

# Der Laser

Faszinierende Wechselwirkungen auf mehreren Ebenen

**B. Vettin**

## 1 Ein besonderes Licht erobert die Welt

Der Laser ist eine einzigartige Erfolgsgeschichte: Die Anzahl der Geräte, der Forschungsvorhaben sowie deren Anwendung und die der Produkte, die einen Laser als Modul nutzen, wird immer größer. Sein „Licht mit Zukunft“ ist heute aus der Technik nicht mehr wegzudenken.

Selbst in unserem unmittelbaren Umfeld (CD-Player, CD-ROM-Laufwerk etc.) leistet er hinter den Kulissen hervorragende Dienste – nur „entdecken“ können wir ihn häufig nicht. Wenn er dann schon als Laser-Pointer vor uns liegt oder den Schülerinnen und Schülern in Lasershows mit seinem „zauberhaften“ Licht oder im Physikunterricht als Werkzeug begegnet, ist in der Regel das Herz dieser besonderen Lichtquelle aus Sicherheitsgründen so gut verpackt, dass es nichts zu erkunden gibt. Hier gilt es problemorientiert mit geeigneten Experimenten die Zusammenhänge zu erkennen.

Das Ziel dieses in der Oberstufe mehrfach erprobten Weges soll sein, exemplarisch die physikalischen Grundlagen des Lasers aufzuzeigen und anschließend dessen Entwicklungs- und Anwendungspotentiale beispielhaft darzustellen. Dabei wird ein besonderer Wert auf vereinfachte Modellvorstellungen gelegt. Themenbezogene Exkursionen unterstützen erfahrungsgemäß die unterrichtliche Arbeit in mehrfacher Hinsicht. Hintergrund ist die unterrichtliche Kompetenzorientierung, hier insbesondere im Bereich „Bewerten“.

Vor gut 100 Jahren wies O. Wiener stehende Lichtwellen nach. Eine entscheidende Grundlage für den Laser legte Albert Einstein durch seine Überlegungen zur stimulierten Emission mit einer gerichteten Ausstrahlung. Die Umsetzung dieses „Gedankenprodukts“ der theoretischen Physik in ein marktfähiges Produkt dauerte 40 Jahre – für heutige Marktstrategen eine unvorstellbare Situation.

Die erste Vorführung des Laserprinzips im Jahre 1960 durch Theodore H. Maiman läutete eine stürmische Entwicklung in der Erzeugung von kohärenten Lichtimpulsen bei 694 nm mit Hilfe eines blitzlampengepumpten Rubinlasers ein. Man sollte sich aber davor hüten, die Entwicklung des Lasers an wenigen Personen festzumachen.

## Zur Geschichte des Lasers

- 1899 O. Wiener weist stehende Wellen beim Licht nach.
- 1905 A. Einstein veröffentlicht Grundlagen zur Lichtquantentheorie.
- 1913 N. Bohr entwickelt sein Atommodell.
- 1916/1917 A. Einstein veröffentlicht eine Untersuchung über die Quantentheorie der Strahlung (stimulierte Emission mit einer gerichteten Ausstrahlung).
- 1920 J. Franck, P. Knipping und F. Reich entdecken einen sehr langlebigen Anregungszustand beim Heliumatom (metastabiler Zustand).
- 1923 W. Bothe entwickelt eine Theorie zur „Räumlichen Verteilung in der Hohlraumstrahlung.“
- 1928 R. Ladenburg regt in Gasentladungslampen stimulierte Emissionen an.
- 1930 R. Ladenburg und Kopfermann gelingt die zum Laserprinzip notwendige Inversion beim Neon in „stromstarken Entladungen“. Ladenburg und Levy benutzen zur Untersuchung der Linien ein Fabry-Perot-Interferometer. Dieses stellt eine Art Hohlraumresonator dar.
- 1932 Born beendet sein Werk „Optik - ein Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie“, das zur Pflichtlektüre für spätere Radartechniker wurde. Die Verknüpfung der Bereiche Hochfrequenztechnik und Optik wird eingeleitet. Die Interferenz, Kohärenz sowie stehende Wellen werden von Born ausführlich diskutiert, jedoch werden Emissionsvorgänge stets nur unter dem Energieaspekt betrachtet. Die „Rückkopplung“ bleibt offen.
- 1948 D. Gabor erfindet die Holographie, muss jedoch auf eine monochromatische und kohärente Lichtquelle verzichten.
- 1951 Ch. Townes regt an, einen Mikrowellengenerator auf der Grundlage der Schwingung eines Ammoniakmoleküls aufzubauen.
- 1953 Ch. Townes experimentiert erfolgreich mit einem Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation).
- 1956 N. Bloembergen verwendet paramagnetische Substanzen zum Masern.
- 1957 Ch. Townes schlägt die Ausdehnung des Frequenzbereiches des Masers zum Infrarot hin vor.
- 1958 F. Gundlach experimentiert mit einem Ammoniak-, einem Wasserstoff- und einem Rubin-Maser. Basov regt den Bau eines Halbleiterlasers an.
- 1959 Javan schlägt als Medium für einen kontinuierlichen Lichtverstärkungsprozess ein Gemisch aus zwei Gasen vor (Stöße zweiter Art).
- 1960 Th. Maiman betreibt den ersten „Impuls-Lichtverstärker“ mit einem Rubinkristall. Wenig später gelingt Javan zum ersten Mal eine Nachrichtenübertragung mit einem Helium-Neon-Laser.
- 1961 E. Snitzer kombiniert Lichtwellenleiter und Laser zur späteren Informationsübertragung.
- 1962 Es werden Halbleitermaterialien zur Herstellung von Laserdioden untersucht.
- 1966 Sorokin betreibt erstmalig einen Flüssigkeitslaser mit einem Rubinlaser als Pumplaser.
- 1970 Basov nimmt den ersten Excimerlaser in Betrieb.
- 1973 Laserdioden haben als Sendeelemente eine Lebensdauer von 1000 Stunden bzw. zirka 40 Tagen erreicht.
- 1983 Halbleiterlaser haben eine Lebensdauer von mehr als zwölf Jahren.
- 1985 Röntgenlaser emittieren bei 15 nm.
- 1989 Mikrolaser haben einen Durchmesser von einem Mikrometer.
- 1991 Halbleiterlaser emittieren im blauen Spektralbereich.
- 1996 Shuji Nakamura entwickelt die erste blaue Laserdiode.
- 1998 Hochleistungsdiodenlaser erreichen eine Leistung von 5 Watt.
- 2008 Femtosekundenlaser werden zur Behandlung von Sehschwächen eingesetzt.
- 2009 Nanolaser werden im Labor realisiert.
- 2010 Der Laser wird 50.

**Kasten 1:** Zur Geschichte des Lasers

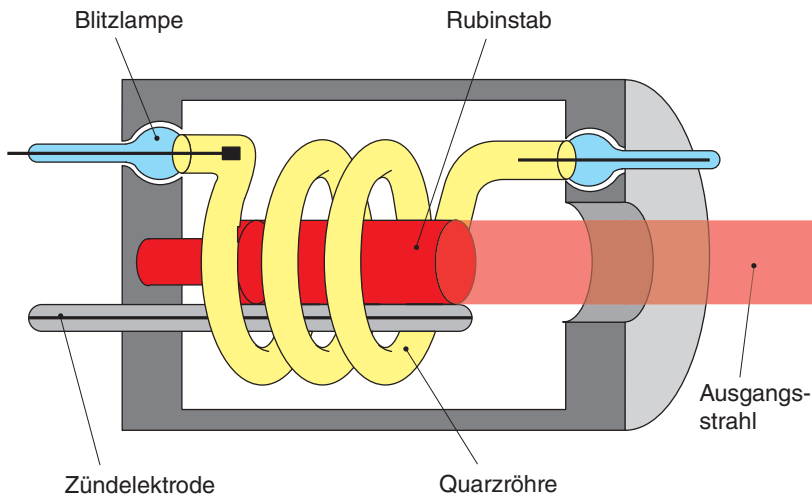


Abb. 1: Rubin-Laser nach Maiman [1]

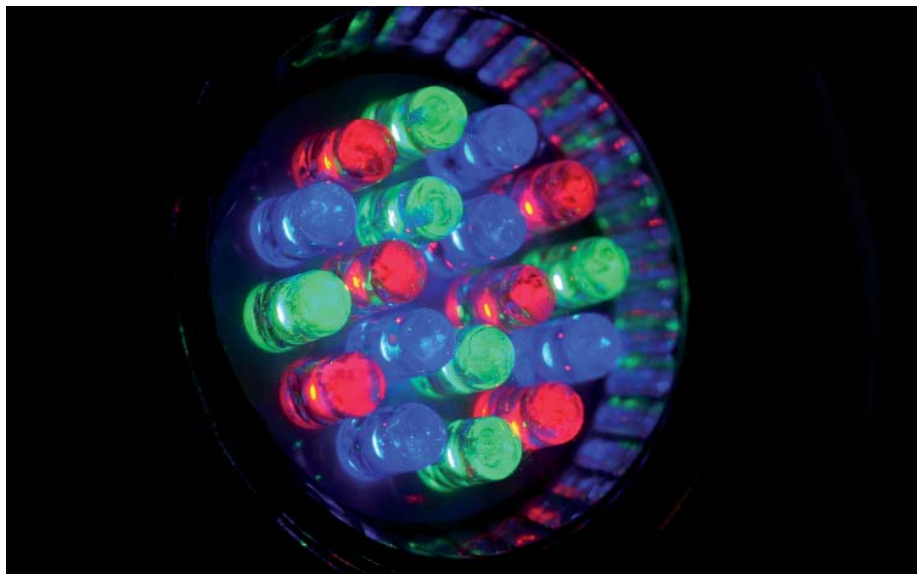


Abb. 2: LED-Farbwechselstrahler aufgenommen mit Langzeitbelichtung

Der Markt forderte von der neuen Lichtquelle stabile Betriebsbedingungen, eine lange Betriebsdauer und niedrige Betriebskosten. Der Laser ist mittlerweile in der Lage, dem Licht immer neue Eigenschaften aufzuprägen und ihm so neue Einsatzfelder zu erschließen.

## 2 Der Name ist der Prozess

Light amplification by stimulated emission of radiation steht für Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Die wesentlichen Komponenten sind das aktive bzw. verstärkende Material (Lasermedium), das durch optische Pumpen angeregt wird, und der optische Resonator zur Rückkopplung sowie zur Wellenlängenselektion.

Im aktiven Material befinden sich Atome oder Moleküle, die verschiedene Energiezustände über die Absorption oder die Emission von Licht annehmen können. Die Zufuhr von Energie kann eine Besetzungsinversion erzeugen, d. h., es befinden sich

mehr Atome oder Moleküle in einem höheren Energiezustand als im Grundzustand. Fällt nun Licht auf das angeregte Medium, so wird dann mit großer Wahrscheinlichkeit eine Emission von Strahlung erzwungen. Voraussetzung ist allerdings, dass die Frequenz des einfallenden Lichts genau der energetischen Differenz zweier Zustände eines Atoms oder Moleküls entspricht. Die emittierte Strahlung besitzt die gleiche Phase, Polarisations- und Ausbreitungsrichtung wie das eingestrahlte Licht.

Diese stimulierte Emission unterscheidet sich grundlegend von der spontanen Emission bei thermischen Lichtquellen wie zum Beispiel Glühlampen. Die induzierte Emission von Licht kann durch eine entsprechende geometrische Anordnung des aktiven Mediums auf einen bestimmten Raumwinkel begrenzt werden, indem die langgestreckte Bauweise das lawinenartige Anwachsen der Strahlung längs der Hauptachse begünstigt. Dennoch wird in den meisten Fällen der „Lasereffekt“ ausbleiben.

Baut man das Lasermedium in einen optischen Resonator (Kavität) ein, der im einfachsten Fall aus zwei senkrecht zur Hauptachse montierten Spiegeln besteht, so wird über viele Reflexionen das Licht seine Verweildauer im Medium deutlich erhöhen. Auf diese Weise wird die Strahlung effizient verstärkt – das System oszilliert.

Der optische Resonator sorgt neben der geeigneten Rückkopplung dafür, dass sich nur bestimmte stehende Wellen, sogenannte Moden, ausbilden können. Die Frequenz des Laserlichts wird über die Moden ausgewählt und sehr präzise festgelegt. Darüber hinaus bestimmt die Geometrie der Kavität die Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt sowie die Divergenz des ausgekoppelten Laserlichtbündels.

## 3 Fachdidaktische Konsequenzen für die Gedankenführung

Sowohl der forschende, als auch der nacherkundende Unterricht bieten sich hier als Methoden zur Erkenntnisgewinnung an. Das Laserprinzip induziert in besonderer Weise einen fruchtbaren Wechsel der Methode. Zusätzlich können historische Aspekte in diesem Unterrichtsgang interessante Akzente setzen. Dabei kann insbesondere das stationenorientierte Arbeiten zur Leitlinie werden.

Um das geniale „Prinzip der Selbstorganisation“ im Laser verstehen zu können, bedarf es bestimmter inhaltlicher Voraussetzungen. Dazu gehören auch Kenntnisse aus dem Bereich der Wellenoptik sowie die intensive Behandlung eines geeigneten Atommodells. Atomspektren im sichtbaren Bereich sollten ebenfalls über die Gas- bzw. Glimmentladung thematisiert worden sein. Folgende Themenbausteine bieten sich zur Gestaltung der Unterrichtsreihe an:

- Forschender Unterricht: Die Wechselwirkung von Licht und Materie – Absorption und Emission
- Informierender Unterricht: Die Besetzungsinversion
- Nacherfindender Unterricht: Der Laserresonator
- Informierender Unterricht: Die Lasertypen und ihre Perspektiven

Im Vordergrund der Diskussion sollten jedoch der He-Ne-Laser und mit Abstrichen der in der Technik häufig genutzte Halbleiterlaser stehen, um ein vereinfachtes Bild von den wichtigsten physikalischen Vorgängen im Laser zu erarbeiten. Auf den „Zufallsaser“, der ohne Resonator auskommt, soll in diesem Zusammenhang verzichtet werden.

Auf die KMK-Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht (hier: Umgang mit LASERN) sei an dieser Stelle ausdrücklich hingewiesen. Diese Richtlinien sind auch als GUV-Information (GUV-SI 8070) erschienen.

#### 4 Die Lumineszenz weist den Weg

*Was man sieht, erkennt man leichter.*

Die fundamentalen Vorgänge der Absorption und Emission von Licht sind für die Schülerinnen und Schüler über eine Vielzahl von Experimenten gut zu „erkennen“. Die Vorgänge in Plasmen besitzen nicht diese Transparenz, da der Pumpvorgang über die Elektronenstoßanregung den Beobachtern zunächst verborgen bleibt. Ausgangspunkt der Überlegungen sollte der Rubinlaser sein: Es handelt sich bei diesem blitzlampengepumpten Festkörperlaser um einen Fluoreszenzeffekt (Abb. 1).

Die Frage „Welche Vorgänge laufen bei der Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Atomen oder Molekülen ab?“ führt zu einer Reihe von Experimenten. Ziel ist die Untersuchung der wellenlängenabhängigen Absorption und anschließenden Emission von Licht. Zur Erarbeitung der Vorgänge im Lasermedium bieten sich die folgenden Versuche zur Lumineszenz an. Diese Versuche sollten an Experimentierstationen durchgeführt werden. Wegen der häufig knappen Unterrichtszeit bietet sich ggf. eine Auswahl an. Es kann auch arbeitsteilig in den Kleingruppen experimentiert werden. Die abschließende Präsentation aller Ergebnisse ist dann zwingend erforderlich.

Ein weiterer Vorteil der nachfolgend beschriebenen Schülerexperimente liegt in der Beliebigkeit der Stationen-Reihenfolge:

##### 4.1 Station zur optischen Anregung von Na-Atomen

###### Aufgabenstellung

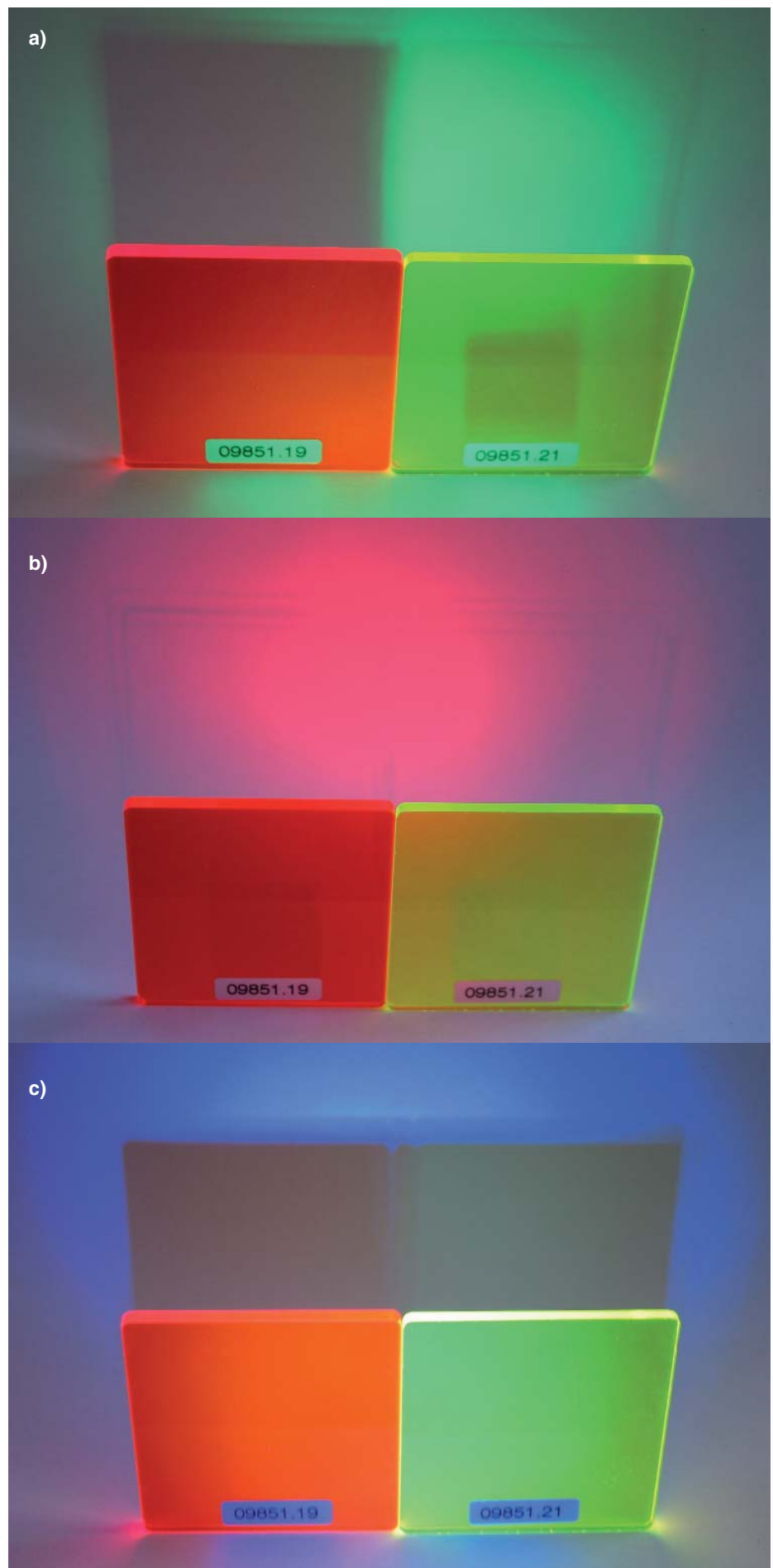
*Beobachte die mit Na-Dampf gefüllte Röhre, wenn das Na-Licht in den Glaskolben fällt.*

*Wiederhole das Experiment mit dem Licht des He-Ne-Lasers.*

*Versuche, die Flüssigkeit mit dem gelben Na-Licht und anschließend mit dem roten Laserlicht anzuregen.*

###### Experimentiermaterial

- 1 Na-Dampfampe mit Betriebsgerät
- 1 Na-Resonanzfluoreszenzröhre
- 1 Lochblende und 1 Sammellinse zur Erzeugung eines Na-Lichtbündels
- 1 He-Ne-Laser
- 1 Küvette oder Becherglas
- 1 Tischchen auf Stiel mit Dreifuß
- Fluoresceinlösung



**Abb. 3:** Fluoreszenzplatten im LED-Licht: a) Fluoreszenzplatten im grünen LED-Licht, b) Fluoreszenzplatten im roten LED-Licht und c) Fluoreszenzplatten im blauen LED-Licht

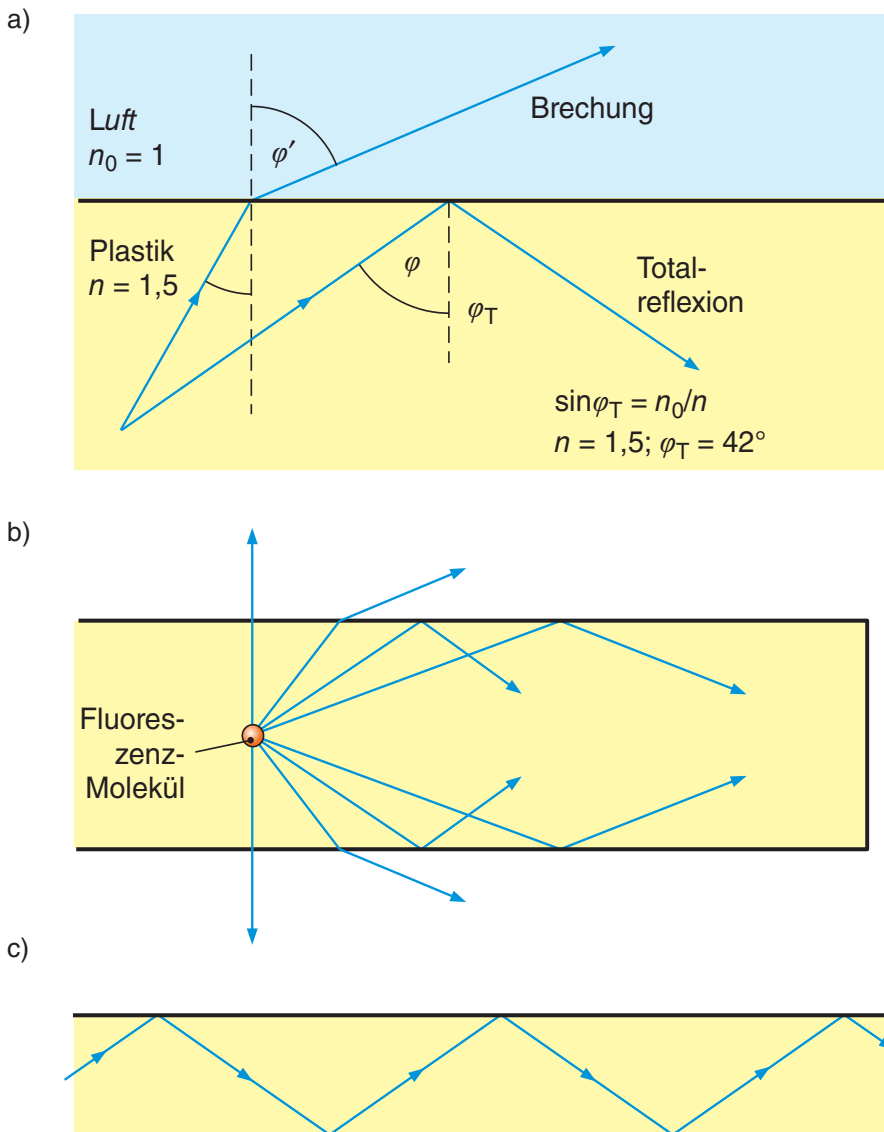
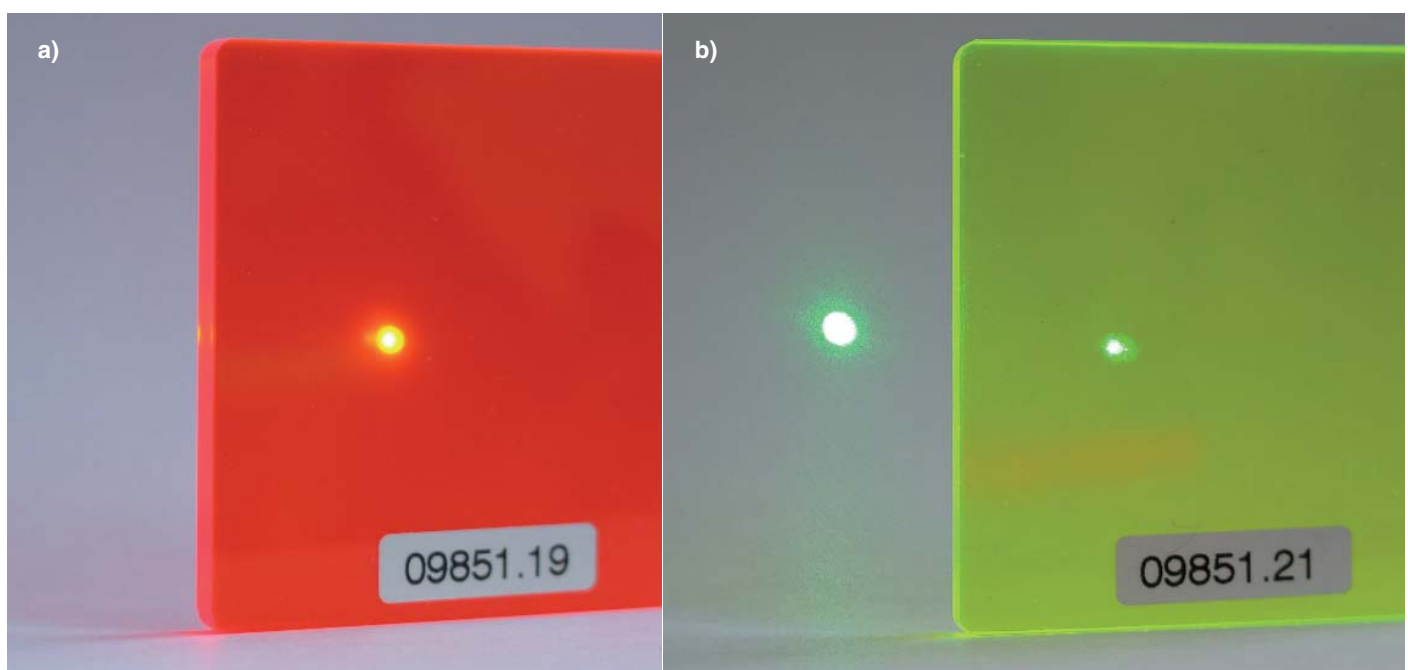


Abb. 4: Darstellung zur Totalreflexion des Fluoreszenzlichts

Abb. 5: Transmissionsexperiment mit Fluoreszenzplatten und grünem Laserlicht: a) Vollständige Absorption des Laserlichts und b) Partielle Absorption des Laserlichts



#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung

Dieses klassische Experiment bietet sich wegen der heißen „Na-Dampf-Komponenten“ als reines „Beobachtungsexperiment“ an. Das Fluorescein sollte in destilliertem Wasser auflöst werden. Aus Gründen der Sicherheit wird der Aufbau hinter Sicherheitsglas mit einem geeignetem Warnhinweis empfohlen.

Die Anregung von Natriumdampfe in einer geheizten Na-Resonanzfluoreszenzröhre gelingt mithilfe von Natriumlicht. Der Versuch der Anregung mithilfe von Laserlicht bei 632,8 nm dagegen nicht: nur gelbliches, aber kein rötliches Leuchten.

Das Licht der Natriumdampfampe und des He-Ne-Lasers durchläuft im zweiten Schritt eine kleine Küvette oder ein Becherglas mit einer Fluoresceinlösung: Die Lösung wird nicht angeregt. Diese kann dann in den Lichtweg vor die Resonanzfluoreszenzröhre auf einen kleinen Tisch gestellt werden.

#### 4.2 Station zur optischen Anregung eines Glaskörpers

##### Aufgabenstellung

Führe den Glaswürfel langsam parallel zur weißen Wand in einem Abstand von ca. 50 cm durch das Spektrum und beobachte dabei den Würfel und gleichzeitig das Spektrum.

##### Experimentiermaterial

- 1 Experimentierleuchte (50 W) mit Konvexlinse und Netzgerät oder besser
- 1 Diaprojektor (150 W)
- 1 Einfachspalt

- 1 Sammellinse
- 1 Rowland-Gitter oder Geradsichtprisma
- 1 weißer Schirm / weiße Wand
- 1 Uranglaswürfel

#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung

Ziel dieses Versuchs ist die Anregung eines Uranglaswürfels im Halogenlampenspektrum, erzeugt mit einem Rowland-Gitter als dispersives Element (objektive Methode), bei gleichzeitiger Beobachtung des Absorptionsspektrums. Dazu wird der Uranglaswürfel langsam durch das Spektrum vor der weißen Wand geführt: Nur im grünen, blauen und violetten Teil des Spektrums zeigt sich grünes Fluoreszenzleuchten im Würfel, gleichzeitig ein dunkler Schatten im entsprechenden Spektralbereich.

### 4.3 Station zur optischen Anregung von Fluoreszenzplatten

#### Aufgabenstellung

Beobachte die Fluoreszenz-Platten und deren Ränder, wenn das rote, grüne, blaue und weiße Licht des LED-Strahlers auf die Platten fällt.

Wiederhole das Experiment mit dem Licht des Lasers.

#### Experimentiermaterial

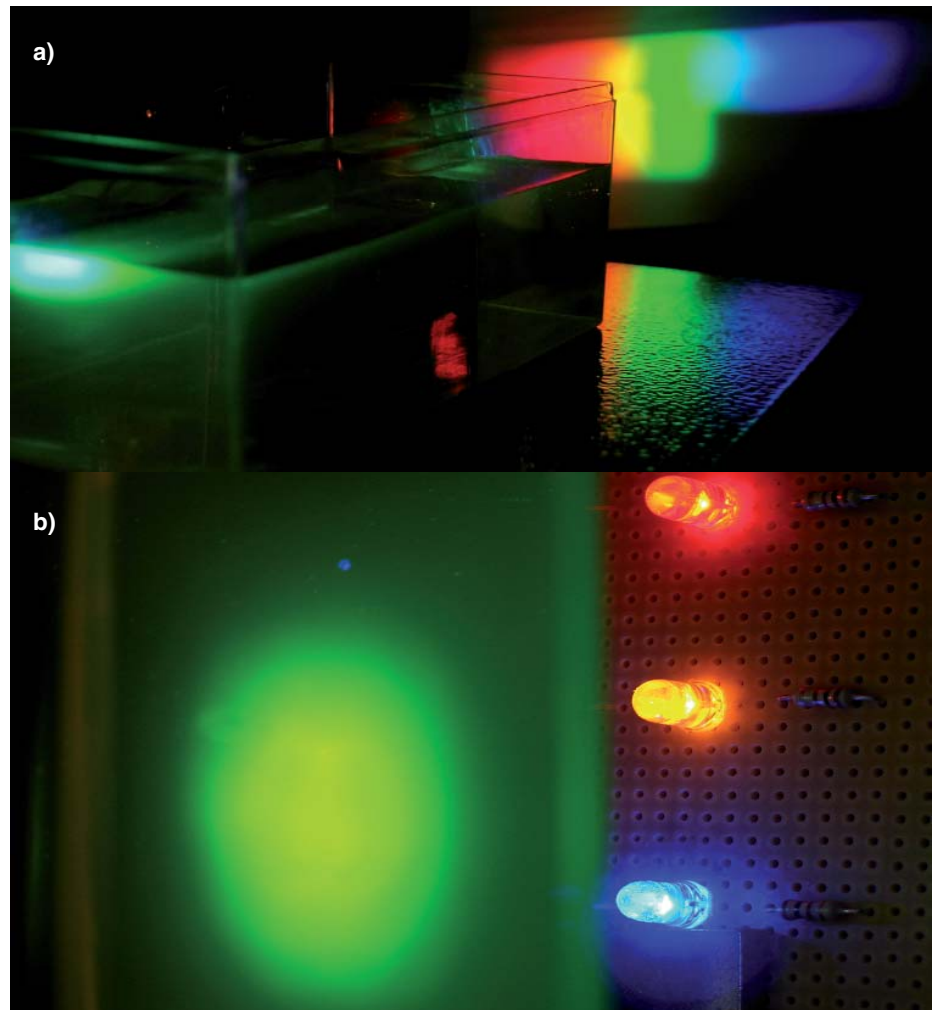
- 1 Satz Fluoreszenz-Platten aus dem Set „Schülerversuche Optik / Atomphysik für Sek II“ der Fa. PHYWE oder fluoreszierende Geodreiecke u. ä.
- 1 LED-Strahler (Osram 80001 color changing DECOSPOT LED PAR 16 CC Lampe mit automatischem Farbwechsel)
- 1 Laser (grün) oder 1 superhelle grüne LED mit Netzgerät
- 1 Blatt Papier (DIN A3)

#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung

Der Osram-LED-Strahler beleuchtet die fluoreszierenden Platten nacheinander mit verschiedenfarbigem Licht, die auf einem im „Schattenbereich“ sanft hochgezogenen weißen Blatt (DIN A3) stehen (Abb. 3). Dabei darf die Beobachtung der Plattenseiten/Ränder hinsichtlich der Leuchterscheinungen nicht vergessen werden (Abb. 4).

Die Anregung von fluoreszierenden Platten erfolgt mit grünem Laserlicht (z. B. mit dem für Schulen zugelassenen diodengepumpten frequenzverdoppelten Yttrium-Vanadat-Festkörperlaser der Fa. PHYWE) oder Licht einer superhellen grünen LED.

Beim Einsatz des grünen Lasers (Betrieb im 0,2 mW-Modus!) müssen die fluoreszierenden Materialien so positioniert werden, dass reflektiertes Laserlicht nicht in die Augen der Beobachter fallen kann.



**Abb. 6:** Transmissionsexperiment mit einer Fluoresceinlösung und verschiedenfarbigem Licht: (a) Vergleich des vollständigen Halogenlichtspektrums mit dem Absorptionsspektrum und (b) Wechselwirkung von verschiedenfarbigem LED-Licht mit einer Fluoresceinlösung

### 4.4 Station zur optischen Anregung einer Flüssigkeit

#### Aufgabenstellung

Beobachte den Verlauf des farbigen Lichts in der Flüssigkeit und das Spektrum auf der weißen Wand.

#### Experimentiermaterial

- 1 LED-Strahler (Osram 80001 color changing DECOSPOT LED PAR 16 CC Lampe mit automatischem Farbwechsel)
- 1 Experimentierleuchte (50 W) mit Konvexlinse und Netzgerät oder besser 1 Diaprojektor (150 W)
- 1 Einfachspalt
- 1 Sammellinse
- 1 Rowland-Gitter oder Geradsichtprisma
- 1 weißer Schirm / weiße Wand
- 1 Küvette
- 1 Tischchen auf Stiel mit Dreifuß
- Fluoresceinlösung

#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung

LEDs verschiedener Farben bieten sich ebenfalls als Lichtquellen an, wenn auf den

Spektrometer-Aufbau verzichtet werden soll. Der oben genannte Osram-LED-Strahler stellt auch hier eine komfortable Alternative dar.

Die Spektralfarben des Halogenlampenlichts (Rowland-Gitter als dispersives Element einsetzen!) durchsetzen zum Teil eine mit einer Fluoresceinlösung gefüllte Küvette in Richtung ihrer Hauptachse: Der violette, blaue und grüne Anteil des Lichts wird längs des Lichtweges zunehmend absorbiert (Abb. 6).

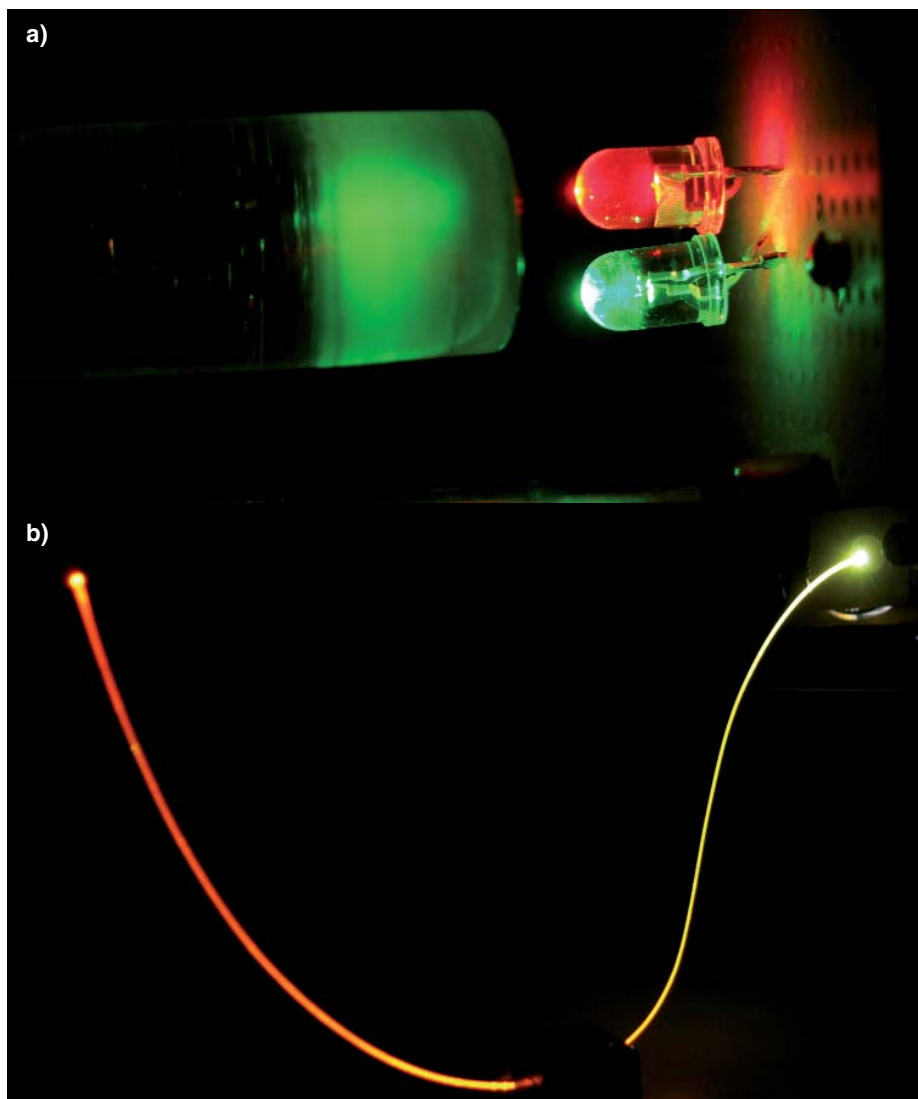
### 4.5 Station zur optischen Anregung eines Lichtwellenleiters

#### Aufgabenstellung

Beobachte den Verlauf des farbigen Lichts im Lichtwellenleiter.

#### Experimentiermaterial

- 1 Experimentierleuchte mit 50 W Leistung sowie Konvexlinse und Netzgerät oder besser 1 Diaprojektor mit 150 W Leistung
- 1 Lochblende
- 1 fluoreszierender Lichtwellenleiter



**Abb. 7:** Optische Anregung eines fluoreszierenden Lichtwellenleiters: a) Einkopplung von rotem und grünem LED-Licht in einen LWL und b) Absorption der kurzwelligen Anteile des Halogenlichts im Lichtwellenleiter längs des Lichtweges

#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung

Eine Lochblende, die auf den LWL an dessen Stirnfläche gesteckt und unmittelbar vor der Linse des Diaprojektors positioniert wird, verhindert weitgehend das störende Streulicht.

In einen fluoreszierenden Lichtwellenleiter<sup>1</sup> wird Halogenlampenlicht eingekoppelt: Der Lichtwellenleiter (LWL) leuchtet längs des Lichtweges grün bis orange. Die Stirnfläche am Ende des Lichtwellenleiters leuchtet orange/rot. Es wird auf diese Weise deutlich, dass das für eine „erfolgreiche“ Anregung notwendige hinreichend energiereiche kurzwellige Licht längs des Lichtwellenleiterweges zunehmend fehlt.

<sup>1</sup>Bezugsquellen: [www.magic-light.de/shop](http://www.magic-light.de/shop) oder <http://shop.schwarzlicht.de/>

Schwarzlicht-Zubehoer/UV-Staebe sowie <http://shop.schwarzlicht.de/Schwarzlicht-Zubehoer/UV-Schnur/PVC-Schnur>

#### 4.6 Station zur optischen Anregung von Farbschichten

##### Aufgabenstellung

Spektroskopiere das von den Leuchtfarben emittierte Licht (subjektive Methode), nachdem du die Farbschichten mit dem Licht einer Halogenlampe angeregt hast.

##### Experimentiermaterial

- 1 Karton mit Leuchtfarben
- 1 Experimentierleuchte (50 W) mit Netzgerät
- 1 Spaltblende
- 1 Rowland-Gitter

#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung:

Ein Karton mit verschiedenen Leuchtfarben, die hinreichend lange nachleuchten, wird mit Halogenlampenlicht beleuchtet und anschließend subjektiv spektroskopiert: Es sind verschiedene kontinuierliche Spektren/Bandspektren zu beobachten.

Nach der jeweiligen Belichtung hilft ein auf die betreffende Leuchtschicht gelegter Einfachspalt aus einem Optik-Experimentierset bei der subjektiven Spektroskopie.

#### 4.7 Station zur optischen Anregung von Ne-Atomen

##### Aufgabenstellung

Beobachte das mit Neon gefüllte Röhrrchen, wenn das Licht des He-Ne-Lasers und anschließend der Taschenlampe in den Glaskolben fällt. Unterbreche dabei auch kurzzeitig das Licht.

##### Experimentiermaterial

- 1 Halogentaschenlampe
- 1 Neonröhrrchen (Glimmlampe) mit Halter
- 1 He-Ne-Laser

#### Hinweis zum Aufbau und zur Durchführung

Das mit Neon gefüllte Röhrrchen (Glimmlampe) wird mit Laserlicht der Wellenlänge 632,8 nm und anschließend mit Halogenlicht einer Taschenlampe beleuchtet: Es ist kein rötliches Leuchten des Edelgases im Innern des Röhrrchens zu beobachten, da die Ne-Atome sich nicht in dem für den Laser-Übergang erforderlichen Energieniveau befinden.

Das Röhrrchen ist am besten in dem dafür vorgesehenen Halter so zu fixieren, dass etwaiges Laserlicht nach unten reflektiert wird. Der Laser ist auch hier im 0,2 mW-Modus zu betreiben.

#### 4.8 Anmerkung zu den Experimenten

Diese Versuche sollten der Lerngruppe „gleichzeitig“ angeboten werden, um auf diese Weise allen Schülerinnen und Schülern die Kleingruppenarbeit zu ermöglichen.

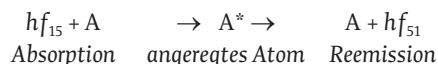
Den Versuchen ist insgesamt zu entnehmen, dass die Absorption der einfallenden Strahlung von deren Wellenlänge und damit von deren Energie und dem absorbierenden Medium mit den Energiezuständen seiner jeweiligen Bausteine abhängig ist. Daneben kann Materie auch über längere Zeit die aufgenommene Energie speichern und in Form von Licht wieder emittieren. Dabei sind die Emissionsbanden materialabhängig.

#### 5 Wechselwirkung mit Struktur

Die Deutung der Experimente verlangt eine elementare Darstellung. Die Experimente sowie der gesamte Unterrichtsgang würden andernfalls ihren fachdidaktischen Wert verlieren und den Laserprozess verschleiern.

Bei allen Lumineszenzvorgängen werden Atome oder Moleküle durch Zufuhr

von Energie (Licht geeigneter Wellenlänge bzw. Frequenz:  $hf_{14}$ ) in angeregte Zustände versetzt, die einfallende Strahlung wird entsprechend geschwächt. Die Reemission von Licht führt nach sehr kurzer Zeit ( $10^{-7}$  bis  $10^{-9}$ s) gegebenenfalls auch über Zwischenzustände die Bausteine in den Grundzustand (Abb. 8). Tritt ein Übergang vom höchsten angeregten Energiezustand in den Grundzustand auf, spricht man von Resonanzfluoreszenz: Experiment mit dem Natriumdampf.



Die Fluoreszenzstrahlung ist die Folge spontaner Emissionen, sie ist inkohärent und wird bei entsprechender geometrischer Anordnung des Mediums in alle Raumrichtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausgesandt. Die Experimente führen unmittelbar zur Stokes'schen Regel:

$$hf_E \leq hf_A \text{ bzw. } f_E \leq f_A.$$

Insbesondere die Versuche mit dem Uranglaswürfel und der Fluoresceinlösung veranschaulichen in besonderer Weise diese Erkenntnis. So ist es leicht nachzuvollziehen, dass Fluoreszenzstrahlung im Allgemeinen nicht monochromatisch ist und bei hohen Anregungszuständen mehrere Spektrallinien gleichzeitig auftreten.

Den fluoreszierenden Lichtwellenleiter kann man in gewisser Weise als erstarrte Fluoresceinlösung auffassen. Diese absorbiert und reemittiert längs des Weges immer dann Strahlung, wenn deren Frequenz hinreichend groß ist. Die Folge dieses Wechselgeschäfts ist aber, dass der kurzwellige Anteil des Lichts nicht erhalten bleibt und somit über die Totalreflexion am Ende nur noch der langwellige Teil reflektiert wird (Abb. 4).

Dieses Tauschgeschäft bzw. dieser Wellenlängenwandler ist in dieser Form noch nicht der Schlüssel zum Laserprozess. Die um den Rubinstab gewickelte Blitzlampe war offenbar das Ergebnis erfolgreicher Überlegungen.

Die Schülerinnen und Schüler entdecken in der Regel keine Linienspektren. Die Moleküle besitzen durch zusätzliche Schwingungs- und Rotationsmöglichkeiten eine Vielzahl von Energieniveaus, so dass feste und flüssige Substanzen breite Bandenspektren emittieren (Abb. 9). Nur „ruhende“ Edelgasatome besitzen scharfe Energieniveaus und erzeugen entsprechende Linienspektren. Schon in der Glimmentladung können Doppler-Verbreite-

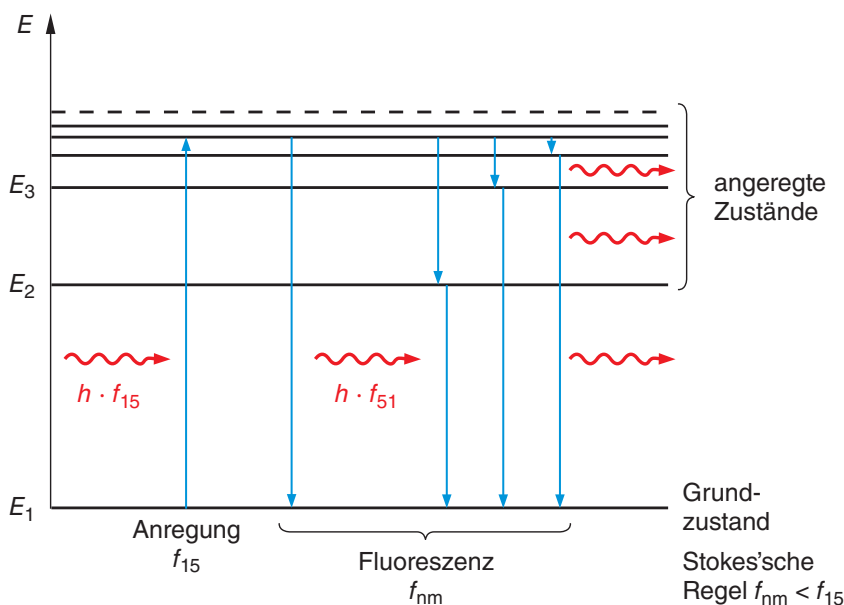


Abb. 8: Übergänge im Energie-Termschema für Lichtabsorption und Lichtemission

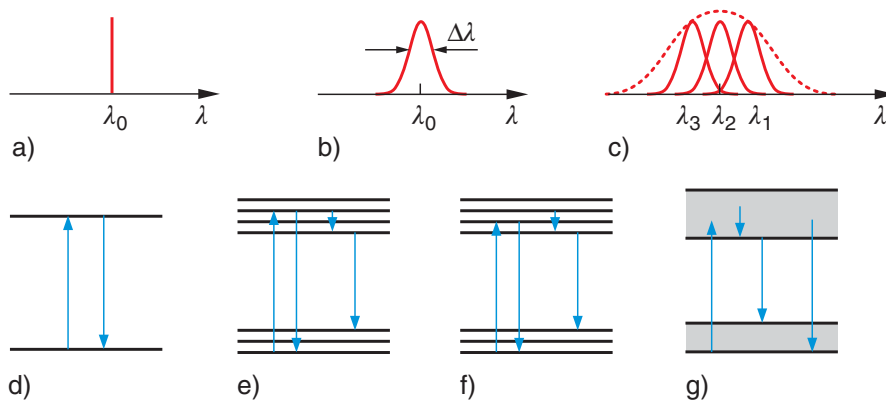


Abb. 9: Veränderungen vom Linienspektrum idealer Atome bis zum kontinuierlichen Spektrum fester Körper

rungen festgestellt werden. Molekülgase besitzen verbreiterte Energierterme, die sich überlappen. Dazwischen bilden sich Bandlücken aus. Interbandübergänge führen zur Emission von Infrarotstrahlung. Strahlungsübergänge führen direkt zur Umwandlung in Wärme oder bei einem Zusammenstoß mit einem anderen Molekül in kinetische Energie der beiden Moleküle.

**Fazit:** Atome oder Moleküle eines Mediums können mit Licht geeigneter (hinreichend kleiner) Wellenlänge angeregt werden. Eine axiale Verstärkung des Strahlungsfeldes findet aber nicht statt. Von einer Monochromasie des Lichts kann noch nicht gesprochen werden. Lediglich eine geführte Strahlung kann bei der langgestreckten Führung des Mediums beobachtet werden.

### 5.1 Inversion als Schlüssel zur Lichtverstärkung

Die erzwungene Aussendung von Licht, die stimulierte oder induzierte Emission mit einer gerichteten Ausstrahlung, fehlt bei al-

len Experimenten in einem hinreichenden Maß. Das gezielte Abrufen von Licht in einem Medium macht es normalerweise erforderlich, in der Gesamtheit der Atome oder Moleküle ein höheres Energieniveau systematisch stärker zu besetzen als ein niedrigeres. Diese sogenannte Besetzungsinversion lässt sich auch über das optische Pumpen erreichen. In einem Zwei-Niveau-System kann über die Wechselwirkung zwischen dem Strahlungsfeld und den atomaren Systemen maximal eine Gleichbesetzung der beiden Energieniveaus erreicht werden. Leider finden dann aber gleich viele Übergänge zwischen den Niveaus in Form von Absorption und Emission statt.

Da für eine Verstärkung beim Lichtdurchlauf sehr viele angeregte Atome benötigt werden, muss das Lasermedium mindestens drei Energieniveaus besitzen, besser aber vier Niveaus (Abb. 10). Mit der letzten Konstellation lässt sich leichter eine Inversion erzielen. Diese stellt sich aber erst ein, wenn sich mehr als 50% der Atome in einem angeregten Zustand be-

finden. Das oberste Energieniveau wird durch selektive Energiezufuhr besetzt. Das Atom soll durch Energieabgabe mit größerer Wahrscheinlichkeit in das metastabile Zwischenniveau übergehen als in den Grundzustand zurückzukehren.

### 5.2 Licht auf Abruf

Welche Prozesse laufen in einem Medium ab, nachdem eine Besetzungsinversion erzeugt wurde?

Diese Problemstellung liefert einen hervorragenden Anlass, in Kleingruppenarbeit die einzelnen Schritte noch einmal zu rekapitulieren:

- Strahlung hinreichend kleiner Wellenlänge wird beim Durchlaufen des Mediums geschwächt: Absorption von Strahlung mit der Energie

$$hf = \Delta E = E_2 - E_1.$$

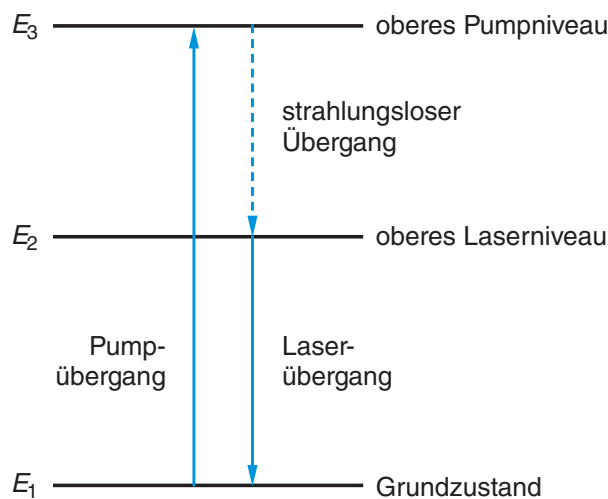
- Spontane Reemission der absorbierten Energie in alle Raumrichtungen.
- Die Strahlung ist polychromatisch, unkorreliert und besitzt eine beliebige Polarisationsrichtung.
- Induzierte Emissionen in benachbarten Zonen.
- Lawinenartiges Anwachsen der Strahlung in axialer Richtung bei entsprechender geometrischer Anordnung des Mediums und damit die Verstärkung des Strahlungsfeldes um die Energie  $\Delta E$ .

Ziel muss es sein, die Besetzungszahl des oberen Laserniveaus hinreichend stark ansteigen zu lassen. Flankierend wird diese Situation unterstützt, wenn das obere Laserniveau eine längere und das untere Laserniveau eine kürzere mittlere Lebensdauer besitzt.

Experimentell lässt sich das Abrufen von Strahlung mit einem sehr einfachen Modellversuch aus dem Bereich der Kristalllumineszenz zeigen:

Ein Zinksulfid-Leuchtschirm wird mit Halogenlampenlicht bestrahlt. Elektronen werden vom Valenzband in das Leitungsband gehoben. Vom Leitungs-

### Laser mit drei Energieniveaus



### Laser mit vier Energieniveaus

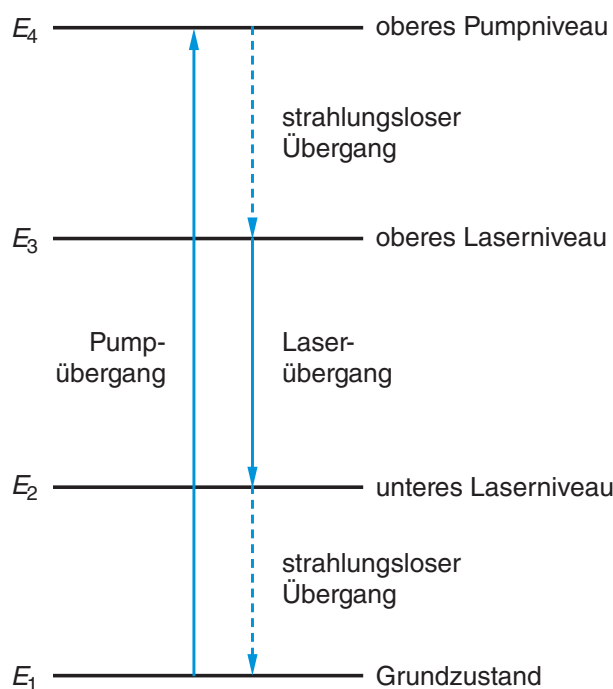


Abb. 10: Erläuterungen zur Besetzungsinversion

Abb. 11: LICHT-Spur unmittelbar nach „Abruf“ der gespeicherten Energie



band aus gelangen die Elektronen in ein schmales Energieband dicht unterhalb des Leitungsbandes, wo sie metastabil verweilen. Erst eine entsprechende Energiezufuhr durch Licht geeigneter Wellenlänge ermöglicht einem Elektron die Rückkehr in das Leitungsband und danach die Freisetzung von Rekombinationsstrahlung.

Fällt ein Laserlichtbündel auf den grün phosphoreszierenden Schirm, leuchtet dieser an der bestrahlten Stelle hell auf und erscheint dort bald danach gegenüber der Leuchtschirmumgebung dunkel. Dabei kehrt der Kristall in seinen Grundzustand zurück. Die gespeicherte Energie wurde also durch das auftreffende Licht abgerufen.

Ein erneutes Anregen der Atome an der „ausgeleuchteten“ Stelle mit Hilfe des HeNe-Laserlichts gelingt natürlich nicht, da der Bandabstand ca. 3,7 eV und die Quantenenergie des Laserlichts nur ca. 2 eV beträgt.

### 5.3 Gewinn durch Rückkopplung

Wie gelingt es, zur besseren Ausnutzung des aktiven Lasermediums die Aufenthaltsdauer der elektromagnetischen Strahlung im Lasermedium zu erhöhen und gleichzeitig Licht mit einer bestimmten Wellenlänge und einer bestimmten Ausbreitungsrichtung zu selektieren?

Eine technische Lösung besteht in einem wiederholten Durchlauf der Strahlung, erzeugt mit Hilfe eines Spiegelsystems. Dieses besteht aus einem hochreflektierenden und einem teilreflektierenden Spiegel – es soll ja schließlich auch Energie ausgekoppelt werden.

Legt man das Wellenmodell zugrunde, so betrachtet man die Interferenz entgegenlaufender Wellen gleicher Wellenlänge. Ist der Spiegelabstand gleich dem ganzzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge, dann bildet sich eine stehende Welle aus (Abb. 12). Die effektive Länge dieses Fabry-Perot-Resonators ist das Produkt aus der geometrischen Länge  $l$  und dem Brechungsindex  $n$  des aktiven Me-



diums. Diese Anordnung selektiert also immer dann durch konstruktive Interferenz, wenn gilt:

$$m\lambda/2 = nL, m \in \mathbb{N}.$$

Die Resonatorlänge kann in der Praxis im Meterbereich liegen. Laserlicht im roten Spektralbereich „lebt“ in diesem Fall für  $n = 1$  mit 3 bis 4 Millionen Wellenbäuchen innerhalb des optischen Resonators.

Die stehenden Wellen werden auch als longitudinale Moden des Resonators bezeichnet. Liefert das Lasermedium eine Emissionsbande, so ist das Spektrum des Lasers durch eine Folge von eng benachbarten Linien gekennzeichnet (Abb. 13), wobei die höchste Intensität im Maximum der Emission liegt. Jedoch verlaufen nicht alle Wellenzüge exakt parallel zur Achse: Jeder longitudinale Mode besitzt zusätzlich einen transversalen Mode.

Für spezielle Anwendungen des Lasers als „LICHT-Werkzeug“ ist das Strahlprofil von Bedeutung. Je nach Konstruktion des Resonators können quer zum Strahl Intensitätsmaxima auftreten. Existieren gleichzeitig sehr viele transversale Moden (Multi-Mode-Betrieb), ist das Lichtbündel lediglich für große Energieübertragungen geeignet, wie zum Beispiel zum Schweißen von Werkstücken. Eine tiefergehende Analyse der transversalen Moden (TEM) sprengt jedoch den unterrichtlichen Rahmen. Für die meisten Anwendungen ist ohnehin nur der Grundmode interessant, dessen Intensität in radialer Richtung gemäß dem Quadrat einer Gausskurve abfällt (Abb. 14).

#### 5.4 Das besondere Licht - Atome senden im Gleichtakt

Welche Eigenschaften zeichnen das Laserlicht aus?

Die bekannten Lichtquellen wie zum Beispiel Glühlampen, Leuchtstofflampen, Kerzenflammen etc. sind „Chaoten“ im Hinblick auf die Emission von Strahlung. Die unkorrelierte Aussendung von polychromatischem Licht (sehr kurze Wellenzüge) seitens der beteiligten Atome oder Moleküle führt zu inkohärentem Licht.

Die stimulierte Emission und die Rückkopplung bilden die Grundlage zur Synchronisation der Atome im Hinblick auf ihre „Sendetätigkeit“. Die Stabilität des Schwingungsmodes ist ein Beispiel dafür, dass in Nichtgleichgewichtssystemen eine Ordnung durch Energiezufuhr erzeugt und aufrechterhalten werden kann: Der Selbstorganisationsprozess im Resonator erzwingt eine taktgemäße Ordnung.

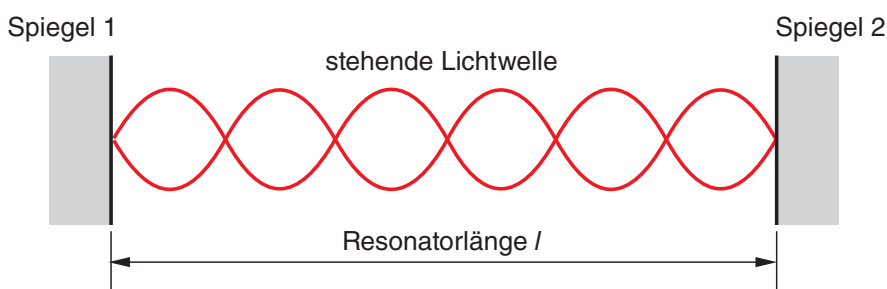


Abb. 12: Stehende Lichtwelle in einem optischen Resonator mit einem sehr hoch reflektierenden Spiegel 1 und einem Spiegel 2 mit einem etwas geringeren Reflexionsgrad

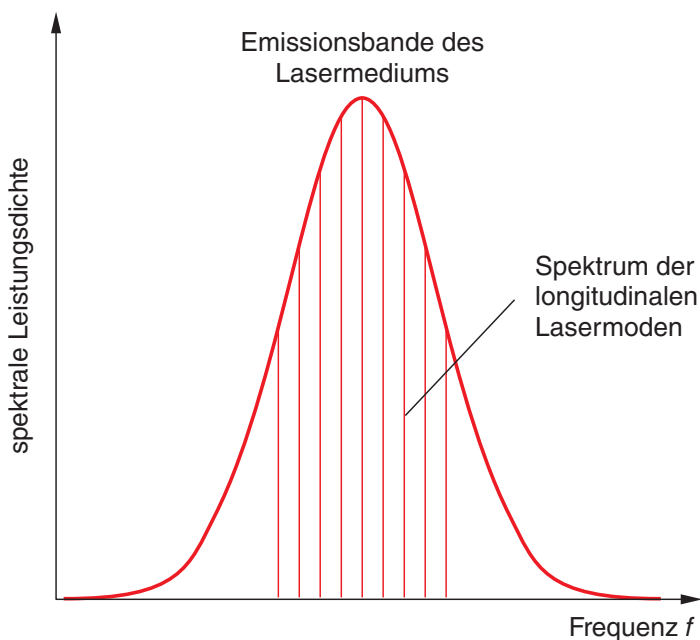


Abb. 13: Spektrum der longitudinalen Lasermoden

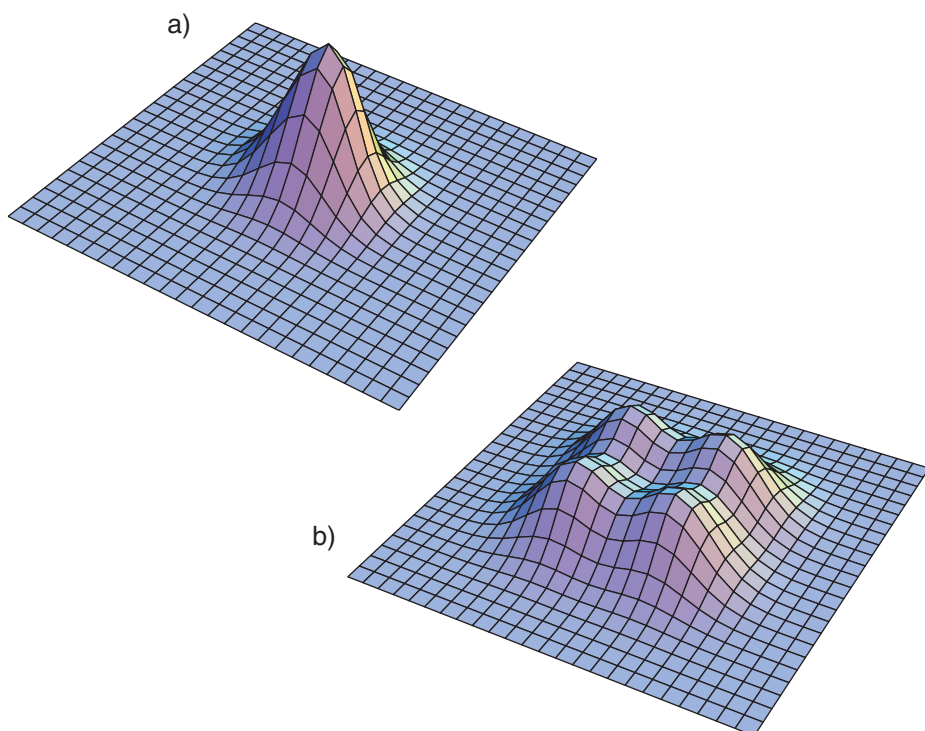


Abb. 14: Strahlprofil von Laserstrahlung mit verschiedenen Moden: Grundmode TEM00 (a), Überlagerung vieler Moden (b) [2]

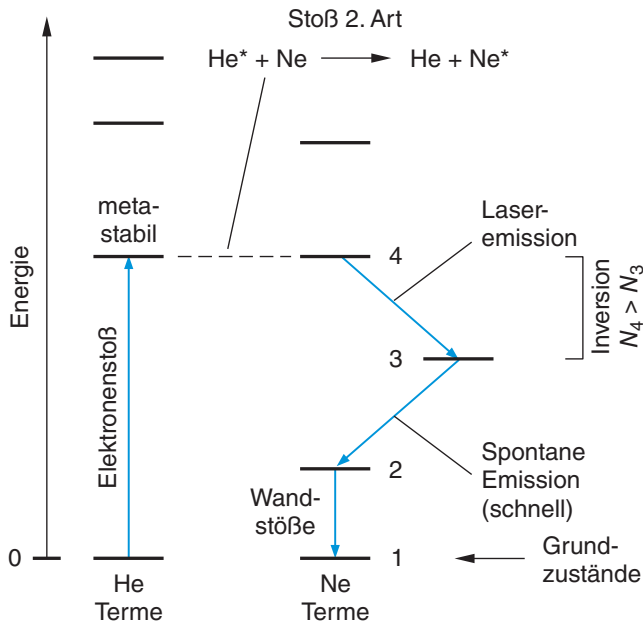


Abb. 15: Schematisches Termschema eines He-Ne-Lasers

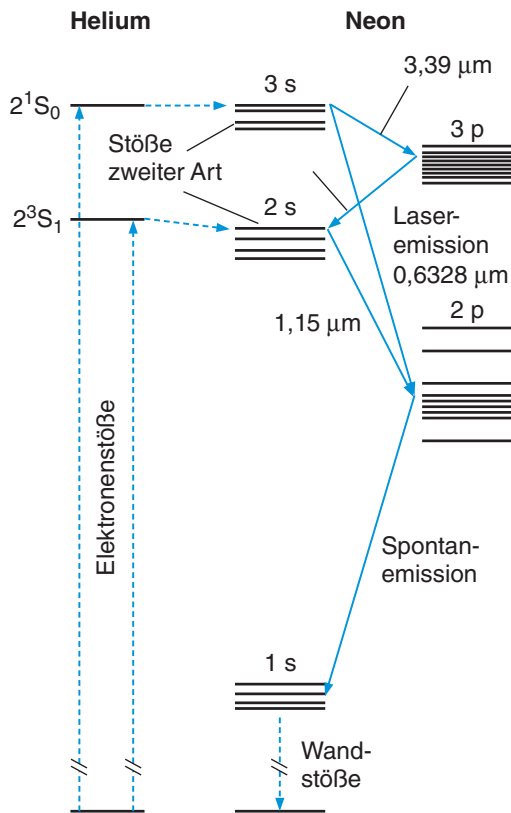


Abb. 16: Energieniveauschema des He-Ne-Lasers

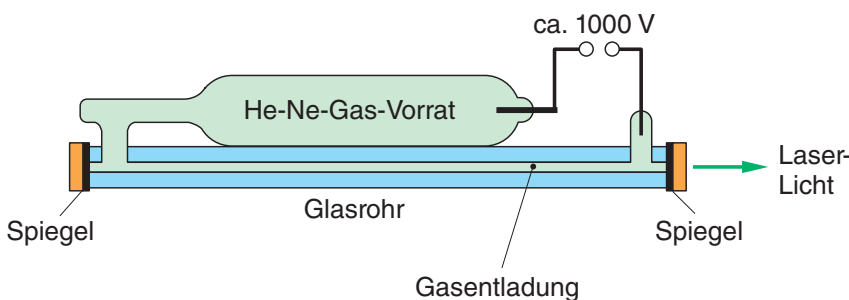


Abb. 17: He-Ne-Laserrohr im Betrieb

## 6 Der Helium-Neon-Laser

Vielfach haben Schülerinnen und Schüler den He-Ne-Laser im unterrichtlichen Einsatz erlebt. Es liegt auf der Hand, dass dieser Lasertyp dann auch stellvertretend für Gaslaser diskutiert werden sollte.

Dieser Edelgaslaser war der erste kontinuierlich arbeitende Laser. Begünstigt durch Vorerfahrungen mit der Fertigungstechnik von Radio- und Fernsehöhren lief eine Massenproduktion an. Bis heute ist er konkurrenzlos hinsichtlich der Strahlgeometrie und der Modenreinheit.

### 6.1 Energie mit Niveau

Die Abbildung 15 zeigt ein vereinfachtes Termschema mit den Niveaus, die für das Verständnis des Anregungsprozesses und das Entstehen der Laserlinie bei 632,8 nm von Bedeutung sind.

Das Lasermedium, bestehend aus einem Gemisch der Edelgase Helium und Neon in einem Verhältnis von 10 : 1, befindet sich in einem Kapillarrohr (Durchmesser ca. 4 mm) mit seitlich angeflanschem Vorratsgefäß. Die Anregung der Heliumatome erfolgt in einer Niederdruckentladung über Elektronenstöße bei einer Spannung von mehreren 1000 Volt. Die ersten angeregten Zustände  $2^1S_1$  und  $2^1S_0$  sind metastabil – also langlebig. Über Atomstöße der zweiten Art, bei denen angeregte Heliumatome wieder in den Grundzustand gelangen, wird die Anregungsenergie auf Neonatome übertragen, obwohl der  $2^1S_0$ -Zustand etwas unterhalb des 3s-Niveaus des Neons liegt (Abb. 16). Die zusätzliche thermische Energie reicht aus, diese Lücke zu überwinden.

Die mittleren Lebensdauern der s-Zustände des Neons sind etwa 10-mal länger als die der p-Zustände; die wichtigste Voraussetzung für eine Besetzungsinversion ist also erfüllt. Das Helium dient lediglich als Pumpgas. Der 2p-Zustand wird durch spontane Emission schnell in den 1s-Zustand entleert. Der Rohrdurchmesser beeinflusst die Entleerung des 1s-Zustandes und damit die Leistung des Lasers. Das Vier-Niveau-System ist die Grundlage dieses Dauerstrichlasers.

Die Selektion von Wellenlängen ist aus zwei Gründen unerlässlich: Entweder liefert das Lasermedium unerwünschte Wellenlängen oder der Laser unterdrückt Wellenlängen, die nur dann oszillieren können, wenn eine bestimmte Wellenlänge nicht oszilliert. Letzteres trifft für diesen Edelgaslaser zu. Weil die sichtbaren Linien vom selben Energieniveau starten, konkurrieren diese Linien untereinander. Die Linie, die die geringere Schwelle besitzt, os-

zilliert als erste und baut somit die Inversion für diesen speziellen Übergang ab.

Der optische Resonator wird häufig mit konkaven Spiegeln gebildet (Abb. 17). Sind sie nicht direkt mit dem Rohrende verbunden, bilden Brewster-Fenster den Abschluss. Die Folge ist ein linear polarisiertes Laserlicht.

Von einer effizienten Lichterzeugung kann man beim He-Ne-Laser auf keinen Fall sprechen. Sein effektiver Wirkungsgrad liegt bei 0,1 %, die Ausgangsleistung häufig nur bei einigen Milliwatt.

**Hinweis:** Das Plasmabündel sollte unbedingt subjektiv mit einem Gitter spektroskopiert werden (Abb. 18). Das linienreiche Spektrum zeigt, wie wirksam die Wellenlängenselektion „funktioniert“ (Abb. 19). An dieser Stelle sei der Beitrag von R. Flehr und M. Frenzel empfohlen [4].

## 6.2 Das offene System, der He-Ne-Laser mit Einblick

Die Firma PHYWE Systeme GmbH, Göttingen, bietet nunmehr neben einem CO<sub>2</sub>- und einem Nd-YAG-Laser einen Helium-Neon-Laser mit frei zugänglichem Resonator an (Abb. 20). Diese Anordnung bietet dem Beobachter ein Maximum an Transparenz und Experimentiermöglichkeiten, um den Laserprozess zu verstehen.

## 7 Die Halbleiterlaser

Lichtemittierende Dioden erfahren einen vielfältigen technischen Einsatz im Bereich der Unterhaltungselektronik, Informations- und Kommunikationstechnik. Die kompakte Bauform und ausgereifte Methoden der mikroelektronischen Massenproduktion machen diese Lichtquelle für den Anwender besonders interessant. Hinzu kommt, dass die Halbleiterlaser den grünen und blauen Spektralbereich erschließen. Die Laserdiode ist in den folgenden Bereichen einsetzbar:

- Sender in optischen Netzen
- Optische Massenspeicher (CD-Rom, CD-RW, DVD etc.)
- Optische Drucker
- Scanner
- Opto-Koppler
- Optische Computer
- Materialbearbeitung
- Medizin (Diagnostik, Therapie)
- Messtechnik
- Strukturerzeugung (Einleitung chemischer Reaktionen)
- Pumpen von Festkörperlaser
- Displaytechnik

Aus bekannten Gründen (Kosten- und Sicherheitsaspekte) ist die Durchführung

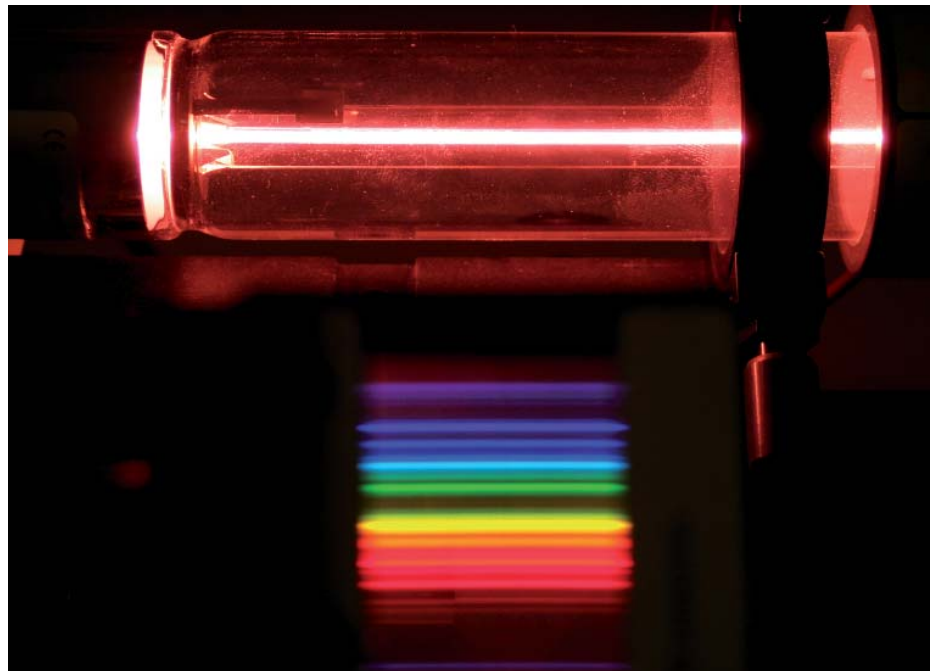


Abb. 18: Spektrum des angeregten Plasmas im Laserkanal

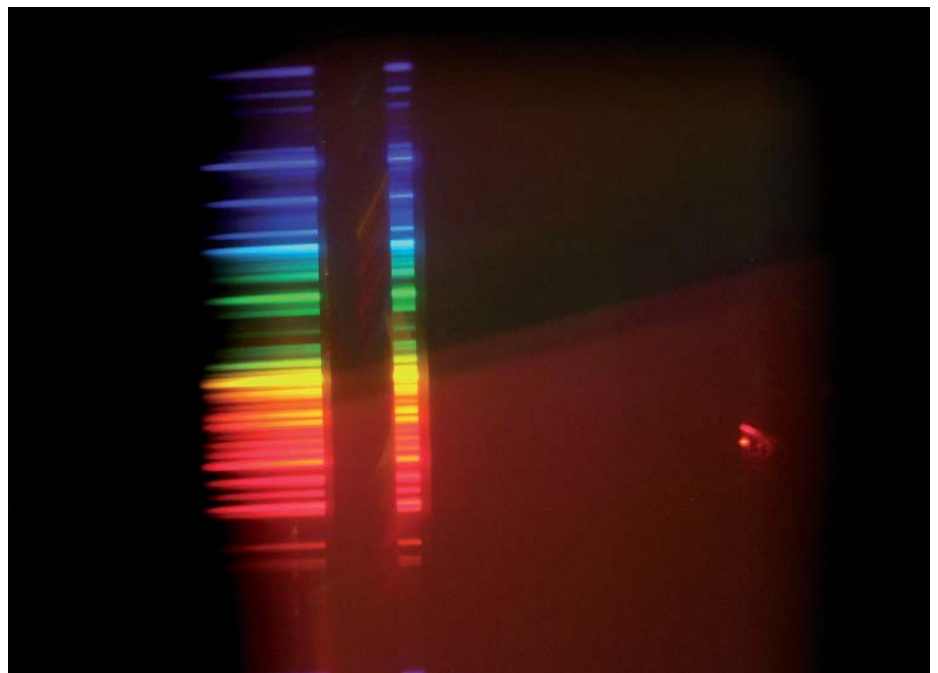


Abb. 19: Emissionsspektren im Vergleich: Plasma / ausgekoppeltes Laserlicht

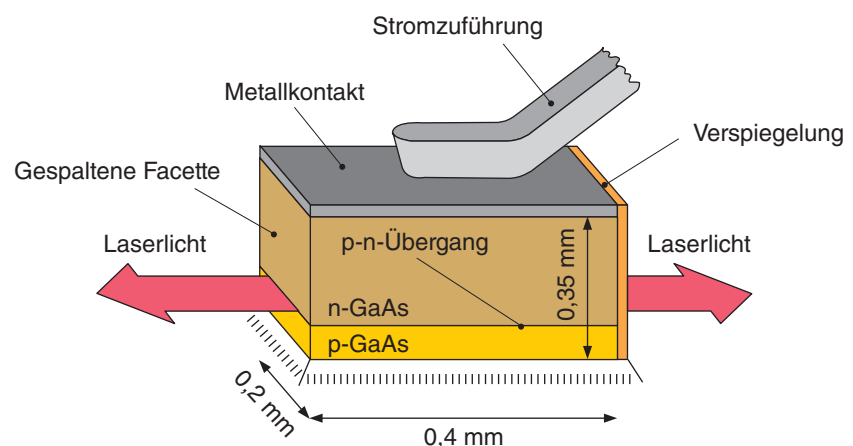


Abb. 20: Aufbau eines GaAs-Lasers [4]

von Schülerexperimenten mit Laserdioden nicht zu empfehlen. Informationen über die Entstehung der Strahlung liefern auch die preiswerten LEDs. Die subjektive Spektroskopie des von verschiedenfarbigen Leuchtdioden emittierten Lichts liefert kein Linienspektrum. Offenbar handelt es sich hier um eine Festkörperlumineszenz. Die für das Laserlicht typische Monochromasie fehlt offensichtlich der LED-Strahlung.

Welche Maßnahmen lassen den pn-Übergang lasern?

Die bauliche Erweiterung mit einem optischen Resonator ermöglicht die Selektion entsprechender resonanter Wellenlängen und erhöht so die Verweildauer der Strahlung im aktiven Lasermedium.

### Das Prinzip des Halbleiterlasers

Das Licht entsteht durch die Rekombination von Elektronen und Löchern im Bereich des pn-Übergangs. Wird nun die Diode mit einer Spannungsquelle verbunden, so werden sich Elektronen zur p-Seite und Löcher zur n-Seite bewegen. Bei ausreichender Spannung überwinden die meisten Ladungsträger die „ehemalige Schwelle“ und bewirken damit eine Verteilung, die man als Besetzungsinversion bezeichnet. Diese Lichterzeugung ist ausgesprochen effizient, da diese Energie-Investition in die Ladungsträger nur geringfügig größer ist als die bei der Reemission freiwerdende Energie. Die Breite der Bandlücke ist materialabhängig und bestimmt den emittierten Wellenlängenbereich.

Der in den 60er Jahren mit Galliumarsenid (GaAs) realisierte Laser ist mit seinem Substrat noch heute aktuell (Abb. 20). Damit die Diode laserfähig wird, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt werden:

- Die stimulierten Emissionsprozesse müssen häufiger auftreten als die optischen Absorptionsprozesse,
- ein optischer Resonator muss die Rückkopplung gewährleisten.

Der Aufbau der Laserstrahlung geschieht in folgenden Phasen (Abb. 21):

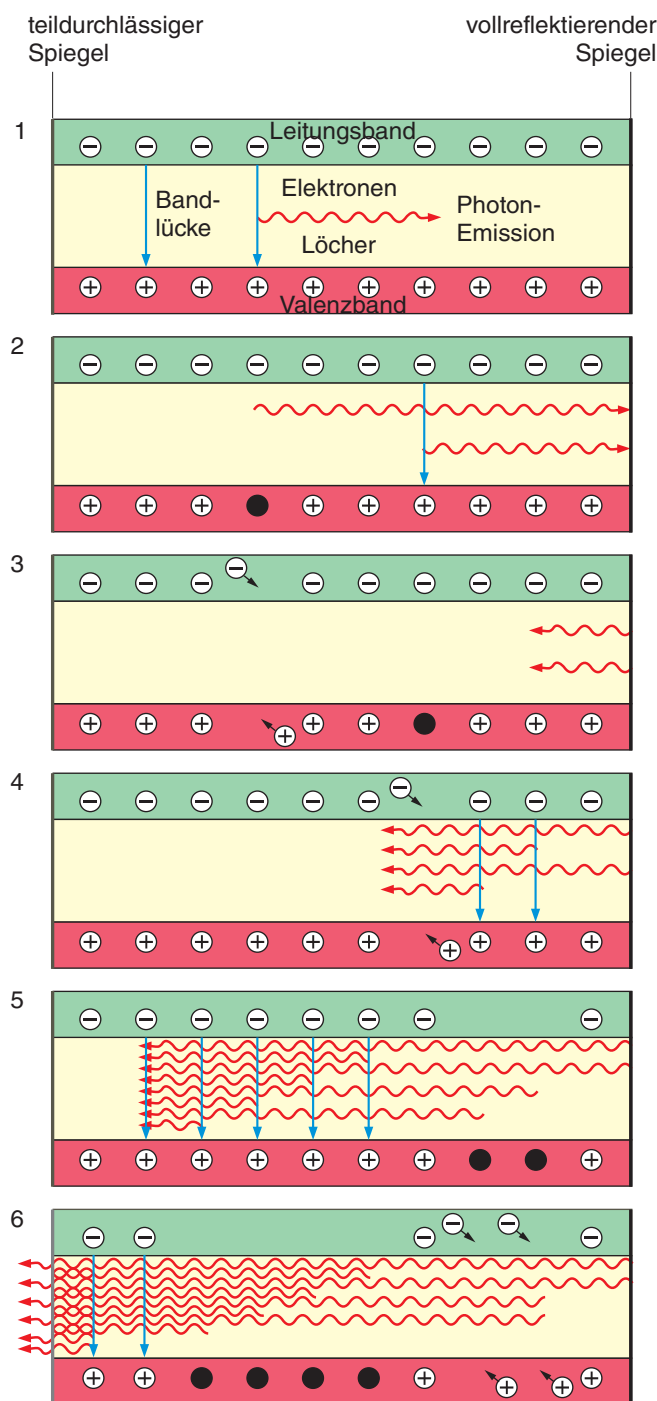


Abb. 21: Zur Emission von Laserlicht aus einer Halbleiterdiode (5)

1. Spontane Rekombination mit spontaner Emission.
2. Stimulierte Rekombination durch die ehemals spontan emittierte Energie.
3. Reflexion der in gleicher Phase laufenden Wellenzüge.
4. Weitere kohärente Wellenzüge durch zusätzlich stimulierte Rekombinationen.
5. Siehe 4.
6. Der teildurchlässige Spiegel sorgt für die Auskopplung der kohärenten Strahlung.

### 8 Das Zeitalter des Laserlichts

Von seiner Bedeutung her kann der Laser durchaus mit anderen revolutionären Ent-

wicklungen konkurrieren. Sein Erfolg ist nicht ein rein technischer Entwicklungsschritt, sondern ein grundlegend neues Konzept. Der Energiestrom LICHT, speziell aufbereitet für besondere Anwendungen, wird mit seinen Eigenschaften immer neue Einsatzfelder erschließen können. War es anfangs die Kohärenz, dann die hohe Frequenzstabilität, gefolgt von großen Dauerleistungen, so sind es heute die Femtosekundenlaser mit Anwendungen in der Telekommunikation zur Übertragung größter Datenraten, die den Stellenwert des Lasers in Forschung und Technik ausmachen. Der Attosekundenlaser macht bereits von sich reden (Eine Attosekunde ist der millionste Teil eines millionsten Teils einer millionstel Sekunde, also  $1 \cdot 10^{-18}$  s.). Die Laserfusion zum Zwecke der Energiegewinnung ist dabei eine der großen Herausforderungen der Zukunft. ■

### Literatur

- [1] H. Brand: LASER, Bonn 1966, S. 25  
 [2] H.J. Eichler u. a.: Laser, Berlin/Heidelberg 1995, S. 25  
 [3] R. Flehr und M. Frenzel: Wellenlängenselektion bei einem Helium Neon Laser, Praxis der Naturwissenschaften – PdN-PhiS, 59 (2010) 8, S. 8-13  
 [4] D. Bimberg: Halbleiterlaser – Winzlinge von riesiger Bedeutung – Wissenschaftsmagazin der TU Berlin, 9/86, S. 22  
 [5] J. M. Rowell: Werkstoffe für die Photonik, Spektrum der Wissenschaft, 12/86, S. 123

### Anschrift des Verfassers

StD Burkhard Vettin, Schapenstr. 33,  
 38104 Braunschweig,  
 E-Mail: burkhard.vettin@gmx.de