

LANDESLEHRERPRÜFUNGSAMT
AUSSENSTELLE BEIM
OBERSCHULAMT STUTTGART

STAATLICHES SEMINAR
FÜR SCHULPÄDAGOGIK
(GYMNASIEN) STUTTGART I

Zweite Staatsprüfung für die Laufbahn
des höheren Schuldienstes an Gymnasien

Schriftliche Arbeit

Fach: Physik

Thema: Aspekte der Atom- und Quantenphysik
am Beispiel des Lasers

Klassenstufe: Kursstufe Physik
Lehrplaneinheit 3 (2-stündig)
„Quantenphysik und Grundlagen der Atomphysik“
Lehrplaneinheit 6 (4-stündig)
„Grundlagen der Quanten- und Atomphysik“

Verfasser: Florian Karsten

Fachleiter: StD Franz Kranzinger

Versicherung:

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Im Falle der Aufbewahrung meiner Arbeit im Archiv des Seminars für Schulpädagogik bzw. im Staatsarchiv erkläre ich mein Einverständnis, dass die Arbeit Benutzern zugänglich gemacht werden kann.

Filderstadt, den 1. September 2002

Vorwort

Das letzte, was man bei Abfassung eines Werkes findet, ist, dass man weiß, was man zuerst schreiben muss.

B. Pascal

Eine ganze Unterrichtseinheit nur über Laser? Was gibt es denn über einen Lichtstrahl so viel zu erzählen? Eine ganze Menge: Laser schneiden Metall und kühlen Atome, Laser weisen die Richtung beim Tunnelbau und vermessen das Ozonloch. Ohne Laser gäbe es kein Hologramm, keinen Laserdrucker und keine CD-ROM! Aber so interessant die Anwendungen des Lasers in verschiedensten Bereichen unserer technisierten Welt auch sein mögen – das eigentlich Faszinierende ist das geniale Prinzip, das hinter jedem Laser steckt.

Welches Prinzip ist das, und wie funktioniert ein Laser? Die vorliegende Arbeit beschreibt einen Unterrichtsgang, der diese Fragen beantwortet. Der Weg dorthin beginnt beim Gerät (dem Laser) und sucht sich Schritt für Schritt die Theorie, die zur Erklärung nötig ist. Dabei werden einige Aspekte der Atom- und Quantenphysik besprochen.

In der Schule wird der Laser meist nur als geeignete Lichtquelle verwendet, die einfarbig, gebündelt und kohärent ist. Im Rahmen der Quantenphysik sind viele Versuche (Mach-Zehnder-Interferometer, Quantenradierer etc.) sogar nur mit Hilfe eines Lasers durchführbar. Allerdings erleben ihn die Schüler¹ dabei stets nur als „Black Box“, die nicht näher erklärt wird. Auch die Schulbücher (Cornelsen, Klett, Metzler, Schrödel etc.) besprechen den Laser erst am Ende ihrer Kapitel über Atom- und Quantenphysik, und der Bildungsplan [BPK] führt ihn sogar nur als Wahlthema an.

Der Grund dafür ist, dass der Standard-Laser (der Helium-Neon-Laser) in der Schule nur schwer zu erklären ist, da man zu seiner Beschreibung vier Energieniveaus, metastabile Niveaus, Gasröhren, Stossprozesse, stehende Wellen, halbdurchlässige Spiegel etc. behandeln muss. Es ist praktisch unmöglich, den Helium-Neon-Laser zu verstehen, ohne zuvor einiges über Atom- und Quantenphysik gelernt zu haben. Dabei muss allerdings viel trockenes Vor-

¹Der Begriff *Schüler* wird im folgenden stets abkürzend für *Schülerinnen und Schüler* verwendet.

ratswissen angehäuft werden – ein nicht sehr motivierendes Verfahren.

Dieses Problem löst ein besonderer Laser, den ich für diesen Unterrichtsgang gebaut habe und der das Herzstück dieser Arbeit darstellt: der Stickstoff-Laser. Er ist übersichtlich aufgebaut und benutzt den Stickstoff in der Umgebungsluft. Er benötigt zur Erklärung nur zwei Energieniveaus und kommt ohne Spiegel, Gasröhren und stehende Wellen aus. Die Schüler können seine Funktionsweise daher auch verstehen, ohne vorher Atom- und Quantenphysik gelernt zu haben. Außerdem fasziniert er den Betrachter durch die Einfachheit der verwendeten Bauteile wie Münzen, Schrauben und Alufolie.

Der Stickstoff-Laser macht es möglich, die Funktion eines Lasers zunächst anhand grober Modelle zu verstehen, und diese nach und nach zu verfeinern. Dieser Weg führt über die Wechselwirkung von Licht mit Materie und die Spektrallinien des Wasserstoffs bis zum Nachweis der Energiequantisierung im Wasserstoffatom. Ich versuchte zudem, den Unterricht in möglichst schüleraktivierenden Formen wie Gruppenpuzzle und Teamarbeiten zu gestalten. Dies war eine große Herausforderung – aber die Mühe hat sich gelohnt!

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Im ersten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen des Lasers besprochen. Dabei geht es um die Lichtentstehung im Laser, die Eigenschaften des Laserlichtes und den Helium-Neon-Laser. Anschließend wird der Stickstoff-Laser mit seinem Aufbau, seinen experimentellen und theoretischen Grundlagen ausführlich besprochen. Den Abschluss des Kapitels bilden die atom- und quantenphysikalischen Grundlagen anhand der Energieniveaus des Wasserstoffatoms. In Kapitel 2 werden die Überlegungen zur methodischen Vorgehensweise des Unterrichtsganges dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung des eigentlichen Unterrichtsganges findet sich in Kapitel 3. Dabei wird auch gleich auf einzelne, direkt auf den Unterricht bezogene, Vorüberlegungen und Nachbetrachtungen eingegangen. Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 4 mit allgemeinen Nachbetrachtungen zum Unterrichtsgang und den Ergebnissen einer Befragung der Schüler.

Auf der beiliegenden CD-ROM stehen sowohl die vorliegende Arbeit als auch alle im Unterricht verwendeten Materialien (Arbeitsblätter, Folien, PowerPoint-Präsentationen) in elektronischer Form zur Verfügung. Zum Stickstoff-Laser befinden sich auf der CD-ROM einige Fotos und eine Powerpoint-Präsentation zur Erklärung der elektrischen Funktionsweise (*02_n2laser_funktionsweise_mit_kommentaren.ppt*).

Mein Dank gilt allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Fachleiter, Herrn F. KRANZINGER, für die Betreuung der Arbeit, die interessanten Gespräche über Physik und für seine vielen kleinen und großen Tipps. Meinem Fachlehrer, Herrn H. SCHWEIZER, möchte ich für seine Unterstützung und die Begleitung meines Unterrichts herzlich danken. Dass der Stickstoff-Laser ein so tolles Gerät wurde, verdanke ich J. GUTJAHR, der die Laserplatten angefertigt hat. Und dass der Unterricht so erfolgreich war, habe ich vor allem den Schülerinnen und Schülern des Grundkurs 13 zu verdanken, die mit Begeisterung und Interesse mitgemacht haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	v
1 Der Laser	1
1.1 Entstehung des Laserlichtes	1
1.2 Eigenschaften des Laserlichtes	3
1.3 Der Helium-Neon-Laser	5
1.4 Der Stickstoff-Laser	7
1.4.1 Material, Aufbau und Bedienung	7
1.4.2 Elektrische Funktionsweise	10
1.4.3 Lichtenstehung im Stickstoff-Laser	11
1.5 Energieniveaus des Wasserstoffatoms	12
1.5.1 Der Abschied vom Bohr'schen Atommodell	12
1.5.2 Die Schrödingergleichung	13
1.5.3 Energiestufen des Wasserstoffatoms	14
2 Methodik	17
2.1 Die Unterrichtssituation	17
2.2 Von der Anwendung zur Theorie	18
2.3 Darbietender und entdeckender Unterricht	19
2.4 Schüleraktivierender Unterricht	20
2.5 Unterrichtsziele	21

3	Unterrichtsgang	23
3.1	Baustein 1: Eigenschaften des Laserlichtes	24
3.1.1	Vorüberlegungen	24
3.1.2	Ablauf	25
3.1.3	Nachbetrachtungen	27
3.2	Baustein 2: Der Stickstoff-Laser	28
3.2.1	Vorüberlegungen	28
3.2.2	Ablauf	28
3.2.3	Nachbetrachtungen	31
3.3	Baustein 3: Entstehung des Laserlichtes	32
3.3.1	Vorüberlegungen	32
3.3.2	Ablauf	33
3.3.3	Nachbetrachtungen	36
3.4	Baustein 4: Spektrallinien	36
3.4.1	Vorüberlegungen	37
3.4.2	Ablauf	37
3.4.3	Nachbetrachtungen	39
3.5	Baustein 5: Energieniveaus des Wasserstoffatoms	42
3.5.1	Vorüberlegungen	42
3.5.2	Ablauf	43
3.5.3	Nachbetrachtungen	44
3.6	Baustein 6: Der Helium-Neon-Laser	45
3.6.1	Ablauf	45
3.6.2	Nachbetrachtungen	47
4	Nachbetrachtungen	49
4.1	Umfrage	49
4.2	Allgemeine Nachbetrachtungen	51
	Literaturverzeichnis	55
	Anhang	57

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lorentz- und Gauß-Profil von Spektrallinien (Maxima auf Eins normiert) [Han]	4
1.2	Energieniveauschema des Helium-Neon-Lasers	6
1.3	Aufbau eines Helium-Neon-Lasers [Mes]	6
1.4	Der Stickstoff-Laser (ohne Plexiglashaube) und das Netzgerät	8
1.5	Der Stickstoff-Laser von oben betrachtet	9
1.6	Termschema des Stickstoff-Lasers	11
1.7	Quantengatter	13
3.1	Folie zum Umgang mit Lasern	25
3.2	Vergleich zwischen Taschenlampe und Laser	27
3.3	Beugungsfigur des Stickstoff-Lasers	30
3.4	Modell zur Entstehung des Laserlichts	34
3.5	Wechselwirkung von Stickstoff-Molekülen mit Licht	35
3.6	Versuchsaufbau zur Spektralanalyse (mit Natrium-Dampflampe)	38
3.7	Versuchsaufbau zur Balmer-Serie	39
3.8	Tafelbild zur Emission von Photonen	40
3.9	Tafelbild zur Absorption von Photonen	41
3.10	Tafelbild zum Wasserstoff-Spektrum	41
3.11	Tafelbild zum Helium-Neon-Laser	46
3.12	Ein mit einem Laser geschnittenes Metallteil	47

Kapitel 1

Der Laser

There are certain situations in which the peculiarities of quantum mechanics can come out in a special way on a large scale.

R. P. Feynman

Laser – das Wort hat sich bei uns so eingebürgert, dass niemand mehr daran denkt, dass es sich dabei eigentlich um eine Abkürzung handelt: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. Ziel des in Kapitel 3 beschriebenen Unterrichtes ist es, diesen Lichtverstärker zu erklären.

In diesem Kapitel möchte ich einige der theoretischen und experimentellen Grundlagen des Unterrichtsganges erläutern. Da die Erklärung eines Lasers viele Themen der Atom- und Quantenphysik streift, kann ich diese hier nur kurz darstellen. Sie sind jedoch in vielen Physik- und Schulbüchern, auf die ich jeweils verweisen werde, hinreichend beschrieben.

Ausführlich hingegen werde ich den Stickstoff-Laser erklären, der das Herzstück des Unterrichtes darstellt, und der in der Standardliteratur nur wenig Erwähnung findet.

1.1 Entstehung des Laserlichtes

Atome¹ können unter Berücksichtigung gewisser Auswahlregeln Photonen absorbieren und emittieren. Ein Übergang zwischen einem Zustand der Energie E_1 und einem Zustand der höheren Energie E_2 kann auftreten, wenn ein Photon der Energie $E_2 - E_1 = h \cdot f$ absorbiert

¹Im folgenden werden Atome häufig synonym für Materie stehen, denn die Überlegungen gelten analog auch für Moleküle, Ionen in Kristallen etc.

wird.

Bei der Wechselwirkung zwischen Atomen und Photonen² gibt es drei verschiedene Vorgänge: Absorption, spontane Emission und stimulierte Emission. Für die genauere Untersuchung dieser Prozesse seien N_1 bzw. N_2 die Anzahl der Elektronen in den Energieniveaus E_1 (g_1 -fach entartet) bzw. E_2 (g_2 -fach entartet). Es gilt die Boltzmann-Beziehung:

$$N_1 = g_1 e^{-E_1/kT} \quad \text{und} \quad N_2 = g_2 e^{-E_2/kT}.$$

Versuche haben ergeben, dass bei der *Absorption* für die Anzahl der Übergänge von E_1 nach E_2 pro Zeiteinheit gilt:

$$\frac{dN_{12}^{\text{abs}}}{dt} = B_{12} \rho(f) N_1. \quad (1.1)$$

Dabei ist $\rho(f)$ die Energiedichte des Strahlungsfeldes. Der sogenannte *Einstein-Koeffizient* B_{12} entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom innerhalb einer Sekunde durch Absorption eines Photons der Energie $h \cdot f$ vom Energieniveau E_1 zum Energieniveau E_2 übergeht.

Der Umkehrprozess zur „stimulierten“ Absorption ist die *stimulierte Emission*. Hierbei gilt für die Anzahl der Übergänge von E_2 nach E_1 pro Zeiteinheit:

$$\frac{dN_{21}^{\text{stim}}}{dt} = B_{21} \rho(f) N_2. \quad (1.2)$$

Nach der Gleichung (1.1) erwartet man, dass keine Absorptionsprozesse auftreten, wenn kein Strahlungsfeld vorhanden ist (d. h. $\rho(f) = 0$).

Nach Gleichung (1.2) sollten aber ohne Strahlungsfeld auch keine Emissionsprozesse stattfinden, was den experimentellen Befunden widerspricht. Sie zeigen nämlich eindeutig, dass angeregte Atome auch im Dunkeln „spontan“ unter Emission eines Photons in den Grundzustand zurückkehren. Bei diesem dritten Prozess, der sogenannten *spontanen Emission*, gilt für die Anzahl der Übergänge von E_2 nach E_1 pro Zeiteinheit

$$\frac{dN_{21}^{\text{spon}}}{dt} = A_{21} N_2.$$

Man kann den Einstein-Koeffizienten A_{21} aus der mittleren Lebensdauer τ des Energieniveaus E_2 bestimmen:

$$A_{21} = \frac{1}{\tau}.$$

Für die Einstein-Koeffizienten A_{21} , B_{12} und B_{21} kann man die folgenden Beziehungen herleiten, die man auch Einsteinsche Beziehungen nennt:

$$\frac{A_{21}}{B_{12}} = 8 \cdot \pi \cdot h \cdot \frac{f^3}{c^3}; \quad g_1 B_{12} = g_2 B_{21}. \quad (1.3)$$

²Die genauere, quantentheoretische Behandlung der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Daher sei auf die Literatur [Mes] und [Han] verwiesen.

Um einen Lichtverstärker zu verwirklichen, muss man erreichen, dass die Photonendichte dN zunimmt, d. h.

$$\frac{dN}{dt} > 0.$$

Die zeitliche Änderung der Photonendichte wird durch die Einsteinschen Beziehungen (1.3) bestimmt. Also muss gelten:

$$\frac{dN}{dt} = A_{21} N_2 + B_{12} \rho(f) \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) > 0.$$

Eine hinreichende Bedingung dafür ist, dass sich mehr Teilchen im höheren Niveau als im niedrigeren Niveau befinden, also

$$\frac{N_2}{g_2} > \frac{N_1}{g_1}.$$

Im thermischen Gleichgewicht mit Temperatur T stellt sich jedoch als Verteilung der Teilchen auf die Energieniveaus die Boltzmann-Verteilung ein:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{(E_2 - E_1)}{kT}}.$$

Dabei kann höchstens Gleichbesetzung der Niveaus erreicht werden, und das auch nur, wenn die thermische Energie kT sehr groß gegenüber der Energie $E_2 - E_1$ ist. Für Übergänge im optischen Spektralbereich und bei Zimmertemperatur gilt jedoch genau entgegengesetzt $E_2 - E_1 \ll kT$. Man muss also dafür sorgen, dass die Besetzung umgekehrt zum Normalfall ist. Man spricht daher bei der Bedingung $N_2 > N_1$ von *Besetzungsinversion*.

Das Prinzip des Lasers beruht nun darauf, zwischen geeigneten Energieniveaus eine Besetzungsinversion aufzubauen und durch die stimulierte Emission das Licht zu verstärken. Damit ist auch das Akronym LASER erklärt: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation.

1.2 Eigenschaften des Laserlichtes

Laserlicht hat vier wichtige Eigenschaften: Es ist einfarbig, gebündelt, intensiv und kohärent.

Laserlicht ist einfarbig. Dies ist eigentlich nicht richtig, denn die spontane Emission führt zu einer endlichen Lebensdauer τ des quantenmechanischen Zustands E_2 , dessen Energie somit nicht scharf sein kann. Aufgrund der unscharfen Energie des angeregten Zustands kann auch die Übergangsfrequenz nicht scharf („nicht einfarbig“) sein, sondern besitzt eine natürliche Linienbreite. Das zugehörige Profil der spektralen Intensität heißt *Lorentz-Profil* und ist in Abb. 1.1 skizziert. In einem dichten Gas von Atomen sind die Spektrallinien zusätzlich stoßverbreitert. Hinzukommt eine scheinbare Verbreiterung der Spektrallinien durch den Dopplereffekt der thermischen Bewegung der Atome. Dies ergibt ein Dopplerprofil mit der

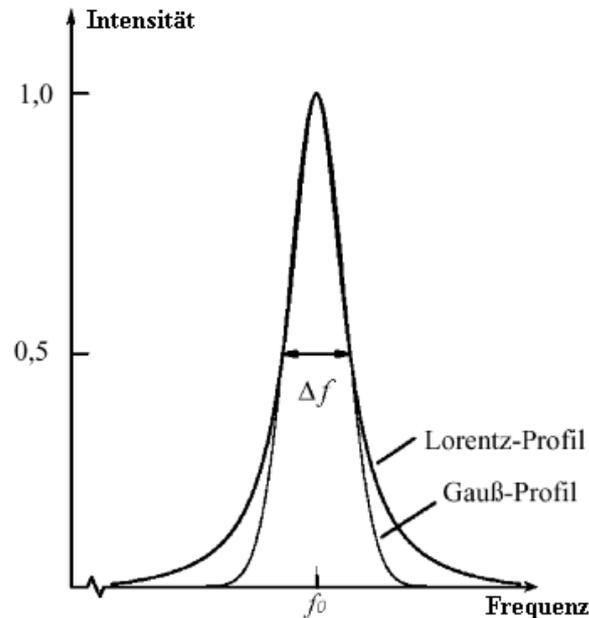


Abbildung 1.1: Lorentz- und Gauß-Profil von Spektrallinien (Maxima auf Eins normiert) [Han]

Form einer *Gauß-Verteilung* (Abb. 1.1). Beim Laser ist die Linienbreite jedoch so klein im Vergleich mit den Linienbreiten herkömmlicher Lichtquellen, dass man durchaus von einer Einfarbigkeit des Laserlichts sprechen kann.

Laserlicht ist gebündelt. Die Resonatorspiegel in einem Laser sorgen dafür, dass nur Photonen einer ganz bestimmten Richtung zum Laserstrahl beitragen. Diese Richtung ist so genau bestimmt, dass z. B. beim Helium-Neon-Laser der Lichtstrahl nur eine Aufweitung von 1 mrad ($1 \text{ mrad} \approx 0,057^\circ$) aufweist. Auf einem Kilometer wird ein solcher Laserstrahl also auf nur einen Meter aufgeweitet. Beim weiter unten beschriebenen Stickstoff-Laser fehlt die Resonator-Anordnung. Seine Strahlaufweitung ist daher wesentlich größer, beträgt aber immer noch – verglichen mit normalen Lichtquellen – winzige 10 mrad!

Laserlicht ist intensiv. Aufgrund der hohen räumlichen Kohärenz lässt sich Laserlicht der Wellenlänge λ auf sehr enge Bereiche mit Querschnittsflächen A_{\min} der Größenordnung λ^2 fokussieren. Mit einem Laserstrahl der Leistung P kann man also eine maximale Strahlungsintensität

$$I_{\max} = \frac{P}{A_{\min}} \approx \frac{P}{\lambda^2}$$

erreichen. Während fokussierte Sonnenstrahlung eine Intensität von maximal 300 W/cm^2 erreicht, kann man schon mit einem Helium-Neon-Laser eine Intensität von

$$I_{\max} = \frac{10 \text{ mW}}{(632 \text{ nm})^2} = 2,5 \text{ MW/cm}^2$$

erzielen. Mit anderen Lasertypen sind sogar Tera-Watt und Peta-Watt möglich!

Laserlicht ist kohärent. Genauer formuliert hat Laserlicht im Gegensatz zu herkömmlichen, thermischen Lichtquellen eine extrem hohe Kohärenz³. Kohärenz ist eine Eigenschaft des Lichtes und beschreibt seine „Interferenzfähigkeit“, d. h., sie gibt an, über welche Entfernungen oder Zeiträume zwischen zwei Teilwellen eine feste Phasenbeziehung besteht, so dass das Superpositionsprinzip angewendet werden kann. Daher unterscheidet man *zeitliche Kohärenz* (die man mit Hilfe eines Michelson-Interferometers bestimmen kann) und *räumliche Kohärenz* (die auf dem Doppelspaltversuch von Young basiert). Die genaue Definition der Kohärenz würde hier zu weit führen. Es genügt zu wissen, dass gewöhnliches Licht eine Kohärenzlänge von ca. 3 mm besitzt, wohingegen z. B. ein Helium-Neon-Laser eine Kohärenzlänge von ca. 500 km aufweist!

1.3 Der Helium-Neon-Laser

Der Helium-Neon-Laser ist der Klassiker unter allen Lasersystemen. Er hat in der Wissenschaft eine große Rolle gespielt und ist auch heute noch *der* Schul-Laser.

Im Helium-Neon Gasgemisch, das aus zehn Teilen Helium und einem Teil Neon besteht, stimmen zwei der Helium-Energieniveaus (2^1S und 2^3S) mit zwei Niveaus des Neon ($5s$ und $4s$) überein (siehe Abb. 1.2). Die Heliumatome werden durch Elektronenstöße auf die metastabilen Niveaus 2^1S und 2^3S angehoben. Die Heliumatome stoßen dann mit nicht angeregten Neonatomen zusammen und heben diese auf die Niveaus $5s$ und $4s$ an. Diese Zustände haben längere Lebensdauern als die energetisch niedrigeren Zustände $4p$ und $3p$. Während so die $5s$ und $4s$ Zustände aufgefüllt werden, entleeren sich die Zustände $4p$ und $3p$ aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer. Dies führt zu einer Besetzungsinversion zwischen den s und p Zuständen, und die Lasertätigkeit setzt ein. Das langlebige $3s$ Niveau wird über Stöße mit den Wänden des engen Entladungsrohres entleert.

Das Schema des Aufbaus eines Helium-Neon-Lasers zeigt Abb. 1.3. Die Enden der Entladungsröhre sind durch Brewster-Fenster verschlossen. Beim Brewster-Winkel kann nur Licht mit Schwingungsrichtung parallel zur Einfallsebene das Fenster ungeschwächt passieren. Dadurch werden die Reflexionsverluste für diese Schwingungsrichtung minimiert und die Laserstrahlung wird eindeutig polarisiert.

Um den Helium-Neon-Laser zu verstehen, muss man also schon einiges über Atomphysik wissen. Nimmt man dann noch Aspekte wie Resonator und Modenselektion (vgl. [Mes]) hinzu, wird es sehr schwierig, diesen Laser im Schulunterricht zu behandeln. Darüber hinaus ist der Schullaser aus Sicherheitsgründen eingekapselt und kann den Schülern daher nur als „Black Box“ präsentiert werden.

Der im nächsten Abschnitt beschriebene Stickstoff-Laser ist übersichtlich aufgebaut, benö-

³Mit dem Begriff *Kohärenz* haben viele Schulbücher Schwierigkeiten. Vergleiche dazu [Her].

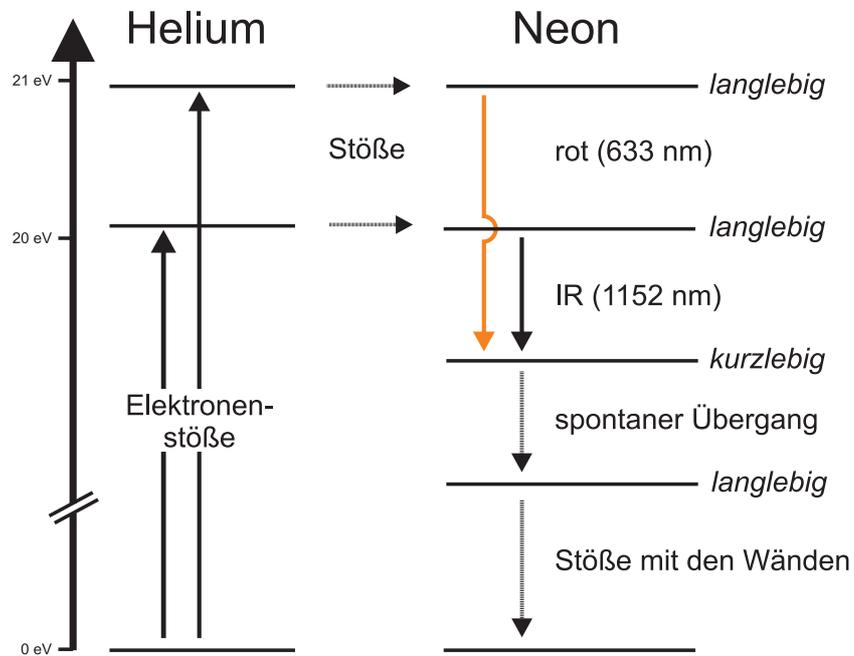


Abbildung 1.2: Energieniveauschema des Helium-Neon-Lasers

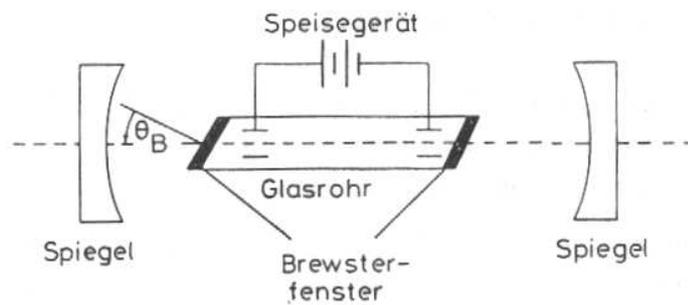


Abbildung 1.3: Aufbau eines Helium-Neon-Lasers [Mes]

tigt zur Erklärung nur zwei Energieniveaus und kommt ohne Spiegel, Gasröhren und stehende Wellen aus. Die Schüler können seine Funktionsweise daher auch verstehen, ohne vorher Atom- und Quantenphysik gelernt zu haben.

1.4 Der Stickstoff-Laser

In diesem Abschnitt wird der Stickstoff-Laser beschrieben, auf dem ein Großteil des in Kapitel 3 beschriebenen Unterrichts basiert.

Der Stickstoff-Laser ist ein Molekülgas-Laser, der im Pulsbetrieb ultraviolettes Laserlicht (337,1 nm) mit einer Leistung von ca. 0,1 mW erzeugt⁴. Dieser Laser wird sowohl an der Universität (siehe [PG1] und [PG2]) als auch an manchen Schulen (siehe [EKKS] und [Lew]) als Demonstrationslaser eingesetzt. In [LiKü] wird ein bereits zusammengebautes Gerät beschrieben, das aber heute nicht mehr im Handel erhältlich ist. Sogar in einem Schulbuch [Imp] wird bereits eine Version des Stickstoff-Lasers beschrieben – jedoch wenig verständlich und nicht motivierend. Auch im Internet finden sich unzählige Seiten, die sich mit mehr oder weniger komplizierten Versionen des Stickstoff-Lasers beschäftigen. Eine gute Informationsquelle ist z. B. *Sam's Laser FAQ*⁵.

Der von mir gebaute Laser (siehe Abb. 1.4) geht im wesentlichen auf die beiden Artikel [EKKS] und [Lew] zurück. Aber auch aus anderen Beschreibungen habe ich kleinere Ideen übernommen. Insgesamt ist so ein Versuchsaufbau entstanden, der – einmal justiert – schnell aufzubauen ist und zuverlässig funktioniert. Außerdem wirkt er durch die Einfachheit der verwendeten Bauteile wie Münzen, Schrauben und Alufolie auf den Betrachter faszinierend.

1.4.1 Material, Aufbau und Bedienung

Tabelle 1.1 zeigt das für den Stickstoff-Laser benötigte Material.

Um die Laserplatten nicht bei jedem Aufbau neu justieren zu müssen, wurden nach einer Idee von C. KRÖMER (siehe [Lew]) auf die Aluminiumplatten Winkel geschraubt, die mit Kunststoffschrauben (M6×40) verbunden sind und die durch Kunststoffmutter (M6) fixiert werden können. Die Laserplatten und Winkel wurden von J. GUTJAHR⁶ hergestellt und können bei ihm auch bestellt werden.

⁴Für den Unterricht dürfen laut der Verwaltungsvorschrift *Richtlinien bei der Verwendung von Lasergeräten im Unterricht* (1. Juni 1970, K. u. U. Seite 724) nur Laser mit einer Leistung von maximal 1 mW verwendet werden. Der Stickstoff-Laser hat eine Leistung von ca. 0,1 mW (vgl. [Lew]). Daher lässt er sich unter Beachtung der üblichen Sicherheitsbestimmungen im Unterricht einsetzen. Um möglichen Gefahren weiter vorzubeugen, habe ich den Stickstoff-Laser im Unterricht unter einer Plexiglashaube betrieben und immer nur kurz eingeschaltet.

⁵<http://www.laserfaq.com/>

⁶Gutjahr GmbH, Neuffenstr. 120, 73240 Wendlingen, Tel. (07024) 9509-0

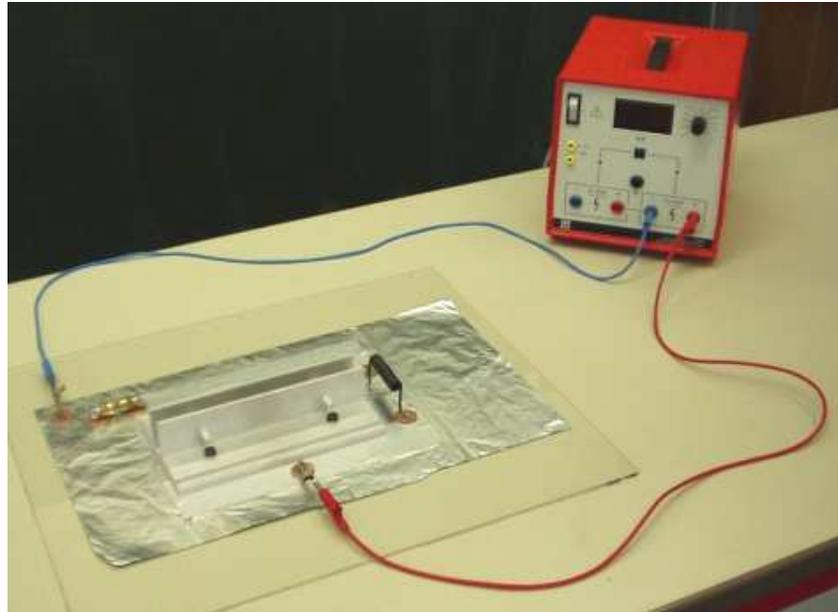


Abbildung 1.4: Der Stickstoff-Laser (ohne Plexiglashaube) und das Netzgerät

Bauteil	Material und Größe
Grundplatte	Kunststoff- oder Glasplatte (40 cm×60 cm)
Kondensatorplatte (unten)	Alufolie (25 cm×45 cm)
Isolator	Overhead-Kopierfolie (DIN A4)
Kondensatorplatten (oben)	2 Alufolien (je 9 cm×25 cm)
Laserplatten	2 Aluminiumplatten mit 90° Schneiden (je 6 cm×20 cm×0,5 cm)
Verbindung der Platten	Selbstgewickelte Spule: Kupferdraht 20-mal um Bleistift gewickelt und auf Kupfermünzen (5 Cent) gelötet
Funkenstrecke	2 Schrauben (M8×16) mit aufgeschraubten Messing-Hutmuttern (M8) auf Kupfermünzen (2 Cent) liegend
Energiequelle	Hochspannungsnetzgerät (5 kV, 2 mA)
Anschluss an die Quelle	2 Laborkabel, 2 Münzen (5 Cent), 2 Krokodilklemmen

Tabelle 1.1: Material für den Stickstoff-Laser



Abbildung 1.5: Der Stickstoff-Laser von oben betrachtet

Aufbau: Auf die Grundplatte (aus Kunststoff oder Glas) wird als untere Kondensatorplatte das große Stück Alufolie gelegt. Darauf kommt in die Mitte der Alufolie die Overheadfolie als Dielektrikum. Auf die Overheadfolie werden die zwei kleineren Alufolienstücke so gelegt, dass zwischen ihren Längsseiten ein Abstand von ca. 2 cm bleibt. Auch zum Rand der Overheadfolie muss ein Mindestabstand von 1–2 cm eingehalten werden, um Funkenüberschläge zu verhindern.

Die Laserplatten werden so auf die zwei Stücke Alufolie gestellt, dass jede Laserplatte nur mit je einer Alufolie Kontakt hat. Zunächst werden die Laserplatten mit Hilfe der Kunststoffschrauben parallel im Abstand von ca. 1 mm justiert und danach leicht verkantet (ca. 0,1 mm). Damit wird der Laserlichtwelle eine feste Ausbreitungsrichtung vorgegeben.

Die Schrauben mit den Muttern werden so auf die untere und die obere Alufolie gesetzt, dass sie eine Funkenstrecke mit ca. 1,5 mm Abstand bilden (vgl. Abb. 1.5). Die Münzen, auf denen die Schrauben liegen, sollen ein Einbrennen in die Alufolie verhindern.

Zum Schluss verbindet man noch die untere Alufolie mit dem Minuspol und eine der beiden oberen Alufolien mit dem Pluspol des Hochspannungsnetzgerätes. Dazu lassen sich wieder Münzen verwenden, auf die man ein Stück Draht gelötet hat. Die Kabel lassen sich dann mit Krokodilklemmen leicht anbringen.

Inbetriebnahme: Für die erste Zündung der Funkenstrecke muss eine Spannung von 5–6 kV

eingestellt werden. Danach genügt eine Zündspannung von 3–4 kV. Die Pulsfrequenz hängt vom maximalen Strom ab, den das Netzgerät liefern kann, und beträgt 1–5 Hz.

Da der Stickstoff-Laser UV-Licht erzeugt, muss man dieses in sichtbares Licht umwandeln. Dies kann z. B. mit Fluoreszenzschirmen geschehen. Aber auch gebleichte Stoffe, wie z. B. weißes Kopierpapier oder frisch gewaschene weiße Textilien, wandeln UV-Licht in blaues, sichtbares Licht um. Wie bei allen Lasern gilt auch hier: Nicht in den Strahl blicken!

Abbau: Der Versuch darf erst abgebaut werden, wenn die Kondensatorplatten vollständig entladen sind! Wenn man die Alufolien von der Overheadfolie trennt, sollte man die untere und die oberen Alufolien verbinden, um einen elektrischen Schlag zu vermeiden!

1.4.2 Elektrische Funktionsweise

Ziel des elektrischen Aufbaus ist, eine Serie von Überschlägen entlang des gesamten Laserkanals zu erzeugen, die den Stickstoff im Laserkanal anregen. Würde man die beiden Laserplatten direkt an das Netzgerät anschließen, gäbe es nur an der engsten Stelle des Laserkanals einen Überschlag. Um Überschläge an vielen Stellen des Kanals zu erzeugen, muss man dafür sorgen, dass am Laserkanal vor dem Überschlag eine Spannung anliegt, die viel höher ist als die eigentliche Zündspannung. Dies erreicht man durch die Kondensatorplatten, die Spule und die Funkenstrecke aus Schrauben – was im folgenden beschrieben wird.

Eine Animation des elektrischen Prozesses zeigt die PowerPoint-Präsentation *02_n2laser_funktionsweise_mit_kommentaren.ppt* auf der beiliegenden CD-ROM.

Zu Beginn des Prozesses liegen an der unteren Kondensatorplatte 0 V und an einer der beiden oberen Laserplatten 5 kV an. Da die beiden Laserplatten durch die Spule verbunden sind, liegen an der anderen Platte ebenfalls 5 kV an, und beide Platten laden sich gleichmäßig auf. Wenn die Spannung groß genug ist, entsteht zwischen den Schrauben (Funkenstrecke) ein Überschlag. Dabei entlädt sich eine der beiden Laserplatten. Wegen des großen Spannungsabfalls in sehr kurzer Zeit (großer Gradient) wirkt die Spule jetzt wie ein sehr großer Widerstand. Die zweite Laserplatte bleibt daher geladen.

Die Potentialdifferenz von 5 kV, die zuvor an der Funkenstrecke lag, liegt nun zwischen den beiden Laserplatten. Da der Abstand der Laserplatten geringer ist als der der Funkenstrecke, liegt am Laserkanal nun eine Spannung, die viel größer ist als die eigentlich nötige Zündspannung. Durch die Kondensatoranordnung steht außerdem eine große Ladung zum Überschlag zur Verfügung. Beides sorgt dafür, dass sich eine Vielzahl von Überschlägen entlang des gesamten Kanals ausbildet. Damit wird der Stickstoff im Laserkanal angeregt, und die für den Laservorgang notwendige Besetzungsinversion (vgl. nächster Abschnitt) ist erreicht.

Nun sind beide Laserplatten entladen, die Spule wirkt nicht mehr als Widerstand (Spannungsgradient sehr klein), die Ladung kann wieder auf beide Platten fließen, und der Prozess beginnt von neuem.

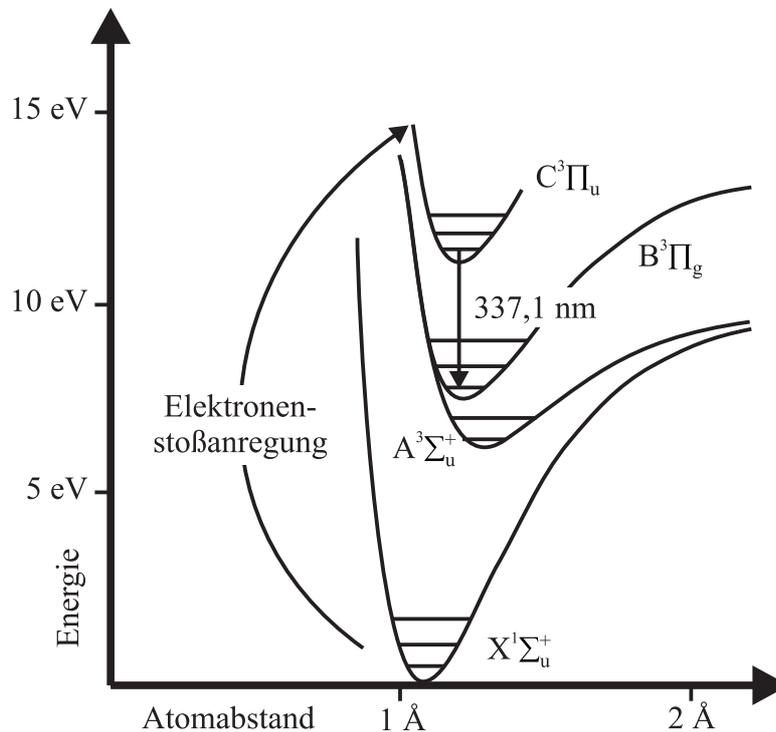


Abbildung 1.6: Termschema des Stickstoff-Lasers

1.4.3 Lichtentstehung im Stickstoff-Laser

Der Stickstoff-Laser ist ein Molekülgas-Laser, dessen intensivste Emission im ultravioletten Bereich bei 337,1 nm liegt. Sie entsteht durch den Übergang vom untersten Schwingungsniveau des Elektronenzustandes $C^3\Pi_u$ in das unterste Schwingungsniveau des Elektronenzustandes $B^3\Pi_g$ (siehe Abb. 1.6). Die Besetzung des oberen Laserniveaus erfolgt durch Elektronenstöße aus dem Grundzustand $X^1\Sigma_u^+$. Zwar existieren auch Übergänge zwischen den beiden Tripletzuständen $B^3\Pi_g$ und $A^3\Sigma_u^+$, doch diese liegen im Infrarot-Bereich und sind auch nicht sehr intensiv, da die Wahrscheinlichkeit für den Übergang $X^1\Sigma_u^+ \rightarrow C^3\Pi_u$ viel größer ist als für den Übergang $X^1\Sigma_u^+ \rightarrow B^3\Pi_g$.

Da die Lebensdauer des unteren Laserzustandes $B^3\Pi_g$ mit $10 \mu\text{s}$ viel größer als die Lebensdauer des oberen Laserzustandes $C^3\Pi_u$ mit 40 ns ist (der Laserübergang ist „self-terminating“), kann der Stickstoff-Laser nur mit sehr kurzen Pulsen ($< 40 \text{ ns}$) betrieben werden.

Die Geometrie des Laserkanals bewirkt eine elektrische Entladung, die synchron zur Lichtwelle läuft. Die Lichtwelle kann aufgrund der hohen Verstärkung des Lasers die gesamte Besetzungsinversion in einem Durchgang abbauen und braucht daher keinen Resonatorspiegel. Ein solcher Laser wird in der Literatur auch als *Superstrahler* bezeichnet.

Weitere Informationen zur Theorie des Stickstoff-Lasers findet sich in [KnSi].

1.5 Energieniveaus des Wasserstoffatoms

Um die Lichtentstehung im Laser erklären zu können, benötigt man eine Begründung für die diskreten Energieniveaus des Wasserstoffatoms. Die Schüler lernen diese anhand der Spektrallinien kennen und sollen sie selbst bestätigen, indem sie in einem Gruppenpuzzle die Schrödinger-Gleichung an einem einfachen Modell des Wasserstoffs lösen. Eine gute, der Schulphysik angepasste, Darstellung der Thematik findet sich in [WiMü].

1.5.1 Der Abschied vom Bohr'schen Atommodell

Das Atom wird oft als kleines Planetensystem dargestellt, bei dem die Elektronen (Planeten) auf festen Bahnen um den Kern (Sonne) kreisen. Warum ist diese Modellannahme falsch?

In diesem Planetenmodell bewegen sich die Elektronen auf Kreisbahnen. Sie müssten also ständig beschleunigt werden. Beschleunigte Ladungen strahlen jedoch wie ein Hertzscher Dipol eine elektromagnetische Welle ab und müssten damit Energie verlieren. Die Elektronen müssten daher nach kurzer Zeit in den Kern stürzen. Stabile Atome, wie wir sie kennen, wären also nicht möglich!

Die Elektronenbahnen lassen sich auch noch auf eine zweite Weise widerlegen: In der Quantentheorie kann man Elektronen im Atom die Eigenschaft „Ort“ gar nicht zuschreiben, da dies der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation widersprechen würde. Nach ihr ist es nicht möglich, Quantenobjekte wie z. B. Elektronen so zu präparieren, dass die Genauigkeit des Ortes Δx und die des Impulses Δp gleichzeitig beliebig klein werden. Es muss nämlich immer gelten:

$$\Delta x \cdot \Delta p \leq \hbar/2$$

R. P. FEYNMAN schreibt dazu in [Fey2]: „So when you try to squeeze light too much to make sure it's going in only a straight line, it refuses to cooperate and begins to spread out.“

Angenommen, im Wasserstoffatom läuft ein Elektron auf einer Bahn um den Atomkern. Dann muss der Ort sehr genau festliegen, z. B. auf ein Zehntel des Atomdurchmessers. Mit Hilfe der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation läßt sich die kinetische Energie des Elektrons berechnen: ungefähr 95 eV. Dies übersteigt die zur Ionisierung nötige Energie von 13,6 eV aber um ein Vielfaches. Das Atom würde sofort ionisiert und damit zerstört. Die Vorstellung von definierten Bahnen im Atom muss also aufgegeben werden.

Heute darf man nicht mehr von Elektronen sprechen, die sich entlang bestimmter Bahnen bewegen. Das aktuelle, quantenphysikalische Modell lässt nur noch Aussagen über die Wahrscheinlichkeit zu, ein Elektron an einer bestimmten Stelle zu messen. Ein eindrucksvolles Beispiel dafür zeigt Abb. 1.7. Man erkennt ein Quantengatter⁷, das aus 48 Eisenatomen auf einer Kupferunterlage besteht (Radius 7 nm). Tastet die Spitze eines Raster-Tunnel-Elektronen-

⁷<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html>

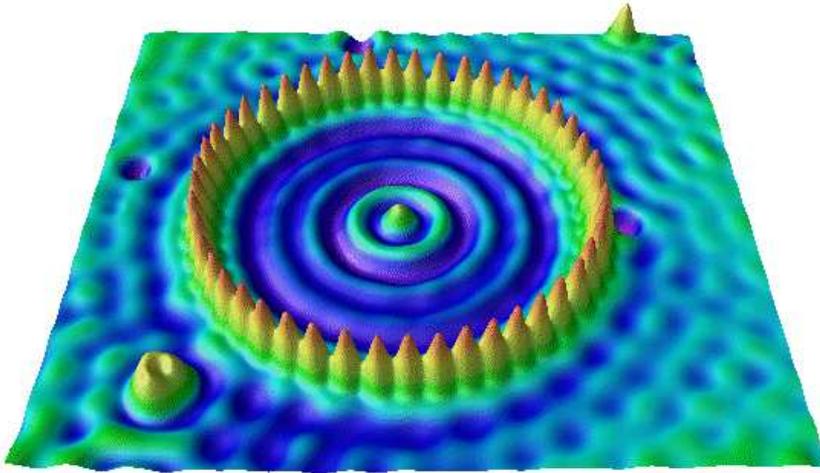


Abbildung 1.7: Quantengatter

Mikroskops das Gebiet ab, liefert sie die Wahrscheinlichkeit dafür, ein Kupfer-Elektron in diesem Bereich anzutreffen.

1.5.2 Die Schrödingergleichung

Will man heute Quantenobjekte (z. B. Elektronen) beschreiben, so kann man nur noch die Wahrscheinlichkeit angeben, dieses Objekt an einer bestimmten Stelle zu messen. Man beschreibt das Elektron mit Hilfe einer Wellenfunktion $\Psi(x)$. Das Quadrat $\Psi^2(x)$ ergibt dann die gesuchte Wahrscheinlichkeitsverteilung. Im Jahr 1926 entwickelte E. SCHRÖDINGER eine heute nach ihm benannte Gleichung zur Bestimmung von $\Psi(x)$, deren einfachste, eindimensionale Form folgendermaßen lautet

$$E\Psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m}\Psi''(x) + V(x)\Psi(x),$$

wobei E die Energie des Quantenobjektes bezeichnet, das sich im Potential $V(x)$ bewegt. R. P. FEYNMAN schreibt dazu: „Where did we get that from? It's not possible to derive it from anything you know. It came out of the mind of Schrödinger, invented in his struggle to find an understanding of the experimental observations of the real world.“

Die Lösungen dieser Schrödingergleichung für ein Kastenpotential der Breite L mit unendlich hohen Wänden lauten

$$\Psi(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad \text{für } n = 1, 2, 3, \dots$$

Die zugehörigen Energieeigenwerte sind quantisiert:

$$E_n = n^2 \frac{\hbar^2}{8mL^2} + V_0(x) \quad \text{für } n = 1, 2, 3, \dots$$

1.5.3 Energiestufen des Wasserstoffatoms

Das Wasserstoffatom ist das einfachste aller Atome, da es nur ein Elektron und ein Proton enthält, die sich wegen ihrer unterschiedlichen Ladung anziehen. Das Proton ist fast zweitausendmal schwerer als das Elektron, und es zeigt sich im Experiment, dass es auf einen sehr kleinen Raumbereich konzentriert ist. Für unser Modell des Wasserstoffatoms können wir also annehmen, dass sich das Elektron im Coulomb-Potential des Kerns aufhält:

$$V(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Man kann die Energieniveaus des Elektrons durch Lösung der Schrödingergleichung in diesem Potential ermitteln, was aber mit den mathematischen Möglichkeiten in der Schule nicht geht. Daher behelfen wir uns, nach einer Idee von [WiMü], mit einem einfacheren Modell: Wir wählen einen kastenförmigen Potentialtopf mit unendlich hohen Potentialwänden und geschickt gewählter Breite und Tiefe. Alle Näherungen dieses Modells betreffen nur die Form des Potentials und können deshalb noch auf der Ebene der klassischen Physik diskutiert werden. Die anschließende quantenmechanische Rechnung kommt ohne Näherungen aus. Im folgenden wird die Vorgehensweise nur kurz skizziert. Für die ausführliche Beschreibung des Modells und der Rechnungen sei auf [WiMü] verwiesen.

Potentialtopf-Breite: In der klassischen Physik kann sich eine in einem Coulomb-Potential gebundene Ladung nicht beliebig weit nach außen bewegen. Wie im Gravitationsfeld gibt es in einem gewissen Abstand R einen Umkehrpunkt. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass die kinetische Energie Null ist. Die Gesamtenergie ist dann gleich der potentiellen Energie:

$$E_{\text{ges}} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \quad \text{bzw.} \quad R = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{\text{ges}}}.$$

Potentialtopf-Tiefe: Es liegt nahe, V_0 so zu wählen, dass es die mittlere Tiefe des Coulomb-Potentials darstellt. Hier ergibt sich zunächst eine Schwierigkeit, weil das Coulomb-Potential am Nullpunkt divergiert. Wie soll man in diesem Fall eine mittlere Tiefe bestimmen? Es handelt sich jedoch nicht um eine echte Divergenz, denn durch die endliche Ausdehnung des Kerns wird das Potential am Rand des Kerns abgeschnitten und nimmt einen endlichen Wert an:

$$V_0 = V(r = R/2) = V\left(-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{\text{ges}}}\right) = 2E_{\text{ges}}.$$

Wir ersetzen das Coulomb-Potential für eine Ladung der Energie E_{ges} also durch einen kastenförmigen Potentialtopf mit unendlich hohen Potentialwänden, dessen Boden sich bei V_0 befindet und dessen Kantenlänge $2R$ ist. Daraus erhält man nach kurzer Rechnung folgende Energieniveaus:

$$E_n = -\frac{me^4}{n^2 h^2 \pi^2 \epsilon_0^2} \quad \text{für } n = 1, 2, 3, \dots$$

Die Proportionalität

$$E_n \sim -\frac{1}{n^2} \quad \text{für } n = 1, 2, 3, \dots$$

bestätigt die Modelle zur Erklärung der Balmerreihe des Wasserstoffs.

Kapitel 2

Methodik

*„What is science?“
is not at all equivalent to
„How to teach science?“*

R. P. Feynman

Was ein Laser ist, habe ich im vorigen Kapitel erklärt. Wie man aber unterrichtet, was ein Laser ist, ist etwas ganz anderes und soll das Thema dieses Kapitels sein.

2.1 Die Unterrichtssituation

Der in dieser Arbeit vorgestellte Unterrichtsgang fand im Frühjahr 2002 im Grundkurs 13 (drei Schülerinnen und neun Schüler) des Immanuel-Kant-Gymnasiums in Leinfelden-Echterdingen statt. Der Fachlehrer, H. SCHWEIZER, hatte in seinem Kurs zuvor nur wenig Quanten- und Atomphysik unterrichtet, so dass ich kaum Vorwissen der Schüler voraussetzen konnte.

Um mir ein Bild vom Wissensstand des Kurses machen zu können, ließ ich die Schüler zuhause einen Vortest bearbeiten, wobei sie auch Bücher und Internet zu Hilfe nehmen konnten (vgl. Blatt *00_vortest.doc* im Anhang). Viele Begriffe, nach denen gefragt war (z. B. Photon, Atombau, Quantensprung), kannten die Schüler zwar, hatten jedoch meist nur eine ungenaue Vorstellung davon. Dafür ließ der Test aber ein Interesse am Thema und eine gewisse Vorfreude auf den Unterricht erkennen, was mir die Vorbereitung sehr erleichterte.

Allerdings hatte ich für meinen Unterricht nur sechs Stunden vor und vier Stunden nach der schriftlichen Abiturprüfung zur Verfügung. Daher musste ich mich bei der Auswahl der Themen einschränken und konnte leider nicht alle Aspekte des Lasers behandeln.

Die meisten Kursteilnehmer hatten nicht vor, nach dem Abitur eine Naturwissenschaft zu studieren. Daher wollte ich den Unterrichtsgang so gestalten, dass auch die an Physik weniger interessierten Schüler mit Freude daran teilnehmen und trotzdem etwas „für später“ mitnehmen konnten. Ein Ziel das F. BADER in [Fir] folgendermaßen beschreibt:

„Die Physik so zu vermitteln, dass anschließend auch ein Studium der Physik oder einer anderen Naturwissenschaft möglich wird, bleibe weiterhin ein Ziel allen Bemühens. Man soll aber auch an den künftigen mündigen Bürger denken, der nicht unsere Fächer studiert. Auch er hat ein Anrecht darauf, im Unterricht etwas von der Kulturleistung der Physik zu erfahren. Sie besteht darin, die uns umgebende Natur sowohl in der Vielfalt ihrer Phänomene, als auch in der Tiefe ihrer Zusammenhänge zu erkennen. Im 21. Jahrhundert darf dabei die Physik des 20. nicht fehlen.“

2.2 Von der Anwendung zur Theorie

In welcher Reihenfolge soll der Laser erklärt werden? Da ich den Schülern einen motivierenden Unterricht bieten wollte, war diese Frage für mich leicht zu beantworten: Wir untersuchen zuerst den Laser und erarbeiten uns dann nach und nach die zur Erklärung nötige Theorie. Oder, wie M. WAGENSCHNEIDER es formuliert [Wag]:

„Wir steigen also beim ‚Einstieg‘ von dem Problem aus hinab ins Elementare, wir suchen das, wonach es zu seiner Erklärung verlangt. Eine Auswahl ist damit gegeben: wir häufen nicht mehr auf Vorrat, sondern suchen, was wir brauchen, wir verfahren also wie in der ursprünglichen Forschung. Das Seltsame fordert uns heraus, und wir fordern ihm das Einfache ab.“

Die PISA-Studie [Bau] hat eindeutig ergeben, dass die englischsprachigen und skandinavischen Länder unter anderem deshalb besser als Deutschland abgeschnitten haben, weil ihr naturwissenschaftlicher Unterricht stärker anwendungsbezogen und problemorientiert ist. Die Bedeutung des Anwendungsbezugs für den Physikunterricht ist jedoch nicht erst seit PISA bekannt. So schreibt H. MUCKENFUSS [Muck]:

„Der Sinngehalt physikalischer Begriffe und Gesetze erwächst erst aus der Anwendung auf einen konkreten, bedeutungsvollen Sachverhalt.“

Alle Schulbücher, die ich mir zur Vorbereitung durchgesehen habe, setzen den Laser stets ans Ende ihrer Kapitel über Atom- bzw. Quantenphysik. Innerhalb des Laser-Kapitels steht meist auch noch die Theorie am Anfang, die Anwendungen sind eher Zugabe. Dieses Vorgehen ist insofern verständlich, da es recht schwierig ist, den normalen Schul-Laser (den Helium-Neon-Laser) zu erklären, ohne zuvor einiges an Vorratswissen besprochen zu haben (vgl. 1.3).

Anders beim Stickstoff-Laser: Er ist so einfach aufgebaut, dass es möglich ist, seine Funktion anhand von Modellen zu verstehen, ohne vorher Atom- und Quantenphysik gelernt zu haben. Er bietet dem Lehrer die Möglichkeit, anders als im Schulbuch vorzugehen, und den Laser und seine Anwendungen als Motivation an den Anfang einer Einheit über Atom- und Quantenphysik zu stellen. Man kann daher mit Hilfe des Stickstoff-Lasers folgenden, fragenden Weg von der Anwendung zur Theorie gehen:

- Das Laserlicht eines Laserpointers wird untersucht. Welche Eigenschaften hat es?
- Der Stickstoff-Laser wird vorgestellt. Ist es wirklich ein Laser? Wie funktioniert er elektrisch?
- Wie entsteht das Laserlicht?
- Wird Licht von Atomen tatsächlich absorbiert und emittiert?
- Warum ist die Energie in Atomen gequantelt?

Zum Schluss kann man den Weg rückwärts gehen und mit Hilfe des erarbeiteten Wissens (nicht Vorratswissen) die Frage beantworten: Wie funktioniert der Helium-Neon-Laser?

Die Schüler wissen also bei der Erarbeitung eines neuen Unterrichtsgegenstandes stets, warum er behandelt wird und wofür er hilfreich ist. Sie erleben so einen motivierenden, nachhaltigen Physikunterricht!

2.3 Darbietender und entdeckender Unterricht

Ich habe den Unterricht so konzipiert, dass ein Gleichgewicht zwischen *entdeckendem Unterricht* und *darbietendem Unterricht* entsteht. Ein wichtiger Unterschied zwischen den beiden Verfahren liegt darin, dass der Schüler beim entdeckenden Unterricht eher eigenem Denken, beim darbietenden Unterricht eher fremdem Denken folgt (vgl. [Dui]).

Beim entdeckenden Unterricht sind die Schüler aktiv. Sie arbeiten selbstständig und sollen ihr Wissen durch eigene Handlungen erweitern. Der Lehrer verzichtet dabei auf ausgeprägte Lenkung. Langfristig können in einem solchen Unterricht Selbstständigkeit, Teamfähigkeit und Eigenverantwortung der Schüler erreicht werden. Allerdings birgt er auch die Gefahr, dass schwächere und zurückhaltendere Schüler sich aktiv oder passiv aus der Teamverantwortung heraushalten können.

Beim darbietenden Unterricht ist der Lehrer aktiv. Er kann Sachverhalte strukturiert darstellen und somit zeitökonomisch und zielgerichtet vorankommen. Die Schüler sind dabei passive Zuhörer und Mitdenker und beteiligen sich immer nur kurz am Unterricht (wie z. B. im fragend-entwickelnden Verfahren).

Da beide Verfahren ihre Vor- und Nachteile besitzen, sollten sie beide ausgeglichen verwendet werden – an jeweils passenden Stellen im Unterricht.

In meinem Unterrichtsgang gibt es Themen, die sich gut entdecken lassen: Die Eigenschaften des Laserlichtes, die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers und die Entstehung des Laserlichtes anhand eines einfachen Modells. Daher war es logisch, diese Themen so aufzubereiten, dass die Schüler sie aktiv in Teams bearbeiten konnten.

Andere Themen waren eher dafür geeignet, vom Lehrer präsentiert zu werden: Die Spektrallinien des Wasserstoffs und der Helium-Neon-Laser. Natürlich hätte man auch diese Themen schüleraktivierend behandeln können, z. B. in Form von Teamarbeiten oder Referaten. Aber aus Gründen der Zeitökonomie und Ausgewogenheit habe ich mich für die darbietende Variante entschieden.

Nur bei einem Thema, den Energieniveaus des Wasserstoffatoms, habe ich lange um die passende Unterrichtsform gerungen. Das Thema ist sehr theoretisch, wenig anschaulich und mathematisch anspruchsvoll. Dies spricht eigentlich für eine darbietende Unterrichtsform. Andererseits sollten die zum Thema gehörenden Unterrichtsstunden unmittelbar nach der schriftlichen Abiturprüfung stattfinden, so dass mit mangelnder Motivation und Aufmerksamkeit der Schüler zu rechnen ist, wenn man lehrerzentriert unterrichten würde. Außerdem gibt es bereits schöne schülergerechte und schüleraktivierende Aufbereitungen der Quantenphysik und insbesondere der Energiequantelung in Form von Teamarbeiten [Kra], einfachen Modellrechnungen [WiMü] und Computersimulationen [Küb]. Diese Ansätze motivierten mich, das Thema trotz des zuvor Gesagten in einer entdeckenden Form zu behandeln: In einem Gruppenpuzzle sollen die Schüler sich das Thema halb forschend, halb angeleitet erarbeiten.

2.4 Schüleraktivierender Unterricht

Schüleraktivierender Unterricht scheint zwar meist viel zeitraubender als ein lehrerzentrierter Unterricht, zeigt aber langfristig bessere Lernerfolge. Zudem können die Schüler wichtige Schlüsselqualifikationen lernen: Teamfähigkeit, Problemlösekompetenz, Diskussionsfähigkeit und Sozialkompetenz. H.-U. FIRNHABER sieht in selbstständigem Lernen folgende Chancen [Fir]:

- Selbstständiges Lernen fordert und unterstützt Verstehen.
- Die Lernenden müssen selbst Phänomene beobachten, Hypothesen entwickeln, Experimente durchführen, miteinander wissenschaftliche Streitgespräche führen. Auf diese Art erleben sie die wesentlichen Elemente physikalischer Erkenntnisgewinnung.
- Jugendliche sollen Physik als etwas Werdendes erfahren.

Um in meinem Unterricht eine möglichst gute Schüleraktivierung zu erreichen und möglichst viele Schüler gleichzeitig am Unterricht zu beteiligen, wählte ich in den entdeckenden

Teilen des Unterrichtsganges meist die Arbeit in Schülerteams. Diese Teams arbeiteten – möglichst ohne Lehrerinteraktion – anhand der von mir vorbereiteten Arbeitsanweisungen. Neben der selbstständigen, intensiven Erarbeitung schwieriger Sachverhalte schult dieses Vorgehen auch die Teamfähigkeit, eine der für das spätere Leben unverzichtbare Schlüsselqualifikation. Durch das Präsentieren der Ergebnisse im Plenum oder (beim Gruppenpuzzle) vor der Stammgruppe, werden die Schüler zu exakter Mitarbeit und zu kritischem Nachfragen animiert. Denn man kann nur das erklären, was man wirklich verstanden hat. Außerdem hören die Mitschüler dabei aufmerksamer zu als bei einem Lehrervortrag. Mit dieser Vorgehensweise habe ich auch die Forderung des Bildungsplans für die Kursstufe [BPK] nach Schüleraktivierung erfüllt:

„Hierbei ist die Vermittlung von Schlüsselqualifikationen von Bedeutung: Die Schülerinnen und Schüler sollen zu selbstverantwortlichem und handlungsorientiertem Arbeiten angeleitet werden und insbesondere durch Teamarbeit soziale Kompetenz sowie Kommunikations- und Präsentationsfähigkeit erwerben.“

2.5 Unterrichtsziele

Mit meinem Unterrichtsgang möchte ich aufgrund der vorangegangenen Überlegungen bei den Schülern folgende Dispositionsziele (vgl. [Dui]) erreichen:

- Entdecken einiger Unterschiede zwischen Laserlicht und herkömmlichem Licht
- Eigenschaften von Laserlicht kennen
- Wissen, wofür Laser verwendet werden können
- Die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers verstehen
- Verstehen, wie die Emissions- und Absorptionsprozesse in einem einfachen Zwei-Niveau-Modell ablaufen
- Erkennen, warum man beim Laser Besetzungsinversion benötigt
- Modelle benutzen können und ihre Grenzen kennen
- Wissen, was Spektrallinien sind und wie sie mit Energieniveaus zusammenhängen
- Verstehen, warum Atome diskrete Energieniveaus besitzen
- Den Helium-Neon-Laser verstehen
- Selbständiges Experimentieren

- Schlüsselqualifikationen vermitteln: Teamfähigkeit, Problemlösungskompetenz, Diskussionsfähigkeit und Sozialkompetenz
- Freude an der Physik, an ihren Phänomenen und Methoden, erleben

In Kap. 3 werden die zu den jeweiligen Bausteinen gehörenden Lernziele ausführlicher und in operationalisierter Form dargestellt.

Kapitel 3

Unterrichtsgang

*Denn lernen und nit tun, das ist klein;
lernen und tun, das ist groß und ganz.*

Paracelsus

In diesem Kapitel wird der Unterrichtsgang detailliert beschrieben. Dieser fand im Frühjahr 2002 im Grundkurs 13 des Immanuel-Kant-Gymnasiums in Leinfelden-Echterdingen statt. Der Kurs bestand aus 3 Schülerinnen und 9 Schülern, deren fachliches Niveau zwar weit gestreut war, die sich aber alle während des hier beschriebenen Unterrichts sehr motiviert und interessiert zeigten. Und dies sogar, obwohl der Unterricht in der Vorbereitungszeit auf das schriftliche Abitur und im „Motivationsloch“ nach der Abiturprüfung stattfand.

Eine kurze Übersicht über den Unterrichtsgang zeigt Tabelle 3.1.

	Baustein	Dauer	Datum	
1	Eigenschaften des Laserlichtes	1 h	12.3.2002	6. Stunde
2	Der Stickstoff-Laser	2 h	14.3.2002	1./2. Stunde
3	Entstehung des Laserlichtes	1 h	18.3.2002	6. Stunde
4	Spektrallinien	2 h	21.3.2002	1./2. Stunde
5	Energieniveaus des Wasserstoffatoms	3 h	23.4.2002	6. Stunde
			30.4.2002	6. Stunde
			2.5.2002	1. Stunde
6	Der Helium-Neon-Laser	1 h	2.5.2002	2. Stunde

Tabelle 3.1: Übersicht über den Unterrichtsgang

Ich habe die Reihenfolge der Stunden so gewählt, dass die Schüler sich zunächst mit der Anwendung beschäftigen können, nämlich dem Laser. Erst danach folgt die Theorie, also die Erklärung des Lasers mit Hilfe immer exakter werdender, physikalischer Modelle.

Da die einzelnen Stunden aber nicht notwendigerweise in dieser Reihenfolge unterrichtet werden müssen, oder auch einzelne Stunden losgelöst von meinem Unterrichtsgang gehalten werden können, werde ich im folgenden von *Bausteinen* statt von Stunden sprechen. Aus diesem Grunde gehören auch zu jeder Beschreibung eines Bausteines (d. h. eine, zwei oder drei Schulstunden) spezielle Vorüberlegungen und Nachbetrachtungen, die von den anderen Bausteinen unabhängig sind.

3.1 Baustein 1: Eigenschaften des Laserlichtes

In dieser Stunde sollen die Schüler im Rahmen einer Teamarbeit das Licht eines Laserpointers mit dem einer gewöhnlichen Lichtquelle vergleichen und daraus die Eigenschaften des Laserlichtes ableiten.

3.1.1 Vorüberlegungen

Drei der vier wichtigen Lasereigenschaften (einfarbig, gebündelt, intensiv) sind den Schülern ihrer Bedeutung nach aus dem Alltag oder dem Physikunterricht bekannt. Sie brauchen also nicht näher thematisiert zu werden. Nur die *Kohärenz* ist ein für Schüler unbekannter und für Schulbücher schwer zu erklärender Begriff (vgl. [Her]). Da für diesen Unterrichtsgang der Begriff Kohärenz keine große Rolle spielt, habe ich mich dagegen entschieden, ihn ausführlich zu behandeln und auch nicht zwischen räumlicher und zeitlicher Kohärenz zu unterscheiden. Für das weitere Vorgehen genügt es, wenn die Schüler mit kohärent „im Gleichtakt laufende Wellen“ und „die Fähigkeit, Interferenzmuster erzeugen zu können“ assoziieren.

Da die Schüler mit Laserpointern der Klasse 2 experimentieren sollen, ist die entsprechende Verwaltungsvorschrift¹ zu beachten. Diese schreibt vor, dass Laser nur von Lehrern in Betrieb genommen werden dürfen. Die Schülerteams können die Laserpointer-Experimente also nur zusammen mit dem Lehrer durchführen. Dem Unterricht muss zudem eine ausdrückliche Sicherheitsbelehrung vorausgehen.

Lernziele: In diesem Baustein sollen die Schüler

- Unterschiede zwischen Laserlicht und herkömmlichem Licht entdecken, indem sie im Team selbstständig Experimente planen, durchführen und dokumentieren;
- die Eigenschaften des Laserlichtes in eigenen Worten formulieren;
- die Experimente und Ergebnisse im Plenum präsentieren.

¹Verwaltungsvorschrift vom 1. Juni 1970, K. u. U. Seite 724: Richtlinien bei der Verwendung von Lasergeräten im Unterricht.



Abbildung 3.1: Folie zum Umgang mit Lasern

3.1.2 Ablauf

Da ich den Kurs bereits bei der Ausgabe des Vortests über das Thema des Unterrichtsganges informiert hatte, konnten wir direkt mit der ersten Frage – dem Thema der Stunde – beginnen: „Was unterscheidet das Licht eines Lasers von dem gewöhnlicher Lichtquellen?“.

Diese Frage sollten die Schüler in einer Teamarbeit untersuchen. Ich erläuterte den Schülern, dass sie in den folgenden Stunden häufig in Teams arbeiten würden und forderte sie auf, vier Dreier-Teams zu bilden, die während des gesamten Unterrichtsganges zusammenbleiben sollten. Es bildeten sich ein gemischtes Team aus zwei Schülerinnen und einem Schüler, ein gemischtes Team aus einer Schülerin und zwei Schülern sowie zwei reine Schüler-Teams.

Vor Beginn der Teamarbeit erklärte ich den Schülern anhand einer Folie (vgl. Abb. 3.1 und Blatt *01_lasereigenschaften_warning.cdr* im Anhang) die Gefahren und Regeln beim Umgang mit Lasern und Laserpointern.

Jedes Team holte sich nun eine von mir vorbereitete Kiste mit den Arbeitsaufträgen (vgl. Blatt *01_lasereigenschaften_teamarbeit.doc* im Anhang) und dem benötigten Material. In allen Kisten befanden sich

- Prismen
- Linsen

- Spalte
- Gitter²

Dazu bekam jedes Team eine der folgenden „gewöhnlichen“ Lichtquellen:

- Glühbirne
- Taschenlampe
- Kerze
- Natrium-Dampflampe

Die Teams sollten sich selbst Experimente ausdenken, um die ihnen zur Verfügung stehende gewöhnliche Lichtquelle mit dem Laserpointer vergleichen zu können. Die Experimente und Beobachtungen sollten auf dem Arbeitsblatt notiert werden.

Alle Teams erkannten sehr rasch, dass Laserlicht monochromatisch ist. Die Experimente dazu waren jedoch unterschiedlich: Gitter, Prismen aber auch eine Kombination aus beidem wurden verwendet. Das Team mit der Natrium-Dampflampe war überrascht, dass bei ihnen das Gitter keinen Unterschied zwischen Laser- und Natrium-Licht zeigte. Daraufhin liehen sie sich die Glühlampe des anderen Teams, um sich zu vergewissern, dass das Gitter „normalerweise doch einen Regenbogen“ erzeugt. Danach konnten sie sicher sagen, dass sowohl Laser- als auch Natrium-Licht monochromatisch ist.

Dass Laser ein sehr gebündeltes Licht erzeugen, war den meisten Schülern so selbstverständlich (Laser kannten sie ja meist von Laserpointern, Lasershows und Science-Fiction-Filmen), dass sie gar keine Experimente dazu machten. Erst, als ich die Teams aufforderte, ihre gewöhnliche Lichtquelle mit Hilfe der Linsen so zu bündeln, dass ein ähnlich kleiner Punkt an der Zimmerwand zustande kommt, bekamen sie ein Gefühl für diese besondere Eigenschaft. Eine Schülerin bezeichnete während dieses Experimentes das Taschenlampenlicht als „Lichtwolke“ im Gegensatz zum Laserpunkt.

Auch zur Interferenz wurden Experimente durchgeführt, die meist damit endeten, dass der Laserpointer das eben besonders gut kann. Genauere Überlegungen zur Kohärenz hatte ich von den Schülern auch nicht erwartet.

Die Intensität als vierte, wichtige Lasereigenschaft, konnte im Rahmen dieser Experimente natürlich nicht entdeckt werden. Diese Eigenschaft ergänzte ich später.

²Das Gitter war ein Spielzeug-Kreuzgitter, das in Spielzeuggläden unter der Bezeichnung *Rainbow Peephole* zu kaufen ist. Da es nur um qualitative Versuche ging, reichte dieser 70 Cent-Artikel völlig aus. Die Teams spielten sofort damit herum und merkten erst später, dass sie eigentlich gerade experimentiert hatten. Ein Schüler brachte in der nächsten Stunde sogar eine Scherz-Brille mit, die er in England gekauft hatte. Ihre „Gläser“ bestanden aus derselben Kreuzgitter-Folie wie das Spielzeug.

Nach ca. 30 Minuten endete die Teamarbeit, und die Ergebnisse wurden im Plenum zusammengetragen. Die Teams schilderten ihre Experimente sowie die daraus abgeleiteten Eigenschaften. Ich erläuterte und ergänzte die von den Teams gefundenen Eigenschaften anhand von Folien (vgl. Blätter *01_lasereigenschaften_eigenschaften.doc* im Anhang), die neben Fachbegriffen und Größenordnungen auch ein Bild (Abb. 3.2) aus [Röt] enthielten, das den Unterschied zwischen Laserlicht und Taschenlampenlicht sehr anschaulich demonstrierte. Die Folien bekamen die Schüler als Kopie ausgeteilt.

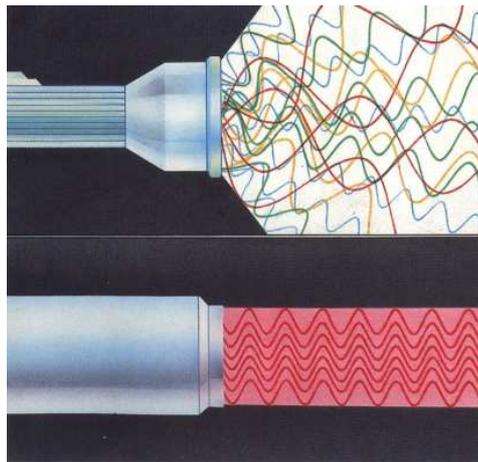


Abbildung 3.2: Vergleich zwischen Taschenlampe und Laser

Als Hausaufgabe beantworteten die Schüler folgende zwei Fragen: „Wo werden Laser verwendet?“ und „Welche Lasereigenschaften spielen dabei eine Rolle?“

3.1.3 Nachbetrachtungen

Die Teamarbeit verlief gut. Die Zusammenarbeit in den Teams klappte von Anfang an. Auch beim Ausdenken geeigneter Experimente waren die Schüler sehr kreativ. Allerdings zeigte sich dabei, dass Schüler nicht gewohnt sind, dass bei Experimenten „kein Ereignis“ durchaus ein gutes Ergebnis sein kann.

Je nach Zeit und Vorbildung des Kurses, könnte man die Kohärenz noch genauer besprechen als in dieser Stunde und die Unterscheidung von zeitlicher und räumlicher Kohärenz erklären: Die räumliche Kohärenz anhand des Young'schen Doppelspaltversuches und die zeitliche mit Hilfe des Michelson-Interferometers. Alternativ dazu bietet sich auch die eher anschauliche Erklärung in [Her] an. Da die Kohärenz (vgl. 1.2) für meinen Unterrichtsgang keine große Rolle spielte, verzichtete ich auf die ausführliche Behandlung.

Als alternativen Einstieg in diesen Unterrichtsgang könnte man statt der Hausaufgabe dieser Stunde die Laseranwendungen vorziehen und zu Beginn der Stunde (oder sogar in einer

eigenen Stunde) besprechen. Eine Auswahl möglicher Themen: Materialbearbeitung, Holographie, Messtechnik, Nachrichtenübertragung, CD/DVD-Spieler, Laserwaffen, Atomfallen, Laserskalpell und viele mehr.

3.2 Baustein 2: Der Stickstoff-Laser

In dieser Doppelstunde werden der Stickstoff-Laser (vgl. Kap. 1) vorgeführt, seine Lasereigenschaften nachgewiesen und die elektrische Funktionsweise erarbeitet.

3.2.1 Vorüberlegungen

So einfach der Stickstoff-Laser auf den ersten Blick auch aussieht, so kompliziert ist es, seine elektrische Funktionsweise *genau* zu verstehen. Daher halte ich es für unabdingbar, dass die Schüler selbst über das Gerät diskutieren und es sich Schritt für Schritt gegenseitig erklären. Genauso wichtig ist aber auch ein Überblick über den gesamten elektrischen Prozess. Beide Aspekte spielen in diesem Baustein daher eine zentrale Rolle.

Lernziele: In diesem Baustein sollen die Schüler

- die Eigenschaften des Laserlichtes aufzählen;
- die Frage beantworten, wofür Laser verwendet werden;
- beschreiben, welche Eigenschaften des Laserlichtes für bestimmte Anwendungen des Lasers eine Rolle spielen;
- Experimente vorschlagen, mit denen man nachweisen kann, dass der Stickstoff-Laser tatsächlich ein Laser ist;
- die Bauteile des Stickstoff-Lasers in einer Skizze beschriften;
- die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers im Team anhand eines Schaltplanes herausfinden;
- die einzelnen Phasen des elektrischen Prozesses beschreiben und skizzieren.

3.2.2 Ablauf

Diese Doppelstunde begann mit der Wiederholung der Eigenschaften des Laserlichtes, die Thema der letzten Stunde waren. Die Schüler sollten als Hausaufgabe Anwendungen des Lasers und die für diese Anwendung entscheidenden Eigenschaften herausfinden. Anscheinend

hat den Schülern diese Hausaufgabe Spaß gemacht, denn sie nannten nicht nur Stichwörter sondern auch vollständige Erklärungen der jeweiligen Laseranwendungen. Beispiele der von Schülern gefundenen Laseranwendungen:

- Richtungsweiser beim Tunnelbau
- Schweißen und Schneiden
- SDI (Laserabwehrsystem)
- Augenoperation
- CD-Player (ich ergänzte den DVD-Player und die Notwendigkeit von blauen Laserdi-oden für diese Anwendung)
- Laserdrucker

Ich steuerte noch zwei weitere Anwendungen hinzu, die die Schüler nicht gefunden hatten:

- Mondabstandsmessung mit Hilfe des auf dem Mond zurückgelassenen Spiegels (System aus mehreren Tripelspiegeln)
- Die Herstellung von Hologrammen, wie sie z. B. auf EC-Karten zu finden sind

Daran anschließend erklärte ich, dass es abhängig von der gewünschten Anwendung ganz verschiedene Möglichkeiten gibt, Laserlicht zu erzeugen. Da die meisten dieser Laser für Schüler nur schwer zu verstehen sind, hätte ich einen Laser gebaut, den man viel leichter verstehen könne.

Nun bat ich die Schüler nach vorne, zeigte ihnen den bereits aufgebauten Stickstoff-Laser (vgl. Kap. 1) und erklärte, aus welchen Teilen er besteht. Über die Funktionsweise habe ich an dieser Stelle noch nicht gesprochen, da sie die Teams später selbst herausfinden sollten.

Nachdem sich alle wieder gesetzt hatten, schaltete ich den Laser ein und hielt einen grauen, ungebleichten Karton in den Laserstrahl. Die Schüler waren etwas enttäuscht, dass es zwar knallte, aber gar nichts zu sehen war. An dieser Stelle erklärte ich, dass dieser Laser UV-Licht emittiert und fragte, wie man UV-Licht sichtbar machen könnte. Eine lustig gemeinte Schülerantwort lautete „Sonnenbrand“. Sowohl aus Sicherheitsgründen als auch wegen der geringen Leistung des Lasers schied dieser Vorschlag schnell aus. Erst nach meinem Hinweis auf Disco-Schwarzlichtlampen, kam der Vorschlag, „weiße Stoffe“ zu verwenden. Ich hielt daraufhin einen weißen, gebleichten Karton in den Strahl, und es erschien bei jedem Knall ein blauer Punkt.

„Woher wissen wir, dass es sich hierbei tatsächlich um Laserlicht handelt?“ – Diese Frage sollte die Schüler an die in der letzten Stunde durchgeführten Experimente erinnern. Die

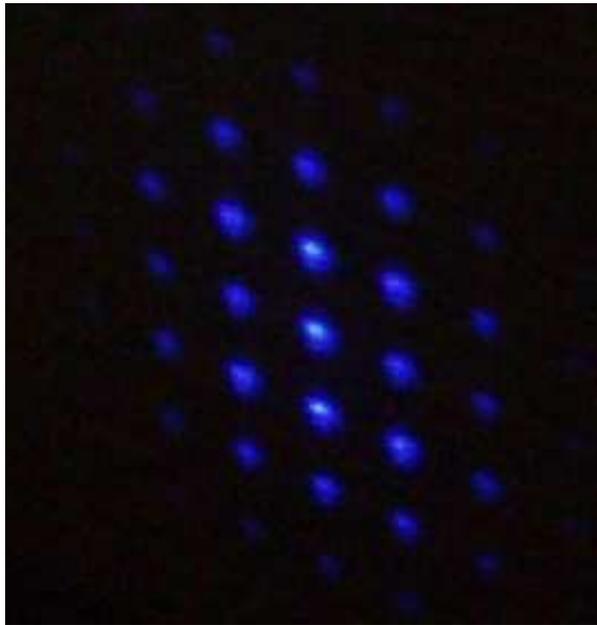


Abbildung 3.3: Beugungsfigur des Stickstoff-Lasers

Schüler forderten mich sofort auf, mit Hilfe des Spielzeug-Kreuzgitters *Rainbow Peephole* die Einfarbigkeit und Kohärenz nachzuweisen. Ich erzeugte in ca. 2 m Entfernung ein blaues Punktmuster (siehe Abb. 3.3).

Zur Intensität des Lasers konnte ich keinen Versuch vorführen. Aber, dass dieses Laserlicht gebündelt ist, konnte ich zeigen, indem ich einen blauen Punkt an der mehrere Meter entfernten Zimmerwand erzeugte. Dieser war zwar (aufbaubedingt) nicht so winzig wie der eines Laserpointers, aber immer noch viel kleiner als es mit einer Taschenlampe möglich gewesen wäre.

Nun tauschte ich den weißen Karton noch gegen einen Karton mit diversen Leuchtfarben (Leybold Nr. 469 82) aus und erzeugte so verschiedenfarbige Lichtblitze.

Nachdem jetzt alle davon überzeugt waren, dass dieses ungewöhnliche Gerät tatsächlich ein Laser ist, erklärte ich dem Kurs das Ziel der gesamten Unterrichtseinheit: Wir wollen verstehen, wie dieser Laser physikalisch funktioniert.

Der erste Schritt dorthin war die Erklärung der elektrischen Funktionsweise. Dazu teilte ich zunächst ein Arbeitsblatt mit einer Schräg- und einer Seitenansicht des Lasers aus (vgl. Blatt *02_n2laser_arbeitsblatt.cdr* im Anhang), in das wir gemeinsam die Bezeichnungen der einzelnen Bauteile eintrugen.

Nach der Pause sollten die Schüler in ihren Dreier-Teams versuchen, die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers zu verstehen. Es entwickelten sich rasch intensive Diskussionen. Den Aufladevorgang hatten die Teams schnell verstanden. Auch der erste Funken-

Überschlag machte wenig Probleme. Etwas mehr Probleme bereitete den Teams der zweite Überschlag und die Funktion der Spule. Aber auch dieses Problem wurde schließlich in den Teams gelöst (Ein Team zeichnete ein STOP-Schild neben das Spulensymbol).

Die Teamarbeit dauerte etwas länger als geplant – dafür hatten die Schüler die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers aber sehr gut verstanden, was die zügige Ergebnissicherung im Anschluss zeigte. Dazu teilte ich ein weiteres Arbeitsblatt (vgl. Blatt *02_n2laser_funktion_arbeitsblatt.doc* im Anhang) aus, das wir gemeinsam ausfüllten:

- Die untere Kondensatorplatte liegt auf 0 V. Beide Laserplatten sind durch die Spule verbunden. Also laden sich beide Laserplatten positiv (5000 V) auf.
- Wenn die Spannung groß genug ist, entsteht ein Überschlag. Eine obere Platte entlädt sich. Wegen des großen Spannungsabfalls wirkt die Spule wie ein Widerstand (induktiv). Daher bleibt die andere Platte geladen.
- Die Spannung liegt nun zwischen den beiden Laserplatten. Ihr Abstand ist kleiner als der der Funkenstrecke. Also entstehen sofort Überschläge. Das Laserlicht entsteht! (→ Erklärung nächste Stunde)
- Die Platten sind entladen. Die Spule ist wieder offen. Ladung kann wieder fließen.
- Der Prozess beginnt von neuem.

Zusätzlich zum Text färbten wir noch die Zeichnungen auf dem Arbeitsblatt entsprechend dem in der jeweiligen Phase vorliegenden Potential.

Da jeder einzelne Schritt viel Denk- und Diskussionszeit bedurfte, hatten die Schüler den Gesamtprozess etwas aus dem Auge verloren. Daher zeigte ich dem Kurs nun eine vorbereitete PowerPoint-Präsentation (vgl. *02_n2laser_funktionsweise.ppt* auf der CD-ROM), in der ich den elektrischen Ablauf des Lasers animiert hatte.

Am Ende der Präsentation stellte eine Schülerin die Frage, die ich eigentlich früher erwartet hatte: „Auf den Arbeitsblättern und in der Präsentation steht immer *Stickstoff*-Laser. Warum heißt der denn so?“ Ich erklärte es und verwies auf die nächste Stunde, in der diese Information sehr wichtig würde.

Da wir an dieser Stelle schon den Bogen zur nächsten Stunde gespannt hatten, stellte ich auch gleich die Hausaufgabe: „Wofür braucht man eigentlich zwei Überschläge? Man könnte ja auch direkt die beiden Laserplatten an das Hochspannungsnetzgerät anschließen.“

3.2.3 Nachbetrachtungen

Da ich recht lange an dem Stickstoff-Laser gebastelt hatte, war ich auf diese Stunde sehr gespannt, und freute mich, den Schülern diesen Laser vorführen zu können. Meine Begeisterung

dafür scheint auf die Schüler übergelungen zu sein, denn trotz der anspruchsvollen Thematik machte der gesamte Kurs von Anfang bis Ende interessiert und aktiv mit.

Die Schüler wollten die Funktionsweise des Lasers wirklich verstehen und knobelten intensiv daran. Die PowerPoint-Präsentation am Ende der Stunde – die aus den kleinen Schritten in den Köpfen wieder einen ganzen Prozess entstehen ließ – verfolgten sie äußerst aufmerksam und stellten gute Zwischenfragen (z. B. über die Zeitdauer der Auf- und Entladungsprozesse).

Ich hatte von mir aus den Begriff des *Stickstoff*-Lasers nicht erklärt und erwartet, dass die Schüler dies sofort erfragen würden. Leider kam diese Frage erst kurz vor Ende der Stunde. Vielleicht sollte man daher den Begriff schon zu Beginn der Stunde besprechen.

Sicherlich hätte man die elektrische Funktionsweise des Lasers auch in kürzerer Zeit besprechen können, aber dann hätten die Schüler dies bestimmt nicht so gut verstanden wie in dieser Doppelstunde, in der genug Zeit für die Teamarbeit war (es braucht z. B. einige Zeit, die Funktionsweise der Spule als induktiver Widerstand in diesem Aufbau gut zu verstehen). Andererseits hätte man dann mehr Zeit, um z. B. die Wellenlänge des Lasers mit Hilfe eines Gitters quantitativ zu bestimmen.

Auch die Laseranwendungen könnte man noch ausführlicher behandeln (wenn man 1–2 Stunden mehr Zeit hat). Als eigener Baustein würde sich dann insbesondere das Hologramm eignen, das sich auch in der Schule leicht herstellen lässt, wie z. B. in [KnWa] beschrieben ist.

3.3 Baustein 3: Entstehung des Laserlichtes

In dieser Stunde sollen die Schüler in Teamarbeit anhand eines einfachen Modells verstehen, wie das Licht des Stickstoff-Lasers (vgl. Kap. 1) entsteht.

3.3.1 Vorüberlegungen

Die Entstehung des Laserlichtes physikalisch korrekt zu erklären, ist aufwendig und schwierig: Die Beschreibung der Wechselwirkung von Licht mit Materie (Quantisierung des elektromagnetischen Feldes), Energieniveaus und Termschemata, spontane und stimulierte Strahlungsprozesse, Besetzungsinversion und Verstärkung etc. In Kapitel 1.1 sind die physikalischen Grundlagen für die Lichtenstehung des Laserlichtes im Stickstoff-Laser kurz zusammengefasst. Ausführliche Darstellungen finden sich z. B. in [KnSi] und [Mes].

Für den Schulunterricht bietet sich ein einfaches Modell an, mit dessen Hilfe die Schüler Absorption, spontane bzw. stimulierte Emission, Besetzungsinversion und Lichtverstärkung verstehen können. Dieses Modell für den Stickstoff-Laser ist [Bro] entnommen und besteht aus magnetisch haftenden Photonen- und Stickstoff-Symbolen (siehe Abb. 3.4). Letztere sind Pfeile, die den Anregungszustand des Stickstoff-Moleküls anzeigen. Mit Hilfe der Symbole lassen sich die Absorptions- und Emissionsprozesse in Momentaufnahmen darstellen. Die

Ausbreitung und Verstärkung der Lichtwellen kann damit von den Schülern leicht nachvollzogen werden.

Dieses Modell setzt folgende Annahmen voraus, die in den folgenden Bausteinen begründet werden:

- Atome senden Photonen aus und nehmen Photonen auf. Dies wird in Baustein 4 begründet.
- Existenz diskreter Energieniveaus der Atome. Dies wird in Baustein 5 begründet.
- An der Lichtentstehung sind nur zwei Energieniveaus beteiligt. Der Stickstoff-Laser ist eigentlich ein Drei-Niveau-Laser, lässt sich aber vereinfacht auch nur mit zwei Niveaus beschreiben.
- Bei der stimulierten Emission „fliegen“ stimulierendes und stimuliertes Photon in dieselbe Richtung. Dies wird hier nicht näher begründet, da die zugrunde liegenden quantenoptischen Überlegungen (siehe [Mes]) im Rahmen der Schulphysik nicht behandelt werden können.

Lernziele: In diesem Baustein sollen die Schüler

- die Wechselwirkungsprozesse zwischen Stickstoff-Molekülen und Licht anhand eines Modells nachvollziehen;
- Prozesse mit unterschiedlichen Anfangsverteilungen simulieren;
- mit Hilfe dieser Simulationen eine Verteilung mit möglichst hoher Photonenausbeute entwickeln;
- die Frage beantworten, wie der Stickstoff-Laser eine solche Verteilung erzeugt;
- in eigenen Worten definieren, was ein Laser ist.

3.3.2 Ablauf

Zu Beginn dieser Stunde führte ich noch einmal kurz den Stickstoff-Laser vor und kam dabei auf die schwierige Hausaufgabe zu sprechen: Wieso braucht man zwei Überschläge? Die Schüler hatten jedoch die Antwort gefunden und erklärten verständlich die Entstehung des Überschlages entlang des gesamten Laserkanals (vgl. 1.4.2).

In der letzten Stunde hatten wir die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers geklärt, dabei aber die Lichtentstehung übersprungen. Damit war das Ziel der heutigen Stunde klar: Wie entsteht das Laserlicht?

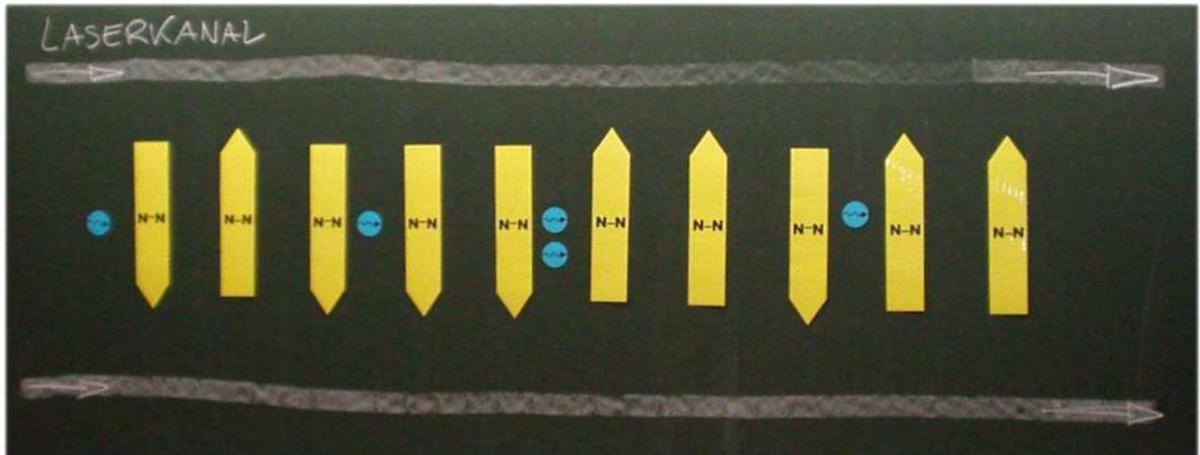


Abbildung 3.4: Modell zur Entstehung des Laserlichts

Zunächst griff ich nochmals die Frage der Schülerin vom letzten Mal auf, woher der Stickstoff-Laser seinen Namen hätte. Luft enthält 77,1% Stickstoff, weshalb wir modellhaft davon ausgehen könnten, dass sich nur Stickstoff-Moleküle (N_2 oder N–N) im Laserkanal befänden. Ich erklärte, dass Stickstoff viele verschiedene Energieniveaus besäße (eine Vorstellung, die den Schülern aus dem Chemieunterricht vertraut war), von denen wir aber nur zwei für unser Modell bräuchten: Ein „oberes Niveau“ und ein „unteres Niveau“. An dieser Stelle zeigte ich das Modell mit magnetisch haftenden Symbolen auf der Tafel (siehe Abb. 3.4).

Anhand dieses Modells besprachen wir die drei Wechselwirkungsprozesse zwischen Stickstoff-Molekülen und Licht (vgl. Blätter *03_lichtentstehung_folien.doc* im Anhang):

- 1) **Absorption:** Das Stickstoff-Molekül kann ein Photon passender Energie E absorbieren und springt dabei vom unteren ins obere Energieniveau (Abb. 3.5 links).
- 2) **Spontane Emission:** Befindet sich das Stickstoff-Molekül im oberen Energieniveau, so fällt es spontan (d. h., nach einer Zeit, die nicht vorhersagbar ist) ins untere Niveau zurück. Dabei sendet es ein Photon aus. Dieses Photon besitzt dieselbe Energie E wie das in 1) absorbierte (Abb. 3.5 in der Mitte).
- 3) **Stimulierte Emission:** Trifft ein Photon ein Stickstoff-Molekül, das sich im oberen Energieniveau befindet, so kann es eine vorzeitige Emission stimulieren: Das Stickstoff-Molekül fällt sofort wieder ins untere Niveau zurück und sendet ein Photon aus. Das stimulierende und das entstandene Photon haben dieselbe Energie E und laufen beide im Gleichschritt (\Rightarrow Kohärenz) (Abb. 3.5 rechts).

Zur stimulierten Emission berichtete ich über die wichtige Arbeit von A. EINSTEIN [Ein] und zitierte aus seinem Brief an M. A. BESSO aus dem Jahre 1916: „Es ist mir ein prächtiges Licht über die Absorption und Emission der Strahlung aufgegangen.“

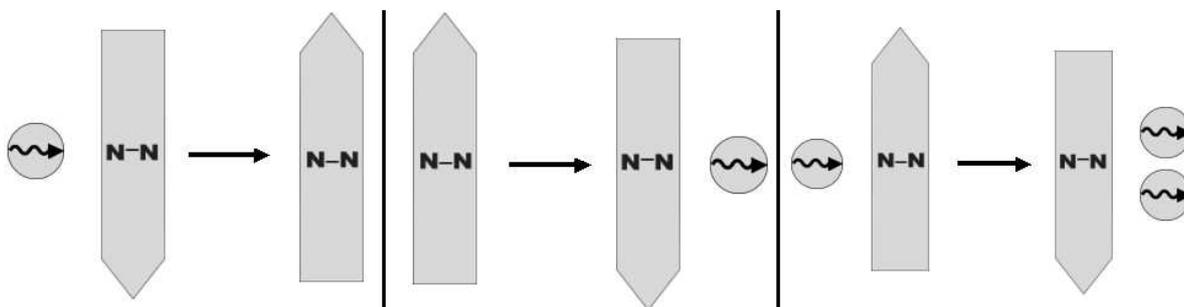


Abbildung 3.5: Wechselwirkung von Stickstoff-Molekülen mit Licht

Anhand eines Arbeitsauftrages (vgl. Blätter *03_lichtentstehung_arbeitsauftrag.doc* im Anhang) sollten die Teams nun mit dem Modell spielen, die Laserbedingung (Besetzungsinversion) entdecken und die Funktion des Überschlags im Stickstoff-Laser verstehen. Dafür hatte ich vier Sätze des Modells hergestellt (je 10 gelbe Pfeile und 12 blaue Photonen aus laminiertem Papier). Ich hatte 15 Minuten für diese Teamarbeit vorgesehen, aber die Diskussionen der Schüler waren so intensiv und anregend, dass ich sie insgesamt 25 Minuten mit dem Modell arbeiten ließ.

Die Schüler brauchten etwas Zeit, um ein Gefühl für das Modell zu bekommen. Dann aber wurden sie sehr kreativ, spielten mehrere Simulationen durch und entdeckten sehr schnell, wie eine große Photonenzahl zu erreichen ist. Dass eine Besetzungsinversion durch Erwärmen nicht funktioniert, aber durch den Funkenüberschlag ersetzt werden kann, bereitete den Team im weiteren Verlauf keine Schwierigkeiten. Dafür begannen sie, sich Konstellationen auszu-denken, in denen zwei Lichtpulse entstehen bzw. gar keine. Auch die Richtung der Emission wurde heftig diskutiert.

Nach dem Ende der Teamarbeit trugen die Schüler ihre Ergebnisse vor und erklärten die einzelnen Abläufe mit Hilfe des großen Modells an der Tafel. Die Frage nach der Richtung des Lichtpulses wurde nochmals im Plenum gestellt und von einer Schülerin perfekt beantwortet: „Der Kanal ist doch an einer Seite enger. Dort werden die Moleküle zuerst ins obere Niveau gehoben. Also fallen sie dort wahrscheinlich früher wieder runter und starten den Lichtpuls.“

Im anschließenden Gespräch ließ ich die Schüler nach einer Definition für den Laser suchen. Sie einigten sich auf „Gerät zur Lichterzeugung durch stimulierte Emission“. Daraufhin legte ich die Folie mit der Erklärung des Akronyms LASER auf (vgl. Blätter *03_lichtentstehung_folien.doc* im Anhang), und ein großes „Ah so!“ ging durch den Raum.

Kurz vor Ende der Stunde diskutierte ich mit den Schülern, dass wir die Entstehung des Laserlichtes in dieser Stunde anhand eines Modells erklärt hätten, in dem mehrere Annahmen stecken. Um diese Erklärung wirklich zu verstehen, müssten wir also auch noch diesen Annahmen auf den Grund gehen. Dazu sollten sich die Schüler als Hausaufgabe überlegen, welche Annahmen dem Modell zu Grunde lägen.

3.3.3 Nachbetrachtungen

Das Modell zur Lichtentstehung im Stickstoff-Laser, das eigentlich für die Sekundarstufe I gedacht war (vgl. [Bro]), hat sich auch in der Sekundarstufe II bewährt. Da die Schüler hier schon viel mehr Hintergrundwissen besitzen, animiert das Modell darüber hinaus zu Diskussionen und regt zum Weiterdenken an. Meiner Meinung nach ist es daher in der Sekundarstufe II sogar besser aufgehoben.

Der Aufwand, die vier kleinen Modelle und das große Tafelmodell herzustellen, war groß. Um Zeit zu sparen, könnte man alternativ den Bastelbogen (vgl. Blätter *03_lichtentstehung_bastelbogen.cdr* im Anhang) von jedem Team als Hausaufgabe ausschneiden und mitbringen lassen.

Die Besprechung der Hausaufgabe zu Beginn der Stunde bestätigte, dass es sich gelohnt hatte, die elektrische Funktionsweise des Stickstoff-Lasers im vorangehenden Baustein so ausführlich zu behandeln. Dass Schüler nämlich die schwere Frage nach der Notwendigkeit des zweiten Überschlags *fehlerfrei* beantworten können, hatte ich nicht erwartet. Positiv überrascht war ich auch von der Freude der Schüler, das Akronym LASER verstanden zu haben.

Als Ergänzung zu dieser Stunde könnte ich mir in weiteren Stunden folgende Themen vorstellen:

- Lesen des oben erwähnten Textes von A. EINSTEIN [Ein] im Original und Erklären der Besetzungsinversion unter Verwendung der Einsteinkoeffizienten
- Realisierung der Besetzungsinversion über Lebensdauern von Energieniveaus (Metastabile Niveaus) am Beispiel des Helium-Neon-Lasers
- Computersimulation des Laserkanals erstellen
- Physikalische Modellbildung anhand des Laserlicht-Modells

Die oben beschriebene Stunde zur Entstehung des Laserlichtes würde ich aber jederzeit so wiederholen, wie sie war!

3.4 Baustein 4: Spektrallinien

In dieser Doppelstunde sollen die Schüler Spektrallinien kennen lernen, durch sie die Absorption und Emission von Photonen verstehen und anhand der Balmer-Serie des Wasserstoffs den Zusammenhang zwischen diskreten Energieniveaus und Spektrallinien erkennen.

3.4.1 Vorüberlegungen

Dieser Baustein enthält eine für die Schüler ungewohnte Vorgehensweise: Das Modell der Emission von Licht aus Atomen wird mit einem weiteren Modell erklärt, nämlich den (zu $-1/n^2$ proportionalen) Energieniveaus des Wasserstoffs. Dieses Vorgehen wird den Schülern aber bewusst gemacht, und das zweite Modell wird in den nächsten Stunden auch gleich begründet.

Lernziele: In diesem Baustein sollen die Schüler

- die Annahmen angeben, die im Laserlicht-Modell stecken;
- die Spektren verschiedener Lichtquellen zeichnen;
- den Zusammenhang zwischen Spektrallinien und Energieniveaus erkennen;
- begründen, warum die Modellannahme der Licht-Emission und -Absorption im vorangegangenen Baustein korrekt war;
- den Unterschied zwischen der physikalischen und literarischen Bedeutung des Wortes Quantensprung erklären.

3.4.2 Ablauf

Die Stunde begann mit einer kurzen Erinnerung an das Modell zum Laserlicht aus der letzten Stunde. Welche Annahmen in diesem Modell steckten, hatten die Schüler als Hausaufgabe herausfinden sollen. Sie fanden folgende Annahmen:

- Diskrete Energieniveaus der Atome und Moleküle
- Atome senden Photonen aus und nehmen Photonen auf
- Die Photonen werden nach „rechts“ emittiert

In den verbleibenden Stunden sollten die ersten beiden Annahmen begründet werden, um somit den Laser vollständig erklären zu können. Die dritte Annahme kann jedoch erst an der Universität beründet werden.

Das Thema dieser Doppelstunde war somit die Begründung der Emission und Absorption von Licht durch Atome. Wir begannen daraufhin mit dem zentralen Versuch der Stunde: Die Untersuchung der Spektren verschiedener Lichtquellen. Dazu wurde ein beleuchteter Spalt mit Hilfe eines Gitters auf die Wand projiziert (vgl. Abb. 3.6).

Damit untersuchten wir qualitativ die Spektren einer Glühlampe, einer Natrium-Dampflampe, eines Laserpointers und einer Quecksilber-Dampflampe. Die Schüler zeichneten die



Abbildung 3.6: Versuchsaufbau zur Spektralanalyse (mit Natrium-Dampfampe)

Spektren, die sie beobachten konnten. Ich gab die zu den Linien gehörenden Wellenlängen an und erklärte anschließend anhand einer Spektraltafel die Spektralanalyse. Währenddessen ließ ich ein Taschenspektroskop durch die Reihen laufen, mit dessen Hilfe die Schüler das Spektrum der Leuchtstoffröhren im Physiksaal betrachten konnten. Abbildung 3.8 zeigt den in dieser Phase entstandenen Tafelanschrieb.

Zu Beginn der zweiten Stunde stand die Begründung der Absorption von Photonen auf dem Programm. Ich baute die Natrium-Dampfampe wieder in den Versuchsaufbau ein, brachte mit dem Bunsenbrenner ein Magnesiastäbchen zum Glühen und tauchte es in Kochsalz. Ich erklärte den Schülern, dass ich nun das Kochsalz auf dem Stäbchen mit dem Bunsenbrenner im Strahlengang verbrennen würde und dass dabei Natrium-Dampf entstünde. Was könnte passieren? Da das Laserlicht-Modell bereits die Absorption passender Photonen enthielt, erwarteten die Schüler, dass ein paar Photonen „verschluckt“ würden. Als ich den Versuch dann durchführte, waren sich sehr erstaunt, dass diese *paar* Photonen ausreichten, die gelbe Natrium-Linie sichtbar dunkler werden zu lassen.

Wir erarbeiteten den zweiten Teil des Tafelanschiebs (vgl. Abb. 3.9) und besprachen noch den Zusammenhang zwischen Energie und Wellenlänge der Photonen. Die Planck'sche Konstante h hatten die Schüler bereits beim Franck-Hertz-Versuch kennen gelernt.

Wie entstehen denn die diskreten Spektrallinien? Um diese Frage zu beantworten, ließ ich die Schüler mit einem Prisma eine mit Wasserstoff gefüllte Gasentladungsröhre betrachten (vgl. Abb. 3.7) und das beobachtete Spektrum zeichnen. Anhand der Folie zum Wasserstoff-Atom (vgl. Blatt 04_spektrallinien_wasserstoff.cdr im Anhang), die die Schüler als Kopie ausgeteilt bekamen, erklärte ich die Entstehung der Balmer-Serie und erarbeitete mit den Schülern den letzten Teil des Tafelanschiebs (siehe Abb. 3.10). Dass die Schüler das Modell schnell begriffen hatten, zeigt folgender Dialog:

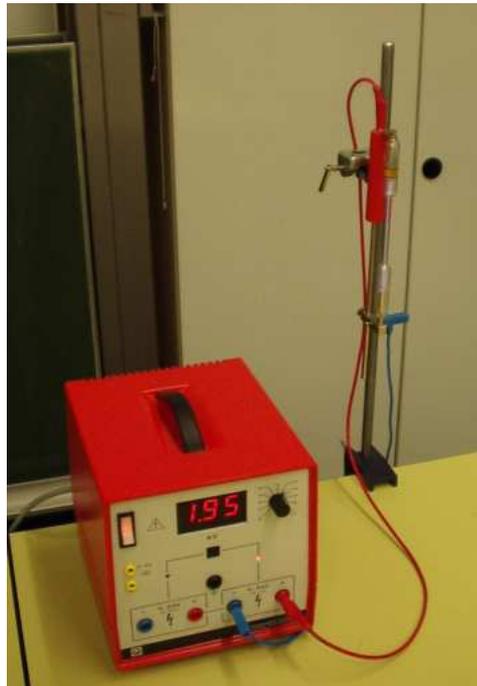


Abbildung 3.7: Versuchsaufbau zur Balmer-Serie

S₁: Kann man auch umgekehrt das Wasserstoff-Atom von einem niedrigen Niveau auf ein höheres Niveau bringen?

L: Ja, das geht. Aber wie?

S₂: Indem man ein Photon schickt mit der Energie, die der benötigten Differenz entspricht.

Da der Unterrichtsgang wegen des schriftlichen Abiturs für vier Wochen unterbrochen wurde, teilte ich den Schülern als vergnügliche Hausaufgabe ein Arbeitsblatt aus, das eine Karikatur und einen Zeitungsausschnitt zum Quantensprung enthielt (vgl. Blatt *04_spektrallinien_quantensprung.cdr* im Anhang).

3.4.3 Nachbetrachtungen

Diese Doppelstunde war im Vergleich zu den anderen Stunden der Unterrichtseinheit sehr lehrerzentriert. Allerdings eigneten sich die meisten Bestandteile dieses Bausteins eher nicht für Teamarbeiten (einen kurzen Teamauftrag zu Spektrallinien findet man in [Kra]).

Ich habe die Wellenlängen der Spektrallinien im Unterricht aus Gründen der Zeitökonomie selbst angegeben. Wenn man möchte und genug Zeit hat, kann man die Linien natürlich ausmessen. Eine weitere Ergänzung wären die Absorptionslinien im Sonnenspektrum (Fraunhofersche Linien).

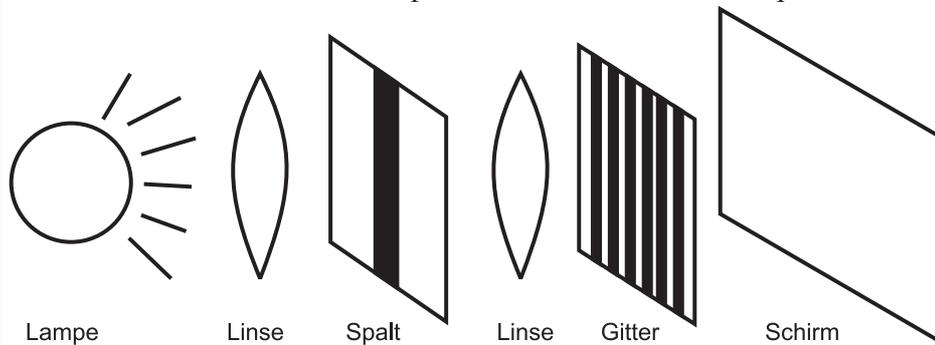
Welche Annahmen stecken im Laserlicht-Modell?

- Diskrete Energieniveaus der Atome und Moleküle
- Atome senden Photonen aus und nehmen Photonen aus
- Die Photonen werden nach „rechts“ emittiert

Warum sind diese Annahmen richtig?

1. Annahme: Atome senden Photonen aus

Versuch: Wir untersuchen die Spektren verschiedener Lichtquellen.



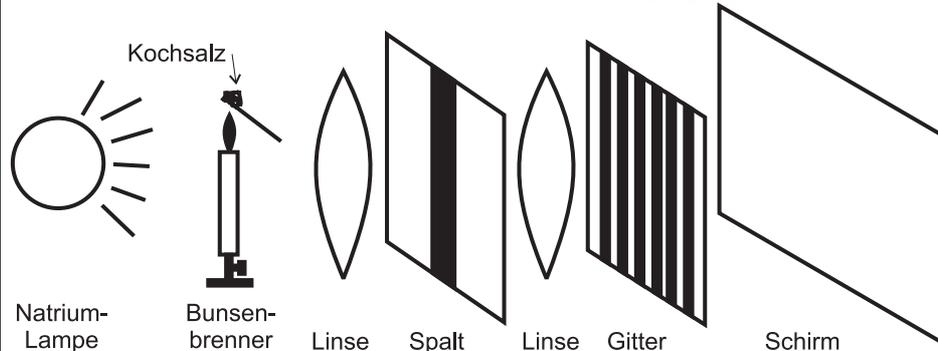
Lichtquelle	Spektrum	Wellenlänge
Glühlampe		750–400 nm
Natrium-Dampfampe		589 nm
Laserpointer		650 nm
Quecksilber-Dampfampe		578 nm gelb

Jedes Gas emittiert Licht mit bestimmten, für das Gas charakteristischen Spektrallinien bzw. Wellenlängen. Mit der Spektralanalyse kann man Stoffe nachweisen (z. B. Astrophysik).

Abbildung 3.8: Tafelbild zur Emission von Photonen

2. Annahme: Atome nehmen Photonen auf

Versuch: Natrium-Licht wird durch Natrium-Dampf geschickt.



Ergebnis: Die Natrium-Linie wird schwächer!

Natrium-Atome emittieren Photonen mit einer bestimmten Wellenlänge bzw. Energie. Photonen dieser Wellenlänge bzw. Energie können wieder absorbiert werden.

Wie hängt die Energie mit der Wellenlänge zusammen?

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E : Energie; h : Planck'sche Konstante; f : Frequenz; c : Lichtgeschwindigkeit; λ : Wellenlänge

Abbildung 3.9: Tafelbild zur Absorption von Photonen

Versuch: Wasserstoff-Spektrum



Aus diesem Spektrum (sog. Balmer-Serie) entwickelten einige Physiker (z. B. NIELS BOHR 1913) folgendes Modell: Das Wasserstoff-Atom besitzt nur bestimmte Energieniveaus E_n . Beim Übergang von einem höheren Niveau E_m auf ein niedriges Niveau E_n wird ein Photon emittiert. Seine Frequenz beträgt:

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{E_m - E_n}{h}$$

Dieser Übergang heißt auch Quantensprung!

Abbildung 3.10: Tafelbild zum Wasserstoff-Spektrum

3.5 Baustein 5: Energieniveaus des Wasserstoffatoms

In diesem Baustein, der sich über insgesamt drei Stunden erstreckt, sollen die Schüler mit Hilfe eines Gruppenpuzzles verstehen, dass auch die letzte Annahme des Laserlicht-Modells korrekt ist: Atome besitzen diskrete Energieniveaus.

3.5.1 Vorüberlegungen

Der Unterricht verläuft in Form eines Gruppenpuzzles mit folgenden Themen³: Abschied vom Bohrschen Atommodell (nach [Kra] und [WiMü]), Schrödingergleichung per Hand (nach [WiMü]), Schrödingergleichung per Computer (nach [Küb]) sowie Energiestufen des Wasserstoff-Atoms (nach [WiMü]).

Abschied vom Bohrschen Atommodell: Mit Hilfe dieses Arbeitsauftrages soll die Expertengruppe verstehen, warum das Bohrsche Atommodell mit seinen festen Elektronenbahnen nicht richtig sein kann. Als erstes Gegenargument sollen die Schüler herausfinden, dass Elektronen auf Kreisbahnen analog zum Hertzschen Dipol Energie verlieren und in den Kern stürzen würden. Das zweite Gegenargument liefert die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation: Wäre der Ort der Elektronen genau festgelegt, so besäßen sie eine Energie, die weit über der Ionisierungsenergie läge. Anschließend soll sich die Expertengruppe noch mit dem heute verwendeten Atommodell beschäftigen und anhand des Computerprogramms *Feyn*⁴ von M. AMELUNXEN die Wellendarstellung und Wahrscheinlichkeitsverteilungen kennen lernen.

Die Schrödingergleichung (per Hand): Diese Expertengruppe soll die Schrödingergleichung für ein Elektron im unendlich tiefen Potentialtopf lösen und damit die Energiequantisierung begründen. Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung ist vorgegeben, um Zeit zu sparen und die Aufgabe nicht übermäßig schwer zu machen. Am Ende des Arbeitsauftrages sollen die Schüler die Wellenfunktionen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die ersten drei Quantenzahlen skizzieren.

Die Schrödingergleichung (per Computer): Im Gegensatz zur zweiten Expertengruppe soll dieses Team selbst herausfinden, dass Lösungen für die Schrödingergleichung Wellen sein müssen. Die Wellenfunktion ist nämlich proportional zu ihrer Gekrümmtheit. Im zweiten Schritt sollen die Schüler verstehen, dass nicht alle Lösungen der Schrödingergleichung physikalisch sinnvoll sind. Sie müssen ja auch noch die Normierungsbedingung erfüllen. Die sinnvollen Lösungen kann man nun sehr anschaulich mit dem Programm *Schrödingers Schlange*⁵ von J. KÜBLBECK entwickeln. Auch die Energiequantisierung wird damit deutlich gemacht.

³Die Literaturangaben in Klammern bezeichnen die Texte, die die Idee für den jeweiligen Arbeitsauftrag lieferten und aus denen ich einzelne Fragestellungen und Abbildungen übernommen habe.

⁴<http://www.physik.uni-mainz.de/lehramt/software/QEDprojekt.zip>

⁵<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Computer/schlange/schlange.html>

Energiestufen des Wasserstoffatoms (Stammgruppe): Das Atommodell des Elektrons im Potentialtopf kann die Linienspektren durch die Energiequantisierung nur qualitativ erklären, nicht aber die exakte Form des Spektrums. Die Stammgruppen sollen daher ein genaueres Modell verwenden, um zu verstehen warum das Energiestufenbild für die Erklärung der Balmer Serie korrekt ist. Dazu müssten sie eigentlich die Schrödingergleichung für das Coulomb-Potential lösen. Dies ist im Rahmen der Schulmathematik jedoch nicht möglich. Man kann aber ein Modell-Potential verwenden, das dem Coulomb-Potential möglichst ähnlich ist, für das die Schüler die Schrödinger-Gleichung aber exakt lösen können. Alle Näherungen, die während der Rechnung gemacht werden müssen, betreffen nur die Form des Potentials und können deshalb im Rahmen der klassischen Physik erklärt werden. Die anschließende quantenmechanische Rechnung kommt dann ohne Näherungen aus.

Lernziele: In diesem Baustein sollen die Schüler selbstständig in Teams

- anhand des Hertzchen Dipols und der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation begründen, warum das Planetenmodell der Atome falsch ist;
- einen Einblick in die moderne Beschreibung des Atoms durch Aufenthaltswahrscheinlichkeiten bekommen;
- die Schrödingergleichung für ein Elektron im Kastenpotential per Hand bzw. per Computer lösen;
- mit Hilfe eines Computerprogrammes begründen, warum es in Atomen diskrete Energieniveaus gibt;
- die Schrödingergleichung für das Wasserstoffatom lösen und die Energiestufen bestimmen.

3.5.2 Ablauf

Da zwischen dieser und der letzten Stunde sowohl die Osterferien als auch das schriftliche Abitur lagen, begann ich mit einem kurzen Rückblick auf den bisherigen Unterricht und auf die Fragen, die wir beantwortet hatten bzw. die noch offen waren (vgl. Blatt *05_energieniveaus_unterrichtsgang.doc* im Anhang):

- Welche Eigenschaften hat Laserlicht?
- Wie funktioniert der Stickstoff-Laser elektrisch?
- Wie entsteht das Laserlicht? (Pfeilmodell)
- Wie entsteht Licht aus Atomen? (Spektrallinien)

- Warum gibt es diskrete Energieniveaus?
⇒ Stickstoff-Laser vollständig erklärt!
- Die Ernte: Wie funktioniert der rote Schullaser?

Da mit dem schriftlichen Abitur die Schulzeit quasi beendet sei, sollten sich die Schüler im folgenden so arbeiten, wie es später im Studium oder Beruf üblich ist: sich ein Thema (die Frage nach den diskreten Energieniveaus) selbstständig in Gruppen erarbeiten. Dazu teilte ich die Arbeitsaufträge für die Expertengruppen aus (vgl. Blätter *05_energieniveaus_gruppenpuzzle.doc* im Anhang) und baute auf dem Lehrerpult eine „Bibliothek“ mit ca. 30 Büchern zum Thema Atom- und Quantenphysik auf (Schulbücher, Universitätsbücher und populärwissenschaftliche Bücher). Die Stammgruppen (die aus den bisherigen Dreier-teams bestanden) teilten sich nach Interesse in die drei Expertengruppen auf und begannen mit der Bearbeitung der Arbeitsaufträge.

Die Schüler arbeiteten sehr konzentriert und machten von den zur Verfügung gestellten Büchern rege Gebrauch. Alle Gruppen beschäftigten sich zunächst ausführlich mit den einleitenden Texten in den Arbeitsanweisungen bevor sie sich an die Bearbeitung der eigentlichen Aufgaben machten.

Ich hatte für die Expertengruppen eine Schulstunde vorgesehen, was aber zu knapp bemessen war, denn am Ende der ersten Stunde hatten die Expertengruppen erst die Hälfte der Aufgaben bewältigt. Daher änderte ich meinen Zeitplan und ließ die Schüler in der darauffolgenden Stunde noch in den Expertengruppen weiterarbeiten.

In der dritten Stunde des Bausteins beschäftigten sich die Schüler in ihren Stammgruppen mit den Energiestufen des Wasserstoffatoms und erarbeiten sich die Proportionalität $E_n \sim 1/n^2$. Damit war die Form der Energiestufen aus dem Modell zur Erklärung der Spektrallinien (vgl. Baustein 4) bestätigt. Insgesamt hatten wir somit alle Annahmen begründet, die im Modell zur Entstehung des Laserlichts (vgl. Baustein 3) steckten. Der Stickstoff-Laser war im Rahmen der Schulphysik vollständig erklärt.

Zum Abschluss teilte ich den Schülern die Lösungsblätter aus (vgl. Blätter *05_energieniveaus_gruppenpuzzle.doc* im Anhang), führte nochmals kurz den Stickstoff-Laser vor, zeigte auf einer Folie das Termschema des Stickstoff-Lasers (siehe Abb. 1.6) und lies die Schüler daran mit Hilfe des Gelernten aus dem Gruppenpuzzle den Prozess der Lichtentstehung erklären.

3.5.3 Nachbetrachtungen

Diesem Gruppenpuzzle war für die Schüler der anspruchsvollste und anstrengendste Teil der Unterrichtseinheit. Sie mussten (nach den Abiturprüfungen) drei Stunden lang konzentriert über Physik nachdenken, sich mit völlig neuen und unbekanntenen Modellen beschäftigen und viele schwere Fragen beantworten. Für einen Leistungskurs wäre dieses Gruppenpuzzle sicher

angemessener gewesen. Diesen Grundkurs habe ich damit aber an die Leistungsgrenzen geführt. Dennoch haben sich alle sehr viel Mühe gegeben und gut mitgemacht. Insbesondere die Aussicht, nach diesem Unterrichtsblock den Laser im Rahmen der Schulphysik vollständig erklären zu können, motivierte die Schüler.

Wenn man diesen Baustein nicht am Ende einer Unterrichtseinheit verwendet, wäre es sinnvoll, dass der Lehrer nach dem Gruppenpuzzle die Inhalte nochmals in einer Zusammenschau präsentiert.

Alles in allem hat es sich wirklich gelohnt, dieses Thema in Form eines Gruppenpuzzles zu behandeln, denn die Schüler haben dadurch sicher viel mehr aus dem Unterricht mitgenommen, als es in drei Stunden Lehrervortrag nach dem Abitur möglich gewesen wäre.

3.6 Baustein 6: Der Helium-Neon-Laser

In diesem einstündigen Baustein soll das in den vorangegangenen Bausteinen gesammelte Wissen angewendet werden, um einen zweiten Lasertyp zu erklären, den die Schüler aus dem Physikunterricht der Oberstufe gut kennen: Der Helium-Neon-Laser.

3.6.1 Ablauf

Aus der vorhergehenden Stunde war der Stickstoff-Laser bereits aufgebaut. Ich baute noch zusätzlich einen Helium-Neon-Laser auf und schaltete beide Laser ein. Wir diskutierten im Plenum, worin sich der Helium-Neon-Laser vom Stickstoff-Laser unterscheidet:

- Der Helium-Neon-Laser knallt nicht.
- Er sendet rotes Licht.
- Er leuchtet kontinuierlich.
- Er ist intensiver.

Ich öffnete den Helium-Neon-Laser, zeigte den Schülern die Gasentladungsröhre und informierte über das Gasgemisch aus Helium und Neon im Verhältnis 10:1. Im anschließenden Unterrichtsgespräch erarbeiteten wir das Termschema von Helium und Neon, die stattfindenden Stoß- und Emissionsprozesse sowie die Bedeutung der unterschiedlichen Lebensdauern der einzelnen Energieniveaus (siehe Tafelbild in Abb. 3.11).

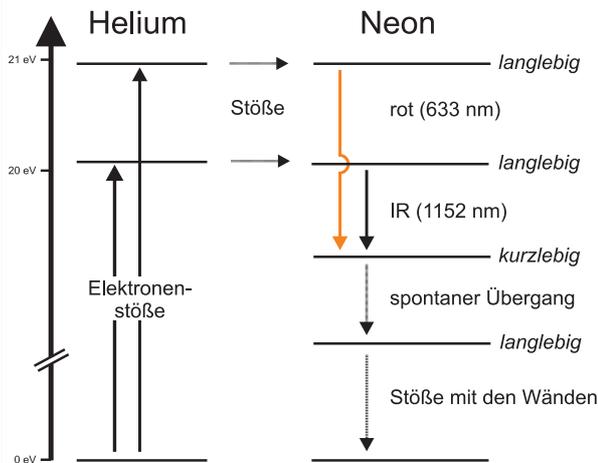
Um die Lichtverstärkung zu erklären, zeigte ich den Schülern die beiden Spiegel des Lasers und skizzierte den Aufbau (vgl. Abb. 3.11). Da man sich die Wirkung eines 1%-durchlässigen Spiegels nur schwer vorstellen kann, erläuterte ich sie an folgendem Modell: Angenommen,

Was haben wir gelernt?

- Atome besitzen diskrete Energieniveaus.
- Atome absorbieren und emittieren Licht.
- Stimulierte Emission wird durch Besetzungsinversion erreicht.

Der rote Schullaser (Helium-Neon-Laser)

Gasgemisch: Helium-Neon (10:1)



Resonator/Gasröhre:



Lichtverstärkung durch die Spiegel:

Linker Spiegel			Rechter Spiegel (teildurchlässig 1%)	
1	→		100	→ 1
9.900	←	99	←	
↔ 9.900	→		990.000	→ 9.900
98.010.000	←	980.100	←	
↔ 98.010.000	→		9.801.000.000	→ 98.010.000

Abbildung 3.11: Tafelbild zum Helium-Neon-Laser



Abbildung 3.12: Ein mit einem Laser geschnittenes Metallteil

ein „Laser-Photon“ der Wellenlänge 633 nm kann auf seinem Weg durch die Gasröhre 99 Neon-Atome zur Emission stimulieren. Dann würden aus einem am linken Spiegel startenden Photon nach Durchlaufen der Röhre am rechten (teildurchlässigen) Spiegel 100 Photonen. Von diesen 100 kommt eines durch den Spiegel, während 99 reflektiert werden. Aus diesen 99 werden 9.900 am linken Spiegel, die alle reflektiert werden. Damit kommen rechts 990.000 Photonen an, von denen bereits 9.900 den Resonator verlassen können. Im nächsten Durchlauf wird die Lichtwelle so verstärkt, dass insgesamt 98.010.000 Photonen aus dem Laser austreten.

Dieses beeindruckende Zahlenspiel verdeutlichte den Schülern, warum Laser so intensiv sein können. Als Ergänzung ließ ich einige Metallteile (wie z. B. in Abb. 3.12) herumgeben, die in einer Maschinenbaufirma mit Lasern geschnitten und beschriftet waren.

Damit war der Kreis von den Anwendungen des Lasers aus der ersten Stunde über die Funktionsweisen und physikalischen Modelle wieder hin zu tatsächlich mit Lasern bearbeiteten Materialien geschlossen – und die Unterrichtseinheit beendet.

3.6.2 Nachbetrachtungen

Ziel dieses Bausteins war es, dass die Schüler alles, was sie in dieser Unterrichtseinheit gelernt haben, nochmals zusammentragen mussten, um einen Laser komplett zu erklären. Diese Wiederholung und Abrundung der Unterrichtseinheit hätte man auch dadurch erreichen können,

dass die Teams z.B. Vorträge über den Stickstoff-Laser oder den Helium-Neon-Laser vorbereiten und halten. Da ich den Schülern mit dem Gruppenpuzzle in den vorausgegangenen Stunden aber sehr viel Engagement abverlangt hatte, hielt ich in dieser Stunde eine Schüler-Lehrer-Dialog für angemessener.

Kapitel 4

Nachbetrachtungen

Einen Großteil der Kritik, die sich direkt auf den Unterricht bezieht, habe ich bereits am Ende der einzelnen Bausteine dargestellt. Dieses Kapitel soll sich nun mit allgemeinen Nachbetrachtungen der methodischen und fachlichen Aspekte des Unterrichtsganges beschäftigen, die über die einzelnen Bausteine hinausgehen. Wichtig war mir aber auch, was die Schüler über den Unterricht dachten. Sie sollen daher zunächst zu Wort kommen.

4.1 Umfrage

Da eine Klausur über den Laser-Unterricht nicht möglich war, ich aber dennoch eine Rückmeldung von den Schülern bekommen wollte, teilte ich ihnen am Ende der letzten Stunde einen Fragebogen (vgl. Blatt *07_umfrage.doc* im Anhang) aus, den Sie zuhause anonym beantworten sollten.

Im folgenden sind die wichtigsten Antworten der Schüler dargestellt (doppelte und ähnliche Antworten sind nur einmal aufgeführt):

War der Laser-Unterricht anders als der sonstige Physikunterricht? Und wenn ja, worin lag der Unterschied?

- Der Unterricht war sehr praxisorientiert. Das hat mir für das Verständnis des Lasers sehr geholfen. Normalerweise habe ich bei theoretischem Unterricht viel mehr Probleme.
- Auf jeden Fall! Wir mussten uns etwas selber erarbeiten (oder hatten jedenfalls das Gefühl) und das über einen etwas längeren Zeitraum.
- Sehr anschaulich, viele Bilder, zuerst Anwendung dann die Theorie.
- Mehr praktische und vor allem freiere Arbeit (auch in Gruppen). Mehr Arbeit mit Folien.

- Ja! Es wurde ein Gerät ausführlich besprochen, dass zwar oft benutzt wird, von dem aber kaum jemand weiß, wie es funktioniert. Der Unterricht war anspruchsvoller; komplizierte Prozesse wurden nicht weggelassen.

Oft wird im Physik-Unterricht erst die Theorie, dann die Anwendung besprochen. Wir haben zunächst die Anwendung (den Stickstoff-Laser) behandelt, danach erst die nötige Theorie. Wie bewerten Sie dieses Vorgehen?

- Spannend. War manchmal ganz schön schwer.
- Ich finde das System nicht schlecht. Aber das kommt auch auf das Thema an. Man kann nicht immer die Praxis zuerst machen.
- Gut! Größere Begeisterung des Kurses für den Stoff. Dadurch hatten wir mehr Motivation, um später die nicht so schönen Teile zu erarbeiten, und um mögliche Theorien über die Funktionsweise aufzustellen.
- Prinzipiell gut, ist aber teilweise schwer zu verstehen.
- Damit ist es mir sehr viel leichter gefallen, das komplexe Thema zu erreichen.
- Gott-sei-Dank war es diesmal andersrum. Ich hätte sonst nichts verstanden.

Ich habe versucht, den Unterricht so aufzubauen, dass Sie sich möglichst viel selbst erarbeiten mussten bzw. konnten (Teamarbeit, Gruppenpuzzle etc.). Fanden Sie das gut oder schlecht?

- Super. Dadurch habe wir mal kennen gelernt, was es heißt, sich auch im Unterricht etwas selbstständig zu erarbeiten.
- Ich finde das nicht schlecht, wenn die Aufgaben nicht so schwer sind wie die Schrödingergleichung. Gut, denn jeder war gezwungen, über das jeweilige Thema nachzudenken. Nur das aufnehmen, was der Lehrer vorne von sich gibt, wird auf Dauer langweilig. Problem: Einer der Gruppe arbeitet, andere sitzen herum.
- Ich fand die Teamarbeit echt gut. Ich glaube, man lernt so besser. Leider war die letzte Teamarbeit in den Expertengruppen sehr schwer.
- Diese Art des Unterrichts fördert das Verstehen. Es dauert länger, aber man versteht besser, was man sich selbst erarbeitet hat.
- Gut, weil es dann nicht stures Absitzen von Stunden bedeutet sondern durch eigene Arbeit gelernt wird. Außerdem ist dabei auch etwas Zeit für einen kleinen Spaß am Rande!!

Was haben Sie in diesem Unterricht gelernt?

- Dass Physik echt gut ist.
- Was ein Laser ist, wie er funktioniert, wo er angewendet wird, und etwas über seine Geschichte.
- Ich habe größtenteils den Aufbau des Lasers verstanden. Das Gruppenpuzzle konnte ich nur in seinen Anfängen erahnen.
- Referendare können auch unterrichten. Und dass ich auch einen Laser bauen kann, aber höllisch aufpassen muss.

Eine Schülerin aus Klasse 12 fragt Sie, was ein Laser ist. Was antworten Sie?

- Ein Gerät, das ein sehr intensives, kurzwelliges und einfarbiges Licht erzeugt und wesentlich komplizierter aufgebaut ist als sonstige Lichtquellen. Der Lichtstrahl ist sehr gebündelt und energiereich, zwei Eigenschaften, die in der Industrie und Medizin verwendet werden.
- Eine bestimmte Art von Lichtblitzen, die von einer Art Lampe ausgesandt werden. Sie unterscheiden sich durch die geringe Streuung der Strahlen und der hohen Energiekapazität von normalem Licht.
- Ich hab jetzt das Abitur. Hier sind meine Blätter, erarbeite es Dir selbst.
- Frag Herrn Karsten, der kann es Dir wunderbar erklären!

Und was sie mir sonst noch mitteilen möchten...

- Ich fand es bemerkenswert, wie gut Sie neue Medien in den Unterricht mit einbeziehen. Hab ich in meiner gesamten Schullaufbahn noch nicht erlebt.

4.2 Allgemeine Nachbetrachtungen

Die Umfrage-Ergebnisse bestätigten meine Vermutung. Der Unterricht hatte die Schüler motiviert und gefordert. Dies konnte man besonders an der guten Mitarbeit und Anwesenheit nach den schriftlichen Abiturprüfungen erkennen.

Nachbetrachtungen zur Methode: Mein Weg, den Laser von der Anwendung zur Theorie zu behandeln, hat nicht nur die Schüler begeistert. Auch mein Eindruck war, dass dies ein gangbarer und lohnenswerter Weg ist. Die Schüler wirkten nie gelangweilt und wussten immer, was bereits erarbeitet und was noch zu klären war. Und vor allem: Der Unterricht hatte ein inhaltliches Ziel, auf das man zusteuern konnte. Das half Schüler und Lehrer gleichermaßen.

Auch die Mischung aus entdeckendem und darbietendem Unterricht hat sich bewährt. Die Schüler waren froh, nach den arbeitsintensiven Phasen hin und wieder „nur“ zuhören zu müssen. Ich konnte in den lehrerzentrierten Stunden Zusammenfassungen und Ausblicke einstreuen und auf die Einhaltung des Zeitplans achten. Inwieweit die Ergebnissicherung in den schülerzentrierten Phasen funktioniert hat, lässt sich ohne Klausur oder Test nur schwer sagen. Aber zumindest in den Unterrichtsgesprächen hatten die Schüler das nötige Wissen stets parat.

Die Teamarbeiten kamen bei den Schülern sehr gut an. Sie waren diese Arbeitsform nicht gewohnt und brauchten ein wenig Zeit, sich damit zurechtzufinden. Ich habe die Einteilung der Gruppen den Schülern überlassen. Dabei entstand jedoch auch ein Team, dessen Leistung und Interesse sehr unausgewogen war. Der beste im Team zeigte sich damit am Ende der Unterrichtseinheit auch recht unzufrieden. Eine andere Art der Teambildung könnte je nach Kurs sinnvoll sein. Gut war, dass die Teams immer in derselben Zusammensetzung arbeiteten. Die Teammitglieder konnten so mit der Zeit immer besser zusammenarbeiten. Das schwere Gruppenpuzzle gegen Ende des Unterrichtsganges wäre nicht möglich gewesen, wenn die Teams nicht schon zuvor so viel Team-Erfahrung gesammelt hätten.

Die gewählten Methoden erwiesen sich daher als Erfolg. Außerdem förderten sie die Schlüsselqualifikationen der Schüler, insbesondere die Teamfähigkeit und die selbstständige Erarbeitung komplizierter Sachverhalte. Dies ist für das spätere Leben und die Studierfähigkeit äußerst wichtig.

Ich habe im Unterricht viele unterschiedliche Medien verwendet (Tafelmodelle, Arbeitsblätter, Folien, Computersimulationen, PowerPoint-Präsentationen, ...). Dies war zwar in der Vorbereitung sehr arbeits- und zeitaufwendig, hatte aber einen wesentlichen Anteil an der Motivation der Schüler und an der Verständlichkeit des Inhalts. Der Medieneinsatz trug somit sehr zum Gelingen des Unterrichts bei.

Nachbetrachtungen zum Thema: Es hat sich gelohnt, einige Aspekte der Atom- und Quantenphysik am Beispiel des Lasers zu behandeln. Dies war zwar aufgrund der gewählten Methoden recht zeitintensiv (der Laser ist ja leider nur ein Wahlthema), aber auch sehr erfolgreich im Hinblick auf die Lernziele, die Mitarbeit und die Begeisterung der Schüler. Der Bildungsplan [BPK] fordert, dass sich die Schüler exemplarisch an geeigneten Stellen mit Aspekten wie *Naturwissenschaftliche Arbeitsweise*, *Modellvorstellungen* und *Alltagsbezüge* beschäftigen sollen. Der Stickstoff-Laser bietet eine solche, geeignete Stelle.

In den Nachbetrachtungen der einzelnen Bausteine habe ich bereits darauf hingewiesen, dass es an vielen Stellen möglich ist, von dem von mir vorgeschlagenen Unterrichtsgang abzuweichen. Dennoch denke ich, dass sich meine Auswahl bestätigt hat, sowohl was das Schülerinteresse als auch die Transparenz und Zielorientierung des Unterrichtsganges betrifft.

Zwar ist es nicht möglich, am Beispiel des Lasers alle für den Bildungsplan relevanten Themen der Atomphysik (der Quantenphysik erst recht nicht) zu behandeln. Nach einem solchen exemplarischen und anwendungsbezogenen Einstieg ist aber bei den Schülern offensichtlich

ein großes Interesse vorhanden, sich mit diesen Themen noch weiter beschäftigen zu wollen – auch wenn dies dann wieder eher ein Gang von der Theorie zur Anwendung sein wird.

Aber vielleicht ermutigen die positiven Erfahrungen des in dieser Arbeit beschriebenen Unterrichtsganges, auch an anderer Stelle zu versuchen, die Atom- und Quantenphysik exemplarischer und anwendungsbezogener zu unterrichten.

Literaturverzeichnis

- [AnAl] ANDERS-VON AHLFTEN, A., ALTHEIDE, H.-J.: *Laser – das andere Licht*. Georg Thieme, Stuttgart, 1989.
- [BPK] *Bildungsplan für die Kursstufe des Gymnasiums*. Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, 2001.
- [Bau] BAUMERT, J. ET AL.: *PISA 2000*. Leske + Budrich, Opladen, 2001.
- [Bro] BROCKHAUS, P.: Der Laser in der SI: Ein Unterrichtskonzept. – *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule 1/50*, 15–18 (2001).
- [Dui] DUIT, R., HÄUSSLER, P., KIRCHER, E.: *Unterricht Physik*. Aulis Verlag Deubner, Köln, 1981.
- [Ein] EINSTEIN, A.: Zur Quantentheorie der Strahlung. – *Physik. Z.* 18, 121 (1917).
- [EKKS] EICK, S., KABUSS, W., KNOKE, W., SCHOMMER, F.: *Ein Stickstoff-Laser im Eigenbau*. <http://users.aol.com/gykophys/nlaser/nlaser.htm>¹
- [Fey1] FEYNMAN, R. P.: *The Feynman lectures on physics, Volume III (Quantum mechanics)*. Addison-Wesley, Reading, 1965.
- [Fey2] FEYNMAN, R. P.: *QED – The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton University Press, 1988.
- [Fir] FIRNHABER, H.-U. ET AL.: *Eigenverantwortlichkeit im handlungsorientierten Physikunterricht*. Oberschulamt Stuttgart, 2000.
- [Han] HANNE, G. F.: *Laser – Grundlagen und Anwendungen*. <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/laser.html>
- [Her] HERRMANN, F.: Altlasten der Physik (57) Kohärenz. – *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*.
- [Imp] *Impulse Physik 2, Gesamtband*. Klett, Stuttgart, 1997.

- [KnSi] KNEUBÜHL, F. K., SIGRIST, M. W.: *Laser*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1991.
- [KnWa] KNITTEL, M., WÄCKERLE, G.: Optische Holographie einfach und kostengünstig für Schule und Hochschule. – *Deutsche Physikalische Gesellschaft – Frühjahrstagung Bremen 2001*.
- [Kra] KRANZINGER, F.: *Impulse Quantenphysik*. Klett, Stuttgart, 2002.
- [KrWi] KRONFELDT, H.-D., WINKLER, R.: Ein einfacher Demonstrationsfarbstofflaser und sein Einsatz in der Spektroskopieausbildung. – *Physik und Didaktik* 7, 1–9 (1979).
- [Küb] KÜBLBECK, J.: Energieniveaus und Orbitale. – *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 55/1, 7–12 (2002).
- [LeKr] LEWINSKY, H. H., KRÖMER, CH.: *Handmade Laser*.
<http://www.uni-duisburg.de/FB10/DDPH/girep/lewin/Laser.htm>
- [Lew] LEWINSKY, H. H.: Der Laser in der S1: Laser zum selber bauen. – *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 1/50, 11–14 (2001).
- [LiKü] LICHTFELDT, M., KÜHLING, F. H.: Didaktische Vorteile eines offenen Lasersystems. – In BEHRENDT, H. (HRSG.): *Zur Didaktik der Physik und Chemie*, 241–243 (1995).
- [Mes] MESCHEDE, D.: *Optik, Licht und Laser*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1999.
- [Muck] MUCKENFUSS, H.: *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Cornelsen, Berlin, 1995.
- [PG1] PROJEKTGRUPPE 235: *Selbstbau eines Superstrahlers*. Physikalisches Grundpraktikum, TU-Berlin, 1995.
<http://pl.physik.tu-berlin.de/groups/pg235/Winter95-96/Experiment07/superstr.html>
- [PG2] PROJEKTGRUPPE 262: *Bau eines Superstrahlers*. Physikalisches Grundpraktikum, TU-Berlin, 2000.
<http://pl.physik.tu-berlin.de/groups/pg262/Protokolle/superstrahler/s-strahler.html>
- [Röt] RÖTHLEIN, B.: Das geniale Prinzip, das hinter jedem Laser steckt. – *P.M. Perspektive: Laser*, 20–25 (1989).
- [WiMü] WIESNER, H., MÜLLER, R.: *Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik*. <http://www.cip.physik.uni-muenchen.de/~milq/>
- [Wag] WAGENSCHHEIN, M.: *Verstehen lehren*. Beltz, Weinheim, 1968.

Anhang

Im Anhang befinden sich die Arbeitsblätter und Folien, auf die in der Beschreibung des Unterrichtsganges (Kap. 3) Bezug genommen wird, in folgender Reihenfolge:

Vortest	<i>00_vortest.doc</i>
Baustein 1	<i>01_lasereigenschaften_warnung.cdr</i> <i>01_lasereigenschaften_teamarbeit.doc</i> <i>01_lasereigenschaften_eigenschaften.doc</i>
Baustein 2	<i>02_n2laser_arbeitsblatt.cdr</i> <i>02_n2laser_funktion_arbeitsblatt.doc</i>
Baustein 3	<i>03_lichtentstehung_folien.doc</i> <i>03_lichtentstehung_arbeitsauftrag.doc</i> <i>03_lichtentstehung_bastelbogen.cdr</i>
Baustein 4	<i>04_spektrallinien_wasserstoff.cdr</i> <i>04_spektrallinien_quantensprung.cdr</i>
Baustein 5	<i>05_energieniveaus_unterrichtsgang.doc</i> <i>05_energieniveaus_gruppenpuzzle.doc</i>
Umfrage	<i>07_umfrage.doc</i>