

Fachreferat  
Leistungskurs Physik

# Die Halbleiterlaserdiode

## - ihre physikalisch-elektrischen Eigenschaften

H.F. Wetzel

Robert-Bosch-Berufskolleg  
Berufskolleg Duisburg-Nord  
Duisburg-Hamborn

28. April 2003

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Physikalische Grundlagen des Lasers	4
2.1	Begriff „Laser“	4
2.2	Induzierte Emission	4
2.2.1	Besetzungsinversion	5
2.3	Wirkungsweise eines Lasers	6
2.3.1	Komponenten eines Lasers	6
2.3.2	Das Pumpen von Lasern	6
2.3.3	Lasermedium	6
2.3.4	Rückkopplungsanordnung – optischer Resonator	7
2.3.5	Betriebsarten von Lasern	8
3	Werkstoffe aus elektrodynamischer Sicht	10
3.1	Materielle Stoffstruktur der festen Laserwerkstoffe	10
3.2	Leiter, Halbleiter, Isolatoren	10
3.3	Rekombination im Halbleiter	11
3.4	Direkte und indirekte Halbleiter	12
3.5	Dotieren von Halbleitern	13
4	Die Halbleiterlaserdiode	15
4.1	Der pn – Übergang ohne äußere elektrische Spannung	15
4.2	Der pn – Übergang mit angelegter äußerer elektrischer Spannung (Lumineszenzprinzip)	15
4.3	Vom LED-Prinzip zum Halbleiterlaser	16
4.4	Doppelheterostruktur-Laserdiode	17
4.5	Oberflächenemittierende Halbleiterdiodenlaser	18
4.6	Elektrische Eigenschaften	19
5	Anwendungen der Halbleiterlaserdiode	19
5.1	Wesentliche technische Einsatzbereiche	19
5.2	Einsatz einer Halbleiterlaserdiode (exemplarisch) (Druckvorgang beim Laserdrucker)	20
6	Entwicklungen	21
7	Quellenverzeichnis	22
7.1	Printmedien	22
7.2	Internetmedien	22
8	Bildverzeichnis	23

# 1 Einleitung

Den Impuls zum Erstellen eines Fachreferates zu diesem Thema im Rahmen des Leistungskurses Physik entsprang der Konfrontation mit der Lasertechnik. Gelegentlich besuche ich Diskotheken, wo diese Halbleitertechnik für mich „sichtbar“ in Erscheinung tritt.

In Zeitungen las ich, inzwischen werden Netzhautkorrekturen mit Hilfe der Lasertechnik vorgenommen, und dass man Autobleche sehr genau laserschneiden kann. (Leider) hat wohl auch die Waffentechnik die Lasertechnik vereinnahmt. Die „Laserkanone“, in der von mir ganz gern gesehenen Science-Fiction Filmserie „Star-Trek – Raumschiff Enterprise/Voyager“ noch hypothetisch eingesetzt, ist inzwischen Gegenwart. In New Mexico (USA) gibt es seit 1982 ein Testgelände für eine Laserkanone mit zerstörerischen 2,2 Mio. Watt Leistung.

Das von den USA im Jahre 2000 wiederaufgelegte Programm „Schutzschild im Weltraum“<sup>1</sup>, scheint den Einsatz des Lasers als Waffe vorantreiben zu wollen.

Der ursprüngliche Anknüpfungspunkt zu dieser Facharbeit war der Einsatz eines Laserpointers unseres Physiklehrers, um den Blick punktuell auf u.a. über Beamer auf der Leinwand dargestellten Informations- bzw. Schaubilder zu lenken. Er sprach davon, dass im Stift ein sehr kleiner Halbleiterbaustein für den wirkungsvollen Effekt Sorge. In der von mir fast täglich genutzten Computertechnik kommt der hier thematisch dargestellte Halbleiterbaustein im Laserdrucker oder beim sogenannten „Brennen“ von CD's zur Sicherung von Daten zum Einsatz. Das weckte Neugierde in mir ... Diese Einsatzfelder zeigen mir in Ansätzen die innovative Kraft dieses nur etwa  $125\mu\text{m} \times 250\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$  kleinen Halbleiterbausteins, dem ich mich nachfolgend widmen möchte.

---

<sup>1</sup> Bekannt als „Strategic Defense Initiative“ (SDI); 1983 von US-Präsident Reagan gestartet, von Präsident Clinton ruhen gelassen, vom gegenwärtigen Präsidenten George Bush wieder aktiviert.

## 2 Physikalische Grundlagen des Lasers

### 2.1 Begriff „Laser“

Das Wort Laser ist die englischsprachige Abkürzung für „Light Amplifikation by Stimulated“ und bedeutet etwa Lichtverstärkung durch stimulierte (erzwungene) Emission (Aussendung) von Strahlung.

### 2.2 Induzierte Emission

Physikalische Grundlage bildet die Darstellung des Lichtes als elektromagnetische Strahlung mit entsprechende Wellenlänge (einiger hundert  $\mu\text{m}$ ).

Die Emission und Absorption elektromagnetischer Strahlung wird durch die beschleunigte Bewegung elektrisch geladener Teilchen verursacht. Im sichtbaren Spektralbereich ( $\lambda = 400 \text{ nm}$  bis  $800 \text{ nm}$ ) wird dies durch Elektronen oder (ionisierten) Atomen bzw. Molekülen realisiert, die beim Übergang zwischen unterschiedlichen Energiezuständen Licht empfangen oder aussenden können.

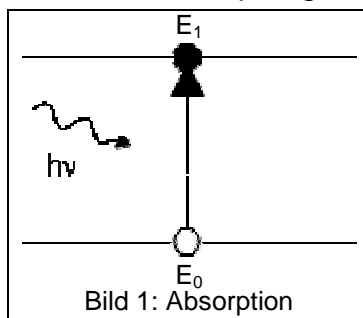


Bild 1: Absorption

Atome<sup>2</sup> liegen nach der Quantentheorie Einsteins (1917) nur in diskreten Energiezuständen vor. Normalerweise befinden sie sich in ihrem energieärmsten Zustand, dem Grundzustand (in der Grafik links  $E_0$ ). In diesem Zustand können sie die Strahlung eines elektromagnetischen Feldes absorbieren (empfangen und aufnehmen) und als Photonenenergie in Form von Anregungsenergie kurzzeitig speichern (in der Grafik Zustand  $E_1$ ). Die Energie eines Lichtquants (Photons) ist gleich dem Produkt aus Planck'schem Wirkungsquantum, einer Naturkonstante, und der Lichtfrequenz  $\nu$ .

$$E = h \cdot \nu$$

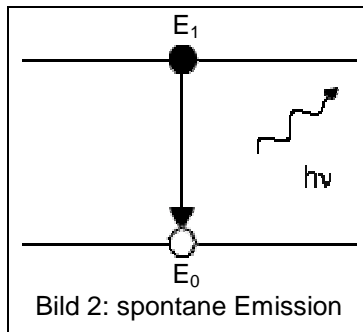


Bild 2: spontane Emission

Das angeregte Atom kann in seinem energiereicheren Zustand im Allgemeinen nicht lange verweilen und kehrt nach einer für das jeweilige System charakteristischen Zeit wieder durch Abgabe (Emission) eines Lichtquants in den Grundzustand zurück.

„Da dies spontan, also ohne Wechselwirkung mit dem (Ein-)Strahlungsfeld und ohne Korrelation dazu geschieht, bezeichnet man den Vorgang als inkohärent. Die Emission des Lichtquants erfolgt hier in alle Richtungen gleich wahrscheinlich und zeitlich unkoordiniert (daher phasenverschoben und damit inkohärent).“<sup>3</sup>

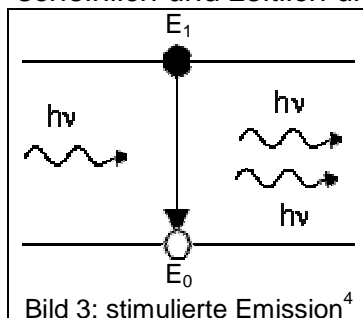


Bild 3: stimulierte Emission<sup>4</sup>

Im Gegensatz zur spontanen wird bei der stimulierten Emission das angeregte Atom durch das äußere Strahlungsfeld unter Verkürzung der Lebensdauer des angeregten Zustandes gezwungen, in den Grundzustand (schneller) zurückzukehren.

Dabei wird die im Atom gespeicherte Energie als ein Photon mit der Energie  $E = h \cdot \nu$  an das (Ein-)Strahlungsfeld zurückgeliefert.

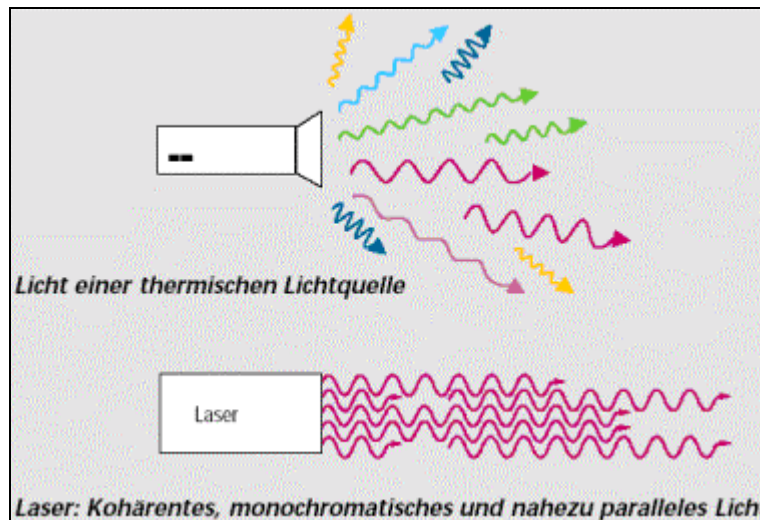
<sup>2</sup> Der Kürze halber wird hier von Atomen gesprochen, obwohl es Elektronen, Atome und Moleküle sein können.

<sup>3</sup> [http://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip\\_Lasers.html](http://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip_Lasers.html), Seite 1 von 5

<sup>4</sup> <http://www.ilt.fhg.de/ger/laserprinzip.html>; Bild 1 bis 3, Seite 1 von 2

Im Sinne des komplementären Dualismus der Quantentheorie, welcher Quantenobjekte entweder vorwiegend mit den Eigenschaften von Wellen oder vorwiegend mit denen von Teilchen beschreibt, tritt es hier als Photon und somit als elektromagnetische Welle mit der Frequenz  $\nu$  auf.

“Diese Welle ist aber im Fall der induzierten Emission gleichphasig und gleichgerichtet mit der Welle des induzierten Photons. Daher ist dieser Vorgang kohärent.“<sup>5</sup>



Taschenlampe:  
Überlagerung vieler  
Wellenzüge mit beliebiger  
Phase und beliebiger  
Richtung;  
**inkohärent**

Induzierte Laseremission:  
Überlagerung phasengleicher  
Wellenzüge in einer  
bestimmten Richtung und  
stabiler Amplitude;  
**kohärent**

Bild 4: Inkohärenz - Kohärenz<sup>6</sup>

Im Allgemeinen ist die spektrale Bandbreite der Laserstrahlung erheblich kleiner als bei einer Glühlampe.

## 2.2.1 Besetzungsinversion

Um die Strahlenemission aus einem Ensemble (System) von Atomen durch stimulierte Emission aufrecht zu erhalten, müssen sich mehr Atome im energetisch höher gelegenen Zustand ( $E_1$ ) als im energetisch tiefer gelegenen Zustand ( $E_0$ ) befinden, es muss Inversion vorliegen. Inversion ist aber nicht der in der Natur vorherrschende Zustand, denn aufgrund des dynamischen Gleichgewichts überwiegt die Absorptionsrate immer über die Emissionsrate<sup>7</sup>. In der Regel sind also die energetisch tiefer liegenden Zustände stärker besetzt als die energetisch höheren. Deshalb muss der energiereichere Emissionszustand künstlich durch „Hineinpumpen von Energie“ von außen herbeigeführt werden. Man nennt diesen Zustand Besetzungsinversion.

“Die Form der Energiezuführung kann ganz unterschiedlicher Natur sein. Sie kann durch Wärme, Lichteinstrahlung (häufig werden hier wieder Laser, sogenannte Pumpenlaser angewandt) oder wie bei den Halbleiterlasern, durch Zuführung von elektrischer Energie erzeugt werden.“<sup>8</sup>

<sup>5</sup> ebenda, Seite 2 von 5

<sup>6</sup> [http://www.trumpf.com/1.img-cust/Fasz-Blech\\_Kapitel-06-Laser\\_Materialbearbeitung.pdf](http://www.trumpf.com/1.img-cust/Fasz-Blech_Kapitel-06-Laser_Materialbearbeitung.pdf), Buchseite 58

<sup>7</sup> Der Wirkungsgrad in der Natur ist nun mal kleiner 1

<sup>8</sup> <http://spot.fho-emden.de/lt/Diodenlaser/basic.htm>

## 2.3 Wirkungsprinzip eines Lasers

### 2.3.1 Komponenten eines Lasers

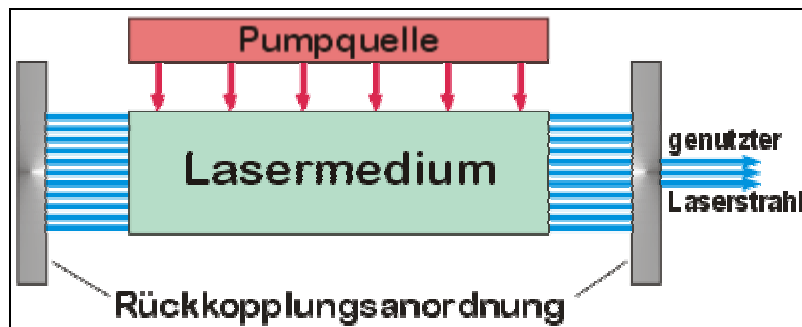


Bild 5. elementare Laserkomponenten

„Drei Komponenten bilden die Basis jeden Lasersystems: ein Lasermedium, eine Energiequelle, Pumpenquelle genannt (da sie Energie in das Lasersystem ‚pumpt‘) und eine Rückkopplungsanordnung (Spiegel oder Gitter), die eine Oszillation im Lasermedium erlaubt.“<sup>9</sup>

### 2.3.2 Das Pumpen von Lasern

Gepumpt werden kann auf verschiedene Weisen:

Lasertyp	Laseraktives Material (Lasermedium)	Pumpenmechanismus und Pumpquellen	Wichtige Beispiele mit Wellenlänge und bevorzugtem Einsatzbereich
<b>Gaslaser</b>	Gas oder Dampf	Elektrisch angeregte Gasentladung	CO <sub>2</sub> -Laser: 10,6 µm (fernes infrarot); Materialbearbeitung HeNe-Laser: (633 nm (rot)); Messtechnik Excimer-Laser: 175-483 nm (ultraviolett); Photochemie
<b>Festkörperlaser</b>	Kristalle oder Gläser, die mit optisch aktiven Ionen dotiert sind	Optisch, mit Anregungslampen oder Diodenlaser	Rubinlaser: 694 nm Nd: YAG-Laser und Nd: Glas-Laser: 1,06 µm (nahes infrarot); Materialbearbeitung
<b>Farbstofflaser</b>	Organische Farbstoffe in stark verdünnter Lösung	Optisch, mit Blitzlampen oder Laser	Abstimmbare von circa 300 nm bis 1,2 µm; Spektroskopie
<b>Halbleiterlaser</b>	Halbleiter	elektrisch	GaNP (670-680 nm), GaAlAs (780-880 nm); Lichtquelle in CD-Playern, optischen Plattenspeichersystemen, Laserprintern, Nachrichtentechnik

Tabelle 1: Lasermedien und Pumpquellen<sup>10</sup>

Wir werden uns im Kapitel 3 auf den Halbleiterdiodenlaser, der zu den Festkörperlaser zählt, konzentrieren, der durch „Hineinpumpen“ elektrischer Energie stimuliert wird.

### 2.3.3 Lasermedium

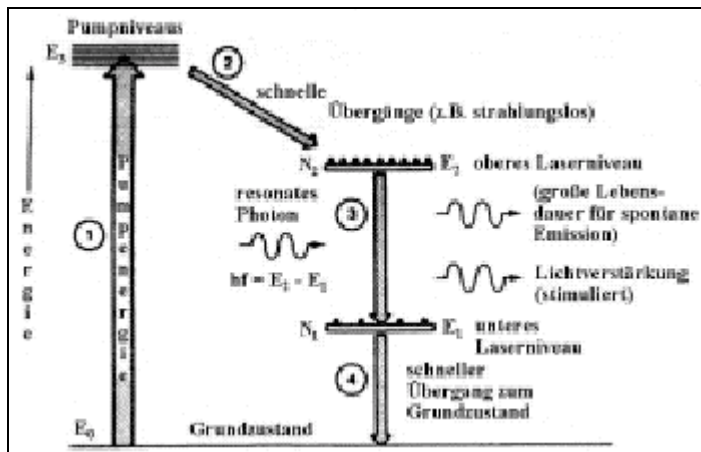
Das Lasermedium muss - wie wir eingangs dargelegt haben – mindestens zwei Energieniveaus  $E_0/E_1$  haben, die einen Quantenunterschied von  $E = h \cdot \nu$  aufweisen. Beim Rubinlaser (erster entdeckter Laser) finden wir diese Bedingung im Grundsatz umgesetzt. Man verwendet jedoch meistens 4-Niveau-Systeme, da diese stabiler sind.<sup>11</sup>

„Das hängt mit der natürlichen Verweildauer der Elektronen (Übergangswahrscheinlichkeit) auf der oberen Energiestufe zusammen. Damit eine Besetzungsumkehr erfolgen

<sup>9</sup> [http://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip\\_Lasers.html](http://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip_Lasers.html), Seite 2 von 5

<sup>10</sup> [http://www.trumpf.com/1.img-cust/Fasz-Blech\\_Kapitel\\_06-Laser\\_Materialbearbeitung.pdf](http://www.trumpf.com/1.img-cust/Fasz-Blech_Kapitel_06-Laser_Materialbearbeitung.pdf), Buchseite 59

<sup>11</sup> <http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA00/mayerhofer/k1.pdf>, Seite 6

Bild 6: Vier-Niveau-Schema für einen Laserprozess<sup>12</sup>

zurückfallen. Da der Zustand  $E_2$  eine große Lebensdauer besitzt, gehen sehr viele Atome sehr schnell (z.B. strahlungslos) in diesen Zustand über. Teilweise fallen die sich dort befindlichen Elektronen durch spontane Emission auf  $E_1$  oder  $E_0$  zurück, der Übergang zwischen erstem Hauptniveau und Grundniveau geht aber sehr schnell vonstatten, sodass sich sehr bald viel mehr Elektronen auf  $E_2$  als auf  $E_1$  befinden und dadurch die Besetzungsumkehr eintritt. Durch die Besetzungsinversion übertrifft die Rate der stimulierten Emission die Rate der stimulierten Absorption und spontanen Emission. Die Elektronen, die bei der induzierten Lichtaussendung von  $E_2$  auf  $E_1$  wechseln, gehen sehr schnell in den Grundzustand über, wo sie durch das Pumpen wieder Energie erhalten und der Zyklus neu beginnt.<sup>13</sup>

### 2.3.4 Rückkopplungsanordnung – optischer Resonator

Das Lasermedium befindet sich in einem Resonator, ist also zwischen Plan- oder gekrümmten Spiegeln eingeschlossen. Einer der Spiegel besitzt einen Reflexionsgrad von 100 %, der andere etwa von 98 %, damit die elektromagnetische Wellenenergie teilweise austreten und genutzt werden kann (s. Bild 5 oben).

Was ist ein Resonator ?

Wir finden ihn bautechnisch auch in Blasinstrumenten realisiert, wo sich stehende Wellen im „dünnen“ Medium Luft (im Laser das Lasermedium) mit unterschiedlichen Frequenzen durch Reflexion an einem dichteren Metallwand- (beim Laser Spiegel-) medium des Blasinstrumentes (des Lasers) ausbilden.

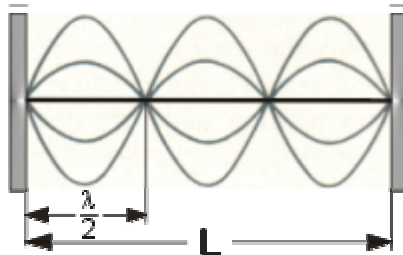


Bild 7: Stehende Wellen durch Reflexion am dichteren Medium

Dies unter der Voraussetzung, dass die Länge des Resonators ein ganzes Vielfaches der halben Wellenlänge ist  $L = n \cdot \lambda/2$ .

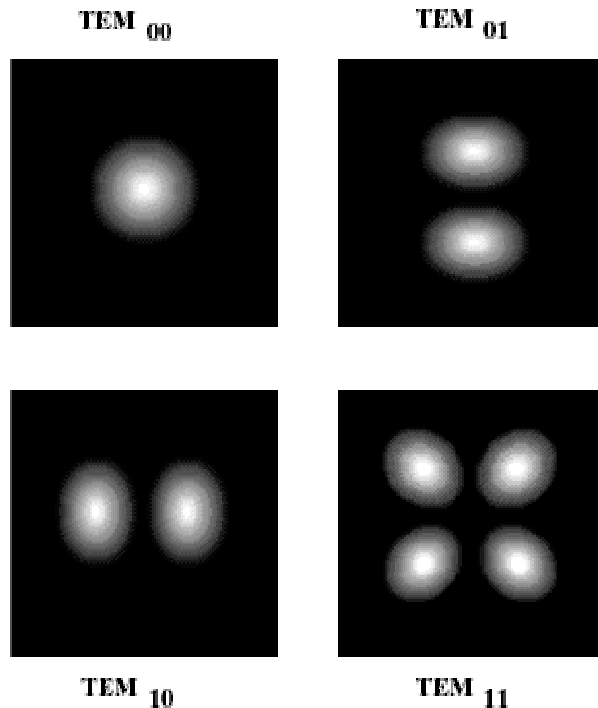
Diese stehenden Wellen weisen Schwingungsknoten, das sind Stellen der Ruhe, und Schwingungsbäuche, das sind Stellen größter Schwingungsweite, auf. Die Schwingungsenergie verteilt sich im „dünnen“ (Luft- bzw. Laser-) Medium stabil, weil sie sich durch Verstärkung von hin- und rücklaufenden Wellen so einstellt. Dabei bilden sich an den „dichteren“ Grenzflächen Knoten heraus, denn dort erfolgt ein Phasensprung der Rücklaufwelle von  $\lambda/2$ .

<sup>12</sup> ebenda, Seite 6

<sup>13</sup> ebenda

Der Resonator bei heute hochtechnologisch „gezüchteten“ Laserdioden hat Ausmaße in der Größenordnung der Laserwellenlänge<sup>14</sup>, sodass die Zahl der (ent-)stehenden Wellenzüge im Resonator (sog. Resonatormoden) gering ausfällt. Insofern nimmt der Resonator eine gewisse Wellenlängenselektion vor, was einer Filterwirkung entspricht. Die bautechnische Seite bestimmt somit das Wellenlängenspektrum des Lasers.

Die zuvor beschriebene durch den Resonator gebildete stabile Wellenanordnung führt ferner zur Erhöhung der Photonendichten im Lasermedium, was einem geringeren Energieaufwand bei gleicher Laserleistung erfordert.



„Neben diesen sogenannten Longitudinalmoden treten im optischen Resonator auch Transversalmoden auf, die für die erreichbare Strahlenqualität von großer Bedeutung sind. Sie sind die Folge von Beugungs- und Interferenzphänomenen im Resonator und spiegeln die räumliche Verteilung (im Querschnittsbild; d. Verf.) der Schwingungsenergie im Laserresonator wider. In Bild 5 links sind die ersten vier Transversalmoden dargestellt. Sie werden nach ihrer Ordnung in zwei Dimensionen als TEM<sub>1n</sub> bezeichnet (transversal elektromagnetic mode).“<sup>15</sup>

Bild 8: Darstellung der Intensitätsverteilung der ersten vier Transversalmoden in großer Entfernung vom Laser auf dem Schirm<sup>16</sup>

### 2.3.5 Betriebsarten von Lasern

„Grundsätzlich sind zwei Arten von Lasern gebräuchlich. Laserstrahlung kann kontinuierlich oder in Form sehr kurzer Pulse erzeugt werden. Kontinuierlich strahlende Laser (cw-Laser = continuous wave laser, ‚Dauerstrichlaser‘) erfordern, dass der Pumpprozess ebenso schnell angeregte Atome erzeugt, wie diese durch die Laseraktivität wieder abgeregt werden. Die maximale Ausgangsleistung solcher Laser ist daher durch den Pumpvorgang begrenzt.

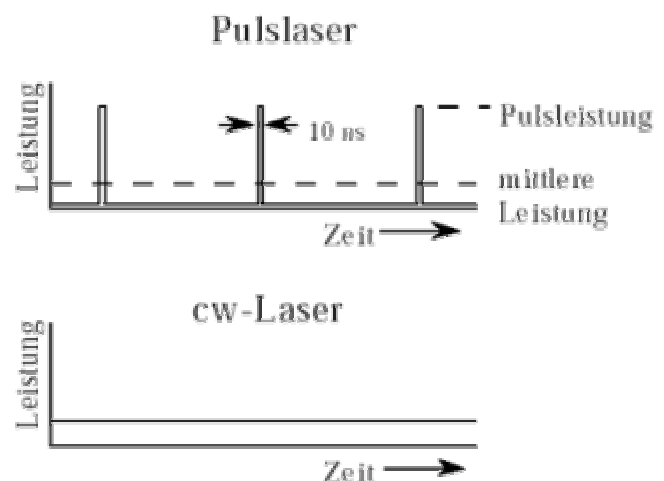


Bild 9: Betriebsarten von Lasern<sup>17</sup>

<sup>14</sup> <http://www.uni-Konstanz.de/quantum-optics/atomoptics/homepages/ralf/laserphysik.pdf>, Kap 1.8, ohne Seitenangabe

<sup>15</sup> <http://www.uni-duesseldorf.de/www/MedFak/LaserMedizin/Laserkurs/skript/Kapitel1.pdf>, Seite 15

<sup>16</sup> <http://www.uni-duesseldorf.de/www/MedFak/LaserMedizin/Laserkurs/skript/Kapitel1.pdf>, Seite 16

<sup>17</sup> ebenda, Seite 17

Betreibt man andererseits innerhalb des Resonators einen schnellen optischen Schalter, der Laseraktivität nur im geöffneten Zustand zulässt, so kann man erreichen, dass eine wesentlich höhere Besetzungsinversion erreicht wird, also wesentlich mehr gespeicherte Energie zur Verfügung steht. Mit dem Öffnen des Schalters wird diese Energie schlagartig freigesetzt und die Besetzungsinversion nahezu vollständig aufgebraucht, so dass die Laseraktivität schon nach sehr kurzer Zeit selbsttätig wieder abbricht. ... Es lassen sich auf diese Weise sehr intensive Laserpulse erzeugen (Pulsdauern typischerweise im Nanosekundenbereich), deren Pulsleistungen im Mega- bis Gigawattbereich liegen. Die mittlere Leistung von Pulslasern ist allerdings im Allgemeinen (abhängig von der Pulsfrequenz) eher geringer als die Leistung von cw-Lasern.“<sup>18</sup>

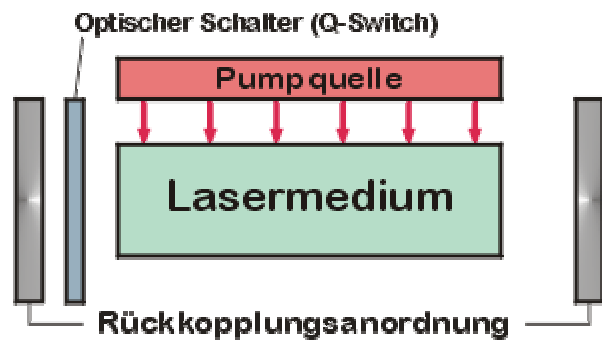


Bild 10: Schematische Darstellung der Güteschaltung (Q-Switch)

<sup>18</sup> ebenda, Seite 17/18

## 3 Werkstoffe aus elektrodynamischer Sicht

### 3.1 Materielle Stoffstruktur der festen Laserwerkstoffe

Der Großteil der hier im Rahmen meines Themas anzusprechenden Laserwerkstoffe haben kristalline Festkörperstruktur, die sich durch regelmäßig aufgebaute Gitterstrukturen kennzeichnen.

Das können Ionengitter (Mineralien, Salze), Atomgitter mit Elektronenpaarbindungen (reine Halbleiterwerkstoffe) als auch Metallgitter (krz-, kfz-, hexagonale Grundformen) sein.

Das Bestreben der an chemischen Bindungen beteiligten Atome ist es, einen möglichst energiearmen Zustand zu erreichen. Dazu nehmen die Elektronen der äußersten Schale bzw. Energieniveaus an Bindungsstrukturen teil, die im Ergebnis zu den unterschiedlichen Festkörpergitterformen führen.

Die an der chemischen Bindung beteiligten Elektronen können je nach Bindungsart relativ niedrige Energiewerte haben. Ihr Zustand ist relativ stabil. Sie gehören zum sogenannten „Valenzband“<sup>19</sup>.

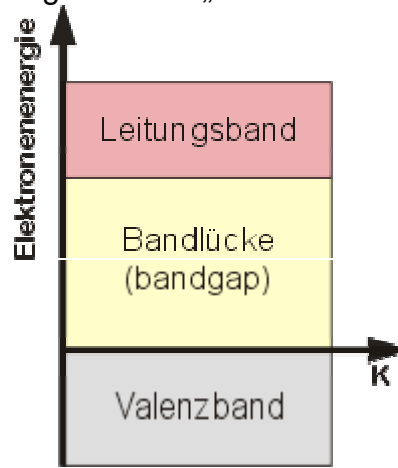


Bild 11: Bandstruktur im Festkörper

Bei Metallen kennzeichnet sich das chemische Bindungsstreben dadurch, dass die beteiligten Elektronen der äußeren Schale bzw. Energieniveaus höhere Werte annehmen können. Sie werden quasi „abgestoßen“ und sind dann im Metall(ionen)gitter frei beweglich und können als Träger des Stromtransports herangezogen werden. Man spricht davon, diese „freien“ Elektronen befinden sich im sogenannten ‚Leitungsband‘.

Es gibt somit zwei „erlaubte“ Elektronenenergiezustände, das Valenzband und das Leitungsband, wie es das links dargestellte Energieband-Schema grob vereinfachend darstellt.<sup>20</sup>

Die in Kristallen organisierten Stoffe unterscheiden sich wesentlich durch die Größe des „verbotenen“ Bereichs

zwischen Leitungsband und Valenzband, die sogenannte Bandlücke (bandgap).

Die horizontale Achse kann als Koordinate im Kristall gedeutet werden, wobei die Lage der Bandgrenzen je nach Erstarrung bzw. Wachstumsrichtung des Kristalls oft ortsabhängig ist.<sup>21</sup>

### 3.2 Leiter, Halbleiter, Isolatoren

Bei Temperatur des absoluten Nullpunktes (-273 Grad Celsius = 0 Grad Kelvin) nehmen alle Atome und deren Elektronen die niedrigsten möglichen Energiewerte ein. Sie gehören energetisch dem Valenzband an.

Wie sich ein Stoff bei höheren (wärmeren) Temperaturen verhält, hängt von der Größe der Bandlücke ab und ist abhängig von der Temperatur, die in der Lage wäre, energetisch Elektronen ins Leitungsband zu heben.

Technische Isolatoren sind solche, bei denen die Bandlücke so groß ist, dass bei

<sup>19</sup> Im Bändermodell werden die diskreten Energieniveaus der Einzelatome, in denen Elektronen sich bewegen können, in Bändern zusammengefasst.

<sup>20</sup> Bild nachgezeichnet aus: [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WS99/infv1-k6.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WS99/infv1-k6.pdf); Seite 5

<sup>21</sup> sinngemäß in: ebenda, Seite 5

„normalen“ Temperaturen keine messbare Eigenleitung auftritt. Erst mit Erreichen des Schmelzpunktes bzw. in der flüssigen Schmelze ist Eigenleitung messbar, wobei die Kristallionen des dann aufgehobenen Gitters als Ladungsträger auftreten.<sup>22</sup>

Halbleiter sind Stoffe, die beim absoluten Nullpunkt Isolatoren darstellen, deren Bandabstand aber so klein ist, dass bei höheren Temperaturen einige Elektronen ins Leitungsband gehoben werden. Die dadurch bewirkte Leitfähigkeit wird Eigenleitung genannt.

Bei den Metallen als elektrische Leiter gibt es zwei Sorten:

Bei einwertigen Metallen ist das Valenzband nur teilweise gefüllt und übernimmt die Funktion des Leitungsbandes. Bei zweiwertigen Metallen ist das Valenzband voll besetzt, jedoch überlappen sich Valenz- und Leitungsband teilweise. Metalle haben also zwei (teilweise) gefüllte Bänder ohne Bandlücke, was ihre elektrische Leitfähigkeit ermöglicht. Auch bei niedrigsten Temperaturen sind sie leitend, weil die Elektronen durch die geringer werdende Bewegungsenergie der Metallionen des Gitters weniger mit diesen in Berührung kommen.

Festkörper	Energielücke	Spezifischer Widerstand in $\Omega \cdot m$ (bei 300 K)
Isolatoren	$E_{\text{Bandlücke}} > 3 \text{ eV}^{23}$	$10^7 - 10^{16}$ (hoch)
Halbleiter <sup>24</sup>	$0 < E_{\text{Bandlücke}} < 3 \text{ eV}$	$10^{-4} - 10^2$ (mittel)
Metalle	Keine	$\approx 10^{-7}$ (klein)

Ein weiteres Merkmal zur Klassifizierung der hier von uns zu betrachtenden Werkstoffe ist ihr spezifischer Widerstand. Er ist als weitere elektrotechnische Stoffgröße ein Maß für die Beweglichkeit der Ladungsträger im Stoff bei einer bestimmten Temperatur. Man kann ihn als „Reibung“ der Elektronen an den Ionen des Metallkristallgitters deuten.

### 3.3 Rekombination im Halbleiter

Wir konnten sehen, dass die Zufuhr von Strahlungs- oder Wärmeenergie zum Kristallgitter Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband wechseln können, wenn die Bandlücke zwischen beiden Bändern nicht zu groß ist.

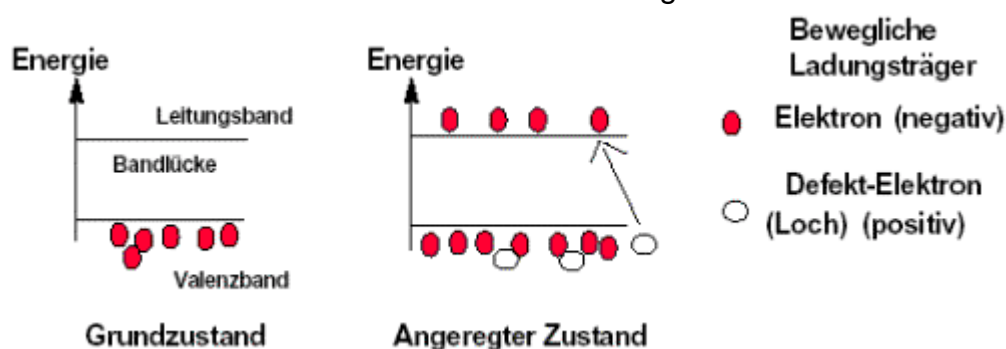


Bild 12:  
Paarbildung im  
Halbleiter<sup>25</sup>

Ein ins Leitungsband gehobenes Elektron hinterlässt aber im Valenzband ein „Loch“ und das abgebende Atom stellt (kurzzeitig) ein positives Ion im Kristallgitter dar. Man nennt es „Defektelektron“, weil ihm ein Elektron und damit die elektrische Neutralität fehlt.

<sup>22</sup> sinngemäß in: [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WWS99/infv1-k6.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WWS99/infv1-k6.pdf), Seite 6

<sup>23</sup>  $1 \text{ eV} = 16 \cdot 10^{-20} \text{ WS}$

<sup>24</sup>  $4 \text{ eV} = 310 \text{ nm} \rightarrow \text{UV}$ ;  $3 \text{ eV} = 413 \text{ nm} \rightarrow \text{blau}$ ;  $2 \text{ eV} = 620 \text{ nm} \rightarrow \text{rot}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,24 \mu\text{m} \rightarrow \text{infrarot}$

<sup>25</sup> Bildquelle: [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WWS99/infv1-k6.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WWS99/infv1-k6.pdf), Seite 7

Im reinen (sauberen) Element-Halbleiterwerkstoff (Ge, Si, Se) entspricht die Zahl der Elektronen immer der der positiven Ladungsträger (Löcher, Defektelektronen).  
 „Natürlich werden nicht alle Ladungsträger, die einmal vom Valenzband ins Leitungsband gewechselt sind, dauernd dort bleiben. Sie werden nach einer mehr oder weniger langen Zeit unter Abgabe von Energie ins Valenzband zurückspringen und dort ein ‚Loch‘ auffüllen. Dieser Vorgang wird als ‚Rekombination‘ bezeichnet.“<sup>26</sup>  
 Beim Element-Halbleiter gleichen sich Löcherbildung und Rekombination im zeitlichen Mittel aus.

### 3.4 Direkte und indirekte Halbleiter

Bezüglich der Dauer des Rekombinationsvorgangs unterscheiden sich verschiedene Halbleiter erheblich.

Bei den sogenannten ‚direkten‘ Halbleitern rekombiniert das aus dem Leitungsband ins Valenzband zurückkehrende Elektron auf direktem Wege ohne impulsmäßige Berührung der Gitteratome unter Aussendung eines Lichtquants, was je nach Material ein Lichtquant im Bereich des infraroten oder des sichtbaren Lichtes sein kann.<sup>27</sup>

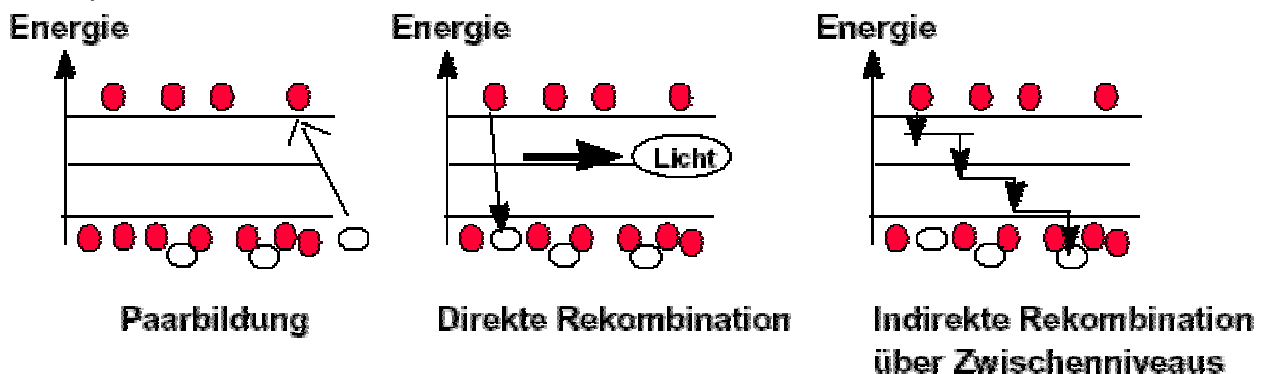


Bild 13: Direkter und indirekter Halbleiter

Solche direkten Halbleiter sind sogenannte Verbindungshalbleiter, die nach den Gruppen der Konstituenten im Periodensystem der Elemente klassifiziert werden:

III – V – Halbleiter: GaAs, AlAs, InAs, InSb, GaSb, ...

II – VI – Halbleiter: ZnS, ZnSe, CdTe, ...

IV – VI – Halbleiter: PbS, PbTe, PbSe, GeTe, SnSe, ...

Es gibt aber auch neben den eben genannten binären Verbindungshalbleitern aber auch tertiäre mit drei chemischen Konstituenten, wie z.B.:

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ , ...

Sie spielen als sogenannte Legierungshalbleiter eine viel größere Rolle.<sup>28</sup>

„Die Element-Halbleiter der IV. Hauptgruppe verhalten sich anders. Hier erfolgt die Rekombination eher ‚zögerlich‘. Das Elektron springt nicht direkt ins Valenzband zurück, sondern rekombiniert ‚in Raten‘ über Zwischenniveaus in der Bandlücke (s. Bild 13 oben; d. Verf.), die durch Störungen im Kristall und geringe Verunreinigungen mit Fremdatomen verursacht wird. Man bezeichnet sie auch als ‚indirekte‘ Halbleiter. ... Die abgegebene Energie wird im Kristall in Wärme umgesetzt. Als aktive Lichtquellen taugen diese Halbleiter also nicht.“<sup>29</sup>

<sup>26</sup> [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WWS99/infv1-k6.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WWS99/infv1-k6.pdf), Seite 9

<sup>27</sup> sinngemäß in: ebenda

<sup>28</sup> nach: [http://www.nanophys.ethz.ch/vorlesung/hlnano02/Skript\\_Teil\\_I.pdf](http://www.nanophys.ethz.ch/vorlesung/hlnano02/Skript_Teil_I.pdf), Seite 6

<sup>29</sup> [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WWS99/infv1-k6.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WWS99/infv1-k6.pdf), Seite 9

### 3.5 Dotieren<sup>30</sup> von Halbleitern

„Für die technische Anwendung der Halbleiter sind die reinen Halbleiterwerkstoffe mit ihrer sehr geringen Eigenleitung meist ungeeignet.. Man benötigt Bauelemente, deren Leitfähigkeit viel größer ist und von außen durch eine Spannung oder einen Strom gesteuert werden kann. Dieses gelingt durch gezielten Einbau von Fremdatomen, das sogenannte Dotieren.“<sup>31</sup>

Die Halbleiterelemente Germanium und Silizium gehören der IV. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente (PSE) an, haben also 4 Elektronen auf der äußersten Schale. Aufgrund der von ihnen eingegangenen Elektronenpaarbindung (kovalente Bindung) bilden sie jeweils mit 4 gleichen stofflichen Nachbaratomen ein (Atom-) Kristallgitter. In der schematischen Darstellung wird jeweils ein Elektronenpaar durch einen Strich symbolisiert (Valenzstrichformel).

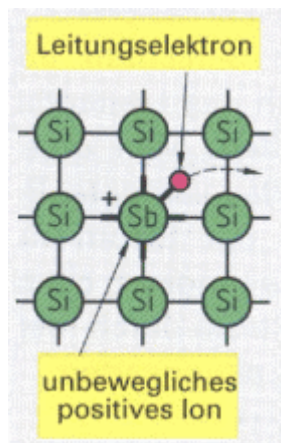


Bild 14: N-leitendes Silicium<sup>32</sup>

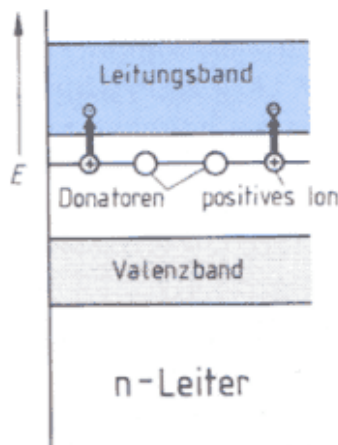


Bild 15: Donatorniveau<sup>33</sup>

„Fügt man in das Kristallgitter des vierwertigen Halbleiterwerkstoffes Silicium Fremdatome mit fünf Valenzelektronen ein, z.B. Antimon (Sb), so können jeweils vier Valenzelektronen gebunden werden (s. Bild 14 links). Das fünfte Valenzelektron des Antimonatoms ist nur schwach an seinen Atomkern gebunden. Deshalb genügt eine geringe Energie (etwa 0,04 eV), z.B. durch Raumtemperatur, um dieses Elektron ins Leitungsband zu heben.

Das angeregte Elektron kann sich dann als Leitungselektron frei im Kristallgitter bewegen und lässt ein positives Ion

zurück. Es entstehen ebenso viele Leitungselektronen wie positive, *unbewegliche* Ionen. Der Kristall bleibt nach außen jedoch elektrisch neutral.

Fremdatome, die im Kristallverband Elektronen abgeben, bezeichnet man als Donatoren (Elektronengeber, lat. Donare = geben).“<sup>34</sup> Solch dotierte Halbleiter sind N-Leiter.

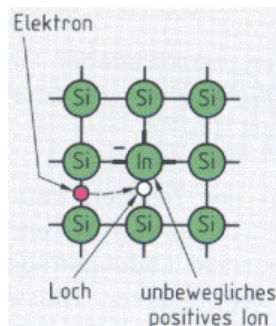
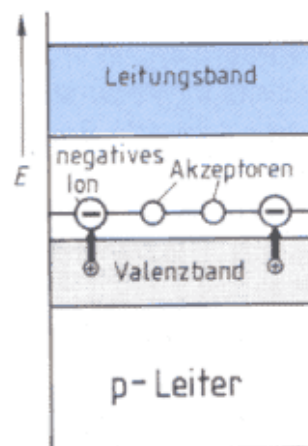


Bild 16: P-leitendes Silicium<sup>35</sup>

Bild 17<sup>36</sup> rechts: Akzeptorniveau



„Baut man Fremdatome mit drei Valenzelektronen, z.B. Indiumatome (In), in ein Siliciumkristall ein, so werden alle drei Valenzelektronen des Indium gebunden und es bleibt im Kristallgitter jeweils noch eine Bildungslücke, ein Loch (s. Bild 16 links). Fremdatome, die im Kristallverband Elektronen aufnehmen, heißen Akzeptoren (Elektronenempfänger, lat. Accipere = annehmen). Das Energieniveau des Indiumatoms (Akzeptorniveau) liegt im verbotenen Band des Siliciumkristalls ganz dicht über dem Valenzband.

<sup>30</sup> lat. Dotare = ausstatten, mitgeben

<sup>31</sup> <http://spot.fho-emden.de/lt/Diodenlaser/technic.htm>, Seite 1 von 2

<sup>32</sup> Bildquelle: Europa Lehrmittel, Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik, a.a.O., Seite 95

<sup>33</sup> Bildquelle: Europa Lehrmittel, BdT, Werkstofftechnik für Elektroberufe, a.a.O., Seite 193

<sup>34</sup> Europa Lehrmittel, Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik, a.a.O., Seite 95

<sup>35</sup> Bildquelle: ebenda, Seite 95

<sup>36</sup> Bildquelle: Europa Lehrmittel, BdT, Werkstofftechnik für Elektroberufe, a.a.O., Seite 193

Bei kleinem Energieaufwand (etwa 0,16 eV) wechseln Elektronen des Siliciums vom Valenzband auf das Akzeptorniveau des Indiums (Bild 17). In das im Silicium-Kristallgitter nun entstandene Loch kann wieder ein Valenzelektron eines Nachbaratoms springen, wodurch dort selbst wieder ein Loch hervorgerufen wird. Das Loch ‚wandert‘ dabei durch das Kristallgitter. Das Indiumatom wird durch das zusätzliche Elektron zu einem negativen unbeweglichen Ion. Der Kristall selbst wirkt nach außen aber neutral. Weitere Akzeptoren für Silicium sind Bor (B), Aluminium (Al) und Gallium (Ga). Der Ladungstransport erfolgt hier vorwiegend durch positive Ladungsträger. Man bezeichnet diese Halbleiter als P-Leiter.“<sup>37</sup>

Die direkten III – V – Halbleiter (Verbindungshalbleiter) „benötigen als Akzeptoren zweiwertige Elemente, z.B. Magnesium (Mg). Die Möglichkeit, III – V – Halbleiter mit vierwertigen Stoffen zu dotieren, besteht auch. Sie werden teilweise in Abhängigkeit von der Temperatur beim Dotiervorgang, bevorzugt als Donatoren (auf den Plätzen 3-wertiger Atome) oder als Akzeptoren (auf den Plätzen 5-wertiger Atome) eingebaut“<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> Europa Lehrmittel, Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik, a.a.O., Seite 95

<sup>38</sup> [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WWS99/infv1-k6.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WWS99/infv1-k6.pdf), Seite 10

## 4 Die Halbleiterlaserdiode

### 4.1 Der pn - Übergang *ohne* äußere elektrische Spannung

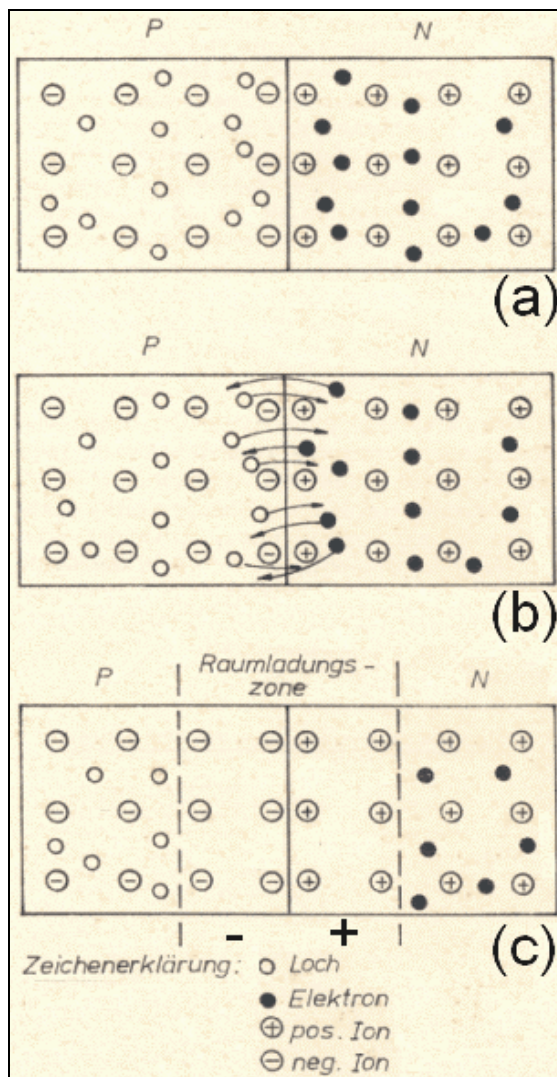


Bild 18: pn-Übergang ohne äußere Spannung

Wir stellen uns vor, wir bringen zwei verschiedenartig, aber jeweils homogen dotierte Siliziumblöcke (P- und N-Leiter) zusammen (s. Bild 18 (a) links). Was geschieht?

Die beweglichen Ladungsträger versuchen, ihrem Ausgleichstreben folgend, in das Nachbargebiet zu kommen, um das Konzentrationsgefälle zu mindern.

Die Elektronen des N-Halbleiters wandern in den Bereich des P-Halbleiters und besetzen dort Löcher der Akzeptoren (s. Bild 18 (b) links).

Dieser Vorgang wird Diffusion<sup>39</sup> genannt.

Die das N-Gebiet verlassenden Elektronen hinterlassen dort aber positive Atomionen, die von nachrückenden Elektronen der N-Dotierung wieder neutralisiert werden, an ihrer ursprünglichen Stelle aber neue positive Atomionen hinterlassen.

Dem Elektronenstrom ins P-Halbleitergebiet ist ein positiver Löcherstrom ins N-Gebiet entgegengerichtet (s. Bild 18 (b) links).

Die Wanderungsbewegung kommt systembedingt nach gewisser Zeit zur Ruhe.

Beide Ströme kompensieren sich. Es besteht ein elektrodynamisches Gleichgewicht in der sich ausbildenden Raumladungszone ( $d \approx 2 \mu\text{m}$ ) (s. Bild 18 (c) links).

In großer Entfernung zu dieser Grenzschicht hat sich gegenüber dem Normalzustand (s. Bild 18 (a) links oben) des homogen dotierten Halbleiters nichts geändert.

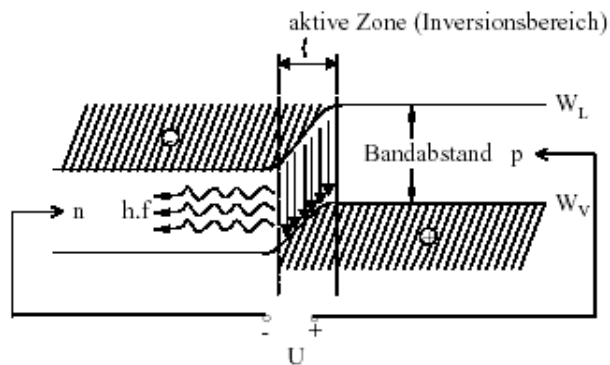
### 4.2 Der pn – Übergang *mit* angelegter äußerer elektrischer Spannung (Lumineszenzprinzip)

Wenn wir an diesem pn-Übergang mit ausgebildeter Raumladungszone eine elektrische Spannung anlegen, die auf der n-Seite Elektronen anliefert (elektrische Energie hineinpumpt) – man spricht von sog. Vorwärtsrichtung<sup>40</sup> –, dann werden eine Vielzahl von Elektronen in Richtung der Raumladungszone gestoßen (gepumpt), wodurch diese sich verkleinert. In der Raumladungszone werden auf der N-Seite die Elektronen über die Bandlücke hinaus ins Leitungsband gehoben.

Die Elektronen fallen aus dem Leitungsband des N-Leiters in die Löcher im Valenzband des P-Halbleiters (Rekombination). Dabei geben sie Energie ab (spontane Emissionen) (s. Bild 19 folgende Seite).

<sup>39</sup> lat. diffundere = eindringen

<sup>40</sup> Die Rückrichtung – die sog. Sperrrichtung – soll im Rahmen dieses Themas unbetrachtet bleiben. Ein Halbleiterlaser wird in Vorwärts- bzw. Durchlassrichtung betrieben.

Bild 19: Energiebetrachtung am pn-Übergang<sup>41</sup>

Die Wellenlänge des ausgesandten Lichtes wird durch die von den Halbleitermaterialien bestimmte Bandlücke geprägt. Ihre Breite kann jedoch durch geeignete Dotierung der Halbleiter in weiten Grenzen eingestellt werden.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, wird die emittierte Energie bei den indirekten Halbleitern (wie Si, Ge) hauptsächlich in Form von Wärme frei. Der Baustein erhitzt sich und muss evtl. gekühlt werden.

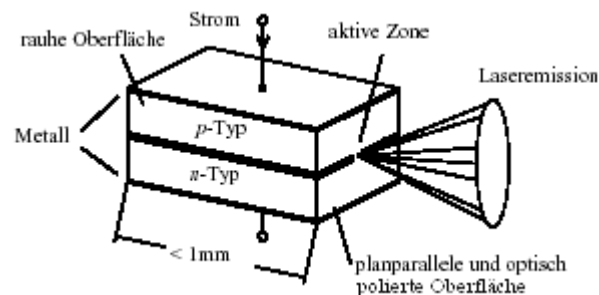
Bei vielen direkten Halbleitern (wie GaP, GaN, GaAs, InP) wird diese Energie in Form von Licht (sog. LED's; engl. = light emitting diodes) oder nicht sichtbar als Infrarotstrahlung (bei GaAs) frei (sog. IRED's = infra red emitting diodes).

### 4.3 Vom LED-Prinzip zum Halbleiterlaser

„Das LED-Prinzip lässt sich zum Halbleiterlaser weiterentwickeln. Dazu sind zwei Dinge notwendig. Erstens muss die induzierte Emission die bei der LED ausschließlich vorhandene spontane Emission deutlich übertreffen. Hierzu ist in der sog. aktiven Zone eine ausreichende Besetzungsinversion notwendig. In einer beidseitig sehr hoch dotierten ( $> 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) entarteten pn-Diode, die in Durchlassrichtung betrieben wird, ist die Ladungsträgerinjektion tatsächlich ausreichend groß, um ... Laserbetrieb zu erhalten. Vorausgesetzt, die zweite Bedingung ist erfüllt: die gesamten Verluste der Strahlungsmode müssen kleiner sein als der Gewinn.“<sup>42</sup>

„Ein negativer Wert erzeugt(e; d. Verf) keine Laserstrahlung, sondern eine breitbandige, nichtkohärente Strahlung wie bei einer Lumineszenzdiode. Außer der Besetzungsinversion bedarf es für die Lasertätigkeit auch stimulierter Emission, denn die Rekombinationsstrahlung ist inkohärent.“<sup>43</sup>

Der geforderte „optische Gewinn“ kann durch den schon in Kapitel 2.3.4 angesprochenen Resonator erzielt werden. Dazu genügt es, zwei gegenüberliegende Flächen parallel zu schneiden und zu polieren, da der Brechungsindex mit  $n$  (von GaAs) = 3,59 recht groß ist<sup>45</sup>. Etwa 32 Prozent des emittierten Lichtes werden zurückreflektiert.

Bild 20: Schematische Darstellung einer Laserdiode<sup>44</sup>

Man spricht hier von einem kantenemittierenden Laser.

Die Laseremission ist beugungsbedingt in einer Richtung stark divergent, ca.  $30^\circ$ .

Ferner hat eine solche einfache Diode einen sehr hohen Schwellenstrom (ca.  $1000 \text{ A/mm}^2$ ) bei Raumtemperatur<sup>46</sup>, um die Laserdiode vom inkohärenten zum kohärenten Strahler

werden zu lassen. Bei Raumtemperatur kann sie nicht kontinuierlich betrieben werden

<sup>41</sup> Bildquelle: <http://www.telematik.informatik.uni-karlsruhe.de/lehre/SS00/vorlesungen/MDKS-Unterlagen/Optische-Nachrichtentechnik-Folien.pdf>, Folie 69

<sup>42</sup> [http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/PhysikalischeElektronik/Phys\\_Elekt/node100.html](http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/PhysikalischeElektronik/Phys_Elekt/node100.html), Seite 3 von 6

<sup>43</sup> <http://www.pci.uni-heidelberg.de/pci/fpraktikum/WS0001/WS000105.pdf>, Seite 5

<sup>44</sup> Bildquelle: <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>, Seite 61

<sup>45</sup> Das Halbleitermaterial muss also einen deutlich höheren Brechungsindex haben als das sie umgebende Material (optisches confinement)

<sup>46</sup> <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>, Seite 61

sondern nur im Pulsbetrieb (s. dazu Kap. 2.3.5).  
 Der große Energieaufwand liegt in hohen Verlusten begründet.  
 Einerseits rekombinieren einige stimulierte Elektronen gar nicht in der aktiven Zone, sondern gehen direkt in den anderen Halbleiterteil über. Des weiteren weist der Resonator hohe optische Verluste auf, da er in der Breite nicht begrenzt ist.  
 Ferner wird schräg zur aktiven Schicht emittierte Strahlung vom Kristall absorbiert, was die Lichtleistung schwächt.

### 4.4 Doppelheterostruktur-Laserdiode

Der hohe Schwellenstrom konnte durch eine Mehrschichtstruktur der Halbleiterlaserdiode stark herabgesetzt werden. Diese Mehrschichtstruktur stellt aber bei der Herstellung höchste Ansprüche, die Schichten aufeinander einkristallin, unverspannt und unverschmutzt „wachsen“ zu lassen (sog. Epitaxieverfahren).  
 Bestimmte Schichtfolgen aus den Energieniveaus der Halbleiterwerkstoffe

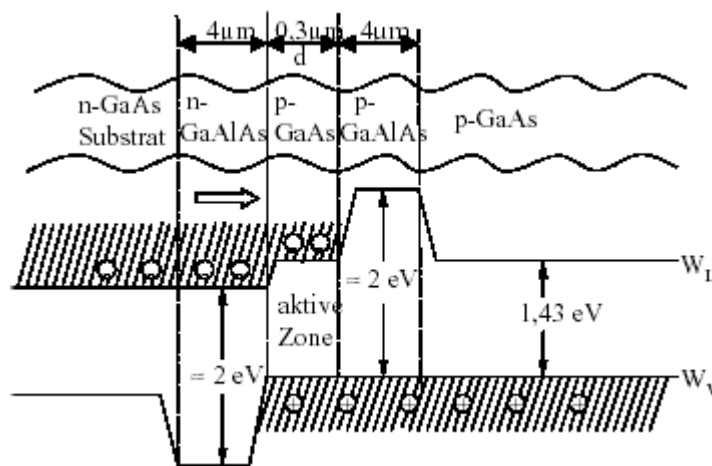


Bild 21: Doppelheterostruktur<sup>47</sup>

$p - Ga_{1-x}Al_xAs$   
 (alternativ:  $p - Ga_{1-x}In_xAs$ ,  $p - Ga_{1-x}In_xP$ , ...)  
 $GaAs$   
 (alternativ:  $GaP$ ) und  
 $n - Ga_{1-x}Al_xAs$   
 (alternativ:  $n - Ga_{1-x}In_xAs$ ,  $n - Ga_{1-x}In_xP$ , ...)  
 bringen einen zusätzlichen Unterschied im Energieniveau der Leitungselektronen.  
 Der Bandabstand der passiven Zonen muss größer sein als der der aktiven Zone (s. Bild 21 links; 2 eV zu 1,43 eV). Das wirkt wie eine zusätzliche Barriere bzw. kanalisiert den Rekombinationsvorgang.

Damit wird erreicht, dass die Rekombination der Elektronen mit Löchern im Valenzband der aktiven Zone auch wirklich nur darin stattfindet und sie nur noch ganz vereinzelt vom Leitungsband der aktiven Zone in den ‚passiven‘ Halbleiterteil (im Bild oben: GaAlAs) übergehen bzw. dort absorbiert werden.

Bei der sog. indexgeführten Laserdiode (s. Bild 22 rechts) wird die aktive Zone nicht nur oben und unten sondern auch seitlich von GaAlAs-Schichten begrenzt. Diese um der aktiven Zone liegenden Schichten haben einen niedrigeren Brechungsindex<sup>48</sup>, weshalb die Absorption der emittierten Strahlung verringert bzw. die Reflexion an ihnen in die aktive Zone zurück erhöht wird.

All diese Maßnahmen subsumiert man unter dem Begriff „optisches confinement“.

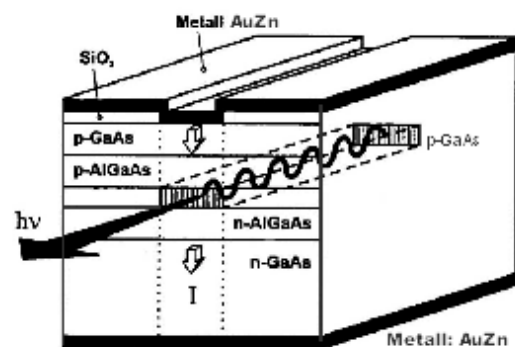


Bild 22: Indexgeführte Halbleiterlaserdiode<sup>49</sup>

Die Verwendung von möglichst niederohmigen Zuleitungsmaterial und das Aufbringen einer Oxidschicht (SiO<sub>2</sub>), sodass der Strom gezielt schmalbandig (lateral) nur in die

<sup>47</sup> Bildquelle: <http://www.telematik.informatik.uni-karlsruhe.de/lehre/SS00/vorlesungen/MDKS-Unterlagen/Optische-Nachrichtentechnik-Folien.pdf>, Folie 73

<sup>48</sup> Brechungsindex  $n$  für  $Al_xGa_{1-x}As$  =  $3,59 - 0,71x$ ; aus: Jäger, Dieter, a. a. O., Seite 15

<sup>49</sup> Bildquelle: <http://www.uni-konstanz.de/quantum-optics/atomoptics/homepages/ralf/laserphysik.pdf>, ohne Seitenangabe, Abb. 5

aktive Zone eintreten kann, sind Maßnahmen des „elektrischen confinement“.

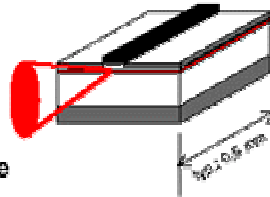
Das großflächige Aufbringen der Elektroden soll die Wärmeabfuhr sicherstellen. Damit wird das thermisch bedingte geometrische Vergrößern des Resonatorraumes eingedämmt (s. Kap. 2.3.3), was die Wellenlänge vergrößert. Ebenso vergrößert ein hoher Injektorstrom (Pumpstrom) die Wellenlänge, weil durch die steigende Ladungsträgerdichte in der aktiven Zone diese sich dann zunehmend erwärmt.<sup>50</sup>

## 4.5 Oberflächenemittierende Halbleiterdiodenlaser

Bislang haben wir nur über den kantenemittierenden Laser gesprochen, der senkrecht zur Schichtebene des Kristallwachstums die Strahlung emittiert. Seit einigen Jahren wird jedoch auch an der Entwicklung anderer Lasertypen (sog. Mikrolasern) gearbeitet, um den Schwellenstrom noch weiter abzusenken.<sup>51</sup>

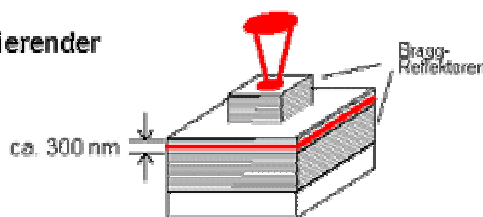
### Kantenemittierender Laser

● Emission in der Schichtebene



### Oberflächenemittierender Laser

● Emission senkrecht zur Schichtebene



Dies erfordert allerdings technologisch anspruchsvolle „komplexe Halbleiterschichten – so genannte Bragg-Reflektoren - ...“, die mit dem Lasermaterial in einem Epitaxieprozess als Einkristall gewachsen werden. Diese Spiegel<sup>53</sup> sind viel effizienter als die gebrochenen Kristallfacetten bei kantenemittierenden Halbleiterlasern und daher können solche Mikrolaser viel kürzer sein als die Kantenemitter. Eine solche Struktur ist ebenfalls in der Grafik dargestellt. ... Die Lichtemission erfolgt senkrecht, durch die Oberfläche. Daher werden solche Halbleiterlaser auch als oberflächenemittierende Halbleiter-

Bild 23: Vergleich von Kanten- und Oberflächen-Laser<sup>52</sup>

laser bezeichnet. Sie haben eine Reihe von Vorteilen gegenüber kantenemittierenden Halbleiterlasern: Sie brauchen geringere Ströme, sie haben eine exakt einstellbare Wellenlänge des emittierenden Lichtes und nicht zuletzt kann das von solchen Lasern emittierte Licht besser in Glasfasern eingekoppelt werden als das von kantenemittierenden Halbleiterlasern.<sup>54</sup>

<sup>50</sup> sinngemäß in: <http://www.uni-konstanz.de/quantum-optics/atomoptics/homepages/ralf/laserphysik.pdf>, ohne Seitenangabe, Kapitel 1.8

<sup>51</sup> siehe auch: Jäger, Dieter, a. a. O., Seite 64

<sup>52</sup> <http://www.uni-marburg.de/zv/news/archiv/mvj-00-6/600-10.html>, ohne Seitenangabe

<sup>53</sup> Diese Spiegel sind hochreflektierend und sollen den Nachteil des kurzen Verstärkungsweges wieder wettmachen.

<sup>54</sup> sinngemäß in: <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>, Seite 62

<sup>54</sup> <http://www.uni-marburg.de/zv/news/archiv/mvj-00-6/600-10.html>, ohne Seitenangabe

## 4.6 Elektrische Eigenschaften

„Einzelne Laserdioden erreichen eine CW-Leistung bis fast 1 W. Bei Mehrkanalstrukturen (‚Barren‘) werden mehrere Laser parallel betrieben, und Laserleistungen von mehr als 20 Watt sind möglich. ...

Da diese Dioden im Durchlass betrieben werden, muss der Strom im CW-Betrieb sehr konstant gehalten werden. Größere Spannungsspitzen können die Diode schnell zerstören.“<sup>55</sup>

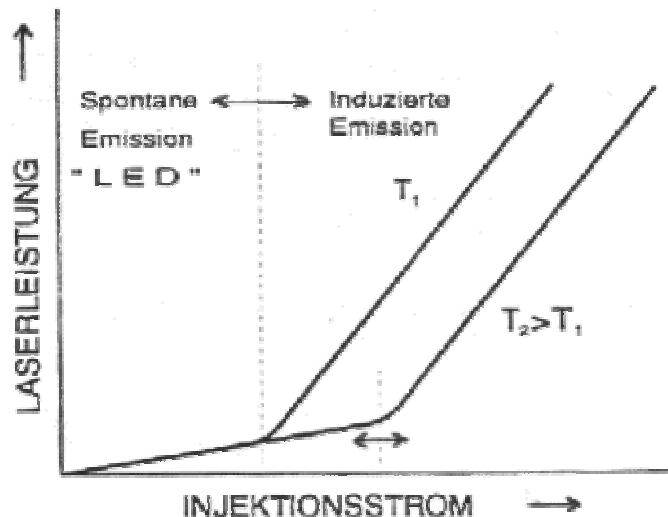


Bild 24: Injektorstromkurve des Halbleiterdiodenlasers<sup>56</sup>

Aufgrund der Kennlinie (Bild 24) ergibt sich: „Mit zunehmenden Strom steigt die Ausgangsleistung wie bei einer LED an. In diesem Bereich der spontanen Emission ist die Strahlungsleistung verhältnismäßig niedrig. Wenn der optische Gewinn (gain) die Verluste übertrifft, setzt bei einem Schwellstrom  $I_{th}$  (threshold) der Laserbetrieb ein. Im Bereich der stimulierten Emission nimmt die Strahlungsleistung extrem zu.

Der Schwellstrom ist temperaturabhängig. Er nimmt mit steigender Temperatur ... zu.“<sup>57</sup>

„(Diese Eigenschaft), dass oberhalb des Schwellstroms kleinste Stromänderungen große Leistungsänderungen erzeugen, ... macht man sich in der Nachrichtentechnik zunutze. Laserdioden können im GHz-Bereich moduliert werden und werden in Kombination mit Lichtwellenleitern zur Signalübertragung verwendet.“<sup>58</sup>

## 5 Anwendungen der Halbleiterlaserdiode

### 5.1 Wesentliche technische Einsatzbereiche

Wir haben die Halbleiterlaserdiode als ein (Doppel-)Heteroschichtenbauteil kennen gelernt, das in den letzten (Forschungs-)Jahren weitere Miniaturisierungsschritte durchlaufen hat, insbesondere was die das Bauteil prägende<sup>59</sup> aktive Zone betrifft. Damit konnten die elektrischen Leistungseigenschaften (geringer Schwellenstrom) wesentlich verbessert werden. Die Wirkungsgrade liegen heute bei relativ hohen 50 Prozent.

Die Diode kann mit kleinsten elektrischen Strömen ( $\approx 15$  mA) bei 2 V Spannung betrieben werden, so dass die Versorgung mit konventionellen Transistorschaltungen möglich ist. Ab dem Schwellenstrom bewirken kleinste Stromänderungen wegen der Kurvensteilheit (s. Bild 24 oben) große Ausgangsleistungen.

<sup>55</sup> <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>, Seite 63

<sup>56</sup> Bildquelle: <http://www.uni-konstanz.de/quantum-optics/atomoptics/homepages/ralf/laserphysik.pdf>, ohne Seitenangabe, Kapitel 1.8

<sup>57</sup> <http://spot.fho-emden.de/It/Diodenlaser/function.htm>; Seite 2 von 2

<sup>58</sup> <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>, Seite 63

<sup>59</sup> Das Bauteil prägend ist natürlich auch die das Wellenspektrum begründende Bandlücke bzw. seine Werkstoffwahl und Werkstoffzusammensetzung.

Wird dem Anregerstrom mit einer bestimmten Trägerfrequenz im hohen GHz-Bereich<sup>60</sup> eine zuvor digitalisierte (z.B. Musik-)Nachricht aufmoduliert und damit die Halbleiterlaserdiode angesteuert, überträgt der Laserstrahl medial diese Information fast verlustfrei.

Oder die digitalisierten Daten bzw. deren Stromimpulse steuern die Halbleiterlaserdiode direkt an, die als integrierter Bestandteil eines „Schreibkopfes“ (z.B. in sog. „Brennern“) zur Informationsspeicherung über den Energieträger Laserstrahl die Informationen auf das Speichermedium in Form eingebrannter „Pits“ verankert.

Es gibt also zwei wesentliche Bereiche der technischen Nutzung der Laserstrahlung (der Halbleiterlaserdiode):

- Die Ausnutzung der Laser-Strahlung zur Übermittlung der Informationen und
- die Ausnutzung der Energie der Laserstrahlung.

## 5.2 Einsatz einer Halbleiterlaserdiode (exemplarisch)

(Druckvorgang beim Laserdrucker)

Im Inneren des Laserdruckers befindet sich als Kernstück eine Aluminiumtrommel, auf der eine extrem dünne lichtempfindliche fotoleitfähige Selenschicht aufgetragen ist. Im dunklen Zustand ist sie sehr hochohmig und wirkt anfangs praktisch wie ein Dielektrikum im Kondensator.

Der Druckvorgang selbst beginnt mit dem ganzflächigen positiven Aufladen der Fotoleiterschicht, erzeugt durch eine hohe negative elektrische Spannung. Im Inneren der Aluminiumtrommel liegt positive Polarität an. Im Grundsatz liegt in diesem Stadium

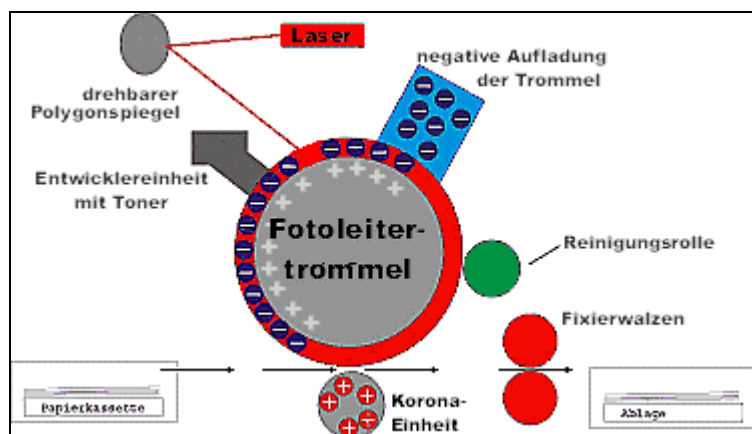


Bild 25: Prinzip eines Laserdruckers<sup>61</sup>

das Kondensatorprinzip vor.

Die Belichtung der fotoleitfähigen Selenschicht auf der sich drehenden Trommel geschieht durch einen in einer Halbleiterlaserdiode erzeugten Laserstrahl, wobei der Laserstrahl je nach (Pixel-)Muster ein- oder ausgeschaltet wird. Dieser „Schreibvorgang“ muss natürlich mit der Drehgeschwindigkeit der Trommel synchronisiert ablaufen.

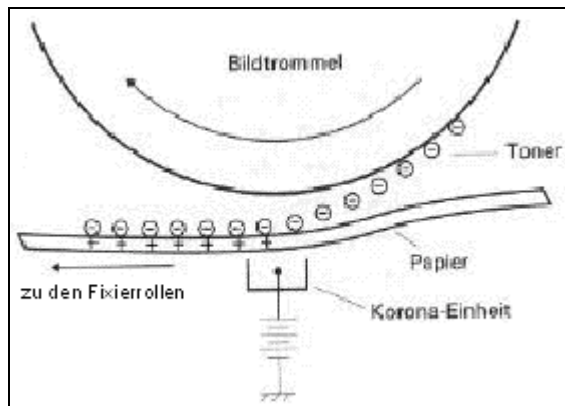
Der Laserstrahl wird über einen rotierenden Polygonspiegel (Spiegel aus vielen gegeneinander geneigten Flächen) zeilenweise auf die Trommel gelenkt. Die Stellen, die später schwarze (Pixel-)Punkte werden sollen, belichtet der dazu eingeschaltete Laserstrahl, wodurch an dieser Stelle die fotoleitende Schicht niederohmig wird und die zuvor aufgetragene negative Ladung zum Aluminiumtrommel-Inneren abfließt.

Das Bild befindet sich mit der entsprechenden Auflösung des Druckers nun mit entsprechend abgebildeter Zeilenzahl auf der Fotoleitertrommel.

Einige Drehgrade weiter wird das Bild nun an einer Entwicklerstation vorbeigeführt, welche negativ geladene Tonerpartikel bereithält. Die Tonerpartikel werden an den belichteten Stellen elektrostatisch angezogen und festgehalten.

<sup>60</sup> Das neue Frequenzband von 400 THz, auf dem 100 Mio. Telefongespräche gleichzeitig übertragen werden könnten, wird bisher praktisch noch nicht verwendet.

<sup>61</sup> Bildquelle: [http://www.noesse.de/infothek\\_Laser.php](http://www.noesse.de/infothek_Laser.php)

Bild 26: Tonerübertragung auf das Papier<sup>62</sup>

Nun ist das Bild auf der Trommel im Prinzip dargestellt. Das Tonerpulver muss „nur noch“ im Papier verankert werden, denn es ist an dieser Stelle ja nur ein loser Pulverauftrag, der momentan nur elektrostatisch festhält. Dazu wird das Papier einer Rolle mit untergebrachter „Korona-Einheit“ zugeführt, die das Papier von unten elektrostatisch mit hoher elektrischer Spannung auflädt, wodurch die negativ geladenen Tonerpartikel von der Fotoleitertrommel auf das Papier übertragen und dort elektrostatisch festgehalten werden (s. Bild 26 links).

Das Papier wird abschließend durch Fixierwalzen geführt (s. Bild 25 oben). Die untere ist die Heiz-, die obere die Andruckrolle. Durch die Hitze ( $\approx 160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) werden die aus Tonerpartikel erschmolzen und durch die Walzrollen im Papier verankert.

Das Papier wird druckbeendigend in die Ablage weitergeführt.

Abschließend wird die Fotoleitertrommel entladen und gereinigt, um den nächsten Seitendruck einzuleiten.

## 6 Entwicklungen

(Weiter-)Entwicklungsschritte bei der Halbleiterdiodentechnologie zielen ab auf die Optimierung der Resonatorspiegel beim oberflächenemittierenden Laser, der Weiterentwicklung der Distributed-Bragg-Reflektoren (DBR) aus bis zu vierzig (!) einzelnen Schichten (wechselnd AlAs- und  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ -Schichten), um auf Reflexionswerte von über 99,9 % zu kommen.

Damit werden die Schwellenstromwerte in dem Bereich von wenigen Milliampere gedrückt.<sup>63,64</sup>

Eine andere Entwicklung konzentriert sich auf die Weiterentwicklung kurzwelligerer Halbleiterlaserdioden.

„Das menschliche Auge ist im grünen Spektralbereich empfindlicher als im roten, ein grüner Laser muss also, um gleich hell zu wirken, nur eine geringere Leistung erbringen. Mit der kürzeren Wellenlänge wird aber auch der Strahl präziser. Mit einem blauen Laser kann man also die Speicherkapazität von (DVD)-CD-ROMs und Hologrammen deutlich erhöhen.“<sup>65</sup>

Ziel ist, blaugrüne Halbleiterlaser zu entwickeln, die in der Industrie zum Einsatz kommen, deren Lebensdauer (Betriebsstundenzahl) dann aber gegenüber dem jetzigen Forschungsstand deutlich höher liegen müsste.

Gleichzeitig soll die Leistung dieser Halbleiterlaser verbessert werden.<sup>66</sup>

Man darf gespannt darauf warten, dass aufgrund der geringeren Größe des Lichtpunktes des blauen Lasers (nur halb so groß wie beim roten) auch Drucker auf den Markt kommen, deren Auflösung viel besser sein wird als der aktuelle Standard.

<sup>62</sup> Bildquelle: <http://www.fh-augsburg.de/informatik/vorlesungen/dvs/fachbericht/Drucker.pdf>, Seite 102

<sup>63</sup> sinngemäß in: <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>, Seite 62

<sup>64</sup> siehe auch: Jäger, Dieter, a. a. O., Seite 64

<sup>65</sup> <http://www.vitavonni.de/facharbeit/Halbleiterlaser.html>, Seite 4 von 7

<sup>66</sup> sinngemäß. ebenda

## 7 Quellenverzeichnis

### 7.1 Printquellen

1. Grimm, B., Häberle, G., u.a.: Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik, Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 6. Auflage 1997
2. Ignatowitz, Eckhard, Spielvogel, Otto, Stricker, Frank-Dieter, Tkotz, Klaus: Werkstofftechnik für Elektroberufe, Bibliothek des Technikers, Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 1995
3. Jäger, Dieter, Prof. Dr.: Technische Elektronik III, Optoelektronik, Gerhard-Mercator-Universität-GH Duisburg, Informationsskript
4. Lindner, Helmut: Physik für Ingenieure, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1969

### 7.2 Internetquellen

1. <http://pluslucis.univie.ac.at/FBA/FBA00/mayerhofer/k1.pdf>  
Moderne Anwendungen der Lasertechnik, 12.01.2003
2. <http://spot.fho-emden.de/lt/Diodenlaser/basic.htm>  
Laser Grundlagen, 13.01.2003
3. <http://spot.fho-emden.de/lt/Diodenlaser/function.htm>  
Halbleiterlaser, 13.01.2003
4. <http://spot.fho-emden.de/lt/Diodenlaser/technic.htm>  
Grundlagen der Halbleitertechnik, 13.01.2003
5. <http://www.fh-augsburg.de/informatik/vorlesungen/dvs/fachbericht/Drucker.pdf>  
3.8 Xerografische Drucker, 20.01.2003
6. <http://www.ilt.fhg.de/ger/laserprinzip.html>  
Laserprinzip, 13.01.2003
7. [http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info\\_V\\_WS99//infv1-k7.pdf](http://www.informatik.tu-cottbus.de/~fsi/skripte/Info_V_WS99//infv1-k7.pdf)  
Grundlagen der Halbleiterelektronik, 13.01.2003
8. [http://www.nanophys.ethz.ch/vorlesung/hlnano02/Skript\\_Teil\\_I.pdf](http://www.nanophys.ethz.ch/vorlesung/hlnano02/Skript_Teil_I.pdf)  
T. Ihn: Halbleiter-Nanostrukturen, 12.01.2003
9. [http://www.noesse.de/infothek\\_Laser.php](http://www.noesse.de/infothek_Laser.php)  
Bildtrommel, 13.01.2003
10. <http://www.pci.uni-heidelberg.de/pci/fpraktikum/WS0001/WS000105.pdf>  
Sirus Zorbachsh: Spurennachweis mit Diodenlasern, 12.01.2003

11. <http://www.telematik.informatik.uni-karlsruhe.de/lehre/SS00/vorlesungen/MDKS-Unterlagen/Optische-Nachrichtentechnik-Folien.pdf>  
Moderne Kommunikationssysteme, Teil II, Optische Nachrichtentechnik, 12.01.2003
12. [http://www.trumpf.com/1.img-cust/Fasz\\_Blech\\_06-Laser\\_Materialbearbeitung.pdf](http://www.trumpf.com/1.img-cust/Fasz_Blech_06-Laser_Materialbearbeitung.pdf)  
Auszug aus dem Buch: Faszination Blech, 12.01.2003
13. <http://www.uni-duesseldorf.de/www/MedFak/LaserMedizin/Laserkurs/skript/Kapitel1.pdf>  
Grundlagen der Lasertechnik, 13.01.2003
14. <http://www.uni-Konstanz.de/quantum-optics/atomoptics/homepages/ralf/laserphysik.pdf>  
Florian Lang, Ralf Stütze: Laserphysik, 12.01.2003
15. <http://www.uni-marburg.de/zv/news/archiv/mvj-00-6/600-10.html>  
Nachrichten übermitteln mit Lichtblitzen, 13.01.2003
16. <http://www.uni-muenster.de/Physik/PI/Hanne/LASER/Laser3.pdf>  
Lasersysteme, 13.01.2003
17. <http://www.vitavonni.de/facharbeit/Halbleiterlaser.html>  
Halbleiterlaser, 13.01.2003
18. [http://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip\\_Lasers.html](http://www.vitavonni.de/facharbeit/Prinzip_Lasers.html)  
Das Prinzip eines Lasers, 13.01.2003
19. [http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/PhysikalischeElektronik/Phys\\_Elektr/node100.html](http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/PhysikalischeElektronik/Phys_Elektr/node100.html)  
Einige optoelektronische Bauelemente, 13.01.2003

## 8 Bildverzeichnis

Bild 1: Absorption	4
Bild 2: spontane Emission	4
Bild 3: stimulierte Emission	4
Bild 4: Inkohärenz – Kohärenz	5
Bild 5: elementare Laserkomponenten	6
Bild 6: Vier-Niveau-Schema für einen Laserprozess	7
Bild 7: Stehende Wellen durch Reflexion am dichteren Medium	7
Bild 8: Darstellung der Intensitätsverteilung der ersten vier Transversalmoden in großer Entfernung vom Laser auf dem Schirm	8
Bild 9: Betriebsarten von Lasern	8
Bild 10: Schematische Darstellung der Güteschaltung (Q-Switch)	9
Bild 11: Bandstruktur im Festkörper	10
Bild 12: Paarbildung im Halbleiter	11
Bild 13: Direkter und indirekter Halbleiter	12
Bild 14: N-leitendes Silicium	13
Bild 15: Donatorniveau	13
Bild 16: P-leitendes Silicium	13
Bild 17: Akzeptorniveau	13
Bild 18: pn-Übergang ohne äußere Spannung	15
Bild 19: Energiebetrachtung am pn-Übergang	16
Bild 20: Schematische Darstellung einer Laserdiode	16
Bild 21: Doppelheterostruktur	17
Bild 22: Indexgeführte Halbleiterlaserdiode	17
Bild 23: Vergleich von Kanten- und Oberflächenlaser	18
Bild 24: Injektorstromkurve des Halbleiterdiodenlasers	19
Bild 25: Prinzip eines Laserdruckers	20
Bild 26: Tonerübertragung auf das Papier	21