

LASER – ein vielseitiges Hilfsmittel in Forschung und Technik

Die Lasertechnik ist eine noch relativ junge Disziplin, die sich aber rapide fortentwickelt. Die Anwendungs- und Einsatzbereiche für LASER reichen von der Physik, der Chemie, der Biologie und der Medizin bis hin zur Technik. Gerade die Anwendung der LASER in den verschiedensten Bereichen der Technik befindet sich z. Z. in einer stürmischen Entwicklung. Der nachfolgende Beitrag vermittelt einen ersten Eindruck über die Geschichte und das Verständnis des LASERs sowie dessen Einsatzmöglichkeiten.

von
Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Fellmann
Fachbereich Naturwissenschaftliche Technik
Fachhochschule Ostfriesland
2970 Emden

1. Kurzer historischer Überblick

Das Wort LASER ist ein Kunstwort und setzt sich aus den unterstrichenen Anfangsbuchstaben des englischen Ausdrucks „light amplification by stimulated emission of radiation“ zusammen. Mit einem LASER wird daher eine „Lichtverstärkung durch stimulierte (erzwungene, induzierte) Emission (Aussendung) von Strahlung“ erreicht. Daher wird der LASER gelegentlich auch als Lichtgenerator oder Quantengenerator bezeichnet. Ähnliche Erscheinungen, wie sie bei dem im optischen Bereich (10^{11} bis 10^{16} Hz) arbeitenden LASER auftreten, gibt es auch im Bereich der Mikrowellen (10^8 bis 10^{10} Hz). Hier spricht man dann vom MASER. Der erste Buchstabe dieser Abkürzung steht für „microwave“ (Mikrowelle).

Die Grundvoraussetzung für das Funktionsprinzip eines LASERs ist die induzierte Emission. Obwohl das Prinzip der induzierten Emission von Einstein bereits im Jahr 1917 formuliert wurde, vergingen noch einmal mehr als 40 Jahre, bis der erste funktionsfähige LASER realisiert wurde. Im Jahre 1960 entwickelte der amerikanische Physiker T. H. Maiman den Rubin-LASER, der zur Gruppe der Festkörper-LASER gehört. Während der folgenden Jahre entstanden in schneller Folge der Helium-Neon-LASER (1961), der Dioden-LASER (1962), der CO₂-LASER (1963) und der Farbstoff-LASER (1966). Im Jahr 1975 wurde schließlich nach einer längeren Entwicklungsphase der Excimer-LASER realisiert. Bei dieser Aufzählung wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Vielmehr wurden nur die wichtigsten Beispiele genannt.

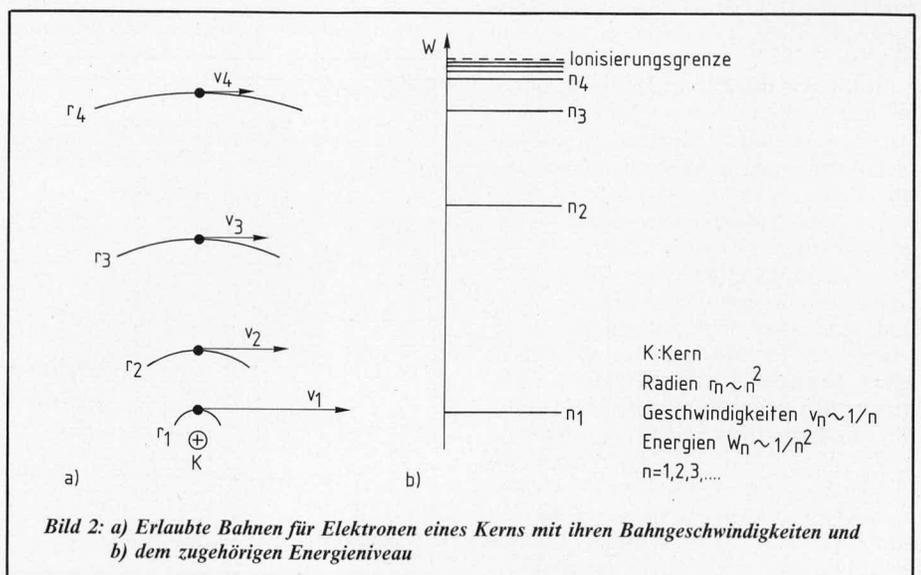
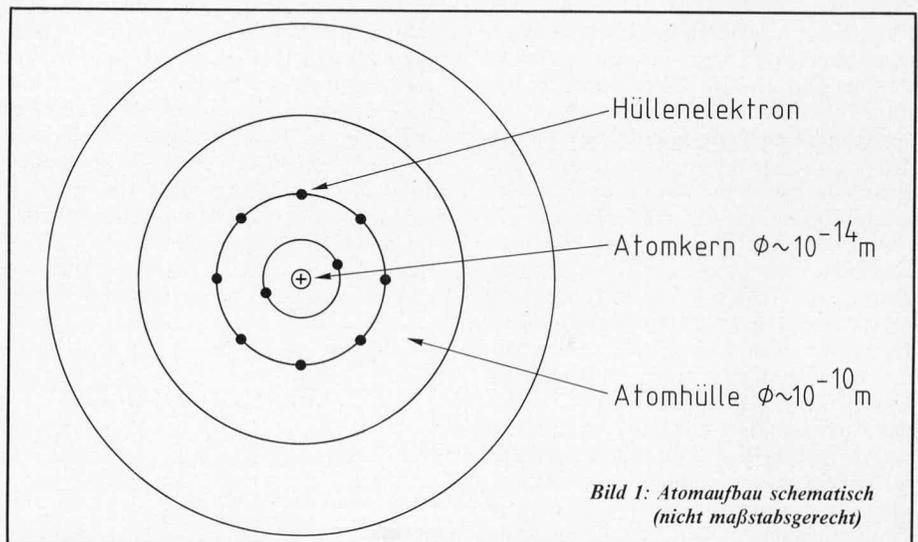
Es gibt heute mehrere tausend atomare Systeme, die die Voraussetzung für LASER-Emission besitzen. Der überdeckte Spektralbereich reicht dabei vom Ultraviolett bis zu den Millimeterwellen. Obwohl eine sehr große Zahl von LASER-Systemen zur Verfügung steht, ist die Zahl von LASER-Typen, die in der Wissenschaft und in der Technik eingesetzt werden, sehr klein. Es sind nur sieben LASER-Typen, die etwa 95 bis 96% des Gesamtmarktes ausmachen, nämlich der Farbstoff-LASER, der Helium-Neon-LASER, der Ionen-LASER, der Neodym-LASER, der Excimer-LASER, der Dioden-LASER und schließlich der CO₂-LASER. Allen LASERn ist gemeinsam, daß zur Entstehung der induzier-

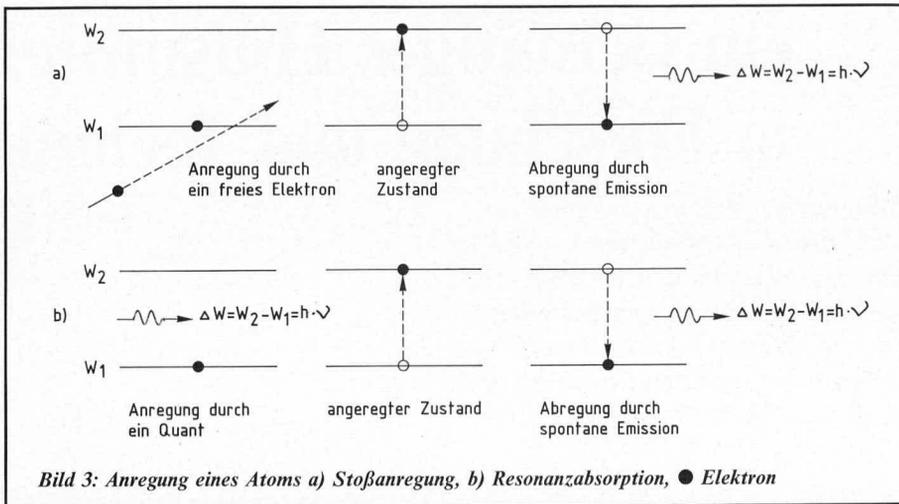
ten Emission besondere Bedingungen erfüllt sein müssen, die in der Natur nicht gegeben sind und die im LASER erst künstlich geschaffen werden müssen. Die für das Verständnis eines LASERs wichtigsten Grundlagen werden im folgenden Abschnitt näher besprochen.

2. Physikalische Grundlagen

Materie ist grundsätzlich atomar aufgebaut. Jedes Atom besitzt einen positiv geladenen Atomkern und eine Elektronenhülle (Abb. 1). Im neutralen Atom stimmt die Zahl der negativen Elektronen der

Elektronenhülle mit der Zahl der positiven Ladungen des Kerns überein. Im Bohr-Sommerfeld'schen-Atommodell kreisen die Elektronen auf verschiedenen Bahnen um den positiv geladenen Kern. Diese Vorstellung ist aus der klassischen makroskopischen Physik (Planetenmodell) in den Mikrokosmos übertragen worden, allerdings mit der Einschränkung, daß sich die Elektronen nur in ganz bestimmten ausgezeichneten Bahnen um den Kern bewegen können (Bohr'sche Postulate). Bei dieser Modellvorstellung wird vorausgesetzt, daß die Elektronen kleine, punktförmige und jederzeit identifizierbare Teilchen sind, deren



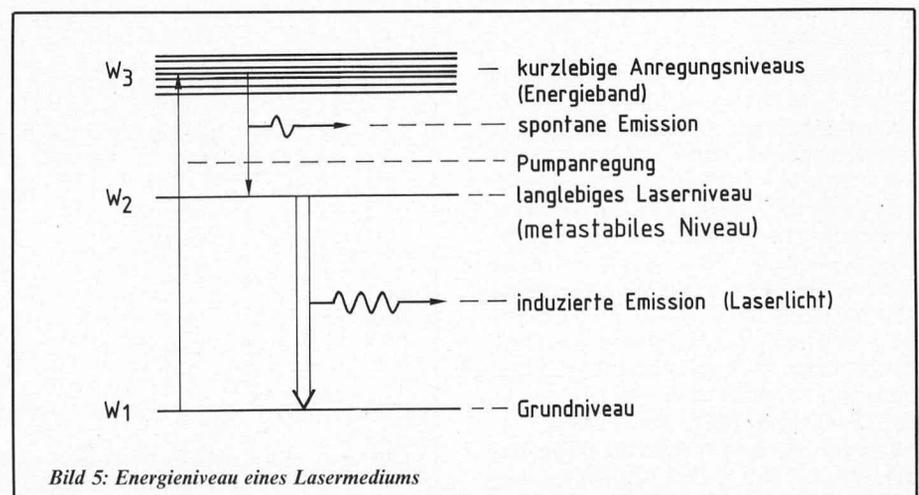
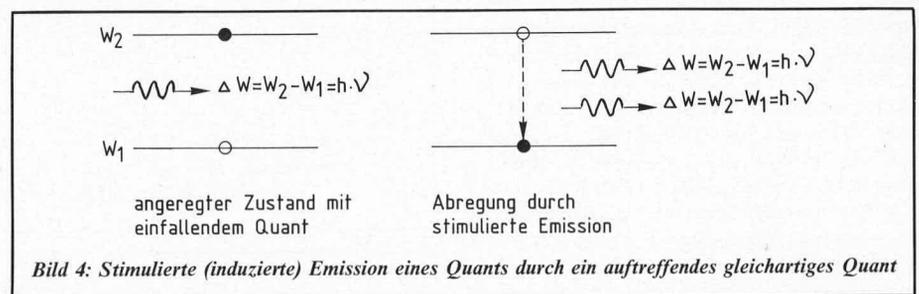


Bahnen als geschlossene Kurven (Kreise und Ellipsen) gegeben sind. Dieses aus dem Planetenmodell der makroskopischen Physik übertragene Bild muß im Mikrokosmos dahingehend ergänzt werden, daß die beschriebenen Bahnen nur Orte größter Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen sind. Mit diesen Einschränkungen kann im weiteren das Bohr-Sommerfeld-Modell durchaus weiter benutzt werden, da es das Verhalten der Atome in vielen Bereichen richtig wiedergibt.

Die genannten Elektronenbahnen sind nicht beobachtbar, wohingegen die zu den Einzelbahnen gehörenden Energiegehalte (Energieniveaus) der Atome meßbare Größen sind. In Abb. 2 sind diese Zusammenhänge dargestellt. Gezeigt sind dort die Ausschnitte einiger erlaubter Bahnen mit den zugehörigen Energiezuständen. Zur Bahn mit dem Bahnradius r_1 und der Geschwindigkeit v_1 gehört das Energieniveau $n = 1$ usw. Die Abstände der erlaubten Energieniveaus nehmen mit $1/n^2$ ab und drängen sich für n gegen ∞ (unendlich) gegen eine Grenze (Ionisierungsgrenze). Führt man einem Atomelektron eine Energie zu, die größer ist als die Differenz der Energien zwischen $n = 1$ und $n = \infty$, so wird das Atom ionisiert und das Elektron verläßt den gebundenen Zustand. Bei geringerer Energiezufuhr kann ein Atomelektron nur die diskreten, erlaubten Energieniveaus einnehmen. Die Gesamtheit aller Elektronen eines Atoms nehmen die tiefstmöglichen Energiezustände ein, wobei auf den verschiedenen Energieniveaus unterschiedliche Zahlen von Elektronen untergebracht werden können (Pauli-Prinzip). Bei der Anregung (Energiezufuhr) atomarer Systeme spielen die Stoßanregung und die Resonanzabsorption eine wichtige Rolle. Der Mechanismus dieser Anregungsprozesse ist in Abb. 3 dargestellt. Bei der Stoßanregung übertragen freie Elektronen ihre Energie auf Atomelektronen und heben diese von tieferen Energieniveaus auf höhere Niveaus. Nach etwa 10^{-8} s gehen die angeregten Atomelektronen wieder in den energetisch tieferen Zustand über und emittieren die Energiedifferenz $\Delta W = W_2 - W_1 = h \cdot \nu$ als Photon (Quant) mit der Frequenz ν . Dabei ist h die Plancksche Konstante, die im atomaren Bereich von großer Bedeutung ist. Werden umgekehrt Photonen mit genau passender Ener-

gie (Frequenz) $\Delta W = W_2 - W_1 = h \cdot \nu$ in ein atomares System eingestrahlt, so werden Elektronen ebenfalls von tieferen in höhere Energieniveaus gehoben (Resonanzabsorption). Das angeregte Atomelektron verläßt auch hier nach ca. 10^{-8} s den höheren Energiezustand und emittiert das vorher absorbierte Quant. In beiden Fällen spricht man bei dieser Form der Energieabgabe von spontaner Emission.

Daneben kann sich in der Atomhülle ein weiterer Vorgang abspielen, der im Hinblick auf die Laserwirkung von besonderem Interesse ist (Abb. 4). Ein angeregtes Atom kann durch ein einfallendes Energiequant geeigneter Frequenz dazu stimuliert werden, aus dem angeregten Zustand mit der Energie W_2 in den Grundzustand mit der Energie W_1 überzugehen, und zwar bevor das angeregte System zur spontanen Emission Zeit hatte. Dabei wird die freierwerdende Energie als zusätzliches Energiequant der gleichen Größe $\Delta W = W_2 - W_1 = h \cdot \nu$ emittiert, so daß zwei Quanten mit der gleichen Energie vorhanden sind.



Dieser Effekt wird als induzierte oder stimulierte Emission bezeichnet. Abb. 4 veranschaulicht diesen Prozeß der Lichtverstärkung. Die induzierte Emission hat dabei nicht nur die gleiche Frequenz wie die anregende elektromagnetische Welle, sondern sie ist mit der anregenden Welle phasengleich (Maxima und Minima der Wellen fallen zusammen). Außerdem stimmen Richtung und Schwingungsebene beider Wellen überein.

Für das Auftreten der induzierten Emission ist Voraussetzung, daß die spontane Emission vermieden oder wenigstens verzögert wird. Im Gegensatz zur induzierten Emission ist die spontane Emission eine zufällige Erscheinung. Nach einer mittleren Verweilzeit von ca. 10^{-8} s im angeregten Zustand kehrt das Elektron zu irgendeinem Zeitpunkt in den Grundzustand zurück, und zwar unabhängig vom Vorhandensein äußerer Strahlung.

Geeignete LASER-Medien mit der Möglichkeit der induzierten Emission müssen daher sog. metastabile Niveaus besitzen. Auf diesen Energieniveaus haben Atomelektronen eine wesentlich größere Verweilzeit als auf den Energieniveaus mit spontaner Emission. Auf metastabilen Energieniveaus verbleiben Atomelektronen etwa um 5 bis 6 Größenordnungen länger als auf Energieniveaus mit spontanem Übergang. In metastabile Energieniveaus können Elektronen allerdings nicht durch Resonanzabsorption gelangen, sondern immer nur auf Umwegen. Durch genügend starkes Anregen (Pumpen) kann ein größerer Prozentsatz von Elektronen gleichzeitig im angeregten metastabilen Zustand gehalten werden. Solche Atomsysteme stellen daher einen atomaren Energiespeicher dar.

Das Prinzip des Pumpens soll mit Hilfe von Abb. 5 diskutiert werden. Durch Pumpenanregung werden Elektronen aus dem Grund-

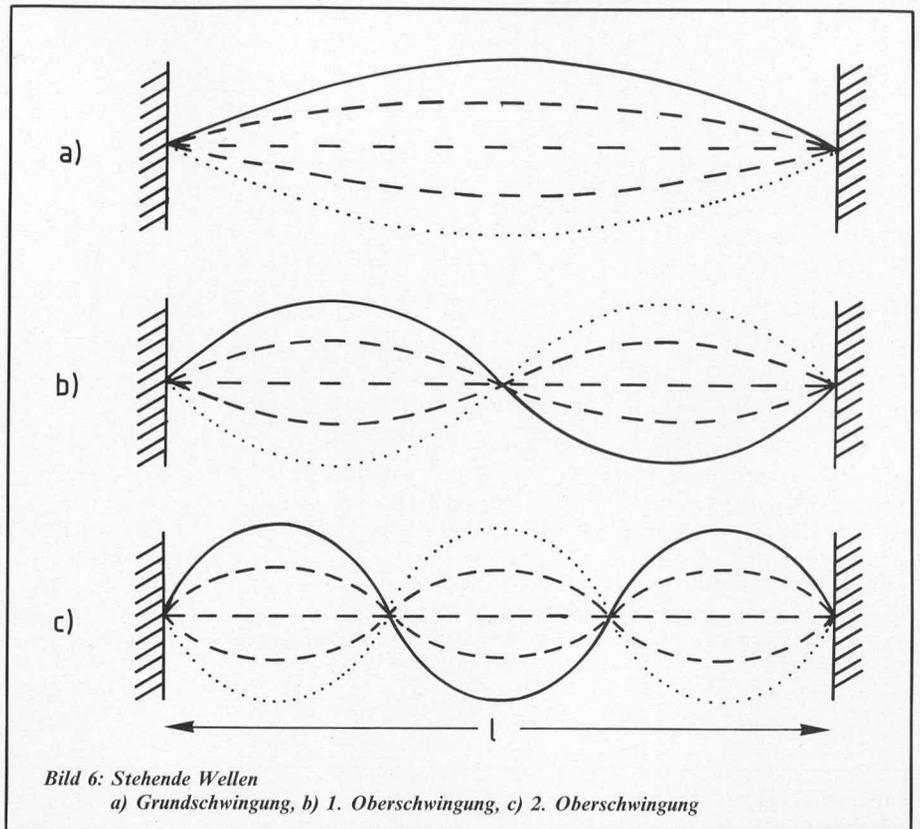
niveau mit der Energie W_1 auf ein kurzlebige Hilfsniveau mit der Energie W_3 durch Einstrahlung einer intensiven elektromagnetischen Welle mit der zu diesem Übergang gehörenden Frequenz (Pumpfrequenz) gebracht. Bei W_3 liegt angenommen nicht ein einzelnes Energieniveau, sondern ein Energieband mit sehr vielen eng beieinanderliegenden Energieniveaus. Dadurch wird die Pumpanregung wesentlich effizienter. Aus dem Energieband mit der Energie W_3 gehen die Elektronen durch spontane Emission auf das tieferliegende langlebige LASER-Niveau über. In diesem Niveau verbleiben die Elektronen ausreichend lange, um durch stimulierte Emission zum Übergang von W_2 nach W_1 abgerufen werden zu können. Durch Einstrahlung von genügend intensivem Pumplicht kommt es daher zur sog. Besetzungsinversion $N_2 > N_1$. Für die Besetzungsdichten N_1 und N_2 mit Elektronen, die zu den Energieniveaus W_1 und W_2 gehören, gilt nach der Boltzmann-Beziehung:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{\frac{W_2 - W_1}{k \cdot T}} . \text{ Dabei sind } k \text{ die Boltzmann-Konstante und } T \text{ die absolute Temperatur.}$$

Anhand dieser Gleichung wird deutlich, daß die Hauptbedingung für das Funktionieren eines LASERs die Besetzungsinversion ist. Im Normalfall (thermodynamisches Gleichgewicht) befinden sich die Elektronen der Atome überwiegend im nicht angeregten, energetisch tiefsten Zustand. Dann sind die unteren Energiestufen der Atome insgesamt stärker besetzt als die oberen. In diesem Normalfall ist N_1 größer als N_2 . Daher würde in diesem Fall das eingestrahle Licht durch Absorption geschwächt und nicht – wie beim LASER gewünscht – durch induzierte Emission verstärkt. Wenn dagegen durch den beschriebenen Pumpvorgang Energie in den Atomen ausreichend lange gespeichert wird, so daß sich mehr Atome in einem angeregten Zustand befinden als im Grundzustand – d. h. N_2 größer N_1 (Besetzungsinversion der Energieniveaus) –, dann wird durch ein Strahlungsquant geeigneter Frequenz eine Lawine induzierter Quanten aus den angeregten Atomen abgerufen, wobei die zuvor gespeicherte Energie der insgesamt emittierten Strahlung zugute kommt und damit diese erheblich verstärkt.

Laserstrahlung besitzt eine Reihe von besonderen Eigenschaften, wodurch sich LASER von herkömmlichen Lichtquellen unterscheiden. Besonders hervorzuheben sind bei Laserstrahlung ihre Kohärenz, ihre strenge Parallelität mit einer Divergenz von nur wenigen Bogenminuten und die mit anderen Hilfsmitteln nicht erreichbare Monochromasie. Wie bereits erwähnt, ist die Kohärenz darauf zurückzuführen, daß die induzierte mit der auslösenden Lichtwelle in Phase ist, so daß also alle Atome ihre Lichtquanten im Takt emittieren und nicht wie bei der spontanen Emission statisch mit von Atom zu Atom schwankenden Phasenbeziehungen.

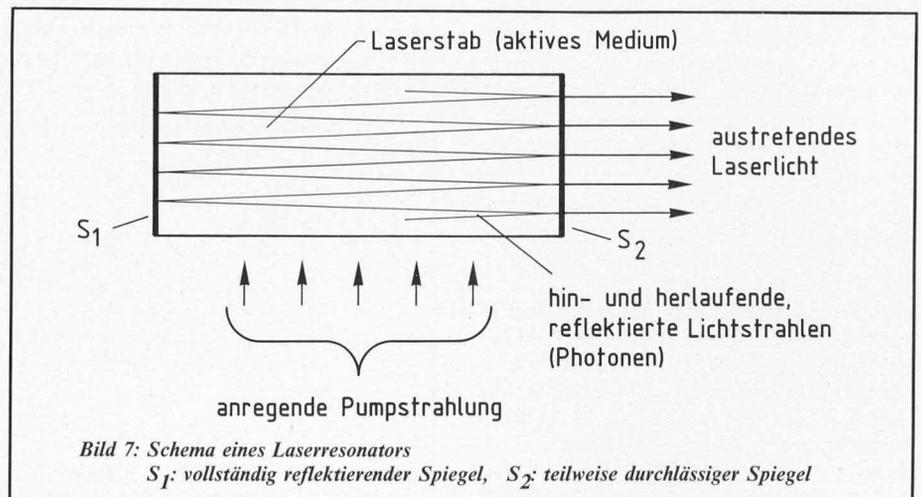
Um bei Verstärkung durch stimulierte Emission ein entsprechend intensives Strahlungsfeld definierter Phase und Frequenz mit großer Kohärenzlänge zu erhalten,

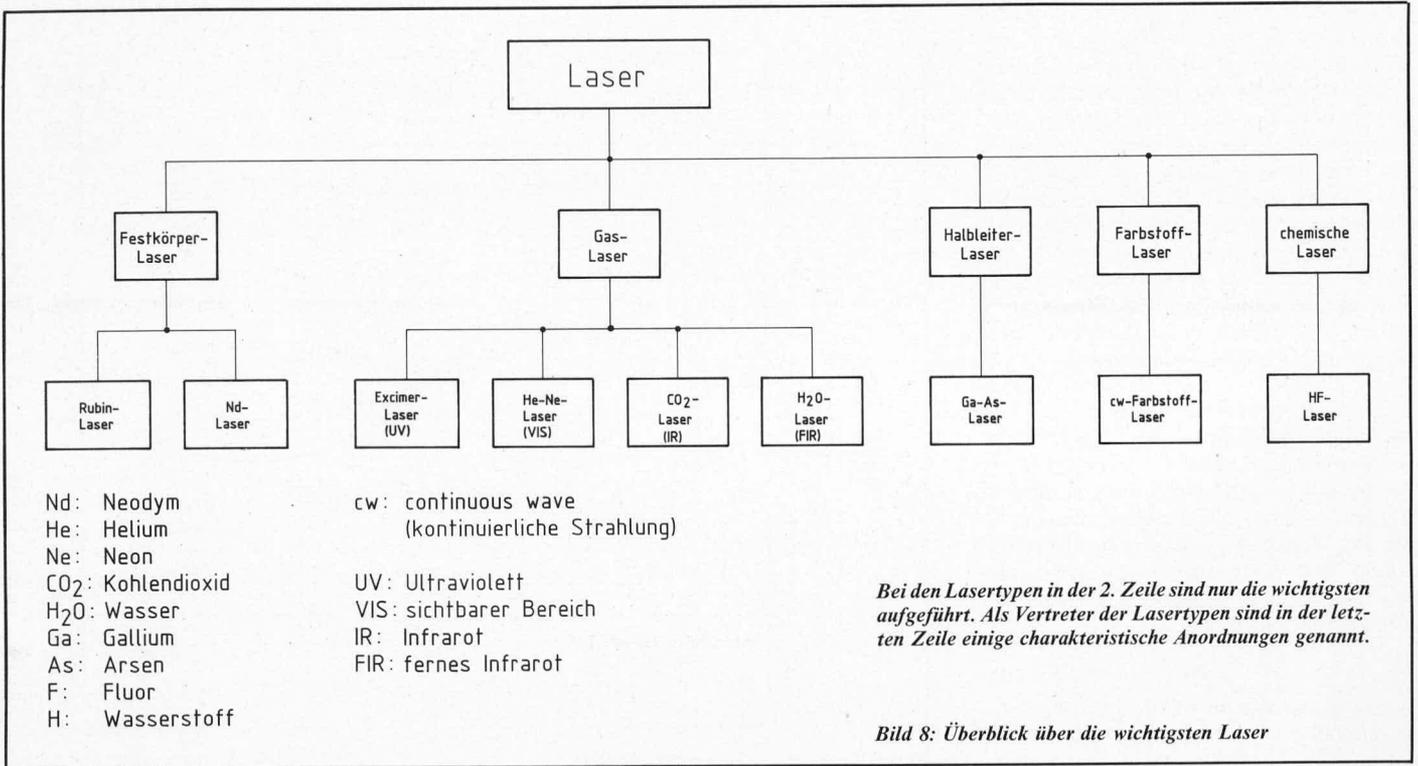


muß stets die gleiche Welle mit dem invertierten LASER-System in Wechselwirkung treten und damit dieses zur stimulierten Emission anregen. Dies wird durch Rückkopplung der verstärkten Welle in einem Resonator erreicht, in dem nur bestimmte Eigenschwingungen möglich sind. Die Ausbildung von Eigenschwingungen kann man sich an einer gespannten Saite, die an ihren Enden fest fixiert ist, veranschaulichen. Wie aus Abb. 6 zu ersehen ist, können sich auf dieser Saite nur ganz bestimmte Schwingungsformen ausbilden, die zu einer stehenden Welle mit Schwingungsbäuchen und Schwingungsknoten führen und durch Reflexion der Welle an den festen Enden zustande kommen. Dadurch entsteht eine ortsfeste Schwingung, die man stehende Welle nennt. Einige der zulässigen Schwingungsformen auf einer Saite der Länge l sind in Abb. 6 wiedergegeben, und zwar die Grundschwingung sowie die beiden ersten Oberschwingungen. Diese möglichen, diskreten Wellen nennt man Eigenschwingungen der Saite.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei einem optischen Resonator gemäß Abb. 7. Bei letzterem ist die Zahl der Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten gegenüber der Saite wesentlich größer, entsprechend der gegenüber der Saitenlänge wesentlich kleineren Wellenlänge des LASERs von der Größenordnung 500 nm. Daher ist bei einem LASER neben der Bedingung der Erzeugung einer Besetzungsinversion noch die Zusatzbedingung der Rückkopplung in einem Resonator erforderlich.

Damit kann zur Strahlungserzeugung in einem LASER wie folgt argumentiert werden. Ein spontan emittiertes Photon mit der Frequenz ν der Laserstrahlung und genau bestimmter Richtung, entsprechend einer Eigenschwingung des optischen Resonators, durchläuft das invertierte LASER-Medium. Mit gewisser Wahrscheinlichkeit wird dadurch eine induzierte Emission ausgelöst. Diese Wahrscheinlichkeit ist um so größer, je häufiger das Photon das System der angeregten metastabilen Atome





durchläuft. Dies gilt auch für ein nach gewisser Zeit induziert emittiertes Photon der gleichen Art. Beide Photonen werden rückgekoppelt, durchlaufen das angeregte Atomsystem und stimulieren die Emission weiterer Photonen. Der geschilderte Vorgang wiederholt sich und baut sich lawinenartig auf, da mit zunehmender Zahl der rückgekoppelten Photonen die Wahrscheinlichkeit für die induzierte Emission weiterer Photonen wächst. Die Energie des Strahlungsfeldes kann dann an einem der Resonatorspiegel ausgekoppelt werden (Abb. 7).

Die Besetzungsinversion wird erleichtert, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind. Das LASER-Niveau mit W_2 muß eine möglichst große mittlere Lebensdauer besitzen (metastabiles Niveau); die Übergangswahrscheinlichkeit von W_1 nach W_3 bei der Anregung muß ebenfalls möglichst groß sein; schließlich müssen die Übergänge von W_3 nach W_2 möglichst schnell erfolgen.

Für die Erzeugung einer Besetzungsinversion, auch Pumpen genannt, werden verschiedene Verfahren eingesetzt. Diese verschiedenen Pumpverfahren lassen gleichzeitig eine Charakterisierung der verschiedenen LASER-Typen zu. Im einzelnen wird die Besetzungsinversion durch optisches Pumpen, Stoßanregung, Stromdurchgang in pn-Übergängen und chemisches Pumpen erreicht.

Beim optischen Pumpen werden die oberen Energieniveaus W_3 durch Absorption optischer Strahlung angeregt, die dem optischen Übergang von W_1 nach W_3 entspricht. Wichtig für eine geeignete Pumplichtquelle ist, daß das Emissionsmaximum der Pumplichtquelle bei höheren Frequenzen als die Frequenz liegt, die zu dem zu invertierenden Übergang W_2 nach W_1 gehört. Insbesondere sollte das Emissionsmaximum der Pumplichtquelle im Bereich des Absorptionsübergangs W_1 nach W_3 liegen.

Dieses Verfahren zur Erzeugung einer Besetzungsinversion wird speziell für Festkörper- und Farbstoff-LASER eingesetzt.

Bei der Stoßanregung wird das obere Niveau W_3 in einer elektrischen Entladung angeregt, und zwar durch Elektronenstöße erster Art oder durch Energieübertragung mit Stößen zweiter Art. Die elektrische Entladung wird vorwiegend als selbständige Entladung erzeugt, bei der die Ladungsträger (Elektronen und Ionen) in der Entladung selbst erzeugt werden. Dies ist die überwiegende Entladungsform in Gas-LASERN. Die Energieübertragung durch Stöße zweiter Art ist beim Helium-Neon-LASER besonders wichtig.

Der Stromdurchgang in einem pn-Übergang zur Erzeugung einer Besetzungsinversion ist die typische Anregungsform für Halbleiter-LASER. Da bei der Anregung Ladungsträger injiziert werden, wird dieser Lasertyp auch als Injektions-LASER bezeichnet. Die Laserabstrahlung erfolgt als Rekombinationsstrahlung (Rekombination von Elektronen und Löchern).

Das chemische Pumpen stellt eine besondere Form der Anregung für spezielle Gas-LASER dar. Die bei chemischen Reaktionen freigesetzte Energie wird zur Besetzungsumkehr genutzt. Speziell die Fotodissoziation von Molekülen mit Hilfe von Photonen, wobei einer der Partner angeregt wird, spielt eine relativ wichtige Rolle. Insgesamt stellt dieses Verfahren zur Erzeugung einer Besetzungsinversion aber mehr ein Verfahren für spezielle Anwendungen dar und kann nicht die Bedeutung der bereits genannten Anregungsverfahren erreichen.

3. Laser-Typen

Die Abb. 8 vermittelt einen Überblick über die wichtigsten LASER-Typen, wobei bewußt auf Vollständigkeit verzichtet wurde. Die verschiedenen LASER-Typen sind in der zweiten Zeile aufgeführt. In der dritten Zeile sind zu den jeweiligen LASER-Typen einige Repräsentanten genannt, und zwar entsprechend ihrer Bedeutung für den Anwendungsbereich.

3. Laser-Typen

Die wesentlichen Komponenten und deren Zusammenspiel bei einem LASER sollen am Beispiel des Rubin-LASERS, dessen prinzipieller Aufbau in Abb. 9 gezeigt ist, näher erläutert werden. Wie erwähnt konnte dieser Festkörper-LASER-Typ als erster funktionsfähiger LASER überhaupt realisiert werden. Trotz dieses Alters spielt er noch immer eine der wichtigsten Rollen bei

zungsumkehr genutzt. Speziell die Fotodissoziation von Molekülen mit Hilfe von Photonen, wobei einer der Partner angeregt wird, spielt eine relativ wichtige Rolle. Insgesamt stellt dieses Verfahren zur Erzeugung einer Besetzungsinversion aber mehr ein Verfahren für spezielle Anwendungen dar und kann nicht die Bedeutung der bereits genannten Anregungsverfahren erreichen.

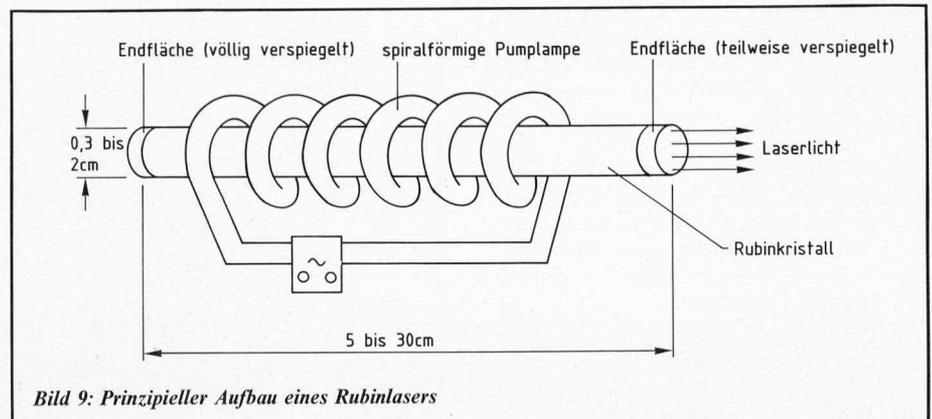


Bild 9: Prinzipieller Aufbau eines Rubinlasers

den Festkörper-LASERn. Zum einen besteht bei diesem LASER die Möglichkeit zur Erzeugung großer Impulsleistungen und zum anderen lassen sich die Rubinkristalle in optisch sehr guter Qualität relativ leicht herstellen.

Ein Rubinkristall besteht aus Aluminium-Oxid (Al_2O_3) als Grundgitter, in dem anstelle von Aluminium-Ionen in bestimmter Dosierung Cr^{3+} -Ionen (Chromionen) eingebaut sind. Die Cr^{3+} -Konzentration besitzt dabei den Wert von etwa 0,05 %. Die eingebauten Chromionen werden durch Pumpenergie aus dem Grundniveau W_1 zunächst in das Hilfsniveau W_3 höherer Energie gebracht (vgl. Abb. 5). Dieses Energieniveau entleert sich mit einer mittleren Lebensdauer von etwa 10^{-8} s durch spontane Übergänge vom Hilfsniveau W_3 in das deutlich langlebigere metastabile Niveau W_2 des Laserübergangs. Dieses Niveau besitzt die relativ lange mittlere Lebensdauer von etwa 3×10^{-5} s, so daß sich eine Besetzungszunahme zu Lasten des Grundniveaus W_1 für das Niveau W_2 ergibt. Wenn ausreichend Pumplicht einstrahlt wird, kommt es zur Besetzungsinversion $N_2 > N_1$, so daß eine Lichtverstärkung für die Wellenlänge des ausgestrahlten roten Laserlichts des Rubins mit der Wellenlänge $\lambda = 694,3$ nm resultiert. Zur Erzeugung einer ausreichenden Besetzungsinversion ist mindestens die Hälfte der Cr^{3+} -Ionen anzuregen. Dazu sind entsprechend hohe Pumpleistungen erforderlich. Die eingesetzten Pumplichtquellen – in Abb. 9 eine spiralförmige Pumplampe – sollten ein Emissionsspektrum besitzen, das mit dem Absorptionsspektrum der Cr^{3+} -Ionen übereinstimmt.

Die wesentliche Lichtverstärkung wird dadurch erreicht, daß der Rubinkristall als optischer Resonator ausgebildet wird. Die Länge des Rubinkristalls bewegt sich etwa zwischen 5 und 30 cm mit Durchmessern von 0,3 bis 2 cm. Dieses zylinderförmige Gebilde ist an den Stirnflächen extrem genau planparallel geschliffen und mit hochreflektierenden Schichten versehen. Eine der Stirnflächen ist so verspiegelt, daß sie vollständig reflektiert, während die andere teildurchlässig ist. Damit erreicht man, daß die den Prozeß der induzierten Emission auslösenden Photonen zwischen den verspiegelten Stirnflächen reflektiert werden und als stehende ebene Welle in Richtung der Zylinderachse hin- und herlaufen (vgl. Abb. 7). Dadurch werden die Atome in den angeregten Laserzuständen zur induzierten Emission angeregt. Die induziert emittierte phasengleiche Strahlung wird ebenfalls zwischen den Stirnflächen reflektiert und führt zu einer weiteren Verstärkung der induzierten Emission. Sobald ein Schwellenwert überschritten wird, verläßt die Laserstrahlung den Kristall an der Stirnfläche mit der teildurchlässigen Schicht in Form eines Lichtimpulses mit entsprechender Leistung. Da der Wirkungsgrad eines Rubin-LASERs nur etwa 1 % beträgt, ergibt sich bei einer investierten Pumpenergie von 10^3 Js für den Lichtimpuls zwar nur eine Energie von etwa 10 Js, doch entspricht dies bei typischen Impulsdauern von ca. 1 ms etwa einer Leistung von 10 kW. Bei Rubin-LASERn steht also ge-

pulstes Laserlicht mit der Wellenlänge $\lambda = 0,694 \mu\text{m}$ mit einer Impulsfrequenz von etwa 1 pro s zur Verfügung.

Zur Erzeugung von Hochleistungsimpulsen ist der Neodym-Glas-LASER wesentlich besser geeignet. Bei diesem sind Nd^{3+} -Ionen mit einer Konzentration von 0,5 bis 8 % in Glas eingebaut. Mit diesem Lasertyp können Lichtimpulse mit einer Energie von etwa 5 kWs produziert werden. Eine andere Variante des Neodym-LASERs ist der Neodym-YAG-LASER, bei dem das relevante Nd^{3+} -Ion in Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) eingebaut ist. Der Neodym-YAG-LASER eignet sich sowohl für den kontinuierlichen Betrieb als auch für den Impulsbetrieb mit hohen Wiederholungsraten der Impulse (typisch bis zu 10 kHz). Neodym-YAG-LASER können eine Leistung bis zu 500 W im kontinuierlichen Betrieb auf der 1,06 μm -Linie erbringen, wobei ein Wirkungsgrad bis zu 3 % erreicht wird. Im Impulsbetrieb beträgt die maximale Laserleistung etwa 10^6 W.

Der Excimer-LASER ist ein Gaslaser und eröffnet im weiteren Sinn der Materialbearbeitung neue Möglichkeiten. Einige typische Anwendungen sind z. B. das Abisolieren extrem feiner Drähte von 50 μm Durchmesser, wie sie in der Mikroelektronik eingesetzt werden. Mit dieser Technik lassen sich aber auch Schnitte durch sehr fragile biologische Strukturen durchführen. In größerem Maßstab werden Excimer-LASER industriell bei der Herstellung von Halbleiterchips eingesetzt, wobei Mikrostrukturen mit fotolithografischen Verfahren auf Halbleiteroberflächen übertragen werden. Aus der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten dieses LASERs sind nur einige Beispiele genannt. Die maximale Impulsenergie liegt bei 0,5 bis 1 Js, wobei Pulsdauern von etwa 15 ns erreichbar sind.

Der Helium-Neon-LASER ist insbesondere meßtechnisch interessant und findet beim optischen Lesen von Daten Verwendung. Er ist ein kontinuierlich betriebener LASER im sichtbaren und infraroten Spektralgebiet mit Ausgangsleistungen im mW-Bereich. Der Hauptvorteil dieses LASERs ist durch seinen kleinen, einfachen und robusten Aufbau bei niedrigem Preis gegeben.

Einer der wichtigsten Hochleistungslaser ist der Kohlendioxid-LASER (CO_2 -LASER). Die emittierten Laserlinien liegen bei 9,6 μm und bei 10,6 μm . Im kontinuierlichen Betrieb werden mit CO_2 -LASERn Leistungen bis zu 100 kW erzielt. Dies sind die höchsten kontinuierlichen Laserleistungen überhaupt. Der CO_2 -LASER gehört auch im gepulsten Betrieb zu den leistungsfähigsten LASERn. So lassen sich Impulse mit Energien von mehr als 10 kWs und Impulsleistungen von einigen Terrawatt (1 Terrawatt = 10^{12} W) erreichen. Dieser LASER ist vergleichbar mit dem Nd^{3+} -Glas-LASER, wobei der CO_2 -LASER allerdings als entwicklungsfähiger eingeschätzt wird. Insbesondere das Interesse an militärischen Anwendungen – Laserwaffen und SDI (strategic defense initiative) – und der Einsatz bei der laserinduzierten Kernfusion (vgl. 4.) treiben die Entwicklung dieses Lasertyps stark voran.

Der H_2O -LASER ist für kontinuierlichen und Impulsbetrieb geeignet. Er besitzt eine Vielzahl von Laserlinien, wobei die intensivsten Übergänge bei $\lambda = 2,797 \mu\text{m}$ und bei $\lambda = 118,59 \mu\text{m}$ liegen. Die Leistungen bei diesen Linien liegen um 115 mW bzw. um 5 mW. Dieser Lasertyp ist vorwiegend von wissenschaftlichem Interesse.

Der erste LASER auf Halbleiterbasis wurde bereits 1962 – 2 Jahre nach dem Rubin-LASER – realisiert. Ein wichtiger Anwendungsbereich der Halbleiter-LASER liegt in der optischen Informationsübertragung und wegen seiner kleinen Abmessungen in integrierten optischen Systemen. Es gibt eine Reihe von geeigneten Halbleitermaterialien, die für diesen Lasertyp geeignet sind. Dabei fällt auf, daß die wichtigsten Halbleiter Silizium und Germanium nicht geeignet sind. Der in Abb. 8 aufgeführte Ga-As-LASER ist der z. Z. am meisten eingesetzte Halbleiter-LASER. Typische Leistungsdaten sind im kontinuierlichen Betrieb kleiner 10 mW und im Impulsbetrieb kleiner 100 W.

Gegenüber den bisher besprochenen Lasertypen unterscheidet sich der Farbstoff-LASER dadurch, daß er in einem breiten Spektralbereich von 0,32 bis 1,8 μm kontinuierlich durchstimmbar betrieben werden kann. Dagegen konnten die bisher beschriebenen Lasertypen nur Laserlicht einer einzigen oder weniger ganz bestimmter Frequenzen emittieren. Gerade auf dieser Durchstimbarkeit beruht die große Bedeutung der Farbstoff-LASER etwa in der Spektroskopie, der Analysenmeßtechnik, der Biologie und anderen Bereichen. Er ist das Paradebeispiel für einen wissenschaftlichen LASER, da er zwar die kürzesten Impulse (10^{-14} s) bei einer kontinuierlichen Abstimmbarkeit liefert, aber andererseits nur kleine Ausgangsleistungen zur Verfügung stellt. Daher wird er industriell kaum eingesetzt.

Der Hauptrepräsentant der chemischen LASER ist der HF-LASER. Lasertätigkeit tritt im Bereich zwischen 2,7 und 3,2 μm auf. Es werden zwar kontinuierliche Ausgangsleistungen von einigen kW erreicht, doch lassen sich diese LASER wegen der Gefährlichkeit bzw. Aggressivität der beteiligten Substanzen H_2 und F_2 nur sehr schwer handhaben.

Zum Abschluß dieses Abschnitts sollte nicht unerwähnt bleiben, daß die Natur MASER und LASER bereits vor dem Menschen realisiert hat. So wurde 1965 von Radioastronomen im Orionnebel ein extrem starkes Signal bei 1,665 MHz entdeckt. Hier handelt es sich um die erste Beobachtung eines kosmischen MASERs. In der Folgezeit sind mehrere hundert solcher kosmischer MASER bekannt geworden.

Auch die zum CO_2 -LASER gehörende Strahlung bei 9,4 und 10,4 μm konnte 1980 als stimulierter Emissionsprozeß in den Atmosphärenschichten der Planeten Mars und Venus identifiziert werden. Für die Effizienz dieser den Planeten Mars und Venus zuzuordnenden CO_2 -LASER fehlt allerdings die Rückkopplung. Hier wird bereits spekuliert, einen großen LASER-Resonator auf eine Umlaufbahn um diese Planeten

zu bringen, um so einen LASER mit gigantischer Leistung zu erzeugen, der sich für die optische Kommunikation mit fernen Welten eignet.

4. Anwendungen

Für die Anwendungen des LASERs bieten sich vor allem drei Eigenschaften dieses Instruments an, und zwar seine große Leistung, seine Monochromasie und seine Durchstimmbarkeit. Diese Eigenschaften werden im Anwendungsbereich sowohl einzeln als auch kombiniert ausgenutzt. Schon die Vielzahl von Lasertypen sowie deren unterschiedliche Leistungsdaten lassen ein breites Anwendungsspektrum erwarten. Daher können hier nur die wichtigsten Einsatzmöglichkeiten genannt werden, wovon wiederum exemplarisch zwei Beispiele etwas ausführlicher dargestellt werden sollen, und zwar je ein Beispiel aus der Laserchirurgie und aus dem Bereich der Energieversorgung.

Gebündelte Laserstrahlen werden z. B. zum Verdampfen hochschmelzender Metalle eingesetzt. So können auch in härteste Werkstoffe feinste Löcher gebohrt werden. Da bei der Laserstrahlung ein breites Frequenzband zur Verfügung steht, werden zur Zeit Verfahren zur Modulation von Laserstrahlen für die Nachrichtenübermittlung entwickelt. Wegen der hohen Kohärenz ihrer Strahlung sind Laser auch hervorragende Strahlungsquellen für die Holographie (Erzeugung räumlicher Bilder). Schließlich werden LASER eingesetzt zum Schneiden, Schmelzen, Schweißen (Metalle, Keramik, Kunststoffe, Diamanten), zum Löten, zur Landvermessung, zur Längenmessung, für Leitstrahlsteuerungssysteme (Tunnelbauten), zur Reaktionssteuerung in der Chemie (Fotochemie), zur Isotopentrennung, in der Chirurgie und zur Kernverschmelzung (LASER-Fusion). Wie eingangs erwähnt, sollen aus diesem großen Anwendungsspektrum zwei Beispiele etwas ausführlicher beschrieben werden.

In der Chirurgie wird üblicherweise ein Skalpell eingesetzt. Dabei sind auftretende Blutungen in der Regel unvermeidlich. Durch Abklemmen der Gefäße oder andere Möglichkeiten sind diese Blutungen jedoch beherrschbar. Dies kann jedoch nicht ohne weiteres auf alle Körperteile bzw. Organe übertragen werden. Ein typisches Beispiel dafür ist das Lebergewebe. Die Leber ist extrem stark von Blutgefäßen durchsetzt, so daß nach einem Schnitt eine Blutstillung kaum möglich ist. Wenn ein operativer Eingriff (Geschwulst oder Leberriß) an der Leber erforderlich wird, muß der Chirurg oft einen ganzen Bereich der Leber entfernen. Beim Einsatz eines LASERs können jedoch in diesem Organ Schnitte ohne auftretende Blutung (blutrockene Schnitte) durchgeführt werden. Dazu wird die Laserstrahlung mit ausreichender Leistung auf das Gewebe fokussiert. Im Fokussierungsbereich wird die Leber von der absorbierten Strahlung so stark aufgeheizt, daß es zu einem lokalen Kochprozeß kommt. Dadurch wird das Lebergewebe aufgesprengt und letztendlich geschnitten. Daneben führt das Aufheizen dazu, daß das Eiweiß des Gewebes zum Gerinnen

(Koagulieren) gebracht wird. Dieses koagulierte Gewebe verschließt die Blutgefäße der Leber, so daß der erwähnte blutrockene Schnitt resultiert.

Die skizzierte Anwendungsmöglichkeit des LASERs im medizinischen Bereich steht nur beispielhaft für eine Fülle weiterer Anwendungen in der Medizin.

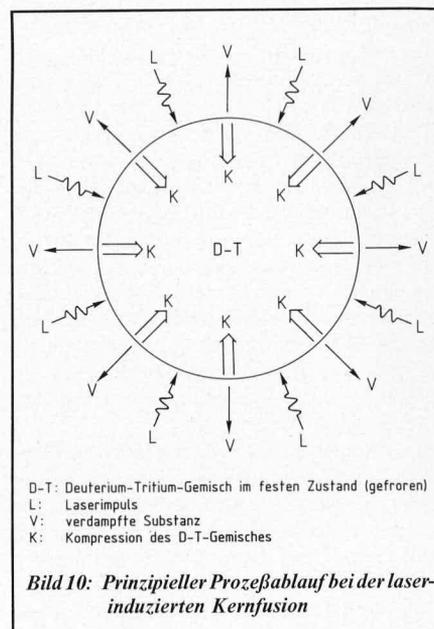
Aus aktuellem Anlaß – Tschernobyl-Unfall – soll abschließend noch eine Einsatzmöglichkeit des LASERs im Bereich der Kerntechnik skizziert werden. Für die Kernenergiegewinnung gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Zum einen können bestimmte schwere Kerne (z. B. Uran-235) unter Energiegewinn gespalten werden. Nach diesem Prinzip arbeiten die derzeitigen Kernreaktoren in verschiedenen Varianten. Man spricht dann von Kernspaltung oder Fission. Zum anderen können leichte Kerne – z. B. Wasserstoffkerne – ebenfalls unter Energiegewinn zu schweren Kernen (z. B. Helium) verschmolzen werden. Man spricht dann von Kernverschmelzung oder Fusion. Die entsprechenden Reaktoren heißen Fusionsreaktoren. Mit großer Sicherheit stellt der Fusionsreaktor die Energiequelle der Zukunft dar, da einmal Wasserstoff auf der Erde in hinreichender Menge vorhanden ist und andererseits die Menge des radioaktiven Abfalls vermutlich geringer ist.

Bekannt ist die Kernfusion bereits heute. Einmal erfolgt die Kernfusion unter außerirdischen Bedingungen im Innern vieler Sterne wie z. B. in der Sonne. Zum anderen erfolgt die Kernfusion unter irdischen Bedingungen bei der Explosion von Wasserstoffbomben, wobei allerdings kein kontrollierbarer Verlauf des Prozesses gegeben ist. Bei Fusionsreaktoren versucht man daher, die langsamere Kernfusion auf der Sonne gesteuert, also beliebig regelbar nachzuahmen. Dazu müssen auch unter irdischen Verhältnissen die extremen Bedingungen, die im Sterninneren herrschen, geschaffen werden, nämlich Temperaturen von etwa 10^8 K, ein Druck von etwa 10^{13} Pa und Dichten von etwa 10^3 g/cm³. Diese Forderungen werden durch das Lawson-Kriterium konkretisiert, das für eine positive Energiebilanz bei der Fusion entscheidend ist. Danach müssen die Teilchendichten und die Einschlußzeit τ bei der erforderlichen Temperatur von 10^8 K die Bedingung erfüllen: $n \cdot \tau \geq 10^{14}$ cm⁻³ · s. Unter diesen Bedingungen befindet sich die Materie im Plasmazustand, d. h. daß sie aus hochaufgeheizten, elektrisch geladenen Gaswolken mit freien Atomkernen und freien Elektronen besteht. Unter diesen Bedingungen können die Wasserstoffkerne die Coulombabstoßungskräfte überwinden und sich wegen ihrer hohen Geschwindigkeit soweit nähern, daß die Kernkräfte wirksam werden und die Wasserstoffkerne miteinander verschmelzen.

Zur Realisierung der gesteuerten Kernfusion werden im wesentlichen zwei Wege beschritten: Einmal werden langlebige Plasmen (etwa 1 s) bei relativ geringer Dichte (mit Konzentrationen von 10^{14} cm⁻³) in großen Volumina von etwa 10^2 m³ erzeugt. Diese Plasmen werden durch extrem starke Magnetfelder (10 T) zusammengehalten

(Tokamak-Anlagen). Die andere Möglichkeit besteht in der Erzeugung kurzlebiger, extrem dichter Plasmen in kleinen Volumina, die trägheitsbedingt zusammengehalten werden. Die Aufheizung erfolgt durch Impulse von LASERn. Daher spricht man hier von laserinduzierter Kernfusion.

Bei der laserinduzierten Kernfusion werden kleine Kugeln (Durchmesser ungefähr 100 µm), die im Innern ein festes (gefrorenes) Gemisch aus Deuterium und Tritium enthalten, konzentrisch aus verschiedenen Richtungen mit Hochleistungs-LASERn bestrahlt (vgl. Abb. 10). Dabei wird Helium als Abbrand erzeugt. Deuterium und Tritium sind Wasserstoff-Isotope. Ersteres kann aus dem Meerwasser gewonnen werden und liegt damit nahezu in unbegrenzter Menge vor. Das Wasserstoff-Isotop Tritium wird durch Beschuß von Lithium mit Neutronen gewonnen, die bei der Umwandlung von Deuterium und Tritium zum Helium auftreten.



Bei der Bestrahlung des Deuterium-Tritium-Kügelchens mit LASERn wird dieses so stark aufgeheizt, daß es in den Plasmazustand übergeht. Dabei werden die äußersten Schichten des Kügelchens abgedampft. Aus Gründen der Impulserhaltung erhält dann das verbleibende Material einen nach innen gerichteten Impuls, so daß es zu einer Kompression der inneren Zonen des Tröpfchens kommt. Durch die Kompression können so große Dichten erreicht werden, daß das Lawson-Kriterium erfüllt wird und somit Fusion eintritt.

Für die laserinduzierte Kernfusion werden NeodymlASER und CO₂-LASER eingesetzt, wobei jeweils 20 bis 30 Einheiten erforderlich sind. Im Bau- bzw. im Versuchsstadium befindliche Anlagen zur laserinduzierten Kernfusion erbringen dabei Leistungen zwischen 100 und 300 TW mit Pulsenergien von etwa 10^5 Js. Dabei werden Plasmadichten zwischen 100 und 300 g/cm³ erreicht. Man nimmt an, daß für eine wirtschaftliche Energiegewinnung Pulse von etwa 2000 TW benötigt werden. Prognostiziert wird, daß ein erstes Fusionskraftwerk in den Jahren 2010 bis 2020 im Versuchsstadium laufen könnte.