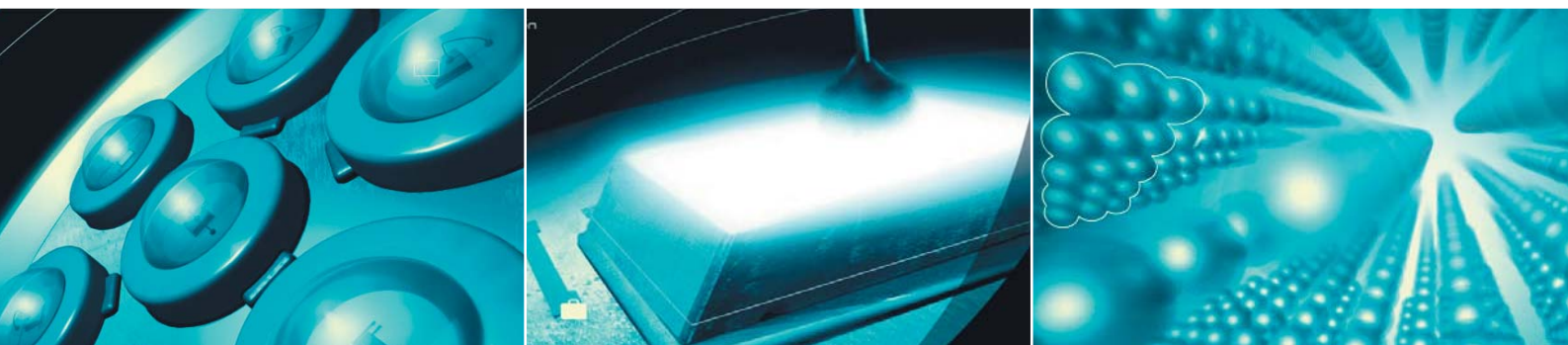




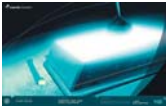
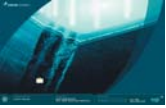
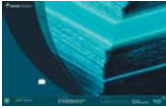




Route »Licht-Blick«

Reiseführer-Infos zu den Etappen der virtuellen Erlebnisreise
in den Mikro- und Nanokosmos www.nanoreisen.de



Inhalt der Route Licht-Blick

Hinweis zur Benutzung: Über das Inhaltsverzeichnis können Sie zu den einzelnen Kapiteln springen und durch Klicken auf das Nanoreisen-Logo gelangen Sie zurück zur Übersicht.

Vorschau		Reisegröße	Etappe	Seite
	10^{-1} m	10 cm Zentimeter	Grillfest unterm Sternenhimmel	3
	10^{-2} m	1 cm Zentimeter	Lichtzeichen aus der Dioden-Oase	6
	10^{-3} m	1 mm Millimeter	Kontakt auf dem Licht-Plateau	9
	10^{-4} m	0,1 mm Millimeter	Photonentanz auf dem Kristallmassiv	11
	10^{-5} m	10 μ m Mikrometer	Steilwandklettern im Spannungsfeld	16
	10^{-6} m	1 μ m Mikrometer	Polarlicht auf dem Kristallgletscher	20
	10^{-7} m	0,1 μ m Mikrometer	Hürdenlauf im Quantentopf	22
	10^{-8} m	10 nm Nanometer	Photonengewitter in der Neutralen Zone	24
	10^{-9} m	1 nm Nanometer	Tauchfahrt zur Wiege des Lichts	26

weiter geht es in der Route Ego-Trip (von Angström bis Femtometer)

Impressum | Bildnachweis

29

Route: **Licht-Blick**

Etappe: **Grillfest unterm Sternenhimmel**



Größenvergleich:

1m : 10 cm
 Ø Erde : Länge Deutschlands

Autolack – schöner Schein und Schutz



Kratzfeste Lacke durch Nanopartikel

Moderne Autolacke bestehen aus vielen verschiedenen Schichten mit **unterschiedlichen Funktionen**, die z. B. das Blech schützen. Trotzdem ist der Lack in einem Autoleben enormen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt.

Zukünftige Lacke werden erstaunliche Funktionen in sich vereinen: Sie **schützen vor mechanischer Zerstörung (Kratzer)**, lassen Dreck leicht entfernen, gestatten eine **veränderbare Farbgebung** und produzieren **Strom** (Solarzelle).

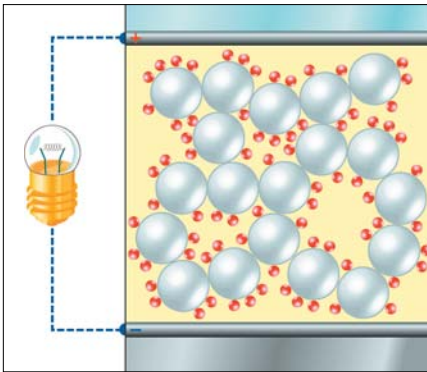


Türen einer Mercedes C-Klasse mit SiO_2 -Nanopartikeln nach 88 Autowäschen. Links mit Nanopartikeln, rechts ohne

Als Schutz vor Kratzern kann in einem letzten Schritt ein Klarlack mit **Nanopartikeln** aufgetragen werden. Dabei verleihen winzige Siliziumdioxidteilchen (SiO_2), die in eine stark vernetzte Matrix (Polymer) eingebettet sind, der Schicht eine deutlich höhere Kratzfestigkeit.

Neben einer kratzfesten Beschichtung sind weitere Funktionen möglich: Spezielle, stark hydrophobe Polymere verleihen der Oberfläche eine stärkere Schmutzresistenz. Eine solche **Easy-to-clean** Oberfläche gestattet dem Schmutz keine feste Bindung einzugehen. Damit lässt er sich leicht entfernen ohne hartnäckige Spuren zu hinterlassen.

Heute Buntmacher – morgen Stromlieferant?



Schematischer Aufbau einer »Grätzelzelle«: weiße TiO_2 -Partikel und rote Farbstoffmoleküle sind in einem Elektrolyten eingebettet.

Eine Vision der Automobilindustrie: **Lacke, die nebenbei Strom produzieren.**

Eine herkömmliche Solarzelle basiert auf dem Halbleiter Silizium und kann aufgrund ihrer großen Dicke in nur relativ kleinen Flächen beim Auto integriert werden, wie z. B. im Dach.

Eine neuartige Solarzelle wurde von Prof. Grätzel an der EPFL Lausanne entwickelt (ca. 1991). Sie ist eine **Farbstoffsolarzelle** und beruht auf einem elektrochemischen Prinzip.

Die roten Farbstoffmoleküle sind von **Titandioxidpartikeln** umgeben (weiß im Bild), die wiederum in einen Elektrolyten eingebettet sind. Diese lichtempfindliche Schicht befindet sich zwischen zwei Elektroden. Licht, welches auf die Titandioxidpartikel trifft, erzeugt Elektron-Loch Paare. Die Löcher wandern an die Oberfläche der Partikel. Dort können sie sich mit einem Elektron des Farbstoffes verbinden, ihn also oxidieren. Die dem Farbstoff fehlenden Elektronen müssen nun vom Elektrolyten »bezahlt« werden. Dieser besteht häufig aus einer Mischung von Kaliumiodid und Iod. Dabei wird Iodid zu Triiodid reduziert, die Elektronen fließen zur Elektrode. Die Gegenelektrode liefert wiederum Elektronen, um das Triiodid zu oxidieren, also für Nachschub zu sorgen. Damit ist der Stromkreis geschlossen. Eine heutige Grätzelzelle besteht aus zwei transparenten und leitfähigen Platten zwischen denen das Titandioxid, der Farbstoff und der Elektrolyt schichtweise gebracht wird.

Brennstoffzellen – Energielieferant der Zukunft?

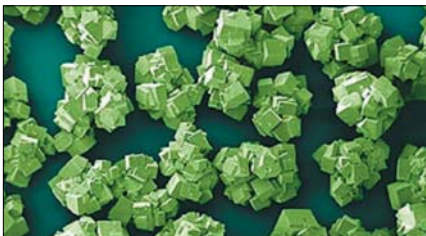
Brennstoffzellen ähneln **Batterien**: Sie liefern Strom. Während aber die chemische Energie einer Batterie irgendwann aufgebraucht ist, wird bei der Brennstoffzelle ständig energiereiche Substanz nachgeliefert. Die Substanz kann reiner Wasserstoff sein, oder ein Gas bzw. eine Flüssigkeit, die Wasserstoff enthält, wie Erdgas oder Rapsöl. In den letzten beiden Fällen muss dann der Wasserstoff in einem »Reformer« abgetrennt werden, bevor er in der Brennstoffzelle zusammen mit Sauerstoff zu Wasser umgesetzt wird, wobei elektrische Energie frei wird.

Wenn sich Wasserstoff und Sauerstoff verbinden, wandern Elektronen vom Wasserstoff zum Sauerstoff. In der Brennstoffzelle werden diese Elektronen in einen äußeren Stromkreis gezwungen, der nun einen Motor und Ähnliches antreiben kann. Damit ist das **Arbeitsprinzip** einer Brennstoffzelle eine **umgedrehte Elektrolyse**.

Leitet man Strom durch Wasser, so bilden sich an den in das Wasser getauchten Elektroden Gase, Wasserstoff und Sauerstoff. Dreht man den Vorgang um, so kann man durch verbinden von Wasserstoff und Sauerstoff Strom erzeugen. Einziges Problem ist die Tatsache, dass Wasserstoff und Sauerstoff jeweils paarweise auftreten (H_2 und O_2) und Wasser nun mal aus zwei H und einem O besteht.

Hier hilft die chemische **Katalyse**. Sie gestattet Prozesse leichter ablaufen zu lassen, da die Aktivierungsschwelle herabgesetzt wird.

Die Nanotechnologie kann zu dieser Technik keramische Folien, nanostrukturierte Oberflächen und katalytisch wirksame Nanopartikel beisteuern, die den ohnehin guten Wirkungsgrad der Brennstoffzellen weiter steigern können.



Nanoporöse Wasserstoffspeicher aus metallorganischen Verbindungen

Auch im Hinblick auf eine effiziente Wasserstoffspeicherung bietet die Nanotechnologie Lösungsansätze. Hier werden hochporöse **Nanomaterialien** in Betracht gezogen wie z. B. nanokristalline Leichtmetallverbindungen oder auch metallorganische Verbindungen, die im Verhältnis zu ihrem Eigengewicht einen hohen Anteil gasförmigen Wasserstoff in ihren feinen Poren speichern und bei Bedarf wieder abgeben können. Die Speicherung des Wasserstoffs stellt noch ein großes Problem dar. Er kann gasförmig unter hohem Druck oder flüssig (Siedepunkt $20\text{ K} = -253^\circ\text{C}$) als reiner Wasserstoff gespeichert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Speicherung in gebundener Form, z. B. an Metalle.

Route: **Licht-Blick**

Etappe: **Lichtzeichen aus der Dioden-Oase**



Größenvergleich: 1m : 1 cm
 Ø Erde : Länge Korsikas

Quelle des Lichts

Die **Sonne** stellt eine **natürliche Weißlichtquelle** dar, die der Mensch seit je her zu kopieren suchte, um unabhängig vom Tageszyklus zu sein. Feuer stellte die primitivste Form der Lichterzeugung dar, mit einem eher unbefriedigend roten Spektrum. Licht kann auf verschiedene Art und Weise erzeugt werden.

Allgemein gilt: Wenn Atome von einem angeregten Zustand in einen niedrigeren Zustand übergehen, wird Energie frei. Dieser Energiebetrag wird meist in Form von Licht abgestrahlt. Die Anregung der Atome geschieht im einfachsten Fall thermisch, also durch Erhitzen. Dieses Prinzip macht sich die Glühlampe, 1880 von **Thomas Edison** patentiert, zu nutze.

Die **Glühlampe** hat einen sehr **schlechten Wirkungsgrad von max. 5–8 %**. Der Wirkungsgrad ist der Anteil der als Licht nutzbar ist im Verhältnis zur eingesteckten Energie. Häufig wird der Wirkungsgrad in **Lumen pro Watt lm/W** angegeben, was der pro Watt erzeugten Lichtmenge entspricht (Lumen lat. Licht). Eine Glühlampe erreicht dabei nur 6–12 lm/W.

Ein anderes Prinzip kann man in **Gasentladungslampen** finden (**Leuchtstoffröhren**). Sie beruhen auf der anfänglichen Ionisierung von Atomen durch Stöße, die weitere Elektronen produzieren bis eine Lawine entstanden ist, die zur Lichterzeugung genutzt wird (**Elektrolumineszenz**). Zwischen zwei Elektroden wird eine hohe Spannung angelegt, die zum Beschleunigen der Elektronen genutzt wird.

Herkömmliche Leuchtstoffröhren enthalten geringe Mengen Quecksilber, welches im Wesentlichen ultraviolettes Licht mit einer Wellenlänge von 254 nm emittiert. Die Quecksilberatome werden von den schnellen Elektronen angeregt und senden UV-Licht aus. An der Innenseite des Glaskörpers befindet sich eine Konversionsschicht (Leuchtstoff), die das energiereiche UV-Licht in sichtbares Licht umwandelt. Entladungslampen haben einen sehr hohen Wirkungsgrad von ca. 60–120 lm/W und können eine Lebensdauer von bis zu 60.000 Stunden erreichen. Lediglich ihr »kalt« empfundenes Spektrum hat einen breiten Einsatz im privaten Bereich bisher verhindert. Eine Optimierung des Leuchtstoffes (»warmes« Licht mit höherem Rotanteil), sowie die sehr kompakte Bauform von **Energiesparlampen**, haben diese Lichtquelle in den vergangenen Jahren beliebter gemacht.

Aus Strom mach Licht



LEDs in allen Farben. Die weiße ist allerdings eine »verkappte« blaue.

Eine weitere Lichtquelle stellen LEDs oder **Leuchtdioden** dar. LED bedeutet »Light emitting diodes«, also lichtemittierende Dioden. Sie stellt ebenfalls eine sog. Elektrolumineszenzlichtquelle dar, d. h. die direkte Wandlung von elektrischem Strom in Licht. Man kann sich eine LED wie eine umgedrehte Solarzelle vorstellen.

Eine LED besteht aus einer **Schichtstruktur**, wobei im Wesentlichen zwei Halbleiter mit komplementären elektrischen Eigenschaften aneinander grenzen. Die Grenzschicht wird pn-Übergang genannt und stellt eine Diode dar. Dioden leiten den Strom nur in eine Richtung und können als **Einbahnstraße für Elektronen** verstanden werden. Elektronen die sich über die Grenzschicht einer LED bewegen, verlieren einen definierten Energiebetrag, der als Licht ausgesendet wird. Die Effizienz in der Wandlung bei einer LED ist außerordentlich hoch und liegt **bei nahezu 100%**. Allerdings existieren andere Verlustmechanismen, die durch die

im Halbleitermaterial vergrabene Grenzschicht verursacht werden, wie Absorption und Reflexion. Daher liegt der Lumenwert derzeit nur bei ca. 20–30 lm/W. Allerdings steckt ein enormes Potential in Halbleiterbauelementen.



Konzeptstudie von Audi »Le Mans«

Man nimmt an, LEDs mit 150 lm/W in wenigen Jahren bauen zu können. Dann können LEDs auch als Frontscheinwerfer in Autos eingesetzt werden wie in der Konzeptstudie des Audi »Le Mans«. Die Lebensdauer von roten LEDs liegt bei **ca. 100.000 Std**, die von den relativ neuen blauen LEDs ist geringer, wobei 20.000 Std. nicht unterschritten werden.

LED werden in der Zukunft die herkömmlichen Scheinwerfer revolutionieren. Bereits heute sind **LED-Tagfahrlichter** und **LED-Rückfahrlichter** realisiert. Die Frontscheinwerfer benötigen allerdings eine sehr viel höhere Leistung. Dort glaubt man langfristig viele LEDs einsetzen zu können.

Ein Problem von LEDs liegt in der schlechten Wärmeabfuhr aufgrund ihrer geringen Fläche. Größere Leistungen sind mit höheren Verlusten verbunden und führen zu einer stärkeren Aufheizung. Dadurch sinkt aber die Lebensdauer rapide, bedingt durch eine Durchmischung der Grenzschicht (Diffusion). Aus diesem Grund haben LEDs eine relativ geringe Leistung von meist nur ca. 1W.

Mit dem Grundprinzip der LEDs lassen sich auch Halbleiterlaser konstruieren, die heute in allen **CD- und DVD-Playern** Verwendung finden.

weitere Infos:

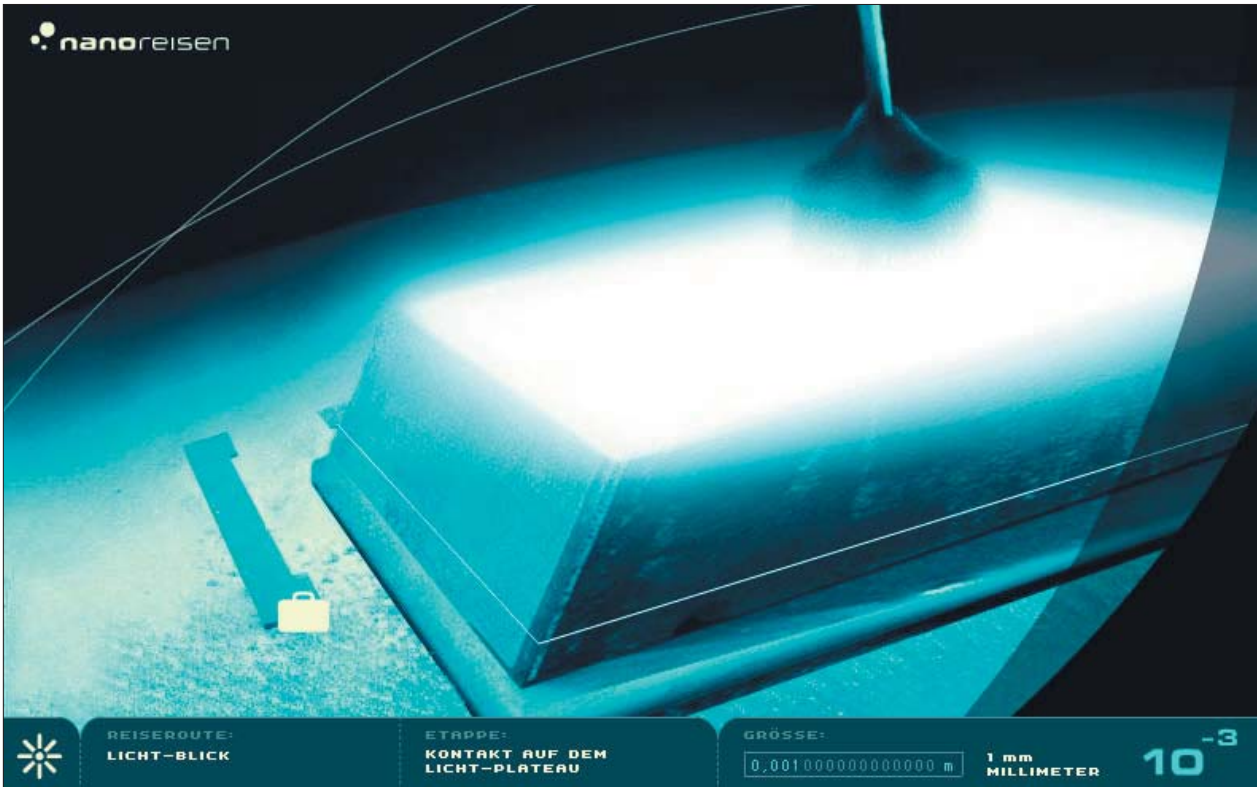
>> www.led-info.de

>> www.lightemittingdiodes.org

>> www.wundersamessammelsurium.de

Route: **Licht-Blick**

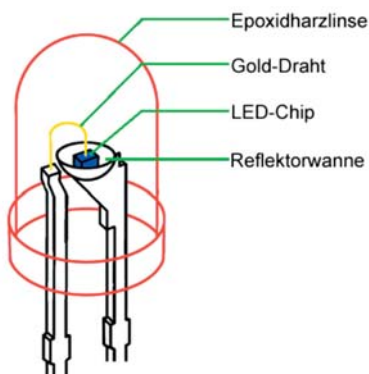
Etappe: **Kontakt auf dem Licht-Plateau**



Größenvergleich:

1m : 1 mm
 Ø Erde : Höhe Mount Everest

Halb leitend – voll leuchtend



Schematischer Aufbau der LED

Leuchtdioden sind in eine transparente Umhüllung gegossen. Sie hat schützende, aber auch abbildende Funktionen. In ihrem Inneren befindet sich die hochempfindliche **Halbleiterstruktur**. Die Oxidation durch den Luftsauerstoff wird durch die Schutzhaube »verzögert«.

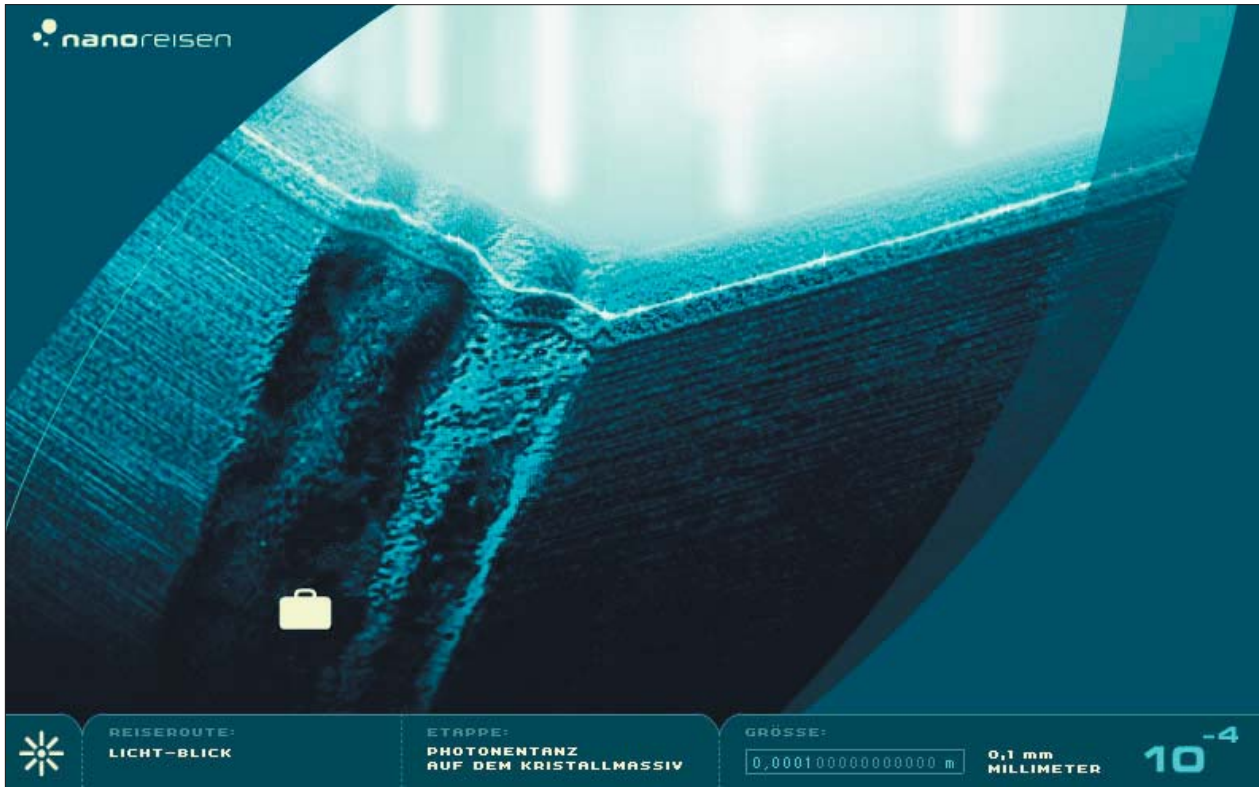
Die transparente Umhüllung dient auch der Abbildung des austretenden Lichtes und wirkt wie eine optische Linse. In einem **Reflektor** liegt der eigentliche Chip, aus verschiedenen Halbleiterschichten. Er enthält die lichtemittierende, aktive Schicht. Licht, welches seitlich austritt, wird durch den Reflektor nach vorne gebündelt.

Der Golddraht

Der Halbleiterchip stellt ein »Sandwich« aus Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften dar, die von beiden Seiten kontaktiert werden müssen. Die untere Seite verfügt über eine metallische, lichtundurchlässige Kontaktfläche (Elektrode). Die Oberseite hingegen muss kontaktiert und auch als **Lichtaustrittsfläche** dienen. Der notwendige elektrische Kontakt wird daher durch einen dünnen Draht hergestellt, um die Abschattung gering zu halten. Dieser Draht wird aus Gold gefertigt. Gold ist zwar nur der drittbeste elektrische Leiter (hinter Silber und Kupfer), hat dafür andere große Vorteile: es ist chemisch inert, diffundiert wenig in den Halbleiter und lässt sich sehr gut »benden«, also mit dem Halbleiter verbinden.

Route: **Licht-Blick**

Etappe: **Photonentanz auf dem Kristallmassiv**



Größenvergleich: 1m : 0,1 mm
 Ø Erde : Länge Rheinbrücke

Eine Fläche, die Licht abstrahlt



*LED-Chip von der Seite betrachtet.
 Der Golddraht kontaktiert die licht-
 emittierende Fläche.*

Durch den Golddraht wird der Stromkreis geschlossen. Wird nun zwischen den Elektroden eine Spannung angelegt, so strahlt die gesamte Fläche des **Halbleiterplättchens** (englisch »die«, gesprochen »dai«) Licht ab.

Dieses Licht entsteht allerdings nicht direkt an der Oberfläche, sondern in einem vergrabenen Übergang, dem **pn-Übergang**. Aus diesem Grund müssen die obersten Schichten einer LED hinreichend transparent, d. h. dünn sein. Ein solcher Aufbau wird daher auch als **Flächenemitter** bezeichnet. Im Falle einer sehr ähnlich aufgebauten Laserdiode tritt das Licht zumeist aus einer Kante in der Seite aus. Diese werden als **Kantenemitter** bezeichnet.

Licht aus der Tiefe

Das Licht einer LED entsteht in einer **vergrabenen Schicht**. Dies hat den folgenden Grund: eine LED ist eine **Halbleiterdiode**, die aus einem **Schichtstapel** mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften bestehen. Die elektrischen Eigenschaften eines Halbleiters werden durch das sog. **Dotieren** verändert, wobei man grundsätzlich zwischen einer positiven und negativen Dotierung (**p und n genannt**) unterscheidet. Das Licht entsteht nun in einem Bereich zwischen einer solchen p- und n-Schicht. Dies bedeutet, dass zumindest eine der beiden Schichten oberhalb der lichtemittierenden Schicht liegen muss. In unserem Fall ist es die n-Schicht. Doch es gibt noch weitere Schichten, durch die sich das Licht kämpfen muss. Einerseits muss ein Kontakt, eine Elektrode angebracht werden, die den Strom in den Schichtstapel leitet, andererseits muss eine möglichst »flächige« Strominjektion erfolgen, um eine homogen leuchtende Fläche zu erzeugen. Hierfür kann eine weitere Schicht angebracht werden, die den Strom besser verteilt (**»current diffusion layer«**). Neben diesen notwendigen Schichten, die oberhalb der Lichterzeugung liegen, gibt es einen weiteren sehr praktischen Grund, warum die Lichtentstehung in der Tiefe günstiger ist: moderne Hochleistungsleuchtdioden produzieren auch sehr viel Wärme, die abgeführt werden muss, um eine Zerstörung der Diode zu vermeiden. Hierfür ist ein guter Wärmekontakt nötig, der durch den Sockel, auch **Carrier** genannt, gegeben ist. Die leuchtende Schicht wird somit nahe an diese **»Wärmesenke«** oder dem Kühlkörper platziert. Moderne Konzepte für weiße LEDs basieren auf der Verwendung sehr dünner Schichten, die eine gute Wärmeabfuhr ermöglichen und auch möglichst viel Licht »auskoppeln«. Denn Licht, das abgestrahlt wird, kann eben keine Wärme im Schichtstapel produzieren. Trotzdem ist die Lichtentstehung in einer LED verglichen mit der in einer Glühlampe kalt, aber der Schichtstapel ist eben auch sehr empfindlich.



Interaktives Tool in der Etappe: Kaltes und heißes Licht im Vergleich

Bei einer LED bestimmt die Zusammensetzung des Halbleitermaterials die Lichtfarbe. Bei einer Glühlampe dagegen entsteht rotes bis gelbweißes Licht durch Erhitzen einer dünnen Wolfram-Wendel.

Welche Farbe hätten Sie gerne?

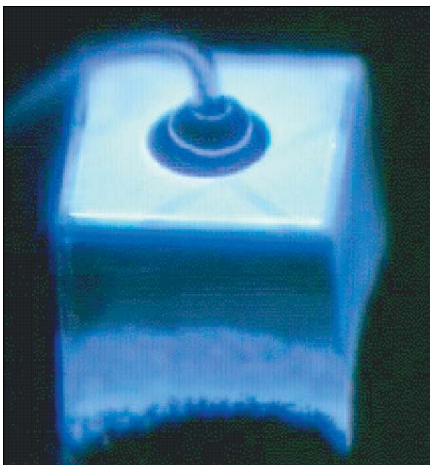
Licht, welches den Chip verlässt, hat immer eine ganz bestimmte Farbe. Diese wird durch die Beschaffenheit des Halbleiter sandwiches, welche auch **Heterostruktur** genannt wird, festgelegt. Die Elektronen müssen auf ihrem Weg durch die Schichtstruktur einen »Sprung« im elektrischen Potential durchlaufen. Dieser **»Sprung«** oder **»Graben«** verursacht einen definierten **Energieverlust**, der **in Form von Licht abgestrahlt** wird. Die Energie des Lichtes ist damit immer nahezu gleich. Licht mit einer bestimmten Energie (bzw. Frequenz oder Wellenlänge) hat eine bestimmte Farbe. Man kann also durch die physikalische Beschaffenheit des »Sprungs« die Farbe der LED einstellen.



Eine weiß leuchtende LED ist eigentlich eine blaue. Blaues, energiereiches Licht, kann unter teilweiser Energieabgabe in weißes Licht verwandelt werden. Dieses Prinzip macht sich z. B. die Leuchtstoffröhre oder das PlasmaTV zu nutze, nur dass dort noch energiereicheres UV-Licht verwendet wird. Bei einer blauen LED wird durch eine **Konversionsschicht** (phosphoreszierende Schicht) das blaue Licht unter Abgabe von Energie (Wärme) teilweise in andere Farben umgewandelt. Dadurch kann weißes Licht mit geringerer Effizienz wegen des Wärmeverlustes produziert werden. Mittlerweile gibt es auch LEDs für den ultravioletten und den infraroten Bereich (UV+IR), die sich direkt an den sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums anschliessen.

Hierin liegt auch ein großer Unterschied zu den **thermischen Lichtquellen**, wie z. B. die Glühlampe. Eine LED sendet immer nur bestimmte Frequenzen bzw. Banden von Frequenzen ab, das Spektrum einer Glühlampe hingegen ist kontinuierlich. Daher werden solche Lichtemitter auch Kontinuumstrahler genannt.

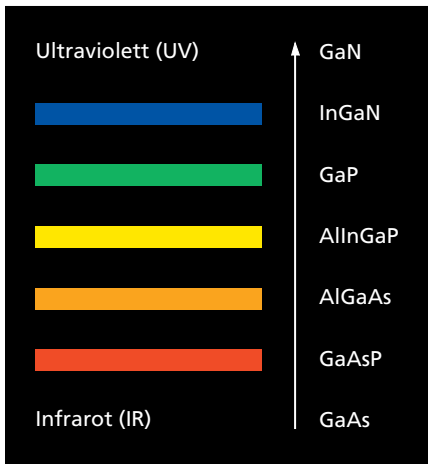
Kaltes Licht



Die Lichterzeugung einer LED unterscheidet sich fundamental von der einer Glühlampe. Eine LED wandelt elektrischen **Strom direkt in Licht** (Elektrolumineszenz) und verliert dabei kaum Energie. Aus diesem Grund wird sie auch nicht so warm. Bei ihr geben energiereiche Elektronen eine definierte Portion ihrer Energie ab und zwar in Form von Licht. Dieses Licht hat dann auch eine ganz bestimmte Wellenlänge bzw. Farbe. Möchte man die Farbe einer LED ändern, so muss man ein anderes Material verwenden. Dies ist auch der Grund, warum es so lange keine blauen LEDs gegeben hat. Man hatte einfach kein passendes Material, bei dem die Elektronen eine dem blauen Licht entsprechende Energieportion verlieren.

Die Herstellung von weißem Licht ist mit einer LED schwierig. Entweder mischt man das Licht einer grünen, roten und einer blauen, oder man muss einen Leuchtstoff verwenden. Der Leuchtstoff verwandelt blaues oder ultraviolettes Licht in ein kontinuierliches Spektrum, also in weißes Licht. Dieses ist die heute gängige Methode: ein gelber Leuchtstoff wandelt das Licht einer blauen LED in weißes durch **additive Farbmischung**. Als Halbleiter werden sog. Verbindungshalbleiter verwendet, die aus zwei oder mehr Elementen bestehen. Die Verbindungen Galliumarsenid, Galliumphosphid und insbesondere Galliumnitrid sind dabei wichtig. Man kann aber mit einem Material verschieden farbige LEDs bauen, wenn man die Zusammensetzung verändert. Hier sind einige Beispiele aufgeführt. »InGaN« ist sowohl für blaue als auch für grüne geeignet und mit AlInGaP können rote orange und sogar gelbe LEDs konstruiert werden.

Materialien und Farbe einiger LEDs:



GaN:	Galliumnitrid
InGaN:	Indium/Galliumnitrid
GaP:	Galliumphosphid
AlInGaP:	Alluminium/Indium/Galliumphosphid
AlGaAs:	Alluminium-Galliumarsenid
GaAsP:	GalliumarsenidPhosphid
GaAs:	Galliumarsenid

Heisses Licht



Eine herkömmliche Glühlampe beruht auf der Lichtemission einer ca. 2800 Grad heißen Wolframwendel. Beim Ein- und Ausschalten sieht man ein rotes Glühen bei niedrigen Temperaturen.

Eine Glühlampe kann nur ein **kontinuierliches Spektrum** abstrahlen, welches je nach Temperatur mehr rot- oder blauverschoben sein kann. Die Lichtentstehung beruht auf der thermischen Anregung der Atome in der Glühwendel. Jeder Körper strahlt eine seiner Temperatur entsprechende, charakteristische Strahlung ab. Bei Raumtemperatur können wir diese Strahlung allerdings nicht mit unseren Augen sehen, da sie noch im Infraroten liegt.

Dies ändert sich schnell, wenn wir die Temperatur erhöhen. Je heißer der Körper ist, desto stärker verschiebt sich die Strahlung in den sichtbaren Bereich (**Plancksches Gesetz**). Je blauer das Spektrum wird, desto heißer muss die Quelle sein. Die heißesten Sterne am Himmel sind die blauweißen.

Allgemein gilt: Bei niedriger Temperatur ist nur ein rotes Glühen zu sehen (600–800° C), erst bei einigen tausend Grad Celsius ist eine »weißliche« Strahlung zu beobachten. Durch dieses Gesetz wissen wir, dass die Sonne eine Oberflächentemperatur von ca. 6000° C hat, obwohl nie jemand vor Ort war und das nachgemessen hat.

Eine Glühlampe besitzt eine Wolframwendel, die bei ca. 2400–2800° C betrieben wird. Damit liegt der größte Teil des Spektrums noch im Infraroten. Dennoch erscheint die Strahlung **gelblich-weiß**. Die meiste Energie, über 90 %, geht als Infrarotstrahlung, also als Wärme verloren. Dies bekommt man schmerzhaft zu spüren, wenn man eine leuchtende Glühlampe berührt.

Eigentlich wäre es schön, wenn wir eine Glühlampe bei 5500° C betreiben könnten. Dann hätten wir eine bessere

Imitation des Sonnenlichtes. Dies geht natürlich nicht, da Wolfram bereits bei 3.420° C schmilzt. Auch ein blauer, thermischer Strahler ist schwierig zu realisieren. Hierfür müsste man die Temperatur auf **10.000° C** erhöhen.

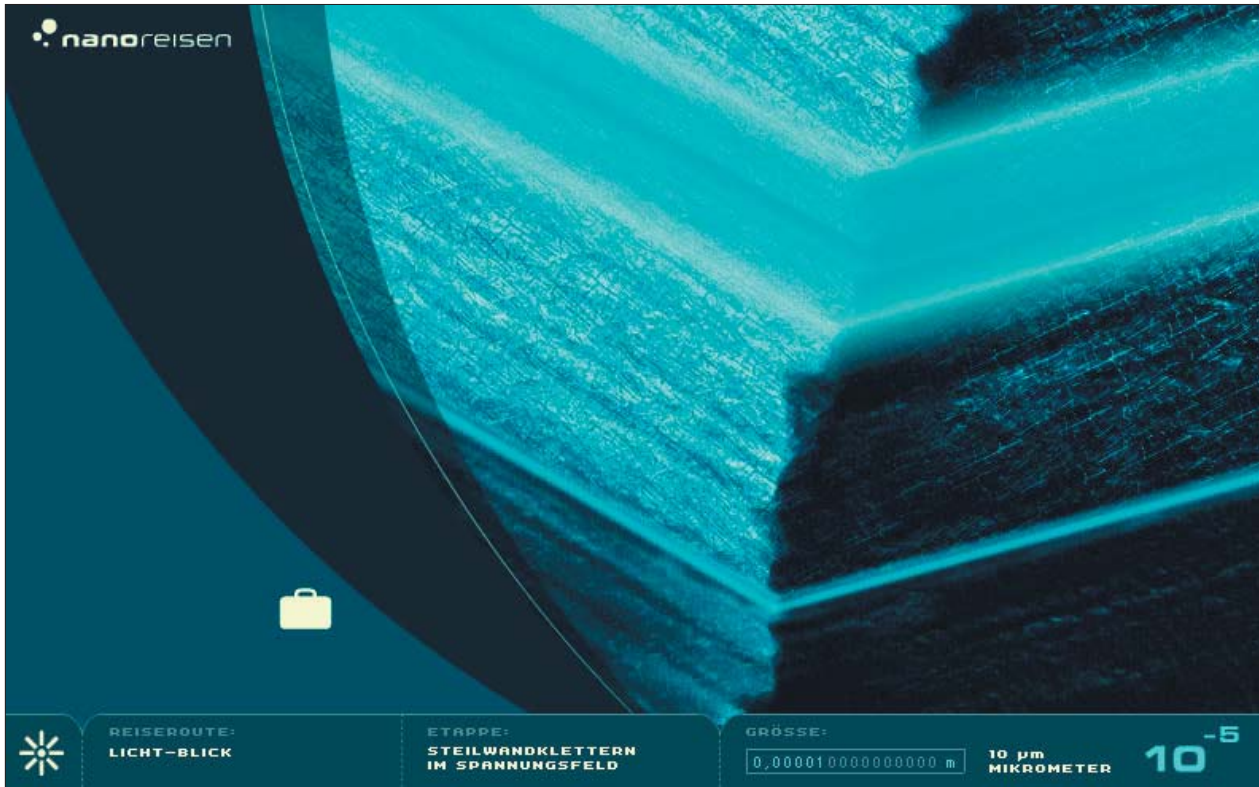
Dies geht aber problemlos mit der kalten »Elektrolumineszenz«: Es gibt blaue LEDs und auch das **blau-weiße** Licht der Leuchtstoffröhren basiert auf dem Prinzip. Die in modernen Autos üblichen »bläulichen« **Xenonlampen** sind ebenfalls »**Gasentladungslampen**«.

Die häufig anzutreffende Lebensdauer herkömmlicher Glühlampen von ca. 1.000 Std. ist natürlich auch kein Zufall, sondern ein Kompromiss der Hersteller, die die Temperatur, das Füllgas, die Wendel und den Preis optimieren. Die Lebensdauer wird durch eine höhere Temperatur drastisch reduziert, aber der Wirkungsgrad erhöht. Das Wolfram der Wendel »verdampft« (genauer sublimiert) permanent und schlägt sich an der Innenseite des Glaskolbens nieder. Dadurch wird die Glühlampe zunehmend undurchsichtiger. Diese **Schwärzung der Innenfläche** kann man bei älteren Lampen sehen. Nach einer bestimmten Zeit wird dadurch die »Performance« zu schlecht und ein Austausch sinnvoll.

Halogenlampen können diesen Effekt durch den Zusatz von Halogeniden teilweise kompensieren, indem sie Wolfram zur Wendel zurücktransportieren. Sie gestatten eine höhere Betriebstemperatur (und damit »weißeres« Licht) und haben eine doppelt so hohe Lebensdauer (2.000 Std.).

Route: **Licht-Blick**

Etappe: **Steilwandklettern im Spannungsfeld**

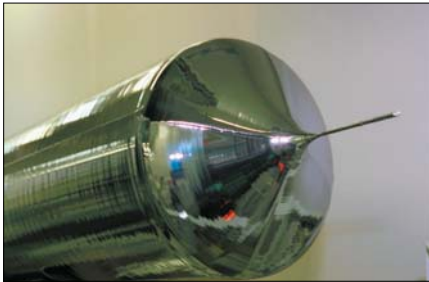


Größenvergleich: 1m : 10 µm
 Ø Erde : Fußballfeld

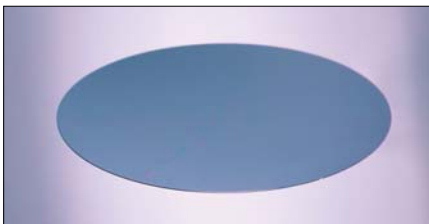
Ein halber Leiter erobert die ganze Welt

Ein **Halbleiter** (HL) unterscheidet sich in seinen elektrischen Eigenschaften von einem Metall (guter Leiter) und einem Isolator (schlechter Leiter). Der HL liegt zwischen diesen beiden Extremen, er **leitet den elektrischen Strom, aber eben relativ schlecht**.

Im 19. Jahrhundert entdeckte **Michael Faraday** die ungewöhnlichen elektrischen Eigenschaften des HL, der im Gegensatz zu allen Metallen seinen Widerstand mit zunehmender Temperatur verringert. Nur wenige Elemente sind elementare HL, die beiden wichtigsten sind **Silizium (Si)** und **Germanium (Ge)**. Noch wichtiger ist, dass man die Leitfähigkeit der HL variieren kann. Diesen am Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckten Vorgang nennt man **Dotierung**.



Silizium, das Gold der Informationsgesellschaft. Oben: ein Einkristall aus Silizium, unten: die daraus geschnittenen und polierten »Wafer«. Die Wafer bilden die Grundlage für die Halbleiterindustrie.



Man unterscheidet zwischen **n- und p-Dotierungen**, die dem HL entweder mehr oder weniger Elektronen zur Verfügung stellen. Der HL-Kristall wird dabei mit Atomen die, entweder **ein Valenzelektron mehr haben (n-Dotierung)** oder mit Atomen, die **ein Valenzelektron weniger haben (p-Dotierung)** gezielt verunreinigt.

Ein Beispiel: das Element Bor (3 Valenzelektronen) ergibt in Silizium (4 Valenzelektronen) eine p-Dotierung, Phosphor (5 Valenzelektronen) eine n-Dotierung. p und n stehen dabei für positiv und negativ. Bei einer p-Dotierung existieren um die Dotierungsatome zu wenige Elektronen, daher spricht man von einem **Loch mit positiver Ladung**. Entsprechend hat man für die n-Dotierungsatome ein Elektron mehr als im umliegenden Kristall.

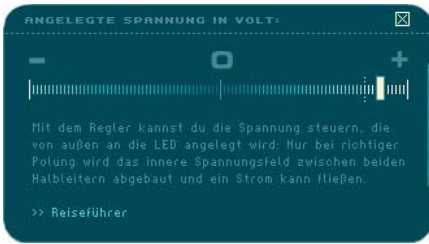
Löcher verhalten sich wie positive Elektronen und können durch den Kristall wandern, indem sie sukzessive von einem Nachbar-elektron gestopft werden. Aus diesem Grund spricht man auch von »**Löcherleitung**« bei p-dotierten HL. Einziger Unterschied der p- und n-Dotierung liegt in der Richtung, in der sich die Ladungsträger bewegen: die Löcher entgegengesetzt den Elektronen.

Die Heterostruktur

p- und n-dotierte Halbleiter sind für sich alleine genommen recht langweilig. Sehr viel spannender ist ein Sandwich aus positiv und negativ dotiertem Material. Ein solches Sandwich stellt eine **Diode** dar. Fügt man eine weitere Schicht hinzu, erhält man einen **Transistor**. Diese zwei Bauelemente haben die gesamte moderne Halbleitertechnologie begründet. Ohne sie würde die moderne Computertechnologie nicht existieren.

Silizium ist für die Konstruktion von Leuchtdioden allerdings ungeeignet. Viel besser sind heute so genannte **Verbindungshalbleiter**, die aus verschiedenen Elementen bestehen, wie **Gallium und Arsen (GaAs)**. Die verschiedenen Schichten können dabei z. B. im Vakuum erzeugt werden, wobei die gewünschten Atome Lage für Lage aus der Gasphase abgeschieden werden (CVD: Chemical Vapor Deposition).

Dieses geordnete Wachstum eines Kristalls nennt man Epitaxie. Die so erhaltene Schichtstruktur wird **Heterostruktur** genannt, da verschiedene Materialien in einem Kristall untergebracht sind und die Struktur ohne Gitterfehler ineinander übergeht. Gitterfehler stellen ein großes Problem dar, weil an Ihnen viel Energie verloren geht und Wärme produziert wird. Wärme wiederum führt zu einer größeren Beweglichkeit der Atome (Diffusion), die letztendlich die Funktionalität der Struktur zerstören würde.



Interaktives Tool in der Etappe:

Die Polung macht's!

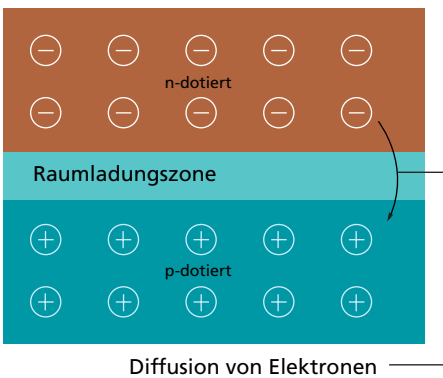
Mit dem Regler kann man die Spannung steuern, die von außen an die LED angelegt wird: Nur bei richtiger Polung wird das innere Spannungsfeld zwischen beiden Halbleitern abgebaut und ein Strom kann fließen.

Für die Lichterzeugung sind im Prinzip nur zwei aneinander grenzende Schichten notwendig, die an ihrer Verbindungsfläche eine »Übergangszone« ausbilden. Dort können Elektronen mit Löchern strahlend rekombinieren. Dieser Bereich wird als p-n-Übergang bezeichnet.

Weitere Schichten optimieren die **Effizienz (Quantenausbeute) bzw. die Lichtauskopplung** und werden auch als Vermittler der Kristallstruktur verwendet, um unterschiedliche Gitter zueinander kompatibel zu machen. Aus diesem Grund besteht die aktive, also leuchtende Schicht, meist aus einem separat aufgewachsenen Material, welches von den n- und p-dotierten Materialien, die die Elektronen und Löcher bereitstellen, umrahmt wird. Diese Zwischenschicht ist undotiert und wird mit »i« für **intrinsisch** bezeichnet. Intrinsisch bedeutet soviel wie »eigentlich«, meint also die elektrische Leitfähigkeit des Halbleiters ohne Dotierung. Damit ist der Übergang als **pin-Übergang** zu bezeichnen. Zur abgewandten Seite kann auch ein Spiegel aus Silber aufgebracht werden, um das in die »falsche Richtung« ausgesendete Licht zurückzuholen.

Einbahnstraße für Elektronen

Grenzen p- und n-dotierte Bereiche in einem HL-Kristall aneinander, so haben die überschüssigen Elektronen des n-Bereiches die Tendenz, in den angrenzenden p-Bereich zu diffundieren. Dadurch baut sich ein **elektrisches Feld** über der Grenzschicht auf, welches die Diffusion zunehmend hemmt, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Es entsteht somit eine Zone, die sich ein Stück weit zu jeder Seite in den p- und n-dotierten Kristall ausbreitet. In dieser Zone rekombinieren Löcher mit Elektronen, so dass der Bereich an Ladungsträgern verarmt (**»Raumladungszone«**).



Der p-n-Übergang schematisch. Ein p-dotierter Halbleiterkristall grenzt an einen n-dotierten. Dazwischen entsteht eine »Raumladungszone« mit einem inneren elektrischen Potential

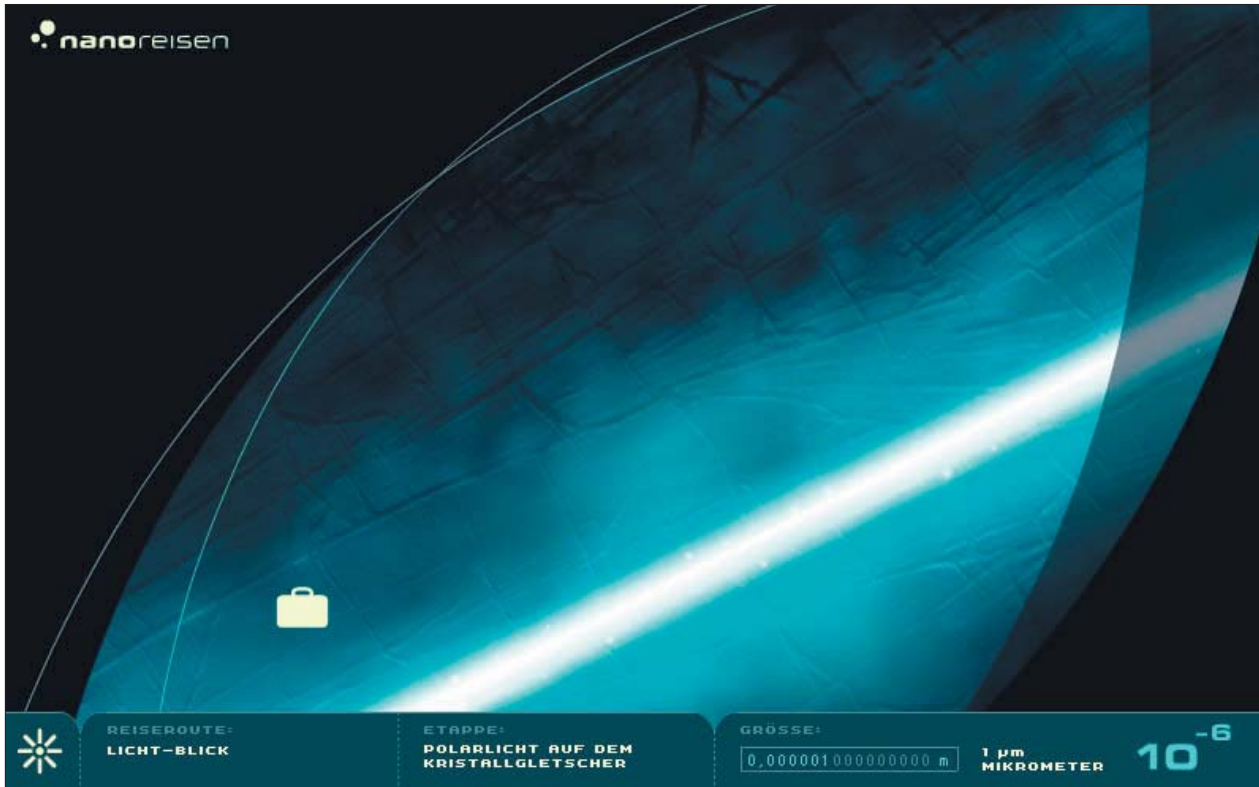
Legt man nun eine äußere Spannung an, so hängt es von der **Polung** ab, ob ein Strom fließen kann oder nicht. In einer Richtung unterstützt das äußere Feld das innere, welches dadurch anwächst und den Stromfluss unterbindet. Polt man den p-n-Übergang um, so können zunächst auch keine Elektronen fließen. Man muss zunächst das innere Feld kompensieren. Übersteigt das äußere Feld das innere betragsmäßig, ist ein Stromfluss möglich. Dieser steigt dann rapide (exponentiell) an. Ein solcher p-n-Übergang hat also eine starke **Richtungsabhängigkeit bzw. stellt eine Einbahnstraße für Elektronen** dar (Gleichrichterfunktion). Das ganze Geheimnis liegt also in einem inneren elektrischem Feld, welches die starke Richtungsabhängigkeit induziert.

Für die Konstruktion von LEDs ist eine Heterostruktur mit einem anderen Material für die aktive Schicht geeigneter. Diese Schicht schränkt die Bewegung der Ladungsträger ein, wobei nur noch bestimmte **»Energieniveaus«** erlaubt sind. Eine solche Struktur

verhält sich ähnlich einem »Topf« oder einer Vertiefung, in dem Ladungsträger (Löcher, Elektronen) eingesperrt sind. Dies ist die »intrinsische« Schicht, die die eigentliche **aktive Zone** darstellt, in der das Licht entsteht. Insgesamt hat man nun einen Aufbau von drei Schichten oder einem p-i-n-Übergang. Dieses Sandwich wird auch als Doppelheterostruktur bezeichnet.

Route: **Licht-Blick**

Etappe: **Polarlicht auf dem Kristallgletscher**



Größenvergleich:

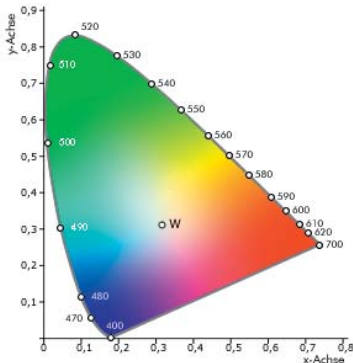
1m : 1 µm

Ø Erde : Breite einer Autobahn

Die aktive Schicht – Licht in alle Richtungen

Die Photonen oder Lichtquanten, die in der **aktiven Schicht** entstehen, breiten sich **in alle Richtungen gleichermaßen** aus. Die, die nach unten emittiert werden, haben allerdings keine Chance, da dort die massive Elektrode eine weite Lichtausbreitung verhindert. Die oberen Schichten werden entsprechend dünn gefertigt, um eine gute Lichtauskopplung erreichen zu können. Dieses gilt natürlich nur für **Flächenemitter**. Bei einem **Kantenemitter** hält man die Lichtausbreitung innerhalb der aktiven Schicht, indem die angrenzenden Schichten ähnlich wie die Hülle einer Glasfaser das Licht zurückwerfen (das so genannte Cladding). Diesen Vorgang nennt man **Totalreflexion**; er findet immer dann statt, wenn Licht ab einem bestimmten Winkel auf ein optisch »dünneres« Medium trifft. Optisch »dünn« bedeutet dabei, dass das Medium ein geringeres Vermögen zur Lichtbrechung besitzt.

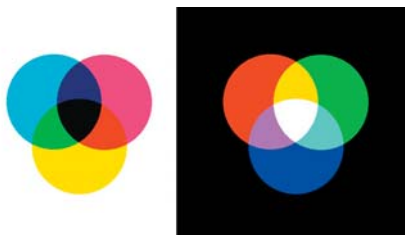
Was ist Farbe?



Dieses ist die hufeisenförmige Normfarbtabelle der internationalen Beleuchtungskommission (IBK) bzw. Commission Internationale d'Eclairage (CIE) von 1931

Farbe wird durch unterschiedliche **Wellenlängen** des Lichtes hervorgerufen. Kurzwelliges Licht wird von uns als blau wahrgenommen, wohingegen langwelliges Licht rot empfunden wird. Die **menschliche Farbwahrnehmung** basiert auf drei verschiedenen Rezeptoren auf der **Retina des Auges**. Die drei verschiedenen Rezeptortypen haben bei unterschiedlichen Wellenlängen eine **maximale Empfindlichkeit**. Es gibt einen für **Blau (445 nm)**, einen für **Grün (535 nm)** und einen für **Rot (575 nm)**. Je nachdem welcher Rezeptortyp stärker angesprochen wird, können wir zwischen unterschiedlichen Farben unterscheiden.

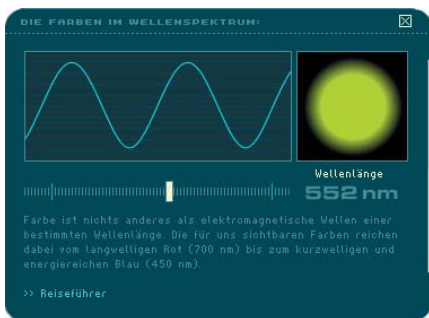
Diese Farbwahrnehmung ist allerdings subjektiv. Aus diesem Grund hat man bereits in den 20er Jahren des vergangenen Jahrhunderts intensive Untersuchungen zur menschlichen **Farbwahrnehmung** unternommen. Das Resultat war eine auf das menschliche Farbempfinden abgestimmte Darstellung der Farben. Das CIE-System wurde 1976 modernisiert und ist seitdem auch als **CIE-L*a*b-System** bekannt. Das L*a*b-System beruht auf der Luminanz (**L**) oder Helligkeit und zwei Farbkomponenten, die den Farbwert von grün bis rot (**a**) und den für gelb bis blau angeben (**b**).



subtraktiv

additiv

Bei der Entstehung eines Farbspektrums unterscheidet man grundsätzlich zwischen additiver und subtraktiver Mischung. Mischt man rot grün und blau additiv, so erhält man **weißes Licht**, mischt man aber diese subtraktiv, so erhält man **schwarz**. Ein Beispiel für subtraktive Farbmischung ist die bei einem Farbdrucker (Licht wird absorbiert). Ein Beispiel für die additive Farbmischung findet sich bei einem Monitor oder Fernseher. Dort werden verschieden farbige Lichtquellen miteinander gemischt, wobei eine subtraktive Mischung nicht möglich ist.



Interaktives Tool in der Etappe: Die Farbe im Wellenlängenspektrum

Farbe entsteht durch elektromagnetische Wellen einer bestimmten Wellenlänge. Die für uns sichtbaren Farben reichen dabei vom langwelligen Rot (700 nm) bis zum kurzwelligen und energiereichen Blau (450 nm).

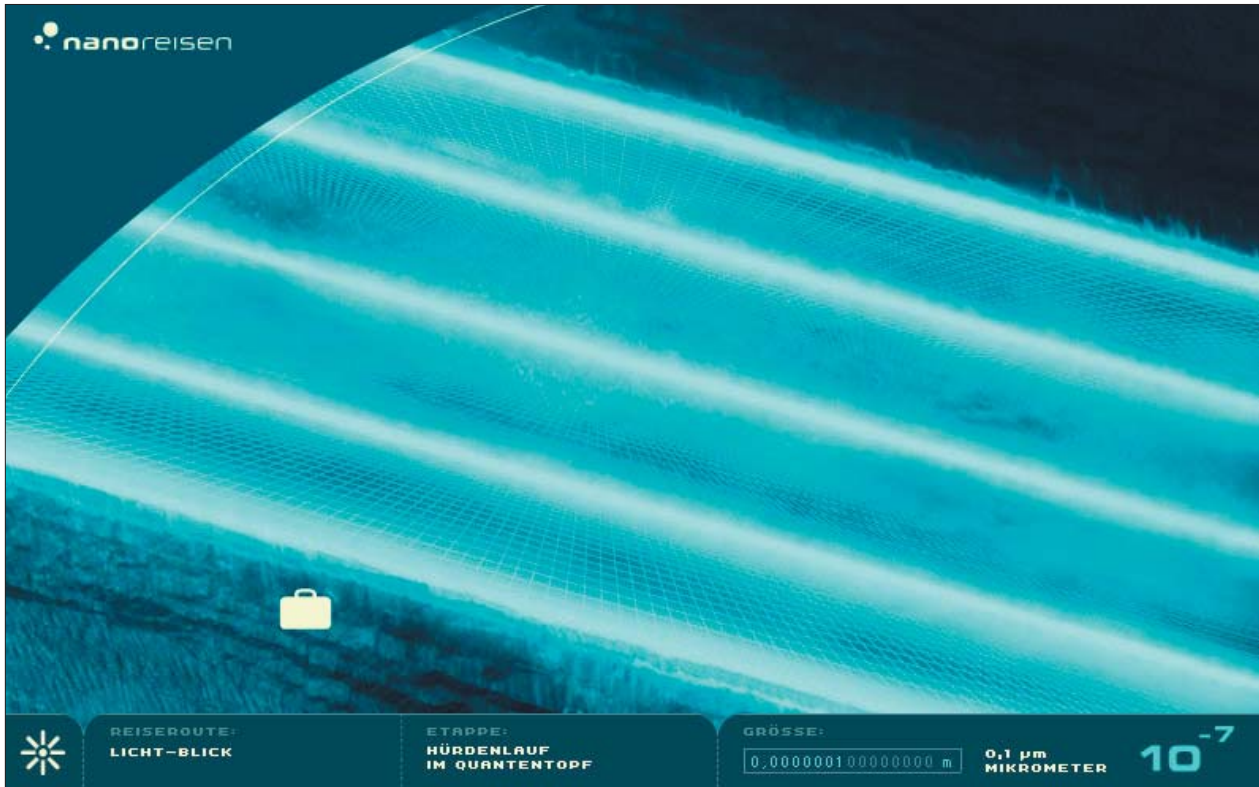
Innerhalb der Normfarbtabelle, lassen sich nun verschiedene Farbsysteme identifizieren. Das so genannte **RGB-System** beruht auf der Mischung von **Rot, Grün und Blau** und bildet die Grundlage der heutigen Bildtechnik. Allerdings lassen sich mit dem RGB-System nicht alle Farben darstellen.

Grund: Man kann nicht alle Wellenlängen durch additive Mischung der drei Farben erzeugen. Andere Farbsysteme beruhen auf unterschiedlichen Ausgangsfarben, wie z. B. das **CMYK-System**. Dieses besonders beim Drucken verbreitete subtraktive System verwendet **Cyan, Magenta, Gelb (Yellow) und schwarz (black)** als Grundfarben.

weitere Infos unter www.lehrerfortbildung-bw.de (Additive Farbmischung / Subtraktive Farbmischung)

Route: **Licht-Blick**

Etappe: **Hürdenlauf im Quantentopf**



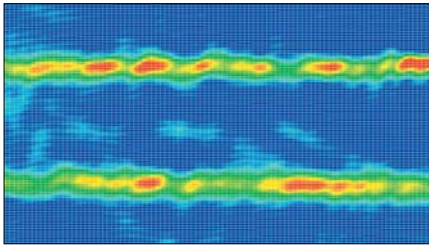
Größenvergleich:

1m : 0,1 µm
 Ø Erde : Armlänge

Dünne Schichten als Gefängnis

Eingerahmt von zwei Lagen liefert die aktive Schicht das gewünschte Licht. Die aktive Schicht wirkt dabei **wie eine Falle**, die das Zusammentreffen von positiven und negativen Ladungsträgern begünstigt. Außerdem kann man durch ihre physikalischen Eigenschaften die Frequenz und somit die **Farbe des Lichtes festlegen**.

Daher spricht man auch von einem **Quantentopf**, der die Ladungsträger in einem kleinen Raumbereich konzentriert und nur bestimmte definierte Energien erlaubt. Hier können die Löcher und die Elektronen strahlend rekombinieren. Solche Quantentöpfe sind **extrem dünne Schichten** innerhalb der aktiven Schicht.



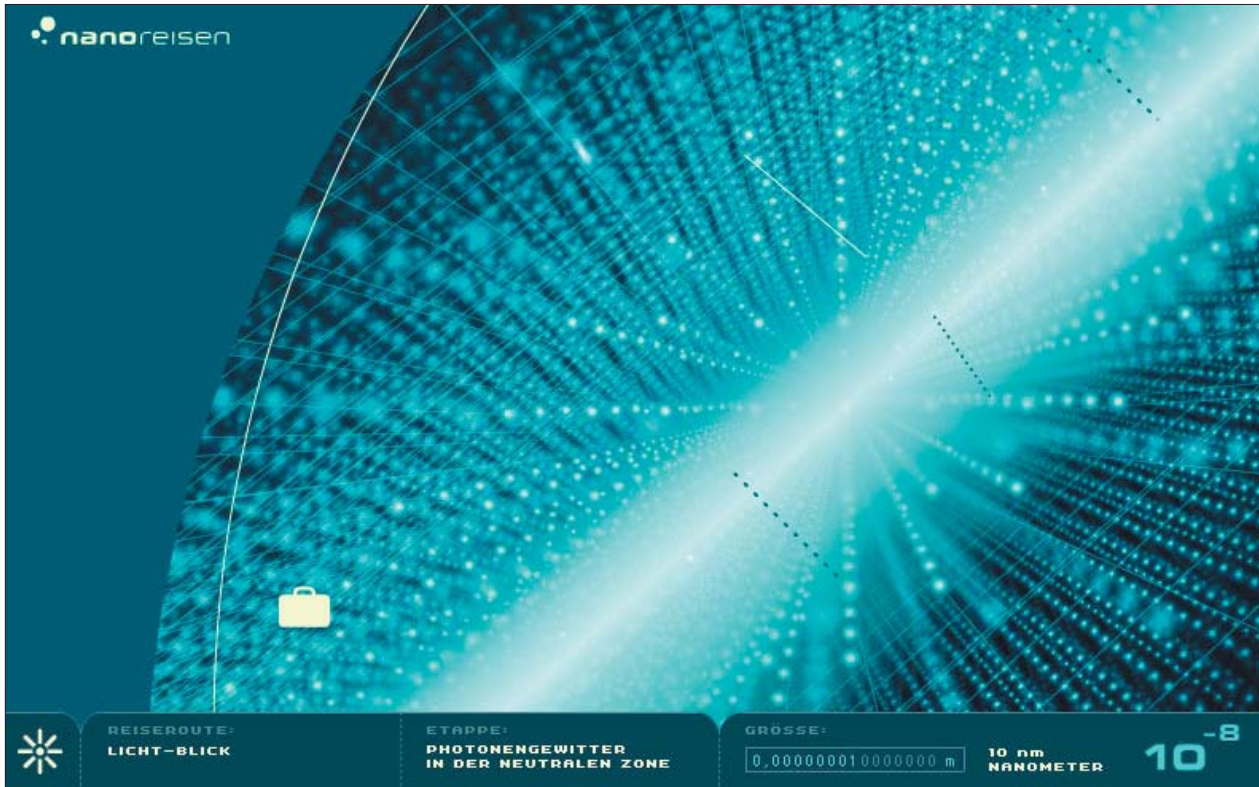
InGaN-Struktur. Die grün-roten Bereiche der Heterostruktur stellen eine erhöhte Indiumkonzentration dar. Sie bilden Quantentöpfe in der aktiven Schicht. Die Quantentöpfe haben eine vertikale Ausdehnung von nur wenigen Nanometern, also nur wenigen Atomlagen.

Meist werden mehrere Quantentöpfe (engl. quantum wells) eingesetzt.

Dies kann man sich wie folgt vorstellen: Elektronen werden in den Quantentopf injiziert, allerdings müssen sie dazu eine Barriere überwinden, also Energie aufnehmen. Aus der anderen Richtung werden **Elektronenakzeptoren**, die Löcher, in den »Topf« geschüttet. Im Topf angekommen können die Elektronen nun die Löcher stopfen und ihre zuvor aufgenommene Energie in Form von Strahlung wieder abgeben. Licht einer bestimmten Wellenlänge wird aus dieser aktiven Zone emittiert.

Route: **Licht-Blick**

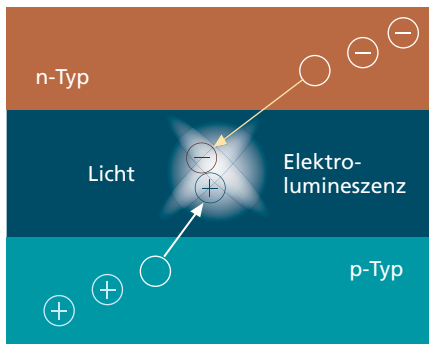
Etappe: **Photonengewitter in der Neutralen Zone**



Größenvergleich: 1m : 10 nm
Ø Erde : Grapefruit

Die strahlende Rekombination

Die Zonen der Lichtentstehung sind häufig sehr dünn. In einem Bereich von nur **wenige Nanometern** bis einigen 10 nm entsteht das Licht. Elektronen geben dabei eine definierte Portion ihrer Energie ab, ähnlich einem Wasserfall, wo die Fallhöhe die potentielle Energie des Wassers bestimmt, kommt es zu der **Rekombination** der positiven und negativen Ladungsträger.



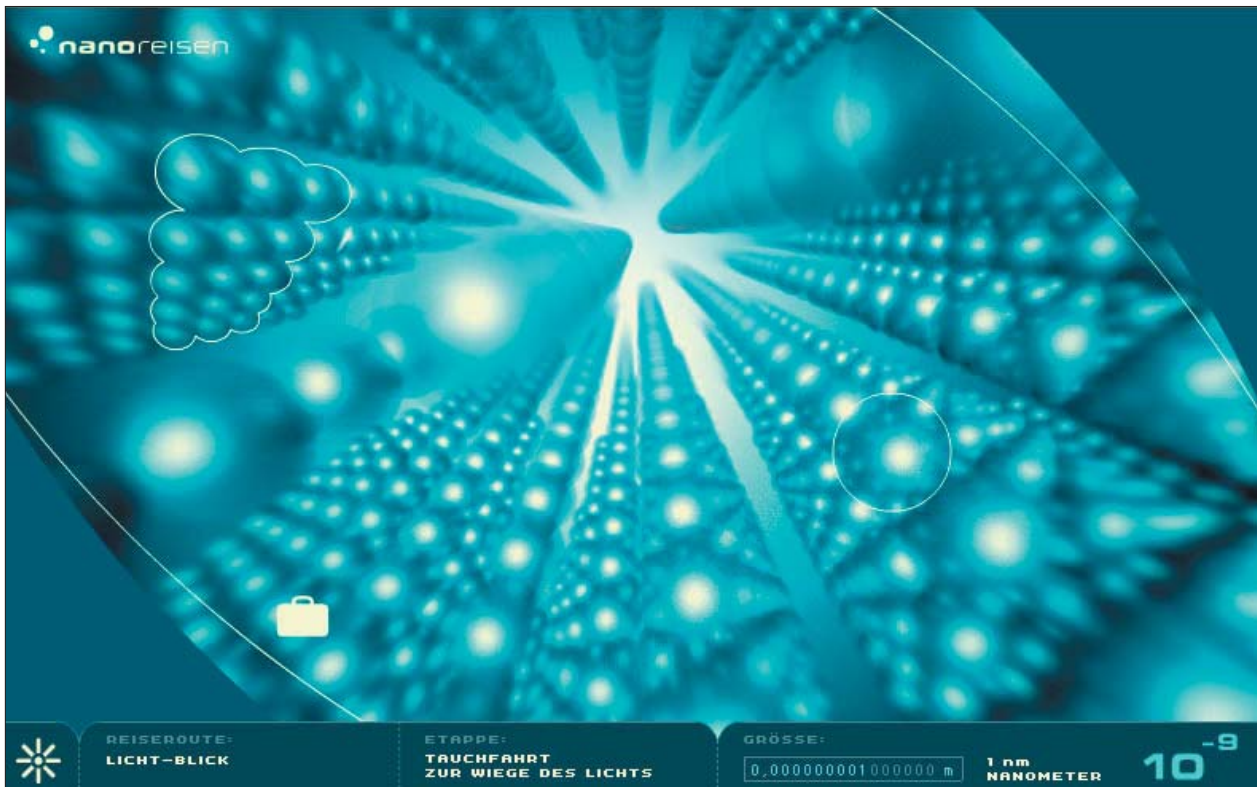
Energetisches Schema der Elektrolumineszenz: Elektronen rekombinieren »strahlend« mit Löchern.

Dieser Vorgang heißt Elektrolumineszenz, d. h. die Umwandlung von elektrischer in elektromagnetische Energie. **Lumineszenz** bedeutet im Allgemeinen die kalte Erzeugung von Licht, die im Gegensatz zur thermischen Anregung keine Wärmezufuhr benötigt. Andere Beispiele sind die Photolumineszenz (Fluoreszenz und Phosphoreszenz), also die Anregung mit Licht oder die Tribolumineszenz, also die Anregung durch Reibung mit Lichtabgabe.

Die kalte Erzeugung von Licht hat den entscheidenden Vorteil, dass relativ wenig Energie verloren geht. **Eine LED kann ca. 30% der elektrischen Energie in Licht verwandeln**, die Rekombination erreicht zwar fast 100%, aber das in der aktiven Schicht entstandene Licht muss erst mal heil aus dem Halbleiterchip gebracht werden.

Genau dort liegt das Problem: Die Schichten der Heterostruktur haben relativ hohe Brechungsindizes, d. h. sie können das Licht stark ablenken. Dadurch wird viel Licht im Kristall hin- und hergeworfen. Es gibt viele Defekte, die Licht absorbieren und nicht zuletzt gibt es nur eine Seite, die dünn genug ist, um das Licht auszukoppeln. Die andere Richtung führt in die Tiefen der Elektrode, wo nur noch ein **Spiegel (Schicht aus Silber)** Einhalt gebieten kann.

Route: **Licht-Blick**

 Etappe: **Tauchfahrt zur Wiege des Lichts**


Größenvergleich:

1m : 1 nm

Ø Erde : Haselnuss

Doping mit Folgen

Mit einer **gezielten Verunreinigung** kann die Leitfähigkeit eines Halbleiters nahezu beliebig gestaltet werden. Entscheidend für die elektrische Leitfähigkeit sind relativ frei bewegliche Ladungsträger. Bei Metallen sind dies immer Elektronen, also negativ geladene Teilchen.

Der Grund liegt im Aufbau der Atome. Bei Metallen werden ein bis zwei Elektronen pro Atom an ein **gemeinschaftlich genutztes Elektronengas** abgegeben. Diese Elektronen können sich dann sehr frei im Kristall der Atome bewegen und so z. B. den elektrischen Strom aber auch Wärme leiten. Man spricht dann von Leitungselektronen.

Ein Halbleiter (HL) besitzt nur sehr wenige freie Elektronen. Er leitet den Strom sehr viel schlechter, aber dennoch besser als ein Isolator wie Glimmer oder Glas. Nun können wenige Atome des HL durch **Fremdatome** ersetzt werden, um die elektrischen Eigenschaften zu verbessern. Fügt man eine Atomsorte ein, die ein **Elektron mehr** zur Verfügung hat als seine Nachbarn, spricht man von **n-Dotierung**. Diese Elektronen können nun die Leitfähigkeit erhöhen. Allerdings ist der Mechanismus anders als bei Metallen. Die Elektronen brauchen erst eine bestimmte **Aktivierungsenergie**, die abhängig vom Material und seiner Dotierung ist, um sich frei bewegen zu können.

Diese **Energielücke**, die überwunden werden muss, um Leitungselektronen zu erhalten, machen das Besondere an Halbleitern aus. Die Höhe dieser Energielücke kann manipuliert werden und **entspricht genau dem Energiebetrag, der in Form von Licht abgestrahlt werden kann**. Auf diesem Wege wird die Farbe einer LED eingestellt. Der p-dotierte Kristall verhält sich ganz ähnlich, nur dass die Ladungsträger **quasi-negative Elektronen** sind, die **Löcher**.

Die klassische Halbleitertechnologie hat allerdings Konkurrenz bekommen, als man entdeckt hat, dass auch **organische Polymere** halbleitende Eigenschaften zeigen. Sie können in extrem flacher Bauweise hergestellt werden und eignen sich für den Bau von **Displays**, wenn man jeweils ein rotes, grünes und blaues Exemplar zu einem Pixel zusammenfügt. Diese **OLEDs (Organic light emitting diodes)** gestatten die Konstruktion von sehr licht- und farbstarke Displays.

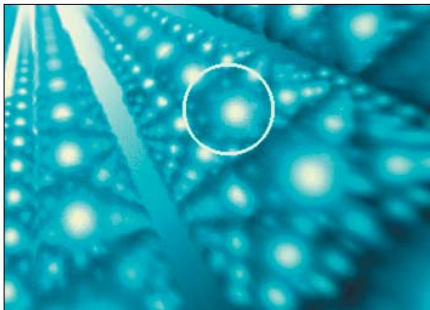
Ein »strahlendes« Treffen

Die **Quantumwells (QWs)** liegen eingebettet in der intrinsischen Schicht. Diese QWs treten auch gerne im Rudel auf und **wirken sehr attraktiv auf die beiden Ladungsträger**, die Löcher und die Elektronen. Von oben kommen **Elektronen** und von unten werden **»fehlende« Elektronen, oder Löcher** herangeführt. Dem elektrischen Feld oder der von außen angelegten Spannung unterliegen sie beide gleichermaßen, nur dass sie sich eben in die entgegengesetzte Richtung bewegen.

Die mit Indiumatomen angereicherten QWs der blauen LEDs dienen dabei als bevorzugter Treffpunkt. Er stellt eine energetische Senke dar, so dass Elektronen und Löcher hier bevorzugt aufeinandertreffen und **»strahlend rekombinieren«**. Diese Begrenzung auf einen sehr engen Raumbereich erhöht die Effizienz der Leuchtdiode (die so genannte Quantenausbeute).

Legt man eine Spannung so an, dass der Minuspol oben und der Pluspol unten ist, so bewegen sich die Elektronen von oben nach unten. Der p-n-Übergang ist damit in **Durchlassrichtung** gepolt. Dabei treffen sie auf mehrere Hindernisse, die QWs. In den QWs können sie nun auf ein Loch treffen und einen Teil ihrer Energie in Form von Licht abgeben. Die **Wahrscheinlichkeit**, dass dies bei einem der QWs passiert, **liegt bei nahezu 100%**.

Von unten sieht man die Löcher hochwandern. Sie sind etwas behäbiger als die Elektronen bzw. haben eine größere »effektive« **Masse**. Die erhöhte Masse resultiert in einer **kleineren »Beweglichkeit«**. Dennoch teilen sie das Schicksal der Elektronen und werden in einem der QWs gestopft.



Das eingekreiste Atom in der Etappe gestattet, den Vorgang in Zeitlupe zu sehen. Einfach mit der Maus auf dem Atom bleiben. Ein dunkles Loch kommt von unten hoch und wird dann durch ein Elektron gestopft.

Man kann sich ein Loch auch als fehlendes Elektron vorstellen, welches von Atom zu Atom gereicht wird. Dies ist eben auch eine Frage des Standpunktes. Wichtig dabei ist, dass die Elektronen bereitwillig Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung abgeben. Alles was sie verlangen ist ein Loch in ihrer Nähe. Diese Form der Lichtentstehung kann nur in bestimmten **Halbleiterkristallen**, wie beispielsweise **Galliumnitrid**, ablaufen. In einem Siliziumkristall geht das schlechter, da dort nicht nur ein Loch und ein Elektron zusammenkommen müssten, sondern auch noch zur gleichen Zeit das Atom etwas stärker hin- und herschwingen müsste. Daher ist der Bau von LEDs auf der Basis von Silizium bisher recht schwierig.

Die strahlende Rekombination eines Loches mit einem Elektron liefert ein **Photon oder ein Lichtteilchen**. Dies wird dann in eine zufällige Richtung ausgesandt. Leider kann man die Atome nicht zwingen nach oben zu strahlen. Versehentlich nach unten ausgesendetes Licht wird durch den **Spiegel** unterhalb des p-Bereiches wieder auf den richtigen Weg gebracht.

Impressum

VDI Technologiezentrum GmbH

Graf-Recke-Straße 84
D-40239 Düsseldorf

Telefon +49 (0) 211 62 14-4 01
Fax: +49 (0) 211 62 14-4 84
E-Mail: info@nanoreisen.de
Web: www.vditz.de



Das Projekt wurde gefördert durch das
Bundesministerium für Bildung
und Forschung.

Konzept, Design und Realisierung:

LEKKERWERKEN
Design & Medienkommunikation
Industriestr. 5
D-65197 Wiesbaden
www.lekkerwerken.de

Urheber- und Nutzungsrechte, Haftungshinweis:

Der Inhalt dieses Dokuments ist urheberrechtlich geschützt. Die Vervielfältigung von Informationen oder Daten, insbesondere die Verwendung von Texten, Textteilen oder Bildmaterial bedarf der vorherigen Zustimmungen der VDI Technologiezentrum GmbH. Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle übernehmen wir keine Haftung für die Inhalte externer Links.

Bildnachweis

Route Licht-Blick

Audi AG, Ingolstadt:

Konzeptstudie »Le Mans«

BASF AG, Ludwigshafen:

»Nanocubes«

DaimlerChrysler AG, Stuttgart:

»Kratzfeste Lacke durch Nanopartikel «,
»Türen einer C-Klasse«,
Schema »Aufbau einer Grätzelzelle«,

Fraunhofer Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF), Freiburg:

»LEDs in allen Farben«

www.LED-Info.de:

»CIE-Farbtafel«,
Schema »Aufbau einer LED«,
www.led-info.de

Osram GmbH, München:

»Weiße LED«,
»LED-Chip von der Seite«,
»Kaltes Licht / LED«,
»InGaN-Struktur«

VDI Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf:

»Heißes Licht / Glühlampe«,
Schema »Elektrolumineszenz«

Wacker Siltronic AG, München:

»Silizium Einkristall«,
»Wafer«