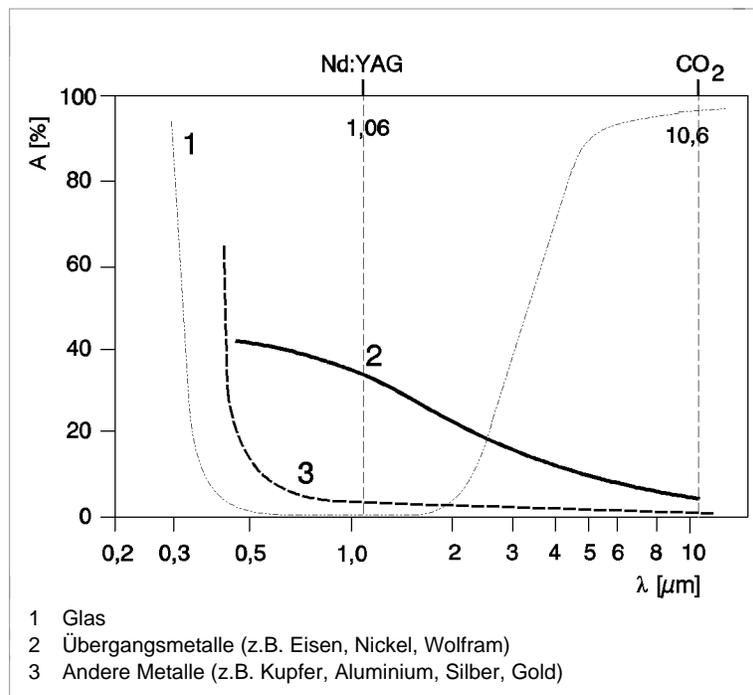
Wichtige Eigenschaften der Nd:YAG-Laser sind Folge dieser Wellenlänge:

Glas-Optiken Laserlicht eines Nd:YAG-Laser kann mit Glas-Optiken und Laserlichtkabeln geführt werden.

Absorption des Nd:YAG-Laserlichts Bei der Materialbearbeitung wird das Material durch den absorbierten Teil der Laserleistung aufgeheizt und - bei genügend hoher Intensität - zum Schmelzen oder sogar zum Verdampfen gebracht. Je besser ein Material die Wellenlänge eines Lasers absorbiert, um so mehr Energie kann in das Material eingebracht werden. Das heißt: Die Wirkung des Laserstrahls ist um so größer, je höher der Absorptionsgrad eines Materials für die Laser-Wellenlänge ist.

Für die Materialbearbeitung ist daher die folgende Frage besonders wichtig: Wie wird die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers von verschiedenen Materialien absorbiert?

Das folgende Diagramm zeigt den Absorptionsgrad verschiedener Materialgruppen in Abhängigkeit von der Wellenlänge:



Absorption von Laserlicht (Nd:YAG und CO₂) in verschiedenen Materialgruppen

Fig. 9714

- Der Absorptionsgrad ist abhängig vom Material und von der Wellenlänge des einfallenden Laserlichts.
- Metalle absorbieren die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers besser als die Wellenlänge des CO₂-Lasers.

Sicherheit Die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers liegt beinahe im sichtbaren Bereich. Das bedeutet: Das menschliche Auge ist für diese Wellenlänge ganz besonders empfindlich. Sicherheitstechnische Maßnahmen sind daher bei diesem Lasertyp ganz besonders wichtig.

Strahlqualität und Fokussierbarkeit

Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Wellenlänge eines Lasers und je geringer die Modenordnung des Laserstrahls ist, um so besser kann der Strahl fokussiert werden.

Nd:YAG-Laser haben eine Wellenlänge von 1,06µm. Die Modenordnung ist wegen der Wärmebelastung des Laserstabs in der Regel relativ hoch - vor allem bei höheren Leistungen.

- Wegen der Wärmebelastung des Laserstabs und der damit verbundenen Effekte (siehe S. 1-6) kann die Strahlqualität eines Nd:YAG-Lasers grundsätzlich nicht so hoch werden wie z.B. die eines CO₂-Lasers.

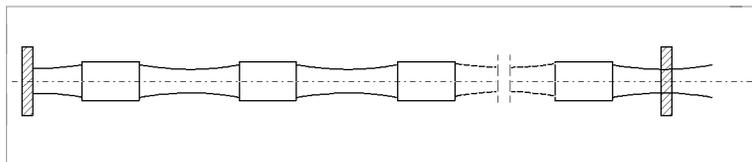
Leistungen

Nd:YAG-Laser mit einer Kavität

Mit einem einzelnen Laserstab können Laserleistungen bis etwa 800 W erreicht werden. Das Strahlparameterprodukt liegt dann bei etwa 30 mm mrad. Mit größeren Laserstäben oder höherer Dotierung könnten höhere Laserleistungen erzeugt werden. Die Strahlqualität wird dann aber sehr schlecht.

Multirod-Systeme

Hohe Laserleistungen werden erreicht, indem mehrere Kavitäten hintereinandergeschaltet werden. Der Resonator umschließt dann mehrere Nd:YAG-Stäbe. Jeder Nd:YAG-Stab befindet sich in einer eigenen Kavität. Die maximale Leistung der Gesamtanordnung ist die Summe der max. Leistungen der Einzelanordnungen. Bei geeigneter Anordnung verändert sich die Strahlqualität durch diese Hintereinanderschaltung nicht. Nd:YAG-Lasersysteme mit mehreren Kavitäten werden als "Multirod-Systeme" bezeichnet.



Multirod-System: schematische Darstellung

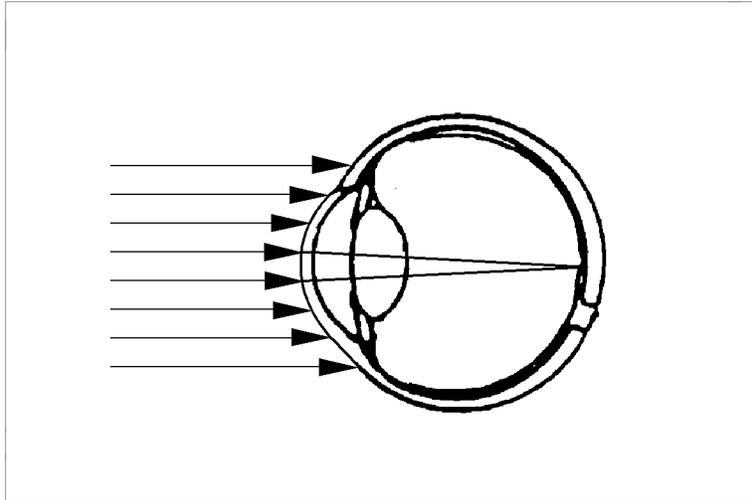
Fig. 9715

Sicherheitstechnische Aspekte

Nd:YAG-Laser senden Licht sehr hoher Leistungsdichte im nahen infraroten Bereich (Wellenlänge: $1,06\mu\text{m}$) aus. Das heißt: Ein Nd:YAG-Laser sendet Licht, das beinahe im sichtbaren Bereich liegt.

Gefahren für das Auge

Aus diesem Grund ist das menschliche Auge für die Wellenlänge eines Nd:YAG-Lasers besonders empfindlich. Die Strahlung wird auf die Netzhaut fokussiert. Die hohe Leistungsdichte im Laserstrahl kann zu sehr schweren irreparablen Schädigungen der Netzhaut führen.



Fokussierung im Auge

Fig. 9707

Gefahren für die Haut

Durch die hohe Leistungsdichte eines Lasers kann beim es Auftreffen des Laserstrahls auf die Haut zu Verbrennungen unterschiedlichen Grades kommen. Diese Schädigungen sind in der Regel weniger gefährlich als Verletzungen des Auges.

Sicherheitstechnische Maßnahmen

Eine genaue Analyse aller Gefahrenstellen und umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen sind bei allen Lasern sehr wichtig. Bei Nd:YAG-Lasern sind die drohenden Gefahren für die Netzhaut und das Auge aufgrund der Wellenlänge im nahen Infrarot besonders groß.

Beim Umgang mit Nd:YAG-Lasern müssen daher grundsätzlich Schutzbrillen getragen werden.

Die Sicherheitsmaßnahmen am Lasergerät müssen vom Laser-Hersteller mit besonderer Sorgfalt getroffen werden.

Kapitel 2

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER

1.	Aufbau	2-3
2.	Die Komponenten.	2-4
	Kavität.	2-4
	Nd:YAG-Stab	2-5
	Resonator.	2-6
	Lampen	2-6
	Leistungsregelung	2-7
	Nd:YAG-Laser von HAAS LASER mit hoher Leistung: Multirod-Systeme	2-8

3.	Strahlführung	2-9
	Laserlichtkabel	2-10
4.	Sicherheitstechnische Maßnahmen	2-13
5.	Leistungsmerkmale.	2-14
	Hohe Strahlqualität	2-14
	Laserleistungen bis 2 kW.	2-14
	Leistungsunabhängige Intensitätsverteilung	2-15
	Kein Warmlaufverhalten	2-15
	Beliebig modulierbar	2-15
	Reproduzierbare Laserparameter	2-16
	Hohe Wirtschaftlichkeit.	2-16
6.	Im Vergleich: Nd:YAG-Laser und CO2-Laser	2-17

1. Aufbau

Lasengeräte von HAAS LASER sind kompakt aufgebaut:

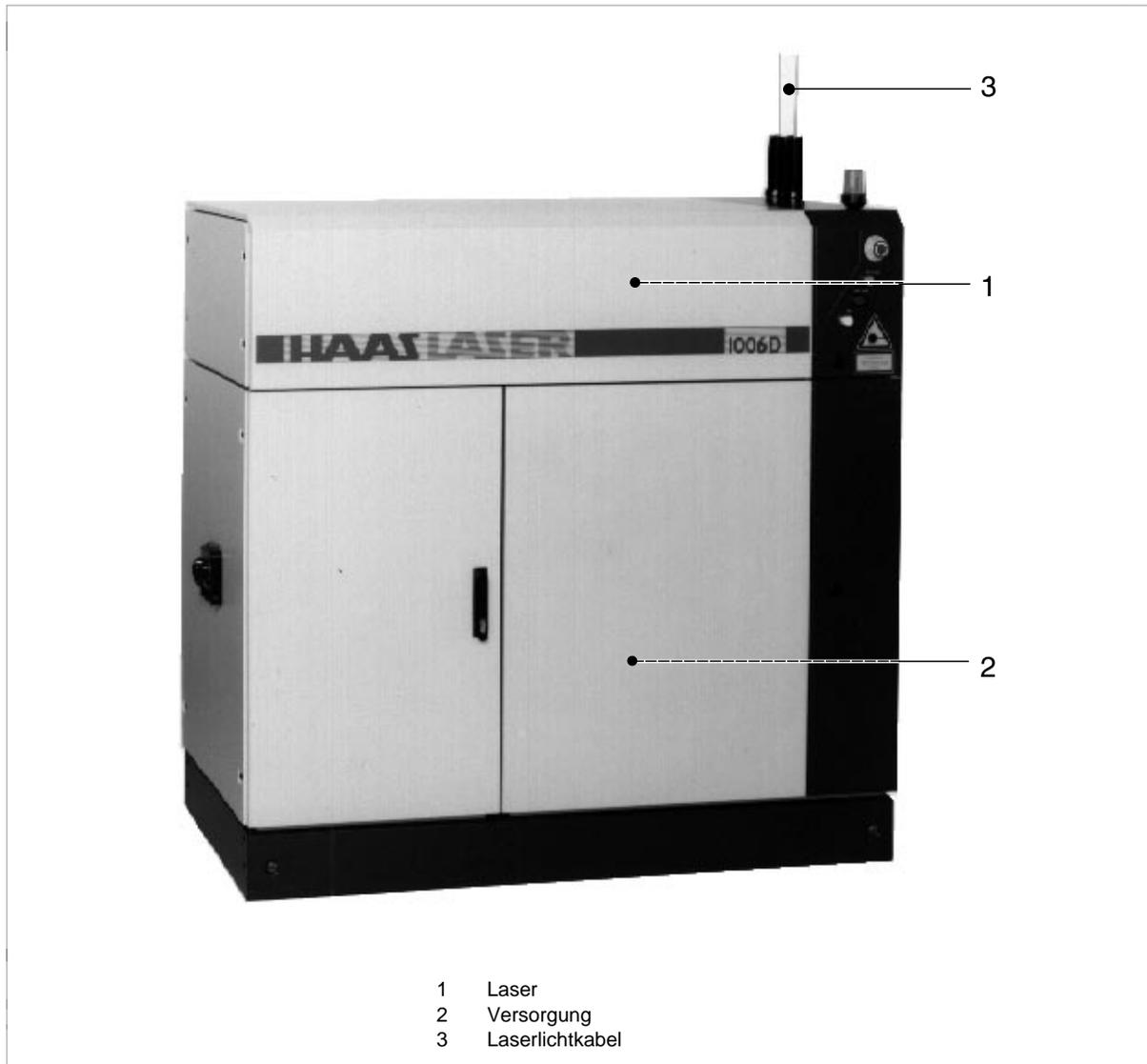


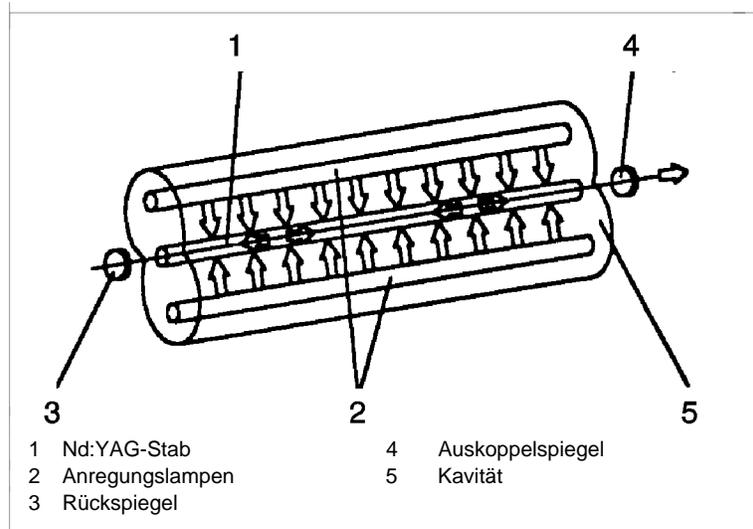
Fig. 9702

Das Laserlicht wird über Laserlichtkabel zur Bearbeitungsstelle geführt.

2. Die Komponenten

Kavität

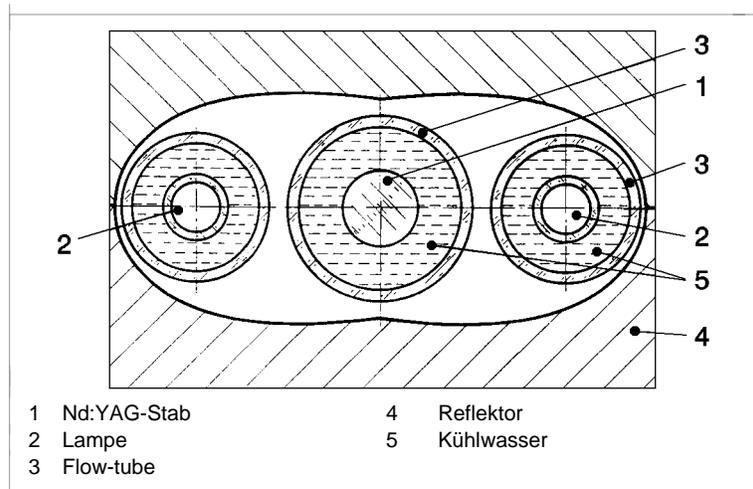
Die Komponenten des Lasers (Laserstab, Anregungslampen und Spiegel) befinden sich in einem hochreflektierenden Gehäuse, das in der Regel als "Kavität" bezeichnet wird. In diesem Gehäuse werden die Lampen und der Nd:YAG-Stab montiert und zwar so, daß möglichst viel Licht in den Laserstab eingebracht wird. In der Praxis bewährt hat sich eine Anordnung, in der auch die Nd:YAG-Laser von HAAS LASER aufgebaut sind:



Nd:YAG-Laser von HAAS LASER (schematische Darstellung)

Fig. 9721

Die Kavität hat einen doppeltelliptischen Querschnitt. Die beiden Anregungslampen sind in den äußeren Brennpunkten der Ellipsen montiert. Der Laserstab selbst befindet sich in der gemeinsamen Brennpunktlinie.



Querschnitt einer Kavität

Fig. 9716

Nd:YAG-Stab

Der Laserstab ist das Herzstück eines Nd:YAG-Lasers. Er wird mit höchster Präzision hergestellt. Die Reinheit des Kristalls, die Dotierung^{*)}, die Abmessungen des Laserstabs und die sorgfältige Justierung sind entscheidend für die Eigenschaften des Lasers.

Herstellung Nd:YAG-Einkristalle für die Laser von HAAS LASER werden nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt. Dabei wird ein gekühlter Impfkristall in die Schmelze getaucht und sehr langsam herausgezogen. Aus den Nd:YAG-Kristallen werden dann die Laserstäbe ausgebohrt. Auf diese Weise wird sichergestellt, daß der Kristall sehr rein ist und daß die Konzentration der Nd-Ionen im YAG-Kristall sehr homogen ist.

Abmessungen und Aussehen Die Laserstäbe haben einen Durchmesser von etwa 10 mm und sind etwa 150 mm lang. Sie sind durchsichtig und schimmern leicht rosa.

Halterung Der Nd:YAG-Stab muß in der Kavität sorgfältig befestigt werden. Die Halterung erfüllt die folgenden Funktionen und Anforderungen:

- "weiche" Lagerung des Stabes, damit keine Belastungen auftreten, die zu Kantenabsprüngen führen.
- Beständigkeit des Dichtmaterials gegenüber Pump- und Laserstrahlung. Falls dies nicht möglich ist, muß die Dichtung gegen die Strahlung abgeschirmt sein.
- Abdichten der Stabendfläche gegen den Kühlwasserdruck

Kühlung des Nd:YAG-Stabes Die strahlungslosen Prozesse im Nd:YAG-Stab setzen sehr viel Wärme frei. Der Nd:YAG-Stab wird heiß und dehnt sich aus. Die thermischen Spannungen können bis zum Zerplatzen des Kristalles führen.

Aus diesem Grund muß der Laserstab gekühlt werden. Dazu wird er von einem Kühlmantel, dem sogenannten Flow-tube, umgeben.

Im Kühlmantel fließt Kühlwasser, so daß der Nd:YAG-Stab an der Oberfläche ständig gekühlt wird.

Das Kühlwasser muß deionisiert und sehr sauber sein. Aus diesem Grund haben Nd:YAG-Laser von HAAS LASER einen eigenen Kühlwasserkreislauf, bei dem Leitfähigkeit und Temperatur ständig überwacht werden. Das interne Kühlwasser wird durch externes Kühlwasser gekühlt.

^{*)} Dotierung = Konzentration der Nd-Ionen im YAG-Kristall

Resonator

Der Resonator eines Nd:YAG-Lasers besteht in der Regel aus zwei Spiegeln. Die genaue Auslegung der Spiegel (Form, Krümmung, Material) wird von HAAS LASER durch aufwendige Rechnungen bestimmt und den spezifischen Anforderungen angepaßt.

Lampen

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER werden mit Krypton-Bogenlampen optisch gepumpt. Die Anregungslampen werden von Flow-tubes umhüllt und mit Kühlwasser gekühlt.

Die Anregungslampen emittieren Licht in einem breiten Wellenlängenbereich. Zur Anregung gebraucht wird aber nur ein schmales Band: die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem Pumpband.

Die übrigen Anteile des Lichtes sind für den Lasereffekt überflüssig. Sie sind sogar störend, weil sie den Kristall zusätzlich aufheizen. Aus diesem Grund hat HAAS LASER verschiedene Maßnahmen getroffen, die ein überflüssiges Aufheizen des Laserstabs verhindern.

Alterungsprozesse Alle Anregungslampen, die als Pumpquellen in Nd:YAG-Lasern eingesetzt werden, unterliegen Alterungsprozessen:

- Das Elektrodenmaterial der Lampen verschleißt. Dadurch bildet sich auf den Innenseiten der Lampenrohre eine sehr feine Schicht, die das Licht nicht mehr ungehindert aus der Röhre austreten läßt.
- Der UV-Anteil des Lichtes schädigt das Röhrenmaterial: Nach sehr vielen Betriebsstunden wird das Glas spröde; das Entladungsgas kann sehr langsam aus der Röhre entweichen.

Versorgung Die Anregungslampen des Lasers werden von der Versorgung des Lasergeräts mit der von der Steuerung vorgegebenen elektrischen Leistung gespeist. Über die Steuerung können beliebige Pulsformen im Anregungslicht erzeugt werden.

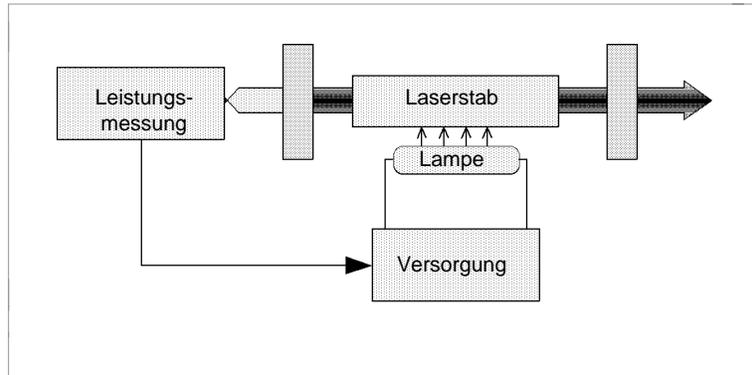
Die Anregungslampen reagieren sehr empfindlich auf Versorgungsschwankungen. In Nd:YAG-Lasern von HAAS LASER wird deshalb die Versorgungsspannung geregelt: Netzschwankungen werden kompensiert.

Pulsbetrieb Eine Veränderung der Anregungsleistung bewirkt eine Veränderung der Laser-Ausgangsleistung. Über die Anregungsleistung der Lampen wird die Ausgangsleistung des Lasers verändert.

Leistungsregelung

Krypton-Bogenlampen altern. Das bedeutet: Die Intensität des Anregungslichtes und damit die Laser-Ausgangsleistung ist abhängig vom Alter der Lampe. Aus diesem Grund haben Nd:YAG-Laser von HAAS LASER eine Leistungsregelung:

Leistungsregelung



Leistungsregelung

Fig. 9718

Hinter einem der Spiegel oder im Strahlengang wird die Leistung des Laserstrahls gemessen. Stimmt die gemessene Leistung nicht mit der gewünschten Leistung überein, wird die Intensität des Lichtes automatisch nachgeregelt. Wenn die Nachregelung ein bestimmtes Maß überschreitet, fordert die Steuerung zu Austausch der Lampen auf.

Das bedeutet für die Materialbearbeitung: Alle Parameter des Laserstrahls und damit alle Bearbeitungsergebnisse sind jederzeit reproduzierbar.

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER mit hoher Leistung: Multirod-Systeme

Hohe Leistungen werden bei Nd:YAG-Lasern durch Aneinanderreihen mehrerer Kavitäten erreicht:



2 kW-Laser von HAAS LASER

Fig. 9802

Bei HAAS LASER besteht ein 1 kW-Laser aus zwei Kavitäten, ein 2 kW-Laser aus vier Kavitäten. Das Strahlparameterprodukt beträgt wie beim 500 W-Laser 25 mm mrad. Das bedeutet: die Strahlqualität ist unabhängig von der maximalen Ausgangsleistung und - dank der Leistungsregelung - auch unabhängig von der momentanen Laserleistung.

3. Strahlführung

Die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers im nahen infraroten Bereich erlaubt es, zur Strahlführung optische Komponenten aus Glas zu verwenden. Eingesetzt werden die folgenden Strahlführungskomponenten:

- Spiegel
- Weichen
- Strahlteiler
- Beobachtungsoptiken
- Energie- und Leistungsmesser
- Laserlichtkabel (LLK)



Strahlführungskomponenten

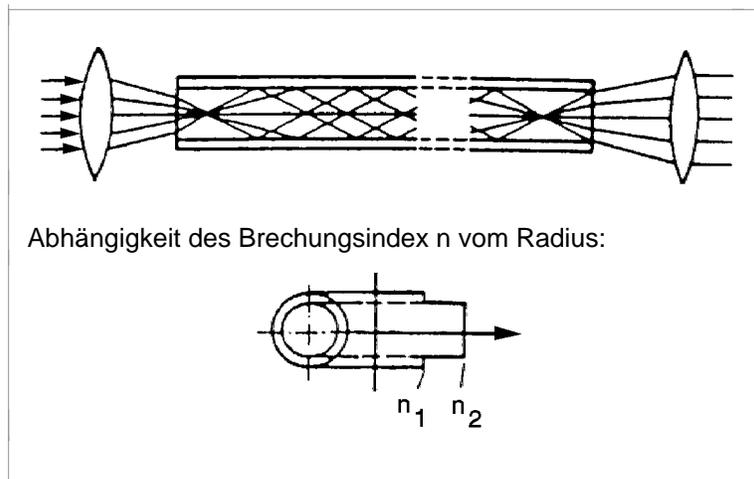
Fig. 9705

Laserlichtkabel

Der Einsatz von Laserlichtkabeln zur Strahlführung macht den Nd:YAG-Laser zu einem hochflexiblen Werkzeug. Mit Laserlichtkabeln kann der Laserstrahl über sehr große Strecken ohne merkliche Verluste geführt werden. Nur bei der Ein- und Auskopplung des Strahls treten geringe Verluste (max. 10%) auf.

Aufbau:

Laserlichtkabel bestehen aus einem Kern, einem Mantel und einer schützenden Umhüllung. Das Material des Kerns hat eine höhere Brechzahl als das Material des Mantels.



Laserlichtkabel

Fig. 9719, 9720

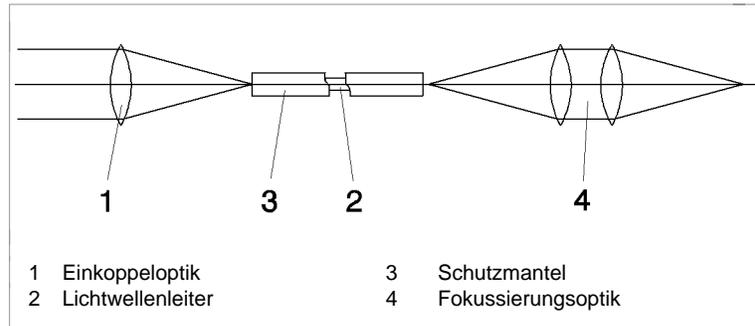
Die Lichtstrahlen, die auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel treffen, werden in den Kern reflektiert. Solange die Faser keine sehr scharfe Biegung macht, pendeln die Lichtstrahlen von einer Seite zur anderen. Nur Lichtstrahlen, die unter einem großen Winkel (größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion) zur Faserachse eintreten, gehen verloren. Solche Strahlen können zur Zerstörung des Laserlichtkabels führen. Bei der Einkopplung von Laserlicht in ein Laserlichtkabel muß daher der Einkoppelwinkel grundsätzlich kleiner sein als der Grenzwinkel der Totalreflexion.

Ein- und Auskopplung

Zur Übertragung mit Laserlichtkabeln muß der Laserstrahl auf das polierte Ende des Lichtwellenleiters fokussiert werden. Dabei müssen die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sein:

- der Fokussdurchmesser der Einkoppeloptik muß kleiner sein als der Kerndurchmesser des Laserlichtkabels. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, entsteht erhöhter Leistungsverlust bei der Einkopplung und es kommt bei hohen mittleren Strahlleistungen zur Zerstörung des Laserlichtkabels.
- der Einkoppelwinkel darf den Grenzwinkel der Totalreflexion nicht überschreiten.

Nach dem Austritt aus dem Laserlichtkabel muß das Laserlicht wieder parallel ausgerichtet und dann auf den Bearbeitungspunkt fokussiert werden.



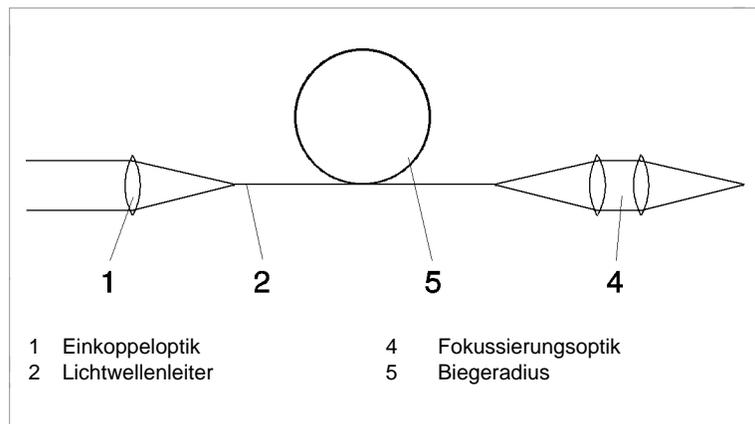
Strahlführung mit Laserlichtkabel

Fig. 9708

Der Grenzwinkel der Totalreflexion kann auch bei einer sehr starken Biegung des Laserlichtkabels überschritten werden. Das führt dann zum Lichtaustritt und zur Zerstörung des Laserlichtkabels.

Laserlichtkabel, die HAAS LASER zur Strahlführung einsetzen, haben daher die beiden folgenden Einrichtungen:

- Biegeradiusbegrenzung:



Biegeradiusbegrenzung

Fig. 9709

- Sicherheitsvorrichtung über die gesamte Länge des Laserlichtkabels, die den Laser abschaltet, sobald Laserlicht aus dem Lichtwellenleiter austritt.

Merkmale der Laserleistungsübertragung mit Laserlichtkabeln

Transmission	Die Laserleistung, die in das Laserlichtkabel eingekoppelt wird, steht am Ende des Laserlichtkabels in etwa wieder zur Verfügung. Verluste entstehen lediglich bei der Einkopplung.
Strahlqualität	Die Strahlqualität des Lasers wird durch die Laserlichtkabelübertragung etwas verschlechtert (ca 10%-20%).
Justage	Nd:YAG-Laser von HAAS LASER werden mit fest verschraubter Ein- und Auskoppeloptik ausgeliefert. Für den Anwender entfallen Justierarbeiten. Das Laserlichtkabel und die Linsen der Ein- und Auskoppeloptik werden von HAAS LASER so an den Laserstrahl angepaßt und justiert, daß eine möglichst hohe Transmission gewährleistet ist.
Flexibilität	Das Laserlichtkabel kann an die räumlichen Bedingungen angepaßt werden. Der Laser kann entfernt vom Bearbeitungsort aufgestellt werden. Schneller Umbau ist möglich. Schwerzugängliche Stellen sind bearbeitbar. 3D-Bearbeitung ist denkbar.
Platzbedarf	Das Laserlichtkabel mit Schutzummantelung ist etwa 10 mm dick, leicht und biegsam. Es kann problemlos verlegt werden.
optische Eigenschaften	Die Endflächen des Laserlichtkabel müssen absolut sauber und glatt sein, sonst kommt es zu Verlusten oder zur Zerstörung des Laserlichtkabels. An den Nd:YAG-Lasern von HAAS LASER ist das Laserlichtkabel bereits fest angebracht, so daß eine Verschmutzung durch den Anwender nahezu ausgeschlossen werden kann.
elektrische Eigenschaften	Laserlichtkabel senden und empfangen keine elektromagnetische Störstrahlung. Sie sind elektrische Isolatoren

4. Sicherheitstechnische Maßnahmen

Ein umfassendes Sicherheitskonzept rundet die Reihe der Maßnahmen ab, die Nd:YAG-Laser von HAAS LASER zu einem flexiblen und leistungsfähigen Werkzeug für den industriellen Einsatz machen.

Einige Beispiele:

- Am Auskoppelspiegel befindet sich ein Sicherheitsverschluß, der im stromlosen Zustand geschlossen ist.
- Das Laserlichtkabel wird über die ganze Länge elektronisch überwacht. Bei einem Faserbruch oder bei Lichtaustritt wird der Laser sofort abgeschaltet.
- Jedes Lasergerät ist mit zusätzlichen Interlockanschlüssen ausgerüstet, an denen zusätzliche Warnlampen o.ä. angeschlossen werden können.

5. Leistungsmerkmale

Hohe Strahlqualität

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER zeichnen sich durch eine sehr hohe Strahlqualität aus, die nahezu unabhängig von der momentanen Leistung des jeweiligen Lasers ist. Das Strahlparameterprodukt beträgt in der Regel 25 mm mrad.

Laserleistungen bis 2 kW

HAAS LASER stellt Nd:YAG-Laser bis zu einer maximalen Ausgangsleistung von 2 kW her. Der Aufbau und die Leistungsregelung gewährleisten eine konstante Strahlqualität-unabhängig von der maximalen Ausgangsleistung und der momentanen Laserleistung.

Ein 1 kW-Laser von HAAS LASER besteht aus 2 Kavitäten, ein 2 kW-Laser aus 4 Kavitäten. Das Strahlparameterprodukt, das die Fokussierbarkeit kennzeichnet, beträgt maximal 25 mmmrad.

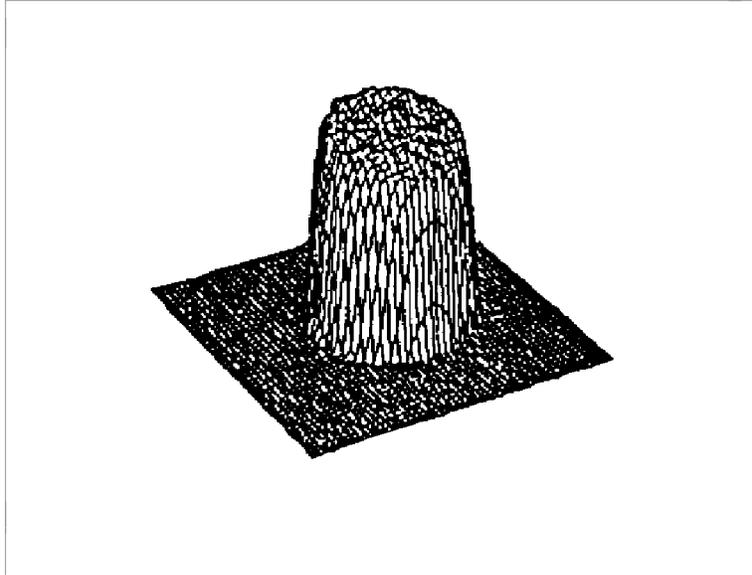


2 kW-Laser von HAAS LASER

Fig. 9802

Leistungsunabhängige Intensitätsverteilung

Die genau berechnete Auslegung des Resonators und die Führung des Laserlichts über Laserlichtkabel gewährleisten eine gleichbleibende Intensitätsverteilung des Laserstrahls am Bearbeitungsort.



Intensitätsverteilung

Fig. 9738

Kein Warmlaufverhalten

Laser von HAAS LASER zeigen kein Warmlaufverhalten. Innerhalb weniger Millisekunden erreichen sie ihre Nennleistung, unabhängig vom Betriebszustand des Lasers.

In Arbeitspausen, aber auch, wenn während des Arbeitstaktes keine Laserleistung gebraucht wird, kann der Laser ausgeschaltet werden. Das schont die Lampen und erhöht die Verfügbarkeit.

Beliebig modulierbar

Die Laserleistung der HAAS Laser kann im Pulsbetrieb und im cw-Betrieb beliebig moduliert werden. Damit lässt sich sowohl eine Pulsformung als auch ein Rampen realisieren.

Reproduzierbare Laserparameter

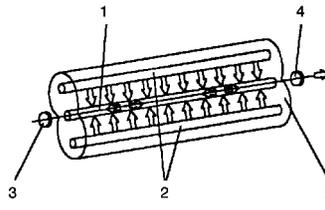
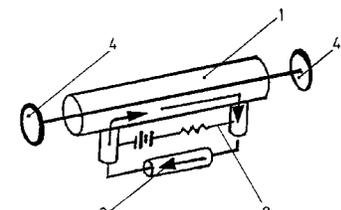
Die in HAAS Lasern eingesetzte Leistungsregelung gewährleistet eine Laserleistung, die extrem konstant gehalten werden kann. Alterungseffekte wie zum Beispiel Lampenverschleiß wirken sich nicht aus. Leistungsunabhängige Intensitätsverteilung und Leistungsregelung machen die Nd:YAG-Laser von HAAS LASER zu zuverlässigen, leicht handhabbaren Werkzeugen für die industrielle Materialbearbeitung.

Hohe Wirtschaftlichkeit

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER sind in besonderem Maß für den industriellen Einsatz geeignet. Die Gründe:

- Hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit durch hohe Strahlqualität
- Hohe Verfügbarkeit durch:
 - ◆ schnellen Lampenwechsel
 - ◆ wenig Verschleißteile
- Niedrige Betriebskosten durch geringen Wartungsaufwand
- Aufgabenspezifisch anpaßbares Produktprogramm

6. Im Vergleich: Nd:YAG-Laser und CO₂-Laser

	Nd:YAG-Laser	CO ₂ -Laser
Wellenlänge	1,06 µm	10,6 µm
Lasermedium	Nd:YAG	CO ₂
Pumpmechanismus	Licht	elektrisch angeregte Gasentladung
Aufbau	 <ul style="list-style-type: none"> 1 Nd:YAG-Stab 2 Lampen 3 Rückspiegel 4 Auskoppelspiegel 5 Kavität 	 <ul style="list-style-type: none"> 1 Entladungsstrecke 2 Elektroden 3 Gasflußrichtung 4 Rück- und Auskoppelspiegel
Mode	in der Regel: Multimode	kann auch bei hohen Leistungen sehr nahe am TEM ₀₀ sein
Strahlführung	Linsen, Spiegel, Laserlichtkabel	Linsen und Spiegel
Linsenmaterial	Spezialgläser	Zinkselenid, Galliumarsenid, Germanium
Spiegelmaterial	beschichtetes Glas	Kupfer, beschichtetes Silizium

	Nd:YAG-Laser	CO ₂ -Laser
Strahlqualität	<p>Die geringere Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers wirkt sich günstig auf die Strahlqualität der Nd:YAG-Lasers aus. Die Wärmeeffekte im Laserstab verschlechtern die Strahlqualität des Nd:YAG-Lasers. Grundsätzlich gilt: Die Strahlqualität des Nd:YAG-Lasers ist bei hohen Laserleistungen geringer als beim CO₂-Laser.</p>	
Absorption im Material	<p>The graph plots absorption A [%] on the y-axis (0 to 100) against wavelength λ [μm] on the x-axis (0.2 to 10). It shows three curves: 1 (dotted), 2 (solid), and 3 (dashed). Vertical dashed lines indicate laser wavelengths at 1.06 μm (Nd:YAG) and 10.6 μm (CO₂). Curve 1 (Glass) has high absorption at short wavelengths. Curve 2 (Transition metals) has high absorption at 1.06 μm and decreases at longer wavelengths. Curve 3 (Other metals) has low absorption across the range.</p> <p>1 Glas 2 Übergangsmetalle (z.B. Eisen, Nickel, Wolfram) 3 Andere Metalle (z.B. Kupfer, Aluminium, Silber, Gold)</p> <p>Absorption von Laserlicht (Nd:YAG und CO₂) in verschiedenen Materialgruppen Fig. 9714</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Der Absorptionsgrad ist abhängig vom Material und von der Wellenlänge des einfallenden Laserlichts. <input type="checkbox"/> Metalle absorbieren die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers besser als die Wellenlänge des CO₂-Lasers. 	

Kapitel 3

Laser: Die Grundlagen

1.	Was ist ein Laser?	3-3
2.	Das Prinzip.	3-4
3.	Die wichtigsten Komponenten	3-6
3.1	Laserm Medien und Pumpquellen	3-7
3.2	Resonatoren	3-8
	Was geschieht im Resonator?	3-8
	Aufbau von Resonatoren.	3-10
	Schwingungszustände im Resonator: Moden.	3-11

4.	Die wichtigsten Eigenschaften der Laserstrahlung	3-12
5.	Strahlqualität	3-15
6.	Betriebsarten eines Lasers	3-17
	CW-Betrieb (Dauerstrichbetrieb)	3-17
	Pulsbetrieb	3-18
7.	Externe Optik: Strahlführung	3-19

1. Was ist ein Laser?

Laser ist die Abkürzung für:

L ight	Licht
A mplification by	Verstärkung durch
S timulated	stimulierte
E mission of	Aussendung von
R adiation	Strahlung



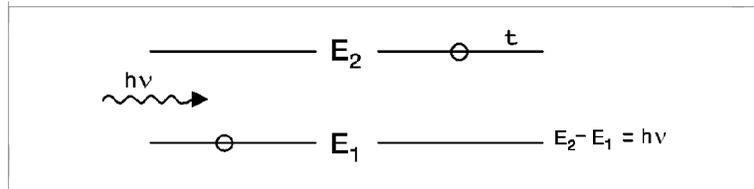
Laserstrahl erzeugen: Vereinfachtes Schema

Ein Laser emittiert elektromagnetische Strahlung einer ganz bestimmten Wellenlänge, die - abhängig vom Lasertyp - im Wellenlängenbereich zwischen Ultraviolett und Infrarot liegen kann. Obwohl nicht alle Laser eine Strahlung in dem für das Auge sichtbaren Bereich (400 - 750 nm) aussenden, wird der Laser trotzdem meist als Lichtquelle und die Strahlung als Laserlicht bezeichnet.

2. Das Prinzip

Atome (oder Moleküle oder Ionen) kommen nur in ganz bestimmten ("diskreten") Energiezuständen vor. Normalerweise befinden sie sich in ihrem energieärmsten Zustand, dem Grundzustand. In diesem Zustand können sie die Strahlung eines elektromagnetischen Feldes absorbieren, wenn die Energiequanten $h\nu$ - die Photonen - dieses Feldes gerade der Energiedifferenz zwischen zwei atomaren Zuständen entsprechen. (ν ist die Frequenz der zum Strahlungsfeld gehörenden elektromagnetischen Wellen.)

Absorption

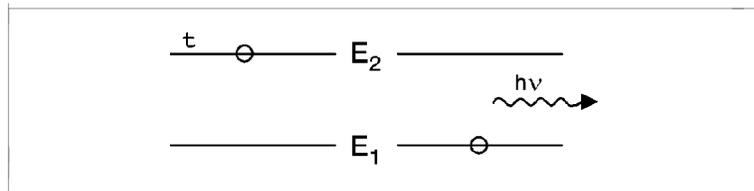


Absorption

Fig. 9537

Das Atom geht mit der Absorption eines Photons in einen energiereicheren, angeregten Zustand über. Dort kann es jedoch nicht beliebig lange verweilen, sondern es kehrt nach einer charakteristischen Zeit - der Lebensdauer t - spontan in den Grundzustand zurück. Dabei wird ein Photon emittiert.

Spontane Emission



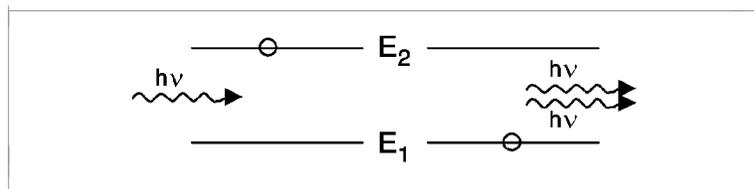
Spontane Emission

Fig. 9574

Neben der spontanen Emission ist nun auch eine "induzierte" oder "stimulierte" Emission möglich und zwar dann, wenn ein weiteres Photon der Energie $h\nu$ mit dem angeregten Atom in Wechselwirkung tritt. Dieses Photon "induziert" - verursacht - einen Übergang in den Grundzustand. Dabei wird die Lebensdauer des angeregten Zustands verkürzt. Die im Atom gespeicherte Energie $h\nu$ wird an das Strahlungsfeld zurückgeliefert.

Dieser Prozeß ist kohärent. Das heißt: Die einfallende und die emittierte Welle schwingen in Phase.

Stimulierte Emission



Stimulierte Emission

Fig. 9575

Laserprinzip

Ein Atom kann ein Strahlungsfeld mit passender Photonenenergie entweder abschwächen (bei der Absorption) oder verstärken (bei der stimulierten Emission).

Ein Laser nützt den Prozeß der stimulierten Emission zur Verstärkung von Licht ("Light amplification by stimulated emission of radiation"). Verstärkt wird der Übergang von einem oberen auf ein unteres "Laserniveau".

Besetzungsinversion

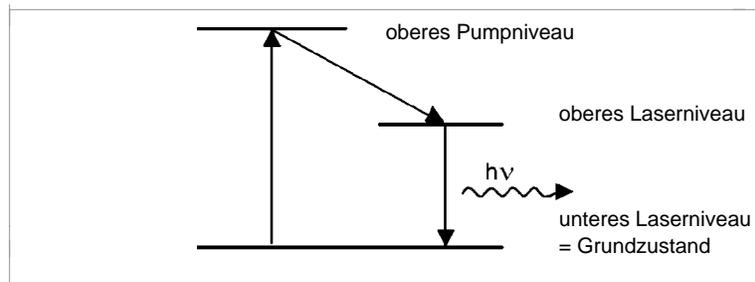
Ob ein Atom ein Photon absorbiert oder ein weiteres Photon emittiert, hängt vom Zustand des Atoms ab: Befindet sich das Atom im unteren Zustand, kann es nur absorbieren. Ist es im angeregten Zustand, kann es nur verstärken.

Bei sehr vielen Atomen kann es daher nur dann Verstärkung geben, wenn mehr Atome im angeregten Zustand als im Grundzustand sind (dann spricht man von "Besetzungsinversion").

Die Anregung sehr vieler Atome in das obere Laserniveau kann nicht direkt erfolgen. Ab dem Moment, in dem sich genauso viele Atome im oberen Zustand wie im unteren befinden, wird die stimulierte Emission genauso wahrscheinlich wie die Absorption. In der Summe ändert sich nichts mehr.

Die Anregung in das obere Laserniveau erfolgt daher immer über einen Umweg, einen dritten Energiezustand. Dieser dritte Zustand wird als "Pumpniveau" bezeichnet, weil Energie in das System "gepumpt" wird. Das Atom wird in das Pumpniveau angeregt und geht durch strahlungslose Prozesse (meistens Wärme) in das obere Laserniveau über:

Dreineveau-System

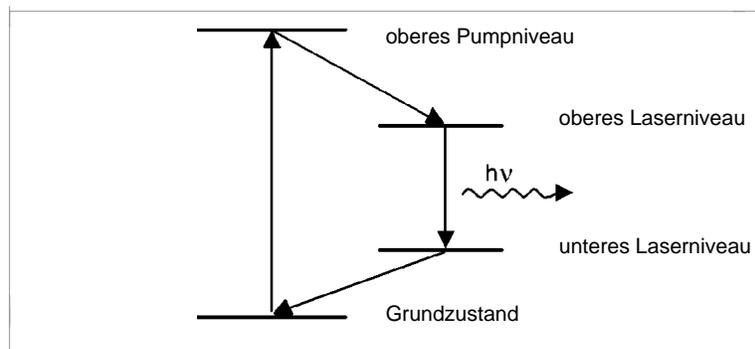


Dreineveau-System

Fig. 9576

Häufig ist das untere Laserniveau nicht der Grundzustand, sondern selbst ein angeregter Zustand. Das untere Laserniveau wird dann automatisch entleert, die Besetzungsinversion ist leichter zu erreichen:

Vierniveau-System



Vierniveau-System

Fig. 9577

3. Die wichtigsten Komponenten

Ein Laser nützt die stimulierte Emission zur Verstärkung von Licht. Damit das funktioniert, müssen grundsätzlich die drei folgenden Bauteile vorhanden sein:

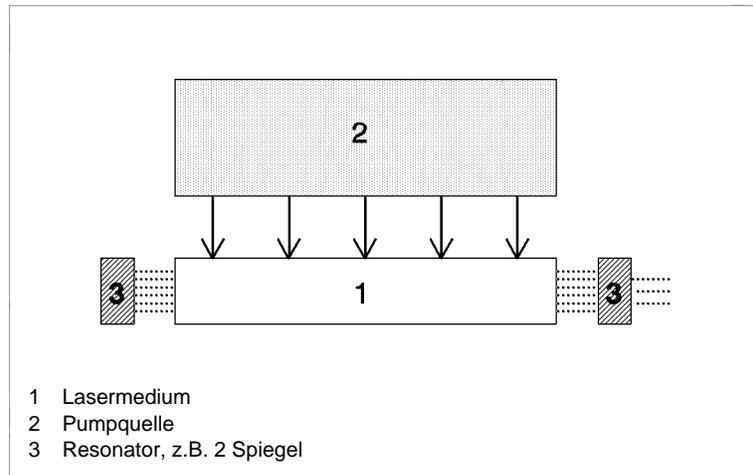
Lasermedium: Das Lasermedium ist die Stelle, an der das Laserlicht entsteht. Es muß mindestens zwei Energieniveaus haben, die durch einen starken Strahlungsübergang gekoppelt sind. Die Anregung über einen dritten Zustand muß möglich sein.

Pumpquelle: eine starke Energiequelle, die die laseraktiven Atome (oder Moleküle oder Ionen) in diesen gewünschten angeregten Zustand befördert.

Resonator (siehe S.3-8): Er hat zwei Funktionen:

- Er sorgt dafür, daß die Photonen lange genug im laseraktiven Medium bleiben.
- Er sorgt dafür, daß eine bestimmte Raumrichtung verstärkt wird.

Komponenten eines Lasers



Komponenten eines Lasers

Fig. 9582

Die Pumpquelle regt das Lasermedium durch Zufuhr von elektromagnetischer oder chemischer Energie zur Emission an. Die rückkoppelnden Elemente (z.B. Spiegel) bilden einen Resonator, in dem eine Laseroszillation entstehen kann.

3.1 Lasermedien und Pumpquellen

Die Anzahl laseraktiver Materialien ist ungeheuer groß. Noch immer werden neue Materialien entdeckt.

Die heute wichtigsten Laser können in vier Klassen eingeteilt werden. Kriterium für die Einteilung ist die Kombination von Lasermedium und Pumpmechanismus.

Lasertyp	Lasermedium	Pumpmechanismus und Pumpquellen	wichtige Beispiele, Wellenlänge, bevorzugter Einsatzbereich
Gaslaser	Gas oder Dampf	elektrisch angeregte Gasentladung	CO₂-Laser : 10.6 µm (fernes Infrarot); Materialbearbeitung. HeNe-Laser : 633nm (rot); Meßtechnik. Excimer-Laser : 175-483 nm (ultraviolett); Meßtechnik, Photochemie.
Festkörperlaser	Kristalle oder Gläser, die mit optisch aktiven Ionen dotiert sind	optisch Blitzlampe, Bogenlampe, Diodenlaser	Rubin-Laser : 694 nm (rot), erster entdeckter Laser. Nd:YAG-Laser[*] , Nd:Glas-Laser : 1,06 µm (nahes Infrarot); Materialbearbeitung.
Farbstofflaser	Organische Farbstoffe in stark verdünnter Lösung	optisch, Blitzlampen Laser	durchstimmbare von ca. 300 nm bis 1,2 µm; Spektroskopie.
Halbleiterlaser	Halbleiter	elektrisch	GaInP (670-680 nm), GaAlAs (780-880 nm); sehr kleine Abmessungen; Lichtquelle in CD-Playern, optischen Plattenspeichersystemen und Laserprintern; Nachrichtentechnik.

^{*}) "Nd:YAG-Laser" wird in der Praxis häufig durch "YAG-Laser" abgekürzt.

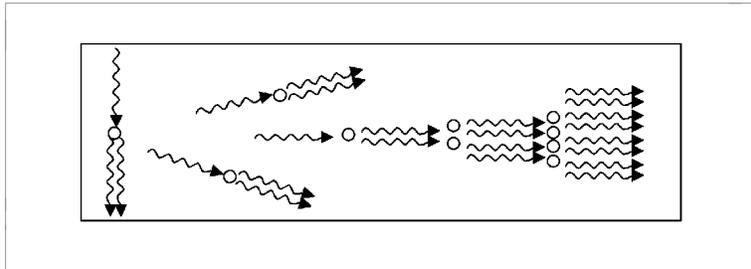
3.2 Resonatoren

Was geschieht im Resonator?

Besetzungsinversion Die Pumpquelle erzeugt die notwendige Besetzungsinversion. Das bedeutet: im Lasermedium befinden sich mehr Atome im oberen Laserniveau (=im angeregten Zustand) als im unteren Laserniveau.

Spontane Emission Einige Atome im Lasermedium gehen durch spontane Emission in das untere Laserniveau über. Dabei emittieren sie Photonen, die benachbarte angeregte Atome zur stimulierten Emission zwingen können.

Verstärkte Spontanemission entlang einer Vorzugsrichtung Ist das Lasermedium z.B. zylinderförmig, so gibt es entlang der Zylinderachse kleine Lawinen (man nennt das "verstärkte Spontanemission"). Senkrecht zur Achse kann kaum Verstärkung entstehen, weil sich die Photonen nicht lange genug im Lasermedium befinden, um eine nennenswerte Verstärkung zu erreichen.

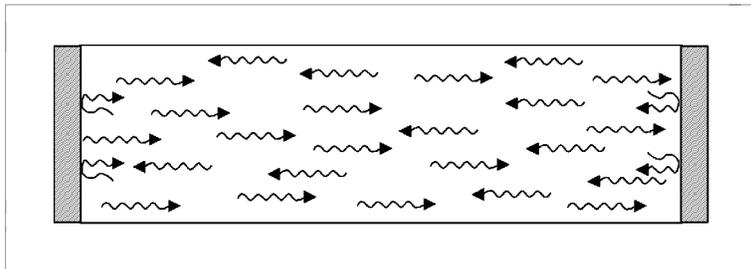


Verstärkte Spontanemission

Fig. 9584

Resonator Bringt man das Lasermedium zwischen zwei Spiegel, dann können die Photonen, die sich parallel zur Zylinderachse bewegen, sehr lange im Lasermedium bleiben und sehr viele Atome dazu zwingen, Photonen in die gleiche Richtung auszusenden.

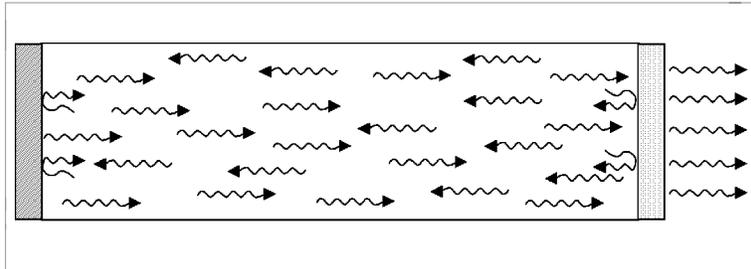
Die beiden Spiegel bilden einen Resonator: Die zu den Photonen gehörenden elektromagnetischen Wellen können im Resonator stehende Wellen ausbilden. Die sogenannte Laseroszillation beginnt.



Wirkung des Resonators

Fig. 9585

Damit der Laser als Lichtquelle verwendet werden kann, muß einer der beiden Spiegel teildurchlässig sein. Der austretende Lichtstrahl ist der gewünschte Laserstrahl:



Entstehung des Laserstrahls

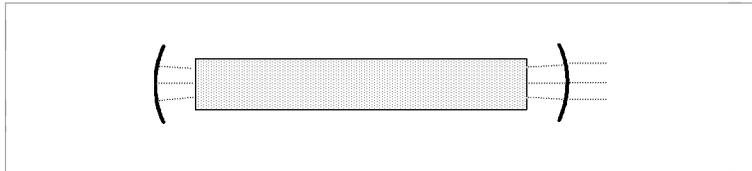
Fig. 9586

Aufbau von Resonatoren

Ein Resonator besteht nur im einfachsten Fall aus 2 ebenen Spiegeln, von denen einer teildurchlässig ist. In der Praxis der Lasertechnik gibt es eine ganze Reihe anderer Anordnungen. 3 Beispiele sollen die Vielfalt der möglichen Resonator-Anordnungen zeigen:

Resonatoren mit gekrümmten Spiegeln

Neben ebenen Spiegeln können auch konkave oder konvexe Spiegel eingesetzt werden. Sie sind in der Regel leichter zu justieren als ebene Spiegel. Damit der Lichtstrahl den Resonator nicht verläßt, dürfen die Spiegel nicht beliebig stark gekrümmt sein. Anordnungen mit 2 konkaven Spiegeln werden häufig in Festkörperlaser eingesetzt:

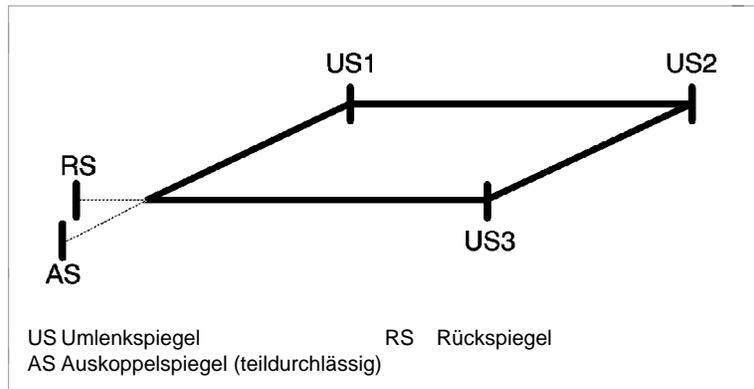


Resonator mit konkaven Spiegeln: schematische Darstellung

Fig. 9583

Gefalteter Resonator

CO₂-Laser von TRUMPF haben "quadratisch gefaltete Resonatoren". Das heißt: der Strahl wird mehrfach umgelenkt. Der eigentliche Resonator wird durch den Rückspiegel (RS) und den Auskoppelspiegel (AS) gebildet. Die Umlenkspiegel (US) haben nur die Aufgabe, den Strahl vom Rückspiegel zum Auskoppelspiegel und zurück zu führen. Diese Anordnung erlaubt eine sehr kompakte Bauweise der Laser.



Gefalteter Resonator: schematische Darstellung (Seitenansicht)

Fig. 7813

Grenzflächen als Resonator

Eine ganz besonders einfache Anordnung wird häufig bei Halbleiterlasern eingesetzt. Die Endflächen des Halbleiterkristalls, in dem die Laserübergänge stattfinden, sind perfekt eben und werden als teildurchlässige Spiegelflächen genutzt.

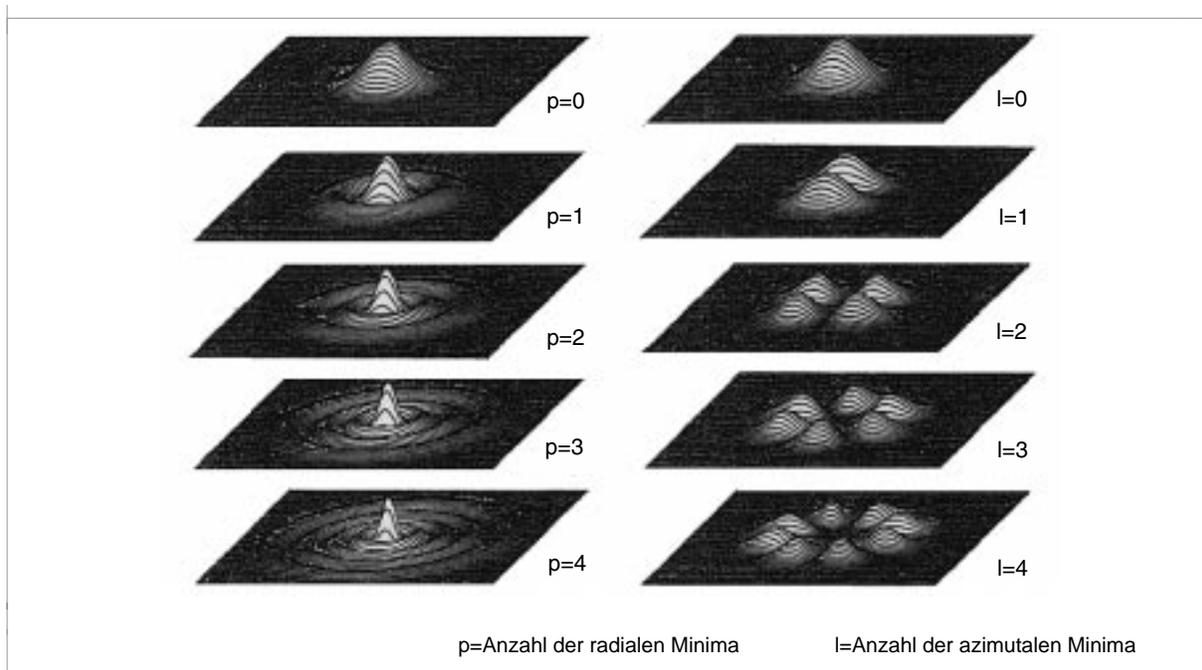
Schwingungszustände im Resonator: Moden

Die zu den Photonen gehörenden elektromagnetischen Wellen bilden im Resonator stehende Wellen aus. Die Schwingungszustände im Resonator werden als "Moden" bezeichnet. Man unterscheidet:

- **Longitudinale Moden:** Schwingungszustände parallel zur Resonatorachse.
- **Transversale Moden (TEM_{p,l}-Moden):** Schwingungszustände senkrecht zur Resonatorachse.

Warum sind die TEM-Moden wichtig?

Intensitätsverteilung Zu jedem transversalen Mode des Resonators gehört eine charakteristische Intensitätsverteilung im Querschnitt des Laserstrahls:



Transversale elektromagnetische Moden
(radialsymmetrischer Resonator)

Fig. 9706

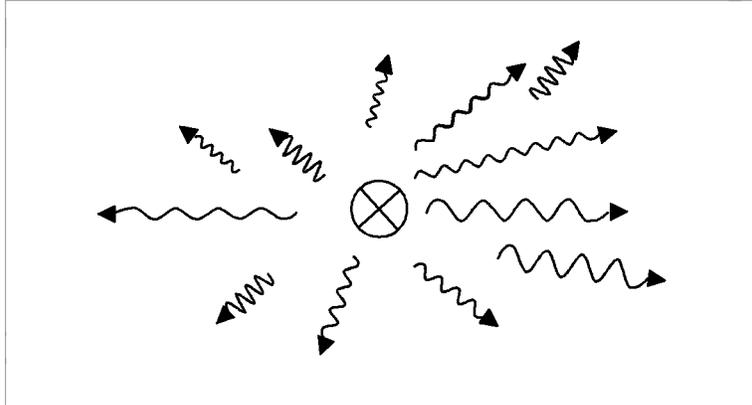
Häufig wird die Intensitätsverteilung im Querschnitt des Laserstrahls selbst als "Mode" bezeichnet.

Im Resonator kann ein einzelner Mode oder mehrere Moden gleichzeitig anschwingen. Im zweiten Fall ist die Intensitätsverteilung eine Überlagerung der anschwingenden Moden ("Multimode").

Strahlqualität Die Modenordnung (p,l) ist eine der Größen, die die Strahlqualität entscheidend beeinflussen: je geringer die Modenordnung ist, um so besser ist die Strahlqualität (siehe S. 3-15).

4. Die wichtigsten Eigenschaften der Laserstrahlung

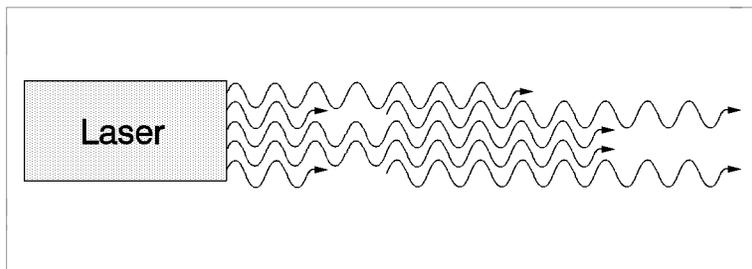
Das Licht einer "normalen", thermischen Lichtquelle (z.B. Sonne oder Glühlampe) besteht aus kurzen Wellenzügen verschiedener Wellenlängen, die völlig regellos von der Lichtquelle ausgesandt werden:



Licht einer thermischen Lichtquelle

Fig. 9589

Laserlicht hat eine Reihe von Eigenschaften, die es vom Licht thermischer Lichtquellen unterscheidet:



Laser: Kohärentes, monochromatisches und nahezu paralleles Licht

Fig. 9590

Laserstrahlung ist monochromatisch

Laserstrahlung ist monochromatisch.

Das bedeutet: Ein Laser sendet Strahlung einer einzigen, genau definierten und für den jeweiligen Laser spezifischen Wellenlänge aus.

Laserstrahlung ist zeitlich und räumlich kohärent

Laserstrahlung ist zeitlich und räumlich kohärent.

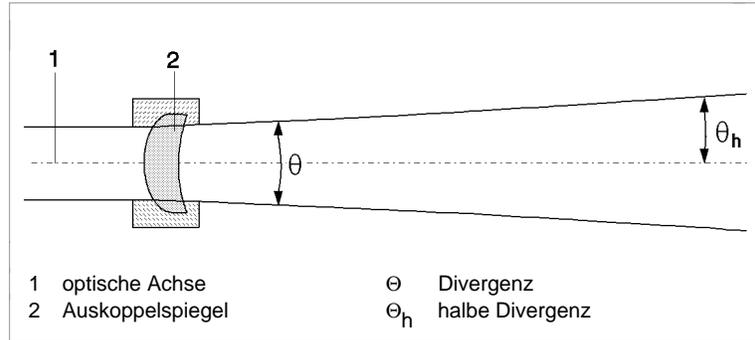
Das bedeutet: Die elektromagnetischen Wellen des Laserlichts schwingen in Phase, "im Takt", und zwar :

- in gleicher Entfernung vom Ausgangspunkt zu verschiedenen Zeiten (zeitliche Kohärenz)
- und
- an verschiedenen Stellen zur gleichen Zeit (räumliche Kohärenz)

Laserstrahlung ist nahezu parallel

Laserstrahlung hat eine geringe Divergenz.
Das bedeutet: Laserstrahlung ist nahezu parallel.

Die Abweichung von der Parallelität wird als **Divergenz** bezeichnet, deren Größe durch den **Öffnungswinkel** (in Grad oder rad) beschrieben werden kann.



Divergenz (nach DIN 18730)

Fig. 9591



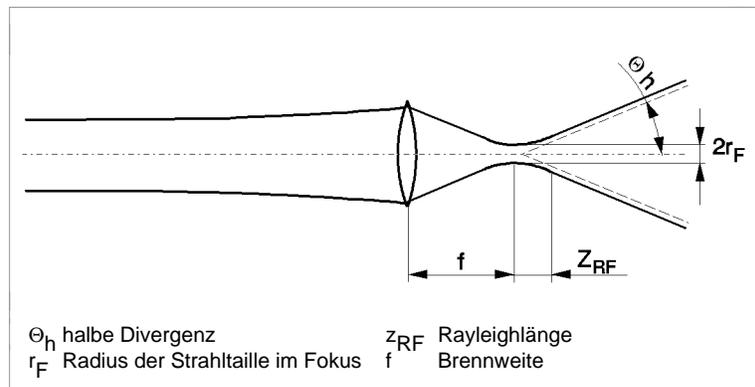
In der Praxis der Lasertechnik wird häufig auch die halbe Divergenz Θ_h angegeben.

Laserstrahlung lässt sich gut fokussieren

Wegen der hohen Parallelität kann Laserlicht besonders gut fokussiert werden. Die gesamte Energie des Laserstrahls wird damit auf einen sehr kleinen Brennfleck - den Fokus - konzentriert.

Zur Fokussierung werden im Laserleistungsbereich bis 2.5 kW überwiegend Linsen, bei höherer Leistung wegen der hohen thermischen Belastung Spiegeloptiken eingesetzt. Durch die Fokussieroptik wird der Laserstrahl auf einen kleinen Brennfleck mit hoher Leistungsdichte gebündelt.

Je kürzer die Brennweite einer Fokussierlinse ist, um so geringer ist der Strahldurchmesser im Fokus. Aber: bei kurzer Brennweite der Linse weitet sich der Laserstrahl mit Abstand zum Fokus stärker auf (außerdem erhöht sich der Fehler durch sphärische Aberration an der Linse).



Kenngrößen bei der Fokussierung

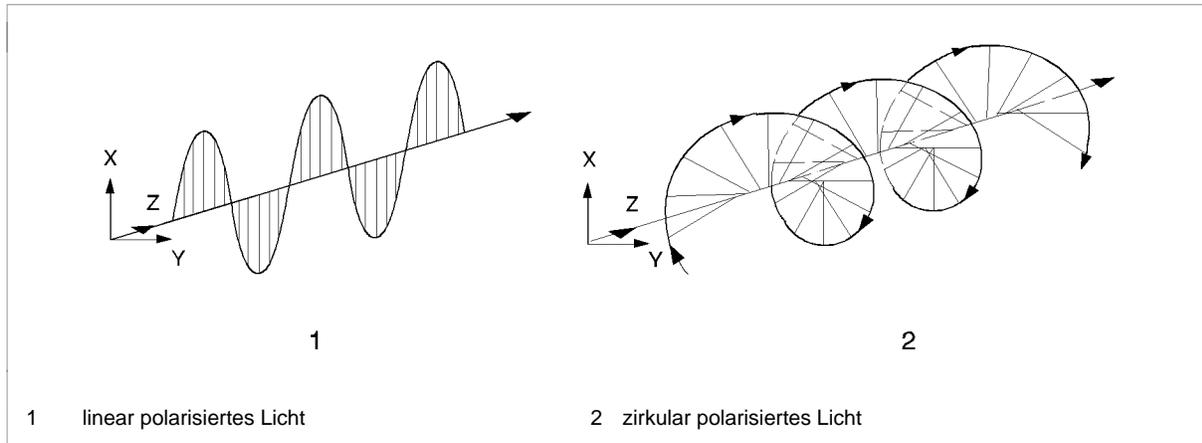
Fig. 9713

Die Rayleighlänge z_{RF} ist das Maß für die Schärfentiefe. z_{RF} ist der Abstand zur Strahltaile, bei dem sich die Fläche des Strahlquerschnittes verdoppelt hat.

Polarisationsrichtung

Bei linear polarisierter Strahlung schwingt das elektrische Feld der elektromagnetischen Wellen immer nur in einer Ebene. Die Richtung des elektrischen Feldes wird Polarisationsrichtung genannt.

Bei zirkular polarisierter Strahlung schwingt die elektrische Feldstärke so, daß die Spitze des Feldvektors einen Kreis um die Ausbreitungsrichtung beschreibt:



Linear und zirkular polarisiertes Licht

Fig. 8384

Laserstrahlung und Polarisationsrichtung

Der Lasereffekt selbst hat keinen Einfluß auf die Polarisationsrichtung des Laserlichts. Werden aber im Resonator optische Bauelemente verwendet, die eine Polarisationsrichtung deutlich bevorzugen (sogenannte selektive Elemente), dann strahlt der Laser linear polarisiertes Licht aus.

Polarisationsrichtung und Laserbearbeitung

Wird zur Bearbeitung von Werkstücken linear polarisierte Laserstrahlung eingesetzt, so ist das Bearbeitungsergebnis von der Bearbeitungsrichtung abhängig.

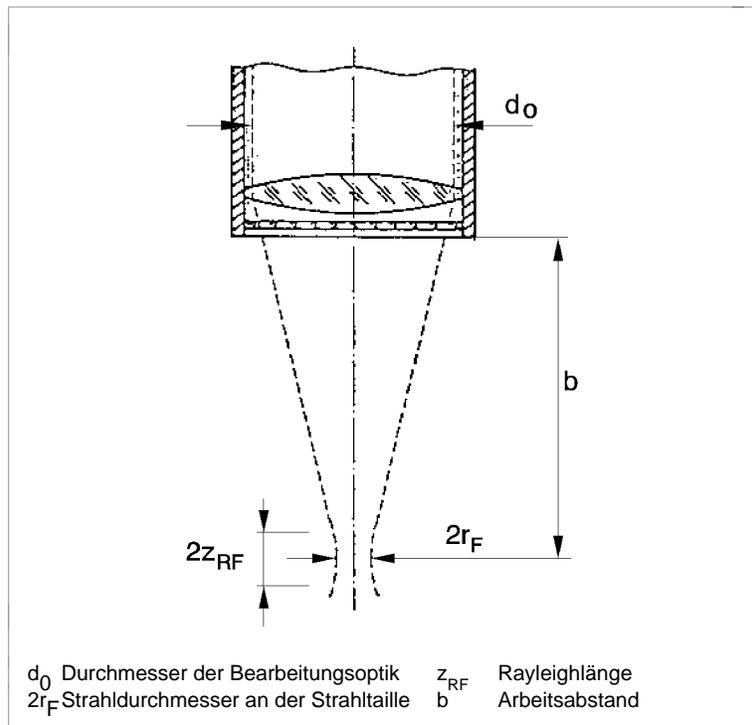
Um ein in alle Richtungen gleichmäßiges Ergebnis zu erzielen, gibt es zwei Möglichkeiten:

- Verwendung von unpolarisiertem Laserlicht, wenn der Laser unpolarisiertes Licht aussendet (Beispiel: Nd:YAG-Laser^{*)}).
- Verwendung von zirkular polarisiertem Licht, wenn der Laser polarisiertes Licht aussendet. Mit einem Phasenschieber kann linear polarisiertes Licht einfach zirkular polarisiert werden (Beispiel: CO₂-Laser).

^{*)} Auch Nd:YAG-Laser können so gebaut werden, daß sie polarisiertes Licht aussenden. Die Nd:YAG-Laser, von denen in dieser Informationsschrift die Rede ist, senden jedoch unpolarisiertes Licht aus.

5. Strahlqualität

Die genaue Angabe der Strahlstruktur eines Laserstrahls ist kompliziert und für die Materialbearbeitung auch nicht notwendig. Entscheidend für die Materialbearbeitung ist, wie gut ein Strahl fokussiert werden kann:



Fokussierbarkeit und Bearbeitungsparameter

Fig. 9737

Gute Fokussierbarkeit heißt:

Kleiner Fokusbereich: Bei der Bearbeitung mit kleinem Fokusbereich muß nur wenig Material aufgeschmolzen werden. Das wirkt sich günstig auf die Bearbeitungsgeschwindigkeiten aus.

Größerer Arbeitsabstand bei kleinem Fokus: Der Arbeitsabstand kennzeichnet den Abstand zwischen Bearbeitungsoptik und Werkstück. Er ist damit eine wichtige Größe für die Prozeßsicherheit und die Verfügbarkeit des Lasersystems.

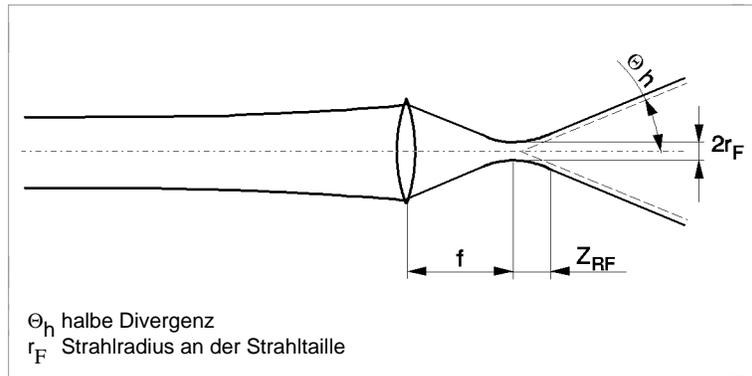
Große Schärfentiefe: Eine große Schärfentiefe ist bei der Bearbeitung von dicken Blechen notwendig. Außerdem werden dadurch die Toleranzanforderungen beim Einstellen des Arbeitsabstands geringer.

Kleiner Durchmesser der Bearbeitungsoptik: Ein kleiner Durchmesser der Bearbeitungsoptik erlaubt eine kleine und kompakte Bauweise einer Laseranlage.

Grundsätzlich gilt: Je kleiner die Wellenlänge eines Lasers und je geringer die Modenordnung des Laserstrahls ist, um so besser kann der Strahl fokussiert werden.

Zur Charakterisierung der Fokussierbarkeit eines Laserstrahls wurde das Strahlparameterprodukt eingeführt. Es wird aus den optischen Größen Divergenz und Strahldurchmesser an der Strahltaile berechnet:

Strahlparameter



Strahlparameter

Fig. 9712

Das Produkt aus diesen beiden Größen bleibt während der gesamten Ausbreitung eines Laserstrahls konstant (auch beim Durchgang durch Linsen oder bei der Reflexion an Spiegeln) und ist charakteristisch für den Laser:

Strahlparameterprodukt

$$\Theta_h \cdot r_F = (\Theta \cdot d_F) / 4 = \text{konstant}$$

Θ_h halbe Divergenz	Θ (volle) Divergenz
r_F Strahlradius an der Strahltaile	d_F Strahldurchmesser an der Strahltaile

Einheit des Strahlparameterprodukts: mm mrad

Strahlparameterprodukt



In der Praxis der Lasertechnik sind beide Schreibweisen verbreitet.

Je größer die Strahltaile ist um so kleiner ist die Divergenz. Das bedeutet: Wird der Strahl mit einem Teleskop aufgeweitet, kann die Parallelität besser werden.

Fokussierbarkeit und Strahlqualität

Das Strahlparameterprodukt ist ein Maß für die Strahlqualität und die Fokussierbarkeit: Je kleiner das Strahlparameterprodukt eines Laserstrahls ist, um so besser ist die Strahlqualität und um so besser lässt sich ein Strahl fokussieren.

Strahlqualität und Laser

Das Strahlparameterprodukt und damit die Strahlqualität eines Lasers ist abhängig von der Wellenlänge des Lasers und von der Modenordnung der im Resonator anschwingenden Moden*):

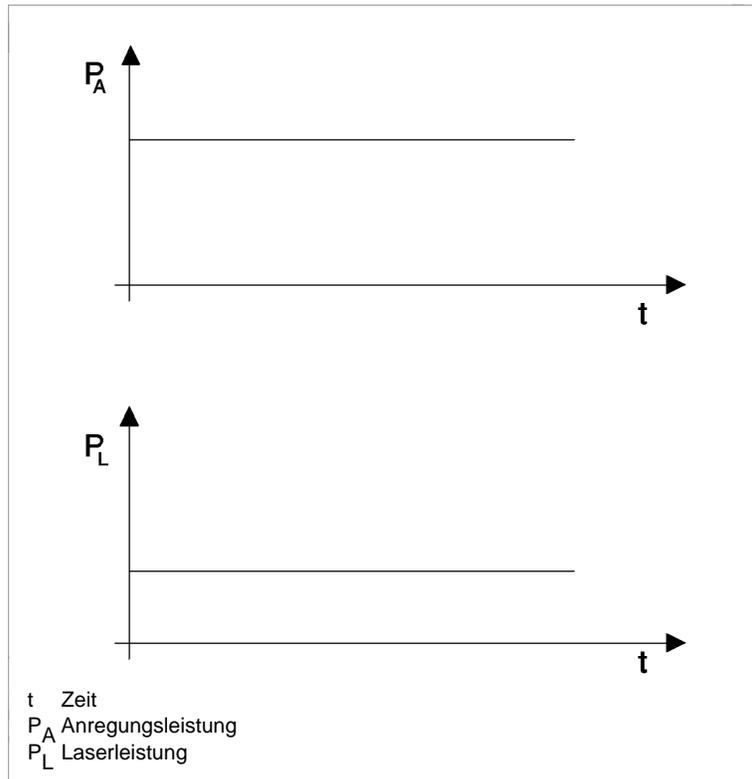
- **Wellenlänge:** Je kleiner die Wellenlänge eines Laserstrahls ist, um so besser ist die Strahlqualität (bei vorgegebener Modenordnung).
- **Modenordnung:** Je höher die Modenordnung eines Laserstrahls ist, um so schlechter wird die Strahlqualität (siehe S.3- 11).

*) $r_0 \Theta_h = \sqrt{(2p+1)^2} \frac{\lambda}{\pi}$

6. Betriebsarten eines Lasers

CW-Betrieb (Dauerstrichbetrieb)

Im Dauerstrichbetrieb (cw = continuous wave) wird der Laserstrahl unter konstanter Energiezufuhr kontinuierlich erzeugt. Der Laser sendet Laserlicht von konstanter Intensität:



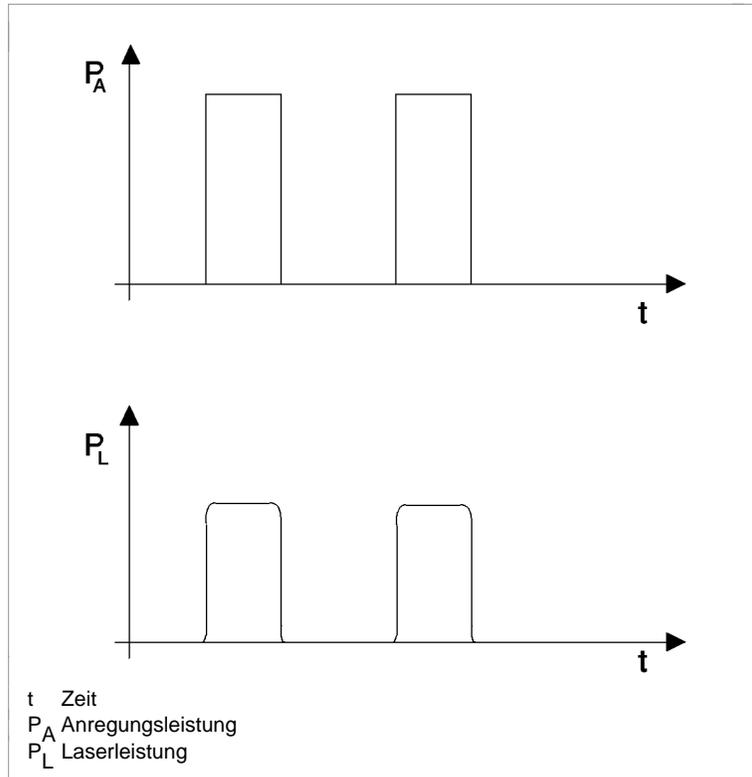
CW-Betrieb

Fig. 9588

Pulsbetrieb

Im Pulsbetrieb wird nicht kontinuierlich angeregt (gepumpt), sondern in Intervallen. Die pulsförmige Anregungsleistung bewirkt eine pulsförmige Laser-Ausgangsleistung.

Im Pulsbetrieb können - zeitlich begrenzt auf die Pulsdauer - sehr hohe Laserleistungen erzeugt werden.



Pulsbetrieb

Fig. 9587

Bei Lasern, die für das Schneiden und das Schweißen eingesetzt werden, werden Pulse in der Regel durch eine pulsierende Anregung erzeugt.

Weitere Methoden der Pulserzeugung

Neben dieser Methode der Pulserzeugung gibt es noch zwei weitere Möglichkeiten der Pulserzeugung: Q-Switch und Modenkopplung.

Mit diesen beiden Methoden können sehr kurze Pulse von extrem hoher Leistungsdichte erzeugt werden.

Die Methode der Pulserzeugung mit Q-Switch wird in der Materialbearbeitung gelegentlich zum Kennzeichnen eingesetzt. Die Technik der Modenkopplung zur Pulserzeugung spielt in der Materialbearbeitung keine Rolle.

7. Externe Optik: Strahlführung

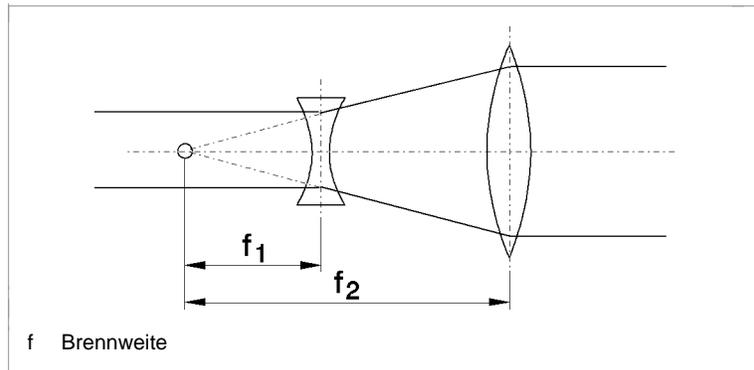
Definition Unter externer Optik versteht man die Strahlführung vom Laseraggregat bis zur Bearbeitungsstelle.

Die externe Optik erfüllt die folgenden Aufgaben:

- **Strahlaufweitung** z.B. durch ein Strahlteleskop
- **Zirkularpolarisation** (nur notwendig, wenn der Laser linear polarisiertes Licht emittiert)
- **Strahlführung** durch Umlenkspiegel oder Lichtleiterkabel
- **Fokussierung** des Laserstrahls auf den Bearbeitungspunkt durch den Schneidkopf.

Strahlaufweitung Die Divergenz Θ (der Öffnungswinkel) eines Laserstrahls ist häufig zu groß für große Übertragungswege. Aus diesem Grund wird der Strahl nach dem Austritt aus dem Laseraggregat aufgeweitet.*) Die Divergenz wird dann kleiner. Der Strahl kann über längere Strecken geführt werden, ohne daß es zu einer großen Strahlaufweitung kommt.

Zur Strahlaufweitung werden in der Regel Teleskope eingesetzt.



Strahlaufweitung (Galilei-Teleskop)

Fig. 9717

Am Bearbeitungsort wird der aufgeweitete Strahl mit Hilfe von Linsensystemen wieder fokussiert.

Strahlpolarisation Sendet der Laser unpolarisiertes Licht aus (z.B. Nd:YAG-Laser⁺⁾), ist kein zusätzliches optisches Bauelement notwendig. Da bei unpolarisiertem Licht keine Polarisationsrichtung bevorzugt wird, ist das Bearbeitungsergebnis bei der Laserbearbeitung in alle Richtungen von gleicher Qualität.

Sendet der Laser linear polarisiertes Licht aus (z.B. CO₂-Laser), muß das Laserlicht zirkular polarisiert werden, um ein in alle Bearbeitungsrichtungen gleichmäßiges Bearbeitungsergebnis zu gewährleisten. Dies geschieht in der Regel mit Hilfe eines Phasenschiebers.

*) $r_0 \cdot \Theta = \text{konstant}$ (siehe S.3- 15)

+) Auch Nd:YAG-Laser können so gebaut werden, daß sie polarisiertes Licht aussenden. Die Nd:YAG-Laser, von denen in dieser Informationsschrift die Rede ist, senden jedoch unpolarisiertes Licht aus.

Strahlführung Damit der Laserstrahl an den Bearbeitungsort gelangt, müssen geeignete Strahlführungskomponenten vorhanden sein. Dazu sind grundsätzlich zwei Methoden denkbar:

- Strahlführung mit Spiegeln und Linsen
- Strahlführung mit Hilfe von Lichtleiterkabeln

Welche der beiden Methoden zur Strahlführung eingesetzt wird, ist abhängig vom Wellenlängenbereich und der Leistung des Laserlichtes.

Strahlfokussierung Damit mit dem Laser Bearbeitungsaufgaben durchgeführt werden können, muß der aufgeweitete Laserstrahl wieder fokussiert werden. Diese Aufgabe übernimmt der Schneidkopf. Er befindet sich am Ende der Strahlführung unmittelbar vor der Bearbeitungsstelle.

Neben der Fokussierung erfolgt im Schneidkopf die Zuführung des Schneidgases, das mit dem Laserstrahl durch die Düse austritt.

Hohe Anforderungen an die Qualität

Alle optischen Bauelemente müssen von sehr hoher optischer Qualität sein.

Kleinste Fehler im Material oder im Schliff können zu sehr hoher Wärmebelastung und damit zur Zerstörung des Materials führen.

Die Materialien, aus denen die optischen Bauteile hergestellt werden, müssen sehr genau auf die Wellenlänge des Lasers abgestimmt sein: der Transmissionsgrad für durchlässige Optiken (z.B. Linsen) und der Reflexionsgrad für reflektierende Optiken (z.B. Spiegel) müssen für die Laser-Wellenlänge sehr hoch sein.

Beispiele

- Nd:YAG-Laser:
Wellenlänge: 1,06µm (nahes Infrarot)
Diese Wellenlänge liegt sehr nahe am sichtbaren Bereich. Aus diesem Grund können für die Strahlführung Glas-Optiken eingesetzt werden.
- CO₂-Laser:
Wellenlänge: 10,6µm (fernendes Infrarot)
Linsenmaterial: z.B. Zinkselenid (ZnSe)
Spiegelmaterial: z.B. Kupfer

Stichworte

2 kW-Laser von HAAS LASER 2-8

Absorption. 3-4

Absorption des Nd:YAG-Laserlichts 1-7

Alterungsprozesse der Anregungslampen . 2-6

Anregung des Nd:YAG-Lasers 1-3

Anregungslampen 2-6

Aufbau eines Nd:YAG-Lasers. 1-5

Aufbau von Laserlichtkabeln 2-10

Bauteile eines Lasers. 3-6

Besetzungsinversion. 3-5

C_w. 3-17

Dauerstrichbetrieb. 3-17

Divergenz 3-13

Dotierung. 1-2

Dreineiveau-System. 3-5

Eigenschaften der Laserstrahlung 3-12

Emission, spontane 3-4

Emission, stimulierte. 3-4

Energietermschema Nd:YAG 1-3

Energiezustände. 3-4

Entstehung des Laserstrahls 3-9

Externe Optik. 3-19

Faserbruch. 2-13

Fokussierbarkeit eines Nd:YAG-Lasers. . 1-8

Fokussierung. 3-13

Gefaltete Resonatoren 3-10

H_v. 3-4

Intensitätsverteilung 3-11

Intensitätsverteilung bei HAAS-Lasern . . 2-15

Kavität. 1-5

Kohärenz. 3-12

Komponenten eines Lasers 3-6

Kühlung des Nd:YAG-Stabes 2-5

Laser. 3-3

Laser: Das Prinzip 3-4

Laser: Die wichtigsten Komponenten. . . 3-6

Laseraktive Materialien 3-7

Laserlicht. 3-3

Laserlichtkabel. 2-10

Laserlichtkabel: Merkmale. 2-12

Lasermedien 3-7

Lasermedium. 3-7

Lasermedium. 3-6

Lasermedium eines Nd:YAG-Lasers 1-2

Laserniveau 3-5

Laseroszillation. 3-8

Laserprinzip 3-5

Laserstab. 1-2

Laserstrahl erzeugen 3-3

Laserstrahl: Entstehung 3-9

Laserstrahlung: Eigenschaften 3-12

Lasertypen 3-7

Leistungen der Nd:YAG-Laser 1-8

Leistungsmerkmale der HAAS LASER . . 2-14

Leistungsregelung. 2-7

Lichtaustritt. 2-13

Lichtleiterkabel. 3-19

Longitudinale Moden. 3-11

Moden. 3-11

Modenkopplung 3-18

Monochromasie 3-12

Multimode 3-11

Multirod-System 1-8

Multirod-System 2-8

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER:Aufbau. 2-3

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER:

Komponenten. 2-5

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER: Leistungsmerkmale	2-14	Spontane Emission	3-4
Nd:YAG-Laser von HAAS LASER: Sicherheitskonzept	2-13	Stimulierte Emission	3-4
Nd:YAG-Laser von HAAS LASER: Wirtschaftlichkeit	2-16	Strahlaufweitung	3-19
Nd:YAG-Laser: Anregung	1-3	Strahlfokussierung	3-20
Nd:YAG-Laser: erreichbare Leistungen	1-8	Strahlführung	3-20
Nd:YAG-Laser: Pumpquelle	1-4	Strahlführungskomponenten	2-9
Nd:YAG-Laser: Resonator	1-4	Strahlparameter	3-16
Nd:YAG-Laser: typische Anordnung	1-5	Strahlparameterprodukt	3-16
Nd:YAG-Laser: Wellenlänge	1-7	Strahlqualität	3-11, 15
Neodym	1-2	Strahlqualität eines Nd:YAG-Lasers	1-8
Ö ffnungswinkel	3-13	Strahltaile	3-16
P hotonen	3-4	T EM _{pl} -Moden	3-11
Polarisationsrichtung	3-14, 19	Thermische Linse	1-6
Pulsbetrieb	2-6	Transversale elektromagnetische Moden	3-11
Pulsbetrieb	3-18	Transversale Moden	3-11
Pumpniveau	3-5	U mlenkspiegel	3-19
Pumpquelle	0-7	V erstärkung	3-5
Pumpquelle	3-6	Vergleich: Nd:YAG-Laser und CO ₂ -Laser	2-17
Pumpquelle eines Nd:YAG-Lasers	1-4	Versorgung der Anregungslampen	2-6
Pumpquellen	3-7	Vierniveau-System	3-5
Q -Switch	3-18	W ärmebelastung des Nd:YAG-Stabs	1-6
R esonator	0-7	Warmlaufverhalten	2-15
Resonator	3-6	Wellenlänge eines Nd:YAG-Lasers	1-7
Resonator eines Nd:YAG-Lasers	1-4	Wirkung des Resonators	3-8
Resonatoren	3-8	Y AG	1-2
Resonatoren: Aufbau	3-10	Yttrium-Aluminium-Granat	1-2
Rod-Laser	1-2	Z irkularpolarisation	3-19
S chneidkopf	3-19		
Schwingungszustände im Resonator	3-11		
Sicherheitskonzept bei HAAS LASER	2-13		
Sicherheitstechnische Aspekte	1-9		
Sicherheitsverschluß	2-13		
Slab-Laser	1-2		

Stichworte

2 kW-Laser von HAAS LASER 2-8

Absorption. 3-4

Absorption des Nd:YAG-Laserlichts 1-7

Alterungsprozesse der Anregungslampen . 2-6

Anregung des Nd:YAG-Lasers 1-3

Anregungslampen 2-6

Aufbau eines Nd:YAG-Lasers. 1-5

Aufbau von Laserlichtkabeln 2-10

Bauteile eines Lasers. 3-6

Besetzungsinversion. 3-5

C_w. 3-17

Dauerstrichbetrieb. 3-17

Divergenz 3-13

Dotierung. 1-2

Dreineiveau-System. 3-5

Eigenschaften der Laserstrahlung 3-12

Emission, spontane 3-4

Emission, stimulierte. 3-4

Energiediagramm Nd:YAG 1-3

Energiezustände. 3-4

Entstehung des Laserstrahls 3-9

Externe Optik. 3-19

Faserbruch. 2-13

Fokussierbarkeit eines Nd:YAG-Lasers. . 1-8

Fokussierung. 3-13

Gefaltete Resonatoren 3-10

H_v. 3-4

Intensitätsverteilung 3-11

Intensitätsverteilung bei HAAS-Lasern . . 2-15

Kavität. 1-5

Kohärenz. 3-12

Komponenten eines Lasers 3-6

Kühlung des Nd:YAG-Stabes 2-5

Laser. 3-3

Laser: Das Prinzip 3-4

Laser: Die wichtigsten Komponenten. . . 3-6

Laseraktive Materialien 3-7

Laserlicht. 3-3

Laserlichtkabel. 2-10

Laserlichtkabel: Merkmale. 2-12

Lasermedien 3-7

Lasermedium. 3-7

Lasermedium. 3-6

Lasermedium eines Nd:YAG-Lasers 1-2

Laserniveau 3-5

Laseroszillation. 3-8

Laserprinzip 3-5

Laserstab. 1-2

Laserstrahl erzeugen 3-3

Laserstrahl: Entstehung 3-9

Laserstrahlung: Eigenschaften 3-12

Lasertypen 3-7

Leistungen der Nd:YAG-Laser 1-8

Leistungsmerkmale der HAAS LASER . . 2-14

Leistungsregelung. 2-7

Lichtaustritt. 2-13

Lichtleiterkabel. 3-19

Longitudinale Moden. 3-11

Moden. 3-11

Modenkopplung 3-18

Monochromasie 3-12

Multimode 3-11

Multirod-System 1-8

Multirod-System 2-8

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER:Aufbau. 2-3

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER:

Komponenten. 2-5

Nd:YAG-Laser von HAAS LASER: Leistungsmerkmale	2-14	Stimulierte Emission	3-4
Nd:YAG-Laser von HAAS LASER: Sicherheitskonzept	2-13	Strahlaufweitung	3-19
Nd:YAG-Laser von HAAS LASER: Wirtschaftlichkeit	2-16	Strahlfokussierung	3-20
Nd:YAG-Laser: Anregung	1-3	Strahlführung	3-20
Nd:YAG-Laser: erreichbare Leistungen	1-8	Strahlführungskomponenten	2-9
Nd:YAG-Laser: Pumpquelle	1-4	Strahlparameter	3-16
Nd:YAG-Laser: Resonator	1-4	Strahlparameterprodukt	3-16
Nd:YAG-Laser: typische Anordnung	1-5	Strahlqualität	3-11, 15
Nd:YAG-Laser: Wellenlänge	1-7	Strahlqualität eines Nd:YAG-Lasers	1-8
Neodym	1-2	Strahltaile	3-16
Ö ffnungswinkel	3-13	T EM _{pl} -Moden	3-11
P hotonen	3-4	Thermische Linse	1-6
Polarisationsrichtung	3-14, 19	Transversale elektromagnetische Moden	3-11
Pulsbetrieb	2-6	Transversale Moden	3-11
Pulsbetrieb	3-18	U mlenkspiegel	3-19
Pumpniveau	3-5	V erstärkung	3-5
Pumpquelle	0-7	Vergleich: Nd:YAG-Laser und CO ₂ -Laser	2-17
Pumpquelle	3-6	Versorgung der Anregungslampen	2-6
Pumpquelle eines Nd:YAG-Lasers	1-4	Vierniveau-System	3-5
Pumpquellen	3-7	W ärmebelastung des Nd:YAG-Stabs	1-6
Q -Switch	3-18	Warmlaufverhalten	2-15
R esonator	0-7	Wellenlänge eines Nd:YAG-Lasers	1-7
Resonator	3-6	Wirkung des Resonators	3-8
Resonator eines Nd:YAG-Lasers	1-4	Y AG	1-2
Resonatoren	3-8	Yttrium-Aluminium-Granat	1-2
Resonatoren: Aufbau	3-10	Z irkularpolarisation	3-19
S chneidkopf	3-19		
Schwingungszustände im Resonator	3-11		
Sicherheitskonzept bei HAAS LASER	2-13		
Sicherheitstechnische Aspekte	1-9		
Sicherheitsverschluß	2-13		
Slab-Laser	1-2		
Spontane Emission	3-4		

TRUMPF GmbH + Co., Maschinenfabrik Stuttgart	
Deutschland Germany Allemagne	✉ Johann-Maus-Straße 2 D-71254 Ditzingen
	☎ (...) 07156/303-0

TRUMPF Maquinas Ltda.	
Brasilien Brazil Brésil	✉ Avenida Juruá, 150 - Alphaville CEP 06455-010 Barueri-Sao Paulo
	☎ (...) 11-421-53 31

TRUMPF S.A.R.L.	
Frankreich France France	✉ Boîte Postale 50239 86, Allée des érables Paris Nord II F-95956 Roissy - Charles de Gaulle Cedex
	☎ (...) 1-48 17 80-40

TRUMPF Ltd.	
Großbritannien Great Britain Grande-Bretagne	✉ President Way Airport Executive Park Luton, Beds. LU2 9NL
	☎ (...) 582-25335

TRUMPF Homberger s.r.l.	
Italien Italy Italie	✉ Via Malta 2/1 I-16121 Genova
	☎ (...) 10-5704040

TRUMPF Corporation	
Japan Japan Japon	✉ 1-18-2 Hakusan Midori-ku Yokohama 226
	☎ (...) 45/931-57 10

TRUMPF (Pte) Ltd.	
Malaysia Malaysia Malaisie	✉ No. 74, 1st floor Jalan SS 15/4D Subang Jaya 47500 Petaling Jaya
	☎ (...) 37343889

TRUMPF Maschinen Austria GmbH & Co. KG	
Österreich Austria Autriche	✉ Industriepark 24 A-4061 Pasching
	☎ (...) 7221-3344-0

TRUMPF maskin ab	
Schweden Sweden Suède	✉ Aleforsvägen 5 Box 606 S-441 17 Alingsås
	☎ (...) 322-39100

TRUMPF Maschinen AG	
Schweiz Switzerland Suisse	✉ Ruessenstraße 8 CH-6341 Baar
	☎ (...) 42-316231

TRUMPF (Pte) Ltd.	
Singapur Singapore Singapour	✉ No. 2-4 Jalan Kilang Barat Singapore 0315
	☎ (...) 271-7027

TRUMPF Maquinaria, S.A.	
Spanien Spain Espagne	✉ Avenida de Valdeparra, 13 E-28100 Alcobendas/Madrid
	☎ (...) 1-6612159

TRUMPF Praha s.r.a.	
Tschech. Republik Czech Republic Tchéquie	✉ Stetkova 18 140 00 Prag 4
	☎ (...) 2 42 33 29

TRUMPF Inc.	
USA United States Etats-Unis	✉ Farmington Industrial Park Hyde road Farmington, CT 06032
	☎ (...) 203-677-9741

☎ (...) = Internationale Vorwahl
 (...) = International Code
 (...) = Code international