

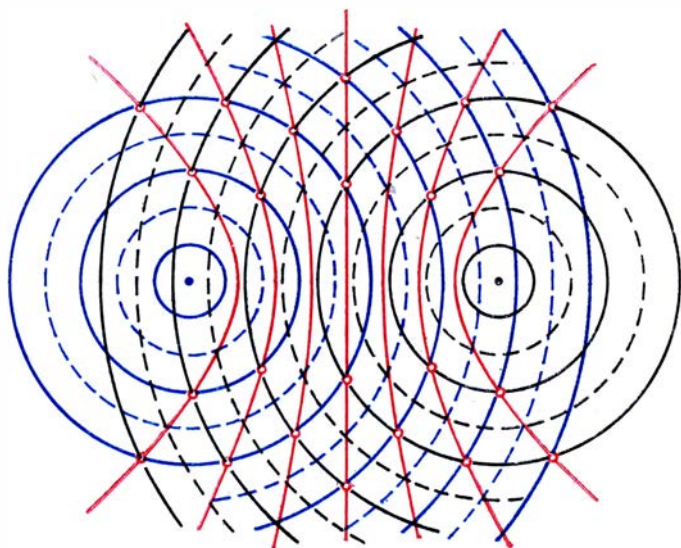
SANDER

Laser **allgemeinverständlich**



POLYTECHNISCHE BIBLIOTHEK





Mit 112 Bildern

DIPL.-PHYS. HENDRIK SANDER

LASER – allgemeinverständlich

Arbeitsweise und Anwendung einer neuen Energiequelle

2., verbesserte Auflage



VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG

Dieser Band der Polytechnischen Bibliothek erscheint in Zusammenarbeit mit der »Urania« Gesellschaft zur Verbreitung wissenschaftlicher Kenntnisse.

© VEB Fachbuchverlag Leipzig 1975

2. Auflage

Lizenznummer: 114-210/133/75

LSV 3009

Gesamtgestaltung: Egon Hunger, Leipzig

Printed in GDR

Satz und Druck: Fachbuchdruck Naumburg (Saale)

Redaktionsschluß: 31. 12. 1974

Bestellnummer: 545 894 7

EVP 5,50 Mark

Geleitwort

Nur wenig älter als ein Jahrzehnt ist der Begriff Laser. Trotzdem sind gewisse Vorstellungen über ihn weit verbreitet. Dazu mag beigetragen haben, daß die ersten Jahre der Forschung gelegentlich von spektakulären Voraussagen und Vermutungen begleitet waren. Tatsächlich bietet das Licht der Laser in vieler Hinsicht Neues.

Neben der hohen Leistung im Lichtstrahl, die sich mit optischen Mitteln auf kleinste Flächen konzentrieren läßt, ist es besonders die hohe zeitliche Kohärenz des Lichts, welche die neuen Eigenschaften im wesentlichen ausmachen, so daß man deutlich eine neue Qualität erkennt. Mit den heute erreichbaren hohen Energiedichten lassen sich außerordentlich hohe Temperaturen erzeugen, wie man sie sonst im Labor kaum erzielen kann, während die Kohärenz des Lichts beispielsweise die Holographie zu einem interessanten Teilgebiet der Optik erhoben hat.

So werden neue Gebiete der Physik erschlossen.

Über die Anwendungen der Laser denken heute viele Forscher, Konstrukteure und Neuerer nach in dem Bestreben, diesen oder jenen Arbeitsvorgang zu rationalisieren oder neue Prinzipien zu finden, die zur Automatisierung beitragen.

Mit den Lasern haben viele Wissenschaftler und Ingenieure in der Forschung zu tun, wenn sie neuen Erkenntnissen auf der Spur sind und die Eigenschaften der Laser immer genauer erforschen.

Dieses Buch soll all denen eine Orientierung geben und eine Hilfe sein, die an solchen Vorhaben mitwirken oder sich mit den Grundlagen einer noch jungen Teildisziplin der Physik in leicht verständlicher und einfacher Form vertraut machen wollen.

Prof. Dr. K. Junge

Direktor des Zentralinstituts für Optik und
Spektroskopie

Akademie der Wissenschaften der DDR

Vorwort

Selten gab es ein Gebiet von Wissenschaft und Technik, das sich in einer kurzen Zeit so stürmisch entwickelte, wie das Gebiet der Laser. Der erste erfolgreiche Versuch, einen Laserstrahl zu erzeugen, wurde 1960 von *Maiman* durchgeführt. Dabei wurde erstmalig ein neues Prinzip der Lichterzeugung experimentell bestätigt, das *Basow*, *Prochorow* und *Townes* theoretisch erarbeitet hatten. Schon zehn Jahre danach stellte Nobelpreisträger *Prochorow* fest: »Nach Meinung der Fachleute werden die Laser im Jahre 2000 das wichtigste Gebiet der Technologie bilden.« Diese rasche Entwicklung ist kein Zufall. Sie beruht auf den besonderen Eigenschaften, die den Laser von allen anderen bisher bekannten Lichtquellen unterscheiden. Die von den verschiedenen Lasertypen erzeugte Strahlung erlaubt eine Vielfalt von Anwendungen in der Meß- und Bearbeitungstechnik bzw. bei wissenschaftlichen Untersuchungen. Auch in der Medizin bieten sich Möglichkeiten einer nutzbringenden Anwendung des Laserstrahls, z. B. in der Augenheilkunde, und hier zeigt sich besonders deutlich, daß das Gebiet des Lasers sich unter dem Gesichtspunkt »Alles zum Wohle des Menschen« auch aus der Sicht der Forderungen des VIII. Parteitags der SED betrachten läßt.

Es kommt jetzt vor allem darauf an, aus der Vielfalt der Möglichkeiten des Einsatzes von Lasern die den meisten Erfolg versprechenden Verfahren auszuwählen und in die Praxis einzuführen.

Dieses Buch soll dazu dienen, allgemeinverständlich die Grundlagen der Arbeitsweise von Lasern darzustellen, die verschiedenen Lasertypen und eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten zu erläutern. Zum besseren Verständnis wird am Ende jedes Abschnitts eine Zusammenfassung gebracht, die mit blauem Punkt besonders gekennzeichnet ist; wichtige Formeln werden durch ein rotes Dreieck hervorgehoben. Ein Bildanhang am Ende des Textteils soll den dargebotenen Stoff ergänzen.

Viele Kollegen unterstützten mich durch Informationen oder mit Literaturhinweisen. Insbesondere danke ich den Kollegen *Göbel*, *Kühn* und Dr. *Zöllner* für wertvolle Diskussionen und kritische Hinweise. Vor allem aber bin ich Herrn Prof. Dr. *Junge*, Direktor des Zentralinstituts für Optik und Spektroskopie der Akademie der Wissenschaften der DDR, und seinen Mitarbeitern zu Dank verpflichtet, die durch Kritik und Verbesserungen in sozialistischer Gemeinschaftsarbeit wesentlichen Anteil an der Entstehung des Buches haben.

Möge dieser Band dazu beitragen, die Kenntnisse des Lesers über die Gesetzmäßigkeiten der Natur zu erweitern.

H. Sander

Inhaltsverzeichnis

GRUNDLAGEN DES LASERS

1.	Elektromagnetische Strahlung	15
1.1.	Schwingung und Welle	15
1.2.	Elektromagnetische Wellen	18
1.3.	Das Foton	20
1.4.	Übersicht über die elektromagnetischen Wellen . .	21
1.5.	Spektrum	24
1.6.	Interferenz und Kohärenz	28
1.7.	Polarisation	32
2.	Physikalische Grundlagen des Lasers	34
2.1.	Wechselwirkung von Atomen mit Licht	34
2.2.	Lichtverstärkung	39
2.3.	Resonator	44
2.4.	Oszillator	48
2.4.1.	Laser-Oszillator	50
2.5.	Beschreibung der Vorgänge im Laser durch Bilanzgleichungen	55
2.6.	Einige Ergebnisse der Bilanzgleichungen	60
3.	Laserarten	63
3.1.	Gaslaser	64
3.1.1.	Atomarer Gaslaser (Beispiel Helium-Neon-Laser). .	64
3.1.2.	Ionenlaser (Beispiel Argonlaser)	70
3.1.3.	Moleküllaser (Beispiel Kohlendioxid-Laser)	74
3.1.3.1.	Kontinuierlicher CO ₂ -Laser	74
3.1.3.2.	TEA-Laser	80
3.2.	Festkörperlaser	83

3.3.	Halbleiterlaser	91
3.4.	Laser mit aktivem Medium in flüssigem Zustand	95
3.4.1.	Chemische Laser	95
3.4.2.	Farbstofflaser	97
3.5.	Vergleich der Lasertypen	99
4.	Bauelemente für Laser	105
4.1.	Passive Elemente	105
4.1.1.	Spiegel	105
4.1.2.	Piezokeramik	110
4.1.3.	Resonatoraufbau	111
4.1.4.	Empfänger für Laserstrahlung	112
4.2.	Elemente zur aktiven Beeinflussung der Laserstrahlung	115
4.2.1.	Nichtlineare Optik	115
4.2.2.	Optischer parametrischer Oszillator	119
4.2.3.	Elektrooptik	122
5.	Methoden zur Beeinflussung der Laserparameter	125
5.1.	Monofrequenz	125
5.2.	Stabilität	128
5.3.	Riesenimpuls laser	134
5.4.	Selbstfokussierung	140
6.	Optischer Überlagerungs empfang	144
ANWENDUNGEN DES LASERS		
7.	Spektroskopie	152
7.1.	Laser-Mikrospektral-Analysator (LMA)	152
7.2.	Nichtlineare Gasspektroskopie	153
7.3.	Weitere Methoden der Spektroskopie	154
8.	Plasmaphysik	156
8.1.	Plasmaerzeugung	156
8.2.	Plasmadiagnostik	157

9.	Messung physikalischer und technischer Größen	159
9.1.	Druckmessung	159
9.2.	Seismograph	160
9.3.	Frequenznormal	162
9.4.	Entfernungsmessung (Impulslaufzeit-Verfahren) . .	164
9.5.	Messen der Strecke Erde – Mond	168
9.6.	Geschwindigkeitsmessung	171
9.6.1.	Doppler-Effekt	171
9.6.2.	Meßverfahren für Geschwindigkeitsmessung . . .	173
9.7.	Längenmessung	176
10.	Holografie	180
10.1.	Grundlagen der Holografie	180
10.2.	Anwendungen der Holografie	186
11.	Verarbeitung von Informationen	192
11.1.	Informationsübertragung	192
11.2.	Informationsübertragung im Sonnensystem . . .	199
11.3.	Datenspeicherung	200
11.4.	Laser-Fernsehprojektor	202
12.	Materialbearbeitung	205
13.	Weitere Anwendungen	210
13.1.	Fluchtung	210
13.2.	Meteorologie	216
13.3.	Laser-Kreisel (Gyroskop)	217
13.4.	Fotometer	220
13.5.	In Medizin und Biologie	221
14.	Arbeitsschutz beim Umgang mit Lasergeräten	226
15.	Zukunft des Lasers	229
	Sachwortverzeichnis	233
	Bildnachweis	236
	Bildanhang	237

Grundlagen des Lasers

1. Elektromagnetische Strahlung

1.1. Schwingung und Welle

Die Frage nach der Natur des Lichtes ist so alt wie die Menschheit selbst. Das ist verständlich, denn schon einfachste Beobachtungen von Naturerscheinungen auf der Erde zeigen, daß diese vom Sonnenlicht in starkem Maße abhängig sind. Nicht nur Wissenschaftler aller Zeiten stellten die Frage: Was ist das – Licht? Auf Grund des heutigen Wissensstandes kann darauf folgende Antwort gegeben werden: Licht ist eine Form elektromagnetischer Energie. Allerdings besagt dieser Satz allein noch recht wenig. Um den Charakter des Lichtes kennenzulernen, muß man erst auf einige Grundfragen seiner physikalischen Natur eingehen.

Ein dazu notwendiger Begriff ist die *Schwingung*, der man in vielen Lebensbereichen begegnet. Schwingen kann eine Schaukel, eine Federung, der Schwingkreis im Radioapparat, der Anker einer Uhr. Auf den ersten Blick sind das völlig verschiedene Prozesse. Ihnen allen ist jedoch eines gemeinsam: Ein bestimmter Vorgang wiederholt sich ständig, er ist periodisch. Im schwingenden System ist Energie gespeichert, die auch wieder abgegeben werden kann. So geht beispielsweise bei mechanischen Systemen Energie durch Reibung verloren, und die periodische Bewegung wird abgebremst, sie wird »gedämpft«. Ein solcher Prozeß soll hier nicht betrachtet werden. Es sei angenommen, daß die Schwingung ohne Energieabgabe vor sich geht.

Beim Schwingprozeß sind folgende Begriffe wichtig: Amplitude, Frequenz und Phase. Sie sollen am Beispiel des Pendels verdeutlicht werden. Für die Pendelbewegung gilt die folgende Formel:

$$x = A \sin (2\pi \nu t). \quad (1)$$

Es bedeuten

x Auslenkung in Richtung der x -Achse zur Zeit t

1. Elektromagnetische Strahlung

A Amplitude

ν Frequenz.

Die *Amplitude* A ist die maximale Größe von x (hier der Auslenkung des Pendels). Die *Frequenz* ist die Anzahl der Perioden (der einzelnen vollständigen Schwingungen) je Zeiteinheit und wird in Hertz ($1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$) angegeben. Die *Phase* $2\pi\nu t$ bestimmt die augenblickliche Lage, in der sich das System zur Zeit t befindet, sie verändert sich also ständig.

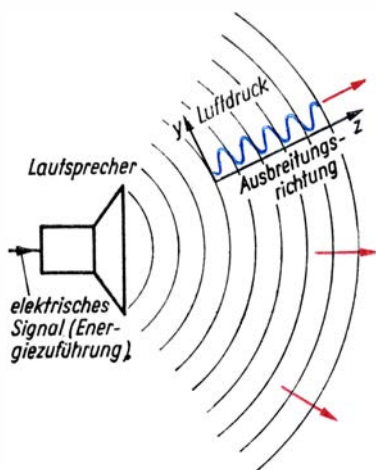


Bild 1. Schallwellen

Nachdem an den Grundbegriff der Schwingung erinnert wurde, soll der physikalische Begriff der *Welle* erläutert werden. Als Beispiel möge die Abstrahlung der Schallwellen vom Lautsprecher dienen (Bild 1). In der Schwingspule wird durch eine angelegte Wechselspannung ein sich ständig umpolendes Magnetfeld erzeugt. Die Wechselspannung und damit auch das Magnetfeld führen Schwingungen aus. Dadurch wird die Spule einmal in den Permanentmagneten hineingezogen, einmal von ihm abgestoßen. Die Schwingungen des Magnetfeldes übertragen sich so auf das mechanische System »Spule und Membran«. Die Membran hat die Aufgabe, die anliegenden Luftteilchen zu bewegen. Vor ihr wird abwechselnd ein Überdruck und ein Unterdruck erzeugt. Die Be-

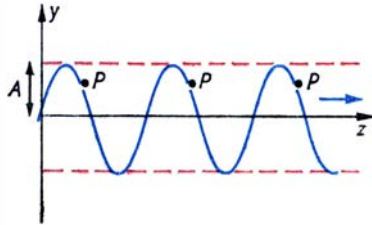


Bild 2. Welle (P Punkte gleicher Phase)

wegung der Luftteilchen, die sich direkt an der Membran befinden, überträgt sich auf die weiter weg liegenden Teilchen. Das Signal breitet sich aus. Dabei legen die Luftteilchen, d. h. die Träger des Signals, keine weite Strecke zurück. Nur ihre Bewegung wird weitergegeben. Eine solche Signalübertragung ist typisch für eine Welle. In diesem Beispiel entsteht eine Schallwelle.

Analog zur Schwingung wird auch die Welle durch Amplitude und Frequenz charakterisiert. Es sei angenommen, daß man die Bewegung zu einem bestimmten Zeitpunkt anhalten kann (Bild 2). Die Welle läßt sich dann durch die Gleichung

$$y = A \sin (2\pi\nu z) \quad (2)$$

ausdrücken.

y veränderliche Größe (im angeführten Beispiel der Luftdruck)

ν Frequenz

z Ausbreitungsrichtung der Welle.

Der Abstand zwischen zwei Punkten gleicher Schwingungsphase wird *Wellenlänge* genannt. Sie ist zur Frequenz umgekehrt proportional:

$$\lambda = \frac{\nu}{\nu} \quad (3)$$

λ Wellenlänge

ν Proportionalitätsfaktor (*Ausbreitungsgeschwindigkeit*).

Die konstante Größe ν ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, sie ist charakteristisch für den bestimmten Vorgang. So hat sie für den Vorgang der Ausbreitung von Schallwellen in Luft den Wert $\nu \approx 330 \text{ ms}^{-1}$.

1. Elektromagnetische Strahlung

Das Licht läßt sich in vielen Fällen als elektromagnetische Welle beschreiben. Diese Betrachtungsweise ist jedoch nicht immer angebracht. Vielfach verhält sich das Licht wie ein Strom von Teilchen (Fotonen). Hier soll vor allem der Wellencharakter des Lichtes dargestellt werden.



Schwingung und Welle werden durch Amplitude, Frequenz und Phase charakterisiert. Der Ausbreitung einer Welle kann eine Geschwindigkeit zugeordnet werden. Diese ist ein Charakteristikum für jeden bestimmten Vorgang.

1.2. Elektromagnetische Wellen

Elektrizität und Magnetismus scheinen auf den ersten Blick zwei Naturerscheinungen zu sein, die nicht viel miteinander zu tun haben. Dennoch sind sie eng miteinander verbunden. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang in der Erscheinung des elektromagnetischen Feldes. Der Begriff des *Feldes* ist eine physikalische Definition, mit deren Hilfe man Wirkungen beschreibt, die ein Körper mit bestimmten Eigenschaften auf andere Körper ausübt. Ein Feld erfüllt ein Raumgebiet, in dem Kräfte so wirken, daß jedem Raumpunkt eine nach Größe und Richtung bestimmte Kraft zugeordnet ist. Ein Feld ist in seiner Gesamtheit dann bekannt, wenn man für jeden Punkt des Feldes eine definierte *Feldstärke* angeben kann. Die Feldstärke ist ein *Vektor*, d. h. eine physikalische Größe, die durch Betrag und Richtung bestimmt wird.

Schüttet man beispielsweise Eisenfeilspäne auf Papier und hält einen Magneten darunter, so ordnen sie sich zu einem charakteristischen Gebilde. Jeder Span wird vom Magneten beeinflusst, er nimmt in Abhängigkeit von seiner Lage zum Magneten eine bestimmte Richtung ein. Diese Orientierung wird durch das Feld bewirkt, das den Magneten umgibt. Die Lage aller Späne zeichnet somit die Struktur des Magnetfeldes nach. Ähnlich verhält es sich mit dem Schwerfeld der Erde. Das Schwerfeld hat an jeder Stelle seines Wirkungsbereiches eine bestimmte Feldstärke, die durch Größe und Richtung der an diesem Ort wirkenden Anziehungs-

kraft gekennzeichnet wird. Man sagt, die Erde ist von einem Schwerfeld umgeben, und meint damit, daß auf einen beliebigen Körper eine Anziehungskraft wirkt.

Der ursächliche Zusammenhang des elektrischen und des magnetischen Feldes tritt dann in Erscheinung, wenn diese eine zeitliche Veränderung erfahren. Eine Änderung des elektrischen Feldes bewirkt immer das Entstehen eines magnetischen Feldes und umgekehrt. Da in diesem Fall beide Feldformen gemeinsam auftreten, spricht man von einem *elektromagnetischen Feld*, das bestimmte Formen der Elektrizität und des Magnetismus in sich einschließt.

Dieses Naturgesetz findet in vielen technischen Apparaturen, beispielsweise beim Transformator, Anwendung. Der Transformator besteht aus zwei Spulen. Eine davon wird mit Wechselstrom gespeist. Um eine stromdurchflossene Spule entsteht ein Magnetfeld. Da die Spule von Wechselstrom durchflossen wird, geht zu einer bestimmten Zeit die Stromstärke durch Null. Infolgedessen bricht das Magnetfeld zusammen, und ein elektrisches Feld wird aufgebaut. Dieser Vorgang wiederholt sich immer wieder. Um die Spule wird ein Feld erzeugt, das sowohl als Magnetfeld als auch als elektrisches Feld wirkt. Dieses elektromagnetische Feld setzt sich analog der Schallausbreitung im Raum fort (jedoch unabhängig vom Vorhandensein eines Mediums). Die Änderung, beispielsweise des magnetischen Feldes, beginnt direkt an der Spule. Es vergeht aber eine gewisse Zeit, ehe sich diese Änderung in einer bestimmten Entfernung bemerkbar macht. Diese Zeit ist nicht unendlich klein. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Änderung ausbreitet, beträgt im Vakuum rd. $300\,000\text{ km s}^{-1}$, das entspricht der *Lichtgeschwindigkeit*. Die zweite Spule des Transformators stellt einen Empfänger für diese elektromagnetische Welle dar. Das elektromagnetische Feld wirkt auf die Elektronen im Draht der Spule, in ihm wird ein Wechselstrom »induziert«. Dieser Strom kann von dem in die erste Spule eingespeisten Strom verschieden sein, woraus sich die Wirkung der Anordnung als Transformator erklärt.

Aus dem Beispiel wird ersichtlich, daß die elektromagnetische Welle diejenige Form darstellt, mit der das elektromagnetische Feld (und damit auch Signale) von einem Ort zum anderen übertragen werden. Dabei ist es nicht notwendig, daß für die Übertragung irgendein Medium vorhanden ist (wie bei der Schallaus-

1. Elektromagnetische Strahlung

breitung die Luft). Elektromagnetische Wellen breiten sich auch im »leeren« Raum, im Vakuum, aus.



Die elektromagnetische Welle ist die Erscheinungsform des elektromagnetischen Feldes. Dieses weist Eigenschaften der Elektrizität und des Magnetismus auf. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit aller elektromagnetischen Wellen im Vakuum beträgt rd. $300\,000\text{ km s}^{-1}$ (Lichtgeschwindigkeit).

1.3. Das Foton

Bis jetzt wurde das Licht als elektromagnetische Welle betrachtet. Diese Modellvorstellung reicht für die Erklärung vieler Naturerscheinungen aus. Es hat sich aber herausgestellt, daß nicht alle Effekte damit erklärt werden können. Am Anfang unseres Jahrhunderts entstand eine neue Modellvorstellung für das Licht. Sie wurde vor allem von *Planck* und *Einstein* begründet und besteht darin, daß man das Licht als eine Einheit von Welle und Teilchen auffaßt. Das Licht verhält sich in bestimmten Experimenten wie eine Welle, in anderen jedoch wie ein Strom von Teilchen.

Ohne näher auf diese Modellvorstellung einzugehen, kann folgendes ausgesagt werden: Das Licht wird von den Atomen nur in bestimmten (von den Eigenschaften des Atoms abhängigen) Portionen aufgenommen bzw. abgegeben. Diese Portionen, die man *Lichtquanten* bzw. *Fotonen* nennt, vereinigen sich zum Lichtstrom.

Die Energie eines Fotons ist der Frequenz der entsprechenden elektromagnetischen Welle proportional. Der Proportionalitätsfaktor hat den Namen *Plancksches Wirkungsquantum* erhalten (nach dem Physiker *Max Planck*, der auf Grund theoretischer Überlegungen auf ein solches Verhalten des Lichtes schloß):



$$E = h\nu \quad (4)$$

E Energie des Fotons

h Plancksches Wirkungsquantum ($h = 4,135 \cdot 10^{-15}\text{ eV s}$)

ν Frequenz der entsprechenden elektromagnetischen Welle.

Außerdem kann man feststellen, daß die Intensität eines Lichtstroms um so größer ist, je mehr Fotonen in ihm enthalten sind.

1.4. Übersicht über die elektromagnetischen Wellen

Ausgehend von den erwähnten Eigenschaften kann man sich vom Energiestandpunkt einen Lichtstrahl als einen Strom von Teilchen (Fotonen) vorstellen. Die Energie ist diskontinuierlich in Form von Fotonen konzentriert. Dabei ist die Zahl der Teilchen ein Maß für die Strahlintensität. Je größer die Energie der einzelnen Fotonen ist, desto größer ist auch die Frequenz des Lichtes in der entsprechenden Wellendarstellung. Man spricht von einem *Dualismus des Lichtes*, also von einer Zweigestalt als Welle und Teilchen. Dieses dialektische Prinzip ist nicht nur beim Licht, sondern in der gesamten Natur von Bedeutung. Allerdings spielt es bei den makroskopischen Erscheinungen, d. h. bei solchen Erscheinungen, die wir mit unseren Sinnen unmittelbar wahrnehmen können, nur eine geringe Rolle. Im gesamten atomaren Bereich ist es dagegen wesentlich. Beispielsweise weist das Elektron, das mit den Prozessen der Lichtabsorption bzw. Lichtemission unmittelbar verknüpft ist, einen gleichen Charakter auf. Auch das Elektron hat Eigenschaften wie Teilchen und Welle. Die gesamte Materie hat in ihrer innersten Struktur einen einheitlichen Grundaufbau. Dessen Eigenschaften stellen sich, je nach der Betrachtungsweise, verschiedenartig dar. Die Modelle beschreiben sie mehr oder weniger vollständig. Sie bestehen darin, daß man Vorstellungen aus der unseren Sinnen direkt zugänglichen makroskopischen Welt in andere Gebiete überträgt. Ein solches Verfahren ist aber nur in bestimmten Grenzen zulässig. Für die vollständigere Beschreibung der Vorgänge im atomaren Bereich bedient man sich der »Quantentheorie«. Auch die Vorgänge im Laser lassen sich nur in erster Näherung durch klassische Modellvorstellungen umschreiben. Für genauere Berechnungen müssen quantenmechanische Theorien aufgestellt werden.

 Die meisten atomaren Erscheinungen, so auch das Licht, sind durch den Welle-Teilchen-Dualismus charakterisiert. Das Licht wird nur in Form von bestimmten Portionen, den Fotonen, von den Atomen emittiert bzw. absorbiert.

1.4. Übersicht über die elektromagnetischen Wellen

Eine der wichtigsten Kenngrößen der elektromagnetischen Welle ist ihre Wellenlänge. Von ihr hängen viele physikalische Eigenschaf-

1. Elektromagnetische Strahlung

ten der betreffenden Strahlung in bezug auf die Wechselwirkung mit der Materie ab. Im folgenden soll eine Übersicht über die elektromagnetischen Wellen verschiedener Wellenlänge gegeben werden (Bild 3).

Die vom Wechselstrom erzeugten elektromagnetischen Wellen werden in der Technik zur Energieübertragung über sehr kurze Entfernungen benutzt. Als Beispiel wurde der Transformator betrachtet. Der Frequenz von 50 Hz dieser Wellen entspricht eine Wellenlänge von 6000 km.

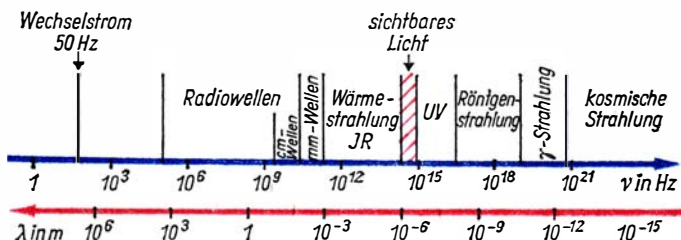


Bild 3. Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Elektromagnetische Wellen mit Frequenzen von etwa 100 kHz bis zu einigen 100 MHz werden als *Radiowellen* bezeichnet. Die entsprechenden Wellenlängen liegen im Bereich zwischen einigen Kilometern und einigen Metern. Man verwendet sie für die Signal- und Nachrichtenübermittlung bzw. für die Übertragung von Radio- und Fernsehprogrammen. Je nach ihrer Wellenlänge nennt man sie Lang-, Mittel-, Kurz- und Ultrakurzwellen. Zur Kennzeichnung der Wellen, die zur Übertragung von Fernsehprogrammen dienen, sind auch Frequenzbezeichnungen eingeführt worden: VHF – Very High Frequency (sehr hohe Frequenz) und UHF – Ultra High Frequency (ultrahohe Frequenz).

Schon bei Kurz- und Ultrakurzwellen spielt die Bündlungsfähigkeit der elektromagnetischen Wellen eine große Rolle. Mit Hilfe geeigneter Elemente (bei sichtbarem Licht z. B. mit Hilfe von Linsen) ist man in der Lage, die elektromagnetischen Wellen mehr oder weniger scharf zu bündeln. Dabei kann man einen bestimmten Ausbreitungswinkel nicht unterschreiten. Dieser *Beugungswinkel* ist proportional der Wellenlänge:

$$\alpha \sim \frac{\lambda}{d} \quad (5)$$

α Beugungswinkel

λ Wellenlänge

d Durchmesser der Blendenöffnung.

Aus Gleichung (5) ist zu ersehen, daß z. B. Radiowellen wegen ihrer großen Wellenlänge nicht so scharf gebündelt werden können wie Lichtwellen.

An das Gebiet der Radiowellen schließen sich die Zentimeter- und Millimeterwellen an, die in zunehmendem Maße für die Nachrichtenübertragung verwendet werden. Zu erwähnen ist, daß der Vorläufer des Lasers, der *Maser*, eine Strahlungsquelle bzw. einen Verstärker für elektromagnetische Strahlung im Mikrowellengebiet darstellt.

Vor allem bei Zentimeter- und Millimeterwellen tritt folgende Eigenschaft zutage. Diese Wellen erwärmen Körper, die sie durchdringen, merklich. In speziell dafür konstruierten Öfen werden z. B. elektromagnetische Wellen mit entsprechenden Frequenzen zur Speisenerwärmung eingesetzt. Die Erwärmung eines Körpers durch elektromagnetische Wellen ist eine Erscheinung, die aus der Absorption der Strahlung folgt. Durch die Absorption wird dem Körper Energie zugeführt. Sofern diese Energie nicht in anderer Form abgeführt wird, kommt es zu einer Umwandlung in Wärmeenergie.

Die elektromagnetische Strahlung, die zum Wellenlängenbereich zwischen dem Zentimeter- und Millimetergebiet und dem sichtbaren Licht gehört, wird mit besonders hohem Wirkungsgrad in Wärme umgewandelt. Man bezeichnet sie deshalb als *Wärmestrahlung*. Ihre Wellenlängen liegen im Bereich von einigen hundert bis zu einigen Mikrometern. Strahlung mit Wellenlängen in der Größenordnung von einigen Mikrometern wird als »infrarote Strahlung« bezeichnet, da sich nach der kurzwelligen Seite hin der Bereich des Lichtes anschließt, dessen langwelligste Strahlung vom menschlichen Auge als rot empfunden wird.

Die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes liegen zwischen 0,4 und 0,8 μm . Ihnen entsprechen Frequenzen von etwa $5 \cdot 10^{14}$ Hz. Dabei weist das rote Licht die größte Wellenlänge auf. Die geringste Wellenlänge bzw. die größte Frequenz ist bei der Strahlung zu verzeichnen, die vom menschlichen Auge als violett registriert

1. Elektromagnetische Strahlung

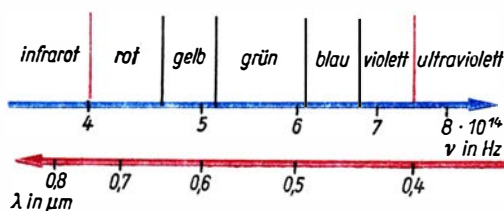


Bild 4. Spektrum der sichtbaren elektromagnetischen Wellen

wird (Bild 4). In Richtung zunehmender Frequenz schließt sich das Ultraviolett an. Darauf folgen die Röntgenstrahlung, die Kernstrahlung (γ -Strahlung) sowie die kosmische Strahlung.

Als Laser-Generatoren bzw. als Laser bezeichnet man heute spezielle Lichtquellen, die Strahlung aussenden, deren Wellenlängen im Bereich des sichtbaren Lichts einschließlich der Grenzgebiete (ultraviolett bzw. infrarot) liegen. Die ausgesandte Strahlung weist bestimmte Eigenschaften auf, die herkömmliche Lichtquellen nicht haben können.



Die Wellenlänge ist eine der wichtigsten Kenngrößen der elektromagnetischen Welle. Die Wellenlängen des sichtbaren Lichts liegen zwischen 0,4 und 0,8 μm , d. h. nur in einem bestimmten Spektralbereich.

1.5. Spektrum

Für die Charakterisierung einer Strahlungsquelle ist die Darstellung der Strahlungsintensität in Abhängigkeit von der Wellenlänge von Bedeutung. Eine solche Darstellungsart bezeichnet man als ein *Spektrum* (im speziellen Fall ein Wellenlängenspektrum). Strahlung, die aus elektromagnetischen Wellen von nur einer einzigen Frequenz bzw. Wellenlänge besteht (in der exakten Begriffsreglung – die monochromatische Strahlung), würde in dieser Darstellungsart als ein unendlich dünner Strich erscheinen (Kurve 1 in Bild 5). Die physikalische Natur der Erzeugung von Licht läßt es jedoch nicht zu, daß die Strahlung einer natürlichen Lichtquelle nur eine einzige definierte Frequenz bzw. Wellenlänge aufweist.

Sogar eine einfarbige Lichtquelle, deren Strahlung nur einem einzigen Atomübergang entsprechen würde, sendet ein Gemisch von Wellen verschiedener Wellenlänge aus. Diese sind aber innerhalb eines engen Wellenlängenbereiches konzentriert. Das Spektrum einer solchen Lichtquelle stellt Kurve 2 in Bild 5 dar. Dabei kann man diese Kurve als Summe über unendlich viele Einzelwellen (Kurve 1) verstehen.

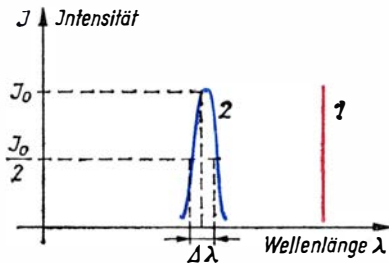


Bild 5. Zum Begriff Halbwertsbreite

Zur Charakterisierung einer solchen Kurve wendet man den Begriff *Halbwertsbreite* $\Delta\lambda$ an. Als Halbwertsbreite einer Strahlung bezeichnet man den Wellenlängenunterschied (bzw. den Frequenzunterschied) der beiden Stellen im Spektrum, bei denen die Intensität auf die Hälfte abgefallen ist. Dabei ist die Halbwertsbreite charakteristisch für die jeweilige Lichtquelle und ist von ihren Ausstrahlungsbedingungen abhängig. Man definiert (abweichend von der exakten Begriffsbestimmung) eine *monochromatische Strahlung* als Strahlung mit geringer Halbwertsbreite. Es muß die Ungleichung gelten:

$$\Delta\lambda \ll \lambda \quad (6)$$

$\Delta\lambda$ Halbwertsbreite

λ Wellenlänge der Strahlung.

Diese Bezeichnung trifft im allgemeinen für eine Strahlung zu, die nur einem einzigen Atomübergang entspricht.

Strahlung mit sehr geringer Halbwertsbreite stellt im Wellenlängenspektrum eine sogenannte *Spektrallinie* dar. Sie ist einem definierten Atomübergang gleichgestellt. Herkömmliche Lichtquellen, wie

die Glühlampe oder die Quecksilberdampflampe, weisen kein Spektrum mit nur einer einzigen Linie auf.

Quecksilberdampf sendet je nach Anregungsart eine Strahlung aus, die aus vielen einzelnen monochromatischen Spektrallinien besteht. Man spricht in diesem Fall von einem *diskreten* oder diskontinuierlichen *Spektrum*. Im Gegensatz dazu ist das von der Glühlampe ausgesandte Licht so beschaffen, daß man keine diskreten, d. h. einzelnen Linien auflösen kann. Man spricht daher von einem *kontinuierlichen Spektrum*. Ein solches Spektrum entspricht nicht einer einzelnen Farbe, sondern wird vom Auge als »weißes Licht« empfunden, wenn alle Farben des Lichts in ihm vorhanden sind, d. h., wenn es ein Gemisch von Strahlung aller Wellenlängen des sichtbaren Lichts darstellt. Auch das Spektrum der Sonne ist kontinuierlich. Die Wellenlängen sind über den ganzen Bereich des sichtbaren Lichts verteilt, man empfindet es als »weiß«. (Im Sonnenspektrum kommen allerdings noch Absorptionslinien vor, die Fraunhoferschen Linien.)

Für eine ganze Reihe von Anwendungen wird monochromatisches Licht benötigt, so z. B. in der Längenmeßtechnik oder in der Holographie. Wie kann man mit herkömmlichen Strahlungsquellen eine solche Strahlung erhalten? Man schwächt mit geeigneten Hilfsmitteln den unerwünschten Teil des Spektrums der Strahlung ab. Dazu wird ein Prisma, ein Filter oder andere Hilfsmittel benutzt. Das übriggebliebene Licht kann man dann weiter verwenden. Hier ist aber die Unzulänglichkeit eines solchen Verfahrens ersichtlich. Der größte Teil der Strahlungsintensität der in Anspruch genommenen Lichtquelle geht dabei ungenutzt verloren.

Verwendet man zur Erzeugung von monochromatischer Strahlung eine Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum, so wird die Halbwertsbreite des durchgelassenen Lichts von der Halbwertsbreite der Filterdurchlaßkurve bestimmt (Bild 6a). Dabei genügen einfache Glasfilter oft nicht, und man muß vielfach hohen technischen Aufwand treiben, um die gewünschte Halbwertsbreite zu erreichen. Ein besseres Verfahren ist das Ausfiltern einer Linie aus einem diskreten Spektrum (Bild 6b). Dabei hängt die Halbwertsbreite der durchgelassenen Strahlung von den Ausstrahlungseigenschaften der betreffenden Quelle ab. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß man nicht jede gewünschte Wellenlänge erhalten kann. Um es noch ein-

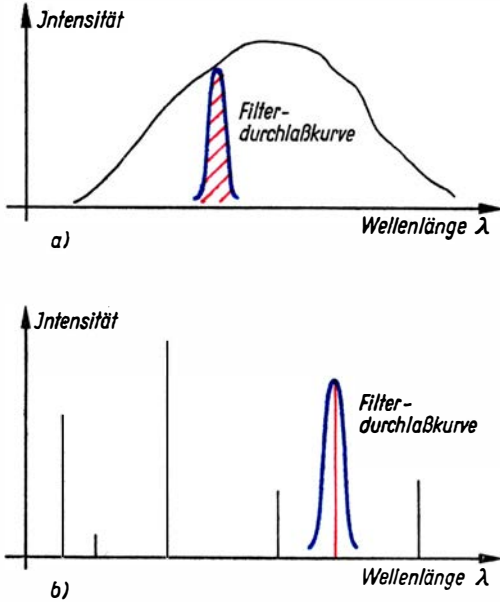


Bild 6. Erzeugung von monochromatischem Licht mit Filtern
 a) kontinuierliches Spektrum b) diskretes Spektrum

mal zu unterstreichen: Der Nachteil dieser obengenannten Methoden besteht vor allem darin, daß ein großer Teil der Strahlungsintensität verlorenght und deshalb die Intensität des weiter zu verwendenden Lichtes gering ist.

Im Gegensatz dazu weist der Laser die Eigenschaft auf, einen großen Teil ausgesandter Strahlung von vornherein auf einen sehr geringen Wellenlängenbereich zu konzentrieren. So kann die Halbwertsbreite der Strahlung eines He-Ne-Lasers nur einige Hertz betragen, ein Wert, der mit herkömmlichen Methoden unerreich-

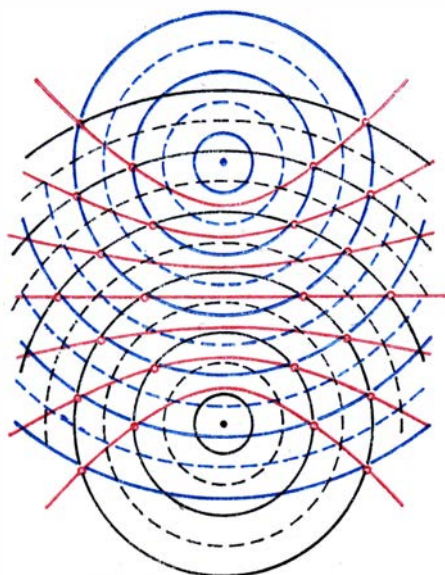
Ein Spektrum ist die Darstellung der Intensitätsverteilung auf einer Wellenlängenskale bzw. Frequenzskale. Die Halbwertsbreite einer Strahlungslinie charakterisiert

ihre spektrale Breite. Nur beim Laser kann ein großer Teil der ausgesandten Strahlung auf eine einzige schmale Linie konzentriert werden.

1.6. Interferenz und Kohärenz

Eine Reihe von Anwendungen des Lasers, z. B. sein Einsatz in der Längenmeßtechnik, beruhen auf Interferenzeffekten bei der Überlagerung von Lichtwellen. Andererseits spielen Interferenzerscheinungen bei den Vorgängen im Laser selbst eine wesentliche Rolle.

Eine Überlagerung zweier Wellen ist auf Bild 7 schematisch dargestellt. Ein solches Bild kann man beispielsweise beobachten, wenn



- Maximum
- - - Minimum
- Stellen maximaler Bewegung

Bild 7. Interferenz

a) Interferenz zweier kreisförmiger Wellen

b) Überlagerung zweier Wellen

$$x_T = x_1 + x_2 \text{ für jeden Zeitpunkt } t_0$$

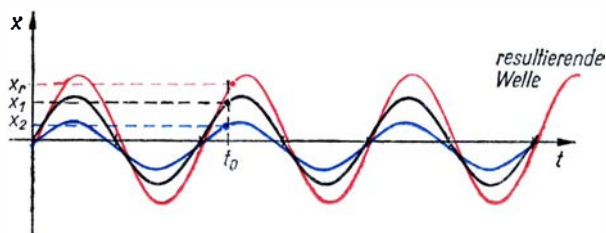


Bild 7b

zwei Wasserwellen einander durchdringen. (Sie müssen dabei allerdings auf eine ganz bestimmte Art und Weise erzeugt werden.) Am Beispiel der Wasserwellen soll dieser Interferenzeffekt erläutert werden. Die Wasserteilchen führen während der Wellenbewegung Schwingungen aus. Überlagern sich zwei Wasserwellen auf die in Bild 7 dargestellte Weise, so überlagern sich auch die Schwingungsbewegungen. Es erscheinen Stellen, an denen sich die Schwingungen gegenseitig auslöschen, an anderen vergrößert sich die Schwingungsamplitude. Das entstehende Überlagerungsbild bleibt trotz der ständigen Ausbreitung der Wasserwellen erhalten. Allgemein wird als *Interferenz* die Überlagerung von Wellen bezeichnet, wobei eine Verstärkung bzw. Auslöschung der Schwingungen zu beobachten ist.

Für die Interferenz von Wellen gilt das *Superpositionsprinzip*. Es besagt, daß die resultierende Schwingungsauslenkung gleich der Summe der Schwingungsauslenkungen der sich überlagernden Wellen ist (ausgenommen sind nichtlineare Erscheinungen). In Bild 7a ist die Überlagerung zweier Wellen (gleicher Frequenz) dargestellt.

Um Interferenzerscheinungen wahrnehmen zu können, muß das Überlagerungsbild zumindest während der Beobachtungszeit konstant bleiben. Die Wellen breiten sich aber ständig aus. Für das Zustandekommen eines konstanten Interferenzbildes ist es daher notwendig, daß die interferierenden Wellen und damit auch die Schwingungen in einer bestimmten, festen Beziehung zueinander stehen. Zwischen ihnen muß stets eine feste Phasenbeziehung herrschen. In diesem Fall spricht man von *Kohärenz* der Wellen.

Das Licht wird durch die Atome der Lichtquelle erzeugt, wenn sie von einem Energiezustand in den anderen übergehen. (Darauf

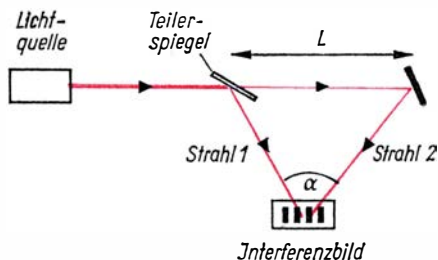


Bild 8. Anordnung zum Messen der Kohärenzlänge

wird später noch genauer eingegangen.) Sollen die ausgestrahlten Wellen kohärent sein, so müssen zwei Bedingungen erfüllt werden. Erstens muß die Ausstrahlung benachbarter Atome zu jedem Zeitpunkt in irgendeiner Weise gekoppelt sein. Eine derartige Kopplung ist beispielsweise erreicht, wenn benachbarte Atome ihr Licht gleichzeitig abgeben. Bildet sich dann ein Lichtstrahl, so stehen die elektromagnetischen Wellen über dem gesamten Querschnitt des Lichtstrahles in fester Beziehung zueinander. Man bezeichnet sie dann als *räumlich kohärent*.

Die zweite Bedingung ist, daß diejenigen Wellen, die zu einem späteren Zeitpunkt ausgesandt werden, in fester Beziehung zu den vorher ausgesandten Wellen stehen. Ist diese Bedingung erfüllt, so spricht man von *zeitlicher Kohärenz*. Auf Bild 8 ist eine Anordnung zur Messung der zeitlichen Kohärenz dargestellt. Der Strahl einer Lichtquelle wird durch einen teildurchlässigen Spiegel in zwei Strahlen aufgespalten. Der eine Strahl fällt auf einen Schirm. Dorthin gelangt auch der zweite Strahl, jedoch über einen Umweg. Der Winkel α zwischen beiden Strahlen muß klein sein. Auf dem Schirm beobachtet man Interferenzfiguren. Der Strahl (2) muß den zusätzlichen Weg L zurücklegen. Auf dem Schirm kommen die Lichtwellen des Strahles (2) zur Interferenz mit solchen Lichtwellen, die zu einem späteren Zeitpunkt ausgesandt wurden und über den Weg (1) nur eine kürzere Strecke zurücklegen mußten. Dabei berechnet sich der Zeitunterschied mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit:

$$30 \quad t = \frac{L}{c} . \quad (7)$$

Je größer die Strecke L wird, desto größer wird auch der Zeitunterschied zwischen den Lichtwellen, die zur Interferenz gelangen. Von einer bestimmten Entfernung an verschwinden dann die Interferenzfiguren. Diese Entfernung hängt von den Eigenschaften der Lichtquelle ab, und man bezeichnet sie als »Kohärenzlänge« der Lichtquelle. Die dazugehörige Zeit nennt man entsprechend *Kohärenzzeit* der Lichtquelle.

Es zeigt sich, daß die Kohärenzlänge der Strahlung einer Lichtquelle umgekehrt proportional der Halbwertsbreite ist. Man kann als *Kohärenzlänge* einer Lichtquelle L_K definieren:

$$L_K = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (7a)$$

c Lichtgeschwindigkeit

$\Delta\nu$ Halbwertsbreite der Strahlung.

Herkömmliche Lichtquellen, z. B. eine Glühlampe oder eine Metallampflampe, weisen nur äußerst geringe Kohärenzlängen auf. Das kommt daher, daß die einzelnen Atome im allgemeinen voneinander unabhängig strahlen, also keine feste Beziehung zueinander haben. So werden hier im allgemeinen nur Kohärenzlängen von einigen Millimetern erreicht.

Die physikalische Natur der Laserstrahlung bringt es mit sich, daß von vornherein die Strahlung der einzelnen beteiligten Atome abgestimmt erfolgt. So konnten bei Lasern Kohärenzlängen von mehreren hundert Kilometern nachgewiesen werden.

Gleichfalls eng mit der Wellennatur des Lichtes verbunden ist die *Beugung*. Man versteht darunter die durch die Wellennatur bedingte Abweichung des Lichtes von seiner geradlinigen Ausbreitung beim Auftreffen des Lichtstrahles auf die Grenze zwischen zwei Medien. Jedoch ist diese Abweichung nicht durch Brechung, Spiegelung oder Streuung bedingt. Stellt man beispielsweise eine spaltförmige Öffnung in den Lichtstrahl, so lassen sich innerhalb des geometrischen Schattens noch Lichterscheinungen nachweisen, d. h., ein Teil des Lichtes wird aus der geradlinigen Richtung abgelenkt.

Diese Erscheinung spielt nicht nur bei bestimmten experimentellen Versuchen mit Licht oder bei speziellen Lichtanwendungen eine wichtige Rolle. Bei der Erzeugung von Laserlicht treten im Laser

1. Elektromagnetische Strahlung

selbst Beugungserscheinungen auf. So hat beispielsweise die Beugung des Lichtes an den Grenzflächen des aktiven Mediums einen wesentlichen Einfluß auf die Lichtverluste innerhalb des Laser-Resonators.



Kohärenz bedeutet, daß zwischen zwei Wellen eine feste Phasenbeziehung besteht. Nur kohärente Wellen können zeitlich konstante Interferenzbilder erzeugen. Es gibt räumliche und zeitliche Kohärenz. Die zeitliche Kohärenz kann man durch Kohärenzzeit und Kohärenzlänge charakterisieren.

1.7. Polarisation

Ein physikalisches Feld kann man durch die Feldstärke charakterisieren. Die Feldstärke wird als Vektor durch Größe und Richtung bestimmt.

Wie erläutert wurde, wechseln in der elektromagnetischen Welle das elektrische und das magnetische Feld miteinander ab. Wenn die elektrische Feldstärke ihren maximalen Wert annimmt, hat die magnetische Feldstärke den Wert Null und umgekehrt. Dabei sind bei der elektromagnetischen Welle die Vektoren der elektrischen und der magnetischen Feldstärke senkrecht zueinander. Diese beiden Schwingungsrichtungen sind ihrerseits senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, so daß man die elektromagnetische Welle wie in Bild 9 darstellen kann. Die Schwingungsrichtungen bleiben bei der Ausbreitung der Welle im Raum unverändert.

Da zu jeder elektrischen Schwingung eine magnetische Schwingung gehört, bezieht man sich zur Charakterisierung der Schwingungsrichtung der elektromagnetischen Welle nur auf eine der Arten des Feldes. Man bezeichnet die Schwingungsrichtung des elektrischen Feldes im Raum als *Polarisationsrichtung* der elektromagnetischen Welle.

Eine Strahlungsquelle strahlt jedoch nicht nur eine einzige, sondern ein ganzes Gemisch von Wellen aus. Die Art der Polarisation der Strahlung ist daher bedingt durch das Verhalten der Summe der einzelnen Schwingungsvektoren. Da die Atome in herkömmlichen Strahlungsquellen ihr Licht unabhängig voneinander aussenden, weisen auch die abgestrahlten Wellen unterschiedliche Polarisationsrichtungen auf. Die abgegebene Strahlung ist dann in ihrer Gesamt-

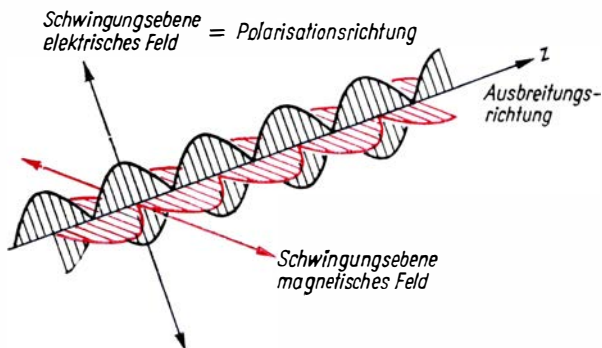


Bild 9. Elektromagnetische Welle

heit nicht polarisiert. Sie kann aber mit Hilfe von Polarisationsfiltern, die nur Licht einer einzigen Schwingungsrichtung durchlassen, polarisiert werden.

Man unterscheidet verschiedene Arten der Polarisation einer Strahlung. Sie sind gegeben durch das Verhalten der Feldstärke der elektromagnetischen Welle, die die Summe aller von den Atomen ausgesandten Einzelwellen darstellt.

Wenn bei der Ausbreitung des Lichtes die Feldstärke der elektromagnetischen Welle in nur einer Richtung schwingt, so spricht man von *linear polarisiertem* Licht. Stellt man ein Polarisationsfilter in den Lichtstrahl, so kann man durch seine Drehung die Intensität des durchgehenden Lichtes verändern. Beim *elliptisch polarisierten* Licht läuft der Feldstärkevektor auf einer Ellipse um. Einen Sonderfall des elliptisch polarisierten Lichtes bildet das *zirkular polarisierte* Licht. Hierbei beschreibt der Vektor der Feldstärke einen Kreis. In diesem Fall läßt sich die Intensität durch Drehen eines Polarisationsfilters im Strahlengang nicht ändern. Einige Laser geben bei geeigneter technischer Anordnung (z. B. Brewsterfenster beim Gaslaser) ihre gesamte gebündelte Strahlung in Form von linear polarisiertem Licht ab.

Eine Strahlung, bei der die elektrische Feldstärke der elektromagnetischen Welle in einer einzigen, festen Richtung im Raum orientiert ist, nennt man linear polarisiert. Einige Lasertypen geben linear polarisiertes Licht ab.

2. Physikalische Grundlagen des Lasers

2.1. Wechselwirkung von Atomen mit Licht

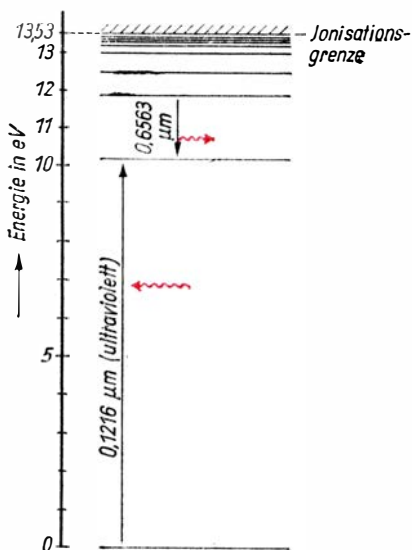
Wenn man untersuchen will, wie eine bestimmte Substanz auf eine Einwirkung von außen reagiert, dann ist es oft notwendig, die Vorgänge in den Atomen zu betrachten. Dazu gehört auch die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Deshalb soll erläutert werden, wie Licht entsteht und wie ein Atom auf Licht reagiert.

Alle Vorgänge, die sich im atomaren Bereich abspielen, kann man nur mit Modellen umschreiben. Diese Modelle werden auf Grund der schon erforschten Eigenschaften der Materie aufgestellt. Man kann mit ihnen auf neue, unerforschte Verhaltensweisen der Substanzen schließen. Solche Modelle können nur einen Teil der Wirklichkeit darstellen. Das gilt auch für das vom Schulunterricht her bekannte Atommodell. Es reicht aber für die durchzuführenden Überlegungen aus.

Ein Atom besteht aus einem Kern und den ihn umgebenden Elektronen. Die Elektronen des Atoms haben eine definierte Energie. Man beschreibt diese Tatsache in der Weise, daß man sagt, das Elektron kreist auf einer Bahn um den Kern. Dabei ist die Bahn (je nach Elektronenenergie) mehr oder weniger vom Kern entfernt. Weiter spricht man davon, daß diese Bahnen Schalen bilden, die um den Kern gelagert sind. Die Gesamtheit der mit diesen Modellvorstellungen umschriebenen Elektronenzustände entspricht einem jeweiligen Energiezustand des Atoms, d. h., im Atom ist eine bestimmte Menge Energie gespeichert (zusätzlich zu der im Kern des Atoms gespeicherten Energie).

Im Normalzustand, wenn keine Einwirkung von außen besteht, verfügt das Atom über eine definierte Grundenergie. Es hat, je nach seiner Stellung im Periodensystem, eine feste Anzahl von Elektronen, die bestimmte Bahnen einhalten. Trifft ein Lichtteilchen, ein Foton, auf das Atom, so wird diesem Energie zu-

Bild 10. Vereinfachtes Energieschema des Wasserstoffs



geführt. Ist die zugeführte Energie groß genug, um ein Elektron von einer Bahn in eine andere zu überführen, so absorbiert das Atom diese Energie und speichert sie. Damit hat das Atom einen höheren Energiezustand erreicht.

Das Atom kann keine beliebige Menge von Energie aufnehmen. Die Energiezustände, die das Atom haben kann, sind vorbestimmt und hängen von der Stellung des Atoms im Periodensystem ab. Sie werden in einem Energieschema dargestellt (Bild 10). Auf einer senkrechten Skale trägt man die Energie auf. Waagerechte Striche bezeichnen die Energiezustände des Atoms. Die Energie des Atoms in seinem Grundzustand spielt für diese Vorgänge keine Rolle und kann als Nullniveau angesetzt werden. Übergänge des Atoms aus dem einen in den anderen Energiezustand werden mit Hilfe von Pfeilen dargestellt. Eine Absorption von Energie durch das Atom bringt eine Erhöhung seiner Eigenenergie mit sich. Sie wird deshalb als nach oben gerichteter Pfeil ausgedrückt. Eine Abstrahlung, d. h. eine Emission von Licht, vermindert die Energie des Atoms und wird als nach unten gerichteter Pfeil dargestellt.

Befindet sich das Atom im Grundzustand, so spricht man von einem nicht angeregten Atom, ein Atom in einem höheren Energiezustand wird als angeregt bezeichnet.

Auf welche Weise kann man ein Atom anregen? Zuerst muß man die Zuführung von Wärmeenergie erwähnen. Jeder reale Körper hat eine gewisse Menge an Wärmeenergie in sich gespeichert. Er weist eine bestimmte Temperatur auf, die höher liegt als der absolute Nullpunkt ($0\text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$).

Am Beispiel eines Gases sollen diese Vorgänge näher erläutert werden. Man kann sich vorstellen, daß die Atome, aus denen das Gas besteht, chaotisch nach allen Seiten durcheinanderfliegen. Dieser Wärmebewegung entspricht eine bestimmte Energie der Gasatome. Bewegt sich ein Körper, so hat er eine bestimmte Energie, die als *kinetische Energie* bezeichnet wird. Stoßen zwei Atome zusammen, so ist es unter anderem möglich, daß ein Teil ihrer kinetischen Energie dazu verwendet wird, das eine Atom anzuregen, d. h. in einen energetisch höheren Zustand zu überführen.

Gleichfalls durch einen Zusammenstoß, jedoch von Teilchen unterschiedlicher Art, wird ein Atom angeregt, wenn es mit einem Elektron zusammenstößt. Auch hierbei wird ein Teil der kinetischen Energie des Elektrons an das betreffende Atom abgegeben, und dieses gerät in einen angeregten Zustand. Dieser Vorgang spielt in Gasentladungsröhren und im Lichtbogen eine entscheidende Rolle.

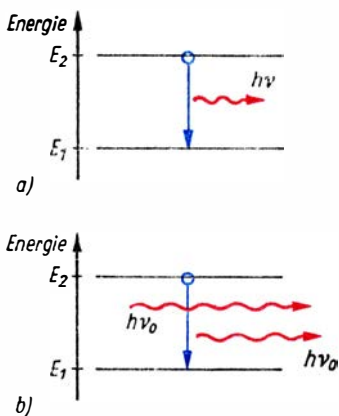


Bild 11. Spontane (a) und induzierte Emission (b)

Eine andere Art der Anregung ist die Absorption von Licht durch das Atom. Hierbei wird ein Lichtquant »verschluckt« und die Energie im Atom gespeichert. Dieser Vorgang ist aber nur dann möglich, wenn die Energie des Quants genau so groß ist wie der energetische Abstand zweier möglicher Zustände des Atoms. Aus Bild 10 kann man z. B. entnehmen, daß vom Atom ein Quant mit der Energie $E = 2,5 \text{ eV}$ absorbiert werden kann, da es dann von dem einen Zustand in den anderen Zustand übergehen kann. Dieser Energie würde nach Gleichung (4) eine Frequenz von

$$\nu = \frac{E}{h} = 0,6 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

entsprechen und damit eine Wellenlänge von

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = 0,5 \text{ } \mu\text{m} .$$

Gibt es keinen passenden Übergang im Atom, so kann ein Photon dieser Wellenlänge nicht absorbiert werden.

Man muß allerdings bei der Betrachtung dieser Prozesse folgendes beachten: Die Anregungsenergie darf einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Von einer gewissen Grenze an, die »Ionisationsenergie« genannt wird, verläßt das angeregte Elektron das Atom. Das zurückbleibende Atom, das nun eine negative Elementarladung weniger hat und demzufolge positiv geladen ist, nennt man *Ion*.

Wie wird sich das angeregte Atom weiter verhalten? Jedes beliebige physikalische System strebt den Zustand niedrigster Energie an. Die Tatsache gilt auch für das angeregte Atom. Nach einer bestimmten Zeit, die man die *Lebensdauer* des angeregten Zustandes nennt, geht das Atom von selbst, ohne äußere Einwirkung, in den Grundzustand zurück. Dabei wird die gespeicherte Energie wieder frei. Sie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung (beispielsweise von Licht) abgestrahlt. Dieser Vorgang ist die *spontane Emission*.

Alle gewöhnlichen Lichtquellen, wie Glühlampen und Leuchtstoffröhren, beruhen in ihrer Funktion auf der spontanen Emission. In der Glühlampe wird beispielsweise die Energie durch Aufheizen eines Glühdrahtes mit Hilfe von elektrischem Strom eingespeist und als Licht durch die spontane Emission wieder abgegeben.

2. Physikalische Grundlagen des Lasers

Einstein schloß aus theoretischen Betrachtungen, daß ein Übergang des Atoms von einem energetisch höheren in einen energetisch niedrigeren Zustand nicht nur spontan (nach Ablauf der Lebensdauer) erfolgen kann. Ein derartiger Übergang kann auch durch ein von außerhalb kommendes, schon vorhandenes Foton hervorgerufen werden. Dieses Foton muß dabei wie bei einer Absorption eine Energie aufweisen, die dem Energieunterschied der entsprechenden Atomzustände gleich ist. Es muß gelten:


$$E_{\text{Foton}} \equiv h\nu = E_2 - E_1$$

E_{Foton} (bzw. $h\nu$) Energie des Fotons

E_2, E_1 Energie der entsprechenden Atomzustände.

Trifft ein Foton dieser Energie auf ein Atom, das sich im oberen Energiezustand befindet, so geht das Atom unter Ausstrahlung von Licht in den unteren Zustand über (genauer: Es gibt eine bestimmte Wahrscheinlichkeit für diesen Prozeß). Das neu entstandene Foton weist die gleichen Eigenschaften (z. B. Energie, Richtung, Polarisation) auf wie das Foton, das den Übergang hervorgerufen hatte. Die Photonen sind nicht unterscheidbar. Einen solchen Vorgang nennt man *induzierte* oder auch *stimulierte Emission* (Bild 11).

Der Prozeß der stimulierten Emission ist dem Prozeß der Absorption eines Fotons direkt entgegengesetzt. Bei der Absorption geht das Atom vom unteren in den oberen Zustand über (dabei wird ein Foton »verschluckt«), bei der induzierten Emission geht es vom oberen in den unteren Zustand über (dabei wird ein Foton freigesetzt). Beide Prozesse gehen unter dem Einfluß eines von außen kommenden Fotons vor sich. Es zeigt sich ferner, daß beide Prozesse die gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen. Ob ein Foton mit der entsprechenden Energie vom Atom absorbiert wird oder ob induzierte Emission erfolgt, hängt demzufolge nur davon ab, ob sich das Atom vor der Wechselwirkung im unteren oder im oberen Zustand des betreffenden Übergangs befindet. Der Prozeß der induzierten Emission ist die Voraussetzung für die Verstärkung von Licht beim Durchgang durch ein Medium. Ob im Medium die Verstärkung oder die Absorption überwiegt, hängt dann also davon ab, wie viele Atome sich im oberen und wie viele Atome sich im unteren Energiezustand des entsprechenden Übergangs befinden.



Die Energiezustände des Atoms werden im Energieschema dargestellt. Absorption und Emission von Licht sind mit Übergängen des Atoms von einem Energiezustand in einen anderen verbunden.

Ist ein Atom angeregt, so geht es nach einer bestimmten Zeit (Lebensdauer) wieder in den nichtangeregten Zustand zurück. Die dabei freiwerdende Energie wird in Form von elektromagnetischer Strahlung (z. B. von Licht) abgegeben. Diesen Vorgang nennt man »spontane Emission«. Der Übergang des Atoms kann auch unter dem Einfluß eines von außen kommenden Photons vor sich gehen. Dabei wird ein weiteres Lichtquant frei. Diesen Vorgang nennt man »induzierte Emission«. Er ist der Absorption entgegengesetzt.

2.2. Lichtverstärkung

Wenn man Licht durch eine Substanz schickt, dann wird seine Intensität gewöhnlich geschwächt (Bild 12a). Das bezieht sich auch auf lichtdurchlässige Körper, wie Glas, Wasser, Luft. Den extremen Fall der »Lichtschwächung« stellen lichtundurchlässige Stoffe dar. Hinter ihnen ist die Lichtintensität Null. Die Intensität des durchgelassenen Lichtes I_D kann man zu der Intensität des auftretenden Lichtes I_0 in Beziehung setzen. Man erhält den *Durchlaßkoeffizienten* D :

$$D = \frac{I_D}{I_0}. \quad (9)$$

Für lichtundurchlässige Stoffe ist $I_D = 0$, daraus folgt $D = 0$. Ist das Medium ideal durchlässig, so gilt $I_D = I_0$, also $D = 1$. Für gewöhnliche Medien kann der Durchlaßkoeffizient nie größer als 1 sein. In einem Medium mit $D < 1$ geht dem Lichtstrahl Energie verloren. Sie kann sich beispielsweise über Absorptionsprozesse in Wärmeenergie umwandeln, oder ein Teil des Lichtes wird durch Streuung bzw. Reflexion in eine andere Richtung gelenkt.

Es ist charakteristisch für den Laser, daß das Lasermaterial das auftreffende Licht nicht abschwächt, sondern verstärkt. In diesem Fall ist der Durchlaßkoeffizient größer als 1. Man spricht von einem »aktiven Medium« (Bild 12b).

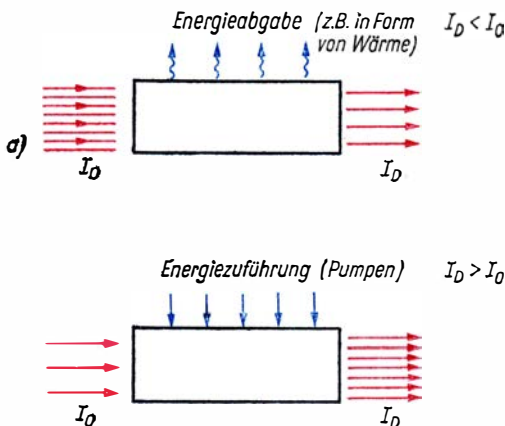


Bild 12. Prinzip des Laser-Verstärkers
Durchgang des Lichts durch ein absorbierendes (passives) Medium (a)
und durch ein verstärkendes (aktives) Medium (b)

Die Verstärkung V kann man folgendermaßen definieren:

$$V = \frac{I_D}{I_0} - 1. \quad (10)$$

Allerdings ist bei diesem Prozeß zu bedenken, daß Licht auf ein Medium fällt und beim Durchgang durch dieses verstärkt wird. Es kommt also Energie hinzu, d. h., die erforderliche Energie muß dem Medium zugeführt werden. Sie wird in Form von Licht, elektrischem Strom, chemischer Energie o. ä. eingespeist. Diese Einspeisung nennt man *Pumpen*.

Den Prozeß der Lichtverstärkung beim Durchgang durch ein »aktives Medium« kann man erklären, wenn man wiederum die Vorgänge in den Atomen betrachtet. Es soll als Beispiel angenommen werden, daß in eine gasförmige Substanz, die aus Atomen einer einzigen Sorte besteht, Licht eingestrahlt wird. Die Photonen mögen die Energie E_{Photon} aufweisen. Im Energiespektrum der Atome möge ein Übergang zwischen den Zuständen E_1 und E_2 möglich sein, wobei nach Gleichung (8) gelten soll:

$$E_{\text{Photon}} = E_2 - E_1.$$

In diesem Fall können die Photonen entweder von den Atomen absorbiert werden, oder sie können induzierte Emission hervorrufen. Durch Absorption ist eine Abnahme der Intensität des Lichtes nach dem Durchgang durch die Substanz zu verzeichnen. Durch induzierte Emission erfolgt eine Zunahme der Photonenzahl und damit der Intensität. Die Wahrscheinlichkeiten der Absorption und der induzierten Emission bei der Wechselwirkung des Photons mit dem Atom sind gleich. Es kommt nur darauf an, ob sich das Atom vor der Wechselwirkung im oberen oder im unteren Energiezustand befindet. Ob also beim Durchgang durch die Substanz eine Erhöhung oder eine Abnahme der Intensität des Lichtes erfolgt, hängt davon ab, wieviel Atome den jeweiligen Energiezustand einnehmen. Befinden sich mehr Atome im unteren Energiezustand (Energie — E_1) als im oberen (Energie — E_2), so überwiegt die Absorption, und die Lichtintensität wird geschwächt. Ist dagegen die Anzahl der Atome im oberen Zustand größer als im unteren, so überwiegt die induzierte Emission, und das Licht wird beim Durchgang durch die Substanz in seiner Intensität verstärkt.

Die Anzahl der Atome bzw. Moleküle, die in einer bestimmten Menge einer Substanz einen bestimmten Energiezustand einnehmen, bezeichnet man als die *Besetzungszahl* N dieses Zustandes. Ist N_2 die Besetzungszahl des oberen Energiezustandes und N_1 die Besetzungszahl des unteren Zustandes, so muß als Voraussetzung für das Zustandekommen einer Lichtverstärkung erfüllt sein:

$$\blacktriangleright \quad N_2 > N_1. \quad (11)$$

In einer gasförmigen Substanz, auf die keine Einwirkung von außen besteht (z. B. durch Licht) und die die Temperatur 0 K (absoluter Nullpunkt) angenommen hat, würden sich alle Atome im energetischen Grundzustand befinden. Solche Bedingungen können jedoch schon deshalb nicht realisiert werden, da man die Temperatur dem absoluten Nullpunkt nur nähern, ihn aber nicht erreichen kann. Unter realen Bedingungen, bei denen die Temperatur verschieden von Null ist, sind die Atome auf die möglichen Energiezustände nach einem bestimmten Gesetz verteilt, der *Boltzmannschen Verteilung* (Bild 13a):

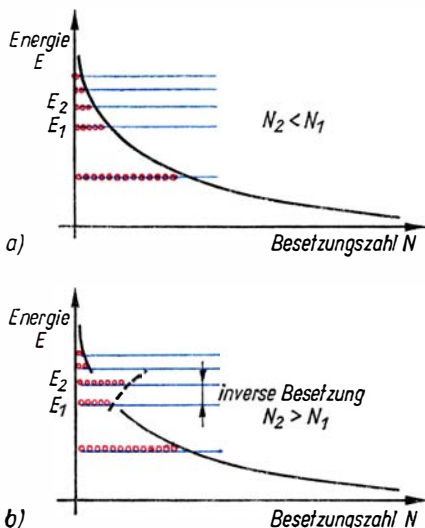
$$\blacktriangleright \quad N_1 = N_0 \exp \left\{ -\frac{E_1 - E_0}{kT} \right\} \quad (12)$$

2. Physikalische Grundlagen des Lasers

Bild 13. Boltzmannsche Verteilung

a) normale Verteilung der Atome auf die möglichen Energiezustände

b) gestörte Verteilung der Atome (inverse Besetzung zwischen E_1 und E_2)



N_0 Besetzungszahl des Grundzustandes

N_i Besetzungszahl des i -ten Zustandes

E_i, E_0 Energie des i -ten bzw. des Grundzustandes

T Temperatur in K

k Boltzmann-Konstante

($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

Dieses Gesetz beschreibt die Verteilung der Atome auf ihre möglichen Energiezustände für den Fall, daß von außen lediglich die Temperatur, aber sonst keine weiteren Einwirkungen gegeben sind. Eine Schlußfolgerung daraus ist, daß ein Zustand höherer Energie immer von weniger Atomen besetzt wird als ein Zustand niedrigerer Energie. Das bedeutet, daß beim Durchgang von Licht die Absorption überwiegt und die Intensität des Lichtes vermindert wird.

Um Lichtverstärkung zu erreichen, muß man eine anomale Verteilung der Atome auf die einzelnen Energiezustände schaffen. Für die beiden Energiezustände muß gelten, daß die Besetzungszahl des oberen Zustandes höher ist als des unteren (Bild 13b).

Das ist nur möglich, wenn den Atomen von außen Energie zuge-

führt wird. In diesem Fall spricht man davon, daß zwischen den betreffenden Energiezuständen eine *inverse* (umgekehrte) *Besetzung* oder eine *Inversion* geschaffen wurde. Die inverse Besetzung zwischen zwei Energiezuständen eines Atom- bzw. Molekülsystems kann mit verschiedenen Methoden erzeugt werden, die man *Pumpen* nennt. Auf sie wird bei der Erläuterung der einzelnen Laserarten noch eingegangen.

Was geschieht, wenn auf ein solches System ein Lichtquant trifft? Es existiert eine bestimmte Wahrscheinlichkeit dafür, daß im System induzierte Emission stattfindet.

Durch den Vorgang der induzierten Emission entstehen anstelle eines Lichtquants zwei Lichtquanten. Die entsprechende Energie wird vom Atom in Form von Strahlung abgegeben. Die induzierte Emission ist die Grundlage der Lichtverstärkung, sie ist die grundlegende Voraussetzung für den Betrieb des Lasers. Der Vorgang der induzierten Emission wiederholt sich ständig. Da die Wahrscheinlichkeit für diesen Vorgang um so größer ist, je mehr Photonen schon vorhanden sind, wächst die Zahl der entstehenden Photonen lawinenartig an.

Auf diese Weise wird die Arbeitsweise des Laser-Verstärkers verständlich. Das englische Wort *Laser* bedeutet:

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Lichtverstärkung durch stimulierte Emission der Strahlung. (Beide Aussprachemöglichkeiten sind richtig: 'le:zər oder 'la:zər.) Entsprechend seiner wörtlichen Bedeutung arbeitet der Laser-Verstärker folgendermaßen (Bild 12b). Licht mit bestimmter Intensität wird auf ein Medium geschickt, das durch Energiezuführung eine inverse Besetzung der entsprechenden Atomzustände aufweist, d. h. Licht verstärken kann. Das aus dem Medium austretende Licht wird in der gleichen Richtung abgestrahlt, die das einfallende Licht einnimmt, und hat eine größere Intensität.

Heute versteht man aber im allgemeinen unter »Laser« die Bezeichnung für eine spezielle Lichtquelle. Die Erzeugung von Licht geschieht im *Laser-Generator*. Die Grundlagen seiner Arbeitsweise werden im Abschnitt 2.3. betrachtet.

Voraussetzung für eine Lichtverstärkung ist eine inverse Besetzung. Das bedeutet, daß sich mehr Atome in einem höheren Energiezustand befinden als in einem niedrige-

ren. Der lawinenartige Prozeß der Verstärkung durch induzierte Emission bildet die Voraussetzung für das Entstehen der Laserstrahlung.

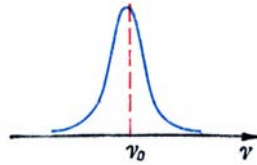
2.3. Resonator

Jedem ist der Begriff der »Resonanz« schon einmal begegnet. Es kann der elektrische Schwingkreis sein, der in Resonanz gerät, und das unangenehme Pfeifen der Wasserleitung ist beispielsweise auch darauf zurückzuführen. Was versteht man unter diesem Begriff? Prinzipiell muß festgestellt werden, daß jedes System, das Schwingungen ausführen kann, auch resonanzfähig ist. Das einfachste Beispiel ist wieder das Pendel. Ein Pendel kann mechanische Schwingungen ausführen. Angenommen, man stößt es an, d. h., man führt einmalig Energie zu und überläßt es dann sich selbst. Das Pendel schwingt in bestimmten Zeitabständen hin und her, es schwingt mit einer bestimmten Frequenz. Die Frequenz ist abhängig von den Parametern des Pendels. Man nennt sie die Eigenfrequenz des Pendels.

Wenn man auch die Anregungsenergie in bestimmten Abständen zuführt (in dem Beispiel des Pendels geschieht das durch wiederholtes Anstoßen in definierten Zeitabständen), so erhält man eine *erzwungene Schwingung* mit der gleichen Frequenz, mit der auch die Anregungsenergie zugeführt wird.

Verändert man die Frequenz der Zuführung der Anregungsenergie (stößt also das Pendel in größeren oder kleineren Zeitabständen an), so bleibt die Amplitude der erzwungenen Schwingung klein, solange die Anregungsfrequenz nicht in die Nähe der Eigenfrequenz des Systems gerät. Regt man aber das System so an, daß die Frequenz der zugeführten Energie gleich der Eigenfrequenz des Systems ist, so wächst die Amplitude stark an (Bild 14). Das System gerät in *Resonanz* mit der Anregung. Ist nur eine geringe Dämpfung vorhanden, so kann die Amplitude soweit anwachsen, daß das System selbst zerstört wird. Solche unerwünschten »Resonanzen« spielen bei bestimmten Maschinen, die auf hohen Touren laufen, eine große Rolle. Man muß beim Anlaufen der Maschinen gezielte Maßnahmen unternehmen, um solche Schädigungen zu verhindern. Im allgemeinen ist aber die Amplitude der Schwingung durch die Dämpfung (die mit Energieabgabe verbunden ist) ausreichend begrenzt.

Bild 14. Resonanzkurve
 ν_0 Eigenfrequenz ν Frequenz der
 Anregung



Ein System kann nicht nur eine, sondern auch mehrere Eigenfrequenzen aufweisen. Beispielsweise hat jedes Musikinstrument eine Vielzahl von Eigenfrequenzen, die durch die Anregung in Resonanz versetzt und von uns als verschiedene Töne wahrgenommen werden. Ein System, in dem bestimmte Eigenschwingungen angeregt werden können, bezeichnet man als *Resonator*. Hier soll der optische Resonator behandelt werden, d. h. ein System, das für elektromagnetische Schwingungen im optischen Bereich ausgelegt ist. Der optische Resonator wird aus Spiegeln gebildet (Bild 15). Die einfachste Konfiguration besteht aus zwei ebenen Spiegeln, die genau parallel zueinander ausgerichtet sind. Man nennt diese Anordnung *Fabry-Perot-Resonator*. Läuft eine elektromagnetische Welle genau senkrecht auf einen der beiden Spiegel zu, so wird sie



Bild 15. Optischer Resonator

von ihm reflektiert, und zwar in die gleiche Richtung, aus der sie gekommen war. Diese Welle läuft nunmehr auf den anderen Spiegel zu und wird von ihm wiederum reflektiert. Zwischen den hin- und herlaufenden Wellen findet Überlagerung statt. Bei bestimmten Phasenbeziehungen zwischen diesen Wellen kommt eine *stehende Welle* zustande. An bestimmten Stellen im Raum bilden sich *Knoten*, dort ist die Feldstärke Null. Zwischen diesen Knoten entstehen *Bäuche*, in der Mitte zwischen den Knoten erreicht die Feldstärke ein Maximum. Die Abstände zwischen den Knoten sind gleich der halben Wellenlänge der umlaufenden Wellen.

Im Zweispiegelresonator gilt die Bedingung, daß die Feldstärke auf den Spiegeln Null sein muß. Auf den Spiegeln müssen sich also Knoten der stehenden Welle bilden. Man erhält die Bedingung dafür, daß eine elektromagnetische Welle im optischen Resonator in Resonanz gerät. Der Spiegelabstand muß gleich dem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge sein. Als Gleichung kann man diese Bedingung wie folgt schreiben:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (13)$$

L Länge des Resonators (Spiegelabstand)

λ Wellenlänge

n ganze Zahl.

Die dieser Wellenlänge entsprechende Frequenz nennt man *Eigenfrequenz* des optischen Resonators; die dazugehörige Schwingung wird als *Eigenschwingung* bezeichnet. Ein Resonator weist eine unendliche Zahl möglicher Eigenschwingungen auf. Die drei einfachsten Formen der Eigenschwingungen sind in Bild 16 dargestellt.

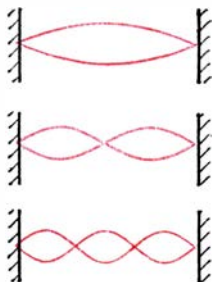


Bild 16. Einige mögliche Eigenschwingungen (Moden) eines Resonators

Unter Berücksichtigung der Beziehung zwischen Frequenz und Wellenlänge für elektromagnetische Wellen nach Gleichung (3) $\lambda = c/\nu$ erhält man die Frequenzen ν_E , die zu den Eigenschwingungen gehören, zu

$$\nu_E = n \frac{c}{2L} . \quad (14)$$

Der Abstand zweier benachbarter Eigenschwingungen (die ganzen Zahlen unterscheiden sich um 1) ist somit:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (15)$$

$\Delta\nu$ Frequenzabstand zweier benachbarter Eigenschwingungen
 L Resonatorlänge.

Damit ist eine Formel gefunden, die für das Verständnis vieler Vorgänge im Laser wichtig ist. Es zeigt sich, daß bei großen Resonatorlängen der Abstand der Eigenfrequenzen klein ist und daß er mit kleiner werdender Resonatorlänge anwächst.

Der optische Resonator bildet einen wichtigen Teil des Laser-Generators. Die Eigenschwingungen, die im Resonator auftreten, bezeichnet man auch als *Moden*.

In den meisten Lasertypen werden Resonatoren benutzt, deren Spiegel nicht eben, sondern gekrümmt sind. Diese Konfigurationen haben gegenüber der oben beschriebenen den Vorteil, daß man mit ihnen Laser aufbauen kann, die weniger Verluste durch Beugungserscheinungen aufweisen als Laser mit ebenen Spiegeln. Man kann also mit gekrümmten Spiegeln höhere Laser-Ausgangsleistungen erzielen. Ein weiterer Vorteil der Resonatoren mit gekrümmten Spiegeln besteht in ihrer einfacheren Justierbarkeit.

Es soll hier noch erwähnt werden, daß in solchen Resonatoren auch Eigenschwingungen quer zur Resonatorachse (sogenannte *transversale* Eigenschwingungen) auftreten können. Sie machen sich bemerkbar in der Intensitätsverteilung über den Querschnitt des Laserstrahls. Der Strahl erzeugt dann auf einem Schirm ein Bild von Lichtflecken mit verschiedensten Symmetrieescheinungen. Oft wirken sich diese Effekte störend aus. Man strebt meist den *transversalen Grundmode* an. Hier ist die Intensitätsverteilung über den Querschnitt des Laserstrahls axialsymmetrisch zur Strahlachse. Die Intensitätsverteilung ist dann durch eine charakteristische Glockenkurve (die »Gauß-Verteilung«) gegeben, d. h., die Intensität ist in Strahlmitte maximal und fällt nach außen hin ab.

Man muß daher für jeden Laser in Abhängigkeit vom Anwendungszweck die Resonatorkonfiguration optimieren, um maximale Leistung und den gewünschten Transversalmode zu erreichen.



Der optische Resonator gerät in Resonanz mit der elektromagnetischen Welle, wenn seine Länge gleich dem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge ist. Die Frequenzen der Eigenschwingungen sind, wie auch ihr Abstand gegeneinander, umgekehrt proportional der Resonatorlänge.

2.4. Oszillator

Unter einem Oszillator versteht man in der Technik im allgemeinen ein Gerät zur Erzeugung von Schwingungen. Auch das Gerät, das mit dem Namen »Laser« bezeichnet wird, ist dazu bestimmt, Schwingungen zu erzeugen, und zwar Schwingungen, deren Frequenz der Wellenlänge des Lichts entspricht. Der technische Aufbau eines Oszillators soll am Beispiel eines Rundfunkoszillators (Bild 17) beschrieben werden. Das wesentliche Element des Oszillators ist in diesem speziellen Fall die Rundfunkröhre bzw. der Transistor. Es ist zur Verstärkung elektrischer Signale geeignet. Ein weiteres Element dieses Oszillators ist der Schwingkreis, bestehend aus Kondensator und Spule. Er hat die Eigenschaft, nur für eine bestimmte, vorgegebene Frequenz elektrischer Schwingungen in Resonanz zu geraten, d. h., er wirkt als selektierendes

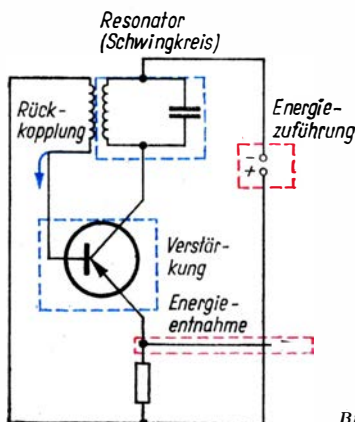


Bild 17. Generator (Rundfunk)

Element. Weiterhin ist eine Rückkopplung der Schwingungen vorgesehen. Sie stellt eine Verbindung zwischen dem Ausgang der Verstärkerstufe zu ihrem Eingang her. Außerdem muß dem Transistor als verstärkendem, d. h. aktivem Element Energie zugeführt werden. Es wird also eine Speisespannung angelegt. Gleichfalls ist eine Verbindung zu nachfolgenden Baustufen für die Abnahme der Schwingungen, d. h. der Nutzenergie, vorgesehen.

Ein Oszillator für elektromagnetische Schwingungen besteht aus

- dem verstärkenden Element
- dem selektierenden Element
- der Rückkopplung
- der Energiezuführung und der Abnahme der Nutzenergie.

Die elektromagnetischen Schwingungen entstehen im Rundfunkoszillator auf folgende Weise: Man stelle sich vor, daß am Eingang des Verstärkers eine Schwingung geringer Amplitude auftritt. Diese Schwingung wird verstärkt. Über den Kreis der Rückkopplung gelangt dieses verstärkte Signal wiederum an den Eingang. Der Vorgang wiederholt sich. Die Amplitude der Schwingung wächst immer mehr an. Zu bemerken ist, daß über die Rückkopplung das Ausgangssignal immer phasenrichtig an den Eingang gelangen muß, d. h., die Schwingungen dürfen sich nicht gegenseitig auslöschen. Durch ein einmaliges Anstoßen des Schwingvorgangs ist der Oszillator in der Lage, selbsttätig kontinuierlich Schwingungen zu erzeugen. Es tritt Selbsterregung des Oszillators ein.

Um die Selbsterregung in Gang zu setzen, muß ein geringes Anfangssignal vorhanden sein. Es wird durch das Verstärkerrauschen bereitgestellt. Dieses Rauschen wird in Transistoren oder Röhren durch statistische Schwankungen des Stroms bzw. der Spannung hervorgerufen. Diese sind frequenzmäßig über einen großen Bereich des Spektrums verteilt. Die Frequenz der selbst-erregten Oszillatorschwingung wird aber durch die Resonanzfrequenz des Schwingkreises, d. h. des selektiven Elements, bestimmt. Beim Rundfunkoszillator ist der Schwingkreis in die Rückkopplungsverbindung zwischen Verstärkerausgang und Verstärkereingang geschaltet. Die Schwingungen am Verstärkerausgang, deren Frequenz der Resonanzfrequenz des Schwingkreises entspricht, gelangen mit größerer Amplitude an den Verstärkereingang als Schwingungen mit anderen Frequenzen.

In jedem Oszillator treten Energieverluste auf. Im Fall des Rundfunkoszillators sind es vor allem die Verluste, die durch Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie entstehen. Wenn die Verstärkung der Schwingungen kleiner ist als die Gesamtverluste, die sie im Oszillator erfahren, so kann keine Selbsterregung stattfinden. Als *Schwelle* des Oszillators bezeichnet man den Zustand, bei dem die Verluste im System gleich der Verstärkung im System sind. Ist die Verstärkung der Schwingungen größer als der Verlust, so stellt sich ein Gleichgewicht ein:

$$\text{Zugeführte Energie} = \text{Nutzenergie} + \text{Verlustenergie}$$

Das heißt, die abgegebene Nutzenergie ist um so größer, je mehr die Verstärkung den Verlust überwiegt, d. h., je mehr sich der Oszillator »von der Schwelle entfernt«. Als *Wirkungsgrad* des Oszillators kann man das Verhältnis

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{zugeführte Energie}} \quad (16)$$

definieren. Es wird immer angestrebt, einen möglichst großen Wirkungsgrad zu erzielen.



Ein Oszillator besteht aus mehreren Elementen. Durch ihr Zusammenwirken entsteht bei geeigneter Anregung eine Schwingung. Als Schwelle des Oszillators wird der Zustand bezeichnet, bei dem Verstärkung und Verluste gleich sind.

2.4.1. Laser-Oszillator

Was für den Oszillator allgemein gültig ist, gilt auch für den speziellen Fall des Laser-Oszillators. Dieser besteht aus einem verstärkenden und aus einem selektierenden Element. Als verstärkendes Element dient das aktive Medium. Auf Grund der inversen Besetzung der Atomzustände ist das aktive Medium in der Lage, durch den Prozeß der induzierten Emission eingestrahktes Licht geringer Intensität in Licht größerer Intensität umzuwandeln. Als selektives Element dient der optische Resonator. Nur für ganz bestimmte Frequenzen der in ihm hin- und herlaufenden Lichtwellen gerät er

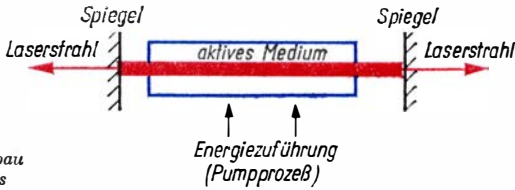


Bild 18
Schematischer Aufbau
des Laser-Oszillators

in Resonanz. Die Rückkopplung wird ebenfalls durch den Resonator gewährleistet. Das aktive Medium bringt man zwischen beide Resonatorspiegel, die sehr genau justiert sein müssen (Bild 18).

Die Zuführung von Energie an das aktive Medium erfolgt durch den Pumpprozeß. Je nach Laserart wird die Energie durch Stromfluß, Ablaufen chemischer Reaktionen, Lichteinstrahlung und andere Prozesse bereitgestellt.

Die Nutzenergie ist die Energie des Laserstrahls. Er verläßt den Laser-Oszillator im allgemeinen durch die Resonatorspiegel, die daher eine gewisse Durchlässigkeit aufweisen müssen. Ein beträchtlicher Teil der zugeführten Energie wird in Form von Wärme oder Seitenlicht als Verlustenergie abgestrahlt.

Möge an dem einen Ende des aktiven Mediums Licht der entsprechenden Frequenz eingestrahlt werden. Beim Durchgang durch das aktive Medium wird es in seiner Intensität verstärkt. Das verstärkte Licht trifft auf den Resonatorspiegel, wird reflektiert, und zwar wieder in das aktive Medium hinein. Dort wird das Licht wiederum verstärkt, der Prozeß wiederholt sich. Es kommt zur Selbsterregung des Laser-Oszillators. Das Verstärkerrauschen, das den Prozeß der Selbsterregung in Gang setzt, ist beim Laser die spontane Emission. Die Photonen, die durch die spontane Emission von den Atomen abgestrahlt werden, stellen das Anfangssignal dar, das nach wiederholter Verstärkung zur Selbsterregung führt.

Die Verstärkungseigenschaft des aktiven Mediums ist nur auf einen geringen Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich beschränkt. Dieser Bereich entspricht der energetischen Breite des Übergangs zwischen den beiden Laserzuständen, d. h., er entspricht der Breite der Emissionslinie des Laserübergangs. Ihre Halbwertsbreite wird bestimmt von den Ausstrahlungseigenschaften, die für jedes Material charakteristisch sind. Die Halbwertsbreite der Verstärkungs-

kurve beträgt beispielsweise für den He-Ne-Laser 1,5 GHz. Optische Resonatoren weisen dagegen wesentlich geringere Halbwertsbreiten der Resonanzkurve auf. Sie liegen (wiederum für das Beispiel He-Ne-Laser) in der Größenordnung von 10 MHz. Das heißt, daß die Frequenz der Laserstrahlung im wesentlichen durch die Resonanzfrequenz des optischen Resonators bestimmt wird, die innerhalb der Verstärkungslinie des aktiven Mediums liegt.

Dabei gilt folgende Formel:

$$\nu_L = \nu_R + (\nu_A - \nu_R) \frac{\Delta\nu_R}{\Delta\nu_A} \quad (17)$$

ν_L Laserfrequenz

ν_R Resonanzfrequenz des optischen Resonators

ν_A Mittenfrequenz der Verstärkungslinie

$\Delta\nu_R, \Delta\nu_A$ Halbwertsbreiten der Resonanzkurve bzw. der Verstärkungslinie.

Die Halbwertsbreite der Resonanzkurve ist viel kleiner als die Halbwertsbreite der Verstärkungslinie

$$\Delta\nu_R \ll \Delta\nu_A. \quad (18)$$

Daher kann man in erster Näherung schreiben:

► $\nu_L = \nu_R. \quad (19)$

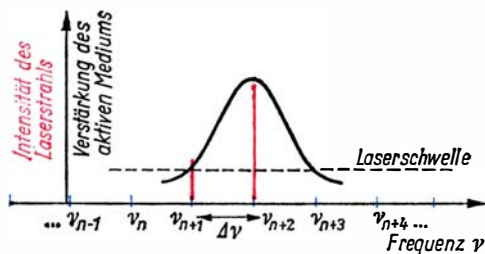


Bild 19. Entstehung der Laserlinien (rot)
($\nu_n + m$ Resonanzstellen des Resonators)

Die Laserfrequenz ist demnach in erster Näherung gleich der Resonanzfrequenz des optischen Resonators (Bild 19). Diese Frequenz wird aber – s. Gleichung (14) – bestimmt durch

$$\nu_R = n \frac{c}{2L}$$

n ganze Zahl

c Lichtgeschwindigkeit

L Resonatorlänge.

Die Halbwertsbreite der Laserstrahlung selbst ist durch die Funktion des Oszillators bedingt. Sie ist um Zehnerpotenzen kleiner als die Resonator-Halbwertsbreite und könnte prinzipiell in der Größenordnung von 10^{-3} Hz liegen. Allerdings wird die tatsächlich gemessene Bandbreite der Laserstrahlung durch kurzzeitige Veränderungen der Resonatorlänge bestimmt (thermische bzw. mechanische Schwingungen). Die praktisch erreichbare untere Grenze der Laser-Halbwertsbreite liegt bei etwa 1 Hz. Derartige Werte sind mit herkömmlichen Lichtquellen auch nicht annähernd zu erreichen.

Als Schwelle eines Oszillators wurde der Zustand bezeichnet, bei dem sich Verstärkung und Verluste die Waage halten. Die Verstärkung wird durch die Eigenschaften des aktiven Mediums bestimmt. Verluste in bezug auf das Licht treten im Laser auf durch

Absorption in den optischen Bauteilen innerhalb des Resonators

Streuung an den optischen Bauteilen bzw. an der Grenzfläche des aktiven Mediums

Beugung durch Blenden und Begrenzungsflächen

Streuung und Absorption durch die Spiegelschichten des Resonators

Durchlässigkeit der Resonatorspiegel.

Die Durchlässigkeit der Resonatorspiegel muß auf geeignete Weise optimiert werden. Die Notwendigkeit dieser Optimierung wird durch folgende Überlegung unterstrichen: Sind die Spiegel besonders hoch vergütet, d. h., ist ihre Durchlässigkeit nahezu Null, so schwingt der Laser zwar an, der durch die Spiegel austretende Strahl weist aber eine geringe Intensität auf. Benutzt man dagegen

2. Physikalische Grundlagen des Lasers

zum Aufbau des Resonators Spiegel von großer Durchlässigkeit, so sind die Verluste sehr hoch, und der Laser schwingt evtl. gar nicht an. Die Intensität des austretenden Laserlichtes weist demnach bei bestimmten optischen Durchlaßkoeffizienten der Resonatorspiegel ein Maximum auf. In den meisten Fällen geht man beim Aufbau des optischen Resonators so vor, daß man auf einer Seite einen möglichst hochvergüteten Spiegel einsetzt. Im Idealfall wäre der Reflexionskoeffizient dieses Spiegels 100 %. Der andere Spiegel wird in bezug auf die Durchlässigkeit optimiert. Man spricht hier von der »Ausgangsseite«.

Aus dem Prinzip des Laseroszillators folgen einige wesentliche Eigenschaften der Laserstrahlung, die sie von der Strahlung anderer Lichtquellen unterscheiden. Bei der Betrachtung des Resonators kann man erkennen, daß diejenigen Strahlen, die nicht senkrecht auf die Spiegel auftreffen, schon nach wenigen Durchläufen durch das verstärkende Medium nach außen abgestrahlt werden (Bild 20).

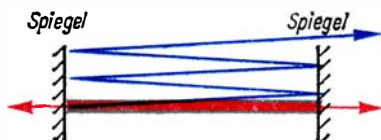


Bild 20. Illustration zur Laserstrahlbündelung

Die Resonanzbedingung ist nur in bezug auf den Spiegel für den senkrechten Strahlengang erfüllt. Das gesamte Laserlicht wird unter einem kleinen Raumwinkel abgestrahlt. Dieser Divergenzwinkel wird durch Beugungserscheinungen im Resonator bestimmt. Die Eigenschaft, einen intensitätsreichen Strahl, in dem das gesamte Nutzlicht konzentriert ist, in eine bestimmte Richtung abzugeben, zeichnet den Laser gegenüber herkömmlichen Lichtquellen aus, die ihr Licht, soweit nicht zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, nach allen Seiten gleichmäßig abstrahlen.

Eine weitere Eigenschaft des Laserstrahls ist seine Kohärenz. Die Strahlung herkömmlicher Lichtquellen ist nicht kohärent, da jedes Atom einer solchen Lichtquelle das Licht unabhängig von den anderen Atomen abstrahlt. Im Laser ist aber, bedingt durch den Prozeß der induzierten Emission, die Strahlung aller an der Abstrahlung des Laserlichts beteiligten Atome miteinander gekoppelt.

2.5. Beschreibung der Vorgänge im Laser durch Bilanzgleichungen

Dieses Verhalten sowie die geringe Halbwertsbreite der Laserstrahlung sind die Voraussetzungen für ihre zeitliche und räumliche Kohärenz. Um diese Eigenschaften des Lasers, die ihn von anderen Lichtquellen unterscheiden, zu unterstreichen, bezeichnet man ihn oft als »kohärente Lichtquelle«.

Auf Grund der geringen Halbwertsbreite des Laserlichts kann man es als »monochromatisch« bezeichnen. Es muß aber berücksichtigt werden, daß im Bereich der Verstärkungskurve, der über der Laserschwelle liegt, mehrere Eigenfrequenzen des optischen Resonators liegen können. Das ist bei langen Lasern der Fall, da der Abstand der Eigenfrequenzen des optischen Resonators umgekehrt proportional der Resonatorlänge ist, s. Gleichung (15):

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$

$\Delta\nu$ Abstand der Eigenfrequenzen.

Unter bestimmten Bedingungen des aktiven Mediums, die für fast alle Typen von Lasern erfüllt sind, kommt es dazu, daß der Laser auf mehreren Frequenzen gleichzeitig anschwingen kann. Das Spektrum der Strahlung besteht dann aus mehreren, dicht beieinander liegenden Strahlungslinien. Dieser Effekt wirkt sich bei einer Reihe von Anwendungen störend aus. Es wurden deshalb Methoden entwickelt, die den Laser dazu bringen, auf nur einer einzigen Frequenz zu emittieren.



Durch den Verstärkungs- und Rückkopplungsprozeß im Laser entsteht eine monochromatische Strahlung mit sehr kleiner Halbwertsbreite. Die Laserfrequenz wird innerhalb der Verstärkungslinie in erster Näherung durch die Resonatorfrequenz bestimmt. Die Laserstrahlung ist räumlich gebündelt; das Laserlicht ist kohärent.

2.5. Beschreibung der Vorgänge im Laser durch Bilanzgleichungen

Um die Vorgänge im Laser zu untersuchen bzw. zu verstehen, muß man wie überall in wissenschaftlichen Disziplinen Theorien aufstellen. Diese Vorgänge können vollständig nur mit den Mitteln

der Quantenmechanik beschrieben werden. Eine solche Theorie ist allerdings sehr kompliziert und aufwendig. Aus diesem Grunde hat man versucht, einfachere Beschreibungen zu finden, die unter gewissen Voraussetzungen, die man vorher definiert, experimentell verwertbare Resultate ergeben. Ein Beispiel dafür ist die halb-klassische Theorie des Gaslasers, die vor allem von *Lamb* ausgearbeitet wurde. Sie liefert eine Reihe von aufschlußreichen Resultaten, die auch experimentelle Bestätigung fanden. So konnte *Lamb* beispielsweise die Voraussage treffen, daß unter bestimmten Bedingungen in der Mitte der Kurve »Laserausgangsleistung in Abhängigkeit von der Frequenz« eine Einsattlung auftritt. Diese Einsattlung wurde tatsächlich gefunden und erhielt den Namen *Lamb-dip*. Eine große Anzahl industriell gefertigter frequenz-stabilisierter Laser arbeitet nach einem Verfahren, das den *Lamb-dip* für die Stabilisierung ausnutzt.

Eine »einfachere« theoretische Methode der Beschreibung der Laservorgänge beruht auf den *Bilanzgleichungen*. Sie liefert nur eine geringe Anzahl von Aussagen und ist nicht in allen Fällen einsetzbar. Man kann jedoch Informationen über die Laserschwelle erhalten und auch über die Energieverhältnisse im Laser. Auch zur Untersuchung der Einschwingvorgänge im Laser können die Bilanzgleichungen herangezogen werden. Man schreibt in ihnen die Vorgänge auf, die zu einer Änderung der Besetzungszahl der Atomzustände führen können.

Es sollen zwei Energiezustände der Laseratome betrachtet werden (Bild 21). Der obere Zustand soll durch den Index 2, der untere mit dem Index 1 bezeichnet werden. Bei der Beschreibung der Vorgänge, die in den Atomen vor sich gehen (auch ihre Wechselwirkung

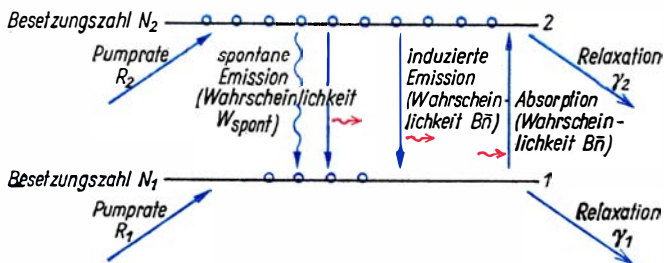


Bild 21. Prozesse, die zur Änderung der Besetzungszahlen führen

2.5. Beschreibung der Vorgänge im Laser durch Bilanzgleichungen

mit Licht) kann man nicht mit genauen Zahlenwerten operieren. Einem jeden Vorgang kann nur eine bestimmte Wahrscheinlichkeit zugeordnet werden. Änderungen der Besetzungszahlen der einzelnen Atomzustände kommen durch folgende Prozesse in Frage:

1. Pumpen

Der obere Zustand wird durch den Pumpmechanismus ständig neu besetzt. Die Zahl der Atome, die je Zeiteinheit in diesen Zustand versetzt werden, wird als *Pumprate* R_2 bezeichnet. Man kann nicht vollständig ausschließen, daß auch der untere Zustand infolge der Energiezuführung besetzt wird. Diesen Vorgang kennzeichnet man durch die Pumprate R_1 . Es wird vorausgesetzt, daß die Pumpraten zeitlich konstant sind.

2. Spontane Emission

Durch die spontane Emission vom oberen in den unteren Laserzustand ändern sich die Besetzungszahlen. Die beteiligten Atome gehen dem eigentlichen Laserprozeß verloren. Wenn als W_{spont} die Wahrscheinlichkeit des spontanen Übergangs (je Zeiteinheit) bezeichnet wird, so beträgt die Änderung der Besetzungszahl (je Zeiteinheit) $N_2 W_{\text{spont}}$.

3. Induzierte Emission

Diese Art der Emission wird durch ein auftreffendes Photon hervorgerufen. Man kann zeigen, daß die dazugehörige Übergangswahrscheinlichkeit je Zeiteinheit unter bestimmten Voraussetzungen als $B\bar{n}$ aufgeschrieben werden kann. Mit B wird der Einstein-Koeffizient für die induzierte Emission bezeichnet. Er ist eine charakteristische Größe für die gegebene Substanz. Die Größe $\bar{n}$ ist die mittlere Photonenzahl der Lasereigenschwingung, d. h. die Zahl der Lichtteilchen, die sich im Laserresonator befinden. Die Übergangswahrscheinlichkeit ist somit proportional der im Laser vorhandenen Photonenzahl.

4. Absorption

Das Photon kann auch absorbiert werden. Der Absorption entspricht der Übergang des Atoms vom 1. Zustand auf den 2. Zustand. Es kann gezeigt werden, daß die Wahrscheinlichkeit der Absorption

gleich der Wahrscheinlichkeit der induzierten Emission ist. Sie ist demnach gleichfalls durch $B\bar{n}$ gegeben.

5. Relaxationsvorgänge

Die Relaxationsvorgänge tragen nicht direkt zur Erzeugung von Photonen des Laserlichts bei. Durch diese Vorgänge wird die Besetzungszahl des entsprechenden Zustandes verringert. Sie bestehen darin, daß ein Übergang von einem Laserzustand zu einem nicht direkt am Laserprozeß beteiligten Zustand erfolgt. Ihre totale Übergangswahrscheinlichkeit wird als γ_1 bzw. als γ_2 (je nach Laserzustand) bezeichnet.

6. Änderung der Photonenzahl

Nicht nur die Besetzungszahl eines Laserzustandes kann sich ändern, sondern auch die mittlere Photonenzahl der Lasereigenschwingung $\bar{n}$. Das geschieht dadurch, daß Photonen durch den Prozeß der Absorption verlorengehen bzw. durch den Prozeß der induzierten Emission erzeugt werden. Außerdem treten in jedem Resonator Verluste auf. Sie sind bedingt durch die Durchlässigkeit der Spiegel, durch Lichtverluste an den Spiegeln, durch Beugung oder auch durch Absorption und Streuung der optischen Materialien innerhalb des Resonators (z. B. Brewsterfenster). Man ordnet diesen Verlusten eine Verlustkonstante κ zu. Ihr reziproker Wert ($1/\kappa$) gibt die Zeit an, in welcher die Intensität des Strahlungsfeldes auf den e-ten Teil abklingt, wenn keine Photonen nachgeliefert werden. Man schreibt demnach drei Bilanzgleichungen auf (Bild 22), und zwar

für die Änderung der Besetzungszahl des oberen Laserzustandes (Index 2)

für die Änderung der Besetzungszahl des unteren Laserzustandes (Index 1)

für die Änderung der mittleren Photonenzahl der Lasereigenschwingung.

$$\frac{dN_2}{dt} = R_2 + N_1 B \bar{n} - N_2 B \bar{n} - N_2 W_{\text{spont}} - N_2 \gamma_2 \quad (20)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = R_1 - N_1 B \bar{n} + N_2 B \bar{n} + N_2 W_{\text{spont}} - N_1 \gamma_1 \quad (21)$$

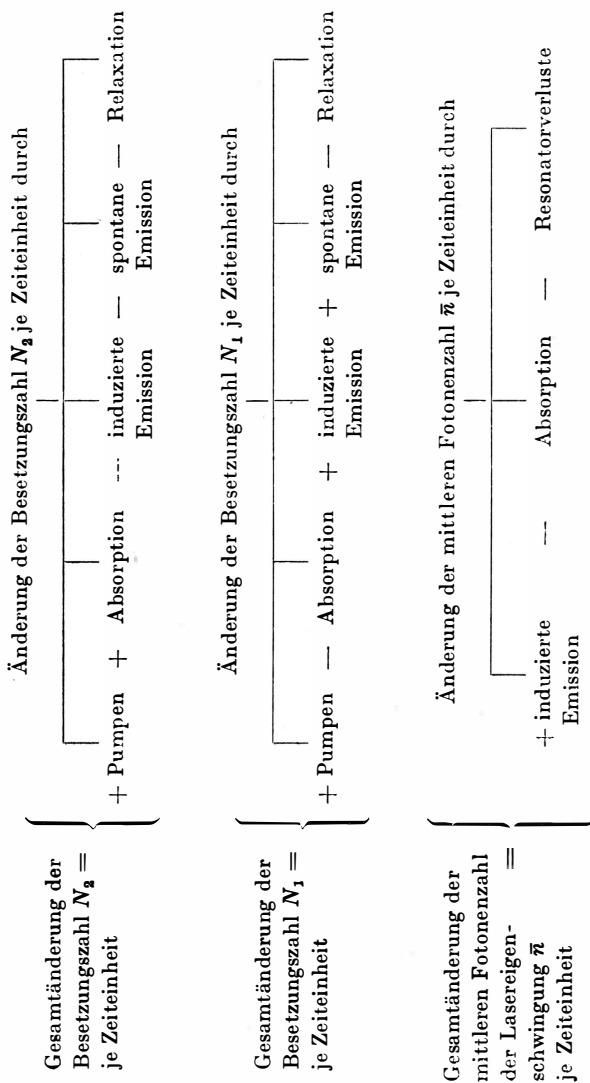


Bild 22. Bilanzgleichungen



$$\frac{d\bar{n}}{dt} = N_2 B \bar{n} - N_1 B \bar{n} - \kappa \bar{n} \quad (22)$$

2.6. Einige Ergebnisse der Bilanzgleichungen

Die Bilanzgleichungen geben Lösungen sowohl für Einschwingvorgänge als auch für einen stationären Fall. Es soll im folgenden nur der stationäre Fall betrachtet werden, also alle Gesamtänderungen sowohl der Besetzungszahlen als auch der Photonenzahl sollen Null sein:

$$0 = R_2 + N_1 B \bar{n} - N_2 (B \bar{n} + W_{\text{spont}} + \gamma_2) \quad (23)$$

$$0 = R_1 + N_2 (B \bar{n} + W_{\text{spont}}) - N_1 (B \bar{n} + \gamma_1) \quad (24)$$

$$0 = (N_2 - N_1) B \bar{n} - \kappa \bar{n} \quad (25)$$

Es soll nun angenommen werden, daß der Laserprozeß in Gang ist, d. h., daß im Resonator ein Strahlungsfeld existiert. Dann ist die mittlere Photonenzahl $\bar{n}$ größer als Null, und es folgt aus Gleichung (25)

$$\sigma \equiv N_2 - N_1 = \frac{\kappa}{B} \quad (26)$$

Die Größe σ , die dem Besetzungsunterschied zwischen den beiden Laserzuständen entspricht, wird als *Besetzungsinversion* bezeichnet. Aus Gleichung (26) kann man ersehen, daß die Besetzungsinversion nur von den Resonatorverlusten abhängig ist, da B einen konstanten Wert aufweist. Die Besetzungsinversion ist demnach nicht abhängig von der Pumprate, also der Stärke des Pumpens oder von der Gesamtzahl der am Laserprozeß beteiligten Atome. Bei einer Vergrößerung der Pumprate werden zwar mehr Atome in den oberen Laserzustand versetzt, gleichzeitig aber gehen auch mehr Atome in den unteren Laserzustand durch induzierte Emission über. Die Inversion bleibt bei Erhöhung der Stärke des Pumpens konstant.

Als Summe von (23) und (24) erhält man

$$60 \quad R_1 + R_2 = N_1 \gamma_1 + N_2 \gamma_2 \quad (27)$$

In Worten ausgedrückt heißt das, daß die Gesamtzahl der je Zeiteinheit in die Laserzustände versetzten Atome gleich der Gesamtzahl der die Laserzustände verlassenden Atome ist. Aus (23) und (24) erhält man

$$\sigma = \frac{R_2(\gamma_1 - W_{\text{spont}}) - R_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}{B\bar{n}(\gamma_1 + \gamma_2) + \gamma_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}. \quad (28)$$

Die Inversion soll einen positiven Wert haben, es sollen also mehr Atome den oberen als den unteren Laserzustand einnehmen. Daraus folgt die Bedingung

$$\gamma_1 > W_{\text{spont}}. \quad (29)$$

Um eine positive Inversion zu gewährleisten, um Laserstrahlung zu erzeugen, muß der untere Laserzustand stärker durch Relaxationsvorgänge entleert werden, als er durch spontane Übergänge aus dem oberen aufgefüllt wird. Diese Bedingung setzt beispielsweise eine Grenze für den Kapillardurchmesser der Entladungsröhre beim He-Ne-Laser. Aus (26) und (28) folgt

$$\bar{n} = \frac{R_2(\gamma_1 - W_{\text{spont}}) - R_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}{\kappa(\gamma_1 + \gamma_2)} - \frac{\gamma_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}{B(\gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (30)$$

Man ersieht daraus, daß die Fotonenzahl $\bar{n}$ mit abnehmenden Resonatorverlusten κ anwächst. Die Fotonenzahl muß aber größer bzw. gleich Null sein. Daraus folgt

$$\frac{R_2(\gamma_1 - W_{\text{spont}}) - R_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}{\gamma_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})} \geq \frac{\kappa}{B}. \quad (31)$$

Diesen Ausdruck bezeichnet man als *Laserbedingung*. Aus ihm ist zu ersehen, daß die Lasertätigkeit erst dann einsetzt, wenn die Stärke des Pumpens einen bestimmten Wert, eine Schwelle, überschreitet. Dieser Wert hängt von den Verlusten im Resonator ab. Den Ausdruck auf der linken Seite dieser Ungleichung kann man als σ_0 bezeichnen. Ein Vergleich mit (28) zeigt: σ_0 ist diejenige Besetzungsinversion, die sich unter dem Einfluß des Pumpens herausbildet, wenn das Strahlungsfeld der Laserschwingung Null ist. Eine solche Situation kann z. B. durch ein Unterbrechen des Strahlungsganges im Resonator geschaffen werden.

Man kann schreiben

$$\sigma_0 \geq \frac{\kappa}{B}. \quad (32)$$

Somit muß folgende Bedingung erfüllt werden, um eine stationäre Lasertätigkeit zu erreichen: Es muß so stark gepumpt werden, daß die erzeugte Inversion (bei abgeschaltetem Strahlungsfeld) größer ist als die für den stationären Laserbetrieb erforderliche Inversion.

Setzt man in (30) die Größe σ_0 ein, so ergibt sich

$$\bar{n} = \frac{\gamma_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}{B(\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot \left(\frac{B\sigma_0}{\kappa} - 1 \right). \quad (33)$$

Hieraus kann man ersehen, daß eine obere Grenze für die Intensität der Laserstrahlung existiert. Wenn die Anzahl N der aktiven Atome und die Größe anderer Parameter konstant bleibt, so kann man keine beliebig hohe Strahlungsleistung erzielen. Die Größe σ_0 kann als Besetzungsinversion den Wert N nicht überschreiten. Daher ist das Maximum der Photonenzahl gegeben durch

$$\bar{n}_{\text{max}} = \frac{\gamma_1(\gamma_2 + W_{\text{spont}})}{B(\gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (34)$$

Die wichtigsten Ergebnisse der Bilanzgleichungen für den stationären Fall kann man folgendermaßen zusammenfassen:

Die Besetzungsinversion im Laser ist (bei existierendem Strahlungsfeld im Resonator) nur von den Resonatorverlusten abhängig. Sie ist unabhängig von der Stärke des Pumpens.

Die Gesamtzahl der in die Laserzustände je Zeiteinheit versetzten Atome ist gleich der Gesamtzahl der die Laserzustände je Zeiteinheit verlassenden Atome.

Der untere Laserzustand muß stärker entleert werden, als er durch spontane Emission aus dem oberen Laserzustand aufgefüllt wird.

Die Laserbedingung besteht in der Forderung, daß die Stärke des Pumpens einen bestimmten Wert überschreiten muß, wenn Lasertätigkeit einsetzen soll.

Es existiert für die Intensität der Laserstrahlung eine obere Grenze, wenn die Gesamtzahl der aktiven Atome und andere Parameter konstant sind.

3. Laserarten

Bevor auf die einzelnen Lasertypen eingegangen wird, ist es notwendig, einige Worte zur allgemeinen Entwicklung des Lasers zu sagen. In der relativ kurzen Zeit seit seiner Erfindung im Jahre 1960 hat dieses Gerät schon erstaunlich viele Anwendungen gefunden.

Die Vorzüge des Lasers liegen auf Gebieten, die seinerzeit noch nicht abzusehen waren. In wissenschaftlichen Untersuchungen, in der Nachrichtentechnik, in der Materialbearbeitung und für viele andere Gebiete findet man zukunftsweisende Anwendungen. Völlig neue Gebiete, wie die nichtlineare Optik oder die Holographie, sind erst durch den Laser erschlossen worden. Deshalb ist es nicht verwunderlich, wenn Tausende von Wissenschaftlern in allen Ländern an der Laserforschung und -entwicklung arbeiten. Das Ergebnis ist eine Flut von wissenschaftlichen Informationen, die ständige Ausarbeitung neuer Geräte und Wirkungsprinzipien, die Erschließung völlig neuer Anwendungsbereiche.

Wenn auf die verschiedenen Laserarten eingegangen werden soll, so muß man sich die Schnellebigkeit unserer Zeit ständig vor Augen halten. Es ist durchaus möglich, daß ein Teil der Informationen beim Erscheinen dieses Buches bereits veraltet ist. Trotzdem haben sich eine ganze Reihe von Lasertypen herauskristallisiert, die sich in der Anwendung und damit auf dem Weltmarkt einen festen Platz erobert haben. Auf diese Geräte wird vor allem eingegangen sowie Ausblick auf vielversprechende Neuentwicklungen gegeben.

Es ist im allgemeinen üblich, die Laser in Gruppen einzuteilen und sich dabei vor allem auf die Besonderheiten des aktiven Mediums zu beziehen. Dabei geht man im wesentlichen von den Aggregatzuständen aus:

Beispiel

1. Gasförmiger Zustand des Mediums

Atomarer Gaslaser

He-Ne

3. Laserarten

Ionenlaser	Ar
Moleküllaser	CO ₂
2. Fester Zustand	
Kristalline Festkörperlaser, Glaslaser	Rubin, Neodymglas
Halbleiterlaser	GaAs
3. Flüssiger Zustand	
Chemische Laser (Gasphase ist möglich)	
Farbstofflaser	

Die hier angeführten Lasertypen unterscheiden sich im physikalischen Prinzip der Lichtaussendung nicht. Es existieren aber wesentliche Unterschiede in der Art des Pumpprozesses, ihrer Parameter (Wirkungsgrad, Ausgangsleistung usw.), ihrer Wellenlänge, ihrem technologischen Stand und ihrer Anwendung. Es würde den Rahmen dieses Buches sprengen, würde man versuchen, auch nur annähernd eine vollständige Übersicht zu geben.

Die wichtigsten Typen sollen aber betrachtet werden, da die Kenntnis ihrer Arbeitsweise wesentlich ist, um die Anwendungen zu verstehen.

3.1. Gaslaser

3.1.1. Atomarer Gaslaser (Beispiel Helium-Neon-Laser)

In einem Gas sind die Atome bzw. Moleküle relativ weit voneinander entfernt. Sie wirken deshalb nur schwach aufeinander ein. Beim atomaren Gas kann man die einzelnen Atome in den meisten Fällen so betrachten, als wären sie isoliert voneinander. Damit ist es möglich, die Überlegungen zur Ausstrahlung eines einzelnen Atoms auf ein atomares Gas direkt zu übertragen. Jedes einzelne Atom strahlt (in erster Näherung) so, als wäre es völlig allein im Raum.

Als Beispiel soll der He-Ne-Laser dienen. Als erster Gaslaser wurde er im Jahre 1960 von *Javan* und seinen Mitarbeitern konzipiert und zum Anschwingen gebracht. Seither ist seine Technologie ausgereift. Die Lebensdauer der Entladungsröhre liegt bei einigen tausend Stunden.

Als aktives Medium wird ein Gemisch von Helium und Neon verwendet, das in einer Glaskapillare durch Zuführen von elektrischer

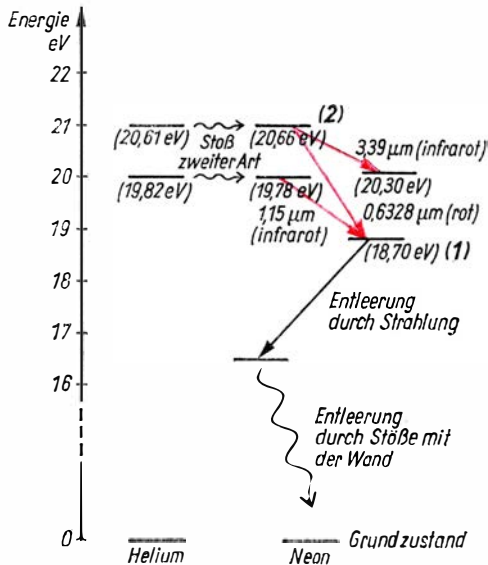


Bild 23. Energieschema des Helium-Neon-Lasers

Energie zur Glimmentladung gebracht wird, ähnlich den Vorgängen in Neonröhren für Leuchtreklame. Der eigentliche Laserübergang geschieht im Neon. Dem Helium kommt eine wesentliche Hilfsrolle zu. Das Übergangsschema des He-Ne-Lasers ist im Bild 23 dargestellt. Wie wird der obere Laserzustand besetzt, d. h., wie wird die notwendige inverse Besetzung erzielt? Den oberen Laserzustand müssen mehr Atome einnehmen als den unteren Laserzustand. Man hat einen eleganten Weg gefunden, um die Inversion der beiden Zustände zu erreichen. Es stellte sich heraus, daß die Heliumatome zwei metastabile Energiezustände einnehmen können, die energetisch sehr gut mit den oberen Laserzuständen im Neon übereinstimmen. Sie sind in Bild 23 eingezeichnet. Hinzu kommt, daß Helium und Neon Edelgase sind, die also weder miteinander noch mit anderen Elementen chemisch reagieren. Das vereinfacht den Umgang mit ihnen. Man füllt ein Rohr aus Quarz oder Glas mit einem Gemisch von Helium und Neon im Verhältnis

von etwa 6 : 1. Im Rohr werden zwei Elektroden angebracht, die eine dient als Anode, die andere als Katode. Legt man eine Spannung an die Elektroden, so kann eine Gasentladung im Gas gezündet werden. Das geschieht auf folgende Weise. Ein geringer Teil der Gasatome ist immer ionisiert. Als frei bewegliche Ladungsträger bewegen sich die dazugehörigen Elektronen im Gas. Beim Anlegen einer Spannung werden sie in der entsprechenden Richtung beschleunigt. Sie erhalten zusätzliche kinetische Energie und können bei ausreichend hoher Geschwindigkeit beim Zusammenstoß mit den neutralen Gasatomen Ionisation hervorrufen. Man spricht von *Stoßionisation*. Lawinenartig werden somit weitere Elektronen frei. Das ursprünglich nichtleitende Gas wird leitend, es fließt ein Entladungsstrom.

In diesem Gas, in dem eine Entladung vor sich geht, ist eine Vielzahl freier Elektronen vorhanden. Beim Zusammenstoß mit neutralen Atomen können die Elektronen Energie an die Atome abgeben. Die Atome werden angeregt.

Obwohl die Lebensdauer des oberen Laserzustandes im Neon um eine Größenordnung höher ist als die des unteren, wird bei der Anregung durch Elektronenstoß im reinen Neon die ursprüngliche *Boltzmann*-Verteilung nur wenig gestört. Um eine ausreichende inverse Besetzung des Laserübergangs zu erreichen, muß der obere Laserzustand durch einen zusätzlichen Prozeß selektiv besetzt werden. Man erreicht das mit Hilfe der Heliumatome. Auch die Heliumatome werden durch Elektronenstoß angeregt. Eine gewisse Anzahl dieser Atome befindet sich im Zustand, der der Energie von 20,61 eV entspricht. Er stimmt energiemäßig gut mit dem oberen Laserzustand im Neon überein. Stößt ein solches Heliumatom mit einem nichtangeregten Neonatom zusammen, so gibt es eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, daß die Anregungsenergie des Heliums direkt auf das Neon übertragen wird. Diesen Vorgang bezeichnet man als *Stoß zweiter Art* im Gegensatz zu Stößen, bei denen kein Austausch der Anregungsenergie stattfindet. Nach dem Zusammenstoß ist dann das Heliumatom nicht mehr angeregt; dafür befindet sich das Neon im oberen Laserzustand. Der Prozeß wird mit folgender Reaktionsgleichung beschrieben:



Die angeregten Zustände des Heliumatoms sind metastabil. Damit ist infolge der großen Lebensdauer des Zustandes die Gewähr gegeben, daß die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes zwischen Helium- und Neonatom groß ist. Als Folge dieser selektiven Anregung und weil die Lebensdauer des oberen Zustandes etwa zehnmal so groß ist wie die des unteren, kommt eine inverse Besetzung zustande. Dabei muß die Anregungsrate, d. h. die Lieferung angeregter Atome je Zeiteinheit, für den oberen Zustand größer sein als für den unteren. Wenn für eine entsprechend verlustarme Rückkopplung gesorgt ist (das aktive Medium befindet sich im optischen Resonator), so kann diese Anordnung als Laser arbeiten.

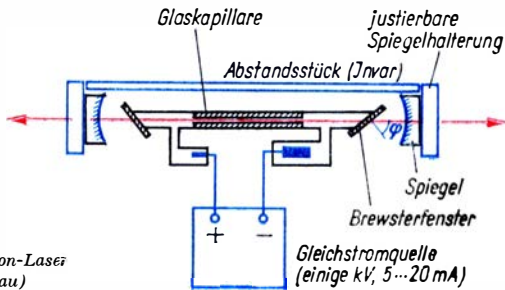


Bild 24. Helium-Neon-Laser
(schematischer Aufbau)

Der technische Aufbau des Helium-Neon-Lasers ist als Prinzipskizze in Bild 24 dargestellt. Das Entladungsrohr, in dem sich das Gasgemisch befindet, besteht aus einem Glasrohr, in dem Kapillare und Elektroden eingebracht sind. Die Gasentladung wird mit Hilfe einer Gleichspannung gezündet, wozu eine Zünd- bzw. Brennspannung von einigen tausend Volt erforderlich ist. Die optimale Stromstärke des Entladungsstroms liegt bei einigen Milliampere. Serienmäßig gefertigte Helium-Neon-Laser sind meist mit Kaltkatoden bestückt. Es können aber auch geheizte Katoden verwendet werden. Eine Gasentladung kann auch (elektrodenlos) durch Anregung mit hochfrequenter Wechselspannung in Betrieb gehalten werden. Dieses Verfahren wird jedoch selten angewendet.

Die Entleerung des unteren Laserzustandes geschieht durch spontane Emission zu einem Zwischenzustand, also nicht zum Grund-

3. Laserarten

zustand des Neons. Dieser Zwischenszustand ist leider metastabil. Er wird im wesentlichen durch Zusammenstöße der Neonatome mit der Kapillarwand entleert. Deshalb muß man Kapillaren mit kleinem Innendurchmesser verwenden (0,5 bis 5 mm in Abhängigkeit von der Rohrlänge). Der Gesamtdruck des Helium-Neon-Gemisches und der Kapillardurchmesser müssen zueinander in einem bestimmten Verhältnis stehen. Es gilt die empirische Formel

$$pD \approx 4 \text{ Torr} \cdot \text{mm} \quad (36)$$

p Gesamtdruck

D Kapillardurchmesser.

Der Gesamtdruck des Helium-Neon-Gemisches liegt bei 1 bis 4 Torr. Als optimales Mischungsverhältnis hat sich ergeben

$$p_{\text{He}} : p_{\text{Ne}} \approx 5 : 1 \cdots 6 : 1 \quad (37)$$

p_{He} Heliumpartialdruck

p_{Ne} Neonpartialdruck.

Die Endflächen des Entladungsrohres werden oft mit Austrittsfenstern verschlossen, die unter einem bestimmten Winkel, dem *Brewsterwinkel*, gegen die Rohrachse geneigt sind. Der Winkel ist abhängig von der Wahl des Fenstermaterials:



$$n = \tan \varphi \quad (38)$$

n Brechzahl des Fenstermaterials

φ Brewsterwinkel.

Durch ein solches Austrittsfenster wird nur Licht einer bestimmten Polarisationsrichtung verlustfrei durchgelassen. Es wird damit im Laser eine bestimmte Polarisationsrichtung erzwungen. Bei einem *Außenspiegellaser* ist also das austretende Laserlicht in einer bestimmten Richtung polarisiert. Für verschiedene Anwendungen ist diese Eigenschaft wesentlich. Im Gegensatz dazu steht der *Innenspiegellaser*. Seine Spiegel sind ohne Zwischenstück direkt am Entladungsrohr angebracht. Die Spiegelschichten kommen dadurch mit dem Gasgemisch in Berührung. Die Strahlung ist nicht polarisiert. Die Verluste im Resonator, die beim Außen-

spiegellaser durch Absorption im Fenstermaterial und durch Ungenauigkeiten beim Einhalten des Brewsterwinkels zustande kommen, entfallen. Es kann bei gleicher Rohrlänge eine höhere Ausgangsleistung erzielt werden.

Helium-Neon-Laser werden kontinuierlich betrieben. Die kleinsten He-Ne-Laser haben Resonatorlängen von 10 bis 15 cm. Die Ausgangsleistungen liegen bei einigen hundert Mikrowatt. Derartige Laser werden vor allem in der Längenmeßtechnik eingesetzt. Als Justierlaser und für eine ganze Reihe von Anwendungen werden vor allem He-Ne-Laser mit einer Länge von 30 bis 50 cm benutzt. Man erreicht mit ihnen Strahlungsleistungen in der Größenordnung von einem Milliwatt. Es werden auch He-Ne-Laser mit Resonatorlängen von einigen Metern hergestellt. Die damit erreichbaren Strahlungsleistungen liegen im Bereich von einigen 10 mW.

Ein Nachteil des Helium-Neon-Lasers besteht darin, daß sein Wirkungsgrad, d. h. das Verhältnis von Ausgangsleistung zu eingespeister Leistung, recht klein ist (rd. 10^{-3}). Die Verstärkung im aktiven Medium ist gering. Deshalb müssen, um eine möglichst hohe Ausgangsleistung zu erreichen, die Verluste im Resonator so klein wie möglich sein. Das bezieht sich vor allem auf die Resonatorspiegel. Sie sollen möglichst kleine Verluste durch Streuung und Absorption einbringen. Für den Spiegel der Seite, an der im Idealfall keine Strahlung durchgelassen werden soll, können Reflexionskoeffizienten von 99,5 % bis 99,8 % erreicht werden. Der Auskoppelspiegel, der das Nutzsignal durchläßt, muß für jeden Lasertyp optimiert werden. Man verwendet für He-Ne-Laser Spiegel mit Reflexionskoeffizienten von 96 % bis 99 %.

Es existieren drei bevorzugte Übergänge im Neon, auf denen man ohne Schwierigkeiten im He-Ne-System Lasertätigkeit erzielen kann. Zwei davon liegen im infraroten Bereich des Spektrums. Die für viele Zwecke günstigste Laserlinie entspricht dem Übergang bei einer Wellenlänge von $0,6328 \mu\text{m}$, der sich im roten Bereich des sichtbaren Spektrums befindet.

Im Helium-Neon-Gaslaser wird das Laserlicht beim Übergang des Neonatoms zwischen zwei Energiezuständen erzeugt. Das Helium dient zur selektiven Besetzung des oberen Laserzustandes. Die Anregung erfolgt mit Hilfe einer Gasentladung. Die Ausgangsleistungen liegen im

Bereich von einigen $100\ \mu\text{W}$ bis zu einigen $10\ \text{mW}$. Beim Außenspiegellaser ist (durch die Brewsterfenster) das Laserlicht linear polarisiert. Die am meisten benutzte Wellenlänge des He-Ne-Lasers beträgt $0,633\ \mu\text{m}$. Der He-Ne-Laser ist der z. Z. technologisch am besten beherrschte Gaslasertyp. Er ist ein kontinuierlich arbeitender Laser.

3.1.2. Ionenlaser (Beispiel Argonlaser)

Für die Anwendung des Lasers ist es besonders wünschenswert, daß sein Licht im grün-blauen Wellenlängenbereich liegt, da für diese Wellenlängen geeignete, nicht aufwendige Lichtempfänger kommerziell vorhanden sind. Diese Forderung erfüllt ein Gaslaser, in dem als aktives Medium das Edelgas Argon verwendet wird. Zum Verständnis seiner Wirkung muß der Begriff »Ion« verdeutlicht werden. Ein Atom kann sich in verschiedenen Energiezuständen befinden, die dadurch zustande kommen, daß ein Elektron der Atomhülle Energie aufnehmen kann. Es kann aber vorkommen, daß dem Elektron durch eine Einwirkung von außen soviel Energie zugeführt wird, daß es durch die Bindungskräfte des Atoms nicht mehr festgehalten werden kann. Das Elektron verläßt den Wirkungsbereich des Atoms und bewegt sich als *freies Elektron* im Raum. Dem verbleibenden Atom fehlt ein Elektron und damit eine negative Elementarladung. Man bezeichnet es als *ionisiertes Atom* oder kurz als *Ion*. Es ist positiv geladen. Um das Ion zu kennzeichnen, schreibt man an die Atombezeichnung ein Kreuz (z. B. Ar^+). Wird ein zweites oder drittes Elektron aus dem Atom herausgeschlagen, so bezeichnet man das Atom als *zweifach* bzw. *dreifach ionisiert*.

Das Ion verhält sich in energetischer Sicht ähnlich wie das neutrale Atom. Die verbliebenen Elektronen können durch äußere Einwirkung ebenfalls auf verschiedene »Bahnen« gehoben werden. Demzufolge kann das Ion wie das neutrale Atom verschiedene Energiezustände einnehmen (Bild 25). Zwischen diesen Zuständen können, wie beim neutralen Atom, Übergänge stattfinden. Diese Tatsache wird beim Argonlaser ausgenutzt. Zwischen zwei Energiezuständen des Ions entsteht eine inverse Besetzung; sie ist die Voraussetzung für den Lasereffekt.

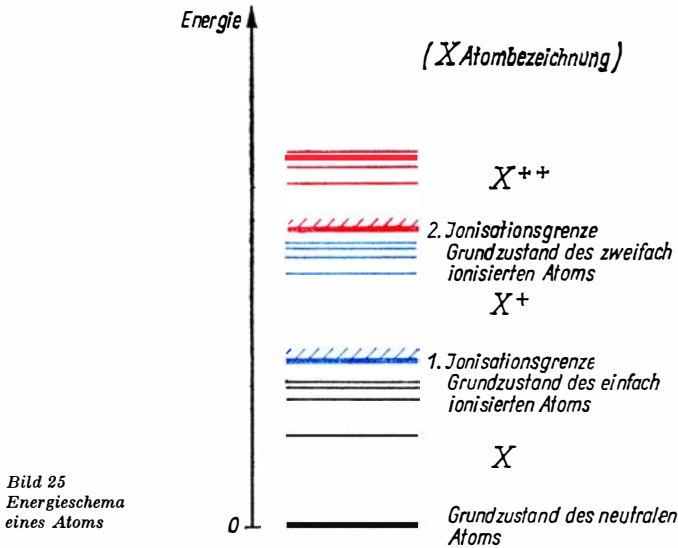


Bild 25
Energieschema
eines Atoms

Der Lasereffekt beim Argon wurde 1964 von *Bridges* und *Convert* u. a. zufällig entdeckt, als man Argon als Puffergas im Quecksilberlaser verwenden wollte. Eine Zeitlang waren die Arbeiten am Argonlaser dadurch charakterisiert, daß man wohl die Laser selbst bauen, aber über den genauen Mechanismus ihrer Ausstrahlung nur Hypothesen anstellen konnte. Das gilt vor allem für das Zustandekommen der inversen Besetzung der Laserzustände.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten dann, daß die Besetzung des oberen Laserzustandes durch Zusammenstöße mit Elektronen vor sich geht und daß die Lebensdauer des unteren Zustandes geringer ist als die des oberen. Mit dem Argonlaser erzielt man im sichtbaren Bereich des Spektrums die größte kontinuierliche Ausgangsleistung im Vergleich zu anderen Lasertypen. Mit ihm kann man Ausgangsleistungen bis zu einer Größenordnung von 100 W erreichen. Sein Wirkungsgrad ist dem des He-Ne-Lasers vergleichbar (rd. 10^{-3}). Wie oben gesagt, ist gerade der grün-blaue Bereich

3. Laserarten

des Spektrums, in dem dieser Laser arbeitet ($0,466$ bis $0,514 \mu\text{m}$), für viele Anwendungen interessant. Das betrifft vor allem die Ramanspektroskopie, die Datenverarbeitung, das Mikrokopierverfahren, aber auch Fernsehgroßprojektion und Einsatz in der Medizin als Foto-Koagulator.

Die Konstruktion der Argonlaser wird vor allem durch die besondere Natur der Gasentladung bestimmt.

Man bezeichnet ein Gas, in dem fast alle Atome ionisiert sind, als ein *Plasma*. Im Argonlaser geht eine elektrische Bogenentladung vor sich. Ein Beispiel für eine Bogenentladung ist der Lichtbogen beim Elektroschweißen. Der elektrische Bogen weist eine negative Widerstandscharakteristik auf. Die Spannungen, die zur Aufrechterhaltung des Bogens nötig sind, betragen rd. $5 \cdots 10 \text{ V cm}^{-1}$. Die Entladungsströme liegen zwischen 10 und 100 A je nach Durchmesser des Entladungsrohres. Die Stromdichten liegen bei einigen 100 A cm^{-2} .

Der gleichstromangeregte Argonlaser besteht wie auch andere Gaslaser aus Entladungsrohr mit Kapillare, Anode, Katode und Resonator (Bild 26). Zusätzlich ist parallel zur Kapillare eine Gasrückführleitung vorgesehen. Durch die hohen Elektronenströme wird das Grundgas (neutrales Argon) von der Katode weggeführt, so daß an der Katode ohne Gasrückführkanal ein Bereich geringen Druckes entstehen würde. Dadurch könnte die Katode (hoher Strom,

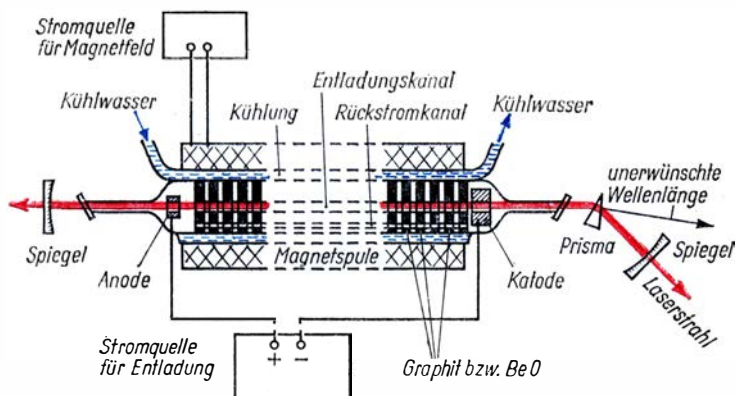


Bild 26. Argonlaser (schematischer Aufbau)

geringer Druck) zerstört werden. Andererseits würde sich das Gas im Anodenraum stauen, der Laser würde keine Strahlung mehr emittieren. Die Gasrückföhrleitung gleicht diesen Effekt aus. Sie muß so bemessen sein, daß die Entladung nicht durch den zusätzlichen Kanal zünden kann.

Aus der hohen Stromdichte ergeben sich große Anforderungen an die Konstruktionselemente. Die Kapillare muß hitzebeständig sein, da eine Wärmeabgabe von einigen 100 W/cm^2 gewährleistet werden muß. Die Katode und die Anode werden ständig mit Ionen bzw. Elektronen bombardiert. Die Elektroden müssen für Entladungsströme bis zu 100 A ausgelegt sein. Anode und Kapillare werden deshalb wassergekühlt. Verunreinigungen, Kalkablagerungen usw. setzen die Kühlfähigkeit der Durchlaßkanäle herab, so daß auf eine ausreichende Reinheit des Wassers geachtet werden muß.

Die Kapillare wird aus Quarz oder Keramik hergestellt. In neueren Typen von Argonlasern sind Kapillaren eingebaut, die aus Scheiben von Berylliumoxid bzw. Graphitscheiben aufgebaut sind, und zwar im Wechsel mit Isolierzwischenstücken (*segmentierte Laser*). Diese Laser kann man bei höheren Stromdichten betreiben und damit größere Ausgangsleistungen erzielen.

Der Entladung im Argon wird meist ein Magnetfeld überlagert. Man erreicht damit eine Einschnürung der Entladung in der Kapillare, die dadurch von der Kapillarwand ferngehalten wird. Die Stromdichten können erhöht werden, die Ausgangsleistung wird um das Zwei- bis Vierfache gesteigert.

Die Argonionen weisen in der entsprechenden Entladung mehrere Übergänge auf, die der Laserbedingung entsprechen. Man beobachtet im Spektrum des Argonlaserstrahls bis zu 8 Spektrallinien im Bereich von $0,466 \dots 0,514 \mu\text{m}$. Stellt man ein Prisma in den Laserstrahl, so ist es möglich, den Strahl aufzuspalten. Man erhält dann grüne bzw. blaue Lichtstrahlen, die jeweils einer Wellenlänge entsprechen. Für bestimmte Anwendungen ist es wünschenswert, daß nur eine einzige Laserlinie definierter Wellenlänge im Argonlaser anschwingen kann. Zur Selektion der einzelnen Linien verwendet man meist ein verlustarmes Glasprisma im Laserresonator (Bild 26). Das Prisma lenkt Lichtstrahlen verschiedener Wellenlänge verschieden stark ab. Man stellt den Spiegel so, daß er nur Licht einer einzigen Linie in den Resonator zurückschickt. Nur diese Linie kann anschwingen, und man erhält einen Laserstrahl

mit einer einzigen, definierten Wellenlänge. Durch Drehung des Spiegels werden nacheinander verschiedene Linien zum Anschwingen gebracht.

Die Länge der Gasentladungsstrecke im Argonlaser beträgt 30 bis 60 cm. Es ergeben sich daraus Gesamtlängen des Lasergerätes von 1...2 m. Die Ausgangsleistung liegt je nach Konstruktion bei 100 mW...100 W.

Zu bemerken ist noch, daß viele kommerzielle Argonlaser auch für Betrieb mit dem Edelgas Krypton ausgelegt sind, dessen Hauptlinie im roten Bereich des Spektrums liegt. Mit diesen Lasern, die eine gewisse Konkurrenz zum He-Ne-Laser darstellen, können Ausgangsleistungen von einigen 100 mW erreicht werden.



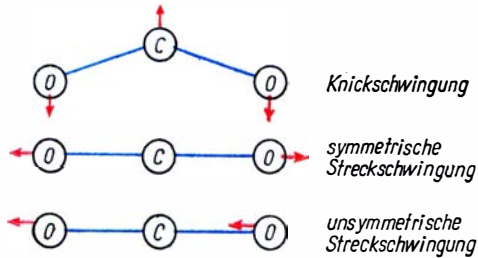
Der Lasereffekt im Argonlaser wird durch eine inverse Besetzung zwischen zwei Energiezuständen im Argonion möglich. In der Gasentladung fließen Ströme mit Stromdichten von einigen 100 A cm^{-2} . Deshalb werden an die Konstruktionselemente hohe Anforderungen gestellt. Die hohe Verstärkung auf verschiedenen laserfähigen Übergängen gestattet ein Anschwingen des Argonlasers auf mehreren Spektrallinien unterschiedlicher Wellenlänge. Zur Selektierung einer einzigen Wellenlänge verwendet man ein Prisma. So kann der Argonlaser auf etwa 8 verschiedenen Wellenlängen im Bereich von $0,514$ bis $0,466 \mu\text{m}$ arbeiten. Der Argonlaser wird hauptsächlich kontinuierlich betrieben. Die Ausgangsleistungen liegen zwischen 100 mW und 100 W je nach konstruktivem Aufbau.

3.1.3. Moleküllaser (Beispiel Kohlendioxid-Laser)

3.1.3.1. Kontinuierlicher CO_2 -Laser

Der Laserübergang beim Kohlendioxid-Laser (CO_2 -Laser) findet zwischen zwei Energiezuständen des CO_2 -Moleküls statt. Der CO_2 -Laser ist ein Gaslaser, d. h., das aktive Medium befindet sich im gasförmigen Aggregatzustand. Er strahlt im infraroten Bereich des Spektrums, er gibt Wärmestrahlung ab. Die Wellenlänge der Strahlung beträgt $10,6 \mu\text{m}$.

Bild 27. Verschiedene Schwingungsmöglichkeiten eines CO_2 -Moleküls



Um die Arbeitsweise des CO_2 -Lasers zu verstehen, muß man das Energiespektrum eines Moleküls betrachten. Ein Molekül besteht aus zwei oder mehreren Atomen, die durch chemische Bindungskräfte miteinander gekoppelt sind. Das Kohlendioxidmolekül besteht aus einem Kohlenstoffatom, an das zwei Sauerstoffatome angelagert sind. Es stellt damit ein dreiatomiges Molekül dar (Bild 27). Die Atome des Moleküls sind in der Lage, Schwingungen auszuführen. Diese Schwingungszustände sind, ebenso wie die Energiezustände des Atoms, quantisiert. Das bedeutet, die Schwingungsamplitude kann nur vorgegebene, diskrete Werte annehmen. Diese Werte werden durch Quantenzahlen charakterisiert. Der Schwingungszustand eines dreiatomigen Moleküls wird durch eine dreistellige Zahl angegeben. Dabei bezeichnet

die erste Ziffer die symmetrische Streckschwingung, bei der die beiden äußeren Atome gegenläufig schwingen;
 die zweite Ziffer die Knickschwingung, bei der das mittlere Atom senkrecht zur Molekülachse schwingt;
 die dritte Ziffer die symmetrische Streckschwingung, bei der die äußeren Atome in gleicher Richtung schwingen.

Die Zahl 000 charakterisiert den Grundzustand des Moleküls. Zahlen mit den Ziffern 1, 2, ... bedeuten höher angeregte Schwingungszustände des Moleküls. Es soll noch erwähnt werden, daß das Molekül außer den Schwingungen auch Rotationen um verschiedene Achsen durchführen kann, die gleichfalls einer Quantisierung

unterliegen. Diese Rotationen sowie eine mögliche zusätzliche Anregung von Energiezuständen in der Elektronenhülle der Atome sollen hier nicht betrachtet werden. Im Prinzip zeigt somit ein Molekül ein ähnliches energetisches Verhalten wie ein Atom. Auch das Molekül kann bestimmte vorgegebene Energiezustände einnehmen, Energie speichern, d. h. Strahlung absorbieren und wieder abgeben.

Im CO_2 -Laser wird die inverse Besetzung zwischen zwei Energiezuständen des Moleküls geschaffen. Jedoch kann ebenso wie beim He-Ne-Laser die Inversion nicht durch direkte Anregung in einer Gasentladung hervorgerufen werden. Man verwendet auch hier ein zusätzliches Gas, nämlich Stickstoff. Auch das N_2 -Molekül weist Schwingungszustände auf. Allerdings können bei einem zweiatomigen Molekül nur symmetrische Streckschwingungen auftreten, so daß die Charakterisierung des Schwingungszustandes durch eine Quantenzahl mit nur einer Ziffer erfolgt. Dabei wird mit der Zahl 0 wiederum der Grundzustand bezeichnet.

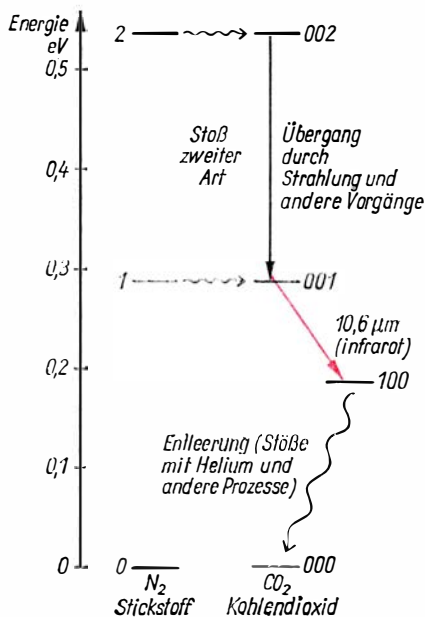


Bild 28. Energieschema des CO_2 -Lasers

Es zeigt sich, daß der Energiezustand 1 des Stickstoffmoleküls energetisch mit dem Zustand 001 des Kohlendioxidmoleküls näherungsweise übereinstimmt (Bild 28). Außerdem ist dieser Zustand des N_2 -Moleküls metastabil, er weist eine große Lebensdauer auf. Dadurch besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, daß durch Stöße zweiter Art die Energie der N_2 -Moleküle auf die CO_2 -Moleküle übertragen wird.

Auf diese Weise wird eine inverse Besetzung des Zustandes 001 gegenüber dem Zustand 100 im CO_2 -Molekül geschaffen. Der Übergang zwischen diesen beiden Zuständen entspricht einer Wellenlänge von $10,6\ \mu m$. Zu der Überbesetzung des oberen Laserzustandes gegenüber dem unteren trägt noch ein weiterer Prozeß bei. Der CO_2 -Zustand 002 kann gleichfalls durch Zusammenstoß mit N_2 -Molekülen (die sich im Zustand 2 befinden) besetzt werden. Die CO_2 -Moleküle gehen dann vom Zustand 002 in den Zustand 001 über – ein Prozeß, der zur Vergrößerung der Inversion des Laserübergangs beiträgt.

Die Lebensdauer des oberen Laserzustandes 001 ist größer als die des unteren Zustandes 100. Die Lebensdauer des unteren Laserzustandes kann noch verkleinert werden, indem man in das Entladungsrohr zusätzlich Heliumgas einfüllt. Die Entleerung des

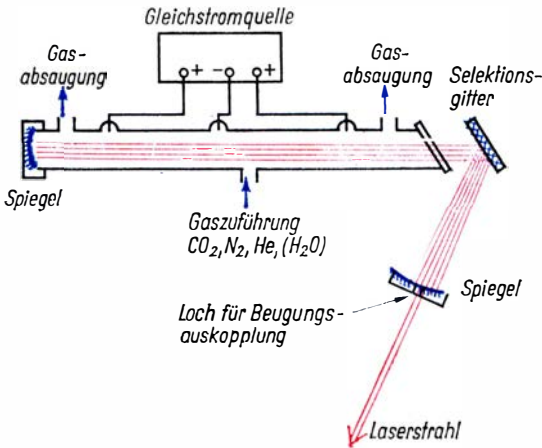


Bild 29. CO_2 -Laser (schematischer Aufbau)

unteren Laserzustandes kann dann auch bei Zusammenstößen der CO_2 -Moleküle mit den He-Atomen vor sich gehen. Durch die Beimengung von Helium kann die Lebensdauer des unteren Laserzustandes von 200 auf rd. 30 μs verkleinert werden.

Ein Beispiel für den konstruktionsmäßigen Aufbau eines CO_2 -Lasers zeigt Bild 29.

Die Resonatorspiegel müssen für die »große« Wellenlänge (10,6 μm) einen ausreichend hohen Reflexionskoeffizienten aufweisen. Dazu eignen sich Schichten aus Gold, Aluminium o. ä., die auf Unterlagen von Quarz oder Glas aufgedampft werden. Eine Unterlage aus Glas läßt aber kein infrarotes Licht einer Wellenlänge von rd. 10 μm hindurch. Da es schwierig ist, geeignete infrarotdurchlässige Unterlagen herzustellen, wird zur Auskopplung des Lichtes aus dem Resonator oft ein Verfahren angewandt, wie es auf Bild 29 dargestellt ist. Man schließt das Entladungsrohr mit einem infrarotdurchlässigen Fenster ab (meist im Brewsterwinkel). In den Auskopplungsspiegel bohrt man ein Loch, das Licht wird durch Beugung an dieser Öffnung ausgekoppelt. Die große Wellenlänge des CO_2 -Lasers läßt ein derartiges Verfahren zu.

Während der Helium-Neon-Laser heute die technologische Reife erreicht hat, daß das Entladungsrohr einmal gefüllt wird und dann einige tausend Stunden im abgeschmolzenen Zustand betrieben werden kann, wird der CO_2 -Laser oft noch am Pumpstand im Durchfluß betrieben. Es entstehen während seines Betriebes Zerfallsprodukte, die die Lebensdauer eines abgeschmolzenen Rohres und die Laserleistung herabsetzen. Die Lebensdauer von abgeschmolzenen Rohren kann durch Zugabe von Wasserdampf erhöht werden.

Die höchste bisher erzielte Leistung eines Lasers im Dauerbetrieb erreicht man mit einem CO_2 -Laser. Dabei wurde das gasdynamische Prinzip angewendet. Es besteht darin, daß man das Gasgemisch mit hoher Geschwindigkeit durch ein speziell konstruiertes System quer zum Resonator strömen läßt. Dabei kann man unter Umständen sogar auf eine elektrische Entladung zur Molekülanregung verzichten. Avco baute einen CO_2 -Laser auf gasdynamischer Grundlage, bei dem das Gas von einem Raketentriebwerk durch den Resonator geblasen wird. Man leitet den Gasstrom durch eine Düse. Vor der Düse hat das Gas einen Druck von 17 at und eine Temperatur von 1400 K. Beim Durchtritt durch die Düse (es

wurden 12 kg Gas je Sekunde mit der Überschallgeschwindigkeit von 1300 m/s durchgeblasen) entspannt sich das Gas. Es kühlt sich auf Zimmertemperatur ab, der Druck beträgt 0,1 at. Die dabei stattfindenden Prozesse (die hier nicht näher erläutert werden können) gewährleisten die notwendige Inversion der Molekülzustände. Das Gasgemisch bestand aus 9% CO_2 , 90% N_2 und 1% H_2O . Der Laserresonator selbst war nur 80 cm lang. Mit diesem Laser konnte die Rekordleistung für den Dauerbetrieb von 60 kW erzielt werden.

Immer wieder muß man sich vor Augen halten, daß geforderte Eigenschaften eines Lasertyps von dessen Anwendung abhängen. So braucht ein Helium-Neon-Laser, der in der Längenmeßtechnik verwendet wird, keine große Strahlungsleistung aufzubringen.

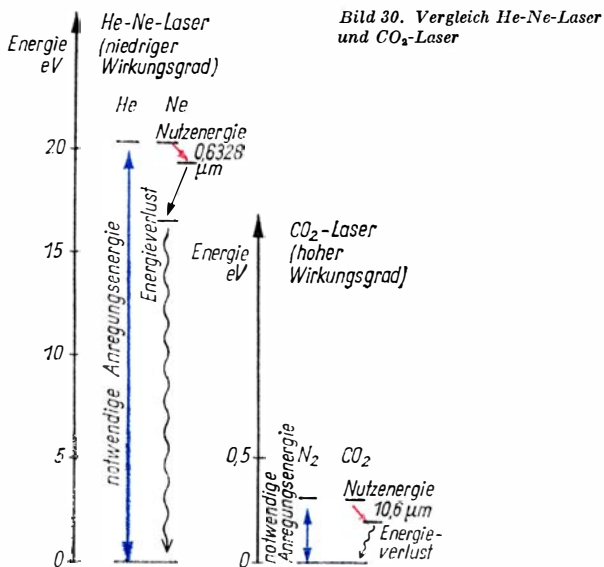
Andererseits legt man etwa bei der Materialbearbeitung keinen Wert auf Kohärenzeigenschaften o. ä., sondern strebt vor allem nach ausreichender Strahlungsleistung.

Der CO_2 -Laser weist einen Wirkungsgrad in bezug auf die Umsetzung von elektrischer Energie in Strahlungsenergie des Laserstrahls von rd. 15 % auf. Dieser Wert wird von anderen Gaslasern nicht im entferntesten erreicht. Worin besteht die Ursache für diesen hohen Wirkungsgrad? Zum Verständnis sollen die Energieschemata des Helium-Neon-Lasers und des CO_2 -Lasers verglichen werden (Bild 30).

Es ist zu erkennen, daß sich beim Neon der eigentliche Laserübergang energetisch sehr hoch über dem Atomgrundzustand befindet. In der Gasentladung sind nur wenige Elektronen vorhanden, die eine so hohe Geschwindigkeit aufweisen, daß sie das Helium (und somit auch das Neon) auf den notwendigen Energiezustand bringen. Außerdem geht etwa 90 % der Anregungsenergie nutzlos verloren, wenn die Atome vom unteren Laserzustand über einen Zwischenzustand auf den Grundzustand zurückgehen. Daher rührt der äußerst geringe Wirkungsgrad (rd. 10^{-3}) beim Helium-Neon-Laser.

Im CO_2 -Laser ist eine völlig andere Situation gegeben. Der Energieunterschied vom Grundzustand zum unteren Laserzustand ist etwa so groß wie der Energieunterschied des Laserübergangs selbst. Das bedeutet einmal, daß genügend Elektronen vorhanden sind, um die Stickstoffmoleküle anzuregen und damit den oberen Laserzustand im CO_2 zu besetzen. Zum anderen geht wenig Energie

3. Laserarten



verloren, wenn das Molekül vom unteren Laserzustand in den Grundzustand zurückgeht.

Der CO₂-Laser kann vor allem in der Materialbearbeitung Anwendung finden. Seine Strahlung mit einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ hat den Vorteil, in einem atmosphärischen »Fenster« zu liegen, d. h., es besteht die Möglichkeit, in der Atmosphäre eine Lichtübertragung zur Nachrichtentechnik über große Strecken dämpfungsarm durchzuführen.

Im CO₂-Laser findet der Laserübergang zwischen zwei Energiezuständen statt, die verschiedenen Schwingungsformen des Kohlendioxids entsprechen. Dieser Laser liefert die höchsten Lichtleistungen im Dauerbetrieb von allen z. Z. bekannten Lasern. Er wird z. Z. besonders für die Materialbearbeitung eingesetzt.

3.1.3.2. TEA-Laser

Da der CO₂-Laser heute den leistungsstärksten kontinuierlichen Lasertyp darstellt, versuchte man, mit ihm auch hohe Impuls-

leistungen zu erzielen. Es zeigte sich, daß sich die bei Festkörperlaser angewandten Methoden der Erzeugung von Riesenimpulsen (Drehspiegel, Sättigungsabsorber) beim CO_2 -Laser nicht bewährten. Unter großem Aufwand erzielte man mit diesen Methoden Impulsleistungen von nur einigen 100 kW. Bei Festkörperlaser erreichte man hingegen Impulsleistungen im Giga- bzw. Terawattbereich. Von kanadischen Wissenschaftlern wurde Anfang 1970 ein CO_2 -Laser vorgestellt, der Impulsleistungen von rd. 100 MW abgibt. Man ging von der Vorstellung aus, daß bei höherem Gasdruck im Entladungsrohr auch die Ausgangsleistung steigt. Es stehen bei höherem Gasdruck je Volumeneinheit mehr Moleküle für die Ausstrahlung zur Verfügung. Hinzu kommt, daß der untere Laserzustand beim CO_2 -Laser im wesentlichen durch Stöße entleert wird. Erhöht man den Gasdruck, so erhöht sich auch die Zahl der Zusammenstöße je Zeiteinheit zwischen den Molekülen. Man berechnete, daß die mittlere Leistung, die je Volumeneinheit vom CO_2 -Laser abgegeben werden kann, dem Quadrat des Druckes proportional ist. Der Gasdruck des kontinuierlich arbeitenden CO_2 -Lasers liegt zwischen 1 und 100 Torr. Der optimale Gasdruck, der bei etwa 10 Torr liegt, ist bedingt durch Parameter, die eine kontinuierliche homogene Gasentladung gewährleisten müssen. Um eine höhere Leistung zu erzielen, wurde bei dem neuen Lasertyp ein Gasdruck von 1 at (760 Torr) gewählt. Bei diesem Druck kann man jedoch keine kontinuierliche Gasentladung parallel zum Laserstrahl erreichen. Es wird deshalb eine impulsförmige Entladung senkrecht zum Laserstrahl gezündet. Im Gegensatz zum kontinuierlich betriebenen CO_2 -Laser wird bei diesem neuen CO_2 -Lasertyp

ein Gasdruck von 1 at gewählt und
die Entladung senkrecht zum Laserstrahl betrieben.

Dieser CO_2 -Lasertyp erhielt die Bezeichnung »TEA-Laser« (»Transversal-Excited-Atmospheric-Pressure-Laser« – Transversal angeregter Atmosphärendruck-Laser). Mit dieser Methode sollen in Zukunft Leistungen im Gigawattbereich erzielt werden.

Wie ist ein solcher TEA-Laser aufgebaut, welche Probleme treten auf? Im Prinzip gleicht der Aufbau dem kontinuierlich arbeitenden CO_2 -Laser (Bild 31). Das Entladungsrohr ist jedoch etwas anders konstruiert, um die transversale Entladung zu gewährleisten. Man

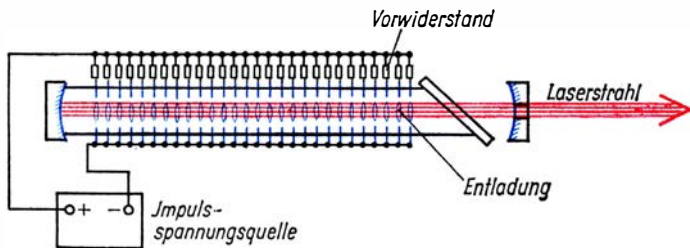


Bild 31. Konstruktionsprinzip des TEA-Lasers

kann z. B. keine zwei gegenüberliegenden Platten verwenden, da in diesem Fall die Entladung nur in eng begrenzten Funkenkanälen vor sich geht. Deshalb wurden kammartig geformte Elektroden verwendet. Damit gleiche Spannungen an den einzelnen Stiften anliegen, wird jeder Stift über einen dazugehörigen Widerstand mit der Spannungsquelle verbunden. Die Anregung wird über mehrere hundert Einzelentladungen gewährleistet. Auch das Gasgemisch, das sich im Entladungsrrohr befindet, muß wahrscheinlich etwas modifiziert werden.

Der TEA-Laser weist gegenüber dem kontinuierlich arbeitenden CO₂-Laser eine Reihe von Vorteilen auf. Da der Druck im TEA-Laser gleich dem Außendruck der umgebenden Luft ist, werden an die Apparatur geringere Anforderungen gestellt. Die Gefäße (z. B. das Entladungsrrohr) müssen keine Vakuumdichtheit aufweisen, eine Vakuumapparatur ist unnötig. Eine aufwendige Kühlung zum Abführen der Verlustwärme kann wegfallen, wenn der Laser im Einzelimpulsbetrieb arbeitet. Die Kosten für die Herstellung des TEA-Lasers könnten geringer sein als beim kontinuierlich betriebenen CO₂-Laser. Um diese Vorteile auszunutzen, kann man den TEA-Laser für bestimmte Anwendungen (z. B. Materialbearbeitung) quasi kontinuierlich betreiben, d. h., die Impulse werden in schneller Folge gezündet. Eine Wiederholfrequenz der Impulse von 1 kHz ist schon erreicht worden, dabei lag die mittlere Leistung bei 200 W. In diesem Fall muß allerdings die entstehende Verlustwärme abgeführt werden.

Der TEA-Laser wird infolge seiner Eigenschaften zu den Hochleistungsimpulslasern gerechnet. Zu dieser Klasse gehören vor allem auch die leistungsstarken Festkörperlaser. Der Vorteil des TEA-

Lasers gegenüber den Festkörperlasern gleicher Ausgangsleistung liegt in den geringen Kosten des aktiven Materials. Die hohen Anforderungen an die optische Güte der Rubin- und Neodymglasstäbe machen ihre Herstellung teuer. Das wird durch gasförmige Medien umgangen. Hinzuzufügen ist, daß Bestrebungen im Gange sind, das TEA-Prinzip auch bei anderen Lasern, z. B. beim Argonlaser, anzuwenden.

Das Prinzip des TEA-Lasers weist einige wesentliche Besonderheiten gegenüber den bisherigen Gaslasern auf. Die Anregung erfolgt in bezug auf den Laserstrahl transversal. Der Gasdruck beträgt 1 at, ist also wesentlich höher als bei anderen Gaslasertypen. Das TEA-Prinzip wurde beim CO₂-Laser verwirklicht. Man erzielte große Impulsleistungen. Der TEA-CO₂-Laser gehört zu den Hochleistungsimpulslasern und ist in der Herstellung relativ billig.

3.2. Festkörperlaser

Energiestruktur des Festkörpers

Einer der Aggregatzustände der uns umgebenden Stoffe ist der feste Zustand. Bei dieser Erscheinungsform einer Substanz liegt eine weitestgehende Ordnung der Atome vor. Im Gegensatz dazu steht beispielsweise ein Gas, in dem die Atome ständig chaotisch durcheinanderfliegen. Man spricht von einem Festkörper, wenn die Teilchen, aus denen er besteht, räumlich gesehen ein mehr oder weniger ideales Kristallgitter bilden. Ein idealer Kristall besteht aus einer unendlichen Anzahl von ein und denselben Strukturelementen (z. B. Atome oder Atomkonfigurationen). Diese sind im Raum so geordnet, daß in jeder beliebigen Betrachtungsrichtung Periodizität festgestellt werden kann. Dabei ist eine unendliche Anzahl von Wiederholungen der Strukturelemente zu verzeichnen. Die Hauptaufgabe der Festkörperphysik ist die Untersuchung der Eigenschaften von Systemen, die eine räumliche periodische Verteilung von Atomen, d. h. ein Kristallgitter, aufweisen.

Die Atome im Festkörper stehen untereinander in starker Wechselwirkung. Im Gegensatz dazu können z. B. beim Gas in den meisten Fällen die Atome als isoliert voneinander betrachtet werden.

3. Laserarten

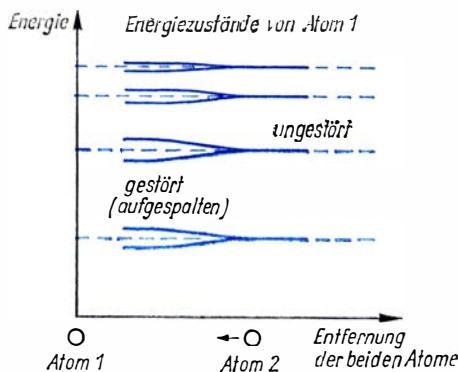
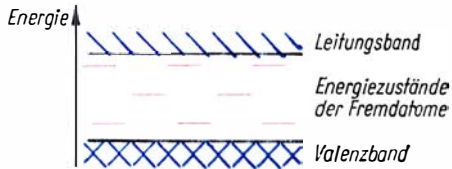


Bild 32. Aufspaltung der Energiezustände eines Atoms unter dem Einfluß eines anderen Atoms

Die starke Wechselwirkung hat einen wesentlichen Einfluß auf die Energiestruktur der Atome. Was geschieht mit den Energiezuständen eines Atoms, wenn es sich einem anderen nähert? In Bild 32 ist die Energiestruktur eines Atoms aufgetragen, und zwar in Abhängigkeit von der Entfernung zu einem anderen Atom. Ist die Entfernung zwischen den beiden Atomen groß, dann ist ihre Energiestruktur noch ungestört, und das energetische Verhalten entspricht dem eines isolierten Atoms. Wenn sich die beiden Atome einander nähern, dann werden die Energiezustände unter dem Einfluß des anderen Atoms aufgespalten. Es entstehen je zwei Energiezustände anstelle von einem. Kommen weitere Atome hinzu, so werden die Energiezustände immer mehr aufgespalten. Dabei ist zu beachten, daß die Abstände zwischen den aufgespaltenen Zuständen nicht groß sind. Im Endeffekt bestehen bei einem Festkörper anstelle der energetisch sehr schmalen Energiezustände des Atoms *Energiebänder*, mit wesentlich größerer energetischer Breite. Wird der Festkörper aus N Atomen gebildet, so kann man sich ein Energieband zusammengesetzt aus N entsprechenden Energiezuständen des Einzelatoms denken. Innerhalb eines Bandes ist das Energiespektrum kontinuierlich, eine Unterscheidung zwischen einzelnen Energiezuständen ist nicht mehr möglich (Bild 33). Ebenso wie die Atome des Festkörpers eine kollektive Ansammlung mit bestimmten Gesetzen bilden, so verhalten sich auch die dazu-

Bild 33. Energetisches
Bändermodell des Fest-
körpers



gehörigen Elektronen kollektiv. Sie sind energetisch den einzelnen Bändern zugeordnet. Jedes Band kann nur von einer endlichen, definierten Anzahl von Elektronen besetzt werden. Zwischen den Bändern bestehen verbotene Zonen, die Elektronen können die entsprechenden Energiezustände nicht einnehmen.

Bei der Temperatur des absoluten Nullpunkts $T = 0 \text{ K}$ wären alle erlaubten Energiezustände bis zu einem bestimmten Energieniveau voll besetzt. Oberhalb dieser Grenze wären dann alle Energiezustände nicht besetzt. Dieses Energieniveau, das die besetzten von den unbesetzten Energiezuständen trennt, nennt man *Fermi-Niveau* E_F . Das oberste Energieband, das noch voll besetzt ist, nennt man *Valenzband*. Das darüberliegende Band wird als *Leitungsband* bezeichnet. Innerhalb des Valenzbandes sind die Elektronen fest an die Atome gebunden. Befinden sich Elektronen im Leitungsband, so sind sie im gesamten Bereich des Festkörpers, für den das spezielle Energieschema gilt, frei beweglich. Sie können beispielsweise an einem elektrischen Stromfluß teilnehmen.

Die Verteilung der Elektronen auf die möglichen Energiezustände wird durch die Fermi-Dirac-Verteilung beschrieben (Bild 34):

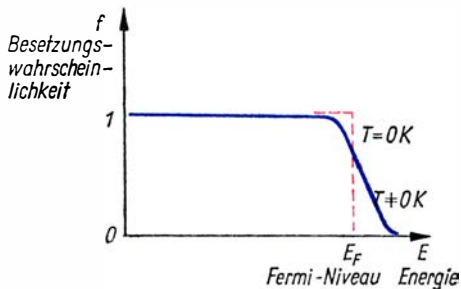


Bild 34. Fermi-Dirac-
Verteilung

$$f = \frac{1}{\exp \left\{ \frac{E - E_F}{kT} \right\} + 1} \quad (39)$$

E Energie des betreffenden Energiezustandes

f Wahrscheinlichkeit dafür, daß der betreffende Energiezustand besetzt ist

k Boltzmann-Konstante

T Temperatur

E_F Fermi-Niveau.

Den Metallen kann man ein Energieschema zuordnen, bei dem das Fermi-Niveau innerhalb eines Energiebandes liegt. Im Leitungsband befinden sich eine Vielzahl von Elektronen, die am elektrischen Stromfluß teilnehmen können. Solche Substanzen bezeichnet man als »Leiter«, sie weisen einen geringen spezifischen elektrischen Widerstand auf (rd. $10^{-6} \Omega \text{ cm}$).

Den Gegensatz zu den Leitern bilden die Isolatoren. Das Fermi-Niveau liegt in einer verbotenen Zone. Der Energieabstand zwischen Valenzband und Leitungsband ist groß. Im Leitungsband befinden sich so gut wie keine Elektronen. Es sind also so gut wie keine Ladungsträger vorhanden, die an einem elektrischen Stromfluß teilnehmen können. Der spezifische Widerstand liegt zwischen $10^{14} \Omega \text{ cm}$ und $10^{22} \Omega \text{ cm}$.

Zu den Halbleitern werden Substanzen gerechnet, deren spezifischer Widerstand im Bereich zwischen 10^{-2} und $10^{-9} \Omega \text{ cm}$ liegt. Auch hier befindet sich das Fermi-Niveau zwischen zwei Energiebändern, jedoch ist der Energieabstand zwischen Valenz- und Leitungsband nicht so groß wie bei den Isolatoren. Bei der Temperatur $T = 0 \text{ K}$ würde sich ein reiner, idealer Halbleiterkristall wie ein Isolator verhalten. Charakteristische Eigenschaften zeigen sich bei Temperatureinfluß sowie bei Vorhandensein von Defekten oder Verunreinigungen in der Kristallstruktur.

Das Bändermodell gilt in seiner dargestellten Form nur für absolut reine Stoffe, die frei von Verunreinigungen und Defekten im Kristallgitter sind. Auch Oberflächeneffekte werden hierbei nicht berücksichtigt. Fremdatome weisen andere Energiezustände auf als die Atome des sie umgebenden Kristallgitters. Die Energiezustände der Fremdatome stellt man im Energieschema gesondert

dar (Bild 33). Sofern die Anzahl der im Festkörper vorhandenen Fremdatome klein ist, beeinflussen sie sich nicht untereinander. Man betrachtet sie in diesem Fall als isolierte Atome, ihre Energiezustände werden im Energiespektrum des Festkörpers als kurze Striche dargestellt. Ist die Anzahl der Fremdatome relativ groß, so beeinflussen sie sich gegeneinander. In diesem Fall können sie gleichfalls Energiebänder bilden, die im Energiespektrum des Festkörpers berücksichtigt werden müssen. Eine Verbreiterung der Energiezustände der Fremdatome kann auch unter dem Einfluß des Kristallgitters erfolgen.

Die Fremdatome können die Eigenschaften des Festkörpers entscheidend beeinflussen. Ein gezieltes Einbringen von Fremdatomen in den Festkörper nennt man *Dotierung*. Um eine Dotierung durchzuführen, muß vor allen Dingen erst einmal das Grundmaterial in möglichst reiner Form hergestellt werden. Danach wird eine definierte Menge an Fremdatomen hinzugegeben. Auf diese Weise werden Halbleiterbauelemente hergestellt.



Das Energieschema des Festkörpers weist anstelle einzelner Energiezustände (beim Atom) Energiebänder auf. Fremdatome bringen gesonderte Energiezustände ein. Ein gezieltes Einbringen von Fremdatomen nennt man »Dotierung«.

Festkörperlaser

Im Festkörperlaser geht der eigentliche Laserübergang in den Dotierungsatomen vor sich. Als Beispiel soll Rubin dienen (Bild 35). Die Grundsubstanz von Rubin ist Korund (Al_2O_3). Sie ist mit Chromoxid (Cr_2O_3) dotiert, wobei im Rubin die Chromionen dreifach ionisiert sind (Cr^{3+}).

Bild 35 zeigt, daß unter dem Einfluß des Kristallgitters einige Energiezustände der Chromionen verbreitert sind. Man bezeichnet sie als *Absorptionsbänder* der Ionen. Wird in den Kristall Licht eingestrahlt, das die entsprechende Wellenlänge aufweist, so wird es von den Ionen absorbiert.

Auf der Grundlage der Absorption der Ionen beruht auch die spezielle Anregungsart, die beim Festkörperlaser angewendet wird: das *optische Pumpen*. Bei einem Gas ist es ein seltener Zufall, wenn

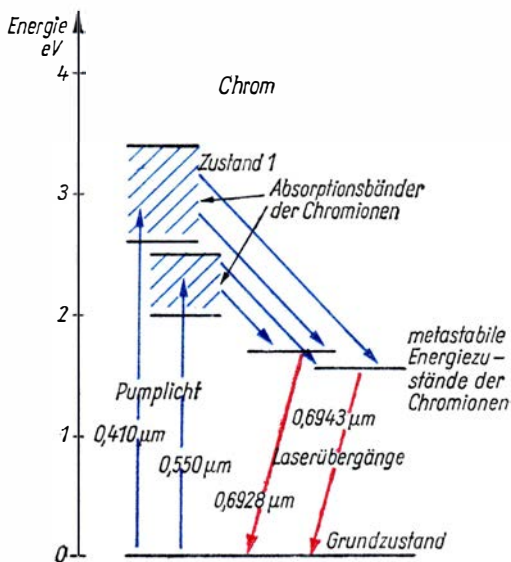


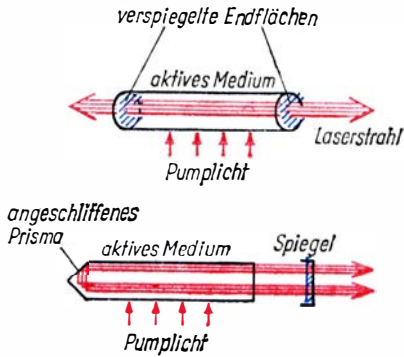
Bild 35.
Energieschema
des Rubinlasers
($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{+++}$)

man eine Lichtquelle zum Einstrahlen findet, deren Wellenlänge gerade mit dem gewünschten Übergang übereinstimmt, den man zum Pumpen braucht. Das kommt daher, daß die Energiezustände der Gase sehr schmal sind. Deshalb und auch aus technologischen Gründen wird ein Gaslaser meist mit Strom angeregt. Anders sieht es beim Festkörperlaser aus. Es lassen sich leichter Spektrallinien von Lichtquellen finden, deren Wellenlänge mit dem Absorptionsband (großer Wellenlängenbereich) der Dotierungionen übereinstimmt. So kann man die Chromatome in Rubin mit der Strahlung einer Quecksilberlampe pumpen.

Der Laserprozeß im Festkörperlaser geht folgendermaßen vor sich: Die Pumplichtquelle (Quecksilberlampe) strahlt Licht aus, deren eine Linie mit einem Absorptionsübergang im Dotierungion (Chrom) zusammenfällt. Die Chromatome werden in den Zustand 1 versetzt. Aus diesem Zustand gehen die Atome sehr schnell in den oberen Laserzustand über. Der obere Laserzustand ist metastabil.

Sobald genügend Atome den oberen Laserzustand erreicht haben

Bild 36. Verschiedene Möglichkeiten der Anordnung eines Festkörperlasers



und damit eine inverse Besetzung zustande gekommen ist, wird das Lasermaterial »aktiv« und kann Licht verstärken. In einen Resonator eingebracht, bildet das aktive Medium die Grundlage für den Laser-Generator.

Das Lasermaterial wird meist in Form von Stäben hergestellt (Bild 36).

Die Endflächen der Stäbe kann man direkt verspiegeln. Damit kann der Resonator mit dem aktiven Material eine Einheit bilden. Für besondere Zwecke, z. B. für die Güteschaltung (s. 5.3.), wird nur eine Endfläche des Stabes verspiegelt. Durch die andere Endfläche kann dann das Licht ungehindert hindurchtreten. Man bringt in diesem Fall einen zweiten Resonatorspiegel zusätzlich an.

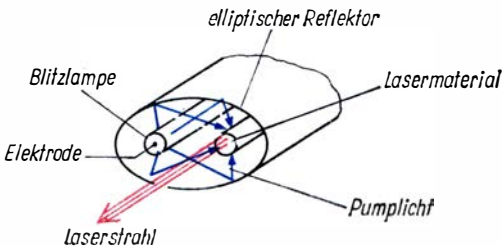


Bild 37. Anordnung von Pumplichtquelle und Lasermaterial in den Brennpunkten eines elliptischen Reflektors

Als Pumplichtquellen verwendet man vor allem Blitzlampen, da die meisten Festkörperlaser im Impulsbetrieb arbeiten. Um das Licht möglichst gut in das Stabmaterial eindringen zu lassen, verwendet man vielfach elliptische Reflektoren (Bild 37). In den beiden Brennpunkten der Ellipse sind Blitzlampe und Laserstab angebracht. Die Energie für die Strahlung der Blitzlampe wird in Form von elektrischer Ladung in Kondensatoren bereitgestellt. Diese Kondensatoren sind in bezug auf Volumen und Masse meist wesentlich größer als der eigentliche Laserkopf, der durch Laserstab, Blitzlampe und Reflektor gebildet wird.

Es ist möglich, mit Festkörperlasern Ausgangsenergien bis zu 100 Ws zu erzeugen. Die Impulsdauer kann man in einem großen Bereich, je nach der Anwendung, variieren. Sie kann bei 1 ms liegen, die kürzesten erreichten Zeiten liegen aber schon im Bereich der Piko-sekunden (10^{-12} s).

Der erste Laser, der im Jahre 1960 von *Maiman* vorgestellt wurde, war ein Festkörperlaser, das verwendete Material Rubin. Es hat sich herausgestellt, daß damit ein ausgezeichnetes Material gefunden wurde, das auch heute noch in vielen Festkörperlasern eingesetzt wird. Die wichtigste Laserwellenlänge beträgt beim Rubinlaser $0,6943 \mu\text{m}$, liegt also im roten Bereich des Spektrums. Der Rubinlaser wird im allgemeinen nur impulsmäßig betrieben. Neben Chrom im Rubin findet das Neodym noch breite Verwendung. Es gehört zu den seltenen Erden. Neodym kann in eine Reihe von Materialien eindotiert werden, z. B. in CaWO_4 (Kalziumwolframat) oder in $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, kurz als YAG (Yttrium-Aluminium-Granat) bezeichnet. Als Grundmaterial dient auch Glas. Die Wellenlänge der Strahlung eines Lasers, in dem Neodym als aktives Atom dient, beträgt $1,06 \mu\text{m}$ (infrarot).

Eine Zeitlang war es nur möglich, den Festkörperlaser im Impulsbetrieb zu betreiben. Anordnungen für Dauerbetrieb hatten wenig Sinn, der Wirkungsgrad war schlecht, und die auftretenden Probleme der Kühlung waren technologisch schwer zu bewältigen. Es ist jedoch gelungen, auch Festkörperlaser kontinuierlich laufen zu lassen. Das dabei verwendete Material ist YAG (mit Neodym dotiert). Hier kann ein großer Wirkungsgrad erreicht werden. Es können Spitzenleistungen von einigen Kilowatt erzeugt werden, die demnach durchaus mit den mit CO_2 -Lasern erreichten Strahlungsleistungen vergleichbar sind.

Das aktive Medium des Festkörperlasers besteht aus einem Kristall, in dem Fremdatome eingelagert sind (Chrom bzw. seltene Erden). Die Pumpenergie wird optisch mit Blitzlampen eingebracht. Dabei wird meist ein elliptischer Reflektor verwendet. Oft werden die Endflächen des Laserstabes selbst verspiegelt. Der Festkörperlaser wird meistens impulsmäßig betrieben. Die erzeugten Energien liegen bei $1 \dots 100$ Ws, die Leistungen zwischen $1 \dots 100$ kW. Beispiele für den Festkörperlaser sind der Rubinlaser ($0,694 \mu\text{m}$) und der Neodymglaslaser ($1,06 \mu\text{m}$). Der YAG-Laser kann kontinuierlich betrieben werden (max. Ausgangsleistung einige Kilowatt).

3.3. Halbleiterlaser

Auf die Grundlagen der Arbeit des Halbleiterlasers kann in diesem Buch nicht eingegangen werden. Die Physik der Halbleiter stellt dafür ein viel zu umfangreiches Gebiet dar, und es kann nicht von jedem Leser ein ausreichendes Grundwissen in diesem Gebiet vorausgesetzt werden. Deshalb sollen nur einige allgemeine Gesichtspunkte aufgeführt werden.

Die Eigenschaften der Halbleiter können durch Dotierung (gezieltes Einbringen von Fremdatomen) entscheidend beeinflusst werden. Für die Herstellung der meisten Halbleiterbauelemente wendet man folgendes Verfahren an: In einen Teil des Halbleitergrundkristalls wird eine Sorte von Fremdatomen eindotiert, in den anderen Teil eine andere Sorte. Man erhält auf diese Weise innerhalb des Kristalls Gebiete mit verschiedenen elektrischen Eigenschaften. Beispielsweise dotiert man in die Halbleitergrundsubstanz Silizium die Fremdstanz Arsen in geringer Menge ein. Beim Einfügen in das Kristallgitter des vierwertigen Siliziums werden nur vier Valenzelektronen des fünfwertigen Arsens gebunden. Deshalb kann ein Elektron des Arsens leicht abgegeben werden und am Stromfluß teilnehmen. Ein solches Fremdatom bezeichnet man als *Donator*. Es entsteht ein Material, bei dem der Stromfluß durch Elektronen gewährleistet wird. Es wird als n-Material bezeichnet. Andererseits kann man in das Siliziumkristallgitter Bor eindotieren. Bor

ist dreiwertig, es fehlt ein Valenzelektron beim Einordnen in das Kristallgitter des Siliziums. Es entstehen Fehlstellen im Kristall. Man bezeichnet solche Fremdatome als *Akzeptoren*. Die entstandenen Fehlstellen (*Löcher*) können unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes wandern. Sie verhalten sich wie positive Ladungen, die am Stromfluß teilnehmen. Ein solches Material bezeichnet man als p-Material.

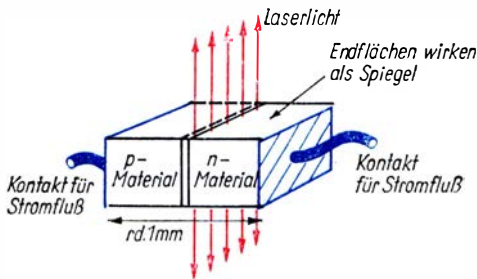
Durch geeignete Dotierung kann man erreichen, daß im Halbleitergrundmaterial ein n-Gebiet und ein p-Gebiet entstehen. Die Grenze zwischen beiden Gebieten wird *pn-Übergang* genannt. An diesem Übergang entsteht eine Potentialschwelle. Diese Schwelle kann von den Elektronen in der einen Stromflußrichtung gut, in der anderen nur schlecht überwunden werden. Es entsteht eine Vorzugsrichtung des Stroms. Dieser Effekt wird beim Aufbau von Halbleiterdioden ausgenutzt, die in der einen Stromrichtung sperrend, in der anderen stromdurchlässig wirken sollen. Ein Transistor hingegen besteht aus einer geeigneten Anordnung von zwei pn-Übergängen in einem Halbleiterkristall.

Beim Stromdurchfluß in Durchlaßrichtung wird an jedem pn-Übergang Strahlung erzeugt. Das hängt mit dem Übertritt von Ladungsträgern aus dem einen Gebiet in das andere zusammen. Folglich kann jede gewöhnliche Diode, die zum Gleichrichten des Stroms dient, Strahlung aussenden. Da die Strahlung aber im infraroten Bereich des Spektrums liegt, die Konstruktion der Diode keinen optimalen Strahlungsausstritt zuläßt und die Diode in einem Gehäuse eingeschlossen ist, wird im allgemeinen keine Strahlung registriert. Es gibt aber auch Dioden, die speziell für Strahlungsabgabe geschaffen wurden. Sie werden *Lumineszenzdioden* genannt. Sie werden heute für viele Zwecke eingesetzt, beispielsweise für optische Entfernungsmessung. Man verwendet sie auch in Ziffernanzeige-Einheiten. Diese Einheiten bestehen aus einem Block, in dem Lumineszenzdioden in geeigneter Anordnung sowie eine elektronische Schaltung zu ihrer Ansteuerung eingebaut sind. Sie ersetzen die bisher üblichen Ziffernanzeigeröhren, wobei die Leuchtkraft und die Lesbarkeit entscheidend besser sind. Man versucht heute schon Fernsehempfänger zu entwickeln, bei denen das Fernsehbild nicht mit Hilfe einer Elektronenröhre, sondern durch eine Vielzahl von Lumineszenzdioden (auf einer Fläche angeordnet) erzeugt werden soll.

Einen wesentlichen Schritt auf diesem Gebiet stellt eine Lumineszenzdiode dar, die mit einem Leuchtstoff belegt ist. Es gelingt eine Lichtumwandlung aus dem roten bzw. infraroten Bereich des Spektrums bis in das Blau hinein. Somit kann man heute Strahlung aller drei Grundfarben des Spektrums (blau, gelb, rot) mit Lumineszenzdioden erzeugen. Durch Lichtmischung lassen sich Fernsehbilder in Farbe herstellen. Das »Fernsehbild an der Wand« rückt damit in den realen Bereich des Möglichen.

Die Lumineszenzdioden geben zwar Strahlung ab, aber es kann kein Lasereffekt erreicht werden. Voraussetzung für die lichtverstärkende Eigenschaft einer Substanz ist die inverse Besetzung der Energiezustände. Man erreicht sie am pn-Übergang, d. h. bei einer Diode, durch bestimmte, sehr hohe Dotierung. Um einen optischen Resonator zu schaffen, werden zwei Seitenflächen des Halbleiterkristalls parallelisiert (Bild 38). Sie wirken als Spiegel für die ausgesandte Strahlung. Damit ist der Kristall geeignet, Laserlicht auszusenden.

Bild 38. Halbleiterlaser
(schematischer Aufbau)



Das bekannteste Material für Laserdioden ist Galliumarsenid (GaAs). Das n-Gebiet wird durch Dotierung mit Selen, Tellur bzw. Silizium erzeugt, wobei in das vorgesehene p-Gebiet vor allem Zink eindotiert wird. Die Laserwellenlänge eines GaAs-Halbleiterlasers beträgt $0,89 \mu\text{m}$.

Ein Halbleiterlaser hat verschiedene Eigenschaften, die ihn von anderen Lasertypen unterscheiden. So wird die Energie des elektrischen Stroms direkt in Lichtenergie umgewandelt. Daher ist es möglich, sein Licht durch Modulation des elektrischen Stroms ohne zusätzliche Bauelemente zu beeinflussen. Der theoretisch

3. Laserarten

erreichbare Wirkungsgrad beträgt 100%. Weiterhin sind die Laserdioden sehr klein. Sie haben ein Volumen von etwa 1 mm^3 . Da die dazugehörigen elektronischen Geräte keinen großen Aufwand erfordern, stellt der Halbleiterlaser eine kompakte Lichtquelle hoher Leistung dar. Man erreichte mit Laserdioden rd. 1 kW Ausgangsleistung im Impulsbetrieb sowie mehrere Watt im Dauerbetrieb.

Es ist allerdings zu bemerken, daß der Halbleiterlaser auch negative Eigenschaften aufweist. So ist die austretende Strahlung nicht so stark gebündelt wie beispielsweise beim Gaslaser. Sie liegt im infraroten Bereich des Spektrums und ist auch nicht so monochromatisch wie die Strahlung anderer Laserarten. Die Reproduzierbarkeit einiger Strahlungsparameter läßt noch zu wünschen übrig. Die Halbleiterdioden müssen meist gekühlt werden, um einen Betrieb bei geringer Stromdichte zu erreichen. Die Herstellung dieser Dioden erfordert eine ausgereifte Halbleitertechnologie. Trotzdem ist zu erwarten, daß die störenden Faktoren weitgehend überwunden werden und Halbleiterdioden in vielen Bereichen der Technik eingesetzt werden können.

Eine ganze Reihe von Anwendungsmöglichkeiten des Halbleiterlasers sind jetzt schon abzusehen. So können z. B. Laserdioden in tragbaren Entfernungsmeßgeräten eingesetzt werden, die, in Flugzeugen bzw. Hubschraubern eingebaut, eine exakte Höhenbestimmung während des Landens gewährleisten. Andererseits kann man tragbare Entfernungsmeßgeräte bei geodätischen Vermessungsarbeiten einsetzen. Eine andere Anwendung wäre der Einsatz des Laserstrahls von Halbleitern als Leitstrahl für Flugzeuge zur Unterstützung bei der Landung. Man könnte derartige Geräte auch zur Steuerung von Arbeitsmaschinen und beim Straßen-, Hoch- und -Tiefbau einsetzen. Weiterhin werden heute Lumineszenzdioden für Lichtschranken benutzt. Laserdioden können den Einsatzbereich von Lichtschranken erweitern. Auch für die Nachrichtenübertragung wäre ein System, aufgebaut aus diesen Halbleiterbauelementen, denkbar. Eine weitere Anwendung ist der Einsatz als Lichtquelle für Infrarot-Sichtgeräte.

Es muß erwähnt werden, daß vor allem in der Sowjetunion nach neuen Wegen gesucht wird, Halbleiter für die Erzeugung von Laserstrahlung einzusetzen. Beispielsweise wird an Laserlichtquellen gearbeitet, die als aktives Material Halbleiterkristalle verwenden,

die keinen pn-Übergang aufweisen. Man pumpt diese Substanzen mit Hilfe von Elektronenstrahlen. Inwieweit solche Systeme Anwendung für industrielle Zwecke finden, wird sich in der Zukunft erweisen.



Eine Lumineszenzdiode ist eine Halbleiterdiode (pn-Übergang), die speziell für den Lichtaustritt gefertigt ist. Durch eine Reihe von Maßnahmen kann man Laserstrahlung am pn-Übergang erzeugen, wobei die Endflächen des Kristalls den Resonator bilden. Theoretisch beträgt der Wirkungsgrad des Halbleiterlasers 100%. Er arbeitet kontinuierlich und im Impulsbetrieb.

Das bekannteste Halbleitermaterial für den Laser ist Galliumarsenid ($0,89\text{ }\mu\text{m}$). Die Modulation des Halbleiterlasers erfolgt relativ einfach über den Anregungsstrom.

3.4. Laser mit aktivem Medium in flüssigem Zustand

3.4.1. Chemische Laser

Der derzeitige Stand der chemischen Laser zeichnet sich noch durch die Suche nach geeigneten Wegen aus. Einer der Vorzüge der chemischen Laser ist die Möglichkeit der Konzentration großer Energiemengen je Volumeneinheit. Damit ist eine weitere Möglichkeit gegeben, Hochleistungslaser von relativ geringem Ausmaß zu entwickeln. Außerdem können in diesem Lasertyp elementare chemische Prozesse untersucht werden.

Die Laserstrahlung kann im chemischen Laser sowohl kontinuierlich als auch impulsmäßig erzeugt werden. Der Wirkungsgrad liegt bei einigen Prozent und die Ausgangsleistung bei einigen hundert Watt.

Ein chemischer Laser arbeitet nach folgendem Prinzip: Zwei Stoffe, die miteinander chemisch reagieren können, werden in Verbindung gebracht. Die Endprodukte der chemischen Reaktion befinden sich meist in einem angeregten energetischen Zustand. Unter bestimmten Bedingungen kann eine inverse Besetzung entstehen. Sie bildet die Grundlage für den Laserprozeß. Das

3. Laserarten

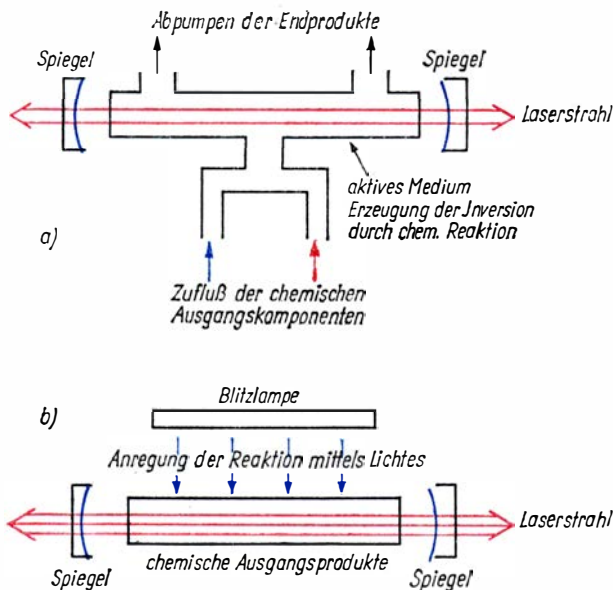


Bild 39. Chemischer Laser (verschiedene Anordnungen)

a) selbständige chemische Reaktion

b) chemische Reaktion mit Anregung

bedeutet, daß der Pumpprozeß, der sonst mit Hilfe von Licht, elektrischer Entladung usw. vor sich geht, von der chemischen Reaktion übernommen wird.

Man arbeitet bei chemischen Lasern mit zwei Methoden. Einmal kann man die Ausgangskomponenten der Reaktion unmittelbar vor dem Einspritzen in den aktiven Teil des Lasers mischen, in dem dann die Reaktion stattfindet (Bild 39a). Die zweite Methode beruht darauf, daß es Reaktionen gibt, die ohne äußere Einwirkung nur sehr langsam verlaufen. Man kann daher die Ausgangsprodukte in die Küvette einbringen (Bild 39b) und lange Zeit im Ausgangszustand erhalten. Durch eine Einwirkung von außen (Blitzlampe bzw. elektrische Entladung) wird die chemische Reaktion in Gang gebracht. Diese zweite Methode ist natürlich nur impulsmäßig anwendbar.

Ein Nachteil der Arbeit von Lasern mit chemischer Reaktion besteht darin, daß die Endprodukte immer wieder entfernt werden müssen. Im Gegensatz dazu kann beispielsweise ein Entladungsröhre eines He-Ne-Lasers in abgeschmolzenem Zustand mehrere tausend Betriebsstunden ohne irgendeine Veränderung betrieben werden. Es ist aber anzunehmen, daß die chemischen Laser mit der Zeit einen technologischen Stand erreichen werden, der das zeitraubende Auswechseln der chemischen Produkte unnötig macht. Das könnte mit Hilfe von Umwälzanlagen, auswechselbaren »Patronen« oder auch durch ausreichende schnelle Regenerierung geschehen.

Man hofft, daß in der Zukunft chemische Hochleistungslaser gebaut werden können, die entweder im Dauer- oder Impulsbetrieb arbeiten. Damit würde man der Entwicklung eines vom elektrischen Stromnetz unabhängigen Hochleistungslasers näherkommen. Ein solches Gerät wäre sowohl für industriellen Einsatz als auch für militärische Zwecke einsetzbar. Gerade im militärischen Bereich stehen für den Betrieb der Laser nur Stromquellen begrenzter Leistung zur Verfügung. Diese Schwierigkeit könnte durch Ausnutzung chemischer Energie überwunden werden.

Das Pumpen, d. h. die Bereitstellung der notwendigen Energie, wird im chemischen Laser mit Hilfe von chemischen Reaktionen gewährleistet. Dabei kann die Reaktion durch Einwirkung von außen stimuliert werden. Ein Problem stellt noch das Auswechseln der chemischen Produkte dar. Der Vorteil der chemischen Laser besteht in der hohen Energiekonzentration je Volumeneinheit.

3.4.2. Farbstofflaser

Laser, die als aktives Medium Farbstoffe enthalten, sind in den Laboratorien noch in Entwicklung. Es werden zwar schon Farbstofflaser angeboten, aber die Möglichkeiten sind auf diesem Gebiet in keiner Weise ausgeschöpft. Das aktive Medium in solchen Lasern wird durch organische Farbstoffe gebildet, die in einer Flüssigkeit als Lösung vorliegen. Man verwendet Szintillator-Farbstoffe, Rhodamine, Zyanine und eine ganze Anzahl anderer Substanzen. Auch bei diesen Lasern muß man, ähnlich wie beim Festkörper-

laser, eine äußere Lichtquelle verwenden, damit der Pumpprozeß vor sich gehen kann. Das sind vor allem Blitzlampen, die einen Pumpimpuls zur Erzeugung der inversen Besetzung des Laserübergangs abgeben. Eine andere Methode zur Erzeugung der Inversion ist das Pumpen der Farbstofflösung mit einem Hilfslaser. Man pumpte beispielsweise Zyaninfarbstoffe mit Rubin-Riesenimpulslasern. Einen kontinuierlichen Betrieb erreicht man, indem als Pumplichtquelle ein Argonlaser verwendet wird. Die entscheidende Besonderheit des Farbstofflasers besteht darin, daß die Wellenlänge seiner Ausstrahlung in weiten Grenzen variiert werden kann. Bei den meisten der heute bekannten Laser liegt diese Wellenlänge von vornherein fest. Nur durch Ersetzen des aktiven Mediums kann Strahlung mit einer anderen, aber wiederum schon von vornherein festliegenden Wellenlänge erzeugt werden. Da aber der Übergang zu einem anderen Medium in der Regel auch Veränderungen der Resonator- und Pumpanordnung erfordert, ist ein Verändern der Wellenlänge nach einer solchen Methode praktisch unmöglich, abgesehen von einer kontinuierlichen Durchstimmung.

Beim Farbstofflaser liegt eine andere Situation vor. Seine Emissionslinie ist von vornherein schon sehr breit. Durch Einbringen einer Selektionseinrichtung in den Laserresonator (z. B. ein Prisma oder ein Gitter) kann man einen Ausschnitt aus dieser Linie auswählen. Diesen verändert man wellenlängenmäßig durch Verstimmen der Selektionseinrichtung. Man erhält damit eine abstimmbare Lichtquelle. Ihre (durch Selektion eingeeengte) Linienbreite ist gegenüber herkömmlichen Lichtquellen extrem schmal. Sie kann bis zum MHz-Bereich und darunter eingeeengt werden (d. h. 10^{-6} nm). Das garantiert ein ausgezeichnetes Auflösungsvermögen für die Spektroskopie.

Der Abstimmbereich eines Farbstofflasers kann durch Konzentrationsänderung noch erweitert werden. Man erzielt Abstimmung von 20...180 nm Breite. Unter Benutzung verschiedener Farbstoffe und Pumpquellen kann man Laseremission im Bereich von 340 bis 1200 nm erzielen. Das entspricht dem gesamten optischen Bereich einschließlich seiner Grenzgebiete.

Zu bemerken ist, daß trotz Einengung der Strahlungsbreite durch Selektionselemente fast kein Intensitätsverlust gegenüber einer breiten Emission des Farbstofflasers auftritt. Das bedeutet, daß der Laser während seiner Durchstimmung seine volle Leistung bei-

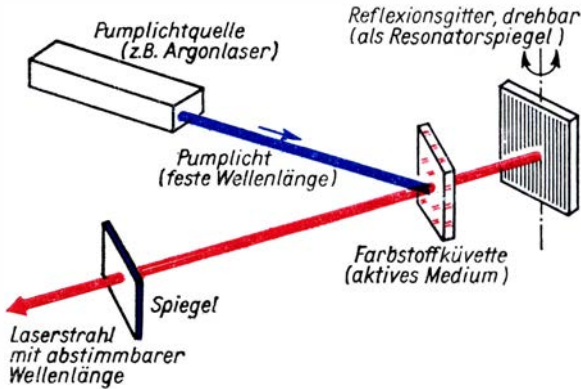


Bild 40. Farbstofflaser mit veränderbarer Wellenlänge (schematischer Aufbau)

behält. Im Impulsbetrieb erreicht man einige Kilowatt Strahlungsleistung, im kontinuierlichen Betrieb etwa 50 mW. Infolge der hohen räumlichen Konzentration des Laserlichtes ist diese Lichtquelle herkömmlichen Beleuchtungseinrichtungen in der Mehrzahl der Anwendungen überlegen. Zur Zeit können diese Laser aber nur für Sonderzwecke eingesetzt werden, da ihr Preis noch sehr hoch ist.

Die wichtigste Eigenschaft des Farbstofflasers ist seine Abstimbarkeit in einem relativ großen Bereich der Wellenlänge. Wenn einige Nachteile dieser Laser überwunden sind, könnte eine intensitätsreiche, abstimmbare Lichtquelle für die Spektroskopie zur Verfügung stehen.

3.5. Vergleich der Lasertypen

Eine absolute Wertung der einzelnen Lasertypen kann es nicht geben. Ihre Einsatzmöglichkeit hängt immer von der konkreten Anwendung ab. Umgekehrt muß berücksichtigt werden, daß es keinen Universallaser geben kann, der »alles schafft«. Von Fall zu Fall muß entschieden werden, welche geforderten Parameter die wichtigsten sind. Danach erst kann man einen geeigneten Laser auswählen und gegebenenfalls auch nach neuen Wegen suchen.

3. Laserarten

Aggregatzustand	Art	Aktives Medium (Beispiel)	Wellenlänge (meist benutzte) in μm	Normale Ausgangsleistung
Gasförmig	atomares Gas	Neon (+ He)	0,6328	0,01 ... 0,1 W
	ionisiertes Gas	Argon	0,488	0,1 ... 10 W
	molekulares Gas	CO ₂ (+ N ₂ + He)	10,6	100 ... 10000 W
	Metall-dampf	Hg, Cs, Pb, Cd		
Fest	Kristalle mit Fremdatomen (Festkörper)	Chrom in Al ₂ O ₃ (Rubin)	0,6943	einige MW
		Neodym in YAG	1,06	einige kW
	Glas mit Fremdatomen	Neodym in Glas	1,06	einige kW
Flüssig	Farbstoff in H ₂ O bzw. Alkohol	Rhodamin B Pyroin B Europium	kontinuierlich durchstimmbar	einige kW
	Chemische Reaktion			
Fest	Halbleiter	GaAs	0,890	einige W

3.5. Vergleich der Lasertypen

Erreichte Spitzenleistung	Anregungsart	Betriebsart (meist angewendete)	Bemerkungen
einige 100 mW	Gasentladung	kontinuierlich	technologisch ausgereift, erster Gaslaser
100 W	Gasentladung	kontinuierlich	stärkster kont. Laser im kurzwell. sichtb. Bereich
20... 60 kW	Gasentladung	kontinuierlich Impuls (TEA-Prinzip)	stärkster kontinuierlicher Laser
	Gasentladung	kontinuierlich	
mit nachgeschaltetem Verstärker einige Gigawatt bzw. Terawatt	Einstrahlung von Licht (Blitzlampe)	Impuls	erster Laser (Rubin) kürzeste Impulse, höchste Ausgangsleistung
	Einstrahlung von Licht	Impuls u. kontinuierlich	
	Einstrahlung von Licht (Blitzlampe)	Impuls	
10 kW	Einstrahlung von Licht	Impuls	durchstimbare Wellenlänge
	chemische Reaktion	Impuls u. kontinuierlich	
	Stromdurchfluß	Impuls	kleinste Abmessungen

3. Laserarten

Aus diesem Grund soll nur auf die hauptsächlichen Vor- und Nachteile der einzelnen Lasertypen eingegangen werden (s. auch Bilder 41 und 42). Der He-Ne-Laser kann überall dort eingesetzt werden, wo bei der zur Verfügung stehenden Wellenlänge von $0,6328\text{ }\mu\text{m}$ (rotes Licht) hohe Genauigkeitsforderungen gestellt werden (andere Wellenlängen dieses Lasertyps, die im Infraroten liegen, sind aus technologischen Gründen nicht so stark gefragt). Die besonderen Forderungen betreffen die Kohärenzlänge, die Stabilität der Frequenz u. a. m. Die Ausgangsleistung ist mit geringem Aufwand stabil zu halten. Der technologische Aufwand ist, abgesehen von Sonderfällen, nicht besonders hoch. Die Technologie ist ausgefeilt, und die Lebensdauer der Entladungsrohre beträgt mehrere tausend Stunden. Der Helium-Neon-Laser ist der geeignete Lasertyp für die Forderungen der Längenmeßtechnik, für Fluchtung, Feinjustierung usw. Allerdings läßt sich die Wellenlänge der Ausstrahlung nicht verändern (bzw. nur in geringsten Grenzen). Außerdem ist die Ausgangsleistung für viele Anwendungen zu gering. Der Laser arbeitet im wesentlichen nur im kontinuierlichen Betrieb.

Der Argonlaser ist technologisch aufwendiger als der He-Ne-Laser. Jedoch ist die Wellenlänge seiner Ausstrahlung interessant ($\lambda = 0,488\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 0,5145\text{ }\mu\text{m}$ u. a.); sie liegt im grün-blauen Bereich. Für diesen Bereich haben viele unkompliziert herstellbare und daher billige Fotoempfänger gerade ein Empfindlichkeitsmaximum. Die kontinuierliche Strahlungsleistung der kommerziellen Argonlaser liegt im Bereich von einigen Watt bis in die Größenordnung von 10 W. Der Argonlaser findet Anwendung in der Spektroskopie, in der Holografie und in anderen Bereichen. Auch er wird vor allem kontinuierlich betrieben.

Der CO_2 -Laser ist zur Zeit der leistungsstärkste kontinuierliche Laser, den wir kennen. Die höchste bisher erzeugte Dauerleistung liegt bei etwa 60 kW. Ein fokussierter Strahl von solcher Strahlleistung läßt jedes Material verdampfen. Diese Spitzenleistung wird z. Z. kaum industriell erreicht bzw. benötigt werden. Da es aber nicht allzu schwierig ist, einige 100 W Ausgangsleistung zu erreichen, so steht einer breiten industriellen Anwendung des CO_2 -Lasers nichts im Wege. Seine Anwendungsgebiete sind z. Z. Materialbearbeitung und Nachrichtenübertragung.

Festkörperlaser werden fast ausschließlich impulsmäßig betrieben, wobei Höchstleistungen (Megawatt bis Terawatt) erreicht werden.

3.5. Vergleich der Lasertypen

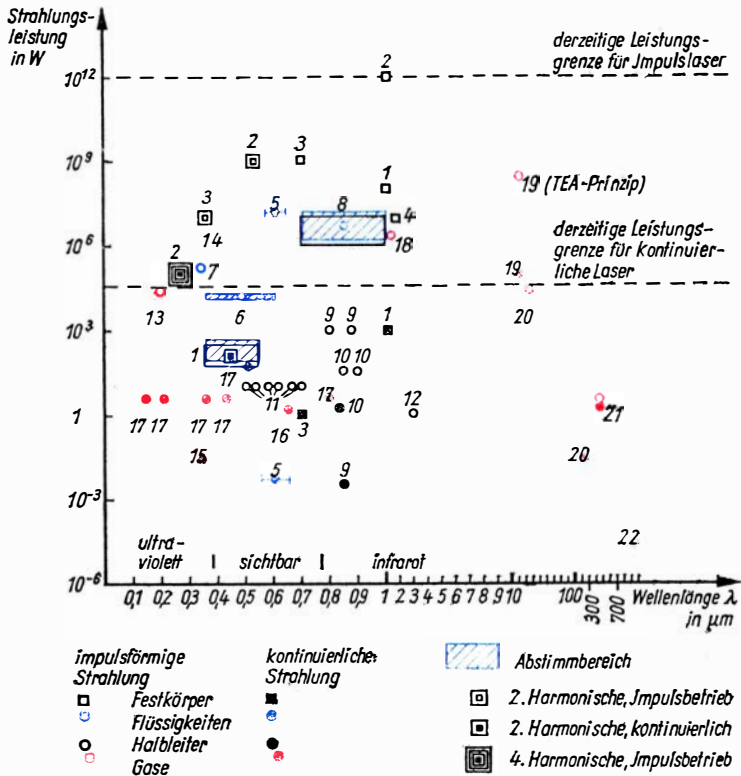


Bild 42. Übersicht über die wichtigsten Laserarten

Lasermaterialien

Festkörper

- 1 Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), neodymdotiert
- 2 Neodymglass
- 3 Rubin
- 4 Granat bzw. Glas, erbiumdotiert

Flüssigkeiten

- 5 Rhodamin 6 G
- 6 Szintillatoren

- 7 Rhodamin 6 GL

- 8 Polymethylen-Farbstoffe

Halbleiter

- 9 Zweifache Heterostruktur von Galliumarsenid und Gallium-Aluminium-Arsenid
- 10 Gallium-Arsenid
- 11 Schmelze aus Cadmium, Selen und Schwefel
- 12 Indium-Arsenid

Gase

- 13 Wasserstoff
- 14 Stickstoff
- 15 Kadmiumdampf
- 16 Helium-Neon
- 17 Argon
- 18 Joddampf
- 19 Kohlendioxid
- 20 Wasserdampf
- 21 Dampf der Zyanwasserstoffsäure
- 22 Dampf von Zyanjodid

3. Laserarten

Eine Ausnahme ist der kontinuierlich arbeitende YAG-Laser, der in der Nachrichtenübertragung und auch in der Materialbearbeitung Anwendung finden kann. Impulsfestkörperlaser (Rubin und Neodymglas) werden ebenfalls in der Materialbearbeitung eingesetzt, außerdem bei wissenschaftlichen Untersuchungen (vor allem für nichtlineare Optik und für Spektroskopie), bei der Entfernungsmessung und in anderen Bereichen. Halbleiterlaser fanden bis jetzt in Spezialgebieten Verwendung (z. B. bei Lichtschranken zur Sicherung militärischer Objekte). An der Lösung solcher Probleme wird vor allem in der Sowjetunion gearbeitet.

Chemische und Farbstofflaser stehen erst am Anfang der Entwicklung. Zu erwähnen sind noch die Metaldampflaser (vor allem der Kadmium-Laser), die für Sonderzwecke eingesetzt werden.

4. Bauelemente für Laser

4.1. Passive Elemente

4.1.1. Spiegel

Zur Herstellung der Laser und auch zu ihrer Anwendung gehören einige Dinge, die man allgemein als »Umfeld« bezeichnet. Das betrifft die Entwicklung geeigneter Laserspiegel, von mechanischen Aufbauten (vor allem der Laserresonatoren), geeigneter Empfänger für die Laserstrahlung u. a. m. In diesem Abschnitt soll vor allen Dingen behandelt werden, welche Anforderungen an die Bauelemente gestellt werden müssen, die nicht unmittelbar an der Lichtverstärkung teilhaben, an die sogenannten »passiven Elemente«.

Eine besondere Rolle beim Aufbau des Laserresonators kommt den Laserspiegeln zu. Bei verschiedenen Lasertypen werden auch unterschiedliche Anforderungen an die Spiegel gestellt. Die Laserspiegel bestehen aus einer Unterlage und aus aufgedampften reflektierenden Schichten. Die Unterlage (auch Träger genannt) muß, um die Auskopplung des Laserstrahls aus dem Resonator zu gestatten, durchlässig für das Licht der entsprechenden Wellenlänge sein. Als Trägermaterial wird für sichtbares Licht Glas bzw. Quarz verwendet. Für die im infraroten Bereich des Spektrums arbeitenden CO₂-Laser wird als Trägermaterial beispielsweise gepreßtes, polykristallines ZnS bzw. BaS unter der Bezeichnung Irtran II bzw. Irtran IV angewendet.

Für einen Spiegel können verschiedene Koeffizienten definiert werden (Bild 43):

$$\text{Durchlaßkoeffizient } D = \frac{I_D}{I_0} \quad (40)$$

$$\text{Reflexionskoeffizient } R = \frac{I_R}{I_0} \quad (41)$$

$$\text{Verlustkoeffizient } V = \frac{I_{\text{Streu}} + I_A}{I_0} \quad (42)$$

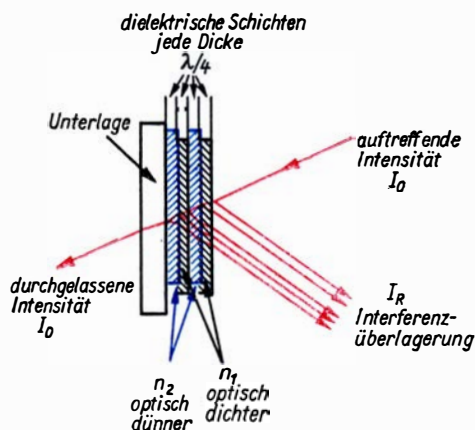


Bild 43. Schema
des dielektrischen
Spiegels

Es bedeuten

I_0 auftreffende Intensität des Lichtes

I_D durchgelassene Intensität des Lichtes

I_R Intensität des reflektierten Lichtes

$I_{\text{Streulicht}}$ Intensität des diffus gestreuten Lichtes

I_A Intensität des absorbierten Lichtes.

Da die Bedingung

$$I_0 = I_D + I_R + I_{\text{Streulicht}} + I_A$$

erfüllt sein muß, so gilt

$$D + R + V = 1.$$

Für einen Laserspiegel wird angestrebt, daß der Verlustkoeffizient so niedrig wie möglich gehalten wird. Daher kann man in erster Näherung schreiben:

$$D + R = 1. \quad (43)$$

Sowohl der Durchlaßkoeffizient als auch der Reflexionskoeffizient werden meist in Prozent angegeben. Die Summe beider Koeffizienten muß also gleich 100 % sein.

Das Material für die reflektierende Schicht (Metall oder dielektrische Mehrschichten) wird in speziellen Verdampfungsanlagen auf die Unterlage aufgebracht. Eine Metallschicht als Spiegelbelag hat bei einer Reihe von Anwendungen den Vorteil, daß der entstandene Spiegel in einem großen Gebiet der Wellenlänge eine gleichmäßige Reflexion aufweist. Man kann jedoch in diesem Falle die Absorption nicht vernachlässigen. Das bedeutet, daß man keine Spiegel mit hohem Reflexionskoeffizienten herstellen kann. Der maximale Reflexionskoeffizient für Metallspiegel liegt bei 95...98 %. Außerdem tritt bei hohen Strahlungsintensitäten auf Grund der genannten Absorption eine Zerstörung durch Erwärmung ein.

Man wendet deshalb für die Herstellung der Laserspiegel in den meisten Fällen eine andere Methode an. Sie beruht auf der Interferenzfähigkeit des Lichtes. An der Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Brechzahl kommt es bei Durchgang des Lichtes immer zu einer mehr oder weniger großen Reflexion (Bild 44). Die Substanzen, die man für die Herstellung der

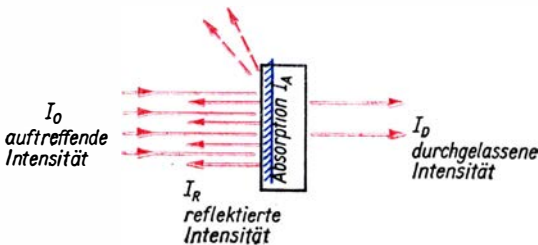


Bild 44. Reflexion und Durchlässigkeit eines Spiegels

Schichten verwendet, sind lichtdurchlässig. An der zweiten Grenzfläche zwischen den Medien wird wiederum ein Teil des Lichtes reflektiert. Man wählt eine Schichtdicke von $\lambda/4$ (λ -Wellenlänge des Lichtes in der Schicht). Daher hat die Lichtwelle, die an der zweiten Grenzfläche reflektiert wurde, gerade einen Weg von $\lambda/2$ zurückgelegt, wenn sie an der ersten Grenzfläche austritt. Rechnet man den Phasensprung bei der Reflexion am dichteren Medium dazu, so besteht zwischen den beiden reflektierten Wellen ein Phasenunterschied von λ . Die Feldstärken der beiden Wellen addieren sich. Ein großer Anteil des auftreffenden Lichtes wird reflektiert. Um diesen Vorgang wiederholt ausnutzen zu können, dampft man mehrere

4. Bauelemente für Laser

Schichten aufeinander. 10 bis 20 Schichten sind keine Seltenheit für Laserspiegel. Der technische Aufwand ist dabei schon recht hoch, denn alle Schichten müssen homogen über die gesamte Oberfläche verteilt sein und immer die gleiche Dicke haben.

Man nennt die nach diesem Verfahren hergestellten Spiegel nach dem Schichtenmaterial *dielektrische Interferenzspiegel*. Ihr Reflexionsvermögen ist für die einfachsten Fälle nur in einem kleinen Wellenlängenbereich ausreichend hoch. Die erreichbaren Reflexionskoeffizienten können fast 100 % betragen.

Für alle Spiegel gilt, daß die Unterlage mechanisch gut bearbeitet sein muß. Dabei kommen die besten Bearbeitungsmethoden für optische Gläser in Betracht. An die reflektierenden Schichten wird die Anforderung gestellt, daß sie gleichmäßig über die gesamte Oberfläche verteilt, streu- und absorptionsfrei sind und ihre Eigenschaften auch nach einigen tausend Stunden Betriebsdauer nicht verändern.

Welche speziellen Anforderungen werden durch die einzelnen Lasertypen an die Spiegel gestellt?

1. Helium-Neon-Laser

Das aktive Medium dieses Lasers erlaubt nur eine relativ geringe Verstärkung. Deshalb müssen die Verluste im Resonator extrem niedrig gehalten werden. Aus diesem Grund soll der Reflexionsgrad der Spiegel große Werte erreichen (98...99%). Verluste, die innerhalb der Spiegelschichten durch Streuung und Absorption auftreten, müssen so klein wie möglich sein.

2. Argonlaser

Die Verstärkung ist größer als beim He-Ne-Laser. Ein extrem hoher Reflexionsgrad ist demzufolge nicht mehr erforderlich. Dafür ist aber die Beständigkeit der Spiegel gegen intensive Laserstrahlung im Hinblick auf ihre Lebensdauer ein Problem. Interessant sind Spiegel, die auf Grund ihrer Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten von der Wellenlänge eine unmittelbare Wellenlängenselektion ohne zusätzliche optische Bauteile zulassen.

3. Festkörperlaser

Die Verstärkung im Festkörperlaser ist so hoch, daß die Anforderungen an den Reflexionsgrad nicht mehr kritisch sind. Dafür

wird aber der Spiegel durch die Laserimpulse höchsten Belastungen ausgesetzt. Bei hohen Feldstärken im Resonator kann es geschehen, daß die Spiegel schon nach einem Impuls unbrauchbar werden. Aus diesem Grund müssen die Spiegel einer hohen Belastung widerstehen.

4. *CO₂-Laser*

Auch bei diesem Laser treten hohe Belastungen der Spiegel auf. Für hohe Gleichlichtleistungen muß man generell eine Kühlung der Spiegel vorsehen. Das größte Problem ist jedoch die Herstellung geeigneter Spiegelträger an der Auskopplungsseite. Sie müssen durchlässig für infrarote Strahlung sein. Eine weit verbreitete Methode ist die Beugungsauskopplung, bei der die Strahlung durch eine Öffnung in der Mitte des Auskoppelspiegels austritt. Die Wellenlänge (10,6 μm) und die Größe der Verstärkung des Lasers lassen dieses Verfahren zu.

Bei Gaslasern muß unterschieden werden, ob sich die Spiegel am Entladungsrohr selbst befinden (»Innenspiegellaser«) oder aber das Entladungsrohr durch Fenster abgeschlossen ist. Im zweiten Fall (»Außenspiegellaser«) haben die Spiegel keinen Kontakt mit dem Gasgemisch. Beim Innenspiegellaser darf eine Einwirkung des Gasgemisches und der Gasentladung auf die Eigenschaften der Spiegel nicht zugelassen werden.

5. *Flüssigkeitslaser*

Der Vorteil dieser Laser besteht in ihrer Abstimmbarkeit über einen großen Wellenlängenbereich. In diesem Bereich müssen auch die Spiegel ausreichend hoch reflektieren. Daher ist ein Einsatz von dielektrischen Spiegeln nur dann möglich, wenn sie genügend breitbandig, d. h. über einen großen Wellenlängenbereich noch reflektierend sind.

Metallspiegel reflektieren annähernd gleichmäßig in einem weiten Wellenlängenbereich, weisen aber eine verhältnismäßig hohe Absorption auf. Interferenzspiegel erreichen Reflexionskoeffizienten von nahezu 100 %.

Einen universellen Laserspiegel gibt es nicht, da für verschiedene Lasertypen die verschiedensten Anforderungen gestellt werden. Die Skala reicht von den Forderungen an höchstes Reflexionsvermögen bis zur bestmöglichen Belastbarkeit.

4.1.2. Piezokeramik

Für bestimmte Anwendungen ist es notwendig, den Laserresonator in seiner Länge um geringe Beträge ($0,1 \dots 1 \mu\text{m}$) zu verstimmen. Dadurch kann z. B. die Frequenz der Ausstrahlung im Bereich des Verstärkungsprofils verändert werden. Es existieren mehrere Methoden für eine derartige Längenänderung, z. B. das Anlegen eines Magnetfeldes (Magnetostriktion). Am besten bewährt hat sich jedoch die Abstimmung mit Hilfe des piezoelektrischen Effektes. Bei bestimmten Materialien (Ionenkristalle, z. B. Quarz, Bariumtitanat u. a.) treten bei mechanischer Beanspruchung (z. B. Zug) Aufladungen an der Oberfläche auf, so daß man zwischen gegenüberliegenden Seiten eines Kristallwürfels eine Spannung messen kann (piezoelektrischer Effekt). Beispiele dafür sind z. B. Mikrofon oder Tonabnehmer.

Die Umkehrung des oben beschriebenen Effektes besteht darin, daß beim Anlegen einer Spannung an das geeignete Material eine mechanische Verformung auftritt. Dabei treten Deformationen in Richtung des elektrischen Feldes und auch quer zu ihm auf (Bild 45). Solche piezoelektrischen Materialien werden z. B. im VEB Keramische Werke Hermsdorf in verschiedenen Formen und Größen hergestellt.

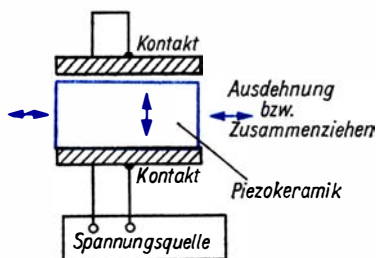


Bild 45. Anordnung zur Erzeugung des reziproken Piezoeffektes

Ein Abstimmeelement für einen Laserresonator kann damit folgendermaßen hergestellt werden: Auf eine Seite eines Zylinders aus Piezokeramik wird der Spiegel aufgebracht, die andere Seite wird an der Spiegelhalterung (Bild 46) befestigt. An die Elektroden, die an der Keramik leitend befestigt sind, wird eine Spannung

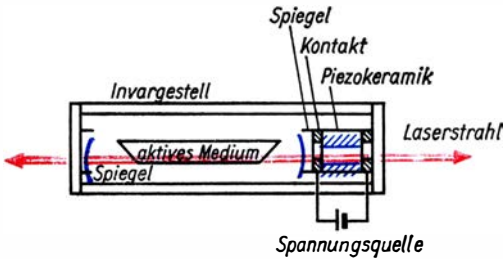


Bild 46. Laser mit Anordnung zur Frequenzabstimmung

angelegt (Größenordnung 100 V). Damit kann man die Länge des Zylinders und demzufolge auch die Resonatorlänge ändern.

Piezokörper arbeiten auf der Grundlage des reziproken piezoelektrischen Effektes und dienen zum Verändern der Resonatorlänge um geringe Beträge.

4.1.3. Resonatoraufbau

Besondere Forderungen werden an den mechanischen Aufbau des Lasers gestellt. Die Fertigung von Lasern setzt einen hohen Stand der Feinmechanik voraus. Das trifft z. B. auf das Problem der Spiegelhalterungen zu, die höchste Genauigkeit in bezug auf Winkeljustierung aufweisen müssen.

Oft tritt das Problem auf, einen Spiegel um seine Achse mit hoher Geschwindigkeit rotieren zu lassen (Riesenimpuls-Laser). Dabei muß bei jedem Durchlauf der Spiegel einmal wieder an derselben Stelle stehen, damit er zusammen mit dem anderen Spiegel den Resonanzraum bilden kann. Diese Drehspiegelanordnung, die zur Güteschaltung des Lasers benutzt wird, stellt höchste Anforderungen an den mechanischen Aufbau.

Ein weiteres Problem ist das Einhalten eines genauen Abstandes zwischen den Spiegeln beim Aufbau eines frequenzstabilen Lasers. Die Frequenzgenauigkeit und Stabilität einiger kommerzieller Laser beträgt beispielsweise $\Delta\nu/\nu = 10^{-7}$. Das bedeutet, daß auch die Resonatorlänge auf den Wert $\Delta L/L = 10^{-7}$ konstant gehalten werden muß. Für einen Resonator von etwa 20 cm Länge bedeutet

das eine Genauigkeit für die tolerierbare Längenänderung von $\Delta L = 0,02 \mu\text{m}$. Die Einhaltung dieser Genauigkeit kann z. B. durch Verwendung von elektronischen Regeleinrichtungen in Verbindung mit Piezokeramiken erreicht werden.

Es zeigt sich, daß der Laser ein Gerät ist, das an die verschiedensten Arbeitsbereiche völlig neue Forderungen stellt, das eine komplexe Entwicklung vieler angrenzender Gebiete geradezu zur Notwendigkeit macht.

4.1.4. Empfänger für Laserstrahlung

Als Empfänger der Laserstrahlung kommen alle Fotoempfänger in Frage. Man verwendet z. B. empfindliche Sekundärelektronenempfänger (SEV) für kleine oder aber Kalorimeter für höchste Leistungen.

1. Sekundärelektronenvervielfacher (SEV)

Diese fotoelektrischen Empfänger werden vor allem dort, wo kleine Leistungen zu messen sind, eingesetzt. Das gilt für physikalische Messungen, für Informationsübertragung, Entfernungsmessung usw. Extreme Forderungen beziehen sich auch auf die Auflösung und Messung von Impulsen geringster Zeitdauer (Nanosekunden, Pikosekunden) bzw. auf ein einwandfreies Arbeiten bei hohen Frequenzen (einige 100 MHz). SEV arbeiten nur bis zu einer Wellenlänge von etwa $1 \mu\text{m}$.

2. Fotodioden und Fotoelemente

ergänzen die SEV bezüglich des Anwendungsbereichs. Vor allem ihre Kleinheit und der geringe elektronische Aufwand im Vergleich zu den SEV machen sie geeignet für den Einsatz bei Laseranwendungen. Probleme bestehen in der Erweiterung ihrer Empfindlichkeit zum roten und infraroten Wellenlängenbereich hin und in der Ausdehnung des Frequenzbereichs.

3. Kalorimeter

112 arbeiten auf der Grundlage der Erwärmung eines bestimmten Materials durch Strahlung. Diese Erwärmung wird gemessen und

und in die Einheiten der Lichtleistung bzw. der Lichtenergie umgerechnet. Sie eignen sich besonders für die Absolutmessung der Strahlungsleistung von Hochleistungslasern aller Wellenlängen. Ihr Nachteil besteht darin, daß sie, bedingt durch den Wärmeeffekt, sehr langsam reagieren, d. h. nur sehr niederfrequente Lichtänderungen anzeigen können.

4. Empfänger für den infraroten Bereich

Als infraroter Bereich des Spektrums sollen Wellenlängen zwischen $1,5\text{ }\mu\text{m}$ und $30\text{ }\mu\text{m}$ verstanden werden. Für diese Wellenlängen sind die oben angeführten fotoelektrischen Bauelemente im allgemeinen ungeeignet, da sie keine Empfindlichkeit mehr aufweisen. So wurden spezielle Empfänger entwickelt, die man in zwei Gruppen unterteilen kann:

Die thermischen Empfänger beruhen auf der Aufheizung einer Probensubstanz durch das auftreffende Licht. Diese Aufheizung ist ein Maß für die Lichtintensität.

Die Fotoempfänger wandeln die Energie der Lichtteilchen direkt in ein nutzbares elektrisches Signal um. Sie arbeiten auf Halbleiterbasis.

Zu der Gruppe der thermischen Empfänger gehört die *Golay-Zelle*. Die zu untersuchende Strahlung fällt auf eine lichtabsorbierende Platte, die sich aufheizt. Die Platte ist mit einer Gaszelle verbunden und heizt damit auch das Gas auf. Bei Erwärmung vergrößert sich das Gasvolumen und verändert die Lage einer die Gaszelle abschließenden Membran. Die Lageänderungen werden von einem fotoelektrischen System registriert und einer Auswerteeinheit zugeführt. Um eine bessere Auswertung zu ermöglichen, wird die zu untersuchende Strahlung mit einer Frequenz von $5\text{ Hz} \dots 15\text{ Hz}$ periodisch unterbrochen. Dieser Empfänger ist sehr empfindlich (man kann Leistungen im μW -Bereich messen), er stellt den besten Empfänger für kontinuierliche Infrarotstrahlung dar. Die Tragheit ist allerdings, bedingt durch die Aufheizprozesse, sehr hoch.

Eine andere Möglichkeit, thermische Prozesse zum Nachweis der infraroten Strahlung zu verwenden, stellen die *pyroelektrischen Empfänger* dar. Bei einigen Kristallen, z. B. Lithiumtantalat oder Strontium-Barium-Niobat, treten bei Temperaturänderungen Verschiebungen im Kristallgefüge auf. Das führt zu Potentialunter-

4. Bauelemente für Laser

schieden, und an zwei Endflächen des Kristalls kann eine Spannung gemessen werden. Allerdings ist diese Spannung zeitlich nicht konstant. Sie ist nicht proportional der Temperatur, sondern proportional der zeitlichen Temperaturänderung:

$$u \sim \frac{dT}{dt}$$

u Spannung zwischen den Kristallendflächen

$\frac{dT}{dt}$ Temperaturänderung je Zeiteinheit.

Aus diesem Grund können wesentlich schnellere Prozesse untersucht werden als mit anderen thermischen Empfängern. Es können auf dieser Basis Empfänger gebaut werden, mit denen man Impulse mit Anstiegszeiten in der Größenordnung von Nanosekunden untersuchen kann. Daher eignen sich diese Empfänger besonders zur Untersuchung von Impuls-CO₂-Lasern (z. B. des TEA-Lasers) und anderen Impulslasern.

Zu den thermischen Empfängern zählen auch Geräte auf der Basis des thermoelektrischen Effekts oder auch Kalorimeter, mit denen Absolutmessungen der Strahlungsleistungen durchgeführt werden.

Fotoelektrische Empfänger für infrarote Strahlung sind auf der Grundlage von Effekten in Halbleitern entwickelt worden. Man nutzt dabei den inneren fotoelektrischen Effekt aus. Er besteht darin, daß unter dem Einfluß des Lichtes im Material Ladungsträger frei werden, die am Stromfluß teilnehmen können.

Für fotoelektrische Bauelemente kommen sowohl undotierte als auch dotierte Halbleiter als Fotowiderstände in Betracht wie auch Fotoelemente. Beispielsweise kann Indiumantimonid (InSb) als undotierter Fotohalbleiter eingesetzt werden. Bei Raumtemperatur liegt das Maximum der Empfindlichkeit bei 6,0 μm , und man kann Impulse mit Anstiegszeiten von rd. 10 ns untersuchen.

Ein Beispiel für dotierte Fotohalbleiter ist Germanium. Mit Gold dotiert erreichen Ge-Empfänger mögliche Auflösungszeiten von < 70 ns (Empfindlichkeitsmaximum bei 4,5 μm). Empfänger aus mit Kupfer dotiertem Germanium weisen ein Empfindlichkeitsmaximum bei 15 μm auf (Auflösungszeit < 1 μs).

Als Beispiel für Fotoelemente für Infrarot sollen die Verbindungen

lichkeit speziell auf den Bereich von $8 \cdots 14 \mu\text{m}$ abgestimmt werden kann. In diesem Wellenlängenbereich, in dem auch die Strahlung des CO_2 -Lasers liegt ($10,6 \mu\text{m}$), weist die Atmosphäre nur geringe Absorption auf.

Als Empfänger für die Laserstrahlung sind sämtliche Fotoempfänger einsetzbar. Dabei werden oft Forderungen gestellt, die in bezug auf den Wellenlängenbereich bzw. auf das zeitliche Auflösungsvermögen bis an die Grenze des heute Möglichen gehen.

4.2. Elemente zur aktiven Beeinflussung der Laserstrahlung

4.2.1. Nichtlineare Optik

In vielen Bereichen der Optik wie auch in der Radiotechnik besteht die Aufgabe, Signale zu übertragen. In der Radiotechnik verwendet man dazu Kabel, Röhren, Transistoren u. a. m. Dabei kommt es meist auf eine originalgetreue Übertragung vom Eingangs- zum Ausgangssignal an. Anders gesagt, diese Elemente müssen linear übertragen. Die Linearität einer Übertragungskurve (z. B. der Verstärkungskurve bei einer Röhre) läßt sich mit einem sinusförmigen Signal nachprüfen, das an den Eingang des Elementes gegeben wird. Am Ausgang muß wieder ein sinusförmiges Signal abzunehmen sein (Bild 47 a).

Gibt man dagegen ein sehr großes Signal an das Element, so kann es in einen Bereich gelangen, in dem das Element nicht mehr linear arbeitet. Umgekehrt ist für genügend kleine Signale jedes Übertragungselement linear. Erfolgt eine nichtlineare Übertragung, so erscheint am Ausgang kein reines Sinussignal mehr (Bild 47 b), das Ausgangssignal ist verzerrt. In diesem Arbeitsbereich haben die physikalischen Gesetze der linearen Übertragung keine Gültigkeit mehr. Diese Gesetzmäßigkeit gilt nicht nur in der Elektronik, sondern bei vielen Elementen, die ein Signal in ein anderes übertragen. Die Arbeitscharakteristik der Elemente in den jeweiligen Bereichen nennt man Übertragungsfunktion.

Die Verzerrung der Sinuskurve kann man auch anders auffassen. Ein verzerrtes Ausgangssignal besteht aus vielen Sinuskurven

4. Bauelemente für Laser

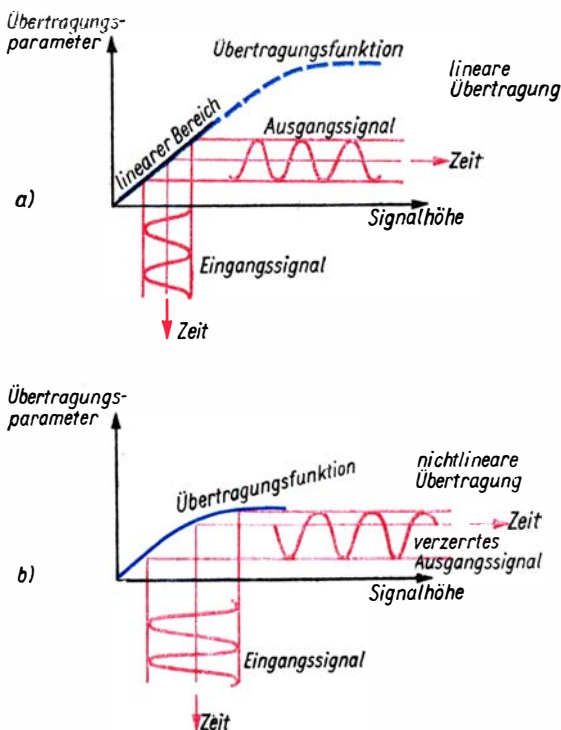


Bild 47. Lineare (a) und nichtlineare Übertragung (b)

unterschiedlicher Frequenz, d. h. einer Überlagerung einer unendlichen Anzahl von Wellen unterschiedlicher Frequenz (Bild 48). Dabei ist vor allem die eingegebene Frequenz selbst enthalten. Man bezeichnet alle diese Wellen als »Harmonische« und das eingegebene Signal als Grundwelle oder auch als 1. Harmonische. Wenn das Eingangssignal die Frequenz ν_0 hat, so weisen die verschiedenen Harmonischen höherer Ordnung, die auch als »Oberwellen« bezeichnet werden und die im Ausgangssignal außer der Grundwelle vorhanden sind, folgende Frequenzen auf:

ν_0 Frequenz der eingegebenen Welle (1. Harmonische)

ν_H Frequenz der Harmonischen höherer Ordnung

n ganze Zahl ($n = 2, 3, \dots \infty$).

Die Welle, die der Zahl $n = 2$ entspricht, bezeichnet man als 2. Harmonische, die anderen Wellen erhalten entsprechende Bezeichnungen.

Oberwellen können in bestimmten Bereichen störend wirken, während sie in anderen Gebieten sogar gewünscht werden. So können Oberwellen eines Rundfunksenders andere Sender stören, und es müssen Maßnahmen zu ihrer Unterdrückung ergriffen werden. Andererseits nutzt man den Effekt der Bildung der Harmonischen höherer Ordnung zur Frequenzumsetzung aus. Man unterdrückt mit Filtern die Grundwelle und läßt nur eine der Oberwellen passieren. Wie schon bemerkt, ist für die Erzeugung von Harmonischen erforderlich, daß das Eingangssignal selbst eine gewisse Größe überschreitet, da das Übertragungselement nur in Bereichen hoher Intensität nichtlinear arbeitet.

Auch in der Optik werden Signale übertragen. Das Licht selbst ist als Signal aufzufassen. In diesem Bereich gelten ebenfalls die

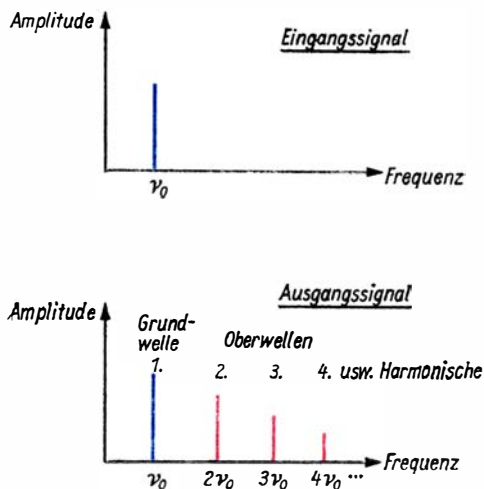


Bild 48. Frequenzspektrum bei nichtlinearer Übertragung

allgemeinen Gesetze der Signalübertragung. Kleine Signale werden linear übertragen, große Signale dagegen nichtlinear, und es erscheinen Oberwellen, die Harmonischen höherer Ordnung. Im herkömmlichen Bereich der Optik hat man es allerdings mit Signalen zu tun, die immer im linearen Bereich der Übertrager liegen. Erst der Laser, der optische Signale mit ausreichender Intensität liefert, gab die Möglichkeit, in nichtlineare Gebiete der Optik vorzudringen. So entwickelte sich ein völlig neues physikalisches Arbeitsgebiet, die *nichtlineare Optik*. Dieser Bereich ist zu groß, als daß er in diesem Buch ausführlich behandelt werden könnte. Es sollen deshalb nur einige wenige Erscheinungen und Anwendungen, die besonders wichtig sind, betrachtet werden.

Die nichtlinearen Eigenschaften sind bei allen Substanzen verschieden stark ausgeprägt. Bei einigen Materialien ist die Übertragungsfunktion bis zu sehr großen Lichtintensitäten linear. Es hat wenig Sinn, solche Materialien in der nichtlinearen Optik einzusetzen. Andere Materialien fangen schon bei relativ geringen Eingangssignalen an, Harmonische höherer Ordnung mit ausreichender Intensität auszusenden. Solche Materialien sind besonders für Untersuchung und Anwendung in diesem Bereich der Optik geeignet. In der Regel sind es Materialien, die den Effekt der Doppelbrechung aufweisen ($\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$, LiNbO_3 , KDP, ADP usw.).

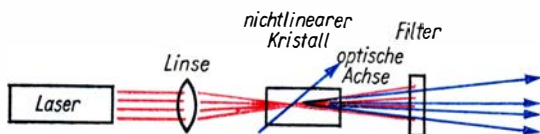


Bild 49. Nichtlineare Optik (Anordnung zur Erzeugung der Harmonischen höherer Ordnung)

Mit Hilfe eines solchen Kristalls kann man demnach die Wellenlänge des Lichtes verändern. Eine Anordnung für derartige Versuche zeigt Bild 49. Das Licht wird mittels einer Linse in den Kristall fokussiert. Dadurch wird die Leistungsdichte des Lichtes erhöht, und die nichtlinearen Eigenschaften des Kristalls werden besser ausgenutzt. Die Ausbildung der Harmonischen höherer Ordnung findet nur dann mit einer relativ großen Effektivität statt, wenn sich das Eingangssignal unter einem bestimmten Winkel zur optischen Achse des Kristalls ausbreitet.

4.2.2. Optischer parametrischer Oszillator

Eine für die Spektroskopie besonders wesentliche Aufgabe ist das Finden von abstimmbaren Lichtquellen, die einen möglichst weiten Wellenlängenbereich überdecken. Zum Beispiel könnte man versuchen, mit Hilfe eines Monochromators eine Lichtquelle mit veränderlicher Wellenlänge zu bauen. Die Arbeitsweise des Monochromators beruht auf folgendem Prinzip: Eine Lichtquelle, die ein kontinuierliches Spektrum aufweist (z. B. eine Glühlampe), gibt ihr Licht auf ein wellenlängenselektierendes Element. Das kann beispielsweise ein Prisma sein. Durch das Prisma werden Lichtstrahlen verschiedener Wellenlängen verschieden stark abgelenkt. Mittels einer Blende sondert man die gewünschte Wellenlänge aus. Durch eine Drehung des Prismas kann man somit hinter der Monochromatorblende Licht verschiedener Wellenlängen erhalten, also die Lichtquelle »abstimmen«. Leider bringt diese Methode einige wesentliche Nachteile mit sich. Durch die Aussonderung geht ein Großteil der Intensität verloren. Die Halbwertsbreite (in bezug auf die Wellenlänge) des weiter zu verwendenden Lichtes kann eine gewisse Grenze nicht unterschreiten. Diese wird durch wellenoptische Beugung an der Blende bestimmt. Weiterhin existiert eine bestimmte spektrale Verteilung der verwendeten Lichtquelle, d. h., die Intensität ist nicht konstant für alle Wellenlängen. Man muß daher entweder in einem begrenzten Bereich arbeiten (in dem eine genügende Konstanz besteht) oder die spektrale Verteilung kennen und berücksichtigen.

Es besteht somit die Forderung nach einer Lichtquelle, die folgende Punkte erfüllt:

Konzentration der gesamten Lichtintensität auf eine Strahlungs-
linie mit möglichst geringer Halbwertsbreite,
Abstimbarkeit über einen weiten Wellenlängenbereich,
konstante Intensität während der Abstimmung.

Den ersten Punkt befriedigt die Laserstrahlung. Allerdings ist der Laser nicht abstimmbar. Die meisten Lasersysteme basieren darauf, daß nur ein fixierter Emissionsübergang ausgenutzt wird, der nicht verändert werden kann.

Eine Ausnahme bildet der Farbstofflaser. Durch eine Änderung der Zusammensetzung und der Konzentration der Farbstoffe ist

eine Abstimmung möglich. Dieser Laser steht noch am Anfang seiner Entwicklung. Eine weitere Möglichkeit, abstimmbare Lichtquellen zu schaffen, beruht auf der Grundlage der nichtlinearen Optik. Es handelt sich um den *optischen parametrischen Oszillator*, bei dem folgender physikalischer Effekt benutzt wird:

Ein optisch nichtlinearer Kristall wird von intensitätsschwachem Licht der Frequenz ν_1 durchstrahlt. Als einen zweiten Lichtstrahl verwendet man Licht der Frequenz $\nu_2 > \nu_1$, das eine hohe Intensität hat und als »Pumpstrahlung« bezeichnet wird. Bei geeigneter Orientierung des Kristalls ist eine Verstärkung des intensitätsschwachen Lichtes der Frequenz ν_1 zu beobachten. Zur besseren Ausnutzung dieses Effektes verwendet man einen optischen Resonator, der für die Pumpstrahlung durchlässig und für die »Nutzstrahlung« der Frequenz ν_1 verspiegelt ist. Durch die Anwendung eines derartigen Resonators kann es zu folgendem Effekt kommen: Bei Erfüllen der Bedingung, daß bei der gemeinsamen Ausbreitung von Pumpwelle und Signalwelle im Resonatorsystem der Verstärkung für die Signalwelle ν_1 größer ist als ihre optischen Verluste, wird das System zum Oszillator. Das System schwingt auf der Frequenz ν_1 und gibt Strahlung mit dieser Frequenz ab. Bei diesem Prozeß ist es nicht mehr erforderlich, daß eine intensitätsschwache Strahlung ν_1 auf das System gegeben wird. Es wird jedoch eine Pumpstrahlung ausreichender Intensität gefordert.

Es tritt dabei eine Erscheinung auf, die für die oben erwähnte Anwendung sehr wesentlich ist: Der Wert der anschwingenden Frequenz ν_1 hängt von der Temperatur und der Orientierung des Kristalls ab. Durch eine Temperaturänderung bzw. durch eine Änderung der Kristallage hinsichtlich der Ausbreitungsrichtung der wechselwirkenden Wellen kann somit die Frequenz des »Nutzlichtes« abgestimmt werden. Das System wird als »optischer parametrischer Oszillator« (OPO) bezeichnet. Man kann den nichtlinearen Kristall mit zugehörigen Spiegeln in den Pumpplaserresonator selbst einbringen. Da die Pumpfeldstärke im Laser selbst sehr hoch ist, kann man in dieser Anordnung einen hohen Wirkungsgrad erzielen. Eine solche Anordnung besteht beispielsweise aus folgenden Teilen (Bild 50): Der Pumpresonator wird durch zwei Spiegel gebildet, die für die »Nutzstrahlung« durchlässig sind. Als aktives Lasermedium dient ein YAG-Kristall mit Neodym dotiert.

120 Ein elektrooptischer Schalter (LiNbO_3) bringt den Laser in den

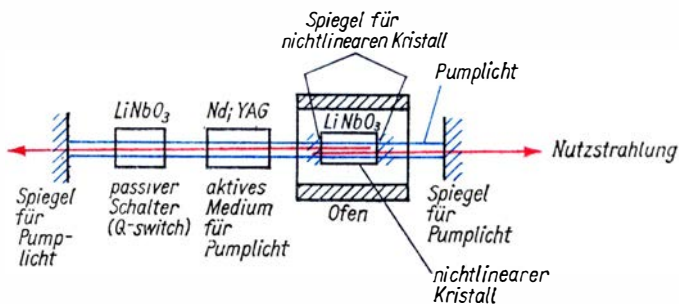


Bild 50. Optischer parametrischer Oszillator (OPO)

Riesenimpuls-Betrieb. Als parametrischer Oszillator dient ein Lithium-Niobat-Kristall (LiNbO_3), auf dessen Endflächen die Spiegel direkt aufgebracht sind. Sie wirken noch reflektierend für die Wellenlänge des »Nutzlichtes« und sind fast vollständig durchlässig für die Pumpstrahlung. Zur Abstimmung der Wellenlänge wird die Temperatur des nichtlinearen Kristalls in einem kleinen Ofen geändert, der bis auf 300°C aufgeheizt werden kann. Die Ausgangswellenlänge in diesem Experiment betrug etwa $2\text{ }\mu\text{m}$. Es konnte ein quasikontinuierlicher Betrieb erreicht werden, die Folgefrequenz betrug etwa 3 kHz und der Wirkungsgrad (Verhältnis der Pumpstrahlung zur Nutzstrahlung) fast 75% .

Für einen kontinuierlichen Betrieb wird als nichtlinearer Kristall vor allem $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ (»Banana-Kristall«) verwendet. Er zeichnet sich durch große Nichtlinearität und hohe Festigkeit gegenüber Beschädigung durch die intensive Pumpstrahlung aus.

Die nichtlineare Optik ermöglicht die Schaffung von abstimmbaren Lichtquellen. Dabei erweist sich der optische parametrische Oszillator als abstimmbare Lichtquelle mit hoher Intensität, geringer Halbwertsbreite und großem Abstimmbereich. Eine effektive Variante des OPO besteht darin, daß der nichtlineare Kristall mit seinen Resonatorspiegeln direkt in den Resonator der Pumplichtquelle eingebracht wird.

4.2.3. Elektrooptik

Für die Arbeit mit dem Laser werden Elemente benötigt, mit denen die Parameter des Lichtes (z. B. seine Intensität) zu beeinflussen sind. Vor allem erfordert die Informationsübertragung mit Hilfe des Lasers diese Bauelemente. Hierfür sind besonders Elemente geeignet, die auf der Grundlage des *elektrooptischen Effektes* arbeiten.

Unter einem elektrooptischen Effekt versteht man die Änderung der lichtbrechenden Eigenschaften eines Festkörpers oder einer Flüssigkeit beim Anlegen eines elektrischen Feldes. Das elektrische Feld ruft im Medium eine Änderung der Brechzahl hervor, die umgekehrt proportional der Lichtgeschwindigkeit im Medium ist:



$$n = \frac{c_0}{c} \quad (45)$$

n Brechzahl

c_0 Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

c Lichtgeschwindigkeit im Medium.

Weiterhin wird unter dem Einfluß des elektrischen Feldes das Material doppelbrechend, Lichtstrahlen mit unterschiedlicher Polarisation durchdringen das Medium mit unterschiedlicher Geschwindigkeit.

Dieser Effekt wird ausgenutzt, um eine Änderung der Lichtintensität zu erreichen (Bild 51). Man läßt auf den Kristall linear polarisiertes Licht fallen. Dabei muß beachtet werden, daß die Polarisationssebene um 45° zum angelegten elektrischen Feld steht. Dann hat das durch den Kristall tretende Licht in bezug auf das Feld zwei gleiche Komponenten mit Polarisationssebenen, die senkrecht aufeinander stehen. Eine liegt parallel zum elektrischen Feld, die andere befindet sich senkrecht zu ihm.

Durch den elektrooptischen Effekt wird erreicht, daß eine Lichtkomponente das Medium schneller durchwandert als die andere. Es ändert sich die Phase zwischen den beiden Komponenten beim Durchgang des Lichtes durch das Material. Nach dem Austritt aus dem elektrooptischen Bauelement ergeben die beiden Komponenten in ihrer Summe schon nicht mehr linear polarisiertes Licht wie beim Eintritt in das Bauelement, sondern Licht elliptischer

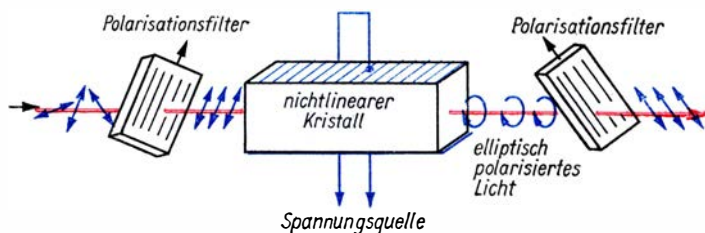


Bild 51. Anordnung zur elektrooptischen Modulation des Lichtes

Polarisation. Hinter das elektrooptische Bauelement stellt man einen Polarisator. Dieser ist um 90° gegenüber dem ersten Polarisator gedreht, d. h. gegenüber der Polarisationsrichtung des auf den Kristall fallenden Lichtes. Ohne den elektrooptischen Effekt würde hinter diesem zweiten Polarisator die Lichtintensität Null sein. So aber wird aus dem elliptisch polarisierten Licht eine Polarisationsrichtung ausgefiltert und damit beim Anlegen einer Spannung an das Medium Licht hindurchgelassen.

Demzufolge steht ein Bauteil zur Verfügung, der das Licht je nach anliegender Spannung mehr oder weniger passieren läßt. Auf diese Weise können elektrische Signale in optische umgewandelt werden. In bezug auf das zu verwendende Material werden Anforderungen dahingehend gestellt, daß das Bauteil schon bei möglichst geringer Spannung optisch »geöffnet« ist, also die ankommende Lichtintensität voll durchläßt.

Derartige Bauelemente finden in der Nachrichtentechnik Verwendung als *elektrooptischer Modulator*. Es ist damit möglich, auf den als »Träger« funktionierenden Laserstrahl ein Signal aufzu- modulieren. Hier werden hohe Anforderungen vor allem an die Grenzfrequenz des Modulators gestellt. Diese muß im Gigahertzbereich (10^9 Hz) liegen.

Es existieren zwei Typen des elektrooptischen Effektes. Der *Pockels-Effekt* besteht darin, daß sich die Brechzahl *proportional* mit der angelegten Spannung ändert. Sie kann aber nur in bestimmten Kristallen (mit sogenanntem »Symmetriezentrum«) Anwendung finden. Das sind beispielsweise KDP (Kaliumdihydrogenphosphat), Lithiumniobat usw. Der zweite Typ nennt sich *Kerr-Effekt*. Er besteht darin, daß sich die Brechzahl *proportional zum Quadrat* der angelegten Spannung ändert. Sie wurde bei Flüssig-

keiten entdeckt und ist auch in jedem Kristall nachweisbar. Mit Hilfe des elektrooptischen Effektes erreicht man eine Modulationsbandbreite von rd. 1 GHz.

Zu erwähnen ist noch, daß man auch Modulatoren baut, die den pn-Übergang einer Halbleiterdiode ausnutzen. Weiterhin kann die Lichtintensität mit sogenannten »magnetooptischen Modulatoren« verändert werden. Ihre Arbeitsweise beruht auf dem *Faraday-Effekt*, der darin besteht, daß sich die Polarisationssebene des Lichtes beim Durchgang durch ein bestimmtes Medium dreht, wenn an dieses ein magnetisches Feld angelegt ist. Damit wurden Grenzfrequenzen von einigen 100 MHz erreicht.

5. Methoden zur Beeinflussung der Laserparameter

5.1. Monofrequenz

Das Spektrum des Lasers soll etwas genauer dargestellt werden. Die Laserstrahlung ist auf einen sehr engen Bereich der Wellenlänge konzentriert. Er entspricht einem einzelnen Atomübergang. Trotzdem ist festzustellen, daß in den meisten Fällen die Strahlung ein Gemisch von mehreren diskreten Wellenlängen darstellt. Diese liegen so eng beieinander, daß sie sich z. B. im Farbempfinden des Auges überhaupt nicht bemerkbar machen und nur mit Hilfe ganz spezieller Methoden voneinander zu trennen sind.

Wodurch entsteht ein solches Spektrum? Die Halbwertsbreiten der Eigenfrequenzen des Resonators und der Verstärkungslinie des aktiven Mediums spielen dabei eine entscheidende Rolle. Im optischen Bereich der elektromagnetischen Wellen ist die Resonatorhalbwertsbreite viel kleiner als die der Verstärkungskurve, die durch den Atomübergang zustande kommt (beim Gaslaser rd. 100mal) (Bild 52a). Deshalb wird die Lage der Strahlungsfrequenz vor allem durch den Resonator bestimmt.

Aus Gleichung (15) $\Delta\nu = c/2L$ ist zu ersehen, daß bei großer Länge des Resonators seine Eigenfrequenzen dicht nebeneinander liegen. Baut man also einen langen Resonator auf, so können mehrere Eigenfrequenzen des Resonators in dem Bereich der Verstärkungskurve liegen, für den Lasertätigkeit möglich ist (Bild 52b). Man erhält Licht, dessen Spektrum mehrere Frequenzen aufweist. Diesen Fall bezeichnet man als *Mehrmodenbetrieb* des Lasers.

In vielen Fällen ist diese Eigenschaft des Lasers störend. Man hat daher verschiedene Methoden ausgearbeitet, um einen *Einmodenbetrieb* (engl.: Single-Mode) des Lasers zu erreichen. Die ins Auge fallende Methode ist die Verkleinerung der Resonatorlänge (Bild 52a). Dann wird der Abstand der Eigenfrequenzen des Resonators größer. Man erreicht damit, daß nur eine Eigenfrequenz des Resonators

5. Methoden zur Beeinflussung der Laserparameter

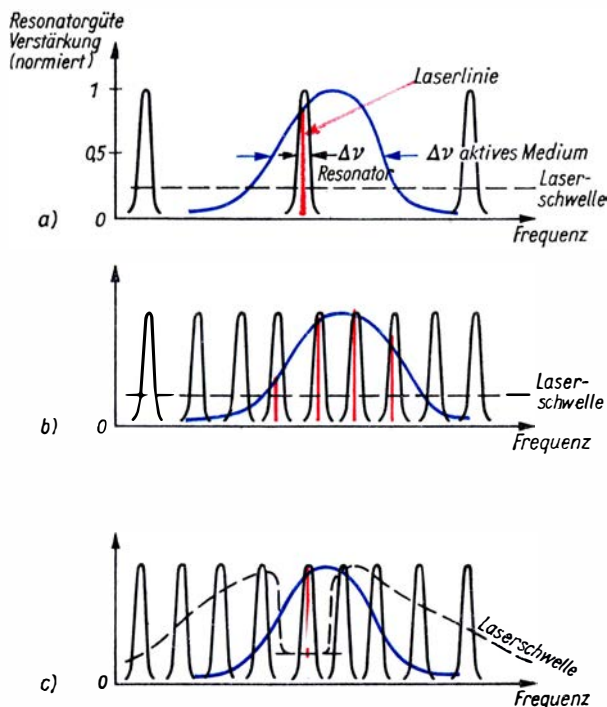


Bild 52. Ein- und Mehrmodenbetrieb (Frequenz) bei verschiedenen Resonatorlängen

a) geringe Resonatorlänge, Einmodenbetrieb

b) große Resonatorlänge, Mehrmodenbetrieb

c) Selektion durch Beeinflussung der Laserschwelle, große Resonatorlänge

in dem laserfähigen Bereich der Verstärkungskurve liegt. Diese Methode wird heute industriemäßig angewandt, vor allem in Zusammenhang mit stabilisierten He-Ne-Lasern, die zur Längenmessung eingesetzt werden. Die geringe Länge des Lasers (Spiegelabstand etwa 10...15 cm) hat aber einen Nachteil. Das aktive Medium muß auch klein gehalten werden. Die geringe Länge des aktiven Mediums bedeutet aber geringe Verstärkung und deshalb eine kleine Laserausgangsleistung (einige 100 μW). Auch aus die-

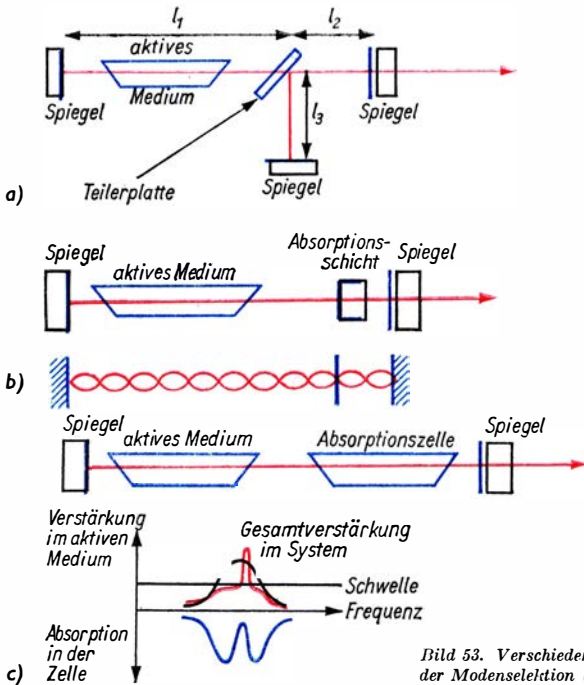


Bild 53. Verschiedene Methoden der Modenselektion (Frequenz)
 a) 3-Spiegel-Resonator
 b) Absorptionsschicht
 c) Absorptionzelle

sem Grund wurden eine Reihe anderer Methoden der Frequenzselektion erarbeitet. Einige Beispiele mögen dafür als Illustration dienen.

Eine Möglichkeit ist ein 3-Spiegel-Aufbau nach dem Prinzip des sogenannten Michelson-Interferometers (Bild 53a). In den Laser ist eine Teilerplatte eingebracht, über die ein Teil des Lichtes auf einen weiteren Spiegel gelenkt wird. Somit besteht der Laser eigentlich aus zwei Resonatoren, einmal aus dem ursprünglichen Resonator $L = l_1 + l_2$, andererseits aus dem Resonator $(l_2 + l_3)$. Um resonanzfähig zu sein, muß der 3-Spiegel-Resonator nicht nur die Bedingung

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

erfüllen, sondern es muß ferner gelten:

$$(l_2 + l_3) = n_1 \frac{\lambda}{2} \quad (46)$$

Durch geeignete Wahl der Abstände kann man dann den Einmodenbetrieb erreichen. Schwierig ist allerdings, dieses 3-Spiegel-System ausreichend stabil zu halten: Eine weitere Methode besteht darin, daß man eine dünne Absorptionsschicht in den Resonator einbringt (Bild 53b). Im Resonator bilden sich stehende Wellen aus. In den Knoten der stehenden Welle ist die elektrische Feldstärke Null, in den Bäuchen maximal. Solche Wellen, bei denen die Absorptionsplatte in einem Knoten steht, können anschwingen. In einem Knoten ist die elektrische Feldstärke Null, also kann auch nichts absorbiert werden. Andere Wellen schwingen nicht an, denn sie werden stärker absorbiert. Ein Nachteil dieser Methode ist die große Erwärmung der Absorptionsschicht in Lasern mit hoher Leistung.

Weiterhin kann man ein Rohr in den Resonator einbringen, das mit einem absorbierenden Gas gefüllt ist (Bild 53c). Durch einen physikalischen Vorgang, der als Sättigungseffekt verstanden werden kann, wird bei hoher Leistung im Laser die Absorption in der Mitte der Absorptionslinie sehr klein. Ein Mode, der sich gerade dort befindet, wird wenig absorbiert, erleidet die geringsten Verluste und schwingt an. Andere Moden werden stärker absorbiert. Bei geeigneten Versuchsbedingungen kann man eine Strahlung erhalten, die nur einen einzigen Mode hat, in dem 70% der Ausgangsleistung des Mehrmodenbetriebes vereinigt sind.

Alle diese Methoden beruhen darauf, daß man die Verluste für alle anderen Moden außer dem einen gewünschten vergrößert. Jede Methode hat Vor- und Nachteile und ist je nach Anwendung besser oder schlechter einsetzbar.

5.2. Stabilität

Im optischen Bereich der elektromagnetischen Wellen ist die Halbwertsbreite des Resonators viel kleiner als die Halbwertsbreite der

Verstärkungslinie des aktiven Mediums. Aus diesem Grund wird die genaue Lage der Frequenz des Lasers (wie schon erwähnt) durch den Resonator bestimmt. Die Eigenfrequenz des Resonators ν_R hängt von seiner Länge ab, wie aus Gleichung (14) zu ersehen ist:

$$\nu_R = n \frac{c}{2L}$$

L Resonatorlänge
 ν_R Resonatoreigenfrequenz
 c Lichtgeschwindigkeit
 n ganze Zahl.

Das bedeutet, daß sich bei einer Änderung der Länge auch die Frequenz ändert. Als Beispiel soll ein He-Ne-Laser dienen, der im Einmodenbetrieb arbeitet. Die Halbwertsbreite der Verstärkungslinie des aktiven Mediums liegt etwa bei 1 GHz. Das bedeutet, daß sich auch die Laserfrequenz bei einer Längenänderung des Resonators um diesen Betrag verschieben kann.

Als Stabilität wird definiert

$$S = \frac{\nu}{\Delta\nu} \quad (47)$$

S Stabilitätsfaktor
 $\Delta\nu$ Frequenzänderung
 ν Frequenz.

Oft findet man auch die Definition $S = \Delta\nu/\nu$, d. h. den reziproken Wert. Je kleiner die Frequenzänderungen sind, desto höher ist die Stabilität. Die Wellenlängenstabilität ist bei konstanter Lichtgeschwindigkeit gleich der Frequenzstabilität:

$$\frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (48)$$

Aus Gleichung (13)

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

kann man ableiten, daß die Stabilität der Laserlänge gleich der Frequenzstabilität ist:

$$S = \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{L}{\Delta L}. \quad (49)$$

Eine Frequenzstabilität von 10^8 erfordert somit, für einen Laser mit etwa 10 cm Spiegelabstand eine Konstanz der Resonatorlänge auf etwa $0,001 \mu\text{m}$.

Die Laserfrequenz kann sich im He-Ne-Laser höchstens um 1 GHz ändern:

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta\nu \cdot \lambda}{c} = \frac{10^9 \text{ Hz} \cdot 0,6328 \mu\text{m}}{3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}} = 5 \cdot 10^{-6}.$$

Die mögliche Änderung entspricht einer relativen Frequenzstabilität von $5 \cdot 10^{-6}$. Für Anwendungen in der Längenmeßtechnik oder als Frequenzstandard werden wesentlich höhere Stabilitäten verlangt. Das bedingt einen höheren Aufwand. Die Resonatorlänge muß mit gezielten Methoden stabil gehalten werden. Dabei muß vor allem die Temperatur im Resonator stabilisiert werden, damit die Wärmeausdehnung des Resonatormaterials nicht störend auftritt. Auch die Änderung der Brechzahl der Luft macht sich geringfügig in einer Änderung der Frequenz bemerkbar, wenn es sich um einen Außenspiegellaser handelt. Es ändert sich dann die optische Weglänge im Raum zwischen Brewsterfenster und Spiegel. Verantwortlich für Brechzahländerungen der Luft sind Änderungen von Druck, Temperatur und Luftfeuchte.

Es existiert eine Vielzahl von Methoden, mit denen die Frequenz stabilisiert werden kann. Sie bestehen darin, daß durch eine Regelschaltung die Resonatorlänge so verändert wird, daß auftretende Frequenzabweichungen kompensiert werden. Eine dieser Methoden besteht in folgendem: Die Laserlänge wird um einen kleinen Betrag mit Hilfe einer Piezokeramik periodisch verändert. Man nennt diesen Vorgang »Wobbelung« (Bild 54). Infolge der Abhängigkeit der Ausgangsintensität von der Resonatorlänge erhält man ein entsprechend modulierte Fehlersignal. Seine Höhe ist ein Maß für die Abweichung von einem bestimmten Bezugspunkt, seine Phasenlage ist bestimmt durch die Richtung dieser Abweichung.

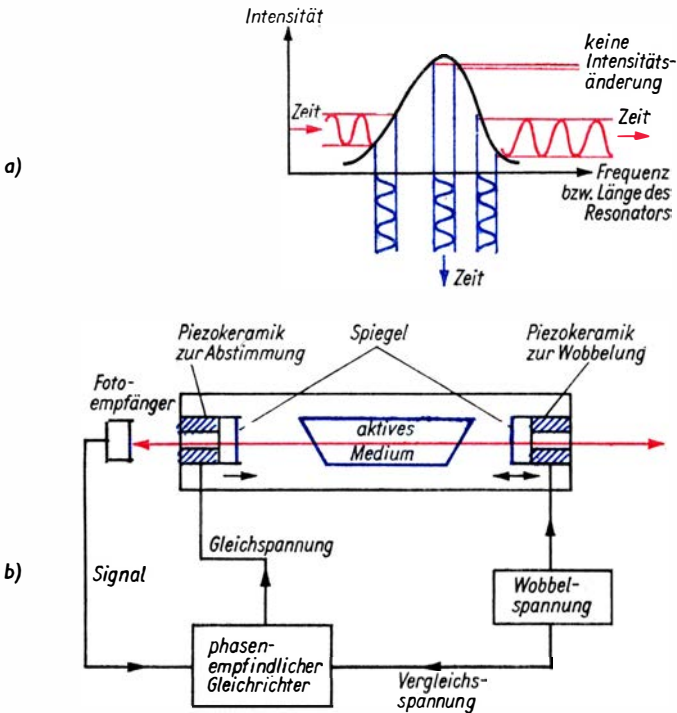


Bild 54. Frequenzstabilisierung mit Wobbelung der Resonatorlänge
(schematischer Aufbau)

a) Wirkprinzip

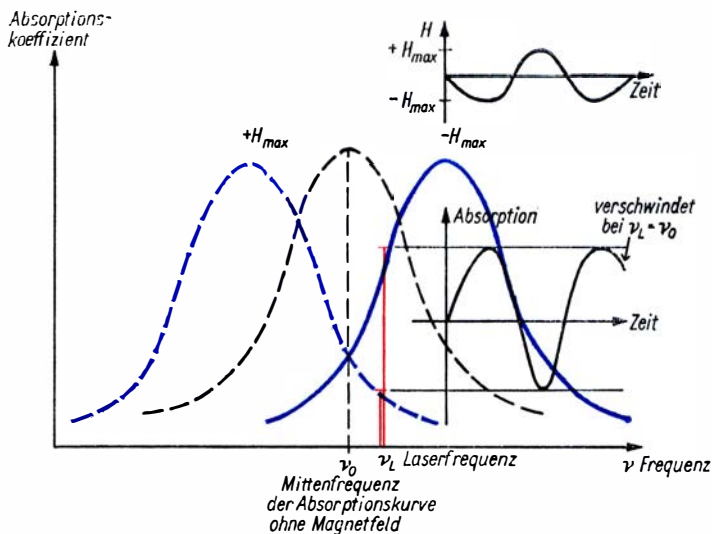
b) technischer Aufbau

Ein phasenempfindlicher Gleichrichter wandelt das Fehlersignal in eine Gleichspannung um. Die Phasenlage bestimmt die Polarität dieser Gleichspannung. Sie wird an eine zweite Piezokeramik angelegt, die den Resonator wieder auf seine vorgegebene Länge (und damit Frequenz) zurückführt. Auf dieser Methode beruhen eine Anzahl kommerzieller frequenzstabilisierter Laser. Hinzuzufügen ist, daß hier nicht auf ein Maximum der Strahlungsintensität, sondern auf ein relatives Minimum in der Mitte der Verstärkungslinie stabilisiert wird. Dieses Minimum ist eine Besonderheit der

5. Methoden zur Beeinflussung der Laserparameter

Strahlung verschiedener Gaslaser und trägt die Bezeichnung »Lamb-dip«. Der erste kommerzielle Laser dieser Art war das Modell 119 von Spectra Physics. Die erzielte Ausgangsleistung beträgt etwa $100 \mu\text{W}$, die Stabilität liegt bei $5 \cdot 10^{-7}$ während mehrerer tausend Stunden Betriebsdauer.

Siemens brachte 1970 einen frequenzstabilisierten He-Ne-Laser unter der Bezeichnung LG 65 auf den Markt. Er arbeitet nach folgendem Prinzip (Bild 56): Der Laserstrahl durchläuft eine Absorptionszelle, die mit Neon gefüllt ist. Um diese Zelle ist eine Spule gelegt, die ein Magnetfeld parallel zum Laserstrahl erzeugt. Dadurch wird die Absorptionslinie in zwei Anteile aufgespalten. Eine dieser beiden Linien absorbiert nur rechts zirkular polarisiertes Licht, die andere nur links zirkular polarisiertes Licht. Eine Umschaltung des Magnetfeldes bringt eine Umkehr dieser Zuordnung mit sich. Somit sieht die Anordnung zur Stabilisierung folgendermaßen aus (Bild 55): Ein optisches Bauteil ($\lambda/4$ -Platte, blaues Rechteck, Bild 56 links) wandelt das linear polarisierte Licht des Lasers in zirkular polarisiertes Licht um (z. B. rechts polari-



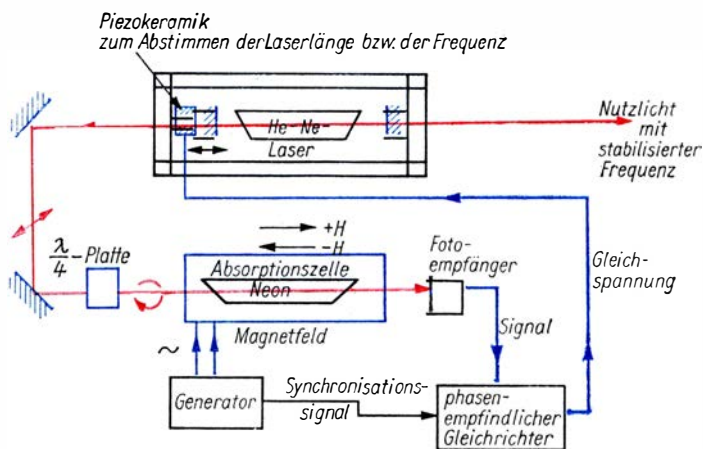


Bild 56. Laserstabilisierung mit Absorptionszelle und angelegtem Magnetfeld (schematischer Aufbau)
 H magnetische Feldstärke

siertes Licht). Das Magnetfeld der Zelle wird durch Wechselstrom erzeugt. Für eine Halbwelle wird dabei die Absorptionslinie auf der einen Seite der Frequenzkurve wirksam. Die nächste Halbwelle läßt die andere symmetrisch zur Mittenfrequenz liegende Kurve wirksam werden. Stimmt die Frequenz des Lasers nicht mit der Mittenfrequenz der ungestörten Absorptionskurve (ohne magnetisches Feld) überein, so entsteht ein Fehlersignal. Das zirkular polarisierte Licht wird einmal mehr, einmal weniger absorbiert. Das Fehlersignal hat genau die gleiche Frequenz wie das angelegte magnetische Feld.

Eine Fotozelle wandelt die Schwankungen der Lichtintensität in ein elektrisches Signal um. Über einen Verstärker gelangt es zu einem Phasendiskriminator. Die Phase des entstandenen elektrischen Signals wird mit der Phase des angelegten Magnetfeldes verglichen. Über einen Gleichrichter wird das elektrische Fehlersignal in eine Gleichspannung umgewandelt. Diese wird an eine Piezokeramik zur Längenabstimmung des Laserresonators übermittelt.

Der Phasendiskriminator bestimmt das Vorzeichen der Gleichspannung. Mit dieser Spannung wird die Länge der Piezokeramik und damit die des Resonators so geändert, daß die Laserfrequenz

immer mit der Zentrumsfrequenz der Absorptionslinie (ohne Magnetfeld) übereinstimmt.

Die maximale Frequenzabweichung ist weniger als ± 100 kHz je Tag. Das entspricht einer Frequenzstabilität

$$S = \frac{\nu}{\Delta\nu} = 5 \cdot 10^9.$$

Dieser Wert stellt zur Zeit für kommerzielle frequenzstabilisierte Laser die Weltspitze dar.

Dazu kommen noch einige Vorzüge, die das System sehr geeignet für die Anwendung machen:

Die Kohärenzlänge ist sehr groß (einige 100 km).

Die Einlaufzeit ist gering (rd. 30 s).

Eine derartige Stabilisierungszelle kann an jeden elektrisch abstimmbaren Einmodenlaser ohne innere Eingriffe angeschlossen werden.

Im Bereich optischer Frequenzen wird die Laserfrequenz sehr empfindlich durch den Resonator bestimmt. Daher haben geringste Änderungen seiner Länge großen Einfluß auf die Frequenzstabilität.

Der zur Zeit beste kommerzielle stabilisierte Laser erreicht eine Stabilität von $5 \cdot 10^9$ je Tag. Bei kommerziellen Lasern für die Längenmeßtechnik werden Stabilitäten von rd. 10^{-7} gefordert.

5.3. Riesenimpulslaser

Ein wesentliches Kriterium für die Anwendung des Lasers ist der zeitliche Verlauf seiner Ausstrahlung. Einmal kann die Anregung und demzufolge auch die Ausstrahlung kontinuierlich über einen großen Zeitraum verlaufen, andererseits ist es möglich, das Laserlicht impulsförmig zu erzeugen.

Oft werden einzelne Laserimpulse benötigt, wobei zusätzlich gefordert wird, daß der Impuls eine möglichst hohe Lichtleistung hat. Dafür ist der »Riesenimpulslaser« gut geeignet.

Der zeitliche Verlauf der Ausstrahlung eines Festkörperimpulslasers ohne spezielle Steuerung (freilaufend) besteht aus einer

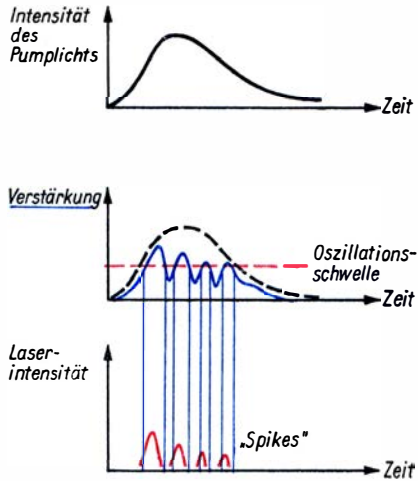


Bild 57. Abhängigkeit der Laserintensität von der Zeit (freilaufender Laser)

Reihe kleiner Impulse, sog. Spikes (Bild 57). Sie entstehen folgendermaßen: Die Blitzlampe für die optische Anregung des Lasers wird gezündet. Durch ihr Licht erreicht man im Laserstab eine inverse Besetzung des Laserübergangs. Der Laserprozeß kann beginnen, wenn die Verstärkung des aktiven Materials die Verluste im Laser übersteigt, d. h., wenn die Oszillationsschwelle erreicht ist. Nun wird Laserlicht ausgestrahlt.

Gleichzeitig mit der Ausstrahlung setzt aber ein anderer Prozeß ein. Man muß bedenken, daß der Ausstrahlungsprozeß dadurch zustande kommt, daß die betreffenden Atome in den unteren Laserzustand übergehen. Es kann aber der Fall eintreten, daß diese Atome nicht schnell genug durch den Pumpprozeß wieder angeregt werden können. Sie stehen dann für die weitere Ausstrahlung nicht mehr zur Verfügung. Die Inversion wird »abgebaut«. Dadurch wird die Verstärkung geringer und kann nicht mehr die Verluste im Resonator kompensieren, der Laser hört auf zu oszillieren. In der ganzen Zeit dieses Prozesses ist die Blitzlampe noch in Aktion. Die Atome werden wieder angeregt, und der Prozeß beginnt von neuem. Während der Leuchtdauer der Blitzlampe kann damit eine ganze Reihe von Einzelimpulsen abgegeben werden. Der zeitliche

Verlauf der Ausgangsstrahlung wird mit Hilfe eines Fotoempfängers auf einem Oszillographen sichtbar gemacht.

Für viele Anwendungen, besonders für Laufzeitmessungen (s. 9.4.), ist der Effekt störend. Man braucht dort unbedingt einen einzelnen eindeutigen Impuls, in dem auch die gesamte zur Verfügung stehende Ausgangsenergie enthalten sein soll. Um einen derartigen Impuls zu erhalten, benutzt man das *Güteschaltungs-Verfahren* (engl.: Q-switch, Q Abkürzung für quality). Es besteht darin, daß für eine gewisse Zeit der Laser unter der Oszillationsschwelle gehalten, d. h. die Resonatorgüte künstlich verschlechtert wird. Zuerst wird die Blitzlampe gezündet. Durch geeignete Mittel werden aber die Verluste im Laser sehr hoch gehalten, so daß die Verstärkung nicht ausreicht, um den Laserprozeß in Gang zu bringen. Also kann auch der oben beschriebene Abbau der Inversion noch nicht stattfinden, und die Pumpenergie wird in den betreffenden Atomen gespeichert.

Wenn sich eine große Anzahl von Atomen im oberen Laserzustand befindet, d. h., wenn eine maximale Inversion besteht, dann wird so schnell wie möglich die künstliche Verschlechterung der Resonatorgüte wieder aufgehoben. Die Oszillationsschwelle wird wieder auf den normalen Wert herabgesetzt. Der Laser kann anschwingen, und die gesamte gespeicherte Energie wird in einem einzigen

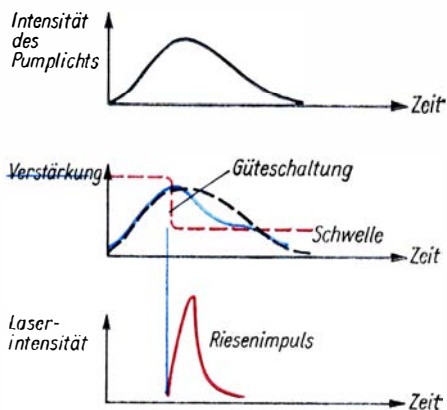


Bild 58. Abhängigkeit der Laserintensität von der Zeit (güteschalteter Riesenimpuls laser)

Riesenimpuls abgegeben, da alle Atome lawinenartig in den unteren Laserzustand übergehen (Bild 58). Es ist verständlich, daß die Lebensdauer des oberen Laserzustandes ausreichend groß sein muß, damit die Energie so gut wie möglich »gespeichert« werden kann. Nicht alle Lasermaterialien sind damit für das Q-switch-Verfahren anwendbar. Man wendet es besonders bei Festkörperlasern sowie beim CO₂-Laser an.

Es existiert eine ganze Reihe von Verfahren, mit denen Riesenimpulse erzeugt werden. Sie müssen ein Anschwingen des Lasers bis zu dem Zeitpunkt verhindern, in dem die Inversion voll aufgebaut ist. Die Umschaltung muß danach sehr schnell vor sich gehen. Sie sollte eine Zeitdauer in der Größenordnung von einigen Nanosekunden (10^{-9} s) nicht überschreiten.

Methoden zur Erzeugung von Riesenimpulsen

1. Drehspiegel

Damit der Laser anschwingen kann, müssen beide Resonatorspiegel genau justiert sein. Diese Tatsache wird beim Drehspiegelverfahren ausgenutzt (Bild 59). Man läßt den einen der beiden Spiegel mit hoher Geschwindigkeit (einige 10000 U/min) rotieren. Dabei erreicht er jeweils bei einer Umdrehung eine solche Stellung, bei der der Laser anschwingen kann. Bevor diese Stellung erreicht wird, wird über eine Automatik die Blitzlampe gezündet. In der Zeit zwischen dem Zünden der Blitzlampe und dem Erreichen der laserfähigen Stellung des Spiegels wird die Inversion aufgebaut. Der Riesenimpuls wird in dem Moment abgegeben, in dem sich der Drehspiegel im Justierbereich befindet. Anstelle eines Spiegels wird manchmal auch ein Prisma verwendet.

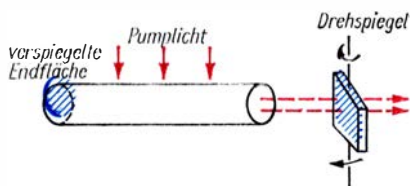


Bild 59. Drehspiegelverfahren für Güteschaltung

Die beschriebene Anordnung ist noch relativ langsam. Die Schaltzeiten und damit die Impulsdauer der Laserstrahlung liegen in der Größenordnung von etwa 100 ns. Die Anordnung wird deshalb zu den »langsamen Schaltern« gerechnet. Dazu gehören auch andere Verfahren, z. B. das der Ultraschallzelle. Um aber Schaltzeiten im Bereich der Nanosekunden zu erreichen, haben sich besonders die Methoden der Elektrooptik und die der Sättigungsabsorber durchgesetzt (schnelle Schalter).

2. Elektrooptische Schalter

In 4.2.3. ist beschrieben worden, wie mit Hilfe zweier Polarisationsfilter und eines elektrooptischen Kristalls eine Anordnung aufgebaut wird, mit der die Intensität des Lichtes gesteuert wird. Im Laserresonator wird eine abgewandelte Art dieser Methode als Schalter eingesetzt (Bild 60). Sie besteht aus einem Polarisator und dem Kristall, an dem eine elektrische Spannung angelegt ist. Die Polarisation des Lichtes, das durch den Polarisator in den Kristall gelangt, wird beim Durchgang durch diesen, bei der Reflexion am Spiegel und beim erneuten Durchgang durch den Kristall verändert. Die Polarisationsebene des Lichtes wird dabei um 90°

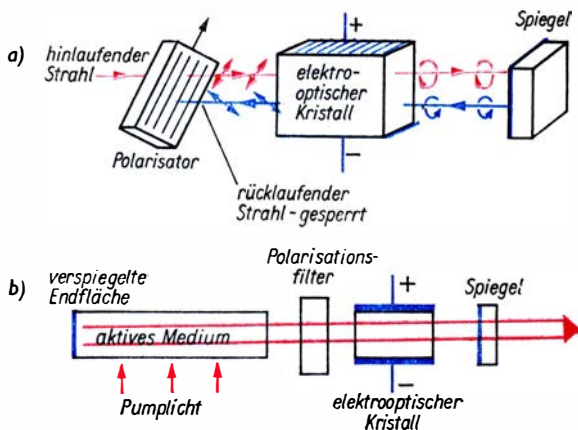


Bild 60. Gröteschaltung mit elektrooptischem Kristall
a) elektrooptisches Sperren b) technischer Aufbau

gedreht, wenn eine ausreichende Spannung am Kristall anliegt. Dieses Licht wird aber durch den Polarisator nicht mehr hindurchgelassen. Damit sperrt der Schalter den Laserprozeß.

Im geeigneten Moment wird die Spannung am elektrooptischen Kristall kurzgeschlossen. Hierfür verwendet man eine geeignete elektronische Schaltung. Die Schaltzeit dieser Elektronik soll so klein wie möglich sein. Wenn die Spannung zusammenbricht, kann das Licht ungehindert durch den Kristall hindurchtreten. Der Laser beginnt zu oszillieren, und der Riesenimpuls kann abgegeben werden.

Die Art der verwendeten Schalter hängt von der Anwendung und vom Preis des Materials ab. Auch eine Flüssigkeitszelle, in der der Kerr-Effekt wirksam wird, kann anstelle eines Kristalls eingesetzt werden. Der Schnelligkeit der elektrooptischen Schalter sind beispielsweise durch die Elektrodenkapazität Grenzen gesetzt. Je größer die Kapazität, desto größer ist die zur Entladung notwendige Zeit.

Die erreichbaren Schaltzeiten liegen in der Größenordnung von einer Nanosekunde, und die erreichbaren Ausgangsleistungen können einige 10 MW betragen. Schwierig ist vor allem das Problem der starken Erwärmung des Modulators. Außerdem kann der Kristall durch die hohe Intensität des Lichtes im Resonator beschädigt werden. Mit einer Flüssigkeitszelle können einige der bei Kristallen auftretenden Schwierigkeiten umgangen werden.

3. Absorptionsschalter

Während die beiden oben erwähnten Schaltertypen durch eine äußere Schaltung in den Laserprozeß eingreifen, wird beim Ab-

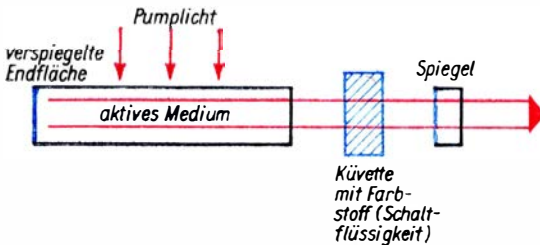


Bild 61. Passive Güteschaltung mit Farbstoff

sorptionsschalter eine Absorptionszelle durch die Strahlung im Laserresonator selbst angesteuert (Bild 61). Das Arbeitsprinzip ist folgendes: Wenn der Laser noch nicht oszilliert, so emittiert das aktive Material nur spontane Lichtstrahlung. Dabei ist die Intensität der spontanen Emission um so größer, je höher die Intensität der Pumplichtquelle ist. Bei geringer spontaner Emission wird durch die Absorptionszelle alles Licht mit der betreffenden Laserwellenlänge absorbiert. Der Laser kann dadurch nicht anschwingen.

Wird die Intensität größer, so kann der Fall eintreten, daß fast alle Atome in der Absorptionszelle in den oberen Zustand übergehen und kein Licht mehr absorbiert wird. Es findet eine Sättigung der Absorption statt. Dieser Prozeß geht in einer sehr geringen Zeit vor sich, d. h., die Zelle wird sehr schnell (Zeitdauer kleiner als 1 ns) durchsichtig für das Laserlicht, und der Riesenimpuls wird abgestrahlt. Nach der Abstrahlung geht die Zelle von selbst wieder in den Ausgangszustand zurück, sie unterbricht die Laseroszillation.

Häufig werden als Material für die Absorptionsschalter organische Verbindungen verwendet. Dabei ist darauf zu achten, daß sich die Schaltsubstanz unter der Einwirkung des Laserlichtes nicht chemisch zersetzt.



Ziel der Güteschaltung ist es, einen Einzelimpuls hoher Ausgangsleistung (Riesenimpuls) zu erzeugen. Die Methoden bestehen darin, daß die Resonatorgüte bis zum Aufbau der maximal erreichbaren Besetzungsinversion künstlich niedrig gehalten wird. Danach wird durch eine schnelle Umschaltung Laserfähigkeit erzeugt. Das Drehspiegelverfahren gestattet Schaltzeiten von rd. 100 ns (langsamer Schalter). Elektrooptische Schalter und Sättigungsabsorber erlauben Schaltzeiten von einigen Nanosekunden (schnelle Schalter).

5.4. Selbstfokussierung

140 Eine wesentliche Kenngröße eines Materials bei der Wechselwirkung mit Licht ist die Brechzahl (n). Beim Übergang des Licht-

tes von einem Medium in ein anderes kommt es, wenn diese beiden Medien verschiedene Brechzahlen aufweisen, zu einer Änderung der Ausbreitungsrichtung des Lichtstrahles.

Im allgemeinen wird für ein bestimmtes Medium die Brechzahl als Konstante angegeben. Sie ist nur abhängig von dem Zustand des Mediums (z. B. von Druck und Temperatur eines Gases) und von der Wellenlänge des Lichtes. Bei den herkömmlichen Lichtquellen ist es nicht nötig gewesen, eine Änderung der Brechzahl der durch das Medium hindurchtretenden Lichtwelle zu betrachten.

Mit der Entwicklung des Lasers ist es möglich geworden, Intensitäten je Volumeneinheit zu erzeugen, die vorher nicht zu erreichen waren. Damit kann man Effekte nachweisen, die auf einer Änderung der Brechzahl in Abhängigkeit von der Intensität des auffallenden Lichtes beruhen.

Nur bei großer Intensität wird dieser Effekt wirksam. Um ihn nachzuweisen, braucht man einen starken Laser. Man benutzt meist einen gütegeschalteten Festkörperlaser und läßt den Impuls noch durch einige nachgeschaltete Verstärker laufen (Bild 62). Um die Leistungsdichte des Lichtes und damit die Wechselwirkung mit dem Medium noch zu erhöhen, fokussiert man die Laserstrahlung mit einer Linse. Unter gewissen Bedingungen kann man dabei den Effekt der *Selbstfokussierung* beobachten: Das Licht läuft nicht wie normal nach der Fokussierung auseinander. Wegen der hohen

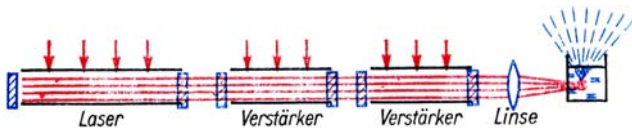


Bild 62. Anordnung zum Erzeugen der Selbstfokussierung

Lichtintensität ändert sich der Brechungsindex des Mediums derart, daß das Licht eine Brechung erfährt, die zu einer zusätzlichen Fokussierung, der Selbstfokussierung, führt. Damit wird aber die Lichtintensität je Flächeneinheit noch größer. Der Brechungsindex ändert sich noch mehr, und der Prozeß setzt sich bis zu einer Beschädigung des Materials fort. Dabei kommt es zu explosionsartigen Erscheinungen, die durch das Licht hervorgerufen werden. In Flüssigkeiten wird dabei Material weggeschleudert; in Gasen erzielt

man vollständige Ionisation. Es entsteht ein Gasplasma, das für weitere Untersuchungen Verwendung findet. Bei diesem Prozeß werden Temperaturen frei, die man für gesteuerte Kernfusion ausnutzen könnte.

Zu den Effekten, welche die Änderung der Brechzahl mit sich bringt, zählen auch z. B. die Selbstdefokussierung und die sog. Kanalbildung. Bei der Kanalbildung geht der Prozeß der Selbstfokussierung nicht bis zum vollständigen Zusammenlaufen des Lichtstrahles vor sich, sondern es bildet sich ein Kanal, aus dem das Licht nicht wieder austreten kann, bis es das Ende des Materials erreicht hat (Bild 63).

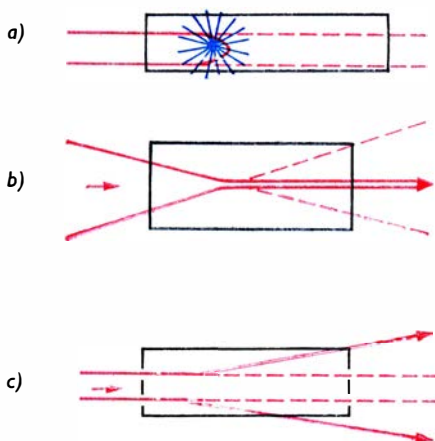


Bild 63. Effekte durch Brechzahländerung bei hoher Intensität
a) Selbstfokussierung b) Kanalbildung c) Selbstdefokussierung

Derartige Effekte haben auch Bedeutung im Festkörperlaser selbst. Bei hohen Leistungen kann im Laserkristall Kanalbildung auftreten. Durch die hohe Leistungsdichte im Kanal wird das Material an dieser Stelle zerstört. Nach kurzer Zeit wird der ganze Kristall unbrauchbar. Demzufolge werden an ein Lasermaterial für große Leistungen besonders hohe Anforderungen gestellt, um derartige Effekte zu vermeiden.

Bei starker Intensität des auftreffenden Lichtes kommt es zu einer Abhängigkeit der Brechzahl von der Intensität. Dabei treten Effekte auf, wie Selbstfokussierung, Selbstdefokussierung und Kanalbildung. Die Selbstfokussierung wird zur Plasmaerzeugung angewandt.

6. Optischer Überlagerungsempfang

Bei verschiedenen Anwendungen des Lasers (z. B. bei Geschwindigkeitsmessungen) sowie bei wissenschaftlichen Untersuchungen der Lasereigenschaften (z. B. der Frequenzstabilität) müssen geringe Änderungen der Laserfrequenz nachgewiesen werden. Der Nachweis dieser Frequenzänderungen ist mit Hilfe des optischen Überlagerungsempfanges möglich. Diese Methode besteht darin, daß das zu untersuchende Lichtsignal in einer Mischstufe mit einem zweiten Lichtsignal (von einem Lokaloszillator) gemischt und in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. Das entstandene elektrische Signal kann dann mit herkömmlichen Methoden der Radiotechnik untersucht bzw. weiterverarbeitet werden.

Diese Signalumwandlung ist mit einer Frequenzumwandlung verbunden. Das auf die Mischstufe auftreffende und zu untersuchende Licht hat eine Frequenz von rd. 10^{14} Hz. Das entstehende elektrische Signal kann im Frequenzbereich bis zu einigen Gigahertz liegen, es unterscheidet sich also frequenzmäßig vom Licht um mehr als 5 Größenordnungen. Diese Frequenztransformation beruht auf dem Verfahren der Erzeugung von Schwebungsfrequenzen, das beispielsweise auch in der Rundfunktechnik vielseitig angewandt wird. In eine geeignete Mischstufe werden zwei sinusförmige Signale eingegeben:

$$x_1 = a \cos 2\pi\nu_1 t$$

$$x_2 = a \cos 2\pi\nu_2 t$$

Vorausgesetzt soll werden, daß sich beide Schwingungen in ihrer Anfangsphase nicht unterscheiden und gleichfalls, daß beide Schwingungen annähernd gleiche Amplituden aufweisen. Die Summe der beiden Schwingungen ergibt

$$144 \quad x = x_1 + x_2 = a (\cos 2\pi\nu_1 t + \cos 2\pi\nu_2 t).$$

Nach einer einfachen Umformung kann man schreiben:

$$x = [2a \cos \pi (\nu_1 - \nu_2) t] \cos \pi (\nu_1 + \nu_2) t.$$

Die Frequenzen der beiden eingegebenen Schwingungen sollen sich nur wenig voneinander unterscheiden:

$$\nu_1 \approx \nu_2.$$

Daraus folgt

$$|\nu_1 - \nu_2| \ll \nu_1 + \nu_2.$$

Man kann dann den resultierenden Vorgang als eine Schwingung mit der Frequenz $(\nu_1 + \nu_2)$ auffassen, deren Amplitude relativ langsam, und zwar mit der Frequenz $(\nu_1 - \nu_2)$ schwankt. Einen solchen Vorgang bezeichnet man als *Schwebung* (Bild 64). Die Schwebungsfrequenz beträgt

$$\nu = \nu_1 - \nu_2.$$

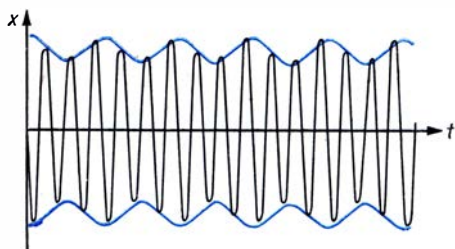


Bild 64. Schwebung

Die Schwebungsfrequenz ist demnach gleich der Differenz der Frequenzen der beiden eingegebenen Signale.

Bei der weiteren Verarbeitung des erzeugten Überlagerungssignals werden in der Regel Bauelemente verwendet, die die Summenfrequenz $(\nu_1 + \nu_2)$ nicht mehr auflösen können. Es wird nur das Signal mit der Differenzfrequenz weiter verarbeitet. Für den Nachweis der Schwebung von zwei Signalen ist ein sogenanntes nichtlineares Element erforderlich. In Rundfunkempfängern, wo eine Frequenztransformation durch Überlagerung durchgeführt werden soll (z. B. im UKW-Tuner), verwendet man als nichtlineare Bau-

elemente Röhren bzw. Transistoren im nichtlinearen Bereich der Kennlinie.

Die beschriebene Methode der Frequenztransformation beruht auf der Mischung zweier Signale. Außer dem zu untersuchenden Signal muß noch ein Hilfssignal bereitgestellt werden. Dieses wird durch einen *Lokaloszillator* erzeugt.

Im Rundfunkempfänger ist deshalb außer der Mischstufe noch eine Oszillatorstufe vorgesehen. Bei optischem Überlagerungsempfang (einer auf den Laserstrahl aufgeprägten Information) wird das Hilfssignal in Form eines weiteren Laserstrahls durch einen zur Empfangsapparatur gehörenden Laser geliefert. Der Lokaloszillator ist also ein Laser, und es werden zwei Laserstrahlen unterschiedlicher Frequenz in einem Mischglied vereinigt.

Als Mischglied wird ein Fotoempfänger verwendet. Dieser muß eine lineare Abhängigkeit des erzeugten elektrischen Signals (z. B. der am Ausgang auftretenden Spannung) von der auftreffenden Intensität des Lichts aufweisen. Es läßt sich zeigen, daß die Intensität des Lichts gleich dem Quadrat der Feldstärke der entsprechenden elektromagnetischen Welle ist. Der Fotoempfänger stellt demnach in der Übertragungstrecke ein quadratisches, d. h. nichtlineares Element dar. Die Voraussetzung für den Nachweis von Schwebungen ist damit gegeben.

Der Frequenzunterschied zwischen den beiden Laserfrequenzen, und damit auch die Schwebungsfrequenz, muß vom Fotoempfänger und von der nachfolgenden elektrischen Apparatur auch aufgelöst werden können. Die Schwebungsfrequenz darf also nicht größer werden als die Grenzfrequenz des Fotoempfängers. Die maximalen Frequenzunterschiede, die beim Laser erreicht werden können, sind abhängig von der Halbwertsbreite der Verstärkungskurve. Sie liegen beispielsweise beim He-Ne-Laser in der Größenordnung von einem Gigahertz. Man stellt heute schon Fotodioden her, die Grenzfrequenzen im Gigahertzbereich aufweisen.

Ist auf einen Laserstrahl eine Frequenzmodulation aufgeprägt, so kann diese mit Hilfe des optischen Überlagerungsempfangs aufgelöst werden. Auch der Nachweis von statistischen Schwankungen der Laserfrequenz um geringe Beträge ist exakt nur mit dieser Methode durchführbar. Das beruht darauf, daß Fotoempfänger auf eine geringe Frequenzveränderung des Lichtes nicht mit einer Änderung der elektrischen Ausgangsgrößen reagieren. Ein Fotoempfän-

ger kann eine Amplitudenmodulation auflösen, jedoch keine Frequenzmodulation.

- Eine Methode für den Nachweis geringer Frequenzänderungen des Lichts stellt der optische Überlagerungsempfang dar. Das zu untersuchende Licht wird in einer Mischstufe (Fotoempfänger) mit dem Licht eines Lokaloszillators (Laser) vereinigt. Es entsteht eine Schwebung, deren Frequenz gleich dem Frequenzunterschied der beiden Lichtsignale ist. Das erzeugte Signal kann mit Hilfe radiotechnischer Methoden weiterverarbeitet werden.

Anwendungen des Lasers

Die Entwicklung auf dem Gebiet des Lasers wird heute dadurch charakterisiert, daß ständig Berichte über weitere Möglichkeiten und Bereiche der Anwendung erscheinen. Es ist deshalb schwer möglich, eine Reihenfolge nach Wichtigkeit und Anwendungsbreite durchzuführen. Das Bild verschiebt sich ständig, denn mit dem Erscheinen des Lasers sind teilweise völlig neue Forschungsgebiete entstanden, die vorher wenig attraktiv waren. So wurde z. B. die Holografie erst durch die Entwicklung des Lasers zu einer vielseitig anwendbaren Methode, die heute schon in vielen Industriezweigen und Forschungseinrichtungen genutzt wird.

Ein großer Teil der Lasergeräte, die auf neuen Effekten beruhen, befindet sich noch in den Entwicklungs- und Forschungslaboratorien. Die Einführung der bekannten Lasergeräte in die Industrie hat heute große Bedeutung.

Beispielsweise ist eine hochpräzise Werkzeugmaschine nicht denkbar ohne Meßmittel mit ausreichender Genauigkeit, ein Laser für Längenmessung ist ohne die dazugehörige Elektronik zur Auswertung nicht einzusetzen. Eine der Aufgaben dieses Buches besteht darin, solche Zusammenhänge zu verdeutlichen. Als erstes werden einige Anwendungen des Lasers aufgeführt, die vor allem in die Forschung Eingang gefunden haben. Man kann jedoch keine scharfe Trennung zwischen Forschung und Industrie ziehen. Zum Beispiel kann der Laser-Mikrospektral-Analysator sowohl in Forschungs- als auch in Industrielaboratorien eingesetzt werden. Durch die Industrialisierung der Forschung kommen in der unmittelbaren Produktion immer mehr wissenschaftliche Geräte zum Einsatz.

7. Spektroskopie

7.1. Laser-Mikrospektral-Analysator (LMA)

Eines der ersten industriell gefertigten Geräte, in das ein Laser eingebaut wurde, war der Laser-Mikrospektral-Analysator (LMA) (s. Bildanhang Bild 10). Er findet Anwendung in der Metallographie, Chemie, Silikattechnik, Mineralogie, Archäologie und in der Kriminaltechnik.

Das Gerät LMA 1 arbeitet folgendermaßen (Bild 65): Ein Festkörperlaser gibt über ein mikroskopisches System einen Lichtimpuls auf eine Probe des Materials. Der Lichtstrahl wird fokussiert, und seine Energie ($0,1 \dots 1$ Joule) reicht aus, um einen kleinen Teil des Materials zu verdampfen. Der Dampf ist teilweise ionisiert. Er gelangt in einen Raum zwischen zwei Elektroden, an denen eine Spannung anliegt. Durch die Ionisation ist der Dampf leitfähig geworden und bewirkt die Zündung einer Funkenentladung zwischen den Elektroden. Dieser Funke regt die Atome des verdampf-

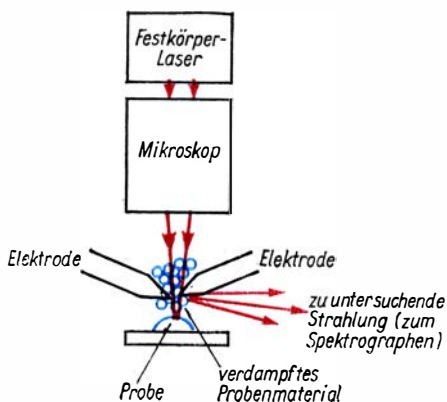


Bild 65. Prinzip des Laser-Mikrospektral-Analysators

ten Materials an. Sie emittieren Strahlung. Diese Strahlung wird mit Hilfe eines Prismen- oder Gitterspektrographen untersucht. Gegenüber herkömmlichen Verfahren hat diese Methode einige wesentliche Vorteile:

Man braucht die Probe nicht vorzubereiten, d. h., weder Zerkleinern, Schleifen, Polieren oder Pulverisieren sind erforderlich.

Gesteinseinschlüsse können im umgebenden Gestein selbst untersucht werden. Sie müssen nur an der Oberfläche liegen.

Leiter, Nichtleiter, kristalline und amorphe Festkörper können untersucht werden.

Die Probe befindet sich nicht im Vakuum.

Kleinste Mengen (10^{-6} bis 10^{-9} g) genügen zum Nachweis von 60 chemischen Elementen.

7.2. Nichtlineare Gasspektroskopie

Bei chemischen sowie physikalischen Untersuchungen ist es oft von Interesse, Spektren von Substanzen in gasförmigem Zustand zu erhalten. Dabei ist das Auflösungsvermögen durch die für gasförmige Zustände typische Dopplerverbreiterung der Absorptions- bzw. Strahlungslinie begrenzt. In einem Gas führen die Teilchen (Atome bzw. Moleküle) chaotische Bewegungen aus, die durch statistische Gesetze beschrieben werden können. Sie weisen eine bestimmte Geschwindigkeitsverteilung auf. Bei der Wechselwirkung mit Licht ist daher der Doppler-Effekt (s. 9.6.1.) von Bedeutung. Im Resultat ist die Breite der Spektrallinien der Atome bzw. Moleküle größer als die durch Strahlungsprozesse bedingte Breite der Spektrallinien eines (angenommenen) unbeweglichen Atoms.

Das Auflösungsvermögen eines Spektrographen kann nicht höher sein als die Linienbreite der Spektrallinien. Durch den Einsatz des Lasers ist es aber möglich geworden, bei einer Reihe von Substanzen (z. B. Neon, Methan, Jod u. a.), die in gasförmiger Form untersucht werden, Spektroskopie innerhalb der Dopplerlinie zu betreiben. Die Methode beruht auf der sogenannten »nichtlinearen Sättigung« der Absorption. Es zeigt sich, daß der Absorptionskoeffizient bei diesen Substanzen bei hohen Intensitäten des durchgehenden Lichtes kleiner wird. Das Gas wird für bestimmte Wellenlängen des Lichtes durchsichtig, wo es bei kleinen Intensitäten

absorbierend wirkt. Das Auflösungsvermögen dieser Methode ist nur abhängig von der natürlichen Linienbreite, die durch den Mechanismus der Wechselwirkung mit Licht bestimmt wird. So kann man bei der Untersuchung von Jod im He-Ne-Laser ein Auflösungsvermögen von einigen Megahertz erzielen. Die entsprechenden Dopplerbreiten liegen dagegen im Gigahertzgebiet.

Der wesentliche Nachteil dieser Methode der Spektroskopie besteht z. Z. noch darin, daß nur eine kleine Anzahl von Laserwellenlängen zur Untersuchung zur Verfügung steht. Daher ist die Anzahl der Substanzen, die mit dieser Methode untersucht werden können, noch gering. Wünschenswert für diese Anwendung sind wellenlängenmäßig durchstimmbare Laser ausreichend hoher Frequenzstabilität, die mit hoher Leistung möglichst kontinuierlich arbeiten.

7.3. Weitere Methoden der Spektroskopie

Will man größere Mengen einer Substanz untersuchen, so müssen andere Methoden angewendet werden (Makro-Spektralanalyse). Auch dabei können Laser zum Einsatz kommen, entweder Festkörperlaser hoher Energie oder auch kontinuierliche Laser, wie der CO₂-Laser.

Mit der Funkenanregung erzeugt man Temperaturen bis zu 10⁵ K. Im Spektrum der Sonne und bei Kernreaktionen kommen Temperaturen von 10⁶ K vor. Solche Temperaturen lassen sich mit Hilfe von Hochleistungslasern (Riesenimpuls laser) erzielen. Damit ist es möglich, im Laboratorium Stoffe bei extremen Bedingungen zu untersuchen. Diese Untersuchungen können unsere Erkenntnisse über die Struktur des Atomaufbaus vertiefen und erweitern und in Zukunft praktische Anwendung finden. So sind Technologien erwogen worden, mit denen es möglich ist, Kernreaktionen mit dem Laser in Gang zu bringen.

Nicht nur eine Emissionsspektroskopie kann man mit dem Laser betreiben, sondern man kann gleichfalls das Absorptionsspektrum eines Stoffes untersuchen. Es wurde vorgeschlagen, auch für diesen Zweck den Laser zum Verdampfen des Materials zu benutzen.

Eine Möglichkeit, einen Spektrographen neuen Typs zu bauen, ist die Methode der Lichtmischung (Bild 66). Dabei wird das zu untersuchende Licht unbekannter spektraler Verteilung zusammen mit

154 Laserlicht bekannter Wellenlänge in einen nichtlinearen Kristall

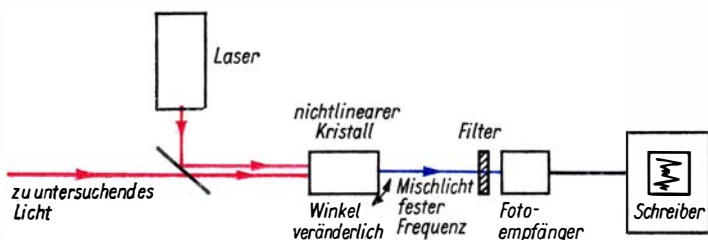


Bild 66. Spektrographie durch Lichtmischung in nichtlinearem Kristall

eingestrahlt. Damit Mischlicht ausreichender Intensität entsteht, ist es notwendig, daß sich das Laserlicht und das in seinem Spektrum zu untersuchende Licht im Kristall unter einem bestimmten Winkel zu dessen optischer Achse ausbreiten. Verändert man diesen Winkel, so wird eine andere Komponente des zu untersuchenden Lichts mit dem Laserlicht wechselwirken, und es entsteht Mischlicht mit einer anderen Wellenlänge. Auf diese Weise kann man durch Drehung des Kristalls das Spektrum einer unbekannten Lichtquelle aufzeichnen. Natürlich ist für eine automatische Aufzeichnung des Spektrums erforderlich, daß man den zur effektiven Ausbildung des Mischlichtes bestimmter Wellenlänge notwendigen Ausbreitungswinkel kennt.

Um die Massenzahlen von Atomen zu bestimmen, wendet man sogenannte »Massenspektrometer« an. Mit einer geeigneten Kombination von elektrischem und magnetischem Feld kann man Ionen nach ihren Atommassen trennen. Im Moskauer Institut für Technische Physik wurde für die Bereitstellung der Ionen ein Laser verwendet. Das Material wird mit Hilfe des Laserstrahls verdampft und bei einer Temperatur von rd. 6000 °C ionisiert. Das System ist anwendbar für Untersuchungen verschiedener Substanzen (Metalle, Kautschuk, Legierungen, Blut usw.).

Der Laser-Mikrospektral-Analysator dient zur emissions-spektroskopischen Untersuchung kleinster Proben. Die Untersuchungszeiten sind sehr klein. Die nichtlineare Gasspektroskopie erlaubt spektroskopische Untersuchungen von Gasen innerhalb der Dopplerlinie. Die Konzeption einer neuen Art von Spektrographen beruht auf der Lichtmischung in einem nichtlinearen Kristall.

8. Plasmaphysik

8.1. Plasmaerzeugung

Für physikalische Untersuchungen ist es oft notwendig, in Gasen ein Plasma herzustellen. So bezeichnet man einen Zustand des Gases, bei dem gleich viel positive wie negative Ladungsträger vorhanden sind und ein großer Teil der Atome ionisiert ist. Die hohe Leistungsdichte des Laserlichtes erlaubt es unter anderem auch, ein Plasma zu erzeugen. Geeignet dafür ist der Riesenimpuls-laser, dessen Licht mit Hilfe einer Linse, deren Brennpunkt im Gas liegt, fokussiert wird. Man erreicht Feldstärken von 10^6 bis 10^7 V/cm. Bei diesen hohen Leistungsdichten kann es zu einer Selbsteinschnürung (Selbstfokussierung) des Lichtstrahles kommen. Die Erzeugung des Plasmas ist von einem scharfen Knall begleitet, weshalb man auch von einem »Plasmafunken« spricht.

Es gibt einige Mechanismen, die für die Plasmaerzeugung durch Laserlicht verantwortlich sind: die Mehrfotonen-Ionisation und die Elektronen-Kaskaden-Ionisation. Die Photonen des Laserlichtes haben allein nicht die nötige Energie, um Elektronen aus den Atomen herauszuschleudern. Die Photonenenergie wird durch die Wellenlänge bestimmt:

$$E = h \nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (50)$$

E Energie

h Plancksches Wirkungsquantum

ν Frequenz

c Lichtgeschwindigkeit

λ Wellenlänge.

So beträgt z. B. für den Rubinlaser die Photonenenergie nur $E =$
156 1,78 eV, während die Ionisationsenergie etwa der Edelgase bei rd.

10 eV liegt. Es ist aber möglich, daß die Atome bei hoher Leistungsdichte eine Vielzahl von Photonen gleichzeitig absorbieren können, die dann ein Elektron herausschlagen. Dieser Prozeß wird *Mehrfotonenabsorption* genannt.

Der zweite Mechanismus ist ein Lawinenprozeß. Man nimmt an, daß zu Beginn des Laserimpulses schon freie Elektronen vorhanden sind (z. B. durch Mehrfotonenabsorption).

Bei Zusammenstößen mit neutralen Atomen können diese Elektronen Photonen absorbieren. Einen solchen Prozeß nennt man inverse Bremsstrahlung. Nachdem das Elektron genügend Energie gesammelt hat, kann es ein neutrales Atom ionisieren. Damit sind zwei freie Elektronen vorhanden, und der Prozeß beginnt von vorn. Er wird *Elektronen-Kaskaden-Ionisation* genannt.

Die Untersuchung des erzeugten Plasmas hat Bedeutung für die Spektroskopie. Für den durch den Laserstrahl erzeugten Plasmafunken kann man industrielle Anwendungen voraussehen.

8.2. Plasmadiagnostik

Die Untersuchung des Plasmas ist für viele wissenschaftliche Gebiete von Bedeutung. Als Plasmastrahl für Schneiden und Schweißen, in stromerzeugenden Generatoren oder bei der Kernfusion kommt Plasma zum Einsatz. Vorkommende Plasmen sind nicht homogen über den Raum verteilt, sondern weisen Temperatur- und Dichtestrukturen auf, die mit Hilfe eines scharf gebündelten Laserstrahls untersucht werden können. Beim Durchgang durch ein Plasma verändert sich die Lichtgeschwindigkeit. Man kann daher ein Plasma untersuchen, indem man interferometrisch eine Phasenverschiebung zwischen einer das Plasma durchlaufenden Lichtwelle und einer unbeeinflussten Vergleichswelle mißt. Außerdem kann man beim Durchgang des Laserstrahls durch ein inhomogenes Plasma eine Lichtablenkung feststellen (bis zu etwa 1°). Auch dieser Effekt kann zur Untersuchung herangezogen werden.

Ein weiteres Verfahren zur Plasmauntersuchung ist die Verwendung eines He-Ne-Lasers. Man nutzt die Eigenschaft, daß der He-Ne-Laser auf zwei Laserlinien ($\lambda = 0,63 \mu\text{m}$, $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$) gleichzeitig emittieren kann. Die beiden Laserlinien haben einen gemeinsamen oberen Energiezustand. Das bedeutet, daß eine Aus-



Bild 67. Bestimmung der Dichte von Stoffen aus der Änderung der Brechzahl n (schematischer Aufbau)

strahlung auf der einen Linie Einfluß auf die Ausstrahlung der anderen Laserlinie hat. Mit einem fotoelektrischen Empfänger mißt man die Intensität der Strahlung auf der Linie $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$ (Bild 67). Der intensitätsreichere Laserstrahl ($3,39 \mu\text{m}$) gelangt über eine Küvette zu einem Spiegel. Der Spiegel reflektiert hauptsächlich das Licht der Wellenlänge $3,39 \mu\text{m}$ in den Laser (optische Rückkopplung). Dadurch wird der Übergang $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ gestört – auf Grund des gemeinsamen oberen Zustandes beider Übergänge –, was sich auf der Linie $0,63 \mu\text{m}$ bemerkbar macht.

Diese Störung hängt ab von der Entfernung des Spiegels. Entfernungsveränderungen von etwa einer halben Wellenlänge bewirken eine Änderung der Laserausgangsleistung. Eine Bewegung des Spiegels über mehrere Wellenlängen ruft somit eine Modulation der $0,63 \mu\text{m}$ -Strahlung hervor. Der gleiche Effekt wird erzielt, wenn der Spiegel festgehalten wird und sich die Dichte des Mediums in der Küvette ändert. Es ändert sich dann die Brechzahl n des Mediums und folglich die optische Weglänge.

Mit dieser Methode ist es möglich, die Dichte von Stoffen sehr genau zu messen. Besonders für die Plasmauntersuchung kommt die Methode zum Einsatz. Es lassen sich damit im Plasma eine Reihe von Parametern bestimmen, z. B. die Elektronendichte. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Längenmeßtechnik mit Lasern zur Messung der Brechzahl einzusetzen (s. 9.7.).

9. Messung physikalischer und technischer Größen

9.1. Druckmessung

Durch interferometrischen Vergleich eines Gases unter Normaldruck mit einem Gas von unbekanntem Druck kann man eine präzise Druckmessung mit Hilfe von Laserlicht durchführen. Der Aufbau eines solchen Gerätes sieht folgendermaßen aus (Bild 68): Die Laserstrahlung wird auf eine spezielle Teilerplatte gerichtet. Sie besteht aus einer Unterlage mit zwei Spiegelschichten. Auf der einen Seite der Unterlage werden 50 % des auftreffenden Lichtes reflektiert, auf der anderen 100 %. Der auftreffende Laserstrahl wird in zwei parallele Strahlen gleicher Intensität aufgespalten. Sie werden in ein Spiegelsystem gelenkt, in dem sie mehrere Male hin- und herreflektiert werden. Durch ein Austrittsfenster verlassen die beiden Strahlen das Spiegelsystem und gelangen über planparallele Platten zu zwei Fotodetektoren.

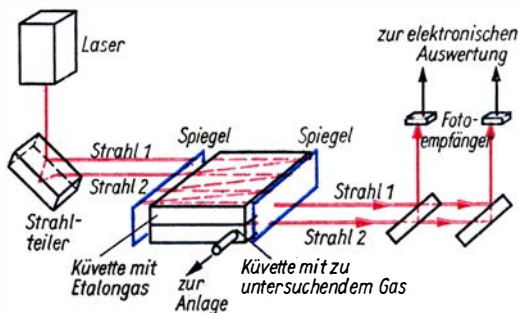


Bild 68
Anordnung zur
Druckmessung

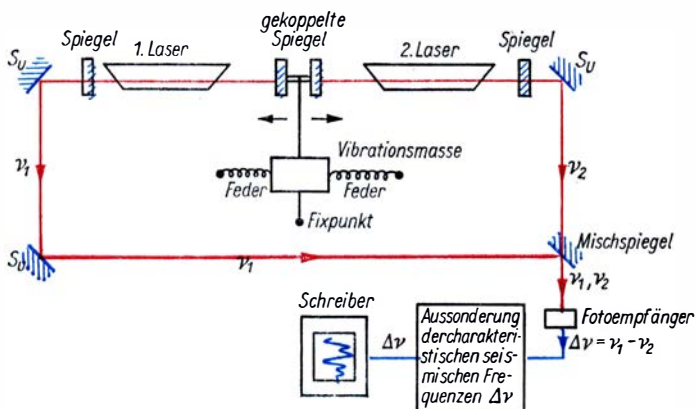
In die beiden Strahlengänge im Spiegelsystem werden zwei Küvetten eingebracht. Die eine Küvette enthält ein Gas unter Normaldruck. Die andere Küvette ist mit dem zu untersuchenden Gas gefüllt. Ein Druck- bzw. Temperaturunterschied der beiden Gase

bewirkt einen Unterschied im Brechungskoeffizienten. Bei einem Druckunterschied der beiden Gase kommt es zu einem Unterschied in den optischen Weglängen der beiden Gase. Die beiden Strahlen werden über planparallele Platten wieder zusammengeführt, wobei sie miteinander interferieren. Durch die Interferenzerscheinungen kommt es zu einer Beeinflussung der auf die Fotoempfänger auftreffenden Intensität des Lichtes. Aus der Aufzeichnung dieser Interferenzerscheinungen kann man auf den Druckunterschied der Gase schließen. Auf diese Weise konnte man einen Luftdruck von nur 0,07 Torr messen.

9.2. Seismograph

Die genaue Lage einer Laserfrequenz ist abhängig von der Resonatorlänge. Aus diesem Grund kann der Laser als empfindlicher Seismograph dienen. Dazu verwendet man zwei gekoppelte Laser (Bild 69).

Zwei Spiegel werden miteinander so gekoppelt, daß beide Laser einen Spiegel gemeinsam haben. Dieser Mittenspiegel ist mit einer Vibrationsmasse verbunden. Die Vibrationsmasse ist ein Teil eines



160 Bild 69. Laser-Seismograph (schematischer Aufbau)

S_U Umlenkspiegel

Pendels, das Schwingungen in vertikaler Richtung ausführen kann. Wenn sich die Vibrationsmasse bewegt, verschiebt sich die Frequenz des einen Lasers um einen größeren Wert, weil sich die Resonatorlänge ändert; die andere verkleinert sich entsprechend. Die beiden Laserstrahlen werden gemischt und die Methode des optischen Überlagerungsempfanges angewendet. Mit Hilfe einer elektronischen Einrichtung sondert man das seismische Signal aus, und es kann aufgezeichnet werden.

Eine geringe Drift der Laserfrequenz geht nicht ein, da nur die Wechselstromkomponenten weiterverarbeitet werden. Die zu untersuchenden Schwingungen liegen auch in einem charakteristischen Frequenzbereich, so daß man sie von anderen Erschütterungen (z. B. durch Bautätigkeit) unterscheiden kann. Sie können damit gut ausgesondert werden. Die Empfindlichkeit eines Laser-Seismographen ist etwa 10mal größer als die von Seismographen anderer Typen.

Der Laser-Seismograph ist nicht die einzige Möglichkeit, seismische Messungen mit Lasern durchzuführen. Beispielsweise wurden Seismographen auf der Grundlage eines Fabry-Perot-Interferometers aufgebaut; der Laser diente dabei als Lichtquelle. Im Prinzip ist es möglich, mit solchen Geräten Längenänderungen mit einer Genauigkeit von $\frac{\Delta L}{L} = 10^{-15}$ aufzubauen. Bis jetzt sind Meßgenauigkeiten (in kurzen Zeitintervallen) von der Größenordnung 10^{-12} erreicht worden. Der empfindlichste Seismograph, der nicht auf dem Laserprinzip arbeitet, erlangt eine Genauigkeit von nur 10^{-9} . Nicht nur zur Untersuchung von Erdbewegungen, die durch Erdbeben, unterirdische Kernwaffenexplosionen oder andere Quellen ausgelöst werden, kann man diese Geräte einsetzen. Es wurde überlegt, wie auf dem Mond ein Laser-Seismograph aufgestellt werden könnte. Der Mond selbst ist, wie Ergebnisse seismographischer Untersuchungen zeigten, ein in hohem Maße ruhiger Körper, führt also wenig innere Eigenbewegungen aus. Es ist vorgesehen, auf dem Mond einen empfindlichen Laser-Seismographen aufzustellen, der im Krater Kopernikus seinen Standpunkt erhalten soll. Mit Hilfe des Vergleichs der experimentellen Resultate, die gleichzeitig von einem Erd-Seismographen als auch von dem Mond-Seismographen erhalten werden, will man Gravitationswellen feststellen. Die Existenz von derartigen Schwerkraftwellen ist bis jetzt nur eine

Hypothese, die durch die angeführten Vergleichsmessungen überprüft werden könnte.

9.3. Frequenznormal

Eine wesentliche Grundlage für sämtliche physikalischen Messungen, die an irgendeinem Objekt durchgeführt werden, ist die Einführung von Grundeinheiten. Es existieren sieben Grundeinheiten, von denen alle anderen Meßgrößen abgeleitet werden:

für die Länge	das Meter	(m)
für die Zeit	die Sekunde	(s)
für die Masse	das Kilogramm	(kg)
für die Temperatur	das Kelvin	(K)
für die elektrische Stromstärke	das Ampere	(A)
für die Stoffmenge	das Mol	(mol)
für die Lichtstärke	die Candela	(cd)

Diese Grundeinheiten sind auf physikalischen Grundlagenmessungen aufgebaut und werden durch *Normale* verkörpert. Die ständig wachsenden Genauigkeitsanforderungen auf allen Lebensgebieten stellen auch an die Genauigkeit der Normale erhöhte Anforderungen. Jedes Meßmittel muß mit dem dafür bestimmten Normal und dieses seinerseits wieder mit dem Primärnormal verglichen werden bzw. den jeweils gültigen Definitionen entsprechen.

Eine Ungenauigkeit eines Normals in dieser Reihe zieht eine ganze Kette von größeren Ungenauigkeiten nach sich, da die nachfolgenden Normale immer ungenauer werden. So genügte es noch in der Mitte des 19. Jahrhunderts, das Meter als den vierzigmillionsten Teil des Erdumfangs zu definieren. Tatsächlich hat man von 1792 bis 1799 die Entfernung zwischen Dünkirchen und Barcelona mit den Mitteln der Landvermessung ausgemessen. Durch astronomische Messungen wurde dann diese Entfernung in Beziehung zum Erdumfang gebracht und das Meter als der vierzigmillionste Teil des Erdumfangs definiert.

Später, als die Genauigkeitsanforderungen höher wurden, verglich man die Maßstäbe mit dem sog. »Urmeter«, das 1889 in Paris als Abstand zwischen zwei Strichen auf einem Platin-Iridiumstab bei

Auch diese Genauigkeit reichte dann nicht mehr aus. Da man es inzwischen gelernt hatte, Längenmaße interferometrisch mit der Wellenlänge einer Lichtquelle zu vergleichen, wurde 1960 das Meter als 1650763,73 Vakuum-Wellenlängen der rötlich-orangefarbenen Strahlung von Krypton 86 definiert.

Konnten bis dahin zwei Meterstäbe mit einer Genauigkeit von

$$\frac{L}{\Delta L} = 10^7$$

verglichen werden, so wurde die Genauigkeit durch den Bezug auf die Kryptonwellenlänge auf etwa 10^8 erhöht.

Allerdings hat dieses Normal einen Nachteil: Das Meter kann nicht in seiner gesamten Länge, sondern nur in Einzelschritten gemessen werden. Das hängt damit zusammen, daß der Vergleich interferometrisch stattfindet. Da die Atome einer herkömmlichen Lichtquelle, wie sie auch die Kryptonlampe ist, unabhängig voneinander ihr Licht aussenden, ist die Kohärenzlänge sehr klein. Längen in der Größenordnung eines Meters können nur in Einzelschritten gemessen werden, da man sonst keine Interferenzfiguren mehr erhält.

Wesentlich anders sieht die Situation beim Laser aus. Hier ist von vornherein die Voraussetzung für große Kohärenzlängen gegeben. Verschiedene Ursachen, die in 5.2. beschrieben wurden, führen allerdings zu einer Drift der Laserfrequenz. Diese Drift muß durch geeignete Maßnahmen herabgesetzt werden. So können Stabilitäten von 10^9 ohne allzugroßen Aufwand erreicht werden.

Die Kohärenzlänge der Laserstrahlung hängt von der sogenannten »Kurzzeitstabilität« ab. Verschiedene Störgrößen, wie eine schnelle Längenänderung des Resonators durch Schwingungen der Spiegel, können bewirken, daß die Frequenz des Lasers schnell hin- und herschwankt. Für die Interferometrie hat das genau den gleichen Einfluß, als wenn die Strahlungslinie verbreitert würde. Die *Kohärenzlänge* des Lasers ist dann

$$L_K = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (51)$$

L_K Kohärenzlänge des Lasers

$\Delta\nu$ Breite des Bereichs der Kurzzeit-Frequenzschwankungen

c Lichtgeschwindigkeit.

Mit einer ausreichenden Kurzzeitstabilität kann man Kohärenzlängen von mehreren 100 km erreichen.

Die Vorzüge eines auf geeignete Weise stabilisierten Lasers in bezug auf den Einsatz als Frequenz- bzw. Längennormal sind:

große Ausgangsintensität
hohe Stabilität
große Kohärenzlänge
starke Strahlbündelung.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß der Laser bald als Sekundär- und auch als Primärnormal Anwendung finden wird. Das Meter kann dann als Vielfaches der Wellenlängen der Laserstrahlung ausgedrückt werden. Ein Vergleich mit anderen Normalen kann über die Methoden der Interferenz-Längenmessung bzw. über die Methode der optischen Überlagerung der Lichtsignale stattfinden.

Vor allem als Sekundärnormal in Meßämtern und Industrielaboratorien könnten stabilisierte Laser verwendet werden. Der Aufwand braucht nicht übermäßig hoch zu sein, da Stabilitäten von 10^8 kaum übertroffen werden müssen. Geräte dieser Art existieren schon auf dem Weltmarkt.

9.4. Entfernungsmessung (Impulslaufzeit-Verfahren)

In vielen Wissenschafts- und industriellen Bereichen ergeben sich Aufgaben der Messung einer bestimmten Entfernung zwischen zwei Punkten. Dazu können Lasergeräte eingesetzt werden. Unter dem Begriff »Entfernungsmessung« soll das Ausmessen einer größeren Strecke (über 100 m) verstanden werden. Kleine Strecken werden mit sogenannten »Längenmeßgeräten« bestimmt. Für die Messung größerer Entfernungen mit Hilfe elektromagnetischer Wellen können verschiedene Methoden zur Anwendung kommen. Im folgenden wird das Impulslaufzeit-Verfahren dargestellt.

Wenn eine größere Entfernung zwischen zwei Punkten gemessen werden soll, so kann die Messung nicht mit einem einmaligen Vergleich der Meßstrecke mit einem Maßstab (z. B. einem Bandmaß) durchgeführt werden. Man kann in diesem Fall die Messung nur in Einzelschritten durchführen. Noch komplizierter ist die Bestimmung der Entfernung, wenn sich zwischen den Meßpunkten größere

9.4. Entfernungsmessung (Impulslaufzeit-Verfahren)

Unebenheiten, z. B. Täler, befinden. Dann kann man nur über indirekte Messungen und geometrische Berechnungen eine exakte Entfernungsbestimmung durchführen. Eine wiederum andere Situation ergibt sich, wenn, wie in der Militärtechnik, die Entfernung zu einem Ziel gemessen werden muß, das aus einem bestimmten Grund nicht zugänglich ist. Auch in solchen Situationen ist man auf indirekte Messungen angewiesen.

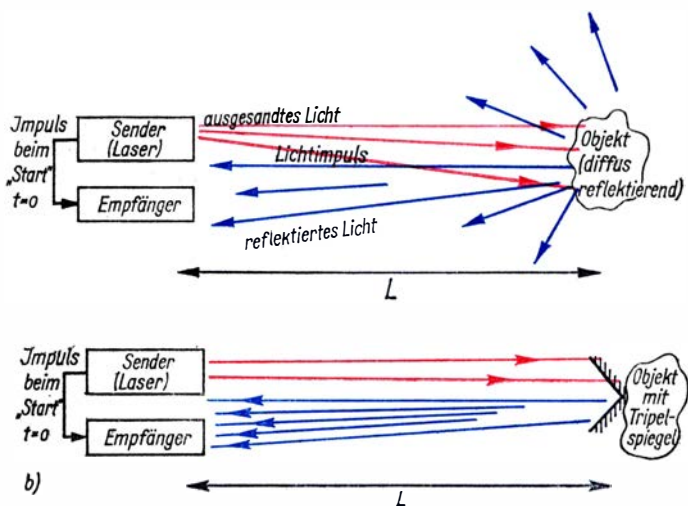


Bild 70. Laser-Entfernungsmessung

a) Entfernungsmessung zu beliebigen Objekten

b) Entfernungsmessung mit Tripelspiegel (reflektiertes Licht ist stärker gebündelt, daher größere Meßstrecken möglich)

Mit der Vervollkommnung der Technik wurden völlig neue Meßmethoden (Radar, Echolot) entwickelt. Ihr Arbeitsprinzip, auf dem auch die Methode der Laser-Entfernungsmessung beruht, nämlich das Impulslaufzeit-Verfahren (Bild 70), arbeitet folgendermaßen:

Ein Signal wird vom Sender abgeschickt und gelangt an das Objekt. Je nach Beschaffenheit des Objekts wird ein mehr oder weniger großer Anteil der Strahlung in die Richtung des Senders reflektiert,

in dessen Nähe ein Empfänger aufgestellt ist. Die räumliche Trennung zwischen Sender und Empfänger kann in erster Näherung vernachlässigt werden, da über sehr große Strecken L gemessen wird. Mit geeigneten Mitteln registriert man die Zeit t , die das Signal braucht, um vom Sender zum Empfänger zu gelangen. Ist die Geschwindigkeit v der Signalausbreitung bekannt, so kann aus der Formel für die Geschwindigkeit (Weg/Zeit) die Strecke L berechnet werden:

$$L = \frac{tv}{2} \quad (52)$$

L zu messende Strecke

t gemessene Zeit

v Geschwindigkeit der Signalausbreitung.

Die Zahl 2 erscheint deshalb, weil das Signal zweimal die Strecke L zurücklegen muß.

Das Lasermeßverfahren wird natürlich nicht Radar- bzw. Echolot verdrängen. Auf Grund der spezifischen Eigenschaften ist es aber möglich, mit Laser-Meßgeräten Aufgaben zu lösen, an deren Verwirklichung zuvor nicht gedacht werden konnte. Ein Vorteil des Lasers besteht darin, daß man den Meßstrahl stark bündeln kann, da das Licht eine kleinere Wellenlänge gegenüber den Radiowellen bzw. dem Schall aufweist. Dadurch kann die Entfernung zu kleineren Objekten gemessen und eine effektivere Energieübertragung gewährleistet werden. Außerdem hat das Laserlicht eine geringe Spektralbreite. Mit Hilfe geeigneter Filter wird das Nutzsignal aus dem Störsignal (von anderen Lichtquellen) ausgesondert.

Als Beispiel für die Entfernungsmessung mit Licht soll die Zeit zwischen Aussenden und Empfang des Impulses bei einer Meßstrecke $L = 1,5$ km berechnet werden:

$$t = \frac{2L}{c} = \frac{2 \cdot 1,5 \text{ km}}{300\,000 \text{ km s}^{-1}} = 10^{-5} \text{ s} = 10 \text{ } \mu\text{s}.$$

Dabei wird deutlich, daß man spezielle elektronische Geräte benötigt, um solche kurze Zeiten messen zu können. Als Lichtsender kommen Riesenimpulslaser in Frage, die einerseits genügend intensitätsreiche Signale zur Verfügung stellen, andererseits eindeutige

Impulse aussenden. Bei tragbaren Geräten für die Bestimmung relativ kurzer Entfernungen kann man auch Halbleiterlaser einsetzen.

Um am Empfänger ein Signal zu erhalten, genügt bei kleineren Entfernungen das Streulicht des Objekts. Zur Messung größerer Strecken bringt man am zu messenden Objekt einen Spiegel an, der einen größeren Teil des Lichtes zum Empfänger reflektiert. Außerdem ist man in der Lage, bei ausgedehnten, unebenen Objekten den Spiegel an einer definierten Stelle anzubringen. Man mißt dann die Entfernung zu einer definierten Stelle und hat im Meßergebnis eindeutige Impulse, die bei der Beobachtung des Streulichts nicht auftreten, da in diesem Fall das Licht von mehreren Punkten reflektiert wird. Die Meßgenauigkeit wird erhöht. Diese Tatsache war einer der Gründe, einen Laserreflektor auf dem Mond aufzustellen. Ein reflektierender Spiegel müßte äußerst genau justiert werden, um mit dem reflektierten Strahl auch den Empfänger tatsächlich zu treffen. Um das zu umgehen, verwendet man einen *Tripelspiegel*, auch Tripelprisma genannt. Er hat die Eigenschaft, auftreffendes Licht in die Einfallsrichtung zu reflektieren, unabhängig von dem Einfallswinkel des Lichtstrahls (s. 9.5.).

Die Methode der Laser-Entfernungsmessung ist zur genauen Vermessung der Entfernung des Mondes von der Erde angewendet worden. Die Anwendung des Lasers zur Bestimmung kosmischer Entfernungen ist sicherlich ein ausgezeichnetes Beispiel für die Leistungsfähigkeit von Lasergeräten. Jedoch sind auch Laser-Entfernungsmesser zum Einsatz auf der Erde universell verwendbar. Werden sie beispielsweise für topographische Aufgaben oder für Bauvorhaben angewendet, so kann vor allem der Zeitaufwand wesentlich verringert werden. Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz von Laser-Entfernungsmeßgeräten bei der Aufnahme von Stereoluftbildern. Die Auswertung dieser Bilder kann nur dann vorgenommen werden, wenn die Flughöhe im Moment der Aufnahme ausreichend genau bekannt ist. Als exakter Höhenmesser kann ein Lasergerät dienen, das auf einen Zielpunkt in der Mitte des fotografisch aufzunehmenden Objekts ausgerichtet ist. Im Moment der Aufnahme wird die Höhe gemessen und fixiert. In der Militärtechnik bedient man sich der Lasermeßgeräte, um die Entfernung zu Zielen und Orientierungspunkten schnell und genau zu bestimmen. Die Geräte können tragbar konstruiert oder in gepanzerten Fahrzeugen eingebaut werden.



Ein Beispiel der Anwendung des Lasers zur Messung von Entfernungen ist das Impulslaufzeit-Verfahren.

Sender und Empfänger stehen am gleichen Ort. Aus der Zeitmessung wird über die Lichtgeschwindigkeit die Entfernung bestimmt. Die Laufzeiten liegen im Bereich von $10 \mu\text{s}$, wenn 1 km Entfernung gemessen werden soll. Die Impulsdauer muß dementsprechend klein sein. Der Laser muß einen eindeutigen Impuls aussenden (Riesenimpulslaser). Das Verfahren findet sowohl im Weltraum als auch für Messungen auf der Erde Anwendung.

9.5. Messen der Strecke Erde – Mond

Eines der Vorhaben, die mit Hilfe der Raumflüge bemannter bzw. unbemannter Raumflugkörper verwirklicht wurden, ist die genaue Vermessung der Strecke Erde – Mond. Im Jahre 1969 wurde durch die Astronauten von Apollo 11 bei der Landung des ersten bemannten Raumschiffes auf dem Mond ein Laserreflektor aufgestellt. Ein weiterer wesentlicher Schritt in bezug auf die genaue Mondvermessung erfolgte durch das erste sowjetische Mondfahrzeug Lunochod 1, auf dem unter anderen Meßgeräten gleichfalls ein Laserreflektor installiert wurde. Sein Spiegel wurde von Frankreich im Rahmen der gegenseitigen Zusammenarbeit bei der Erforschung des Welt-raums geliefert.

Die durchgeführten Vermessungen der Strecke Erde – Mond beruhen auf dem Prinzip der Laser-Entfernungsmessung mit dem Impulslaufzeit-Verfahren. Bei diesen Messungen wird ein Laserimpuls zum Mond geschickt. Der Impuls wird dort reflektiert, gelangt zur Erde zurück und wird von der Empfangsapparatur aufgenommen. Die Laufzeit wird gemessen und mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit die durchlaufene Strecke bestimmt. Natürlich kann man dieses Experiment auch durchführen, ohne einen speziellen Reflektor auf dem Mond zu installieren. Die ersten Versuche in dieser Richtung begannen schon 1964. Im Herbst 1965 gelang es erstmalig einer Gruppe sowjetischer Spezialisten, ein verwertbares Resultat zu erreichen. Sie verwendeten für diese Zwecke einen Rubinlaser (Impulsdauer 50 ns) sowie für Aussenden und Empfang der Impulse ein 260-cm-Teleskop. Es gelang ihnen, die Entfernung Erde – Mond auf rd. 384 000 m genau zu bestimmen.

Die Genauigkeit, mit der diese kosmische Entfernung gemessen werden kann, ohne einen Reflektor zu verwenden, ist vor allem durch die Unregelmäßigkeit sowie durch die Krümmung der Mondoberfläche begrenzt. Nunmehr stehen für diese Messungen Reflektoren zur Verfügung, die einen wesentlich größeren Teil des Lichtes zur Erde zurücksenden als die Mondoberfläche. Es ist damit möglich, ein Signal auszusondern, das einem definierten Punkt auf dem Mond entspricht.

Der von den Apollo-Astronauten installierte Reflektor besteht aus 100 Tripelprismen aus hochwertigem Quarzglas. Der Reflektor auf Lunochod 1 ist aus wesentlich weniger Prismen (14 Stück) aufgebaut, die jedoch größere Ausmaße aufweisen. Besonderer Wert wurde bei der Konstruktion und der Fertigung auf hochpräzisen Schliff gelegt. Bei der Konstruktion der Prismenhalterung mußte berücksichtigt werden, daß auf dem Mond extreme Temperaturschwankungen auftreten (von -170 bis $+130^{\circ}\text{C}$). Außerdem dürfen die Eigenschaften des Reflektors nicht durch Vibration und Beschleunigung beim Flug zum Mond beeinträchtigt werden.

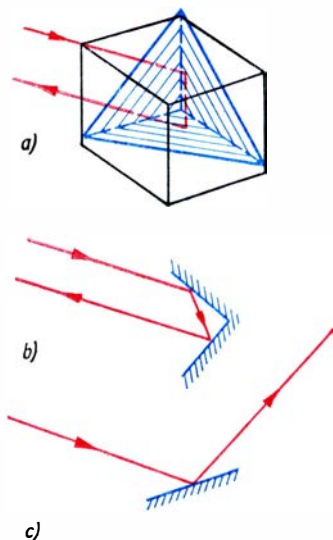


Bild 71. Tripelspiegel
(Tripelprisma)

- a) Aufbau
- b) Schnitt über zwei Flächen
- c) Reflexion am einfachen Spiegel

Ein *Tripelspiegel* (Tripelprisma) besteht aus einem Glas- oder Quarzkörper mit drei reflektierenden Flächen. Das Prisma kann man sich als einen Teil eines Quaders (Bild 71) vorstellen, bei dem drei Kanten des Prismas mit drei Kanten des Quaders übereinstimmen und die anderen drei Prismenkanten Diagonalen in drei Quaderseiten darstellen. Alle drei reflektierenden Begrenzungsflächen des Prismas stehen senkrecht aufeinander. Der Tripelspiegel hat die Eigenschaft, auftreffendes Licht in die Einfallsrichtung zurückzusenden, und zwar unabhängig vom Einfallswinkel. Ein einfacher Spiegel hingegen reflektiert das Licht nach dem Gesetz »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel« und sendet das Licht in die Einfallsrichtung nur bei senkrechtem Einfall zurück. Es wäre z. B. unmöglich, einen einfachen Spiegel auf dem Mond so genau zu justieren, daß das reflektierte Licht zum Ausgangspunkt auf der Erde zurückgelangt, da geringste Vibrationen oder Auslenkungen riesenhafte Auslenkungen des Reflexionsstrahls auf der Erde zur Folge hätten.

Mit Hilfe der Laser-Entfernungsmessung und des Laserreflektors ist es möglich geworden, die Strecke Erde – Mond mit einer Genauigkeit von 1 m auszumessen. Grundsätzlich ist es möglich, eine Genauigkeit von 1 dm zu erreichen.

Aus welchem Grund wird eine derartige Genauigkeit der Entfernungsmessung Erde – Mond angestrebt? Man ist nicht so sehr an der exakten Bestimmung dieser Entfernung interessiert, sondern möchte feststellen, ob sich diese Entfernung in einem Zeitraum von einigen Monaten bzw. einigen Jahren verändert. Die genaue Kenntnis dieser Größen würde Antworten auf eine Reihe von wichtigen Problemen geben. Beispielsweise könnte man auf die Verteilung der Massen innerhalb des Mondes schließen. Durch eine Pendelbewegung des Mondes um sein Zentrum während seiner Bewegung um die Erde ist es uns möglich, etwa 59 % der Mondoberfläche einzusehen. Diese Pendelbewegungen werden zum Teil durch die ungleichmäßige Verteilung der Mondmassen hervorgerufen. Eine andere wichtige Aufgabe, die mit der Entfernungsmessung dieser Strecke gelöst wird, ist die weitere Erforschung der Erde. Beispielsweise könnte man Kontinentverschiebungen nachweisen, die auf Grund einer aufgestellten Theorie vorhergesagt wurden. Andererseits kann man den Nordpol der Erde mit einer Genauigkeit von rd.

170 15 cm bestimmen, d. h. etwa 5···10mal genauer, als seine Lage

heute bekannt ist. Der Nordpol der Erde wandert auf einer elliptischen Bahn und kann sich im Jahr um etwa 60 m verschieben. Eine genauere Untersuchung dieser Erscheinung gestattet Rückschlüsse auf die Struktur der Erde. Ein besonders interessantes Resultat wäre die Überprüfung der Hypothese, daß sich das Weltall ausdehnt. Indem man die Bewegung des Mondes auf Jahre hinaus äußerst genau verfolgt, könnte man aus seiner Bewegung Rückschlüsse auf die Gravitationskonstante ziehen. Man würde erkennen können, ob diese Konstante mit der Zeit eine langsame Veränderung erfährt.

9.6. Geschwindigkeitsmessung

9.6.1. Doppler-Effekt

Bei jeder Signalübertragung gibt es einen Sender und einen Empfänger. Wenn sinusförmige Signale übertragen werden, so kann man ihnen eine bestimmte Frequenz zuordnen. Es stellt sich heraus, daß bei einer Bewegung von Sender und Empfänger zueinander die am Empfänger aufgenommene Frequenz nicht gleich der vom Sender ausgestrahlten ist. Wenn sich Sender und Empfänger zueinander in Ruhe befinden, so ist die Frequenz des vom Empfänger aufgenommenen Signals gleich der Frequenz, mit der das Signal vom Sender abgeschickt wurde. Bewegen sich Sender und Empfänger aufeinander zu, so wird eine höhere Frequenz empfangen. Bewegen sie sich voneinander weg, so ist die empfangene Frequenz niedriger. Die dazugehörige Gleichung lautet:

$$\nu_E = \nu_S \left(1 + \frac{v}{v_{\text{Sign}}} \right) \quad (53)$$

ν_E empfangene Frequenz

ν_S ausgesandte Frequenz

v_{Sign} Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals

v relative Geschwindigkeit Sender zu Empfänger.

Dabei gilt: v ist positiv, wenn sich Sender und Empfänger aufeinander zubewegen, und negativ im umgekehrten Fall. Der Effekt ist gut zu beobachten, wenn man an der Autobahn steht. Die vor-

überfahrenden Wagen haben eine relativ hohe Geschwindigkeit. Der Schall breitet sich mit einer Geschwindigkeit von 330 m/s aus. Das menschliche Ohr ist so empfindlich, daß es die dabei auftretenden Frequenzunterschiede aufzunehmen vermag. Bewegt sich das Fahrzeug auf den Beobachter zu, so hört man ein hohes Motorengeräusch. Bei der Vorüberfahrt schlägt der Ton um und nimmt eine niedrigere Tonhöhe an, d. h., die Tonfrequenz des Motorengeräusches scheint kleiner geworden zu sein. Dabei fährt das Fahrzeug mit etwa gleichbleibender Geschwindigkeit. Zum Doppler-Effekt gibt es eine Anekdote: Ein Professor wurde von der Polizei bei einer Autofahrt gestoppt. Er hatte eine Kreuzung überquert, die Ampel zeigte rot. Vor dem Gericht versuchte er sich zu verteidigen. Er wäre so schnell gefahren, daß er anstelle rot durch den Doppler-Effekt grün gesehen hätte. Die Lichtfrequenz hätte sich scheinbar erhöht.

Seine Rechnung ging nicht auf. Im Saal saß einer seiner Studenten. Er bewies, daß die Wellenlängenänderung auch bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit so gering ist, daß rotes Licht immer als rot aufgenommen wird. Der Professor wurde für schuldig befunden.

Die Lichtgeschwindigkeit c beträgt etwa $3 \cdot 10^{10}$ cm/s. Aus Gleichung (53) erkennt man, daß erst nahe der Lichtgeschwindigkeit eine für das Auge merkbare Frequenzänderung stattfindet. Das hindert allerdings nicht daran, mit empfindlichen Meßgeräten auch bei kleineren Geschwindigkeiten Frequenzänderungen festzustellen (mit Hilfe optischen Überlagerungssempfangs). Auf dieser Grundlage beruht das Verfahren der Laser-Geschwindigkeitsmessung. Dabei wird das vom Objekt reflektierte Licht gemessen.

Andererseits spielt der Doppler-Effekt auch im atomaren Bereich eine große Rolle. Besonders bei Gasen, in denen sich die Teilchen schnell bewegen, haben derartige Effekte wesentlichen Einfluß auf die physikalischen Parameter. Im Gaslaser beeinflußt die »Doppler-Verbreiterung« die Halbwertsbreite der Verstärkungskurve.



Eine Bewegung einer Signalquelle relativ zum Empfänger bewirkt eine Änderung der aufgenommenen Frequenz. Für Licht sind diese Änderungen klein, können aber mit Hilfe des optischen Überlagerungssempfangs gemessen werden.

9.6.2. Meßverfahren für Geschwindigkeitsmessung

Auf Grund des Doppler-Effekts lassen sich Geschwindigkeitsmessungen mit Hilfe des Lasers durchführen (Bild 72). Dabei wird durch den Laser das zu messende Objekt angestrahlt. Am Objekt tritt durch den Doppler-Effekt die Frequenz auf

$$\nu_0 = \nu_L \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (54)$$

ν_0 am Objekt auftretende Frequenz

ν_L Laserfrequenz

v Objektgeschwindigkeit

c Lichtgeschwindigkeit.

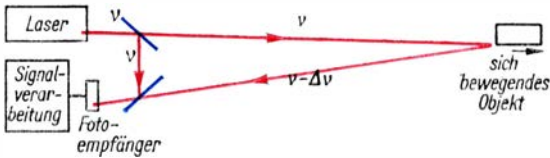


Bild 72. Geschwindigkeitsmessung (Ausnutzung des Doppler-Effekts)

Das Objekt reflektiert das Licht und wirkt somit wieder als Sender. An einem Empfänger, der starr mit dem Laser gekoppelt ist, tritt dann die Frequenz auf

$$\nu_E = \nu_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$$

ν_E Frequenz am Empfänger

oder anders ausgedrückt

$$\nu_E = \nu_L \left(1 + \frac{v}{c} \right)^2. \quad (55)$$

Die Frequenzänderung ist bei allen heute auf der Erde erreichbaren Geschwindigkeiten von makroskopischen Körpern sehr gering. Aus diesem Grund wendet man zur Messung der Frequenzänderung die Methode des optischen Überlagerungsempfangs an. Ein Teil

des Laserstrahles wird direkt auf den Empfänger gegeben. Durch die Überlagerung entsteht eine Schwebungsfrequenz, die ausgewertet wird. Die Schwebungsfrequenz der beiden überlagerten Wellen hat folgenden Wert (in erster Näherung):

$$\nu_L - \nu_E = \Delta\nu = 2\nu_L \frac{v}{c},$$

anders ausgedrückt

$$\Delta\nu = 2 \frac{1}{\lambda} v. \quad (56)$$

Bei kleineren Wellenlängen ergibt sich somit eine große Frequenzänderung, d. h., für Geschwindigkeitsmessungen sind optische Frequenzen vorteilhafter als z. B. Radiofrequenzen. Außerdem kann man den Laserstrahl stark bündeln. Nachstehend sind für verschiedene Geschwindigkeitswerte die Frequenzänderungen angegeben:

v	ν	Beispiel
3,6 km/h	3 MHz	Fußgänger
108 km/h	100 MHz	PKW
1200 km/h	1 GHz	Schallgeschwindigkeit

Ein universal einsetzbares Gerät zur Geschwindigkeitsmessung muß deshalb auf einem großen Frequenzbereich die Auswertung vornehmen. Die Auswertung im Gigahertzbereich wird von der Elektronik her aufwendig. Durch den geringen Divergenzwinkel wird die Ausrichtung auf das Meßobjekt bzw. auch die Nachführung schwierig. Andererseits kann man leichter definierte Objekte aussortieren.

Für Geschwindigkeitsmessung kommt nur ein kontinuierlicher Laser in Frage. Mit einem He-Ne-Laser lassen sich Entfernungen zu diffus reflektierenden Objekten bis etwa 100 m überbrücken. Wird am Objekt ein Tripelspiegel befestigt, so steigt die mögliche Meßlänge auf rd. 1 km an. Im Weltraum, wo keine Störungen durch die Atmosphäre auftreten, kann die Geschwindigkeit von Objekten mit einem He-Ne-Laser über eine Entfernung von rd. 20 km gemessen werden. Wenn es gelingt, den Argonlaser für Geschwindigkeitsmessungen einzusetzen, werden die zulässigen Entfernungen

größer. Die Ausgangsleistung des Argonlasers ist wesentlich höher als die des He-Ne-Lasers. Das Problem besteht vor allem darin, ein geeignetes Ausgangsfrequenzspektrum bereitzustellen. Kleine Frequenzschwankungen im Laser gehen in die Messung nicht ein, da sie gleichzeitig zum Empfänger gelangen und somit auf die Zwischenfrequenz keinen Einfluß haben.

Allerdings dürfen die kurzzeitigen Frequenzschwankungen die Kohärenzlänge der Laserstrahlung nicht zu stark herabsetzen. Die Kohärenzlänge muß größer sein als der Wegunterschied zwischen den Teilstrahlen.

Es wurde angenommen, daß sich Objekt und Laser gegeneinander gradlinig bewegen. Ein Doppler-Effekt tritt jedoch auch auf, wenn sich das Objekt schräg zum Meßstrahl bewegt.

Dabei gilt folgende Formel:

$$\Delta\nu = \frac{2\nu}{\lambda} \cos \alpha \quad (57)$$

α Winkel zwischen Meßstrahl und Bewegungsrichtung des Objektes.

Anwendung der Geschwindigkeitsmessung ist auf folgenden Gebieten möglich:

Verkehrsradaeinrichtungen;

zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten;

Messung an Werkzeugmaschinen;

in Längenmeßmaschinen;

zur Kontrolle der Geschwindigkeit beim Rendezvous zweier Raumflugkörper. Hier kommt es vor allem darauf an, kleinste relative Geschwindigkeiten zu messen. Durch den Doppler-Effekt ist es möglich, auch die Richtung der Bewegung festzustellen. Mit der Änderung der Richtung ändert sich auch das Vorzeichen der Frequenzdifferenz, d. h. ihre Phasenlage. Mit einem geeigneten Vergleichssignal kann damit auch die Bewegungsrichtung definiert werden;

zur Geschwindigkeitskontrolle an Flugzeugen bei Start und Landung (dabei kann die Geschwindigkeit auch vom Flugzeug aus gemessen werden).



Durch den Doppler-Effekt treten Frequenzänderungen im Licht auf, das durch ein bewegtes Objekt reflektiert wurde. Sie können mit der Methode des optischen Überlagerungsempfangs aufgelöst werden. Auf dieser Grundlage beruht die Geschwindigkeitsmessung mit Laser, die heute in einer Entfernung von rd. 100 m bis 1 km durchgeführt werden kann.

9.7. Längenmessung

Bei hochpräzisen Maschinen in der Mikroelektronik und anderen technischen Gebieten kommt es oft darauf an, kleinere Meßstrecken (10 cm bis einige 10 m) so genau wie möglich auszumessen. Die Genauigkeit der Messung wird durch die Toleranz der Meßmittel begrenzt. So hat beispielsweise die Schieblehre eine Toleranz von $\pm 0,1$ mm auf etwa 10 cm.

Die zulässige Toleranz der Meßmittel hängt von der geforderten Genauigkeit, von der Anwendung ab. Als *Genauigkeit* der Längenmessung wird das Verhältnis der Toleranz zur Gesamtlänge definiert:

$$G = \frac{l}{\Delta L} \quad (58)$$

G Genauigkeit

ΔL Toleranz

l Gesamtlänge.

Eine Schieblehre mit einer Länge von 100 mm hat also eine Genauigkeit von

$$G = \frac{100 \text{ mm}}{0,1 \text{ mm}} = 10^3.$$

Schon heute ist man bei mehreren Anwendungen gezwungen, Längenmessungen über einige Meter mit einer Toleranz von $1 \mu\text{m}$ durchzuführen. Die Genauigkeit, die erforderlich ist, um einen Meter auf $1 \mu\text{m}$ genau zu messen, beträgt

$$G = \frac{1 \text{ m}}{1 \mu\text{m}} = \frac{1 \text{ m}}{10^{-6} \text{ m}} = 10^6.$$

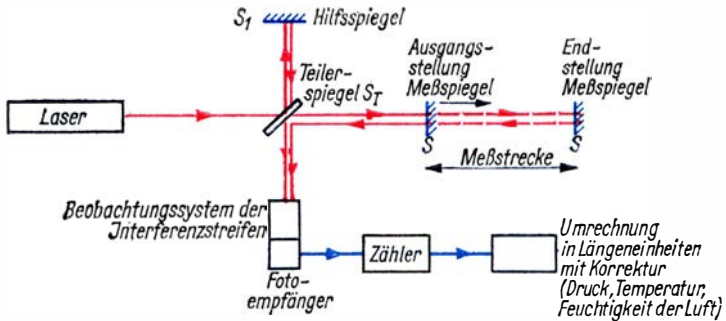


Bild 73. Interferometrisches Längenmeßsystem (Variante nach Michelson-Interferometer)

Mit sogenannten »Endmaßen« erreicht man diese Genauigkeit zwar, aber über mehrere Meter hinweg wird die Messung immer komplizierter. Auf der Grundlage des Lasers sind Verfahren für Messungen mit solcher Genauigkeit entwickelt worden.

Ein Arbeitsprinzip besteht etwa in folgendem: Man baut ein Interferometer auf, mit dem Interferenzstreifen beobachtet werden können. Als Beispiel möge das Michelson-Interferometer (Bild 73) dienen. Das Laserlicht fällt auf einen Teilerspiegel S_T , der einen Teil des Lichtes zu einem Hilfsspiegel S_1 reflektiert und einen Teil zum Meßspiegel S durchläßt. Die Spiegel S_1 und S senden die Strahlen zurück über den Teilerspiegel zum Beobachtungssystem. Dort entstehen Interferenzen als Folge der Überlagerung der beiden Teilstrahlen. Die Lage der Interferenzstreifen ist abhängig von dem Unterschied der Strecken, die das Licht über S_1 und S zurücklegt. Bewegt man den Spiegel S in eine bestimmte Richtung, so wandern auch die Interferenzstreifen im Beobachtungssystem. Die Bewegung der Interferenzstreifen ist somit ein Maß für die Bewegung des Meßspiegels S .

Mit Hilfe eines Fotoempfängers und einer elektronischen Zähl-einrichtung wird aufgenommen, wieviel Interferenzstreifen bei der Bewegung des Spiegels von einer Ausgangs- zu einer Endstellung durch das Beobachtungssystem wandern. An den Zähler schließt sich ein Rechner an, der die Spiegelverschiebung direkt in Metern (mit 6 Stellen hinter dem Komma) anzeigt.

Damit stellt sich ein wesentlicher Vorteil des Laser-Längenmeßsystems heraus. Es läßt sich nicht nur zum passiven Messen von Werkstücken, Endmaßen usw. einsetzen. Das elektrische Signal, das am Rechner die jeweilige Länge anzeigt, läßt sich sofort zum aktiven Steuern von Bearbeitungsmaschinen einsetzen (z. B. bei Werkzeugmaschinen hoher Präzision). In einen Computer wird die erforderliche Bearbeitungslänge eingegeben. Im Laufe der Bearbeitung gelangt ein elektrisches Signal in den Computer, das abhängig ist von der Länge der schon bearbeiteten Strecke. Die Maschine wird automatisch angehalten, wenn die vorgeschriebene Bearbeitungslänge erreicht ist.

Die Lasersteuerung von numerischen Werkzeugmaschinen wird heute nicht durch die Genauigkeit des Lasersystems bestimmt. Das Längenmeßsystem zeigt 1 m mit einer Toleranz von $1\text{ }\mu\text{m}$ an. Die besten Werkzeugmaschinen arbeiten auf einer vergleichbaren Strecke jedoch »nur« mit einer Toleranz von einigen $10\text{ }\mu\text{m}$. Daher sind die Möglichkeiten eines Laser-Meßsystems zur Zeit noch nicht voll ausgeschöpft.

An einen Laser für die Längenmeßtechnik werden eine Reihe von Anforderungen gestellt. Er muß billig herzustellen und robust sein. Seine Kohärenzlänge soll möglichst große Werte erreichen (mindestens einige 10 m). Die Hauptforderung an den Laser besteht aber in der ausreichend hohen Stabilität seiner Frequenz. Wenn die Frequenz nicht ausreichend stabil ist, verändern sich die Interferenzstreifen. Wandert die Laserfrequenz, so wandern auch die Streifen im Empfängersystem, und es entsteht ein Fehlersignal. Die Elektronik registriert eine scheinbare Spiegelbewegung. Die erforderliche Genauigkeit für die oben diskutierte Messung beträgt

$$\frac{l}{\Delta L} = \frac{1\text{ m}}{1\text{ }\mu\text{m}} = 10^6.$$

Somit muß die Frequenzstabilität des Lasers mindestens eine Größenordnung besser sein:

$$\frac{\nu}{\Delta\nu} = 10^7.$$

Die kommerziellen Laser, die heute für die Längenmeßtechnik
 178 gebaut werden, arbeiten meistens auf der Grundlage der thermi-

schen Stabilisierung des Laserresonators bzw. der Regelung der Resonatorlänge mit Hilfe eines kleinen Fehlersignals, einer Wobbelung (s. 5.2.). Es gibt auch andere Systeme, die z. B. auf der Laser-Geschwindigkeitsmessung beruhen. Man erzielt mit ihnen Auflösungen von $0,01\text{ }\mu\text{m}$, die Genauigkeit liegt bei 10^7 .

Die Hauptanwendung der Lasersysteme besteht in der Kalibrierung bzw. Steuerung von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen und von Koordinaten-Meßmaschinen. Man kann auch die axiale Verlängerung einer Rotationsspindel während des Betriebes messen. Mit dem Längenmeßsystem, das auf Geschwindigkeitsmessung beruht, können sogar gleichzeitig verschiedene Geschwindigkeiten gemessen werden. Man könnte auf diese Weise den Vorschub einer Werkzeugmaschine kalibrieren. Andererseits können in Laboratorien Metallskalen, Glasmaßstäbe und andere Meßmittel getestet werden. Das Interferometer kann direkt als Längenstandard dienen. Eine andere Anwendung besteht in einer Positionskontrolle. Sie ist von Bedeutung bei Werkzeugmaschinen, bei der Herstellung von integrierten Schaltkreisen, bei der Fotometrie oder auch bei der Herstellung von Meßtischblättern. Man kann den Wärmeausdehnungs-Koeffizienten von Proben messen oder auch die Brechzahl von durchsichtigen Materialien.

Die Laser-Längenmeßeinrichtungen gestatten eine Genauigkeit der Messung von 10^6 bis 10^7 über mehrere Meter hinweg. Ein Verfahren beruht auf der Zählung von Interferenzstreifen in einem Interferometer. Eine andere Methode benutzt die Geschwindigkeitsverschiebung der Meßfrequenz. Die Längenmeßeinrichtungen finden vor allem Anwendung zur Kontrolle numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen. Sie können auch direkt für ihre Steuerung eingesetzt werden.

10. Holografie

10.1. Grundlagen der Holografie

Eines der Anwendungsgebiete, die erst durch die Entwicklung des Lasers möglich geworden sind bzw. stimuliert wurden, ist die Holografie. Diese Art der fotografischen Speicherung optischer Information ist schon im Jahre 1947 durch *Gabor* vorgeschlagen worden. Jedoch standen damals keine Lichtquellen mit ausreichender Kohärenzlänge zur Verfügung. Deshalb konnte sich diese neue Art der Informationsspeicherung noch nicht durchsetzen.

Leith und *Upatnieks* setzten 1963 den Laser für die Holografie ein. Die Resultate waren so gut, daß sich daraus ein Forschungsgebiet entwickelte, das so umfassend ist, daß es nötig erscheint, in diesem Buch näher darauf einzugehen.

Zuerst soll verdeutlicht werden, worin das Wesen der herkömmlichen Fotografie besteht. Man speichert auf der fotografischen Platte bzw. auf dem Film Informationen, um sie zu beliebiger Zeit wiederzugewinnen. Dabei ist der Informationsverlust bei der herkömmlichen Fotografie recht hoch. Ein dreidimensionales Objekt kann z. B. nur flächenhaft, also zweidimensional, wiedergegeben werden. Diesen Nachteil versucht man in der Stereofotografie zu umgehen. Allerdings kann man auch hier nicht ausschalten, daß der Beobachtungsstandpunkt von vornherein festgelegt ist. Auch die Konzentration auf eine bestimmte Tiefe ist durch die Aufnahme vorausbestimmt. Das Auge kann sich beim Betrachten der Aufnahme nicht, wie es beim Betrachten realer Dinge möglich ist, auf einen Punkt in der Tiefe anpassen. Wenn beispielsweise der Hintergrund bei der Aufnahme unscharf eingestellt ist, so läßt sich das später nicht mehr korrigieren. Alle diese Mängel haben ihre Ursache darin, daß nur die Intensität des Lichtes auf der Fotoplatte registriert wird. Die Lichtintensität ist ein Maß für die Amplitude des Lichts.

Die elektromagnetische Welle wird jedoch auch noch durch Phase und Frequenz gekennzeichnet. Um die Frequenz bzw. die Wellenlänge des Lichtes zu speichern, d. h. ihre Einwirkung auf das Auge als Farbe zu erhalten, bedient man sich der Farbfotografie. Verloren geht aber bei der gewöhnlichen Fotografie die Information über die Phasen der Lichtwellen. Das ist der Grund für die obengenannten Unzulänglichkeiten.

Durch die Methode der Holografie werden diese Unzulänglichkeiten vermieden, die Informationen der elektromagnetischen Wellen werden in ihrer Gesamtheit gespeichert. Daher stammt auch das Wort Holografie, das in Anlehnung an das Wort Fotografie gebildet wurde. »Holos« kommt aus dem Griechischen und bedeutet soviel wie ganz bzw. umfassend.

Die von einem Objekt ausgehenden Lichtwellen bilden in ihrer Gesamtheit ein *Wellenfeld*. Es bewegt sich im Raum fort und ändert seine Struktur nur dann, wenn andere Objekte seinen Lauf stören. Eine *Wellenfront* ist die Einhüllende aller von dem Objekt ausgehenden Lichtwellen, sie verbindet Punkte gleicher Amplitude miteinander. Die Lichtwellen, die von einer punktförmigen Lichtquelle ausgehen, bilden ein Wellenfeld mit sphärischen Wellenfronten. Liegt ein paralleles Strahlenbündel vor, so bilden die sich ausbreitenden Wellen ein Wellenfeld mit ebenen Wellenfronten. Eine Wellenfront, die von einem bestimmten Gegenstand ausgeht, ist in definierter Weise verzerrt. Sie trägt die optischen Informationen über den Gegenstand. Mit Hilfe der Augenlinse und der Netzhaut sowie des Gehirns ist es uns möglich, die Information aus der Wellenfront »herauszulesen«, d. h. den Gegenstand zu sehen.

Die Holografie ist im eigentlichen Sinne ein Verfahren zur Speicherung dieser Wellenfront. Auf dem sogenannten Hologramm wird die vom Objekt ausgehende Wellenfront im übertragenen Sinne »eingefroren«. Das Objekt kann dann fortgenommen werden bzw. es kann sich in seiner Struktur verändern. Gespeichert bleibt aber die gesamte optische Information über den Gegenstand, die zum Zeitpunkt der Aufnahme vorhanden war. Zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt kann diese Information wiedergewonnen werden. Durch ein Verfahren, das man Rekonstruktion nennt, wird erreicht, daß auftreffende Lichtwellen ein Wellenfeld mit der Struktur der gespeicherten Wellenfront bilden. Sie laufen danach genauso weiter, als kämen sie vom aufgenommenen Objekt. Das Auge kann

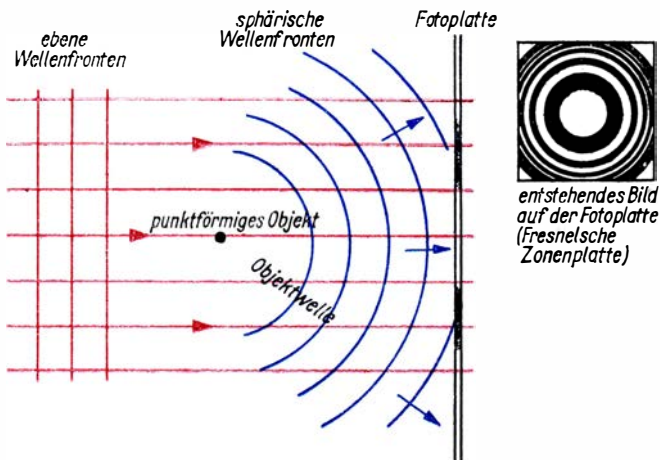


Bild 74. Entstehung eines Hologramms durch Überlagerung zweier Wellen

das Objekt sehen, man kann es fotografieren, man kann nicht zwischen Realität und Bild unterscheiden.

Für das Verfahren der holografischen Aufnahmen soll folgendes Beispiel als Illustration dienen. Ein paralleler Laserstrahl fällt auf ein punktförmiges Objekt (Bild 74). Von diesem Punkt breitet sich unter dem Einfluß des auftreffenden Lichts wieder eine Lichtwelle aus. Eine von einem Punkt ausgehende Welle nennt man *Elementarwelle*. Jedes reelle Objekt kann man sich aus mehreren Punkten zusammengesetzt denken. Die Einhüllende aller von diesen Punkten ausgehenden Elementarwellen ist die von der Struktur des Objekts bestimmte Wellenfront. Im Bild werden die Wellenmaxima durch ausgezogene Linien dargestellt. In einer gewissen Entfernung steht eine Fotoplatte. Die Wellenfronten einer einzigen Elementarwelle sind sphärisch, auf dem Bild werden sie als Kreise dargestellt. Außer den Elementarwellenfronten treffen auf die Fotoplatte noch die ungestörten ebenen Wellenfronten des parallelen Lichtstrahls (Referenzwelle) auf. Die Wellenfronten von Objekt- und Referenzwelle stehen untereinander in fester Beziehung. Das hat zwei Ursachen. Einmal wird die Elementarwelle direkt von dem auffallenden Licht hervorgerufen. Andererseits ist der Lichtstrahl

des Lasers räumlich kohärent, d. h., sämtliche Lichtwellen stehen untereinander in fester Beziehung.

Daher kommt auf der Fotoplatte ein Interferenzbild zustande. In bestimmten Punkten auf der Platte löschen sich die Wellen gegenseitig aus, in anderen summieren sie sich. Da die zeitlich kohärente Laserstrahlung stationär ist, bleibt dieses Interferenzbild ständig erhalten, obwohl Wellen zeitlich fortlaufende Erscheinungen sind. Das Interferenzbild enthält alle Informationen der Wellenfront, sowohl über die Amplitude als auch über die Phase. Die Frequenz ist vorerst durch die Laserstrahlung festgelegt. Man erkennt folgendes: Um ein derartiges Interferenzbild zu erzeugen, benötigt man eine *Objektwelle* und eine *Referenzwelle*. So bezeichnet man die ungestörte Welle, die sich mit der Objektwelle überlagert. Mit dem sich anschließenden Prozeß der Bearbeitung der Fotoplatte (Entwickeln und Fixieren), der wie bei der gewöhnlichen Fotografie vor sich geht, entsteht das fertige Hologramm.

An den Aufnahmeprozess schließt sich, wie auch bei der Fotografie, der Prozeß der *Rekonstruktion* an. So nennt man das »Abfragen« der optischen Information bei der Holografie.

Bei der Fotografie besteht die Rekonstruktion im einfachen Betrachten des Bildes bzw. in der Projektion auf einen Bildschirm mit anschließender Betrachtung. Auf einem Hologramm ist jedoch

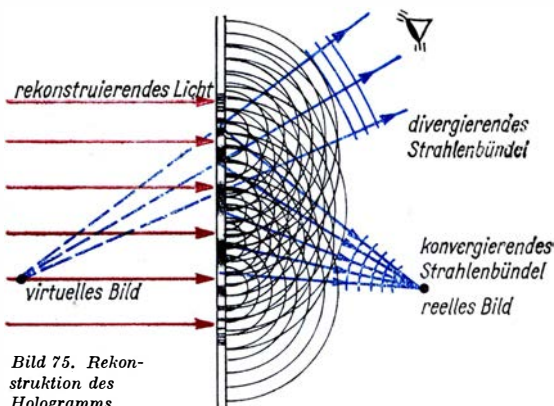


Bild 75. Rekonstruktion des Hologramms

beim einfachen Betrachten im normalen Licht weiter nichts zu sehen als ein Interferenzmuster. Die Information ist »verschlüsselt«. Will man die »eingefrorene« Wellenfront weiterlaufen lassen, d. h. das Objekt sichtbar machen, so muß man das Hologramm mit einer kohärenten Welle (Rekonstruktionsstrahl) beleuchten. Wiederum soll das Hologramm eines Punktes als Beispiel dienen.

Das Hologramm wird in einen parallelen Lichtstrahl gestellt. Das Objekt ist nicht mehr vorhanden (Bild 75). Nun wirkt das Hologramm wie ein Streugitter. Es gehen wiederum von den einzelnen Punkten des Gitters Elementarwellen aus. Durch ihre Überlagerung entstehen zwei Wellenfronten: Eine Wellenfront fokussiert sich auf einen Punkt, sie gibt das *reelle Bild*. Die andere Wellenfront divergiert. Verlängert man ihre Strahlen rückwärts, so treffen sie sich in demselben Punkt, in dem das Objekt stand. Es ist so, als stünde das Objekt noch da und würde die Wellen selbst ausenden. Das ist das *virtuelle Bild*.

Ein wirkliches Objekt besteht natürlich nicht nur aus einem Punkt. Man kann es sich aber aus mehreren Punkten zusammengesetzt denken. Jeder Punkt bildet auf der Fotoplatte sein eigenes Interferenzbild ab. Die Überlagerung der Interferenzbilder aller Punkte ergibt das Gesamthologramm. Bei der Rekonstruktion bildet die Gesamtzahl der rekonstruierten Punkte die Abbildung des Objekts. Das reelle Bild kann man auf einem Schirm oder auf einer Fotoplatte auffangen, und man erhält eine Abbildung wie bei der gewöhnlichen Fotografie. Dabei ist zu beachten, daß bei der Herstellung einer holografischen Aufnahme keine Linsen benötigt werden. Diese »linsenlose Fotografie« war eine der ersten Anwendungen der Holografie.

Das virtuelle Bild enthält alle optischen Informationen über das Objekt, denn es entsteht genauso, als würden die Strahlen vom Objekt selbst ausgesandt. Man sieht das aufgenommene Objekt so, als würde es tatsächlich noch an seinem Platz stehen. Es hat eine räumliche Ausdehnung, man sieht es stereoskopisch. Sind mehrere Gegenstände aufgenommen und steht ein Gegenstand hinter dem anderen, so genügt es, wie auch in der Wirklichkeit, den Kopf zu bewegen und hinter den vorderen Gegenstand zu sehen. Dabei wird der vorher verdeckte Gegenstand sichtbar. Man kann einen Gegenstand im Vordergrund betrachten, dabei ist der Hintergrund unscharf. Umgekehrt sieht man den Vordergrund unscharf, wenn

man einen Gegenstand im Hintergrund betrachtet. Das virtuelle Bild ist nicht vom wirklichen Gegenstand zu unterscheiden.

Das Aufnahmeverfahren kann man nur mit dem Laser durchführen, denn nur der Laser liefert kohärentes Licht mit ausreichender Intensität. Ist das Licht, wie bei allen anderen Lichtquellen, nicht kohärent (hat es nur eine geringe Kohärenzlänge), so existiert keine feste Beziehung zwischen den Lichtwellen. Es entsteht keine Interferenz bei der Aufnahme. Die Aufnahmetechnik des Hologramms sieht in der Praxis etwas anders aus, als im Bild 74 dargestellt ist. In dem angeführten Beispiel stören sich nämlich das

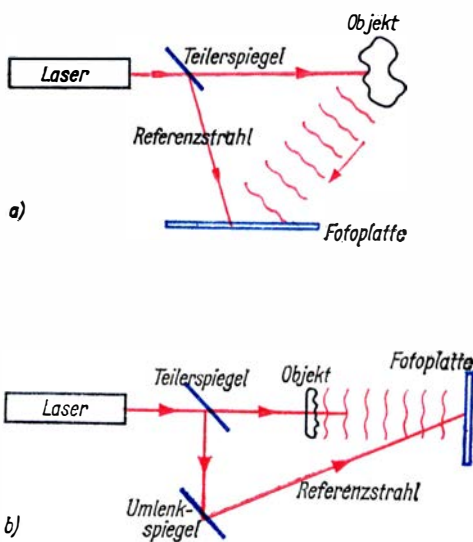


Bild 76. Aufnahme eines Hologramms
a) Streichtaufnahme
b) Durchlichtaufnahme

virtuelle und das reelle Bild bei der Betrachtung gegenseitig. Die Aufnahmetechnik zeigt Bild 76. Ein Teil des Laserstrahls wird als Referenzstrahl durch einen Teilerspiegel abgetrennt. Er wird direkt auf die Fotoplatte gelenkt. Der andere Teil trifft das Objekt. Von der Platte wird entweder das Durchlicht oder das Streulicht aufgefangen.

Es gibt beim Hologramm kein positives oder negatives Bild wie bei der Fotografie. Die Abbildung erscheint bei der Rekonstruktion immer »richtig«. Deshalb braucht auch kein Positiv hergestellt zu werden. Im Gegenteil, Kopien sind nie so gut wie die Originale. Andererseits braucht man zur Herstellung von Hologrammkopien nur einen Kontaktabzug. Dieser gibt dann sofort wieder das normale holografische Bild.

Bei der Rekonstruktion beleuchtet man das Hologramm nur mit einem Strahl. Im einfachsten Fall benutzt man die gleiche Anordnung wie bei der Aufnahme. Natürlich ist der Aufnahme-prozeß nicht allzu einfach. Das Fotomaterial muß hohes Auflösungsvermögen aufweisen. Die Anordnung der Aufnahme muß stabil sein. An den Laser selbst werden bestimmte Forderungen gestellt. Der Wiedergabeprozess ist nicht ganz so kritisch. Hier genügen sogar Lichtquellen mit kleinerer Kohärenzlänge, z. B. Quecksilberlampen. Die Wiedergabe hängt von der Strahldivergenz, von der Wellenlänge der benutzten Lichtquelle und von anderen Parametern ab.



Die Methode der Holografie schafft die Möglichkeit, die von einem Objekt ausgehende optische Information vollständig zu speichern. Daher ist beim »Abfragen« dieser Information der Betrachter nicht in der Lage, Bild und tatsächliches Objekt voneinander zu unterscheiden. Die Aufnahme des Hologramms geschieht so, daß man die vom Objekt ausgehende Welle mit einer (vom ungestörten Laserstrahl abgespaltenen) Referenzwelle interferieren läßt. Das Interferenzbild wird fotografisch festgehalten. Bei der Rekonstruktion des Hologramms wird eine auffallende Lichtwelle durch das Interferenzgitter gebeugt. Es entstehen das reelle und das virtuelle Bild. Das virtuelle Bild hat optisch alle Eigenschaften des tatsächlichen Objekts.

10.2. Anwendungen der Holografie

Die einfachste Anwendung der Holografie, ist, wie schon dargestellt, die linsenlose Fotografie. Das reelle Bild, das man mit einer Fotoplatte auffängt, stellt eine herkömmliche fotografische Auf-

nahme dar. Da weder bei der Aufnahme noch bei der Rekonstruktion Linsen verwendet werden, können auch keine Linsenfehler in das Bild eingehen. Es ist jedoch möglich, daß holografische Abbildungsfehler entstehen. Allerdings wirken sich Fehler auf dem Hologramm (in Form von Staub, Kratzern und anderen Unregelmäßigkeiten) nicht auf die Abbildung aus. Die verwendete Fotoplatte zur Herstellung des Hologramms muß ein ausreichend großes Auflösungsvermögen haben. Es entstehen auf diese Weise große Bildfelder von höchster Bildauflösung.

Das Verfahren ist besonders bei der Herstellung von integrierten Schaltkreisen einsetzbar. Fotomasken und gewöhnliches Licht erreichen schwer die erforderlichen Toleranzen, die in der Größenordnung von $0,1\text{ }\mu\text{m}$ liegen.

Man kann weiterhin Aufnahmen von schnell veränderlichen Prozessen herstellen, z. B. von Schwebeteilchen in Flüssigkeiten oder Gasen oder auch von kleinen Lebewesen. Bei der Rekonstruktion des Hologramms kann dann das Objekt in der Stellung, die es im Aufnahmement innehatte, dreidimensional beliebig lange untersucht werden.

Die Tiefenschärfe der Hologramme ist nahezu unbegrenzt. Man hat z. B. eine Aufnahme von einer 20 cm dicken Wasserschicht eines Teiches hergestellt. Bei der Rekonstruktion konnte man ein Mikroskop auf jeden beliebigen Punkt richten, scharf einstellen und somit kleinste Lebewesen in ihrem Lebenselement dreidimensional betrachten.

Eine andere Anwendung der Holografie ist die optische Kodierung. Der Referenzstrahl braucht nicht unbedingt eine ebene, ungestörte Welle zu sein. So kann auch ein zweites Objekt in den Referenzstrahl gestellt werden. Bei der Rekonstruktion muß dann dieses »Referenzstrahl-Objekt« wieder in der bei der Aufnahme benutzten Stellung stehen. Nur in diesem Falle erscheint das Bild. Diesen Effekt kann man zur Verschlüsselung von Dokumenten, Bildern u. a. ausnutzen. Eine originelle Anwendung dieses Effekts in der Kriminalistik sähe folgendermaßen aus: Man könnte als Objekt ein Bild verwenden und als »Referenzstrahl-Objekt« den dazugehörigen Fingerabdruck. Auf einem Hologramm kann eine Vielzahl solcher Interferenzfiguren gespeichert werden. Soll nun ein unbekannter Fingerabdruck identifiziert werden, so stellt man sein Abbild zwischen Laser und Hologramm, und es erscheint das dazugehörige

Bild, vorausgesetzt, es wurde gespeichert. Anstelle eines Bildes kann man natürlich auch Kenndaten eingeben.

Eine der wichtigsten Anwendungen ist die Methode der Interferenzholografie.

Dabei wird ein Hologramm von einem Objekt, z. B. einem Zahnrad, aufgenommen und rekonstruiert. Das Objekt läßt man an seinem Platz. Dann betrachtet man die Überlagerung des Objektes selbst mit seinem Abbild (dem virtuellen Bild). Hat sich dabei etwas geändert, sind z. B. Spannungen im Zahnrad entstanden, so treten diese Veränderungen als Interferenzstreifen sehr deutlich hervor. Das ist ein ausgezeichnetes Mittel, um Werkstoffprüfungen durchzuführen, Wachstumsprozesse zu untersuchen u. a. m. Eine Anwendung dieser Methode ist die Prüfung von Autoreifen. Man fertigt zunächst ein Hologramm des luftgefüllten Reifens an. Danach wird der Luftdruck im Reifen geringfügig erhöht, sonst aber werden alle anderen Versuchsbedingungen unverändert gelassen. Eine Erhöhung des Luftdrucks bedingt eine Ausdehnung des elastischen Materials. Sind Fehler im Material vorhanden, so findet eine ungleichmäßige Ausdehnung statt. Durch Überlagerung der holografischen Abbildung (geringer Luftdruck im Reifen) mit dem Objekt selbst entsteht ein Interferenzmuster. Dabei werden Materialfehler durch das Muster eingekreist, es entstehen um den Fehlerort herum Interferenzringe. Durch diese Methode kann man kleinste Fehler sichtbar machen, auch dann, wenn sie unter der Oberfläche des Autoreifens liegen. Werden zwei Hologramme von verschiedenen Schwingungszuständen eines Systems (z. B. eines Lautsprechers) hergestellt und zur Deckung gebracht, so kann man durch die auftretenden Interferenzfiguren die Schwingungen im System untersuchen. Auch die bei der Schlierenfotografie auftretenden Interferenzen kann man holografisch sichtbar machen. In den Strahl wird ein dünner Glaskeil gestellt, der zu Interferenzstreifen führt. Jede Änderung der Brechzahl stört das Bild und kann somit untersucht werden. Bewährt hat sich diese Methode bei der Plasmadiagnostik und auch bei der Untersuchung von Stoßwellen von Geschossen.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Hologramme von Gegenständen anzufertigen, die in Wirklichkeit gar nicht zu existieren brauchen. Der gewünschte Gegenstand (im einfachsten Fall eine geometrische Figur) wird mathematisch beschrieben. Dann berech-

net man das dazugehörige Hologramm. Mit Hilfe eines gesteuerten Systems wird eine Fotoplatte belichtet, so daß auf ihr das gewünschte Interferenzbild erscheint. Man bezeichnet den Vorgang als »Herstellung von synthetischen Hologrammen«. Bei der Rekonstruktion erscheint eine optische Abbildung des mathematisch berechneten Gegenstandes. Synthetische Hologramme können bei der räumlichen Projektierung, bei der Darstellung von räumlichen geometrischen Formen und in vielen anderen Gebieten Anwendung finden.

1891 wurde durch *Lippmann* ein Verfahren entwickelt, bei dem man mit einer sehr feinkörnigen Emulsion ohne Farbstoff Farbbilder herstellen kann. Man hinterlegt die Emulsion mit einem Quecksilberspiegel, und durch die Reflexion des Lichtes werden stehende Wellen erzeugt, in deren Maxima (im Abstand der halben Wellenlängen) Schwärzungen erscheinen (Bild 77). Es entsteht ein Gitter aus geschwärzten Teilchen. Bei der Betrachtung im weißen Licht werden nur die Lichtanteile von derjenigen Wellenlänge reflektiert, durch die auch das Gitter entstanden ist. Alle anderen Wellenlängen werden absorbiert. Man sieht ein farbiges Bild. Die Lippmann-Fotografie spielt heute nur für wissenschaftliche Untersuchungen eine Rolle.

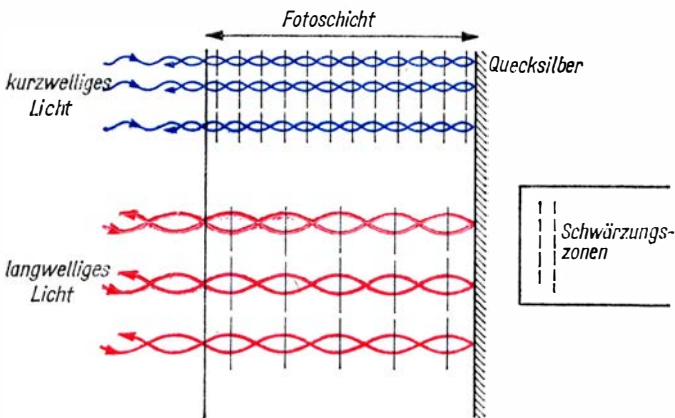


Bild 77. Aufnahme einer Farbfotografie nach Lippmann

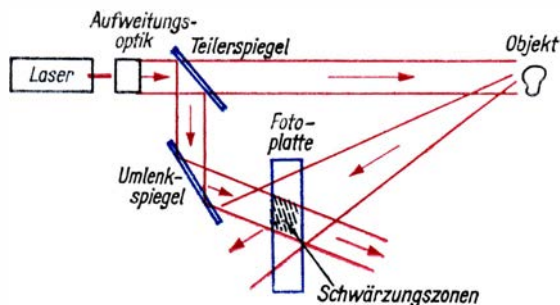


Bild 78. Prinzip der Lippmann-Denisjuk-Holografie (Tiefenhologramm)

Im Jahre 1962 wurde durch den sowjetischen Physiker *Denisjuk* die Kombination von Lippmann-Fotografie und Holografie für dicke Fotoschichten vorgeschlagen. Er zeigte, daß man die Objektwelle und die Referenzwelle von entgegengesetzten Seiten auf die Foto-platte fallen lassen kann (Bild 78). Durch die Überlagerung der Wellen entstehen wiederum Schwärzungszonen. Bei der Rekonstruktion erscheint das Bild dreidimensional und in den natürlichen Farben. Zur Wiederherstellung kann sogar natürliches Weißlicht verwendet werden.

Ausgehend von dieser Methode hat man Mikroskopie-Hologramme angefertigt, die unter weißem Licht Rekonstruktionen des Objektes in den natürlichen Farben ergeben. Auf der Grundlage der Lippmann-Denisjuk-Holografie ist es auch möglich, optische Speicher herzustellen. Dabei macht man sich die Tatsache zunutze, daß bei diesem sogenannten »Tiefenhologramm« nicht nur eine Farbselektivität, sondern auch eine Richtungsselektivität erfolgt. Im Gegensatz zur »gewöhnlichen« Holografie, bei der die Platte praktisch aus jeder beliebigen Richtung beleuchtet werden kann, muß die Beleuchtungsrichtung des Tiefenhologramms in einem kleinen Winkel liegen. Sie muß bei der Rekonstruktion mit der Beleuchtungsrichtung bei der Aufnahme übereinstimmen, sonst verschwindet das Bild. So kann man in eine Fotoplatte oder in einen Kristall Laserlicht mit Hilfe eines Ablensystems eingeben und dann die Platten bei der Rekonstruktion »abfragen« (s. 11.3.).

Mit der Holografie ist es auch möglich geworden, unscharfe fotografische Aufnahmen zu korrigieren. Mit Hilfe eines Impulslasers

wurden holografische Porträts hergestellt. Die Methode der Holografie wird nicht durch die Wellenlängen des Lichtes begrenzt. Wenn man in der Lage sein wird, kohärente Lichtquellen im Röntgengebiet herzustellen, so können Möglichkeiten eröffnet werden, die heute nur schwer vorstellbar sind. Man könnte Hologramme des menschlichen Körpers anfertigen. Durch die Betrachtung eines Röntgenhologrammes im sichtbaren Licht könnte man ohne weitere Vorkehrungen sofort Vergrößerungen erzielen.

Es ist weiterhin möglich, Mikrowellen-Hologramme in sichtbarem Licht zu betrachten. Das ist für die Untersuchung der Ausbreitung der Mikrowellen und auch ihrer Feldverteilung in Resonatoren von Interesse. Es gibt Anwendungen in der Infrarottechnik. Andererseits sind es nicht nur elektromagnetische Wellen, die als Träger der holografischen Information dienen können. Man hat auch Schallwellen (vornehmlich Ultraschall) zur holografischen Untersuchung von Unterwasserobjekten angewandt. Reproduziert wurde das Bild mit Hilfe eines Lasers und somit optisch sichtbar gemacht. Die große Wellenlänge des Schalls begrenzt allerdings stark das Auflösungsvermögen.

Auch die Möglichkeit der Darstellung bewegter holografischer Bilder bzw. des holografischen dreidimensionalen Fernsehens wird untersucht. Allerdings ist das Verfahren zur Zeit noch unwirtschaftlich. So wird von der Firma RCA ein System konzipiert, das Hologramme auf einem Filmband als Speicher von Fernsehbildern benutzt.



Die Holografie hat seit der Entwicklung des Lasers eine breite Anwendung gefunden. Besonders die Interferometrie hat durch die neuen Verfahren eine wesentliche Bereicherung erfahren. Die Methode der Lippmann-Denisjuk-Holografie eröffnet neue Möglichkeiten, beispielsweise für die Speicherung in Computern. Weitere Anwendungen sind Schlierenfotografie, Unterwasser-Holografie und Mikroskopie.

11. Verarbeitung von Informationen

11.1. Informationsübertragung

Es ist heute zur Selbstverständlichkeit geworden, daß mit Hilfe elektromagnetischer Wellen im Radiobereich Informationen übertragen werden können. Dabei ist noch nicht einmal ein Jahrhundert seit dem experimentellen Nachweis dieser Wellen durch *Heinrich Hertz* vergangen. Daß Licht jedoch ist eines der ältesten Mittel der Menschheit, das für die Übertragung von Informationen verwendet wurde. Ob Signalfener oder Leuchttürme, sie dienten dazu, um auf Sichtweite bestimmte Nachrichten von einem Ort zum anderen gelangen zu lassen. Die Möglichkeiten des Einsatzes solcher Mittel waren aber begrenzt. Eine Modulation des Lichts mit Tonnfrequenzen wurde erst dann möglich, als elektrische Lichtquellen entwickelt wurden. So verwendete man im zweiten Weltkrieg Lichtsprechgeräte. Mit ihnen konnte man auf kurze Entfernungen gesprochene Nachrichten übermitteln. Die Lichtsprechgeräte beruhten auf der Modulation einer elektrischen Lichtquelle (z. B. einer Glühlampe) unter Einsatz eines elektrischen Systems, das an einem Mikrofon angeschlossen war. Vorteilhaft war dabei, daß die Gespräche nicht abgehört werden konnten. Ein entscheidender Nachteil dieser Methode besteht darin, daß infolge der Wärmeträgheit der Lichtquelle nur geringe Modulationsfrequenzen erreicht werden können.

Mit der Entwicklung des Lasers wurden die Untersuchungen zur Informationsübertragung mit Hilfe von Licht intensiv weitergeführt.

Zu einem Übertragungssystem für Informationen gehören fünf Hauptelemente:

1. Oszillator für die Trägerwelle
2. Modulator zum Aufbringen der Information auf die Trägerwelle
3. Übertragungsmedium

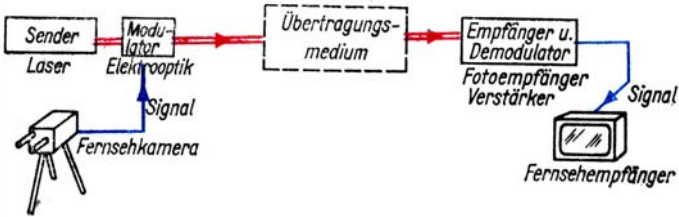
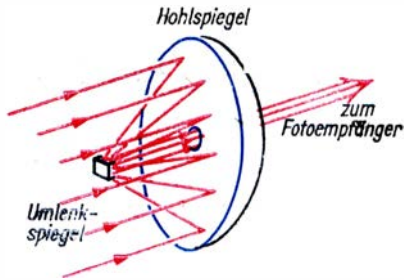


Bild 79. Schema eines Lasersystems für Informationsübertragung

Bild 80. Bündelungseinrichtung für Informationsempfang auf Lichtfrequenzen (Lichtantenne)
(Umlenkspiegel steht im Brennpunkt des Hohlspiegels)



4. Empfänger für die modulierte Trägerwelle

5. Demodulator zum Aussondern der Information von der Trägerwelle.

Im Bild 79 ist für den optischen Bereich ein derartiges Übertragungssystem dargestellt, in Bild 80 eine mögliche »Antennen«-Form für optische Frequenzen.

Bei der Informationsübertragung unterscheidet man zwischen Amplituden- und Frequenzmodulation, abgekürzt AM bzw. FM (Bilder 81 und 82). Die Amplitudenmodulation wird in zwei Spezialfälle unterteilt:

analoge Modulation

(Die Amplitude der Trägerwelle ist proportional der Amplitude des Modulationssignals.)

Pulse-Code-Modulation (PCM).

(So wird das Ein- und Ausschalten des Trägersignals in definierter Folge bezeichnet; es entsteht ein digitales Signal.)

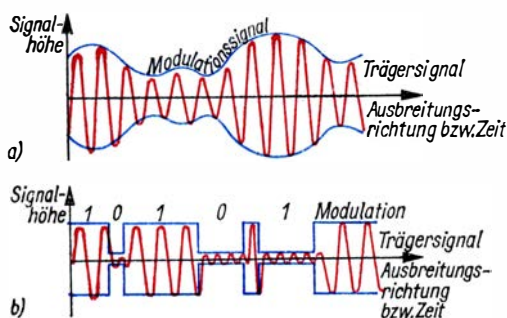


Bild 81. Amplitudenmodulation

a) analoge Modulation

b) digitale Modulation (Puls-Code-Modulation, PCM)

Die analoge Modulation kann in Sonderfällen angewandt werden, um Sprache und Musik zu übertragen.

Die PCM hat gegenüber der analogen Modulation in einem Übertragungssystem entscheidende Vorteile. Auf die Übertragungsgüte haben Schwunderscheinungen (innerhalb gewisser Grenzen) keinen Einfluß. So würden atmosphärisch bedingte Störungen der Laserintensität weniger Fehlerscheinungen im Übertragungssystem hervorrufen als bei der Anwendung analoger Modulation. Im Empfangssystem ist es leichter, eine digitale Modulation vom Empfängerrauschen zu trennen als eine analoge Modulation. Die Technik der Impulsmodulation gestattet außerdem besondere Kombinationsverfahren (Multiplexverfahren), mit denen man sehr große Übertragungsraten der eingegebenen Daten garantieren kann (etwa 10^{14} bit/s). Damit kann die vorhandene Modulationsbandbreite des Lasers optimal ausgenutzt werden.

Die Informationsübertragung mit Hilfe des Lasers hat einige potentielle Vorteile gegenüber den bisherigen Übertragungssystemen. Sie beruhen vor allem auf der erzielbaren geringen Divergenz der Laserstrahlung sowie auf der großen möglichen Modulationsbandbreite. Die mögliche Modulationsbandbreite liegt z. B. bei Gaslasern in der Größenordnung von einem Gigahertz. Aus der kleinen Divergenz ergibt sich beispielsweise eine große Abhörsicherheit, die bei Anwendungen im militärischen Bereich eine bedeutende Rolle spielt. Unter Umständen kann man bei der Anwendung von Laser-

geräten zur militärischen Nachrichtenübertragung auf eine Chiffrierung verzichten. Gegenüber den erwähnten Lichtsprechgeräten (mit Glühlampe) werden wesentlich größere Reichweiten erzielt.

Aus der großen Übertragungsbandbreite ergibt sich vor allem die Möglichkeit, beträchtliche Datenmengen für Informationsspeicherung bzw. Computerverarbeitung in kurzer Zeit zu übertragen. Die Technik der Impulsmodulation gestattet es, diesen Vorteil optimal auszunutzen.

Wie werden die erwähnten fünf Hauptelemente eines Informations-Übertragungssystems beim Einsatz von Lasern realisiert? Als wichtigste Lasertypen (d. h. als Oszillator für die Trägerwelle) kommen in Betracht

Gaslaser (He-Ne, Ar, CO₂)

Halbleiterlaser (GaAs, Ga_xAl_{1-x}As)

Festkörperlaser (YAG).

Wird die Methode der Frequenzmodulation angewandt, so muß der Laser eine ausreichende Frequenzstabilität aufweisen. Zur Amplitudenmodulation muß die Amplitude der Laserintensität stabil gehalten werden. Dabei wären die Anforderungen bei der analogen Modulation höher als bei der digitalen. Eine Steuerung der Strahlintensität wird man vor allem mit Bauelementen der Elektrooptik vornehmen. Mit Hilfe eines elektrooptischen Modulators, der in den Laserstrahl gestellt wird, kann man die durchgelassene Intensität modulieren.

Es ist auch möglich, die Intensität des Strahls durch Modulation mit Hilfe der Elektrooptik innerhalb des Laserresonators zu beeinflussen. Bei Hochleistungslasern müssen dabei allerdings Effekte berücksichtigt werden, die mit dem Aufheizen des Modulators durch die hohe Lichtintensität zusammenhängen. Sind diese Probleme überwunden, so stellt die Modulation innerhalb des Resonators die effektivere Methode dar. Die an den Modulator angelegte Spannung braucht hierbei nicht so hoch zu sein wie bei der äußeren Modulation. Verluste von einigen Prozent führen im Resonator meist schon zum Auslöschen des Strahls. Bei der äußeren Modulation ist aber zum Auslöschen des Laserstrahls ein Modulationsgrad in bezug auf die Absorption des Lichts von 100% erforderlich.

Wird ein Halbleiterlaser als Lichtquelle für Informationsübertragung verwendet, so kann seine Ausgangsintensität direkt durch

Änderung des Anregungsstroms gesteuert werden. Die meisten Halbleiterlaser, die heute hergestellt werden, können bei Zimmertemperatur nur im Impulsbetrieb arbeiten. Die Impulsfolge könnte in bestimmter Weise codiert und damit eine Impulsmodulation erreicht werden.

Ein Übertragungsmedium ist für die elektromagnetischen Wellen, d. h. auch für das Licht, nicht erforderlich. Sie breiten sich auch im Vakuum aus. Ein fast ideales Vakuum ist im Weltraum gegeben.. Unter diesen Bedingungen gelangen die Lichtstrahlen vom Sender zum Empfänger des Übertragungssystems ohne wesentliche Absorption bzw. Streuung. Im erdgebundenen Raum ist eine andere Situation gegeben. Die Ausbreitungsbedingungen sind erstens wellenlängenabhängig. Weiterhin wirken auch bei klarem Wetter die Einflüsse der Turbulenz der Luft und der molekularen Absorption störend auf die Übertragungsstrecke. Die Dämpfung beträgt etwa 1 bis 5 db/km. Nebel, Regen oder Schneefall haben erheblichen Einfluß auf die Lichtübertragungsstrecke. In diesem Fall sind Dämpfungen zwischen 10 und 40 db/km typisch. Auch Totalausfälle sind durchaus möglich. Unter diesen Voraussetzungen sind für die infrarote Strahlung des CO₂-Lasers ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) bessere Ausbreitungsbedingungen gegeben als für sichtbares Licht.

Für die meisten Anwendungen einer Informations-Übertragungsstrecke, sei es Telefonverkehr, Übertragung von Fernsehprogrammen oder Datenübermittlung, wird jedoch eine hohe Streckensicherheit gefordert. Ausfälle oder Störungen müssen auf ein Mindestmaß beschränkt werden. Aus diesem Grund wird ein Laser-Informations-Übertragungssystem auf der Basis der Ausbreitung

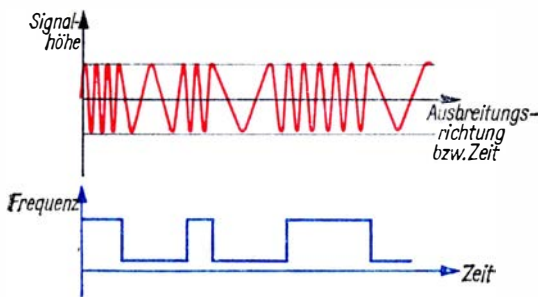
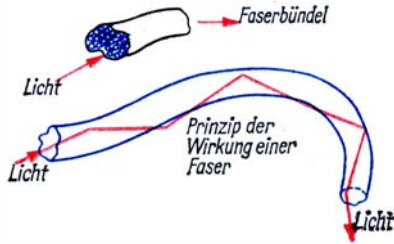


Bild 83. Lichtleitkabel unter Ausnutzung der Totalreflexion an der Grenzfläche der Glasfaser



des Lichts in der Atmosphäre nur für Spezialzwecke in Frage kommen. Um eine nahezu hundertprozentige Streckensicherheit im erdgebundenen Raum zu garantieren, muß man Lichtleiter verwenden. Eine einfache Abschirmung der Strahlung mit Hilfe von Röhren läßt keine großen Entfernungen vom Sender zum Empfänger zu. Durch Reflexionserscheinungen wird das zu übermittelnde Signal verzerrt. Eine aussichtsreiche Möglichkeit, Licht über eine Leitung zu übermitteln, ergibt sich im Einsatz von Fiberleitungen. Sie bestehen aus einzelnen Glasfasern, in denen das Licht durch Totalreflexion an der Begrenzungsfläche übertragen wird (Bild 83). Fiberleitungen erlauben eine beliebige Streckenführung, d. h., das Licht wird nicht nur geradlinig übertragen. Die Wirtschaftlichkeit ihres Einsatzes ist abhängig von den Herstellungskosten sowie von der durch Absorption und Streuung bedingten erreichbaren minimalen Dämpfung im Kabel.

Unter der Bezeichnung *Selfoc* wurde ein in Japan entwickeltes Glasmaterial patentiert, das sowohl in Faser- als auch in Stabform herstellbar ist. Die Besonderheit einer Selfoc-Faser besteht darin, daß der Brechungsindex des Glases parabolisch über den Radius der Faser variiert. Ein schräg in die Faser einfallender Lichtstrahl wird in der Substanz so abgelenkt, daß er einen sinusförmigen Weg durchläuft (Bild 84). Dieses Verfahren bringt eine Reihe entscheidender Vorteile gegenüber Lichtleitfasern mit sich, die auf der Basis der Totalreflexion an der Glasoberfläche arbeiten. So kann der Strahl einen Weg durch die Faser durchlaufen, ohne mit der Glasoberfläche in Berührung zu kommen. Oberflächenbeschädigungen oder Unebenheiten in der Glasoberfläche haben dann keinen Einfluß auf die Übertragungsgüte. Man hofft, bei der Wellenlänge $0,6328 \mu\text{m}$ (die rote Linie des He-Ne-Lasers) die Dämpfung im

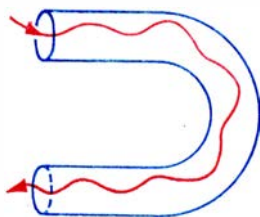


Bild 84. Weg eines Lichtstrahls in eine Selfoc-Faser

Glasmaterial bis auf 40 bis 60 db/km beschränken zu können. Solche Glasfasern lassen nicht nur eine Anwendung in der optischen Informationsübertragung zu. Beispielsweise wurden Endoskope mit diesen Lichtleitfasern gebaut, die bei medizinischen Untersuchungen von Gehirn, Augen und Gelenken eingesetzt werden. Bildet man eine Lichtleitfaser als Kegel aus, so erfolgt eine Lichtfokussierung. So wurde auf eine Avalanche-Fotodiode (mit innerer elektronischer Signalverstärkung) ein Stück Selfocmaterial in Kegelform aufgesetzt. Der Durchmesser der lichtempfindlichen Fläche konnte auf diese Weise von 0,2 auf 1 mm vergrößert werden, wobei verzerrungsfreie Übertragung gewährleistet ist.

Als Empfänger für die modulierte Trägerwelle kommen fotoelektrische Bauelemente in Betracht. Das sind beispielsweise Sekundärelektronen-Vervielfacher (SEV), Fotodioden, Fotowiderstände oder Fotoelemente. Als Empfänger für infrarote Strahlung müssen spezielle Bauelemente benutzt werden, da die meisten der fotoelektrischen Bauelemente in diesem Bereich zu unempfindlich sind. Eine wesentliche Anforderung an die Empfänger besteht darin, daß die dem Strahl aufgeprägte Modulation nicht verzerrt wird. Die Bauelemente müssen demnach noch bei Modulationsfrequenzen von einigen hundert Megahertz bis zu einigen Gigahertz einwandfrei arbeiten.

Das als Empfänger benutzte fotoelektrische Bauelement dient gleichzeitig als Demodulator einer Amplitudenmodulation. An seinem Ausgang kann das Modulationssignal direkt als elektrisches Signal abgenommen und weiterverarbeitet werden. Schwieriger ist die Demodulation, wenn der zu empfangende Laserstrahl frequenzmoduliert ist. Zur Demodulation muß die Methode des

optischen Überlagerungsempfangs angewendet werden. Man benötigt einen Hilfsoszillator, d. h. einen weiteren Laser. Der fotoelektrische Empfänger wirkt als Mischglied. An seinem Ausgang kann das Modulationssignal in Form von elektrischen Frequenzschwankungen abgenommen werden.

Möglichkeiten der Anwendung von Laser-Informations-Übertragungssystemen ergeben sich in vielen Bereichen. Ob im Welt-raum, in der Industrie, in der Datenübermittlung oder im Militärwesen, überall sind derartige Lasersysteme einsetzbar. Obwohl die Technik der Informationsübertragung mit Laser noch in den Kinderschuhen steckt, gibt es doch schon Beispiele der Anwendung. So wurden in der Sowjetunion (in Moskau) versuchsweise Telefongespräche über Laserstrahl übertragen. In den USA wurde ein Gerät für Sprechfunk auf der Basis der Ausstrahlung einer Halbleiterdiode entwickelt. Es dient für militärische Nachrichtenübertragung und ist direkt in einen Stahlhelm eingebaut. Es gibt aber auch schon Sprechfunkgeräte für den zivilen Sektor, die in ein Fernglas eingebaut sind, denn der Sender muß sehr genau auf den Empfänger eingerichtet werden. Während eines Gemini-Raumflugs wollte man eine Verbindung zwischen dem Raumschiff und einer Erdstation auf der Basis der Strahlung eines Halbleiterlasers zustande bringen. Es gelang aber nicht, mit dem Strahl die Bodenstation zu treffen.

Die Informationsübertragung durch Laser ist besonders wegen der großen erreichbaren Bandbreite interessant. Eine besonders erfolgversprechende Möglichkeit stellt die Weiterleitung über Lichtleitkabel dar. Die Probleme der Informationsübertragung sind noch nicht zufriedenstellend gelöst.

11.2. Informationsübertragung im Sonnensystem

Für die Übertragung von Informationen im Sonnensystem, um eine Verbindung zu bemannten bzw. unbemannten Raumsonden herzustellen, werden Systeme auf der Basis elektromagnetischer Wellen eingesetzt. Zur Zeit kommt besonders der Bereich der Mikrowellen zur Anwendung. Seit der Erfindung des Lasers werden jedoch immer mehr Systeme auf der Basis von Lichtwellen in Betracht gezogen. Dabei ist vor allem die größere Bündlungsfähigkeit der

Lichtwellen gegenüber den Mikrowellen interessant. Besonders für die Verbindung mit Raumsonden, deren Flug über die unmittelbare Erdnähe, einschließlich des Mondes, bzw. über die erdnächsten Planeten hinausgeht, kommen Lasersysteme in die nähere Wahl. Dabei ist noch nicht geklärt, ob nicht doch Mikrowellensysteme (im Bereich von 1 bis 5 GHz) eingesetzt werden.

Eine direkte optische Verbindung zwischen einer Raumsonde und einer Erdstation ist dadurch behindert, daß die Lichtwellen die Atmosphäre durchdringen müssen. Dabei kann es nicht nur zu Störungen auf Grund der Luftturbulenz und anderer Erscheinungen kommen, sondern sogar zu Totalausfällen der Verbindung. Die besten Voraussetzungen für dieses System sind für Wellenlängen um $10\text{ }\mu\text{m}$, d. h. im Infrarotgebiet, gegeben. Bei diesen Wellenlängen ist der Einfluß der Atmosphäre relativ gering. Die vom CO_2 -Laser ausgesandte Strahlung von $10,6\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge ist demnach gut geeignet. Allerdings müßten mehrere Empfangs- und Sendestationen auf der Erde aufgebaut werden, um eine hohe Streckensicherheit zu gewährleisten. Um den Einfluß der Atmosphäre so stark wie möglich zu beseitigen, kann man sich auch eine Verbindung über einen Zwischen-satelliten vorstellen. Die Übertragung der Information vom Satelliten zur Raumsonde könnte dann durch Laser geschehen. Im Satelliten als Zwischenstation würden die optischen Signale in den Bereich der Mikrowellen transformiert und umgekehrt. Die Verbindung von der Erd- zur Zwischenstation würde dann im Mikrowellenbereich aufrechterhalten.

11.3. Datenspeicherung

Auf einer Kombination von Laserstrahl-Ablenkssystem und Holografie beruht eine Methode der optischen Datenspeicherung. Wie in 10.2. dargestellt wurde, ist es möglich, Tiefenhologramme nach der Methode von *Lippmann* und *Denisjuk* herzustellen. Sie gestatten eine Rekonstruktion des Bildes nur dann, wenn die Richtung des rekonstruierten Strahles mit der Richtung des Referenzstrahles übereinstimmt. Von *van Heerden* wurde deshalb vorgeschlagen, diesen Effekt zur Datenspeicherung zu nutzen. Als einfachste Möglichkeit der Realisierung dieses Vorschlags kann man sich folgende Apparatur vorstellen (Bild 85): Man läßt den Referenz-

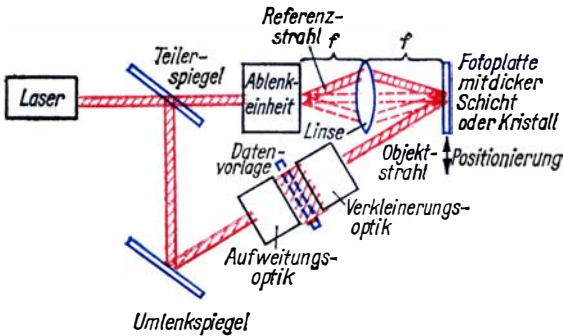


Bild 85. Schema einer möglichen Datenspeicherung durch Laserlicht

strahl unter verschiedenen Winkeln auf einen kleinen Teil der Fotoplatte (mit dicker Schicht) auftreffen. Das geschieht mit Hilfe der Kombination von Ablenkeinheit und Linse. Damit große Datenmengen auf dem kleinen Teil der Fotoplatte gespeichert werden können, wird z. B. die Datenvorlage in einen zunächst aufgeweiteten und danach wieder verengten Laserstrahl (Objektstrahl) gebracht. Das Hologramm (sogenanntes Unterhologramm) entsteht in dem kleinen beleuchteten Teil der Fotoplatte oder des lichtempfindlichen Kristalls. Auf der Fotoplatte können viele Unterhologramme nebeneinander gespeichert werden, wobei man z. B. durch mechanische Verschiebung der Platte eine Positionierung vornimmt. Das Auslesen geschieht durch Beleuchtung mit einem Referenzstrahl. Es stehen einmal die verschiedenen Winkelstellungen und zum anderen die verschiedenen Positionen auf der Speicherplatte für Teilhologramme zur Verfügung. Jedes Ansteuern eines Teilhologramms beim Auslesen ergibt auf einer Matrix von Fotoelementen ein elektrisch definiertes Signal, das weiter genutzt werden kann. Das Positionieren kann auch durch Ablenkung von Referenz- und Objektstrahl gleichzeitig durch mechanische oder nichtmechanische Ablenkeinheiten erfolgen.

Eine weitere Möglichkeit der Datenspeicherung ist der Speicher auf magneto-optischer Grundlage. Dabei wird anstelle eines lichtempfindlichen Kristalls oder einer dicken Fotoplatte eine magneto-optische Speicherschicht eingesetzt. Der Laserstrahl trifft auf die Schicht und erwärmt sie an einer lokalen Stelle. Durch Erwärmen

erzielt man eine Änderung der Richtung der Magnetisierung an dieser Stelle. Theoretisch besteht die Möglichkeit, auf 1 cm^2 etwa 100 Millionen derartiger Speicherpunkte aufzubringen, jedoch erreicht man z. Z. eine Dichte von rd. 10 Millionen Punkten je Quadratzentimeter. Da es mit dieser Methode nur möglich ist, »ja-nein«-Informationen auf den einzelnen Punkt aufzubringen, entspricht die Zahl der aufbringbaren Punkte auch dem Informationsvolumen. Das Informationsvolumen dieser Methode beträgt demnach theoretisch 10^8 bit (Informationseinheiten) je Quadratzentimeter. Bei der magneto-optischen Methode ändert sich beim Abfragen mit der geeigneten Ablenkeinrichtung nicht die Intensität, sondern die Polarisationsrichtung des Lichtes. Ein Polarisations-Analysator verwandelt diese Information in eine Intensitätsinformation. Damit kann man zur Umwandlung in elektrische Signale wiederum einen fotoelektrischen Empfänger einsetzen.

Ein Problem besteht in der Methode, den Laserstrahl um den gewünschten Winkel abzulenken. Vielfach werden in den Laboratorien noch mechanische Methoden angewandt. Es existieren jedoch auch schon Ablenkeinheiten, die auf elektro-optisch oder akustisch hervorgerufenen Brechzahländerungen beruhen. Man erhofft sich von Laserspeichern vor allem kurze Zugriffszeiten ohne mechanische Elemente. Für Spezialgebiete wird dieser Speicher sicherlich Anwendung finden.



Eine der möglichen Methoden des Einsatzes von Lasern bei der Datenspeicherung beruht auf der Grundlage der Lippmann-Denisjuk-Holografie. Eine weitere Methode benutzt magneto-optische Effekte. Kurze Zugriffszeiten werden erwartet.

11.4. Laser-Fernsehprojektor

Hitachi entwickelte einen Laser-Fernsehprojektor, der vor allem zu Reklamezwecken vorgeführt wird. Er zeigt aber, wie vielseitig man Laser einsetzen kann. Auf Bild 86 ist das Schema eines derartigen Projektors dargestellt.

202 Bekanntlich kann man durch eine Mischung der Primärfarben Blau, Gelb und Rot jede beliebige Farbe erzeugen. Man läßt bei-

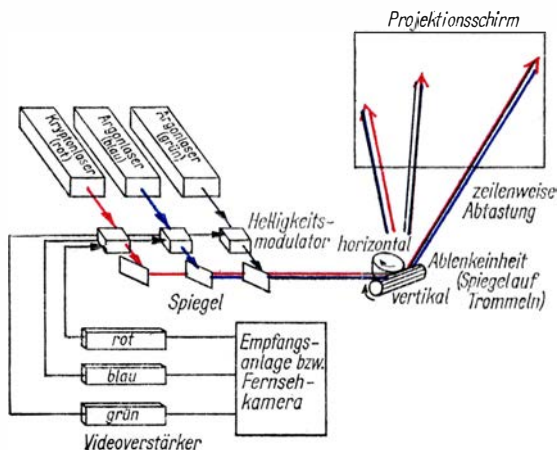


Bild 86. Laser-Fernsehprojektor

spielsweise drei Lichtstrahlen mit den entsprechenden Wellenlängen auf einen gemeinsamen Projektionsschirm fallen. Sind ihre Intensitäten gleich, so entsteht beim Betrachter der Farbeindruck Weiß. Wird die Intensität von einem der drei Strahlen vermindert, so sieht man eine bestimmte Farbe. Wird beispielsweise der blaue Strahl völlig abgeblendet, so erscheint auf dem Projektionsschirm die Komplementärfarbe zu Blau – Orange. Beim Farbfernsehen wird zur Farbmischung die Primärfarbe Gelb nicht verwendet, sondern die Sekundärfarbe Grün.

Beim Hitachi-System des Laser-Fernsehprojektors werden die drei Strahlen durch folgende drei Laser erzeugt:

Krypton	0,6471 μm	(rot)
Argon	0,4880 μm	(blau)
Argon	0,5145 μm	(grün)

Alle drei Laser strahlen mit einer Leistung von 5 W. Diese Strahlen werden über Spiegel gemischt. Indem man die Intensität der einzelnen Strahlen durch Modulatoren steuert, kann im gemischten Strahl jede beliebige Farbe hergestellt werden. Um die hohe Intensität der Laserstrahlen voll auszunutzen, projiziert man den Strahl auf eine Bildwand von der Größe 3 m $\times$ 4 m.

Wie beim elektrischen Fernsehsystem mit Elektronenstrahl wird auch hier das Bild zeilenweise geschrieben. Jeder Bildpunkt wird dabei von den drei Modulatoren in Farbe und Helligkeit gesteuert. Dazu dient, wie auch beim Elektronenstrahl-Fernsehen, ein Videoverstärker. Die Strahlablenkung über die einzelne Zeile und auch die Zeilenablenkung geschieht mit Hilfe von Trommeln, die definiert angeordnete Spiegel tragen. Dabei rotiert die Trommel für die Horizontalablenkung (16 Spiegel) mit einer Geschwindigkeit von 60000 U/min. Die Zeilenablenktrommel (mit 24 Spiegeln bestückt) rotiert mit einer Geschwindigkeit von 150 U/min.

Die zur Mischung verwendeten Spektralfarben weisen infolge der Monochromasie des Laserlichts eine hohe spektrale Reinheit auf. Aus diesem Grund ist die Bildqualität des Lasersystems weitaus höher als die des Farbfernsehbildes beim Elektronenstrahlverfahren. Die Bildhelligkeit ist so groß, daß das projizierte Großbild auch bei Tageslicht betrachtet werden kann. Das Laserfernsehen wurde auf der Expo 70 in Osaka mit einem Bildschirm von $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ dargestellt, d. h., eine im Fernsehbild dargestellte Person kann in Überlebensgröße erscheinen.

Nicht nur für Fernsehanlagen oder für Freilichttheater wird das System einsatzfähig sein, Anwendungen können sich beispielsweise in der Flugüberwachung, in der Flugsimulation bzw. überall dort ergeben, wo Farbbilder hoher Qualität auf großflächigen Bildschirmen dargestellt werden sollen. Allerdings wird nach der Meinung der Ingenieure dieser Firma ein breiter Einsatz von Lasern in der Fernsehtechnik erst in 5 bis 10 Jahren zu erwarten sein. So müssen die Laser eine höhere Lebensdauer als jetzt (z. Z. etwa 1000 h) erreichen. Die Lichtmodulatoren sind noch nicht auf dem gewünschten technologischen Stand, und der gesamte Aufbau ist apparativ und ökonomisch noch zu aufwendig.



Der Laser-Fernsehprojektor stellt nur einen Anfang des Einsatzes von Lasern in der Fernseh- und Projektionstechnik dar. Allerdings übertreffen Bildqualität und Farbwiedergabe sowie Projektionsfähigkeit schon heute den von Farbfernsehgeräten mit Elektronenröhren erreichten Stand.

12. Materialbearbeitung

Die Materialbearbeitung mit Hilfe von Lasern steht erst am Anfang ihrer Entwicklung. Sie ist aber schon in solchen Gebieten verwendet worden, die früher nur der mechanischen Bearbeitung zugänglich waren.

Ein Beispiel der Materialbearbeitung mit einem Laser ist das Bohren von Löchern in Diamanten. In der Uhrenindustrie der UdSSR gehört dieses Verfahren schon zur Alltäglichkeit. Die Bearbeitung von Diamanten mit mechanischen Mitteln erfordert viel Zeit und Kostenaufwand. Es stehen Laser zur Verfügung, die Lichtimpulse mit einer Dauer von 10^{-3} bis 10^{-6} s und einer Leistung bis zu 10^8 W aussenden. Im Bruchteil einer Sekunde kann das Material der vor gesehenen Bohrung entfernt werden. Dabei lassen sich Bohrungen herstellen, die einen Durchmesser von weniger als $1/10$ mm und eine Bohrtiefe bis zu 1 mm aufweisen. Allerdings reicht die Glätte und Genauigkeit nicht aus, um die vorgegebenen Ansprüche zu erfüllen. Das kommt daher, daß es sich bei diesen »Bohrungen« um Verdampfung bzw. Herausschlagen von Material handelt. Jedoch steht die anschließend notwendige Nacharbeit in keinem Verhältnis zum Aufwand und zur Bearbeitungszeit mit herkömmlichen Methoden. Für die Herstellung der Lagersteine für Uhren benötigt man für den gesamten Prozeß einschließlich Bearbeitung mit Laser und Nacharbeit nur noch etwa 10% der bisher dazu notwendigen Arbeitszeit. Speziell zur Bearbeitung von Diamanten dient der sowjetische Laser Quant 9.

Mit Rubinlaser lassen sich nicht nur Diamanten, sondern auch Keramik, Glas, Sintermetall, Karbide, Wolfram, Asbest usw. bearbeiten, d. h. Werkstoffe, deren mechanische Bearbeitung technologisch schwierig ist.

Auch für das Mikroschweißen kann man Impulslaser einsetzen. Es können dünne Drähte mit Durchmessern bis zu $1/10$ mm stumpf oder kreuzweise geschweißt werden. Es ist verständlich, daß die

Laserleistung herabgesetzt oder die Impulsdauer vergrößert werden muß, um ein Verdampfen des Metalls zu verhindern. Der sowjetische Laser SLS-10 ist für das Schweißen dünner Drähte entwickelt worden. Molybdän, Tantal, Wolfram usw. von einer Dicke von 0,3 mm können bearbeitet werden. Die Schweißzone hat einen Durchmesser von 0,4...0,6 mm.

Die größte Entwicklung hat in der letzten Zeit in bezug auf die Materialbearbeitung der CO₂-Laser genommen. Leistungen von einigen 10 kW wurden zwar nur in Laboratorien erreicht. Ein Aufbau für einen CO₂-Laser mit rd. 200 W Leistung ist aber z. Z. nicht besonders aufwendig. Auch die YAG-Laser senden ausreichend intensitätsreiche Strahlung aus. Mit solchen Lasern können weite Gebiete der Materialbearbeitung erschlossen werden.

In der Textilindustrie müssen Stoffe kontinuierlich in einzelne Bahnen getrennt werden. Außerdem muß man in der Konfektionsindustrie Stoffe in verschiedenen Formen zuschneiden. Die dazu verwendeten Messer werden schnell stumpf. Mit dem CO₂-Laser hat man ein »Messer« zur Verfügung, das nie stumpf werden kann. Der Strahl trennt den Stoff durch die auftretende lokale Hitze. Gesundheitsschädigende Staubteilchen treten nicht auf, entstehende Abgase können schnell abgesaugt werden.

Genesco führte dieses Verfahren in der Produktion von Herrenbekleidung ein, und zwar für das Zuschneiden von Konfektionsanzügen. Eine Stoffbahn durchläuft ein Schneidesystem. Ein intensitätsreicher Laserstrahl wird über ein Glasfaserkabel an die gewünschten Stoffstellen gelenkt, auf den Stoff fokussiert und trennt den Stoff durch Verbrennung. Die entstehenden Dämpfe werden abgesaugt. Die Steuerung des Bearbeitungskopfes geschieht durch einen Computer, in den die gewünschten Daten eingegeben werden, dabei können natürlich modische Änderungen an den Kleidungsstücken sofort Berücksichtigung finden.

Es ergeben sich mit diesem System geringere Herstellungskosten als bei herkömmlichen Zuschneideverfahren. Besonders beachtenswert ist, daß der Schnitt äußerst scharf ist. Es entsteht an der Schnittstelle keine Faserung. In bestimmten Fällen kann auf ein Säumen verzichtet werden. Das Zuschneiden erfolgt exakt, Irrtümer kommen nicht vor, die Kleidung entspricht den vorgeschriebenen Normen in einer engen Toleranz. Man rechnet beim Einsatz einer derartigen Maschine mit einem Stoffabfall von nur 5 bis 6 %.

Natürlich lohnt sich der Einsatz einer derartigen Zuschneidemaschine nur dort, wo Massenfertigung notwendig ist. Für Uniformherstellung ist eine Laser-Schneideanlage ideal. Andererseits können, wenn für den Computer ausreichend Programme vorliegen, auch kleinere Serien in großer Schnelligkeit gefertigt werden.

Der Einsatz eines CO₂-Lasers ist jedoch nicht nur auf Materialien wie Stoffe oder Plaste beschränkt. Mit einem 1-kW-CO₂-Laser lassen sich Metalle bis zu 10 mm Stärke unter Zusatz von Sauerstoff schneiden, Ziegelsteine von einigen Zentimetern Dicke sowie eine Vielzahl anderer Materialien trennen.

Bei kleineren Leistungen lassen sich Kunststofffolien, Papier und andere dünne Stoffe durchschneiden bzw. auch Kunststoffe schweißen. Mit größeren Leistungen ist es möglich, Quarz oder Quarzpulver zu schmelzen. Das Schweißverfahren mit CO₂-Laser weist beispielsweise gegenüber dem Mikroplasma-Schweißverfahren den Vorteil auf, daß durch den Laserstrahl eine wesentlich kleinere Zone erhitzt wird.

Für die Lasertechnik selbst und auch für die Halbleitertechnik benötigt man reine Kristalle ohne Inhomogenitäten. Aus der Schmelze können aber keine Kristalle mit der erforderlichen Reinheit gezogen werden. Deshalb wendet man zur erneuten Reinigung die Methode des Zonenschmelzens an. Der Kristall wird dabei langsam durch eine lokal erhitzte Zone gezogen. Unreinheiten bleiben dabei zurück. Mit einem Laser kann eine sehr scharf begrenzte Erhitzungszone geschaffen werden. Bei dem Aufschwung, den die Halbleitertechnik gemeinsam mit der Elektronik genommen hat, haben derartige Methoden große Bedeutung. Mit einer CO₂-Lasingleistung von 400 W konnte ein Zonenschmelzen für Rubine bis zu einem Durchmesser von 5 mm erzielt werden.

In der pharmazeutischen Industrie wird der Laser zum Verschließen (Abschmelzen) von Glasampullen verwendet. Bei feuergefährlichem und temperaturempfindlichem Inhalt können bis jetzt nur $\frac{2}{3}$ des Ampullenvolumens gefüllt werden. Durch den Laserstrahl wird eine sehr kleine Zone erhitzt. Somit kann man die Ampullen nahezu vollständig füllen. Unter anderem bedeutet das eine Einsparung von Transport- und Lagervolumen.

Arbeitet man mit einem Impulslaser, so kann die Veränderung der Impulsdauer eine Anpassung an die Gegebenheiten der jeweiligen Bearbeitungsmethoden mit sich bringen. So wird man zum »Boh-

12. Materialbearbeitung

ren« von Löchern nur kurze Impulse verwenden. Dann wird das Material am Kraterrand nur unwesentlich erwärmt, denn die Wärmeleitung ist ein relativ träger Vorgang. Will man hingegen Löt- oder Schweißverbindungen herstellen, so muß sich das Material an allen Stellen der Verbindung gleichmäßig erwärmen. Also muß die Impulsdauer höher sein. Bei der Bearbeitung von Halbleitermaterialien kommt es gleichfalls darauf an, die Umgebung wenig zu erwärmen. Dafür sind ebenfalls Laser kurzer Impulsdauer geeignet.

Eine andere Frage ist die Handhabung der Lasergeräte für die Materialbearbeitung. Dort, wo laufende Bahnen getrennt werden sollen oder wo eine Taktstraße die Elemente an der Bearbeitungseinheit vorüberführt, kann der Laser als stationäres Gerät eingebaut werden. Anders wird es bei Aufgaben, bei denen größere Konturen getrennt oder geschweißt werden sollen. Hier wird der Laser in ein transportables bzw. fahrbares Gerät eingebaut werden müssen. Für Spezialaufgaben kann man Ablenkeinheiten aus Spiegeln oder Glasfasern herstellen oder aber das Werkstück selbst bewegen.

Andererseits kann der Laser in Bearbeitungseinheiten, die eine Justierung unter dem Mikroskop erfordern, von Vorteil sein. Die Strahlung des Lasers läßt sich direkt in das Mikroskop einspiegeln. Dieses Prinzip wurde im Laser-Mikrospektral-Analysator verwirklicht. Ein weiterer Vorteil ist durch Fokussierung gegeben. So kann man auch innerhalb eines kleinen Aufbaus löten, schweißen oder trennen, ohne die Umgebung durch zu hohe Temperaturen zu gefährden.

Die Bedeutung der Elektronik für die heutige Technik kann wohl kaum unterschätzt werden. Immer mehr wird in diesem Bereich die Mikroelektronik eingesetzt, die wesentlich geringere Ausmaße erfordert als elektronische Schaltungen, die mit herkömmlichen Bauelementen, Transistoren, Kondensatoren, Widerständen, aufgebaut werden. Eine Reihe wichtiger Parameter, wie hohe Grenzfrequenzen oder kurze Schaltzeiten, lassen sich in den meisten Fällen nur mit Hilfe dieser Technik entscheidend verbessern. Es ist aber nicht einfach, bei Schaltkreisen, die nur unter der Lupe oder dem Mikroskop zu betrachten sind, feinste Arbeiten vorzunehmen. Es wurden besondere Verfahren zur Herstellung integrierter Schaltkreise entwickelt, beispielsweise der Einsatz der Fotolithografie. Eine Reihe von Aufgaben sind jedoch nur dann zu lösen,

wenn man an schon fertigen Dünnschichtelementen bestimmte Operationen vornimmt. Das betrifft vor allem die exakte Herstellung von Widerständen, das sogenannte »Widerstands-Trimmen«. Hier konnte man wiederum mit großem Erfolg den Laser einsetzen. Dickschicht- oder Dünnschichtwiderstände lassen sich durch Verdampfen von geringsten Mengen der Substanz mit Hilfe von Lasern mit einer Genauigkeit von 0,01 bis 0,1 % herstellen. Im Gegensatz dazu erreicht man mit den bisher eingesetzten Methoden nur eine Genauigkeit von 5 bis 20 %.

Durch genaueste Fokussierung des Laserstrahls bleibt die Unterlage, auf der das Widerstandsmaterial aufgebracht ist, unbeschädigt. Außerdem ist zu beachten, daß der Laserstrahl ein absolut steriles Instrument darstellt. Verunreinigungen des bearbeiteten Materials kommen nicht vor. Da sich der Laserstrahl durch Glas oder durchsichtiges Plastmaterial leiten läßt, ist es möglich, unmittelbar unter Vakuum zu arbeiten. Er gestattet sogar, Bearbeitung spannungsführender Teile ohne aufwendige Schutzmaßnahmen vorzunehmen. Eine Apparatur für Widerstandstrimmen mit Hilfe eines Lasers brachte einen Jahresausstoß von 28,8 Millionen Widerständen. Dagegen konnte mit einer vergleichbaren Apparatur auf mechanischer Basis nur eine Bearbeitung von 2,4 Millionen Widerständen je Jahr erreicht werden. Für die Bearbeitung von Mikroelektronikteilen wurde die sowjetische Laser-Apparatur TILU-1 entwickelt.

Die Materialbearbeitung ist eines der aussichtsreichsten Einsatzgebiete des Lasers. Der Impulslaser kann durch Variation seiner Impulsdauer auf die jeweilige Bearbeitungsmethode abgestimmt werden. Für kontinuierliche Bearbeitungen sind CO₂-Laser und YAG-Laser mit Leistungen zwischen 100 und 1000 W geeignet.

13. Weitere Anwendungen

13.1. Fluchtung

Bei Arbeiten im Bergbau, Bauwesen, Maschinen- und Schiffsbau, beim Bau von Gräben und Kanälen und in vielen anderen Wirtschaftszweigen sind ständig Fluchtungsaufgaben zu lösen. Bei Verwendung herkömmlicher Mittel (Meßplatten, Fluchtungsfernrohre usw.) erfordert die Fluchtung einen hohen Zeitaufwand. Er verringert sich, wenn man einen optischen Leitstrahl zur Verfügung hat. Die herkömmlichen Lichtquellen strahlen das Licht nach allen Seiten gleichmäßig ab. Auch beim Einsatz von Reflektoren und Bündlungsoptiken gelingt es selten, mit Hilfe von herkömmlichen Lichtquellen Leitstrahlen zu erzeugen, die für Fluchtungsaufgaben geeignet sind. Besonders der Strahl eines Gaslasers weist Eigenschaften auf, die ihn geeignet machen, als optische Bezugsachse zu dienen. Erstens ist die Divergenz des Strahles gering und kann durch eine Aufweitungsoptik auf ein Minimum gebracht werden. In diesem Strahl ist der größte Teil der vom Laser in Form von Licht abgegebenen Energie konzentriert. Außerdem ist die Monochromasie des Laserlichts so gut, daß es mit Hilfe von Interferenzfiltern vom Störlicht ohne große Schwierigkeiten zu trennen ist.

Wird durch den Laserstrahl eine optische Bezugsachse vorgegeben, so genügt es in vielen Fällen schon, die Lage der einzelnen Gegenstände ohne weitere Hilfsmittel direkt mit dem Laserstrahl zu kontrollieren (Bild 87). Mit Hilfe des Lichtflecks, den der Laserstrahl auf einer Zielscheibe erzeugt, wird die Abweichung von einem bestimmten Bezugspunkt festgestellt. Die Gegenstände werden dann soweit verschoben, daß keine Abweichung mehr feststellbar ist.

In einer nächsten Stufe kann man eine elektronische Anzeige der
210 Abweichung aufbauen. Anstelle einer Bezugsmarke wird ein speziell

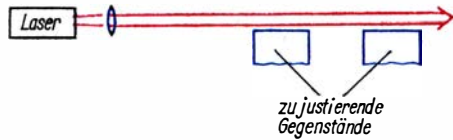


Bild 87. Laserstrahl als optische Bezugsachse

konstruierter Fotoempfänger verwendet. Als Fotoempfänger dient beispielsweise ein Fotoelement, das aus vier getrennten Segmenten besteht (Bild 88). Werden diese in geeigneter Weise zusammengeschaltet, so entsteht, wenn der Laserstrahl nicht genau auf den Mittelpunkt des Fotoempfängers trifft, ein Fehlersignal. Mit Hilfe einer Auswerteelektronik läßt sich die Abweichung in x - und y -Richtung in Längeneinheiten anzeigen. Wenn sich der Strahl im Zentrum befindet, heben sich die Signale auf.

Eine vollautomatische Steuerung von Bearbeitungsmaschinen wird aufgebaut, wenn man dieses elektrische Signal der Abweichung elektronisch weiterverarbeitet. Die Seiten- bzw. Höhenantriebe der Bearbeitungsmaschine werden automatisch immer so gesteuert, daß das Zentrum des Fotoelementes, das mit der Maschine fest gekoppelt ist, immer mit der durch den Laserstrahl vorgegebenen Achse übereinstimmt (Bild 89).

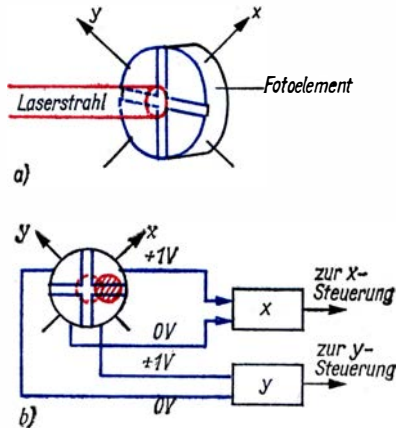


Bild 88. x - y -empfindlicher Fotoempfänger für automatische Fluchtung (mögliche Variante mit 4 Fotoelementen)

a) technischer Aufbau
b) elektrische Schaltung

13. Weitere Anwendungen

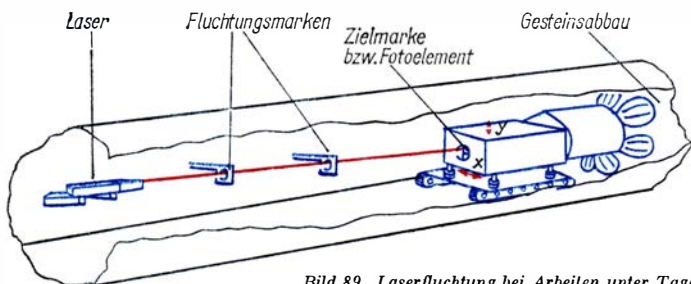


Bild 89. Laserfluchtung bei Arbeiten unter Tage

Einen wesentlichen Einfluß auf die Genauigkeit der Positionierung hat die Atmosphäre (Bild 90). Die Resonatorkonfiguration des Lasers kann man so gestalten, daß der Laserstrahl bei seinem Austritt aus dem Laser eine axial-symmetrische Intensitätsverteilung aufweist. Bezüglich des Durchmessers ist in der Mitte die Intensität am größten und fällt dann nach außen glockenförmig ab (*transversaler Grundmode*). In der Atmosphäre existieren auch bei klarer, durchsichtiger Luft immer Turbulenzen. Druck und Temperatur wirken sich auf die Brechzahl der Luft aus. Das Flimmern der Luft an heißen Tagen ist ein Beispiel dafür. Dadurch kann die Intensitätsverteilung über den Durchmesser des Laserstrahls bis zur Unkenntlichkeit unkontrolliert gestört werden. Aus diesem Grund sind Feinfluchtungen mit Laser nur unter ausreichend stabilen atmosphärischen Bedingungen möglich.

Ein wesentliches Anwendungsgebiet für Laserfluchtungsgeräte wurde für Arbeiten unter Tage erschlossen. Beim Bau von Trinkwasserstollen durch die Schwäbische Alb fanden Lasergeräte zur automatischen Steuerung von Bohrmaschinen Anwendung.

Bei einer Gesamtlänge der Bohrung von 9,2 km wurde eine Gesamtabweichung von weniger als 5 cm erreicht. Die Tagesleistung beim Vortrieb lag dabei bis zu 50 % höher als beim herkömmlichen Meßverfahren mit Theodoliten. Eine wesentliche Erleichterung besteht darin, daß die Messung kontinuierlich erfolgen kann und die Maschinen zur Messung nicht entfernt werden müssen.

Das Verfahren der automatischen Steuerung kann noch dahingehend erweitert werden, daß nicht nur gerade Strecken, sondern auch Bogen gegraben werden können. Dabei wird der Laserstrahl

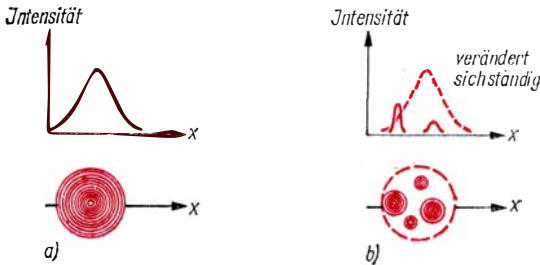


Bild 90. Intensitätsverteilung über den Querschnitt des Laserstrahls (Einfluß der Atmosphäre)

a) beim Austritt aus dem Laser

b) beim Durchlaufen der Atmosphäre

durch einen Computer abgelenkt. Ein derartiges Verfahren wurde beim Bau der U-Bahn in München angewandt. Die Abweichungen vom vorgegebenen Weg lagen unter einem Zentimeter, es wurde ein Bohrtunnel mit einem Durchmesser von 6,80 m gegraben.

Der Einsatz von Lasern lohnt sich vor allem beim Ausrichten von Übertageeinrichtungen mit großen Abmaßen. Das bezieht sich beispielsweise auf Schornsteine, Flugzeughallen, Maste, Türme, Flugzeuge oder Raketen. So wurde das Deck des britischen Tankers »Northumbria« (253 000 t) mit Hilfe eines Lasers auf mechanische Spannungen vermessen. Diese Spannungen treten auf, wenn die verschiedenen Tanks gefüllt werden.

Besonders beim Bau von Großtankern und Großflugzeugen kann der Laser zur Fluchtung eingesetzt werden. Zum Beispiel wird der Bau der Tragflächenkonstruktion der Boeing 747 unter Zuhilfenahme von Laserfluchtungsgeräten durchgeführt. Die Tragflächen sind rd. 30 m lang. Sie werden in 10 Rahmen montiert. Dabei muß die Genauigkeit über die gesamte Länge 0,3 mm betragen. Mit konventionellen Verfahren erreicht man eine solche Präzision nicht. Nur mit Hilfe der Laserfluchtung kann die erforderliche Genauigkeit erzielt werden.

Zum Bau von hohen Gebäuden können Senklote nur bis rd. 100 m eingesetzt werden. Dabei muß bei der Gleitschalenbauweise das Lot ständig verlängert werden. Das wird mit der Laserfluchtung

umgangen. Beim Bau des größten Fernsehturms der Welt, dem Moskauer Fernsehturm in Ostankino, kam ein Laser zum Einsatz. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Verwendung des Laserstrahls als Leitstrahl für Raketen und Flugzeuge. Vor allem könnte der Laser bei Einflugschneisen und evtl. bei Startrampen genutzt und mit Hilfe des Doppler-Effekts gleichzeitig sogar die Geschwindigkeit gemessen werden. Die gleiche Anwendung als Leitstrahl kann bei großen Transport- und Arbeitsmaschinen (z. B. für Bagger) Nutzen bringen. Man kann sich auch Anwendungen vorstellen, bei denen zwei Großteile genau aufeinander gepaßt werden müssen. Das gilt sowohl für Einsatz auf der Erde als auch beim Bau von Weltraumstationen.

In der DDR wird beim Bau von hohen Gebäuden immer mehr die Gleitschalenbauweise angewandt. In Zusammenarbeit zwischen dem Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie, der Bauakademie der DDR und dem VE Spezialbaukombinat Magdeburg wurde ein Laserleitstrahlsystem entwickelt, das beispielsweise beim Bau von Kühltürmen in Gleitschalenbauweise eingesetzt werden kann. Das Prinzip dieses Systems besteht in folgendem (Bild 91): Der Laser wird durch einen pendelnden Kollimator in seiner Achse stabilisiert. Der senkrecht nach oben austretende Strahl wird mit Hilfe eines Teleskops aufgeweitet. Dadurch wird seine Divergenz verringert. Dieser Strahl wird über ein Umlenkprisma (Pentaprisma) in die horizontale Ebene abgelenkt. Das Umlenkprisma kann durch ein Schrittschaltwerk um seine vertikale Achse gedreht werden. In der horizontalen Ebene sind bis zu 24 weitere Umlenkeinheiten (Pentaprismen) angeordnet, die durch den vom Zentralprisma umgelenkten Laserstrahl beleuchtet werden. Diese Umlenkeinheiten lenken den Laserstrahl nach oben ab, er dient als Leitstrahl für den Gleitbau. Mit einem einzigen Laserstrahl lassen sich somit bis zu 24 Leitstrahlen (zeitlich nacheinander) erzeugen. Die erste Variante dieses Systems sieht vor, für jeden einzelnen Leitstrahl eine Meßplatte an der Gleitschale anzubringen, auf der die Meßwerte abgelesen werden können. Die zweite Variante besteht in der automatischen Kontrolle der Messung mit Hilfe von fotoelektrischen Empfängern und Bandschreibern oder digitalen Anzeigeeinheiten.

Mit diesem Meßverfahren erreicht man eine Genauigkeit von 5 mm (bis zu 150 m Gesamtlänge). Damit ist es den besten geodätischen

214 Methoden gleichzusetzen. Die Anwendung mit Laserstrahl weist

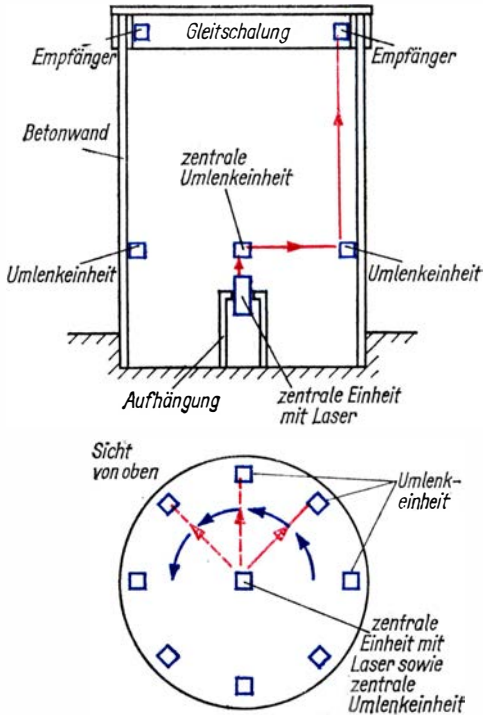


Bild 91. Schema des Laser-Leitstrahl-systems für Gleitbau

aber eine Reihe von Vorteilen gegenüber den herkömmlichen Verfahren auf:

Die Meßwerte stehen unmittelbar nach der Messung zur Verfügung, die Bauausführung wird genauer. Der Anteil von Nacharbeiten wird verringert, die Wanddicken können geringer gehalten werden.

Das Meßpersonal hält sich nicht mehr im Gefahrenbereich auf.

Die Anlage kann von Facharbeitern bedient werden. Störungen durch Regen bzw. Nebel werden weitgehend ausgeschaltet.

13. Weitere Anwendungen

Der Aufwand an lebendiger Arbeit wird um 50% und mehr reduziert. Man rechnet mit einer Amortisation der Anlage innerhalb von zwei bis drei Jahren. Das Verfahren bewährte sich bereits beim Bau von zwei Kühltürmen in Boxberg mit parabolisch gekrümmten Wänden.

Die Laserfluchtung findet weitere Einsatzgebiete beim Straßenbau, z. B. beim Bau der Autobahn Berlin – Rostock.



Durch die scharfe Bündelung des Nutzlichtes ist der Laser in der Lage, als optische Bezugsachse für Fluchtungen eingesetzt zu werden. Besonders bei großräumigen Bauten sowie bei Arbeiten unter Tage findet er Anwendung. In der DDR wird ein Laser-Leitstrahlssystem zur Kontrolle von Gleitschalungen eingesetzt.

13.2. Meteorologie

Die wesentlichsten Informationen, die über den Zustand der Atmosphäre Auskunft geben, werden mit Hilfe des Lichts gewonnen. Ob Wolkenformen beobachtet werden, ob Nebel die Sicht beschränkt oder ob man Schlierenerscheinungen (flimmernde Luft) beobachtet, überall bei diesen Aufgaben werden mit Hilfe des sichtbaren Teils der elektromagnetischen Wellen wesentliche Erkenntnisse erhalten. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß man die intensitätsreichen und monochromatischen Laserstrahlen zur aktiven Untersuchung der atmosphärischen Prozesse ausnutzt. In einer Reihe von Observatorien setzt man Laser zur Untersuchung der höheren Luftschichten ein, wobei besonders die Streuprozesse an den kleinsten atmosphärischen Teilchen über die Beschaffenheit der Luft Auskunft geben. Im übrigen haben solche Untersuchungen nicht nur Bedeutung für die Luftfahrt oder für den zivilen Sektor der Wirtschaft. Mit Hilfe von Lasern könnte man auch Warnanlagen für militärische Zwecke schaffen. Beispielsweise könnte ein Flugzeug, das Giftstoffe versprüht, sofort identifiziert und aus der Untersuchung von Streuspektren könnten eventuell schnell Aussagen über die Art des versprühten Giftstoffes erhalten werden.

Zunächst wird aber die friedliche Anwendung der Untersuchungen der Atmosphäre mit Laser betrieben. Im April 1971 wurde in Austra-

lien der erste Laser-Leuchtturm in Betrieb gesetzt. Er dient gleichzeitig als Laser-Radar. Das Licht, das von aufkommenden Nebelbänken reflektiert wird, wird in einem speziellen System aufgefangen und verarbeitet. Automatisch wird jede Nebelbank in einem Umkreis von etwa drei Meilen angezeigt.

Die Luftverschmutzung durch Abgase ist zu einem dringenden Problem angewachsen. Das betrifft vor allem Ballungszentren der Industrie. Es existieren Gesetze, die der zunehmenden Luftverschmutzung in Industriezentren Einhalt gebieten sollen. Man versuchte, im Ruhrgebiet ein Überwachungssystem durch Einsatz eines Lasers einzurichten. Auf einem Wachturm wurde ein Laser installiert, der mit einer bestimmten Geschwindigkeit rotiert. Das reflektierte Licht wird registriert. Erhöht sich die Luftverschmutzung über einem bestimmten Abschnitt durch Rauch oder andere Abgase über das festgesetzte Maß, so wird dies sofort automatisch registriert. Die Koordinaten der entsprechenden Betriebe sind bekannt, der Betrieb kann identifiziert werden. Ein Beispiel, wie man mit technischen Mitteln, versucht, gesellschaftliche Probleme zu lösen.

13.3. Laser-Kreisel (Giroskop)

Bisher wurde zur Navigation auf Schiffen und Flugzeugen der Kompaß verwendet. Beim Magnetkompaß wird die Ausrichtung eines Permanentmagneten nach dem Magnetfeld genutzt. Die damit erreichbare Genauigkeit ist nicht hoch. Der Magnetkompaß gibt eine bestimmte Mißweisung, die an verschiedenen Stellen der Erde unterschiedlich ist, da magnetischer Südpol und geographischer Nordpol nicht genau übereinstimmen. Außerdem wird die Richtung durch Eisenteile auf Schiffen und durch störende magnetische Felder beeinflusst. Da der größte Teil eines Schiffes aus Metall besteht und viele Prozesse der Schiffsbedienung auf elektrischem Wege ablaufen, sind gewöhnliche Magnetkomпасse meist nicht verwendbar. Noch kritischer ist die Situation in Raumfahrzeugen, in denen die Orientierung nach dem Magnetpol der Erde entfällt.

So hat sich in der Navigation eine andere Methode durchgesetzt, und zwar das girokopische Prinzip. Es besteht in folgendem: Ein Körper rotiert um eine Achse. Diese Rotationsachse bleibt fest im

13. Weitere Anwendungen

Raum orientiert und wird durch kleine äußere Kräfte, Schwerkraft oder Reibung, nur gering beeinflusst. Aus diesem Grund bleibt z. B. ein Kinderkreisel senkrecht, wenn er in Drehung versetzt wird. Dieses Prinzip wird im Kreiselkompaß für die Navigation angewendet. Eine kardanische Aufhängung garantiert eine freie Bewegung in jeder Achse. Der Rotor wird über ein elektrisches System auf hohe Drehzahl gebracht. Bei einer Drehung des Schiffskörpers bewegt sich die Rotationsachse nicht mit. Sie bleibt fest im Raum orientiert und dient anstelle eines Magnetkompasses als Navigationsrichtung.

Die Genauigkeit des mechanischen Systems ist oft unzureichend. Kleinere Kräfte haben trotzdem einen gewissen Einfluß (Präzession der Rotationsachse) auf die vorgegebene Richtung. Schwankungen in der Umlauffrequenz wirken sich negativ aus.

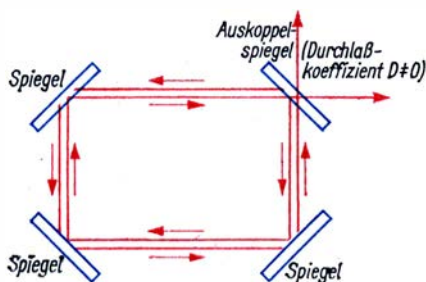


Bild 92. Ringresonator
(Beispiel eines
4-Spiegel-Resonators
mit rechts- und links-
umlaufender Welle)

Eine prinzipiell neue Lösung bietet sich beim Laser an. In 2.3. wurde nur ein Zwei-Spiegel-Resonator behandelt. Es besteht aber auch die Möglichkeit, einen sogenannten Ringresonator aufzubauen (Bild 92). Er besteht aus drei oder mehr Spiegeln, in denen der Strahlengang einen geschlossenen Ring bildet. Die Schwierigkeiten der Justierung und des Stabilhaltens sind bei derartigen Systemen natürlich größer. In einem Ringresonator sind die physikalischen Bedingungen anders als im Zwei-Spiegel-Resonator. Es bilden sich keine stehenden Wellen aus. Eine Lichtwelle läuft im Uhrzeigersinn um, die andere gegen den Uhrzeigersinn. Sie sind

im wesentlichen unabhängig voneinander. Für die Eigenfrequenzen des Ringresonators gilt:

$$n\lambda = U \quad (59)$$

n ganze Zahl

U Umfang des Resonators

λ Wellenlänge.

Diese Bedingung gilt jedoch nur für einen leeren, unbeweglichen Resonator. Der Strahlengang im Resonator liegt in einer bestimmten Ebene.

Wenn sich der Ringresonator um eine Achse, die senkrecht zu dieser Ebene ist, dreht, so sind die Umlaufzeiten der Wellen im und gegen den Uhrzeigersinn verschieden voneinander. Man kann das auffassen als eine scheinbare Verkürzung bzw. Verlängerung des Resonatorumfangs. Damit verändert sich die Wellenlänge bzw. die Frequenz der Wellen. Auf der Grundplatte des Ringlasers ist ein optisches System aufgebracht, das die beiden Laserstrahlen der rechts- und der linksumlaufenden Welle überlagert und auf einen Fotoempfänger gibt (Bild 93). Mit der Methode des optischen Überlagerungsempfangs kann der entstehende Frequenzunterschied gemessen werden. Einen Frequenzunterschied, der von

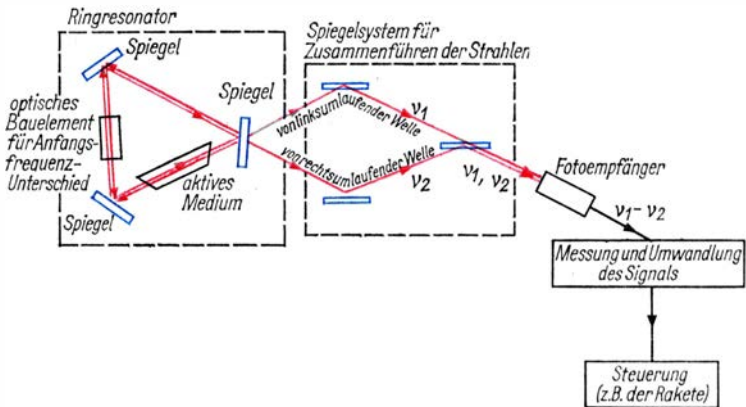


Bild 93. Laser-Kreisel (Gyroskop) 219

13. Weitere Anwendungen

Null beginnt (bei ruhendem Resonator), kann man aber schlecht messen. Aus diesem Grund wird in den Laser noch ein optisches Bauelement eingebracht, das einen Anfangsfrequenzunterschied hervorruft.

Somit kann ein Laserkompaß folgendermaßen arbeiten: Der Ringresonator ist fest mit dem zu messenden System (Schiff, Rakete, Weltraumfahrzeug) gekoppelt. Solange das System seinen Kurs beibehält, ist nur der Anfangsfrequenzunterschied feststellbar. Eine Drehung des Systems um eine Achse senkrecht zur Resonatorebene ruft eine Frequenzänderung über den optischen Überlagerungssempfang hervor. Die Frequenzänderung wird in ein Digitalsignal umgewandelt, gezählt und im Gradmaß angezeigt. Dieses elektronische Signal kann direkt zur Steuerung des zu messenden Systems (z. B. der Rakete) verwendet werden.

Mit einem Laser-Kreisel wurde experimentell eine Restmißweisung von nur 5 Bogensekunden je Tag erzielt. Die Empfindlichkeit, die noch gesteigert werden kann, beträgt etwa $0,5^\circ/\text{min}$. Die Betriebsbereitschaft kann in Millisekunden hergestellt werden. Im Laser-Kreisel gibt es keine beweglichen Teile. Er ist unempfindlich gegenüber Stößen und Schwingungen und auch gegen hohe Beschleunigungen. Er kann auch bei sehr schneller Drehung noch reagieren und läßt sich deshalb beispielsweise zur Steuerung von Antiraketen-Raketen verwenden. Das gleiche gilt für Flugzeuge. Da ein Laser-Ringresonator nur zur Messung von Drehungen in einer Ebene verwendet werden kann, müssen zur Steuerung von Raumschiffen drei Laserkreisel zusammengeschaltet werden.

13.4. Fotometer

Eine Fotoplatte muß oftmals fotometrisch in ihrer Schwärzung ausgemessen werden. Die hohe Bündlungsfähigkeit des Laserstrahls kann hierbei von Nutzen sein. Ein derartiges System fand in der Astronomie Anwendung.

Um die Bewegung der Gestirne zu messen, vergleicht man die Fotografien des Himmels. Für die Bestimmung einer Kurve benötigt man mindestens 3 Punkte. Mit herkömmlichen Methoden lassen sich nur Aufnahmen vergleichen, die im Intervall von 10 Jahren angefertigt wurden. Um drei Punkte zu erhalten, benötigt man somit

20 Jahre. Es konnte ein Laser-Fotometer entwickelt werden, das dafür einen Zeitraum von $1\frac{1}{2}$ Monaten benötigt. Ein Laserstrahl tastet zeilenweise (wie beim Fernsehen) gleichzeitig zwei Fotoplatten ab. Ein System von Fotoempfängern mißt die Intensität an den verschiedenen Abtastpunkten. Ist die Fotoplatte durch die Abbildung eines Sterns geschwärzt, so wird die Strahlintensität an dieser Stelle verringert. Die Verringerung der Intensität ist ein Maß für die Sternhelligkeit. Die aufgezeichneten Signale können in einen elektronischen Speicher eingegeben werden. Da die Auflösung eines derartigen Systems sehr hoch ist, können Negative verglichen werden, die in dem obengenannten Zeitintervall aufgenommen wurden.

Die gleiche Anordnung läßt sich zur Bahnbestimmung von künstlichen Raumflugkörpern verwenden. In der Kernphysik lassen sich Blaskammeraufnahmen analysieren, genauso wie in anderen Wissenschaftsgebieten ein genauer Vergleich zweier Fotoaufnahmen durchgeführt werden kann.

13.5. In Medizin und Biologie

Für Untersuchungen im Bereich der Medizin und der Biologie eröffnet sich für Lasergeräte ein weites Feld. Obwohl z. Z. bei der Einführung dieser neuen Untersuchungsmethoden noch von einem Anfang gesprochen werden kann, gibt es doch schon zahlreiche Veröffentlichungen zu diesem Thema. Eine Reihe von Behandlungen mit Lasergeräten haben heute ihren festen Platz im medizinischen Alltag. In einigen medizinischen Instituten wurden sogar schon spezielle Räume für die Behandlung mit Laserstrahlen eingerichtet.

Als erstes Beispiel sei die Untersuchung mikroskopisch kleiner Objekte mit Laserstrahlung genannt. Sie beruht auf einer schon 1912 durch *Tschakhotin* konzipierten Methode der Verbindung einer Strahlungsquelle mit einem Mikroskopsystem. Es wird hierbei ein dünner Strahl erzeugt, der mikroskopische Strukturen verletzen oder vernichten kann. Ein Impulslaserstrahl, fokussiert durch ein Mikroskopsystem, erbringt eine hohe Leistungsdichte in einem kleinen Gebiet. Mit dieser Methode führt man Untersuchungen an Zellen, Makromolekülen und Chromosomen durch. Sie erlaubt neue

Experimente in der Experimental-Embryologie und in der Thrombose-Forschung.

Bei der Untersuchung und Behandlung von größeren Objekten werden unfokussierte bzw. aufgeweitete Laserstrahlen eingesetzt. Es wurde z. B. mit Zellkulturen experimentiert. Andererseits führte man auch Experimente und Behandlungen an lebenden Tieren (Mäuse, Ratten, Hamster, Kaninchen, Affen, Hunden) durch. Die Hauptrichtung dieser Experimente ist die Tumorbildung. Es wurden auch schon bei Menschen Versuche durchgeführt, Tumore urologischer Art bzw. Gehirntumore zu behandeln. Der Vorteil eines Laserstrahls gegenüber radioaktiven Präparaten bzw. Röntgenstrahlung besteht darin, daß man in der Lage ist, den Laserstrahl sehr genau auf die zu behandelnde Stelle zu konzentrieren.

Sowohl im Impulsbetrieb arbeitende Rubinlaser als auch CO₂-Laser wurden für Versuche zu dieser Behandlung eingesetzt. Dabei hat der CO₂-Laser den Vorteil, daß mit seinem kontinuierlichen Strahl eine gewisse Schockwirkung vermieden wird, die beim Auftreffen eines Lichtimpulses hoher Intensität möglich ist.

Es kann sein, daß im Operationssaal schon bald Lasergeräte stehen werden. Ein chirurgisches Messer »zerreißt« (mikroskopisch gesehen) Haut, Blutgefäße, Muskelgewebe usw. Dadurch kommt es zu starker Blutung und hohem Schmerzempfinden. Im Gegensatz dazu ist ein fokussierter Laserstrahl in der Lage, das Gewebe weniger schadhaft zu trennen. Die Zellen werden nur im Fokussierungsbereich zerstört. Durch die hohe Temperatur könnte es auch zu einem gleichzeitigen Verschließen der kleinen Blutgefäße kommen. Insgesamt bedeutet das eine Erleichterung der Arbeit des Chirurgen.

Operationen können fast blutlos verlaufen, die Schmerzen werden geringer, so daß die Narkose leichter gehalten werden kann. Unter Umständen kann sogar die Knochensäge durch den Laser ersetzt werden. Die Beschädigungen der Knochensubstanz werden eingeschränkt. Allerdings ist der Einsatz des Lasers in der Chirurgie z. Z. noch nicht weit fortgeschritten, da noch eine Reihe von Problemen gelöst werden müssen. Beispielsweise kann von einem auftretenden Blutfilm die Laserstrahlung absorbiert werden, der Schneidprozeß wird behindert. Die Knochen des Schädeldaches konnten bis auf eine Tiefe von etwa 3 mm geschnitten werden, dann trat eine Ver-

kohlung auf. Diese Probleme sind sicherlich zu lösen. Man könnte z. B. Methoden entwickeln, bei denen störende Schichten auf mechanische Art bzw. durch Spülen mit Flüssigkeit entfernt werden.

Ein völlig andersgeartetes Einsatzgebiet findet der Laser im zahn-technischen Laboratorium. Für die Anfertigung künstlicher Gebisse wurde ein Impulslaser eingesetzt. Die Zahnprothese muß mit einer Unterlage verschweißt werden. Auf die Prothese wird aus ästhetischen und anderen Gründen ein Überzug aus plastischem oder keramischem Material aufgebracht. Bisher mußte dieser Prozeß nach dem Verschweißen ausgeführt werden, da der Schweißprozeß bedeutende Wärmegrade entwickelte, die schädlich auf den Überzug einwirkten. Der Schweißprozeß, der mit einem Rubinlaser erfolgte (Impulsdauer einige Millisekunden, Ausgangsenergie $5 \cdots 15$ Joule), wurde auf eine kleine Zone konzentriert. Auf diese Weise wurde die Umgebung unwesentlich erwärmt und das umgebende Material nicht beschädigt. Alle Fertigungsprozesse an der Zahnprothese konnten vor dem Verschweißen durchgeführt werden. Der technische Prozeß des Verschweißens beanspruchte etwa 45 min. Diese Zeit konnte durch Einsatz des Lasers auf 4 min reduziert werden.

In der Augenmedizin dienen Lasergeräte dazu, Netzhautablösungen zu behandeln. Ein Impulslaser wird auf den Teil der Netzhaut fokussiert, der wieder mit der »Unterlage« verbunden werden soll. Durch den Laserblitz werden die beiden Gewebe miteinander »verschweißt«, d. h., die bestrahlten, mikroskopisch kleinen Stellen werden beschädigt und vernarben danach schnell. Durch die entstandene Narbe wird die Netzhaut festgehalten. Es wurde vorgeschlagen, für diese Methode kontinuierlich arbeitende Argonlaser einzusetzen, die eine Reihe von Vorteilen gegenüber Impulslasern erbringen sollen.

Geräte auf der Grundlage eines Lasers könnten auch dem Augenarzt dazu dienen, eine schnelle und genaue Brillenanpassung bei seinen Patienten vorzunehmen. Das Verfahren beruht auf einem für kontinuierliche Laser im sichtbaren Bereich des Spektrums typischen Effekt. Bei der Betrachtung des Lichtflecks, den der Laserstrahl auf einem Hindernis (z. B. auf einer Wand oder einem Projektionsschirm) erzeugt, hat man einen ungewohnten Eindruck. Es scheint, als ob das Bild eine körnige Struktur aufweist, als ob

man ein Foto des Lichtflecks mit grober Rasterung betrachtet. Der Eindruck ist eine direkte Folge der Kohärenzeigenschaften des Laserlichtes. Die Lichtwellen werden von den kleinsten Unebenheiten der Oberfläche der Projektionswand abgelenkt und interferieren miteinander. Auf Grund der räumlichen Kohärenz der Laserstrahlung kann man diese Interferenzerscheinungen wahrnehmen.

Bewegt man bei der Betrachtung dieses Lichtflecks den Kopf seitlich hin und her, so wandert diese körnige Struktur mit. Dabei stellt sich heraus, daß bei Kurzsichtigkeit die Bewegung der Struktur der Bewegung des Kopfes entgegengerichtet ist. Dagegen stimmen die Bewegungsrichtungen bei Weitsichtigkeit miteinander überein. Auf dieser Grundlage wurde folgendes Gerät geschaffen: Ein Laserstrahl beleuchtet eine sehr langsam rotierende, mit Papier bespannte Trommel. Somit ist eine Bewegung des Kopfes unnötig. Der Patient betrachtet das Bild, wobei die Körnigkeitsstruktur nach einer bestimmten Richtung zu wandern scheint. Der Patient gibt die Bewegungsrichtung an, und in eine Anpassungsbrille werden Korrekturgläser eingesetzt. Bei einer Überkorrektur schlägt die Bewegungsrichtung um. Angepaßt wird auf minimale Bildbewegung.

Das Verfahren ist äußerst genau. Man kann Abweichungen von $\frac{1}{4}$ Dioptrie und weniger nachweisen. Außerdem gibt es keine Schwierigkeiten, auch bei stark fehlsichtigen Patienten die notwendigen Dioptrien der Brillengläser zu bestimmen, da die Körnigkeit von allen Personen mit beliebiger Fehlsichtigkeit scharf gesehen wird. Subjektive Faktoren, die auf die Lesbarkeit von Zeichen zurückzuführen sind, werden gemindert, da nur die Bewegungsrichtung des Bildes angegeben werden muß. Durch eine Abwandlung des Verfahrens ist es auch möglich, den Astigmatismus des Auges zu prüfen und zu korrigieren.

Eine Methode, die sowohl bei biologischen als auch bei medizinischen Untersuchungen Anwendung findet, ist die holografische Mikroskopie. Sie erlaubt, Polymere, einzelne biologische Organismen bzw. die Mikrofauna in einer bestimmten Substanz dreidimensional zu untersuchen. Dabei ist es möglich (wie schon erwähnt), das zu einem bestimmten Zeitpunkt aufgenommene Bild beliebig lange zu untersuchen und dabei das Mikroskop auf jeden Punkt des Objekts scharf einzustellen. Andererseits können auch durch-

sichtige Mikroorganismen sichtbar gemacht werden, wenn man zwei Aufnahmen mit einer Phasendifferenz anfertigt. Das können zwei zeitlich aufeinanderfolgende Aufnahmen sein, wenn sich das Objekt bewegt.

Auch mit der akustischen Holografie ist man in der Lage, eine Reihe wichtiger Untersuchungen durchzuführen. Man versuchte beispielsweise Tumore zu lokalisieren, die Lage eines Fötusses im Uterus zu bestimmen oder einen Embryo eines Huhns im unversehrten Ei sichtbar zu machen. Dabei ist die Gefahr der Schädigung des Organismus wahrscheinlich geringer als bei Untersuchungen mit Röntgenstrahlen.

Man kann erwarten, daß der Laser in der Biomedizin immer neue Anwendungen findet. Einige Möglichkeiten, bei denen schon Untersuchungen durchgeführt worden sind, mögen als Beispiel dienen:

- Untersuchungen des Herzzinneren mit Laserstrahlung über Lichtleitkabel,
- Bestimmung der Alkoholkonzentration sowie der Konzentration anderer Gase in der Atemluft,
- Blindenstöcke zur Orientierung im Raum, ausgerüstet mit Laserdioden,
- Messung der Fließgeschwindigkeit des Blutes in ausreichend transparenten Adern.

14. Arbeitsschutz beim Umgang mit Lasergeräten

Je mehr Lasergeräte in den verschiedenen industriellen Bereichen angewendet werden, desto dringlicher wird auch die Frage eines allgemein gültig geregelten Arbeitsschutzes in bezug auf Laser. Es soll betont werden, daß jedes Experiment und jede Anwendung des Lasers spezifische Gefahren mit sich bringt. Besonders die Augen sind beim Umgang mit Lasern gefährdet. Die Photonen des sichtbaren Bereichs der elektromagnetischen Wellen lösen auf der Netzhaut des Auges einen Reiz aus. Über den Sehnerv wird dieser Reiz an das Gehirn weitergegeben und als »Licht« empfunden. Die Irisblende des Auges kann Helligkeitsunterschiede ausgleichen. Sie sorgt dafür, daß auf die Netzhaut immer eine nahezu konstante Intensität einwirkt. Jedes System, so auch das Auge, hat seine Grenzen. Allzustarke Lichteinwirkung kann die Irisblende nicht ausgleichen. Ein Laserstrahl großer Intensität wird demnach mit fast unverminderter Intensität die Netzhaut des Auges treffen. Außerdem hat jeder Vorgang eine gewisse Zeitkonstante. Bei plötzlichem Auftreffen hoher Intensität kann die Irisblende des Auges nicht schnell genug reagieren. Dadurch steigt die Gefahr. Wird die Netzhaut überlastet, so wird dem Gehirn gemeldet, daß Gefahr besteht. Es entsteht der Eindruck der Blendung. Die Reaktion darauf erfolgt aber erst nach einer gewissen Zeit. Die Augen schließen sich, der Kopf oder der gesamte Körper wird unwillkürlich zur Seite genommen.

Das Blenden durch Überlastung der Netzhaut kann vorübergehend sein. Ab einer gewissen Grenze treten aber nicht zu heilende Schädigungen auf, die Netzhaut verbrennt an einer bestimmten Stelle. Ein sicherer Grenzwert für die Energiedichte, die zur Schädigung der Netzhaut führt, ist noch nicht bekannt.

Welche Beeinträchtigungen des Sehvermögens nach einer Schädigung der Netzhaut auftreten, ist abhängig von der Lage der Verbrennung. Liegt sie an der Peripherie der Netzhaut, so wird sie

von dem Betreffenden oft überhaupt nicht wahrgenommen. Über spätere Folgen solcher Verbrennungen liegen noch keine Erfahrungen vor. Befindet sich die Schädigung an der Stelle des schärfsten Sehens, so kann die zentrale Sehschärfe empfindlich gestört sein. Noch gefährlicher ist eine Verletzung der Eintrittsstelle des Sehnervs, die zur Erblindung führen kann. Zu beachten ist, daß der Laserstrahl durch die Augenlinse fokussiert wird. Deshalb ist auch beim Umgang mit Lasern geringer Leistung Vorsicht geboten. Durch Auftreffen intensitätsreicher Laserstrahlung können auch Iris bzw. Hornhaut des Auges Schaden erleiden, dessen Ausmaß besonders von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ist.

Es ist bekannt, daß sich die Empfindlichkeit der Netzhaut gegenüber Lichteinwirkung auf die jeweiligen Lichtverhältnisse einstellt. Das Auge kann sich an Dunkelheit gewöhnen. Durch diese »Dunkeladaption« ist das Auge in der Lage, Lichtströme zu registrieren, die von einer nur geringen Anzahl von Photonen gebildet werden. Deshalb sollte man nur in Sonderfällen an Laseranlagen in abgedunkelten Räumen arbeiten, sonst aber immer den Arbeitsplatz hell beleuchten.

Auch auf die Haut kann der Laserstrahl einwirken. Bei Lasern hoher Ausgangsleistung besteht die Gefahr der Verbrennung der Hautoberfläche. Über die Prozesse, die beim Auftreffen intensitätsreicher Laserstrahlung auf organisches Gewebe vor sich gehen, ist noch wenig bekannt. Es ist wahrscheinlich, daß nicht nur Wärmeeffekte eine Rolle spielen. Es scheint auch eine nicht durch Wärme verursachte Tiefenwirkung des Laserlichtes auf das Gewebe zu geben.

Einige Laser senden infrarote (bzw. auch ultraviolette) Strahlung aus, die dem bloßen Auge unsichtbar ist. Wird beispielsweise ein CO₂-Laser zur Materialbearbeitung eingesetzt, so muß der unsichtbare Laserstrahl besonders sorgfältig abgesichert sein. Andererseits ist auch die sichtbare Laserstrahlung nur dann als »Strahl« im Raum zu sehen, wenn ausreichend Schwebeteilchen (Rauch, Staub) vorhanden sind. Besonders gefährlich sind unkontrollierte Reflexionen des Laserstrahls an Spiegeln, Metallteilen und anderen Materialien. Sie müssen auf jeden Fall vermieden werden.

Es sollte beachtet werden, daß beim Umgang mit dem Laser auch Gefahrenquellen vorhanden sind, die nicht unmittelbar durch die Strahlung hervorgerufen werden. So gehören zu jedem Laser

elektrische Anlagen. Eine besondere Gefahrenquelle stellen unzureichend abgesicherte Hochspannungszuleitungen zum Laser dar. Insbesondere trifft das zu, wenn Kondensatorbatterien (z. B. beim Festkörperlaser) zur Anwendung kommen. Je nach Einsatz des Lasers muß nachgeprüft werden, welche spezifischen Gefährdungen auftreten können. So können z. B. bei der Materialbearbeitung schädliche Dämpfe auftreten, die abgesaugt werden müssen.

Soweit nicht staatliche Regelungen über Sicherheitsvorschriften beim Umgang mit Lasergeräten bestehen, sind betriebliche Richtlinien über Beschaffenheit der Arbeitsräume und Anlagen, Arbeitsschutzmittel (z. B. Schutzbrillen) aufzustellen. An das Bedienungspersonal müssen bestimmte fachliche und persönliche Anforderungen gestellt sowie Maßnahmen zu seiner medizinischen Betreuung festgelegt werden.

In diesem Zusammenhang soll auf Heft 30 der »Schriftenreihe Arbeitsschutz« (Kleinschmidt, Wolfgang: Laser aus der Sicht des Arbeitsschutzes. Berlin: Verlag Tribüne 1971) verwiesen werden.

15. Zukunft des Lasers

Eine Vorausschau für ein einzelnes Gerät oder auch für eine einzelne Gerätegruppe zu geben ist immer problematisch. Die physikalischen Prinzipien, auf denen das jeweilige Gerät beruht, könnten durch völlig andere ersetzt werden. Es kann sich herausstellen, daß einige Erwartungen nicht erfüllbar sind. Man könnte sie auch nur im Zusammenhang mit dem gesamten Wissenschaftsgebiet und seinen Beziehungen zu anderen Bereichen geben. Derartige Betrachtungen würden den Rahmen dieses Buches sprengen.

Der Laser ist eine Lichtquelle, von der man erwarten kann, daß sie immer weitere Anwendung finden wird. Er ist zu einem unentbehrlichen physikalischen Hilfsmittel geworden. Es geht nicht nur darum, daß neue Geräte der Lichterzeugung entwickelt wurden und daß eine Reihe neuer Meß- und Bearbeitungsmethoden möglich geworden sind. Mit der Erfindung des Laserprinzips ist es zum ersten Mal gelungen, kohärentes Licht in einer Lichtquelle direkt zu erzeugen, abgesehen von den Parametern der Strahlintensität, des Impulsverhaltens u. a. m. Aus diesem Grund wird zwar der Laser späterhin auf einigen Anwendungsgebieten von anderen, dann möglicherweise moderneren Methoden verdrängt werden, aber die kohärente Lichtquelle wird immer Anwendung finden. Es ist weiterhin zu beachten, daß die Erfindung des Lasers dazu beigetragen hat, die Kenntnisse über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wechselwirkung von Substanz und Licht wesentlich zu erweitern. Neue Wissenschaftszweige sind entstanden, so z. B. die Holografie oder die nichtlineare Optik.

Wie wird die Entwicklung des Lasers und seiner Anwendungen weiter vor sich gehen, was ist in nächster Zukunft zu erwarten? Die Antwort wird unvollständig sein. Trotzdem sollen folgende Beispiele einige mögliche Entwicklungsrichtungen verdeutlichen.

Eines der Hauptanwendungsgebiete des Lasers wird sicherlich die Materialbearbeitung sein. Derartige Bearbeitungsmaschinen

werden eines Tages zur normalen Ausrüstung moderner Werke gehören. Kriterien für ihre Einführung in die Produktion sind wirtschaftlicher Einsatz und geeignete Technologien. Ihr Anwendungsbereich wird vom Trennen der Stoffe in der Textilindustrie bis zum Schneiden und Schweißen von Stahlplatten reichen.

Aussichtsreich ist auch die Verwendung des Lasers in der Mikrobearbeitung. Hier kann vor allem das Verfahren zur Herstellung integrierter Schaltkreise eine wesentliche Verbesserung erfahren. Diese Schaltkreise sind die Voraussetzung zur Herstellung von Computern der dritten Generation. Die erste Rechnergeneration beruht auf Elektronenröhren, die zweite auf der Grundlage von Transistoren. Heute schon werden Strukturen in der Größenordnung von $1\text{ }\mu\text{m}$ aufgebracht. Das bedeutet, daß man in der Toleranz noch unter $0,1\text{ }\mu\text{m}$ gehen muß. Auf einen Halbleiterkristall werden einige tausend Schaltungen nebeneinander aufgebracht. Somit muß die Genauigkeit der Positionierung sehr groß sein. Zur Steuerung bietet sich daher ein Laser-Meßsystem an.

Andererseits wird man später auch zur Herstellung dieser Schaltkreise selbst einen Laser verwenden. Zur Zeit werden sie über ein Negativ mit Hilfe einer Lampe und eines Linsensystems hergestellt. Auf dem Halbleiterkristall ist Fotolack aufgebracht. Durch entsprechende Belichtung und anschließendes Ätzen erhält man die gewünschte Struktur im Halbleiter. Es kann möglich sein, daß man Linsenfehler und andere Unzulänglichkeiten später umgeht, indem man holografische Verfahren anwendet. Auch ein speziell auf den entsprechenden Fotolack abgestimmter Laser wird entwickelt werden.

Mit der Weiterentwicklung der Stabilisierung der Laserfrequenzen ist zu erwarten, daß eine hochstabile Laserlichtquelle als Wellenlängen- bzw. Frequenzstandard im optischen Bereich vorhanden sein wird. Die Vorteile liegen in der größeren Kohärenzlänge und einer höheren Lichtintensität gegenüber dem Kryptonnormal. Wenn die Frequenzgenauigkeit des Kryptonnormals bei 10^{-8} liegt, so können Laserapparaturen schon heute Genauigkeiten erreichen, die einige Größenordnungen darunter liegen. Es ist auch zu erwarten, daß man über einige Zwischenstufen einen direkten Anschluß der optischen Frequenzmessungen an den Mikrowellen- bzw. Radiobereich schafft. Schon heute können Frequenzen im infraroten Bereich direkt gemessen werden.

Wellenlängenmäßig abstimmbare Laser werden eine neue Lichtquelle für die Spektroskopie darstellen. Zuerst wird die Wellenlänge nur im kleinen Bereich veränderbar sein. Später aber kann man damit rechnen, daß Laser zur Verfügung stehen, die als Monochromatoren über den gesamten Spektralbereich durchgestimmt werden können.

Auf die Holografie soll hier noch einmal kurz verwiesen werden. Sie ist ein selbständiges Gebiet geworden, in dem viele Anwendungen möglich sind. Bestimmt wird es noch einige dieser Gebiete geben, die durch den Laser erst erschlossen werden. So ein Gebiet kann die Kurzzeittechnik sein. Die Untersuchungen der Kurzzeit-Laserimpulse im Pikosekundengebiet stellen schon heute eine Forschungsrichtung dar, die viele neue wesentliche Erkenntnisse der Naturzusammenhänge bringt. Aber auch Impulslaser mit Impulsen längerer Dauer und hoher Folgefrequenz können beispielsweise in der Kurzzeitfotografie neue Möglichkeiten bieten.

Zukunftsaussichten hat auch die Datenverarbeitung und Informationsspeicherung mittels Lasers. In einiger Zeit werden sicherlich derartige Rechenanlagen ein breites Anwendungsgebiet finden. In den Forschungslaboratorien werden Untersuchungen mit Laserlicht angestellt, die mit Hilfe der Lichtstreuung Aussagen über die Struktur von Stoffen ergeben.

Die Lasertechnik steht heute, trotz der erreichten Erfolge und trotz der bisher abzusehenden Einsatzgebiete, erst am Anfang ihrer Entwicklung. Heute kommt es darauf an, die im Prinzip erprobten Verfahren einem breiten Einsatz in der Industrie zuzuführen. Welche Haupteinsatzgebiete sich in Zukunft ergeben, ist heute nur schwer oder auch gar nicht abzusehen. Es werden beispielsweise schon Möglichkeiten über Röntgenlaser, interplanetare Verbindungen, Energieübertragungen u. ä. diskutiert. Vielleicht wird auch in späteren Jahren eine Fotonenrakete auf Laserbasis gebaut. Auf welchen Gebieten auch Laser eingesetzt werden, eines ist sicher: Laser-Lichtquellen sind keine Geräte, die in hundert Jahren überholt oder vergessen sind, sondern sie werden ein unentbehrliches Hilfsmittel der Meß- und Bearbeitungstechnik bleiben. Wie alle Erfindungen können sie aber nur in der sozialistischen Gesellschaftsordnung nutzbringend und nicht Verderben schaffend angewendet werden, in der nach dem Leitsatz gehandelt wird: Alles dient dem Wohl der Menschen.

Sachwortverzeichnis

- Absorption 37, 57
Absorptionsbänder 87
Akzeptor 92
Amplitude 16
Ausbreitungsgeschwindigkeit 17
Außenspiegellaser 68
- Bändermodell 84
Bäuche der stehenden Welle 45
Besetzungs-inversion 60
— -zahl 41
Beugung 31
Beugungswinkel 22
Bilanzgleichungen 56
Bild, reelles 184
—, virtuelles 184
Boltzmannsche Verteilung 41
Brewsterwinkel 68
Bündlungsfähigkeit der elektromagnetischen Welle 22
- Differenzfrequenz 145
Donator 91
Dotierung 87
Dualismus des Lichtes 21
Durchlaßkoeffizient 39, 105
- Eigenfrequenzen des optischen Resonators 46
Eigenschwingung 46
—, transversale 47
- Einmodenbetrieb 125
Elektron, freies 70
elektrooptischer Effekt 122
Elementarwelle 182
Emission, spontane und induzierte 37, 38
Energie-bänder 84
—, kinetische 36
— -schema 35
— -übertragung 35
— -zustand 35
— — des Moleküls 75
- Fabry-Perot-Resonator 45
Faraday-Effekt 124
Feld 18
—, elektromagnetisches 19
— -stärke 18
Fermi-Dirac-Verteilung 85
— -Niveau 85
Festkörper 83
Frequenz 16
- Genauigkeit der Längenmessung 176
Golay-Zelle 113
Grund-mode, transversaler 47, 212
— -welle 116
Güteschaltung 136

- Halbwertsbreite 25
- Harmonische 116
- Hertz/Hz 16
- Hologramm, synthetisches 189

- Innenspiegellaser 68
- Interferenz 29
 - -holografie 188
 - -spiegel, dielektrischer 108
- Inversion 43
- Ion 37, 70
- Ionisation 70

- Kerr-Effekt 123
- Knoten der stehenden Welle 45
- Kohärenz 29
 - -länge 31, 163
 - -zeit 31
- Kristallgitter 83

- Lamb-dip 56
- Laser (wörtliche Bedeutung) 43
 - -bedingung 61
 - -Chirurgie 222
- Lebensdauer des angeregten Zustandes 37
- Leitstrahl 214
- Leitungsband 85
- Licht-geschwindigkeit 19
 - -leitkabel 197
 - -quanten 20
 - -verstärkung 40
- Löcher 92
- Lokaloszillator 146
- Lumineszenzdiode 92

- Maser 23
- Mehrmodenbetrieb 125
- Mehrphotonenabsorption 157

- Moden des optischen Resonators 47
- Modulator, elektrooptischer 123, 138

- Oberwelle 116
- Objektwelle 183

- Phase 16
- Photonen 20
- piezoelektrischer Effekt 110
- Plancksches Wirkungsquantum 20
- Plasma 156
- pn-Übergang 92
- Pockels-Effekt 123
- Polarisationsrichtung 32
- Pumpen 40
 - , optisches 87
- Pumprate 57
- pyroelektrischer Empfänger 119

- Radiowellen 22
- Referenzwelle 183
- Reflexionskoeffizient 105
- Rekonstruktion 183
- Resonator 45
- Riesenimpuls 137

- Schwebung 145
- Schwelle des Oszillators 50, 53, 61
- Schwingung 15
 - , erzwungene 44
- segmentierter Laser 73
- Selfoc-Faser 197
- Spektrallinie 25
- Spektrum 24
- Spikes beim Festkörperlaser 96

Stoß-ionisation 66	Wärmestrahlung 23
— zweiter Art 66	Welle 16
Strahlung, monochromatische 25	Wellen-feld 181
Superpositionsprinzip 29	— -front 181
	— -länge 17
Tripelspiegel 167, 170	—, stehende 45
	Wirkungsgrad 50
Valenzband 85	Wobbelung 130
Vektor 18	
Verstärungskoeffizient 40	Zustand, angeregter 36

Bildnachweis

(für die Bilder des Anhangs)

Bild 1: Spectra-Physics GmbH., Darmstadt

Bilder 2, 4: Verlag Moskowski rabotschi, Moskau (aus Ostaptschenko, Wunderbare Strahlen)

Bild 3: Spindler & Hoyer KG, Göttingen

Bilder 5, 6: Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie, Berlin, Akademie der Wissenschaften der DDR

Bilder 7, 10: VEB Carl Zeiss Jena

Bilder 8, 9, 18: Umschau-Verlag, Frankfurt am Main (aus Gürs, Laser)

(Bild 8 Foto: Battelle-Institut e.V.; Bild 18 Foto: Impulsphysik)

Bild 11: W.C. Heraeus GmbH, Hanau

Bild 12: Zentralbild

Bilder 13, 14: Siemens Pressebild

Bilder 15, 16, 17: Verlag Maschinostrojenije, Moskau (aus Suminow, Materialbearbeitung mit Laser)

Bild 19: Friedrich-Schiller-Universität Jena

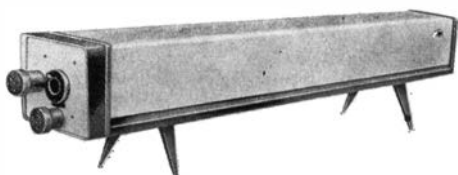
Als Grundlage für die Übersicht der Bilanzgleichungen auf S. 62 wurde die Darstellung von H. Paul in »Lasertheorie« verwendet.

Bild 42 wurde nach einer Zeichnung in »Nauka i shisn« 1971, Nr. 8 angefertigt.

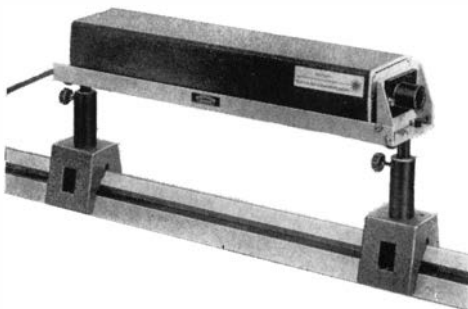
Bildanhang



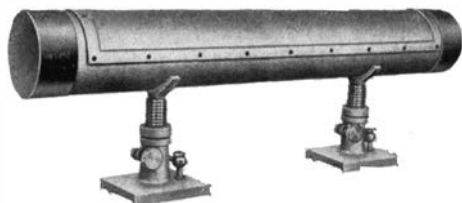
*Bild 1. Spectra Physics
Modell 170 Dauerstrich-
Argon-Ionen-Gas-Laser,
mit 15 Watt Leistung*



*Bild 2. Sowjetischer
Dauerstrich-Gaslaser
LG-36*



*Bild 3. He-Ne-Laser 155
mit Experimentierhalte-
rung auf Dreikantschiene*



*Bild 4. Sowjetischer
Impuls-Gaslaser LG I-1
(He-Ne) Wellenlänge
1,15 μ m*

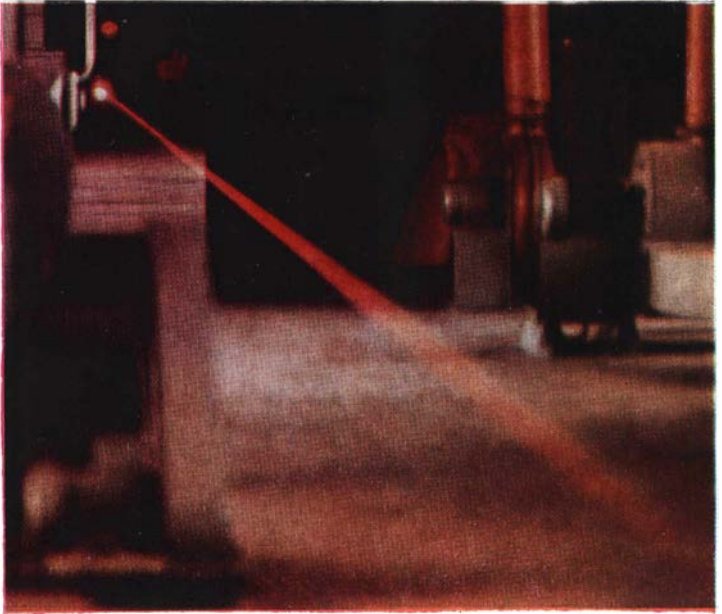


Bild 5. Strahl eines He-Ne-Lasers

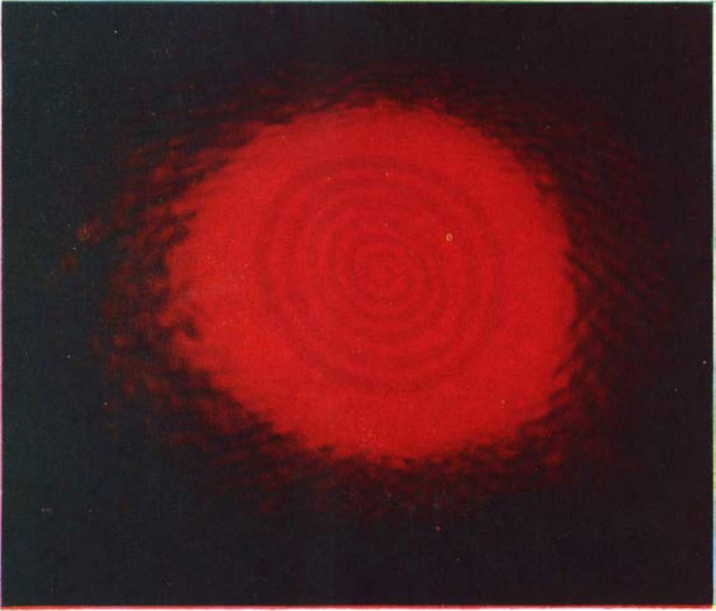


Bild 6. Lichtfleck, erzeugt durch einen He-Ne-Laserstrahl

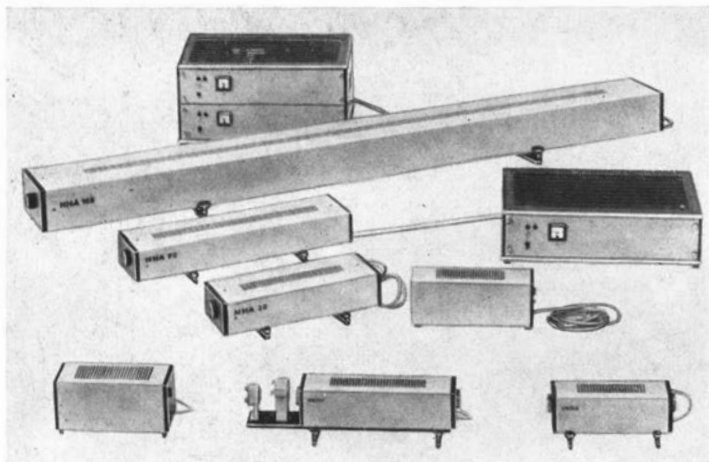


Bild 7. He-Ne-Laser-Typenreihe

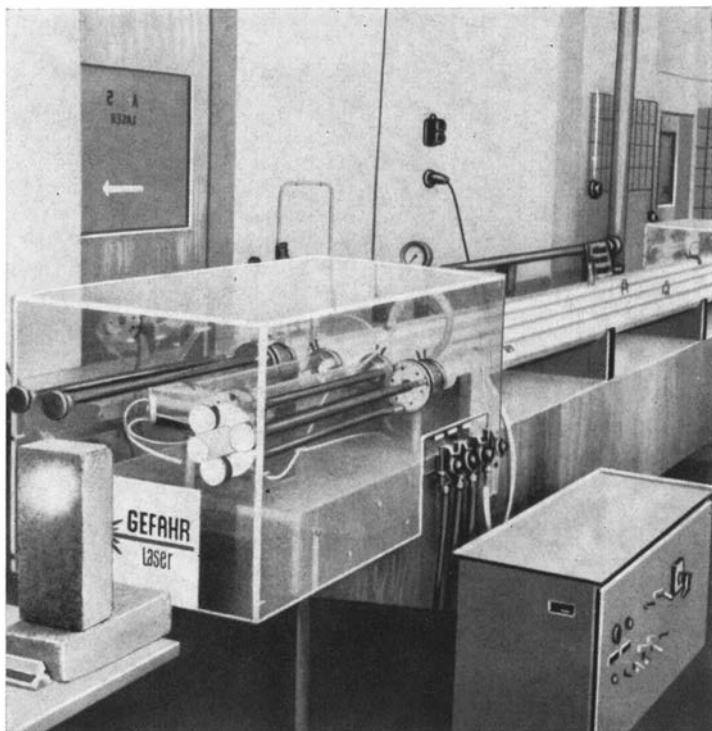


Bild 8. Hochleistungs-CO₂-Laser

Länge 28 m (gefalteter Resonator), Ausgangsleistung 1,5 kW, durchbohrt mit unfokussiertem Strahl einen Ziegelstein

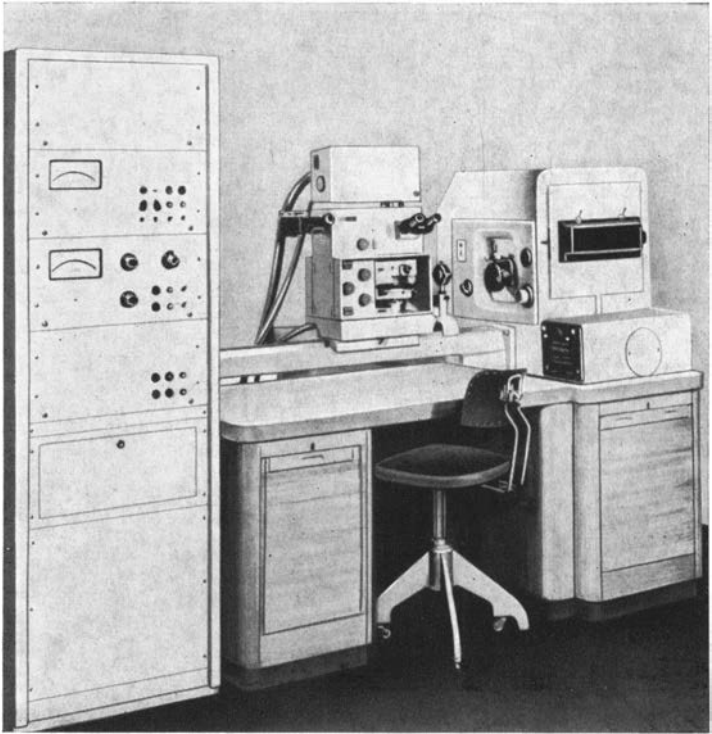


Bild 10. Laser-Mikrospektral-Analysator LMA 1

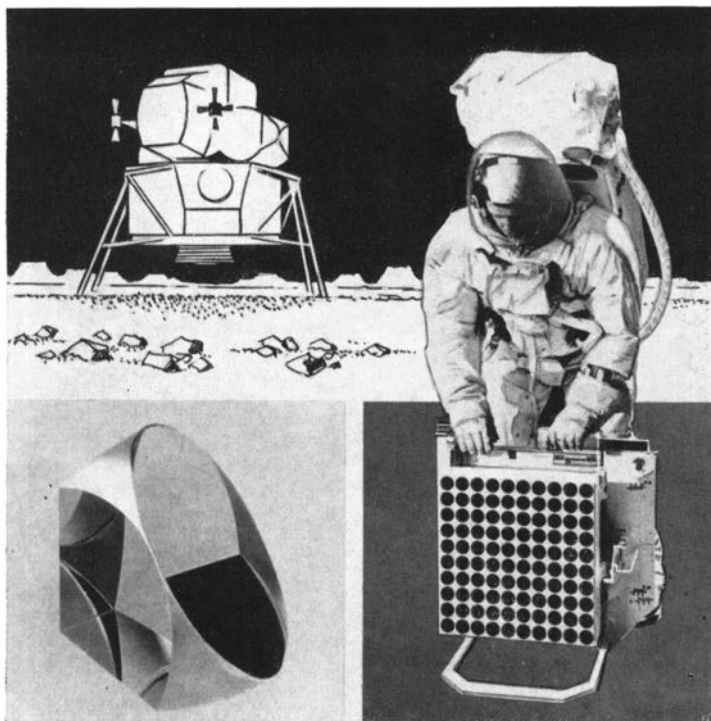
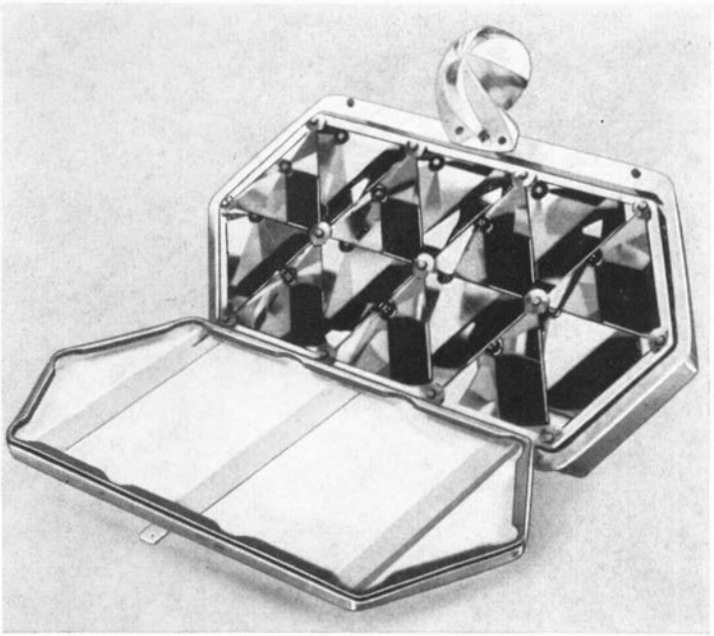


Bild 11. Tripelprismen

aus höchstreinem synthetischem Quarzglas Suprasil (Bild links unten) sind die entscheidend wichtigen Bestandteile von Reflektoren (Bild rechts unten), die die Apollo-Astronauten nach ihren Landungen auf dem Mond niederlegten. Jedes einzelne der 100 in dem Reflektor gefaßten Prismen wirkt wie ein sogenanntes »Katzenauge«: Alle in die Prismen einfallenden Strahlen werden in einem weiten Winkelbereich unabhängig von der Orientierung des Reflektors so reflektiert, daß sie an ihren Ausgangspunkt zurückkehren. Die Reflektoren werden genauesten astronomischen Messungen mittels Laserstrahlen dienen



*Bild 12. Laser-Reflektor (Tripelspiegel)
(Der dargestellte Laser-Reflektor wurde auf dem sowjetischen
Mondfahrzeug »Lunochod 1« installiert)*



Bild 13. Meßtechnischer Einsatz des Lasers beim Bau eines U-Bahn-Tunnels

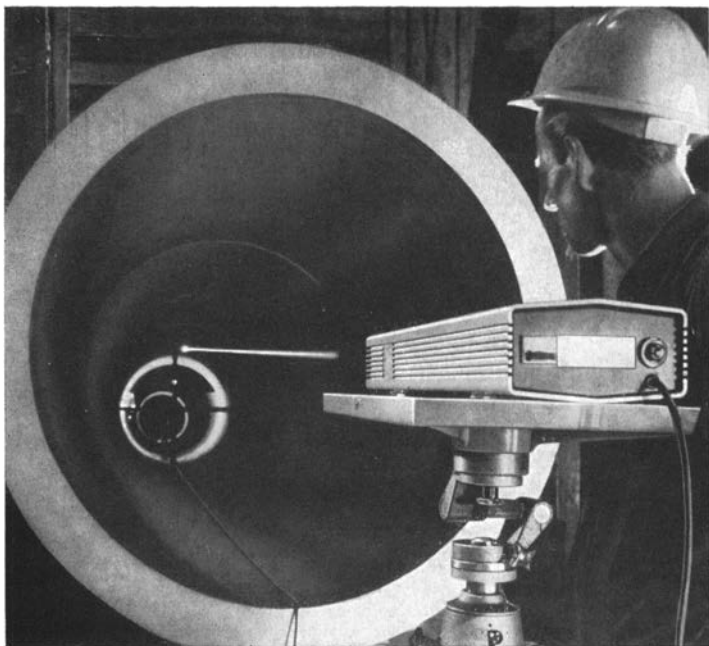


Bild 14. Einsatz des Lasers bei der Fluchtung von Rohren

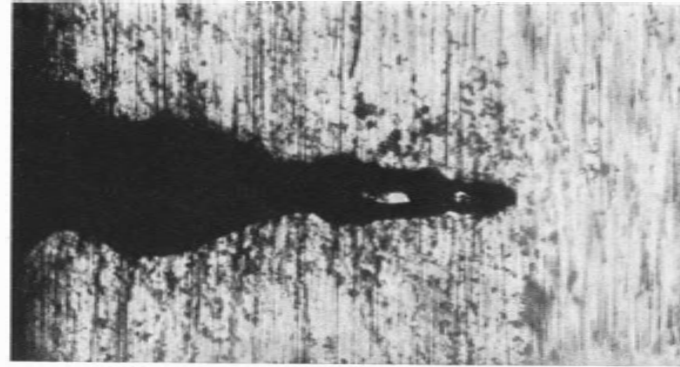
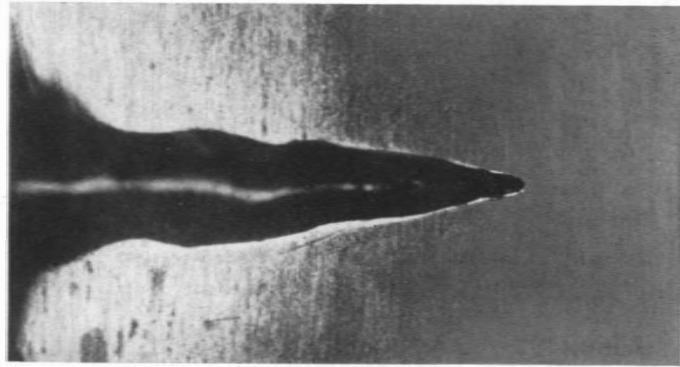
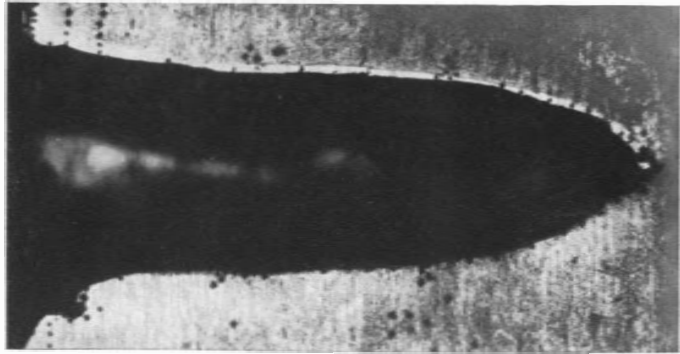
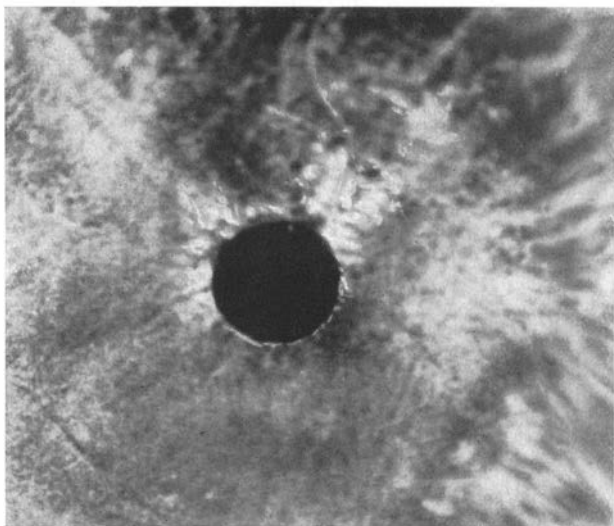
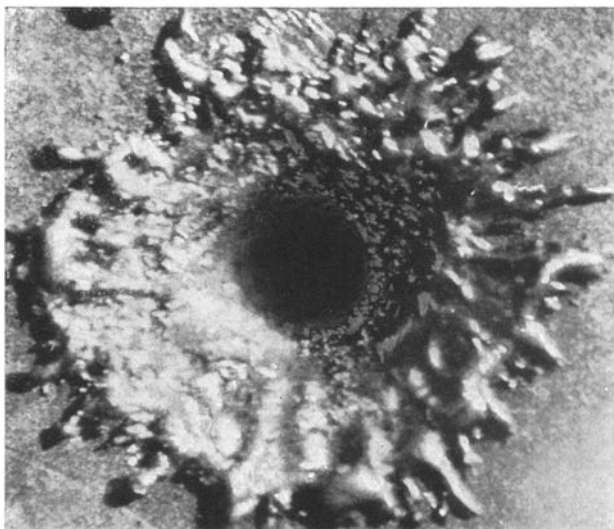


Bild 15. Mit einem Impulslaser erzeugte Bohrlöcher (Seitenansicht)
 (Die unterschiedlichen Profile entsprechen verschiedenen Versuchsbedingungen)



*Bild 16. Mit einem Impulslaser erzeugte Bohrlöcher (Draufsicht).
(Die unterschiedlichen Formen entsprechen verschiedenen
Versuchsbedingungen)*

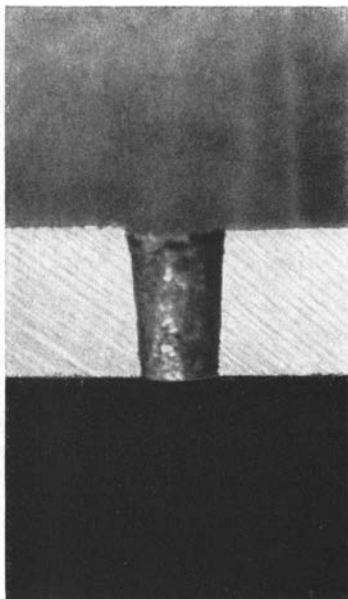
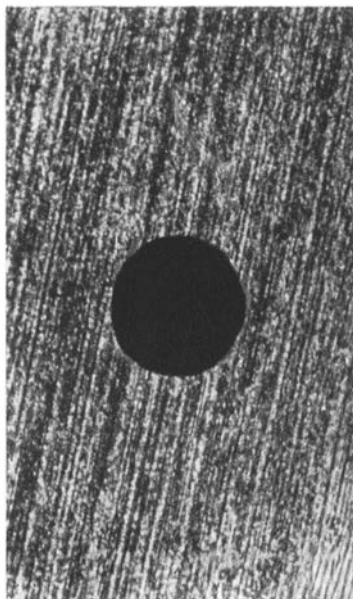


Bild 17. Mit einem Impulslaser durchbohrtes Materialstück
links: Draufsicht *rechts: Seitenansicht*

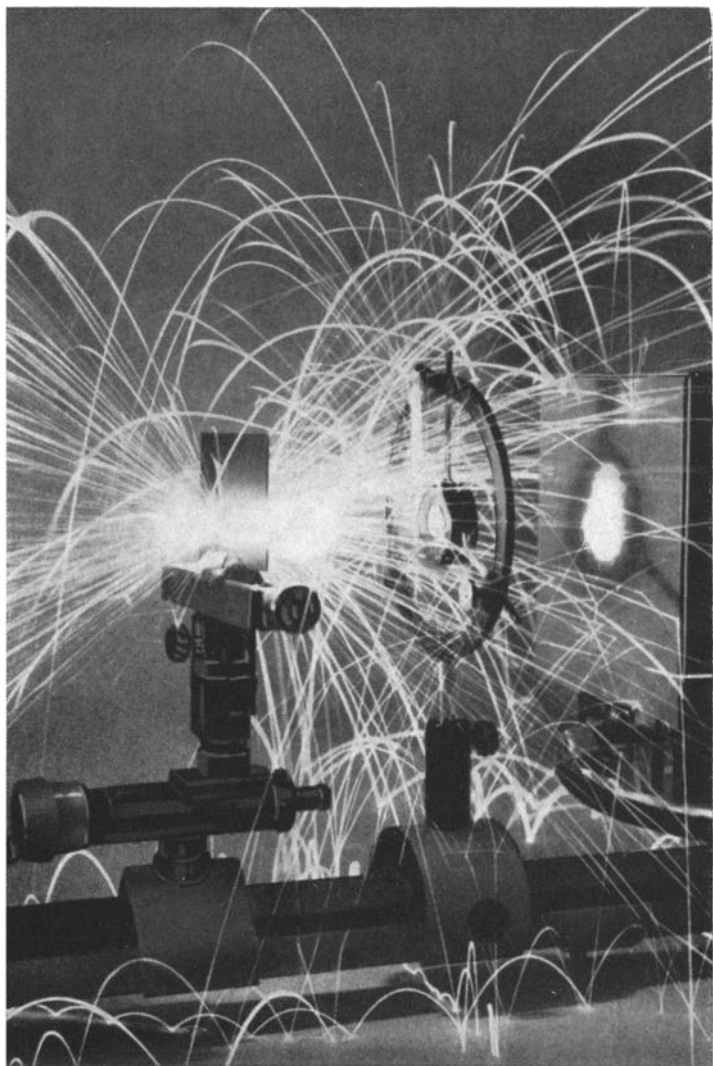


Bild 18. Durchbohren eines Titanbleches mit einem Impulslaser

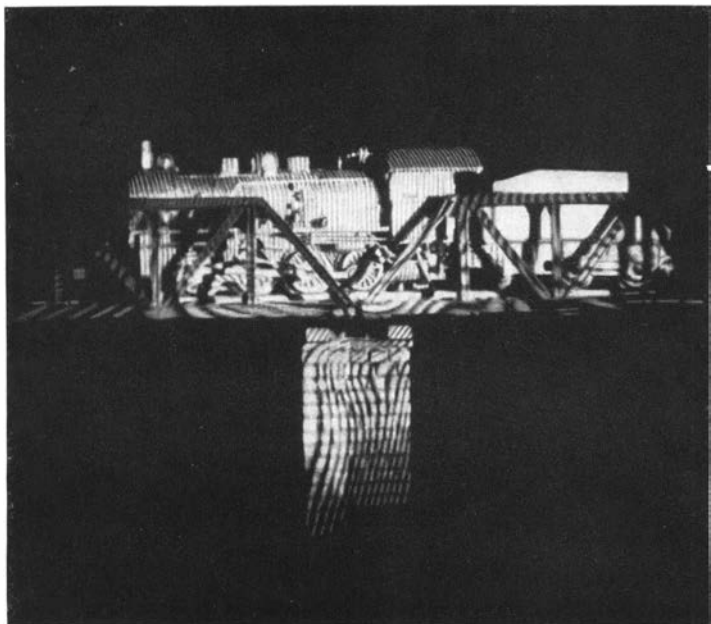


Bild 19. Interferenzholografie

Die Brücke wurde zuerst ohne Last holografisch aufgenommen. Danach wurde die Spielzeuglokomotive aufgesetzt, und es erfolgt eine zweite Belichtung des Hologramms. Durch die Belastung entstehen Verformungen der Brücke im μm -Bereich. Diese sind als Interferenzstreifen auf der Brücke sichtbar

LASERSTRAHL mißt Entfernung zum Mond.

LASERSTRAHL durchbohrt Gestein.

LASERSTRAHL als Lot für höchste Bauwerke.

LASERSTRAHL verhilft zum dreidimensionalen Fotografieren. In der Medizin und vielen anderen naturwissenschaftlichen und technischen Disziplinen werden Laser nutzbringend und erfolgreich angewendet. So bietet die von den verschiedenen Lasertypen erzeugte Strahlung vielfältige Einsatzmöglichkeiten. — Dieser Band der „Polytechnischen Bibliothek“ unterrichtet allgemeinverständlich über die Grundlagen der Arbeitsweise von Lasern, die verschiedenen Lasertypen und erläutert eine Reihe von Anwendungsmöglichkeiten.