

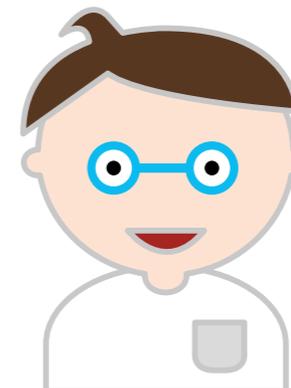
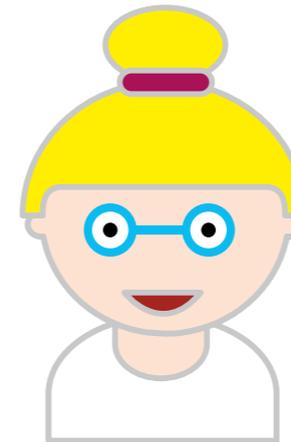
The logo features a large circle with a white double-line border. Inside this circle, a ring of 18 dark blue hexagons is arranged in a circular pattern. The central area is a solid dark blue circle containing the text.

# NANO TREFF

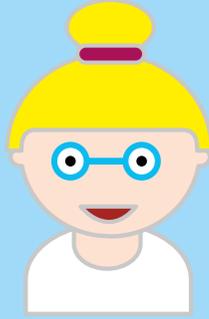
*ein Einblick in die wundersame  
Welt der (künstlichen) Atome*

# NANO TREFF

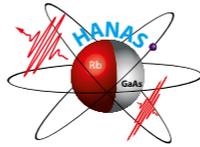
*ein Einblick in die wundersame  
Welt der (künstlichen) Atome*



*... Willkommen  
in unserer Welt der  
Nano-Physik!*



Unser Dank geht an:



## Vorwort

Am Anfang des letzten Jahrhunderts stand die Physik einer Reihe von Rätseln gegenüber, die nur anhand einer vollkommen neuen Theorie - der sogenannten „Quantenmechanik“ - gelöst werden konnten.

Diese faszinierende Theorie ist zum Beispiel notwendig, um das eigenartige Verhalten von Atomen zu beschreiben. Obwohl die Entwicklung der Quantenmechanik zu Beginn hauptsächlich von der Neugier der Wissenschaft vorangetrieben wurde, hat diese Theorie mittlerweile den Alltag der Menschen vollständig verändert. Mobiltelefone, Computer, digitale Photokameras, das Internet, und viele andere Gegenstände des täglichen Lebens würden ohne die Erkenntnisse der Quantenmechanik nicht existieren.

Die Möglichkeiten und Entdeckungen sind aber bei weitem noch nicht erschöpft. Das wundersame Verhalten von Atomen und anderen Objekten, die den Gesetzen der Quantenmechanik folgen, könnte zum Beispiel genutzt werden, um die Sicherheit der Kommunikation im Internet deutlich zu erhöhen. Es ist nämlich heutzutage noch schwierig zu erkennen, ob Nachrichten bereits abgefangen und durch Unbekannte schon gelesen wurden. Dies ist nicht nur ärgerlich für die Betroffenen, sondern bedeutet, dass auch sensible Informationen recht leicht in falsche Hände geraten können.

Ein Netzwerk von europäischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern beschäftigt sich zurzeit mit diesem Thema. Konkret wird versucht, sogenannte „künstliche Atome“ mit natürlichen Atomen kommunizieren zu lassen, mit dem langfristigen Ziel, neue Bausteine für eine sichere Kommunikation zu bilden. Auf dem Weg zu diesem Ziel werden stetig spannende physikalische Phänomene entdeckt und neue technologische Ansätze entwickelt.

Das vorliegende Booklet soll einen Einblick in dieses Forschungsthema und die dazugehörigen Konzepte in allgemein verständlicher Weise geben. Verdeutlicht wird dies anhand von Illustrationen und ausgewählten Experimenten. Unsere WissenschaftlerInnen Hannes und Hanna führen uns durch diese Kurzreise in die wundersame Welt der Atome und künstlichen Atome.

Viel Spaß beim Lesen und Experimentieren!

Univ. Prof. Dr. Armando Rastelli  
Johannes Kepler Universität Linz

# Inhalt

## KAPITEL I ATOME, ELEKTRONEN UND LICHT

Was ist ein natürliches Atom und wie groß ist es? 08 | 09

**EXPERIMENT 1:** Die elektrostatische Kraft 10 | 11

Wie verhalten sich Elektronen in einem Atom? 12 | 13

Was bedeutet es, dass Elektronen eines Atoms nur diskrete Energiewerte haben dürfen? 14 | 15

Superpositionsprinzip und „Kollaps der Wellenfunktion“ 14 | 15

Woran lässt sich erkennen, dass Elektronen in Atomen nur diskrete Energiewerte haben können? 16 | 17

**EXPERIMENT 2:** Bau deinen eigenen Spektrografen um die Farben von verschiedenen Weißlichtquellen zu erkennen! 18 | 19

Was ist Licht und was hat seine Farbe mit Energie und Geschwindigkeit zu tun? 20 | 21

**EXPERIMENT 3:** Wie können wir infrarotes Licht sichtbar machen?! 22 | 23

## KAPITEL II ANWENDUNGEN DER QUANTENMECHANIK

Was hat uns die Quantenmechanik bisher genutzt? 24 | 25

Wofür könnte die Quantenmechanik noch nützlich sein? 26 | 27

## KAPITEL III KÜNSTLICHE ATOME

Was ist ein künstliches Atom (oder ein „Quantenpunkt“)? 28 | 29

Wie kann man ein künstliches Atom herstellen? 30 | 31

Was ist eine Molekularstrahlepitaxie-Anlage? 30 | 31

Wie kann man GaAs Quantenpunkte, umgeben von einer AlGaAs Barriere, herstellen? 32 | 33

**EXPERIMENT 4:** Entstehung von Tropfen und Reifung 34 | 35

Wie können künstliche Atome Licht emittieren und wie funktioniert eine LED? 36 | 37

Wie unterscheidet sich das Licht eines künstlichen Atoms vom Licht einer herkömmlichen LED? 36 | 37

Warum ist es schwierig, aus einem Halbleiter Licht zu gewinnen? 38 | 39

**EXPERIMENT 5:** Totalreflexion 40 | 41

## KAPITEL IV NANO-TREFF

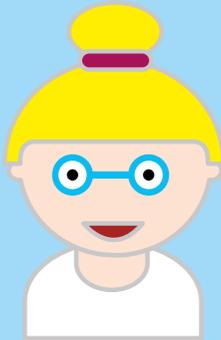
Warum wäre es interessant, künstliche und natürliche Atome miteinander kommunizieren zu lassen? 42 | 43

Wie soll man ein Photon speichern, das sich normalerweise mit Lichtgeschwindigkeit bewegt? 44 | 45

Wie kann man das Spektrum eines künstlichen Atoms nach seiner Herstellung kontrollieren? 46 | 47

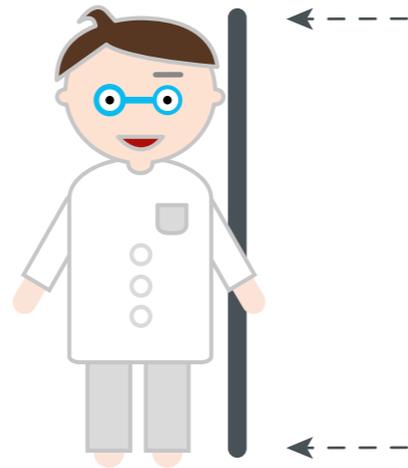
.....  
Zusammenfassung 49  
Bildnachweis/ Anmerkung 50  
Impressum 51

Was ist ein natürliches Atom und wie groß ist es?



Der Atombau ist etwa 10 Millionen mal kleiner als 1 Millimeter. Das entspricht ungefähr dem selben Verhältnis zwischen meiner Größe und dem Erddurchmesser!

Ich bestehe aus insgesamt etwa  $7 \cdot 10^{27}$  Atomen!



Wir können uns ein Atom als winzige Kugel mit einem Durchmesser von ungefähr 0,1 Nanometer vorstellen.

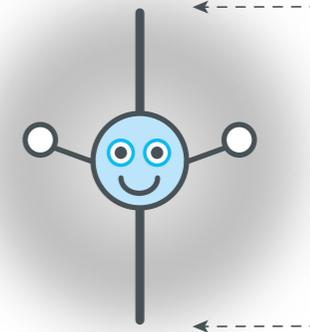
**Wieviel ist das?** Das ist 10.000.000 (10 Millionen) mal weniger als ein Millimeter. Grob gesagt, entspricht das dem Verhältnis zwischen der Körpergröße eines Menschen und dem Durchmesser unserer Erde!

Das Atom besteht wiederum aus einem positiv geladenen Kern, der von negativ geladenen Elektronen umgeben ist. Die Elektronen werden dort durch die natürliche Anziehungskraft zwischen positiven und negativen Ladungen gehalten. Die dafür verantwortliche Kraft nennen wir **elektrostatische Kraft** (siehe dazu **Experiment 1**).

Alle Objekte, die wir sehen, bestehen aus ganz vielen Atomen verschiedener Sorten (mehr als 100 sind bekannt). Um eine Vorstellung zu haben: Der menschliche Körper besteht hauptsächlich aus Sauerstoff-, Wasserstoff- und Kohlenstoffatomen und enthält insgesamt etwa 7.000.000.000.000.000.000.000.000 (kurz  $7 \cdot 10^{27}$ ) Atome!



Hey ... Ich bin etwa 0,1 Nanometer groß!



# 1 Experiment



Die elektrostatische Kraft

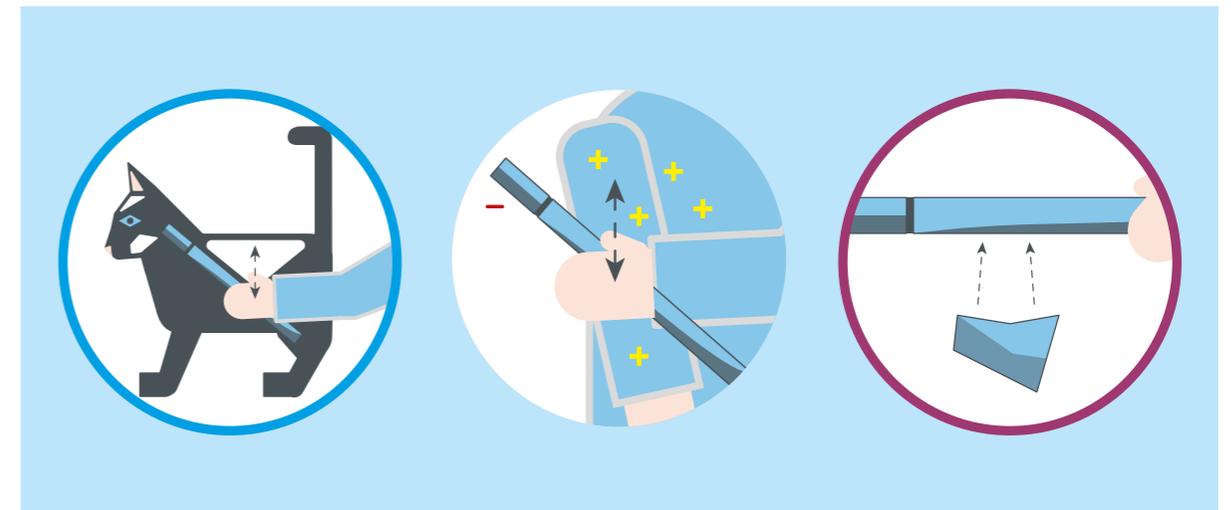
**Was Du brauchst:** ■ Stift aus Plastik ■ Stückchen Papier ■ Pulli (oder eine Katze).

**Was ist zu tun?** Lege das Stückchen Papier auf einen Tisch und reibe kräftig den Stift am Pulli. Jetzt nähere den Stift dem Papier an, ohne es zu berühren und schau, was passiert: Du wirst bemerken, dass das Papierstückchen anfängt, sich zu bewegen und dass es eventuell zum Stift springt! Wenn Du eine Katze hast, kannst Du sie bitten, ihr Fell statt des Pullis nutzen zu dürfen. Das funktioniert sogar besser. Selbstverständlich kannst Du dasselbe Experiment auch mit anderen leichten Gegenständen wiederholen, wie zum Beispiel deinen Haaren.

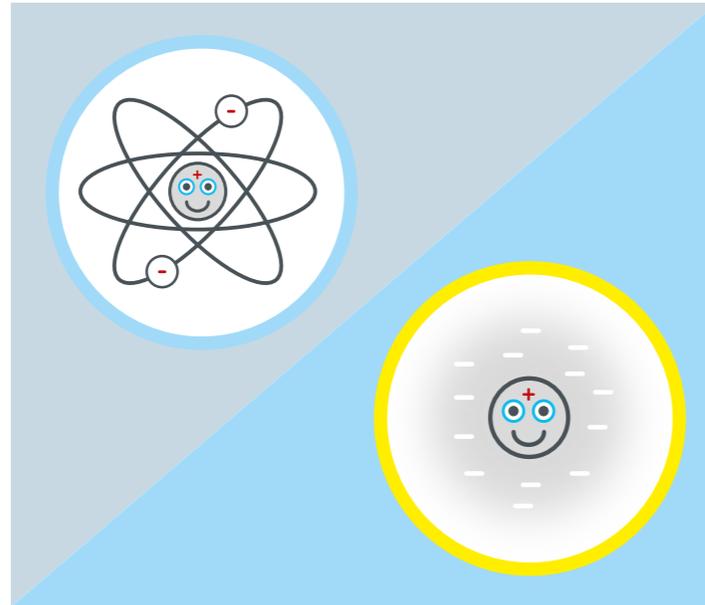
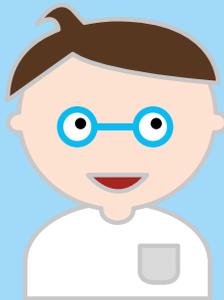
**Was passiert?** Beim Reiben des Stiftes werden einige Elektronen vom Stift zum Pulli abgegeben oder umgekehrt. Das Ergebnis ist, dass der Stift geladen wird. Er ist damit in der Lage, Gegenstände aufgrund der elektrostatischen Kraft anzuziehen. Das funktioniert auch wenn die Gegenstände ungeladen sind! Der Grund dafür ist ein Phänomen, das „elektrostatische Polarisation“ genannt wird: die Ladungen im Inneren des Papiers spüren den geladenen Stift und verschieben sich ein wenig. Wenn z.B. der Stift positiv geladen ist, bewegen sich die negativen Ladungen im Papier leicht

in Richtung des Stiftes und die positiven auf die andere Seite. Weil die elektrostatische Kraft mit der Entfernung abnimmt, werden die „nahen“ Teile der Papierschnipsel mehr angezogen, als die „entfernteren“ Teile abgestoßen werden. Damit wird das Papier insgesamt angezogen, obwohl es ungeladen ist.

Nach kurzer Zeit entlädt sich der Stift, da er Elektronen wieder von den Luftatomen aufnimmt oder an sie abgibt. Dann musst Du das Ganze wiederholen.



Wie verhalten sich Elektronen  
in einem Atom?



Ich bin ein Teilchen und auch  
eine Welle ...



## Web-Tip

► <https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0>

Da ein Atom so klein ist, verhalten sich Elektronen außerordentlich seltsam. Wissenschaftler forschten Jahrhunderte lang, bevor sie eine gute Beschreibung für die Bewegung der Elektronen um den Atomkern fanden. Anfänglich glaubten sie, dass sich Elektronen so um den Kern bewegen wie die Planeten um die Sonne. Das ist jedoch nicht richtig, und daher mussten die Wissenschaftler eine komplett neue Theorie entwickeln, die wir „Quantenmechanik“ nennen.

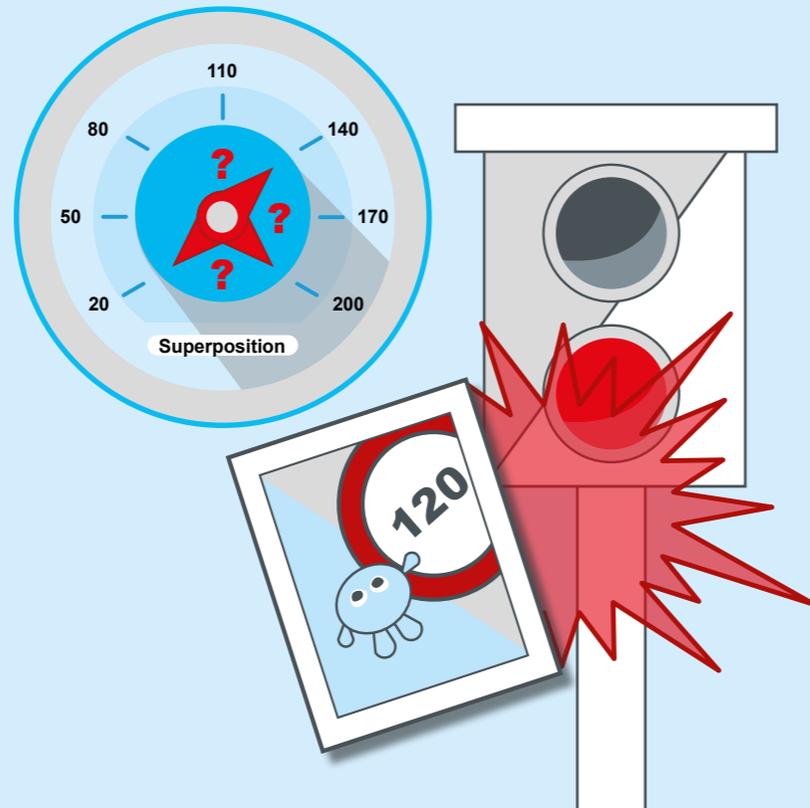
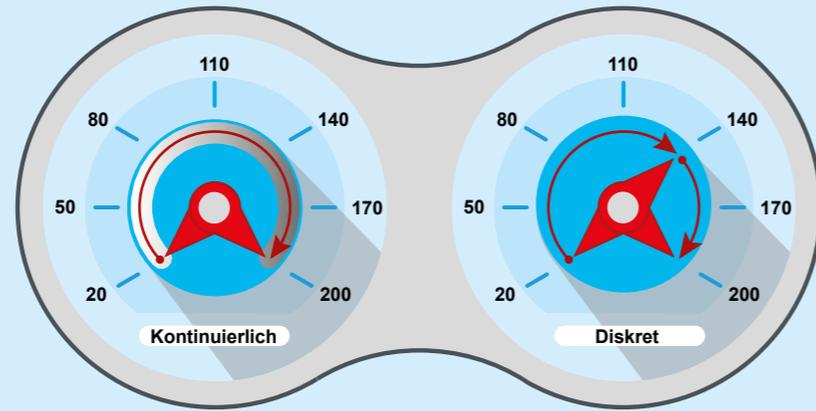
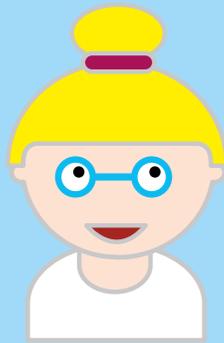
Der Quantenmechanik zufolge kann sich ein Objekt wie ein Elektron sowohl als **Teilchen** (oder Partikel) als auch als **Welle** verhalten, abhängig davon, wie wir es betrachten. Das heißt, wir können uns ein Elektron sowohl als eine kleine Kugel, als auch als eine winzige Welle auf einer Wasseroberfläche vorstellen. Ein Unterschied zwischen den zwei Bildern ist, dass eine Kugel sich in jedem Moment an einem wohldefinierten Ort befindet. Eine Welle hat stattdessen eine gewisse Ausdehnung, sodass wir nicht genau sagen können, wo sie ist. Dieses Phänomen, das wir „**Teilchen-Welle Dualismus**“ nennen, ist immer noch auch für Wissenschaftler schwierig zu begreifen, aber die **Nanowelt** ist eben **anders** als die Welt, die wir kennen.

**Warum ist das so?** Der Grund dafür ist, dass unsere **Augen** nichts sehen können, was kleiner als etwa 50 Mikrometer ist (was noch immer 500.000 mal größer ist als ein Atom). Das heißt, wir sehen immer sehr viele Atome gleichzeitig, und wenn so viele Atome zusammenkommen, neigen sie dazu, sich „**normal**“ zu verhalten. Heutzutage gibt es jedoch sehr **leistungsstarke Mikroskope** und andere Tricks, die uns erlauben, einzelne Atome und Elektronen zu „sehen“ und die Gesetze der Quantenmechanik zu überprüfen (siehe dazu **Web-Tip**).

Was bedeutet es, dass Elektronen eines Atoms nur diskrete Energiewerte haben dürfen?

Wir wollen noch ein letztes wichtiges Konzept der Quantenmechanik erläutern:

Superpositionsprinzip und „Kollaps der Wellenfunktion“



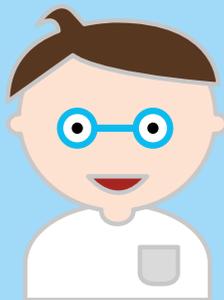
Eine weitere Eigenheit der Elektronen eines Atoms ist, dass sie nicht beliebige **Energie-**werte haben können. Nur manche ganz bestimmte Energiewerte, die von der Atomsorte abhängen, sind erlaubt - und das ist wirklich seltsam.

Stellen wir uns vor, mit dem Auto zu fahren. Unsere Energie steht in Beziehung zu unserer Geschwindigkeit: Je höher die Energie, desto höher die Geschwindigkeit. Jetzt stellen wir uns vor zu beschleunigen, und beobachten dabei den Tachometer. Was wir sehen würden ist, dass sich der Zeiger des Tachometers **ohne Sprünge** bewegt (z.B. von einer Geschwindigkeit von 20 km/h auf 200 km/h). Wenn wir aber ein Elektron eines Atoms wären, würden wir folgendes beobachten: anfänglich passiert nichts, aber ganz plötzlich erhöht sich die Geschwindigkeit auf - sagen wir - 140 km/h, dann passiert wieder nichts und ganz plötzlich **springt** der Zeiger bei 200 km/h. Und schlimmer noch: Bis zum Stillstand abzustoppen ist überhaupt nicht möglich! Man sagt, dass die Elektronenenergie nur „**diskrete**“ Werte haben kann, und dass ein Elektron in einem Atom nur **diskrete Zustände** (oder „**Energieniveaus**“) einnehmen kann, im Gegensatz zu den kontinuierlichen Werten, die wir aus unserem täglichen Leben gewöhnt sind. Wir können uns diese Energieniveaus wie die Stufen einer Leiter vorstellen.

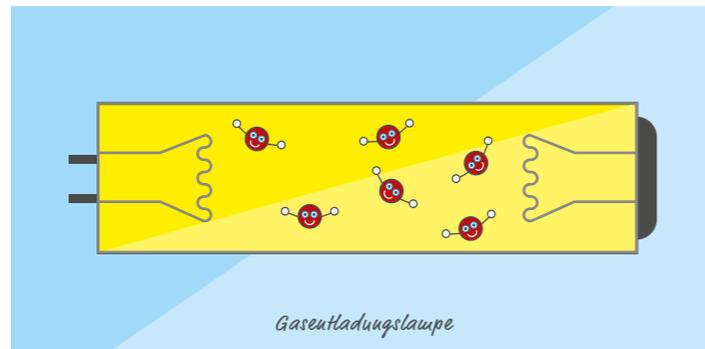
Die Quantenmechanik besagt auch, dass ein Elektron sich gleichzeitig in zwei oder mehreren unterschiedlichen Zuständen befinden kann. Diese Tatsache bezeichnet man als „**Superpositionsprinzip**“. Nur wenn wir das Elektron beobachten, wird es sich für einen genauen Energiewert entscheiden. Das heißt, dass wir durch unsere Beobachtung das Elektron „**stören**“ und es zwingen, sich für einen bestimmten Zustand zu entscheiden. Diese erzwungene Entscheidung wird als „**Kollaps der Wellenfunktion**“ genannt, eine für den Rest unserer Reise wichtige Erkenntnis.

Am Beispiel vom „Auto-Elektron“ würde diese seltsame Situation der folgenden Darstellung entsprechen: Wir fahren **gleichzeitig** mit Tempo 20, 140 und 200 km/h; die Geschwindigkeit ist nicht wohl definiert und wir befinden uns in einem „**Superpositions-**zustand“; die genaue Geschwindigkeit wird nur bekannt, wenn wir z.B. von einem Blitzer fotografiert werden. Sobald wir beobachtet werden, müssen wir uns entscheiden. Dann können wir nur hoffen, dass wir das Tempolimit nicht überschritten haben. Es wäre sicherlich schwierig eine/n PolizistIn zu überzeugen, dass wir uns in einem Superpositionszustand befanden!

Woher lässt sich erkennen, dass Elektronen in Atomen nur diskrete Energiewerte haben können?



Energieleiter und Quantensprünge



Gasentladungslampe

Die Tatsache, dass die Elektronen in Atomen nur diskrete Zustände einnehmen können, erkennt man bei Betrachtung des „Spektrums“ einer Gasentladungslampe (vgl. Experiment 2), bei der Atome „angeregt“ werden und Licht emittieren, wenn sie wieder in ihren ursprünglichen Zustand zurückkehren.

#### Wie funktioniert das?

Um das zu verstehen, müssen wir zwei Tatsachen bedenken:

(1) Erstens kann sich nicht mehr als ein Elektron in einem Zustand (auf einer Stufe unserer Leiter) befinden – dies wird als „Pauli’sches Ausschlussprinzip“ bezeichnet –, ebenfalls eine Manifestation der Quantenmechanik bei Teilchen wie Elektronen. Wenn man versucht, mehrere Elektronen auf der gleichen Stufe der Leiter festzuklemmen, ist das einfach gänzlich unmöglich. Es gibt andere Teilchen, denen es nichts ausmacht, eine Stufe der Leiter mit anderen zu teilen (wie die Photonen, die wir später treffen werden), aber Elektronen gehören nicht dazu, und das ist auch gut so. Wenn sie sich „sozialer“ verhalten würden, würde die Menschheit nicht existieren, denn die Atome, aus denen wir zusammengesetzt sind, würden einfach miteinander verschmelzen.

(2) Die zweite Tatsache ist, dass, sofern noch etwas Raum auf einer niedrigeren Stufe verfügbar ist, ein auf einer höheren Stufe befindliches Elektron versuchen wird, herunterzuspringen. Das ist ein geläufiges Prinzip in der Physik: Jedes System versucht so schnell wie möglich, seine Energie zu verringern.

Wenn ein Elektron von einer höheren auf eine niedrigere Stufe springt, reden wir von einem „Quantensprung“. Da die Energie der verschiedenen Stufen unterschiedlich ist, muss das Elektron dabei Energie abgeben, zum Beispiel in Form von Licht. Da aber Energie nicht einfach verschwinden kann (ein weiteres physikalisches Grundprinzip), muss das emittierte Licht exakt die gleiche Energiemenge abtransportieren, welche das Elektron beim Sprung von einer höheren Stufe auf eine niedrigere verloren hat. Das heißt, die Energie des Lichtes ist ebenfalls genau definiert und lässt sich durch seine Farbe quantifizieren. Die getrennten (diskreten) Farben, die wir im Licht einer Gasentladungslampe sehen können, entstehen genau aus der Tatsache, dass Elektronen nur diskrete Energiewerte besitzen können!

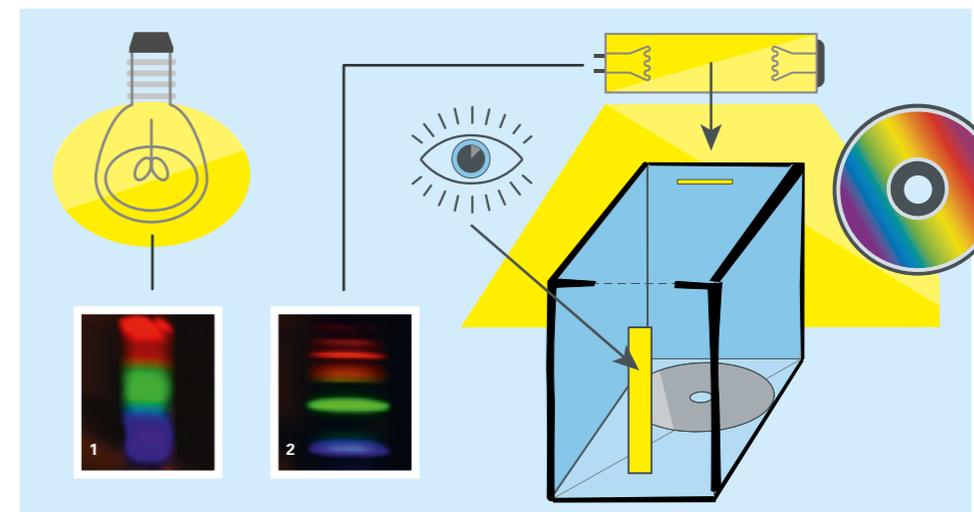
## 2 Experiment



Bau deinen eigenen Spektrografen um die Farben von verschiedenen Weißlichtquellen zu erkennen!

**Was Du brauchst:** ■ 1 DVD ■ Schuhkarton ■ schwarzes Isolierband  
■ Cutter (bitte vorsichtig!) ■ Klebstoff

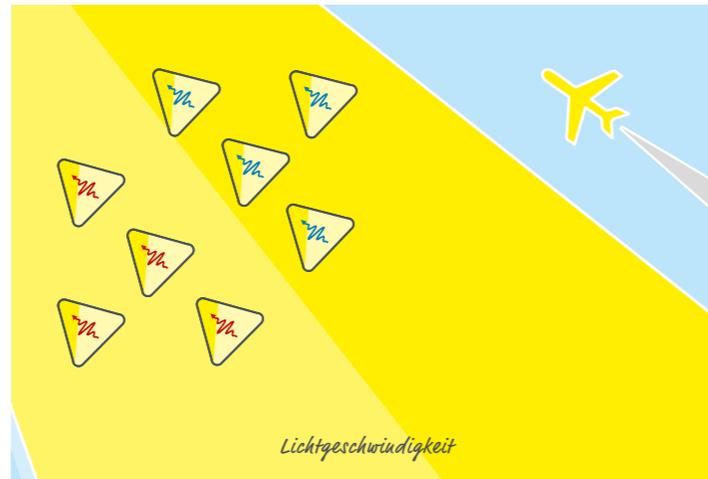
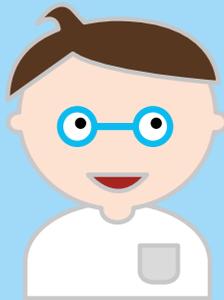
**Was ist zu tun?** Nimm die DVD und klebe sie im Inneren der Schachtel auf eine der kurzen Seiten. Die farbige Seite der DVD muss nach Innen schauen. Jetzt schneide vorsichtig ein rechteckiges Fenster auf der gegenüberliegenden Seite der Schachtel. Das Fenster soll etwa 1 cm vom Rand der Schachtel entfernt, 2 cm hoch und etwa 0,5 cm breit sein. Es muss so positioniert sein, dass wenn Du durch das Fenster parallel zur langen Kante die Schachtel anschaust, Du einen Teil der DVD gut sehen kannst. Jetzt nimm das Isolierband und klebe zwei Streifen davon auf das Fenster, sodass nur ein dünner Spalt (etwa 0,5 mm breit) in der Mitte bleibt. Das ist der Eingang für das Licht. Du brauchst noch einen Ausgang, wo du mit deinen Augen die Farben sehen kannst. Dafür schneide ein rechteckiges Loch auf der langen Seite der Schachtel, die weiter weg vom Spalt ist. Jetzt kannst Du die Schachtel schließen und alle Öffnungen mit dem schwarzen Band versiegeln (außer Eingang und Ausgang!). Jetzt stelle die Schachtel unter eine Lampe, sodass das Licht in den Spalt eintreten kann. Du solltest schöne Farben (von Blau bis Rot) auf der DVD sehen. Dein Spektrograf ist fertig!



Jetzt kannst Du diesen nutzen, um verschiedenen Lichtquellen zu unterscheiden. Du kannst mit dem Himmel anfangen, auch wenn er bewölkt ist (bitte nicht die Sonne direkt anschauen!). Du wirst eine Art Regenbogen sehen. Alle Farben treten ohne Unterbrechungen auf. Dasselbe passiert bei Glühlampen. Anders ist es bei Gasentladungslampen, wie „Sparlampen“. In diesem Fall solltest Du bunte Streifen erkennen, die durch dunkle Streifen getrennt sind. Die hellen Streifen entsprechen den Farben des Lichtes, die durch Quantensprünge in den Atomen im Innern der Lampe sind!

**Was passiert?** Die Oberfläche der DVD enthält ganz viele Rillen, die so nah beieinander liegen, dass man sie nicht getrennt sehen kann. Auf diesen Rillen sind Lieder oder Filme gespeichert. Die Anordnung der Rillen ist in der Lage, das Licht zu „beugen“. Das Licht verhält sich dabei wie eine Welle. Unterschiedliche Farben werden in unterschiedliche Richtungen gebeugt. Da das weiße Licht aus der Überlagerung verschiedener Farben besteht, ist die DVD in der Lage, diese Farben räumlich zu trennen. Auf diese Weise kannst du das „Spektrum“ verschiedener Lampen sehen und erkennen, auch welche Lampe ein aus Atomen bestehendes Gas enthält.

Was ist Licht und was hat seine Farbe mit Energie und Geschwindigkeit zu tun?



Ähnlich wie die Elektronen, können wir uns vorstellen, dass das Licht aus Teilchen oder Wellen besteht. Alles hängt davon ab, wie wir es betrachten. Die Licht-Teilchen nennen wir „Photonen“. Bei einem Quantensprung eines Elektrons in einem Atom wird meistens ein **einzelnes Photon** erzeugt. Wie oben erläutert, ist die Energie dieses Photons genau definiert und korrespondiert mit einer genau definierten **Farbe**. Da wir das Licht auch als Welle betrachten können, entspricht jede Farbe einer bestimmten **Wellenlänge**.

Und tatsächlich gibt es eine Beziehung zwischen der Energie und der Wellenlänge des Lichts. Violette Licht besteht z.B. aus hochenergetischen Photonen, oder aus Wellen mit kurzer Wellenlänge. Rotes Licht besteht dagegen aus niederenergetischen Photonen oder aus Wellen mit größeren Wellenlänge. Das ist genau das, was die Quantenmechanik besagt.

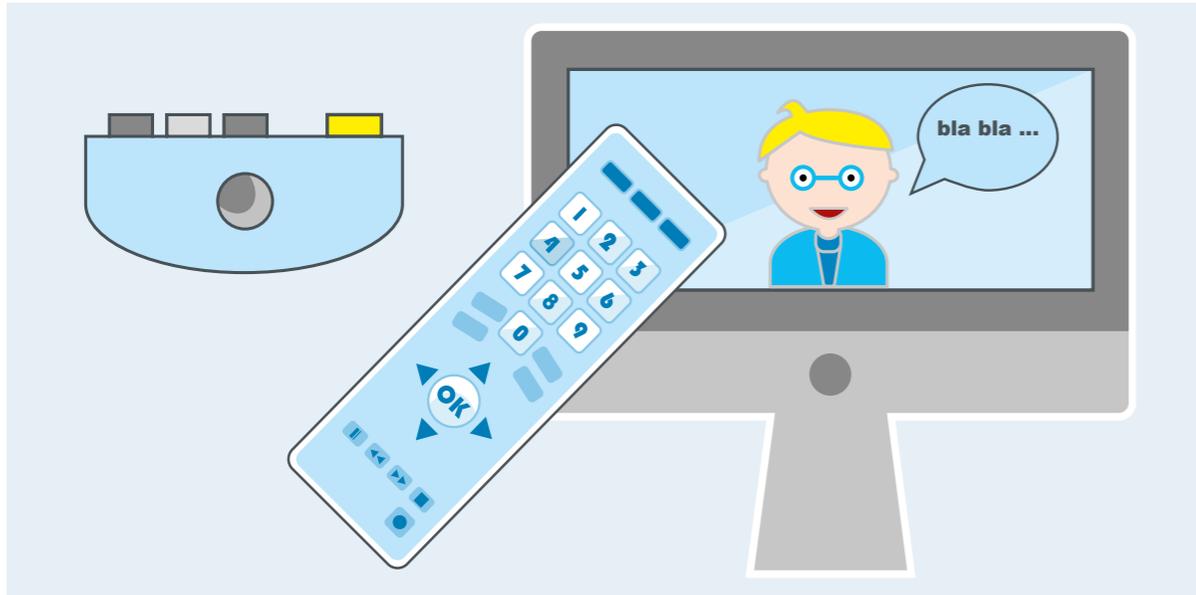
Wir möchten hier anmerken, dass die Farben, die unsere Augen sehen können, nur ein winziger Bruchteil des **elektromagnetischen Spektrums** sind. Bei hohen Energien (niedrigen Wellenlängen) finden wir z.B. **ultraviolettes Licht** und **Röntgen-Strahlen**, bei niedrigen Energien (langen Wellenlängen) **infrarotes Licht** (vgl. **Experiment 3**) und **Radiowellen**. Obwohl die Benennungen unterschiedlich sind, handelt es sich in allen Fällen um „Licht“!

Beachten wir aber, dass **die Geschwindigkeit eines Photons nicht von seiner Energie abhängig ist**. Das ist eine merkwürdige Eigenschaft der Photonen.

Bei Objekten wie einem Auto oder einem Ball stehen die Energie und die Geschwindigkeit in Beziehung zueinander: je höher die Energie, desto höher die Geschwindigkeit. Das gleiche gilt für Elektronen (jedenfalls wenn ihre Geschwindigkeit nicht zu groß ist), nicht aber für Photonen.

Der Unterschied zwischen Photonen und anderen Objekten ist, dass Photonen **keine Masse** haben, sondern nur Energie, und dass sie sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen müssen, der **Lichtgeschwindigkeit**. In der Luft oder im Vakuum beträgt diese Geschwindigkeit rund 1.000.000.000 km/h – das ist viel schneller als die Reisegeschwindigkeit eines Flugzeugs (ca. 900 km/h), und bei solchen Geschwindigkeiten ist alles anders ... Das seltsame Verhalten von Objekten, die sich mit großen Geschwindigkeiten bewegen, wurde von Albert Einstein in seiner **Relativitätstheorie** beschrieben.

Wir wollen aber dieses Thema hier nicht weiter vertiefen. Wichtig ist hier nur anzumerken, dass die Welt, die wir vom Alltagsleben mit unseren Sinnen kennen, nur ein Bruchteil des Ganzen ist. Sobald wir uns etwas von den alltäglichen Bedingungen entfernen, entdecken wir Rätsel, die nur durch große Bemühungen, geniale Ideen und Vorstellungsvermögen entschlüsselt werden können. Und sicherlich sind die Überraschungen noch nicht erschöpft!



# 3 Experiment



Wie können wir infrarotes Licht sichtbar machen?!

**Was Du brauchst:** ■ 1 Fernbedienung ■ 1 Handy mit Kamera

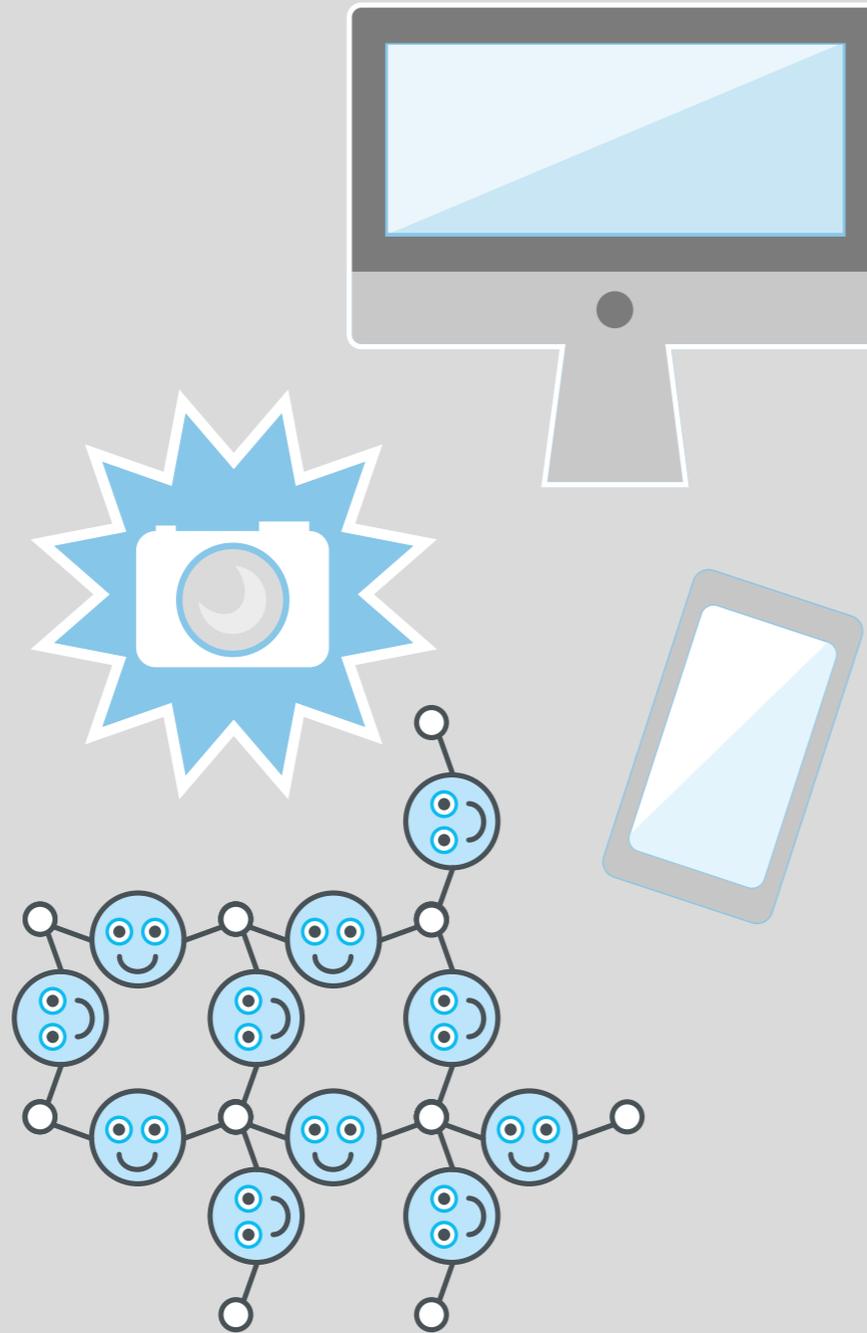
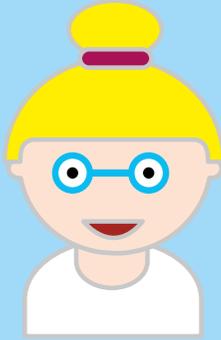
**Was ist zu tun?** In den meisten Fernbedienungen sieht man auf der Vorderseite eine dunkle Halbkugel oder ein kleines dunkles Plastikfenster. Dahinter sitzt eine Leuchtdiode (LED), die infrarotes Licht emittiert. Wenn Du einen Knopf der Fernbedienung drückst, leuchtet diese LED und sendet damit Befehle, z.B. zum Fernseher. Unsere Augen können dieses infrarote Licht aber nicht wahrnehmen. Wir können eben nur Farben von Violett zu Rot sehen (sichtbarer Bereich), aber kein Infrarot und auch nicht Ultraviolett. Jetzt schalte deine Handykamera an und richte sie auf die Fernbedienung. Wenn Du jetzt einen Knopf drückst, solltest Du ein blinkendes Licht sehen!

**Warum ist das so?** Die Kamera in deinem Handy besteht aus Silizium, welches nicht nur im sichtbaren Bereich lichtempfindlich ist, sondern auch im infraroten! Am Fernseher ist auch irgendwo eine Art Auge (ein Lichtdetektor), das das infrarote Licht der Fernbedienung sehen kann. Deshalb kannst Du das Fernsehgerät nicht steuern, wenn Du eine Hand vor die LED hältst. Das Fernsehgerät kann dann das Licht nicht empfangen!

**Was ist, wenn Du mit der Kamera nichts siehst?** Es könnte sein, dass deine Kamera mit einem Infrarotfilter versehen ist, welcher das Infrarotlicht absorbiert. Versuch es noch mal mit einem anderen (eventuell älteren) Handy oder einer Videokamera!

Bevor wir uns mit künstlichen Atome beschäftigen, wollen wir auf eine praktische Frage eingehen:

Was hat uns die Quantenmechanik bisher genutzt?



Kristalliner Festkörper (z.B. Halbleiter)

Obwohl sie seltsam erscheint, hat uns die Quantenmechanik ermöglicht, nicht nur Atome und Gase zu verstehen, sondern auch **Festkörper**. Festkörper bestehen aus vielen Atomen, die zusammengebunden sind und sich berühren. Verantwortlich für die Bindung sind wieder die elektrostatischen Kräfte. Im Gegensatz dazu bestehen atomare **Gase** aus Atomen, die weit voneinander entfernt sind, und daher wenig miteinander wechselwirken. Zwischen isolierten Atomen und Festkörpern finden wir **Moleküle**, die aus einigen aneinander gebundenen Atomen bestehen. Die Luft, die wir atmen, besteht zum Beispiel hauptsächlich aus **Stickstoff-** und **Sauerstoffmolekülen**. Kommen wir aber zurück zu den Festkörpern. Besonders interessant sind **kristalline Festkörper**, bei denen die Atome eine fast perfekte räumliche Anordnung aufweisen.

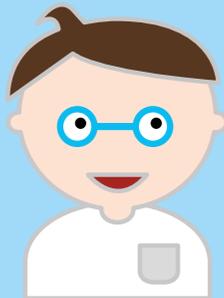
Eine wichtige Klasse von kristallinen Festkörpern sind Materialien, die wir als „**Halbleiter**“ bezeichnen. Diese Materialien finden in jedem elektronischen Gerät Anwendung, wie etwa dem Prozessor eines **Computers**, in einem **Handy** oder einer **Videokamera**, im **Laser** eines DVD- oder Blue-Ray Players oder in den **Leuchtdioden (LEDs)**, welche in Fernbedienungen, TV-Geräten und zur Beleuchtung verwendet werden.

Es gibt viele Arten von Halbleitermaterialien, und ihre Auswahl hängt von der speziellen Anwendung ab. In Prozessoren und Kameras findet man hauptsächlich **Silizium** und, in geringerem Ausmaß, **Germanium**. Diese Elemente sind gut zum Transport elektrischer Signale oder zur Umwandlung von Licht in Elektrizität geeignet, aber nicht so gut für Anwendungen, die auf Lichtemission abzielen.

In LEDs und Lasern verwendet man zumeist **Halbleiterverbindungen**, welche **Gallium**, **Aluminium** und andere Elemente wie **Stickstoff**, **Arsen** oder **Phosphor** enthalten. Die Verbindungen **Galliumnitrid (GaN)** oder **Galliumarsenid (GaAs)** emittieren zum Beispiel Licht gut. Da sie aus unterschiedlichen Atomen bestehen, hat das emittierte Licht unterschiedliche Farben. GaN emittiert blaues und ultraviolettes Licht, GaAs emittiert Licht im **infraroten** Bereich. Diese Farbe kann man mit bloßen Augen nicht sehen (vgl. dazu Experiment 3).

Ohne die Erkenntnisse der Quantenmechanik gäbe es keine der oben genannten Geräte und auch keine Festplatten und USB-Sticks zur Speicherung von Bildern und Daten, kein Internet, etc. Also können wir durchaus sagen, dass die Quantenmechanik nicht nur faszinierend sondern auch sehr nützlich ist!

Wofür könnte die Quantenmechanik noch nützlich sein?



Sichere Kommunikation anhand der Quantenmechanik

Die Möglichkeiten der Quantenmechanik wurden bisher noch nicht zur Gänze ausgeschöpft. Es gibt Ideen, die Quantenmechanik zur Konstruktion noch leistungsstärkerer Computer zu nutzen, und Daten auf völlig sichere Weise zu übertragen. Die meisten Ideen beruhen auf den oben erläuterten Konzepten von **Superpositionsprinzip** und **Kollaps der Wellenfunktion**.

Als Beispiel nehmen wir das Problem der **Sicherheit der Kommunikation**. Es ist nämlich heutzutage schwierig zu erkennen, ob Unbekannte (Hacker, Computerviren oder Geheimdienste z.B.) private Nachrichten mitlesen. Dies ist nicht nur ärgerlich für die Betroffenen, es kann auch zur

Gefährdung unserer Sicherheit führen und nicht zuletzt große Verluste verursachen, wenn z.B. jemand Codes von Kreditkarten „mitliest“.

Ein Lösungsansatz ist, die Tatsache zu nutzen, dass man die Information eines **quantenmechanischen Systems** nicht lesen oder beobachten kann, ohne es zu stören und zu ändern. Wir haben schon das Beispiel mit dem Auto und dem Blitzer gemacht. Wir können uns dieses Phänomen auch so vorstellen: Wir lesen ein Buch, und die Buchstaben verändern sich, sobald wir sie ansehen! Wenn wir einem Freund eine Nachricht schicken und dabei die Gesetze der Quantenmechanik anwenden, wird jeder Versuch, diese Nachricht zu stehlen, eine Änderung der Nachricht bewirken. Wenn also jemand versucht, die Nachricht zu lesen, wird unser Freund eine Nachricht ohne jeden Sinn erhalten und daraus erkennen, dass jemand versucht hat, diese Nachricht zu lesen!

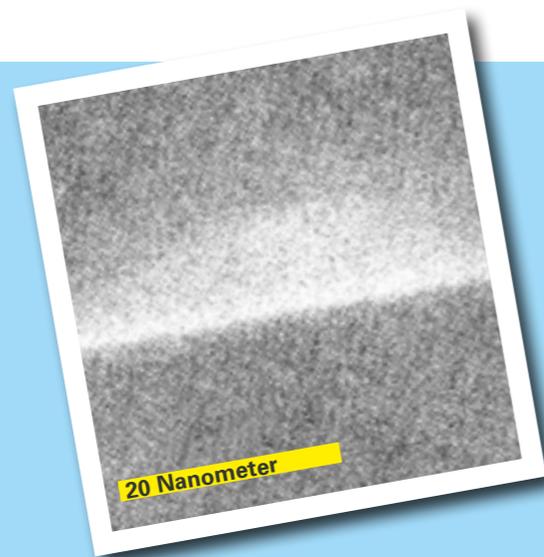
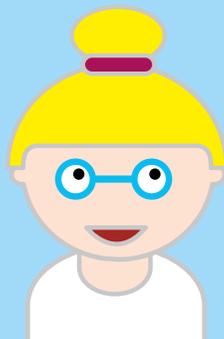
Das ist eine faszinierende Vorstellung und ist unter dem Begriff **„Quantenkommunikation“** bereits öfter in den Medien erschienen, sie ist aber bisher nur in begrenzter Form Realität. Der Grund liegt darin, dass man viele neue Komponenten benötigt, um ein **„Quantenkommunikationssystem“** zu erzeugen. Man muss in der Lage sein, **„Quantensignale“** zu erzeugen, diese zu übertragen, zu speichern und geschickt auszulesen. Die am besten bekannte Form von **„Quantensignalen“** sind die oben erwähnten Photonen.

Einzelne Atome könnten für die meisten Aufgabenstellungen der **Quantenkommunikation** genutzt werden, aber es gibt dabei ein Problem: Es ist ziemlich umständlich, einzelne Atome im Raum festzuhalten, da sie dazu neigen davonzufliegen. Aus diesem Grund hatten WissenschaftlerInnen die Idee, **„künstliche Atome“** zu erzeugen, die auch **„Quantenpunkte“** genannt werden.

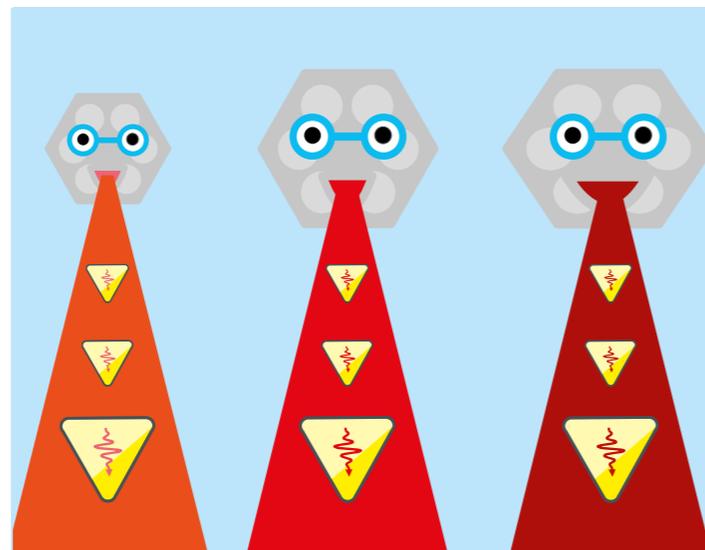
Diese **künstlichen Atome** können als hervorragende Quellen für unsere **„Quantensignale“** genutzt werden, aber sie sind nicht so gut, was die Speicherung solcher Signale betrifft. Zu diesem Zweck eignen sich **„Wolken“** natürlicher Atome besser, die sich z.B. in einem Glasgefäß befinden (ähnlich der Gasentladungslampe).

Dies ist die Idee, die dem Projekt der Europäischen Union **„Hybrid Artificial and Natural Atomic Systems“** (kurz HANAS) zugrunde liegt: Die **Kombination von künstlichen und natürlichen Atomen**.

Was ist ein künstliches Atom (oder ein „Quantenpunkt“)?



Transmissionselektronenmikroskopie-Aufnahme eines Quantenpunktes umgeben von einem Halbleiter



Lichtemission von Quantenpunkten: Die Größe zählt!

Ein künstliches Atom ist eine **Nanostruktur**, bestehend aus einem **Halbleitermaterial**, die von einem anderen Halbleitermaterial umgeben ist.

Wir können uns einen Quantenpunkt als einen winzigen flachen Kegel vorstellen, der eine typische Höhe von 2 bis 10 Nanometer und eine Breite von etwa 10 bis 50 Nanometer besitzt. Aufgrund seiner Größe besteht so ein Objekt aus **einigen Tausenden Atomen**, die zusammengebunden sind.

Die Bindung zwischen den Atomen eines Halbleiters (wie auch anderer Festkörper) führt dazu, dass gemeinsame Energiezustände für die Elektronen im Material entstehen. Wenn die Größe eines Halbleiterstückes mehr als einige Mikrometer beträgt, liegen diese Zustände sehr nah zueinander. Das emittierte Licht zeigt deshalb ein kontinuierliches Spektrum, bestehend aus vielen Farben ohne Unterbrechungen.

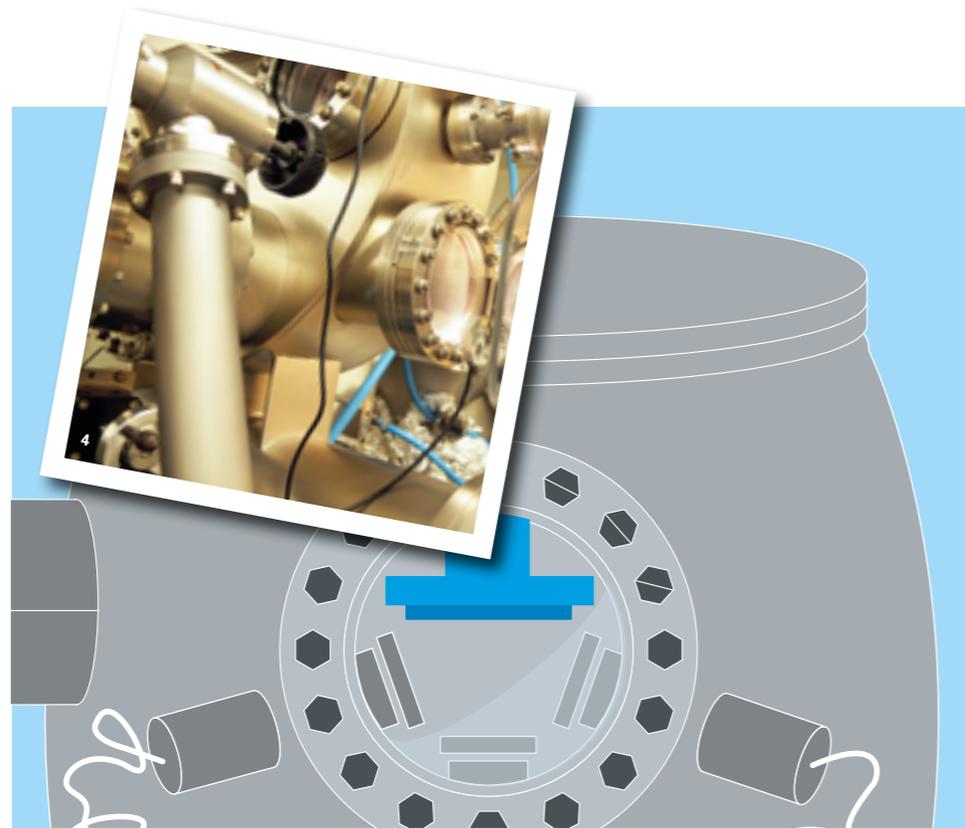
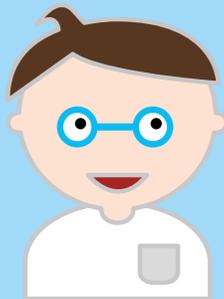
Wenn aber die Größe des Halbleiterstückes im Nanometer-Bereich liegt und die Materialien richtig ausgewählt werden, ist so ein künstliches Atom in der Lage, Elektronen in einem winzigen Volumen einzufangen. Auf diese Weise wird der Quantenpunkt ebenfalls den Gesetzen der Quantenmechanik folgen und die Elektronen werden wie in natürlichen Atomen **diskrete Energiewerte** haben.

Die Abstände zwischen diesen Energiezuständen hängen nicht nur vom Material ab, sondern auch von der **Größe** des Bereichs, in dem das Elektron eingefangen ist: Je kleiner der Quantenpunkt, desto größer die Zwischenräume zwischen den „Stufen der Energieleiter“. Wenn wir also die Farbe des Lichts vergleichen, das von einem kleinen und einem großen Quantenpunkt emittiert wird, beobachten wir folgendes: der kleine Quantenpunkt emittiert Photonen mit höherer Energie (kleinerer Wellenlänge) als der große Quantenpunkt.

Die Hauptunterschiede zwischen künstlichen und natürlichen Atomen bestehen also darin, dass die künstlichen Atome viel größer sind, und dass sie in einem Festkörper wie in einem Käfig eingesperrt sind, sodass sie nicht umherfliegen können.

Wie kann man ein künstliches Atom herstellen?

Was ist eine Molekularstrahlepitaxie-Anlage?



Wie oben gesagt, benötigen wir zwei Arten von Halbleitern, eine zum Einfangen von Elektronen (der Quantenpunkt) und die andere als Käfig (oder auch **Barriere** genannt). Es gibt viele verschiedene Sorten von Halbleitern. Eine mögliche Kombination besteht aus **Gallium-Arsenid** (kurz genannt GaAs) für den Quantenpunkt und aus einer Legierung von Aluminium-Arsenid und Gallium-Arsenid (kurz genannt **AlGaAs**) für die Barriere.

Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften dieser zwei Materialien besitzen Elektronen in GaAs eine niedrigere Energie als in AlGaAs. Elektronen wandern daher „gerne“ in das GaAs, wo sie eingefangen werden.

Wie kann man so eine Nanostruktur aus GaAs, umgeben von AlGaAs, herstellen? Dafür braucht man eine Art „Brutkasten“. Ein Beispiel hierfür ist ein System, welches **Molekularstrahlepitaxie-Anlage** genannt wird.

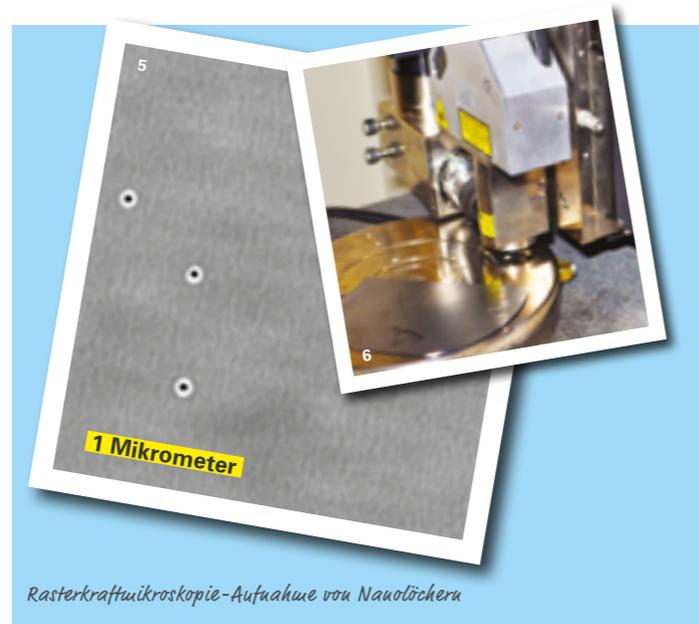
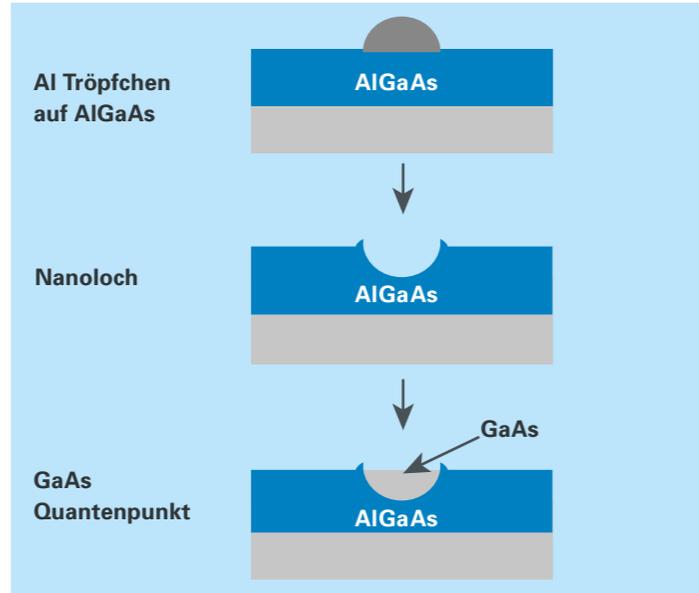
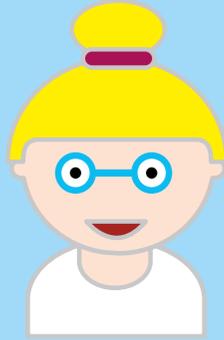
Auch wenn der Name kompliziert ist, ist eine Molekularstrahlepitaxie-Anlage (kurzgenannt **MBE**) ziemlich einfach zu verstehen. Sie besteht aus einem **Stahlkessel**, der mit leistungsstarken **Vakuumpumpen** evakuiert wird.

Verschiedene Materialien können auf eine kristalline Scheibe (**Substrat**) aufgedampft werden. Aluminium, Gallium, Arsen und andere Materialien befinden sich in **Tiegeln** im Inneren der MBE, welche auf mehrere hundert Grad Celsius erhitzt werden können. Dadurch schmelzen die Materialien und „verdampfen“ teilweise ins Vakuum, d.h. einige Atome „fliegen aus den Tiegeln heraus“. Die Anzahl dieser Atome hängt von der Temperatur des Tiegels und von der Zeit ab. Je höher die Temperatur ist, desto schneller verdampft das Material. Die Atome, die aus einem Tiegel austreten, flitzen in alle Richtungen, insbesondere auch in Richtung des Substrates. Dabei ist es wichtig, dass der Kessel keine Luft enthält, da diese den Flug der Atome stören würde.

Die Atome prallen mit hoher Geschwindigkeit auf dem Substrat auf, das auch beheizt wird, aber weniger als die Tiegel. Dadurch wird erreicht, dass sich die Atome noch ein wenig auf dem Substrat umherbewegen können, bevor sie eine Stelle finden, an der sie eine Bindung zu den Atomen des Substrates ausbilden können, wodurch sie wieder einen kristallinen Festkörper bilden können.

Vor der Öffnung jedes Tiegels befindet sich eine bewegliche Klappe (auf Englisch **„Shutter“**), die man für eine beliebige Zeit öffnen und schließen kann. Damit können Schichten verschiedener Materialien auf dem Substrat aufgebracht werden. Die Dicke dieser Schichten lässt sich sehr genau kontrollieren. Man kann sogar Schichten aufbringen, die aus nur eine Atomlage bestehen!

Wie kann man GaAs  
Quantenpunkte, umgeben  
von einer AlGaAs Barriere,  
herstellen?



Das Substrat besteht hier aus einer GaAs-Scheibe. Darauf wird eine ebene Schicht AlGaAs durch gleichzeitiges Verdampfen von Aluminium (Al), Gallium (Ga) und Arsen (As) hergestellt. Diese Schicht dient als untere Barriere für unsere Quantenpunkte. Anders gesagt, werden die Elektronen in diese Barriere nur geringfügig eindringen. Jetzt benötigen wir kleine Nanostrukturen aus GaAs. Dabei hilft uns die Natur, wie wir gleich sehen werden.

Das Substrat wird auf eine hohe Temperatur (600°C) erhitzt und Aluminium wird darauf gedampft (also ohne Gallium und Arsen). Sobald die Aluminiumatome aus dem Tiegel auf dem Substrat landen, beginnen sie herumzuwandern und nach einem guten „Bindungsplatz zu suchen“. Da für die Kristallbildung aber auch As-Atome nötig wären, besteht der Zustand niedrigster Energie für die Al-Atome darin, sich zu winzigen **Tröpfchen** aus flüssigem Aluminium zu vereinen.

Die Größe dieser Tröpfchen hängt davon ab, wieviel Aluminium abgeschieden wird und auch davon, wieviel Zeit die Atome haben, sich frei zu bewegen. Die Atome bewegen sich dabei auch von einem Tröpfchen zum anderen, und die großen Tröpfchen neigen dazu, die kleinen zu „fressen“, weil größere Tröpfchen eine kleinere Energie aufweisen als kleinere. Dieses Phänomen wird als „**Ostwald-Reifung**“ bezeichnet.

Ein kleines Experiment zeigt uns, wie sich ähnliche Tröpfchen aus Wasser bilden und wachsen (vgl. dazu **Experiment 4**).

Aus dem Experiment wissen wir nun, wie Tröpfchen erzeugt werden können. Die Tröpfchen, die wir für die künstlichen Atome benötigen, sind allerdings viel kleiner. Sie müssen einige zehn Nanometer groß sein, also 100.000 mal kleiner als ein Millimeter. Daher können wir sie unmöglich mit freiem Auge sehen, aber zum Glück gibt es starke **Mikroskope**, mit denen sie betrachtet werden können. Ein Beispiel hierfür ist das **Rasterkraftmikroskop** (auf Englisch „Atomic Force Microscope“, kurz AFM). Außerdem sind die Tröpfchen so winzig, dass kein Risiko besteht, dass sie zurück an ihren Ausgangspunkt (Tiegel) fallen. Die Schwerkraft spielt bei der Größe der Tröpfchen kaum eine Rolle!

Zur Erzeugung solcher Tröpfchen können wir allerdings keinen Herd verwenden, weil eine extrem hohe Temperatur zur Verdampfung des Aluminiums nötig ist. Außerdem können wir keine Luft im Umfeld brauchen, weil Aluminium in der Luft oxidiert, und das wäre nicht gut. Aus diesem Grund werden die Tröpfchen im Vakuum einer MBE hergestellt.

Nun haben wir die Aluminium-Tröpfchen auf dem Substrat. Sie sind aber noch nicht unsere Quantenpunkte. Aluminium ist ein Metall und kein Halbleiter! Aber etwas Interessantes passiert, wenn man die Aluminiumtröpfchen auf der AlGaAs Barriere belässt: die Tröpfchen „saugen“ mit der Zeit einen Teil des Arsens des darunterliegenden Substrats auf und erzeugen winzige Löcher. Gleichzeitig wandern Al und Ga-Atome mit dem gewonnenen As weg von den Zentren der Löcher und bilden kleine Ringe aus AlGaAs um die „Nanolöcher“ herum. Die entstandenen „Nanolöcher“ haben ähnliche Größen wie die Tröpfchen, und wenn wir die Aluminiummenge genau dosieren, können wir auch die Größe der Löcher ziemlich genau festlegen. Eine Rasterkraftmikroskopie-Aufnahme solcher Nanolöcher, umgeben von einem AlGaAs Ring, ist auf S. 30 zu sehen. Die dunklen Gebiete entsprechen Vertiefungen in der AlGaAs-Oberfläche, während die hellen Ringe lokale Erhöhungen der Oberfläche sind.

Der letzte Schritt ist die Befüllung der Löcher mit dem geeigneten Halbleitermaterial, in unserem Fall GaAs. An diesem Punkt haben wir winzige GaAs-Gebilde, welche als künstliche Atome dienen und die wir mit AlGaAs umhüllen können. Dafür wird erst eine dünne GaAs-Schicht und dann eine AlGaAs-Schicht verdampft. Um die Befüllung zu erreichen, muss der GaAs-Schicht etwas Zeit gegeben werden. Während dieser Zeit (einige Minuten) kann das GaAs in die Nanolöcher wandern, um die Oberfläche zu glätten. Der Grund dafür ist, dass Löcher auf einer Oberfläche energetisch ungünstig sind, sodass sie dazu neigen, sich spontan zu verschließen. Dieses Phänomen wird „Kapillarität“ genannt.

Das Gute ist, dass wir innerhalb von wenigen Sekunden Millionen von künstlichen Atomen erhalten, die in einem Halbleitermaterial eingeschlossen sind.

Das Substrat mit darauf liegenden Quantenpunkten kann jetzt aus dem Brutkasten (der MBE) geholt und als Lichtquelle benutzt werden. Wir wollen jetzt die Lichtemission eines künstlichen Atoms näher betrachten.

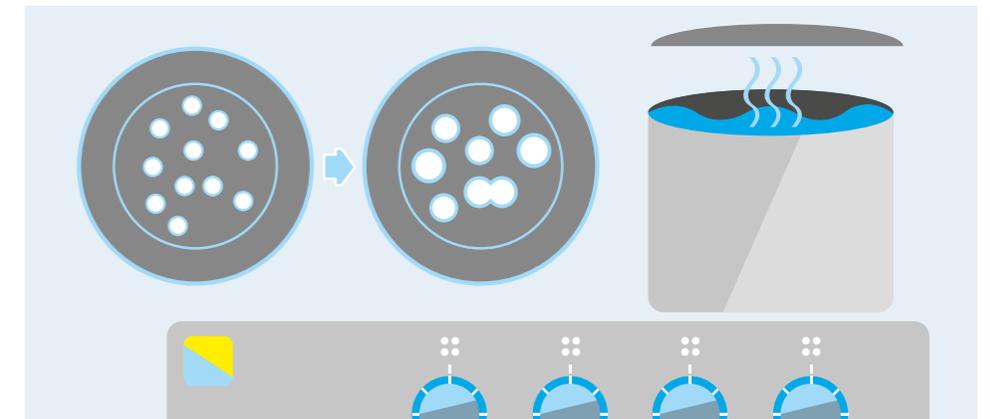
## 4 Experiment



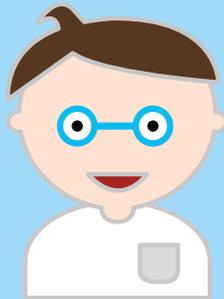
Entstehung von Tropfen und Reifung

**Was Du brauchst:** ■ 1 Topf ■ Wasser ■ 1 Glasteller

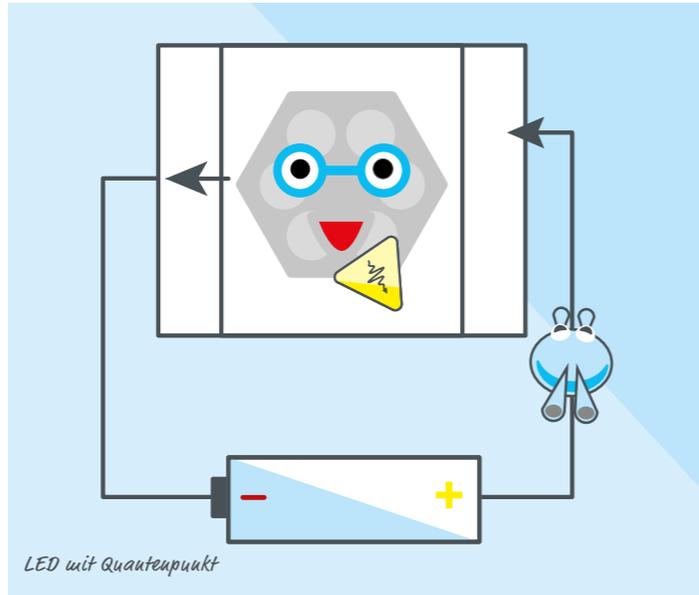
**Was zu tun ist und was passiert:** Nimm den Topf und fülle eine kleine Menge Wasser hinein. Dann bedecke den Topf mit dem Glasteller und stelle ihn auf den Herd. Schalte den Herd ein und beobachte genau, was an der Unterseite des Glastellers passiert. Als Hilfsmittel kannst Du auch eine Lupe verwenden. Während sich das Wasser erwärmt, verdampft es und kondensiert auf dem Glasteller, ähnlich dem Halbleitersubstrat. Die Dampfmoleküle bilden zuerst winzige Tröpfchen. Sobald Du die ersten Tröpfchen erkennst, schalte den Herd ab und beobachte den Teller weiter. Du wirst sehen, dass sich vieles bewegt: Große Tropfen wachsen („reifen“) und kleine Tröpfchen verschwinden.



Wie können künstliche Atome Licht emittieren und wie funktioniert eine LED?



Wie unterscheidet sich das Licht eines künstlichen Atoms vom Licht einer herkömmlichen LED?



LED mit Quantenpunkt

Eine wichtige Eigenschaft der künstliche Atome ist, dass die Lichtemission herbeigeführt werden kann, indem ganz einfach elektrische Spannung an sie angelegt wird. In dieser Beziehung ähneln sie Leuchtdioden (LEDs), die zur Beleuchtung oder in modernen TV-Geräten Anwendung finden.

**Wie funktioniert das eigentlich?** Erinnern wir uns daran, wie die Lichtemission in einem Atom funktioniert: Ein Elektron wird von einem niedrigen Energieniveau entfernt, wodurch ein Elektron von einem höheren Niveau herunterspringen und Licht aussenden kann. In einer LED gibt es eine „aktive“ Region, die für die Lichtemission zuständig ist und zwei Regionen, die zur Hineinbeförderung der

Elektronen in die aktiven Regionen und zur Herausbeförderung aus diesen dienen. Es funktioniert so: Man entfernt niedrigerenergetische Elektronen von der einen Seite (links im Bild) und „pumpt“ hochenergetische Elektronen von der anderen Seite (rechts im Bild) herüber.

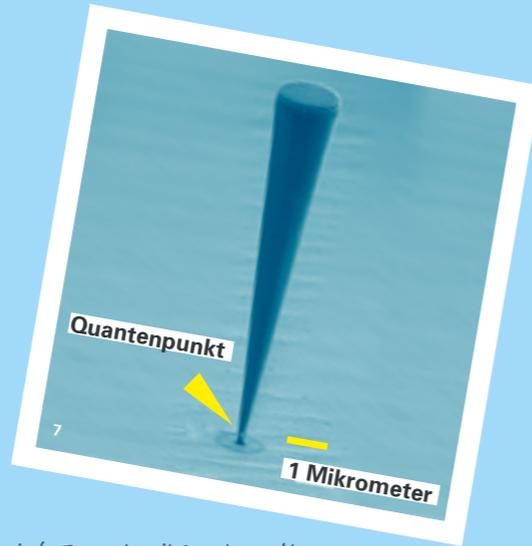
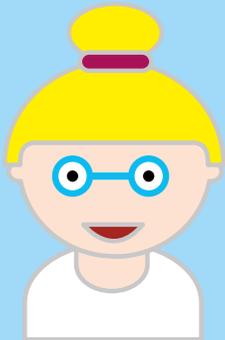
Die Elektronen mit hoher Energie entdecken freie Plätze auf niedrigeren Energieniveaus, springen hinunter, indem sie Licht aussenden, und danach werden sie wieder entfernt, um Platz für weitere Elektronen zu schaffen. Auf diese Weise kann der Prozess der Lichtemission kontinuierlich wiederholt werden.

Man kann die LED auch ein- und ausschalten, indem man sie von der Elektrizitätsquelle, z.B. von einer Batterie trennt, die die Elektronen in die aktive Region hinein- und wieder herausbefördert. Etwas Ähnliches passiert, wenn wir den Knopf der Fernbedienung drücken, damit der Infrarot-LED eine Sequenz elektrischer Signale gesendet wird, die in der LED in Lichtpulse mit einem bestimmten zeitlichen Muster verwandelt werden (**siehe hierzu Experiment 3**).

Nun kommt das Interessante: Wenn sich ein Quantenpunkt in der aktiven Region befindet und man die Stromquelle sehr schnell ein- und ausschaltet, bekommt man nur ein **einziges Photon** aus einem Quantenpunkt, und zwar jedes Mal wenn man ein elektrisches Signal sendet. Das ist eine Eigenheit, die eine LED mit einem künstlichen Atom in der aktiven Region von einer herkömmlichen LED unterscheidet. Bei einer herkömmlichen LED kann man mehr als ein Elektron in vielen ähnlichen Energiezuständen erhalten, sodass auch viele Photonen gleichzeitig mit etwa der gleichen Farbe ausgesendet werden. Der Grund dafür ist, dass die aktive Region groß ist und die Stufen der Energieleiter sehr nahe beieinander liegen. In einem Quantenpunkt sind die Stufen aber weit voneinander entfernt und das Pauli'sche Ausschlussprinzip garantiert, dass man höchstens ein Photon erhält, wenn man den Quantenpunkt mit einem höherenergetischen Elektron besetzt und ein niederenergetisches entfernt. Bevor wir diesen Teil abschließen, müssen wir noch eine etwas ärgerliche Eigenschaft von künstlichen Atomen besprechen. Obwohl der Halbleiter-„Käfig“ erlaubt, diese im Raum zu fixieren, macht er es auch schwierig, daraus Licht zu erzeugen. Das ist wirklich ein Problem, weil wir alle Photonen, die von unserem Quantenpunkt ausgesendet werden, für die Quantenkommunikation herausbekommen möchten.

Warum ist es schwierig aus einem Halbleiter Licht herauszubekommen?

Wie lässt sich mit Totalreflexion umgehen?



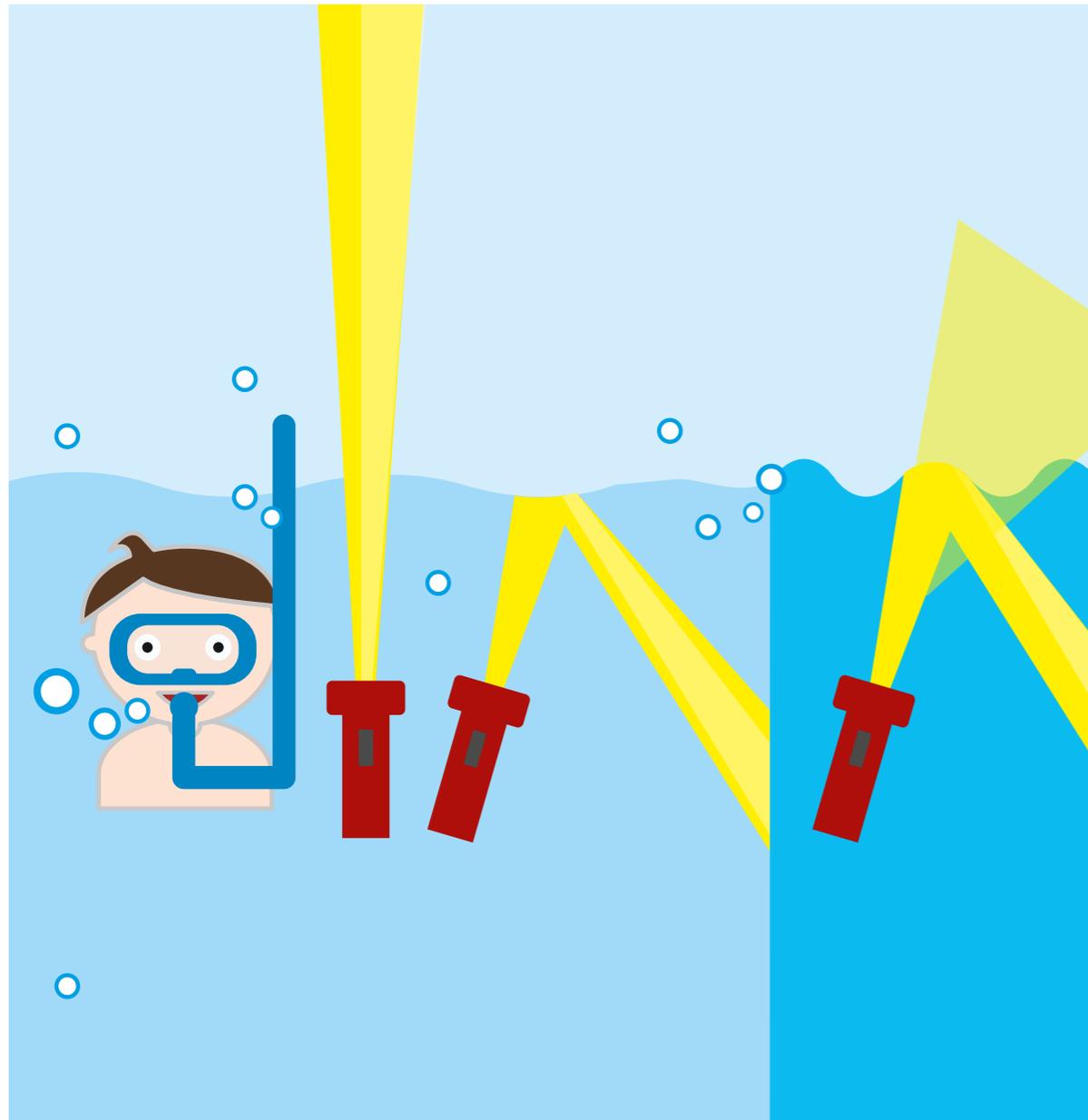
Photonische Trompete mit Quantenpunkt

Die Ursache des Problems ist ein Phänomen mit der Bezeichnung „**Totalreflexion**“, welches immer dann auftritt, wenn man versucht, Licht aus einem Medium in die Luft auszusenden. Mit Medium meinen wir ein transparentes Material, sei es fest oder flüssig. Jedes transparente Medium wird charakterisiert durch eine Zahl, die **Brechungsindex** genannt wird. Auch die Luft ist ein transparentes Medium und ihr Brechungsindex beträgt etwa 1. Bei Wasser liegt der Wert bei 1,5. Bei Halbleitern ist der Brechungsindex viel größer. Bei AlGaAs liegt er z.B. bei etwa 3. Je größer das Verhältnis zwischen Brechungsindex des Mediums und der Luft ist, desto größer ist die Totalreflexion. Das Resultat ist, dass nur weniger als 1% der emittierten Photonen aus dem Halbleiter herauskommen! Um das zu verstehen, müssen wir ein anderes Phänomen

in Betracht ziehen: die „**Brechung**“. Wenn das Licht von einem Medium zu einem anderen mit einem kleineren Brechungsindex schräg einfällt, ändert sich seine Richtung: Der Lichtstrahl wird „**gebrochen**“. Genauer gesagt, wird der Winkel zwischen dem Lichtstrahl und der Grenzfläche zwischen den zwei Medien kleiner. Für einen bestimmten („**kritischen**“) Wert des Winkels zwischen Lichtstrahls und Grenzfläche wird der austretende Strahl parallel zur Grenzfläche. Es ist klar, dass wenn der Winkel zwischen dem Lichtstrahl im Medium und der Grenzfläche noch flacher wird, kein Licht mehr austreten kann! Wir können das Phänomen der Totalreflexion, wie hier vorgeschlagen beobachten (**siehe dazu Experiment 5**).

Wenn man nichts gegen die Totalreflexion unternehmen würde, würde das meiste emittierte Licht im Halbleiter bleiben und (letztendlich in Form von Wärme) verloren gehen. Dieses Problem tritt natürlich auch bei herkömmlichen LEDs auf und reduziert ihre Effizienz. Daher braucht man einige Tricks, um die Totalreflexion zu umgehen. Eine einfache Lösung besteht darin die Oberfläche des Halbleiters mit **Rillen** zu versehen, die einen ähnlichen Effekt wie die Wellen im **Experiment 5** haben. Man kann auch den Halbleiter in einer Halbkugel eines anderen transparenten Mediums einhüllen. Deshalb haben die meisten LEDs eine Kugelform! Bei allen diesen Ansätzen bleibt aber die Lichtausbeute begrenzt.

Für künstliche Atome, die nur einzelne Photonen emittieren, ist aber jeder Verlust gravierend. WissenschaftlerInnen hatten daher die Idee, die Halbleiter-Barriere um einen Quantenpunkt in die Form einer „**photonischen Trompete**“ umzuwandeln. Diese Strukturen haben einen Durchmesser von nur etwa 200 Nanometern und eine Höhe von einigen Mikrometern, wie in der Abbildung gezeigt wird. Sie können durch „**Schneiden**“ des AlGaAs mit speziellen Werkzeugen erzeugt werden. Diese Trompeten verhalten sich wie ein **Trichter für das Licht**. Auf diese Weise können fast 100% der Photonen aus dem Trichter entweichen und als Quantensignale genutzt werden!



## 5 Experiment



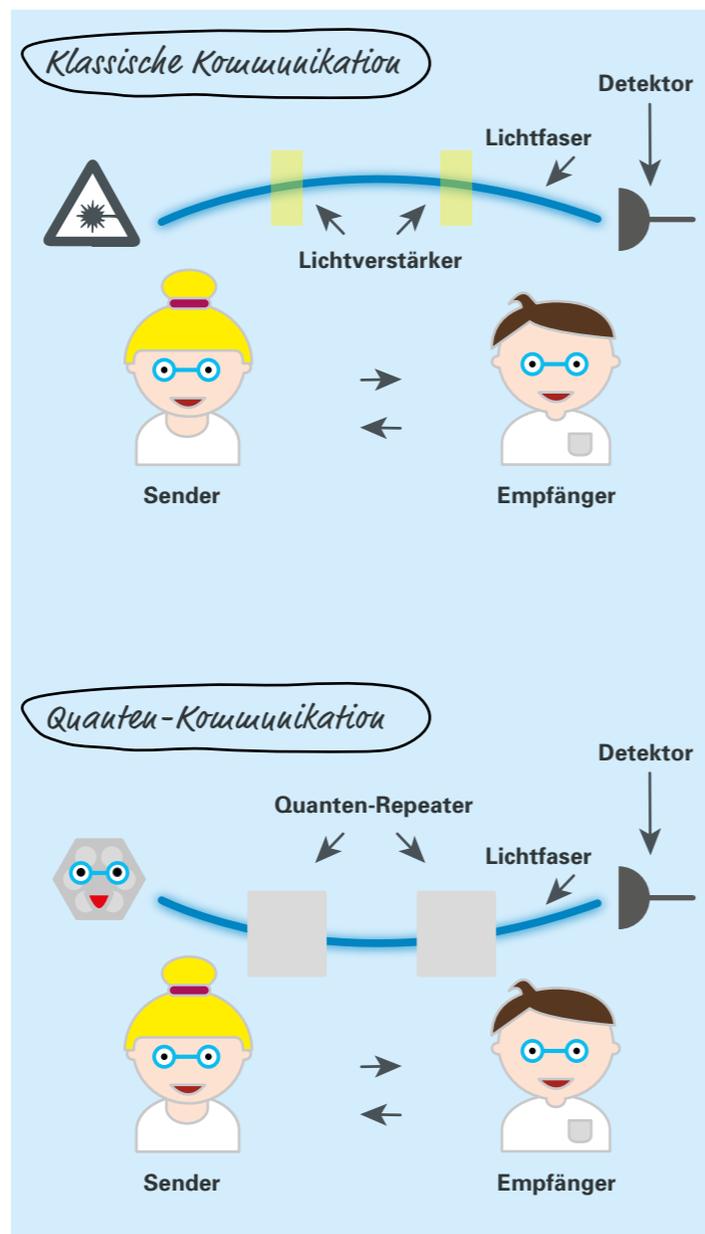
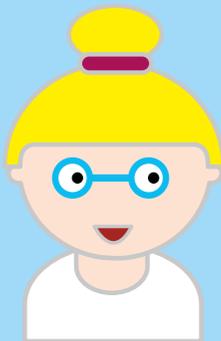
### Totalreflexion

**Was Du brauchst:** ■ 1 Taucherbrille und ■ 1 Badewanne (oder Schwimmbad, See, Meer) oder eine wasserfeste Taschenlampe (du kannst auch eine normale Taschenlampe nehmen und gut in einer durchsichtigen Plastiktüte einpacken).

**Was zu tun ist:** Den Kopf unter Wasser tauchen mit dem Gesicht nach oben. Die Wasseroberfläche muss dabei ruhig sein - also kurz die Luft anhalten. Jetzt sieh dich unter Wasser um. Du wirst bemerken, dass du Dinge sehr gut siehst, die genau oberhalb deines Kopfes sind, nicht aber solche, die sich in einem stark geneigten Winkel zu dir befinden. Stattdessen reflektiert das Wasser den Boden der Wanne oder deine Hände wie ein Spiegel. Das ist die Totalreflexion, die jedes Mal vorkommt wenn der Winkel zwischen Lichtstrahl und Oberfläche flacher wird als ein Wert (man nennt diesen Wert „kritischer Winkel“), der mit dem Brechungsindex des Mediums zu tun hat. Wenn Du selbst nicht tauchen möchtest, kannst Du auch eine wasserfeste Taschenlampe unter Wasser stecken und diese kippen. Ab einem gewissen Winkel wirst du sehen, dass kein Licht mehr herauskommt. Stattdessen beleuchtet das Licht den Boden der Wanne! Wenn Du aber jetzt die Oberfläche des Wassers störst und kleine Wellen erzeugst, kann das Licht teilweise wieder austreten.

**Was ist passiert?** Die Wellen ändern die Oberfläche des Wassers, sodass an manchen Stellen der Winkel zwischen Lichtstrahl und Oberfläche wieder größer wird als der „kritische Winkel“. Damit kann das Licht an diesen Stellen austreten!

Warum wäre es interessant, künstliche und natürliche Atome miteinander kommunizieren zu lassen?

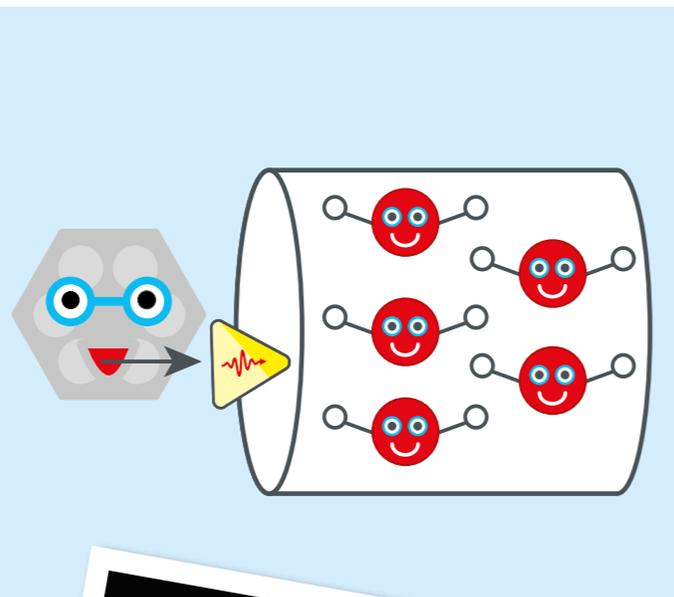
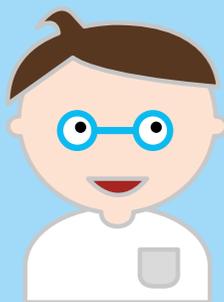


Die Frage ist sehr spannend, weil diese beiden Welten ihre eigenen Vor- und Nachteile haben und bis vor kurzem völlig getrennt waren. Künstliche Atome können als hoch-effiziente und kompakte Quellen für Einzelphotonen verwendet werden. Tatsächlich können sie bis etwa 1.000.000.000 Photonen pro Sekunde aussenden, sodass man mit ihnen zahlreiche Quantensignale mitsenden kann. Und diese Signale können mithilfe von Lichtdetektoren ausgelesen werden, ähnlich wie bei **Experiment 3** erläutert.

Das Problem ist, dass wir zeitweise diese Signale für eine Weile **speichern** müssen, d.h. wir müssten sie eine Weile an einer Stelle festhalten und sie danach wieder abholen. Etwas Ähnliches geschieht in einem Computer: Elektrische Signale müssen von Zeit zu Zeit im Speicher behalten und nach einer Weile wieder abgerufen werden. Für die Speicherung von Quantensignalen sind natürliche Atome besser geeignet als künstliche Atome, wie bereits oben erwähnt.

In der Quantenkommunikation wird die Speicherung der Photonen benötigt, wenn man Quanteninformation über lange Strecken (mehrere hunderte Kilometer) übertragen möchte. Der Grund dafür ist, dass während der Übertragung (z.B. mittels **Lichtfasern**, die in der Lage sind, das Licht von einem Ort zu einem anderen zu leiten) ein Teil der Photonen verloren geht, und die Sicherheit der Übertragung damit beeinträchtigt wird. Diesem Problem begegnet man auch in der klassischen Kommunikation und es wird dort mithilfe von **Lichtverstärkern** behoben. Diese Geräte verstärken das eintreffende Lichtsignal, um die Verluste auszugleichen. Man kann sich dabei das Signal als ein Bild vorstellen, das auf der Strecke zum Empfänger verblasst. Der Lichtverstärker macht eine Kopie des Bildes und belebt wieder seine Farben. Wie oben erwähnt ist es aber nicht möglich, ein Quantensystem auszulesen und dann Kopien davon zu machen. Das ist der eigentliche Grund, warum die Quantenkommunikation sicherer als die gängige klassische Kommunikation ist! Um das Problem der Verluste zu umgehen, wurde das Konzept eines „**Quanten-Repeater**“ erfunden. Dieses „Gerät“ muss u.A. in der Lage sein, **Quantensignale zwischendurch zu speichern, ohne sie dabei zu lesen**. Da ein Quanten-Repeater sehr schwierig zu realisieren ist, ist die Anwendung der Quantenkommunikation heutzutage auf kurze Strecken (z.B. in derselben Stadt) begrenzt.

Wie soll man ein Photon speichern, das sich normalerweise mit Lichtgeschwindigkeit bewegt?



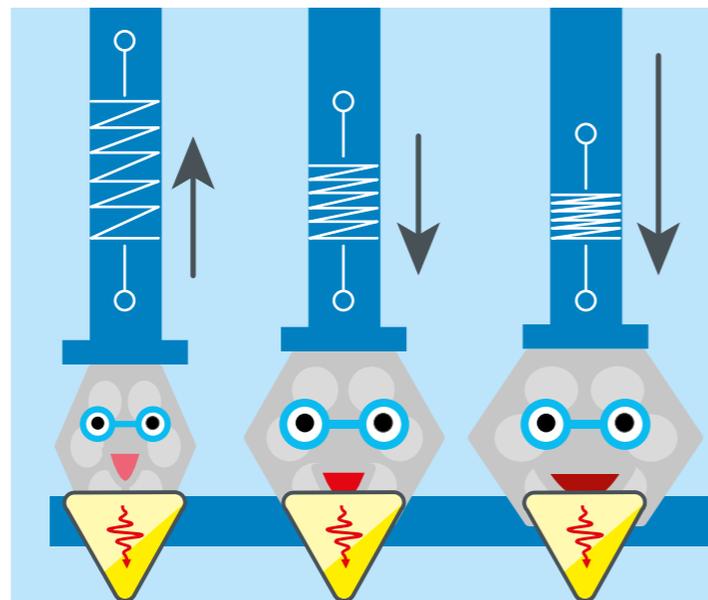
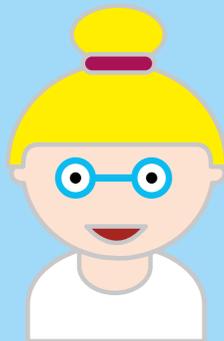
Zelle für Rubidium-Wolke

Eine Möglichkeit dazu bieten **Wolken von Atomen wie Rubidium**.

Bei Temperaturen um die  $100^\circ\text{C}$  wird Rubidium gasförmig und wir können dieses Gas in einer Glasflasche aufbewahren, ähnlich wie die Atome in einer Gasentladungslampe. Die Rubidiumatome können als „**Quantenspeicher**“ für die von künstlichen Atomen emittierten Photonen dienen. Dabei wird das Photon mithilfe eines externen **Laserpulses** in einer Anregung der Rubidiumwolke umgewandelt. Alle Atome gemeinsam tragen die Information eines abgespeicherten Photons in Form einer **kollektiven Anregung**. Wichtig ist es, den gemeinsamen Zustand der Atome nicht zu messen, da sonst die Quanteninformation verloren gehen würde. Jedes einzelne Atom besitzt allerdings nur einen Bruchteil der Gesamtinformationen über die Eigenschaften des Photons. Daher verrät die Beobachtung eines einzelnen Atoms nur wenig über den Quantenzustand des abgespeicherten Photons. Vergleichbar mit einem Puzzle, bei dem erst die richtige Kombination aller Einzelteile das gesamte Bild ergibt, kann das abgespeicherte Photon nur über ein gemeinsames Auslesen aller Atome wiederhergestellt werden. Ein weiterer externer Laserpuls initiiert und koordiniert dabei die Umwandlung der kollektiven Anregung aller Atome in ein Photon, welches genau die gleichen Eigenschaften wie das ursprünglich vom Quantenpunkt emittierte Photon hat. Da zwei in allen Eigenschaften gleiche Photonen aber in der Tat völlig ununterscheidbar sind, ist dieses „verzögerte“ Photon genauso für die Quantenkommunikation geeignet wie das Ursprüngliche.

Damit ein Photonenpeicher funktioniert, muss die Farbe der von einem künstlichen Atom ausgesandten Photonen der Farbe der natürlichen Atome im Speicher entsprechen. Aber dabei gibt es ein Problem. Während es relativ einfach ist, eine Flasche mit Rubidiumatomen zu füllen, die alle dasselbe Energiespektrum haben, gilt dies nicht für künstliche Atome. Wie schon erwähnt, hängt das Spektrum eines künstlichen Atoms (d.h. die Entfernung zwischen den Energieniveaus auf der Energieleiter und damit die Farbe der emittierten Photonen) von seiner Größe ab. Leider ist es praktisch unmöglich, die Größe von Quantenpunkten genau zu kontrollieren. Wenn du das Experiment mit den Wassertröpfchen durchgeführt hast, hast du vielleicht bemerkt, dass die verschiedenen Tröpfchen auch unterschiedlich groß sind. Eventuell haben sie auch unterschiedliche Formen – das gleiche gilt für die Aluminiumtröpfchen, die zur Herstellung unserer Quantenpunkte benutzt werden. Dies bedeutet, dass es **sehr schwierig ist, ein künstliches Atom mit dem zu jenem der natürlichen Atomwolke passenden Spektrum zu finden**. Da sich die Quantenpunkte im Halbleiterkäfig befinden, kann ihre Größe nicht einfach geändert werden, wenn sie einmal eingeschlossen sind.

Wie kann man das Spektrum eines künstlichen Atoms nach seiner Herstellung kontrollieren, so dass es mit natürlichen Atomen kommunizieren kann?



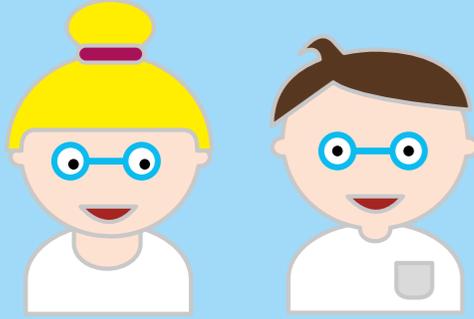
2 LEDs mit Quantenpunkten auf einem Piezosubstrat

Eine Methode, die Energieniveaus eines Quantenpunkts zu verändern, ist die leichte **Verformung des Halbleitermaterials** durch die Anwendung von Kräften. Dies ist eine weitere Eigenschaft von Halbleitern: Leichte Verformungen bewirken starke Veränderungen bezüglich der Art, wie sich die Elektronen in Halbleitern verhalten. Durch eine Verformung werden nämlich die Distanzen zwischen Atomen im Material geändert und damit ihre Wechselwirkung. Dieses Prinzip wird bereits zur **Geschwindigkeitssteigerung der Prozessoren** in modernen Computern angewandt, und die benötigten Verformungen sind sehr gering, etwa in der Größenordnung von 0,1% oder weniger. Dies lässt sich mit der Dehnung eines 1 Meter langen Seils um nur 1 Millimeter vergleichen. Für einen Halbleiter macht dies einen enormen Unterschied!

Also müssen wir den Halbleiter leicht verformen, um das Spektrum eines bestimmten Quantenpunkts an die Rubidiumatome anzupassen. Dies kann erreicht werden, indem man die Halbleiter-LED mit Quantenpunkten auf speziellen, „**piezoelektrisch**“ genannten Materialien anbringt, welche in der Lage sind, elektrische Spannungen in mechanische Verformungen umzuwandeln und umgekehrt.

Solche Materialien finden wir z.B. in den Lautsprechern (**Piezolautsprecher**) und Mikrofonen eines Handys. Obwohl die Verformungen typischerweise so klein sind, dass man sie mit bloßen Augen nicht sehen kann, können wir sie hören! Die schnelle Verformung des Materials setzt in diesem Fall die Luft in Bewegung und erzeugt eine Schallwelle. Umgekehrt kann eine Schallwelle ein piezoelektrisches Material in kleine Schwingungen versetzen, die in ein elektrisches Signal umgewandelt werden können. So funktioniert ein **Piezomikrofon**.

Da die Deformationen so winzig sein können, können piezoelektrische Materialien zur Erzeugung von viel geringeren Verschiebungen als der Größe eines Atoms verwendet werden! Diese erstaunliche Eigenschaft von piezoelektrischen Materialien wird zum Bau der stärksten bisher existierenden Mikroskope benutzt (**Rastertunnelmikroskope**, **Rasterkraftmikroskope**). Damit konnten Anfang der 1980er Jahre einzelne Atome endlich „gesehen“, oder besser gesagt, berührt werden. Auch künstliche Atome lassen sich damit genau beobachten.



*Wir hoffen,  
dass ihr beim Lesen und  
Experimentieren Spaß  
gehabt habt!*

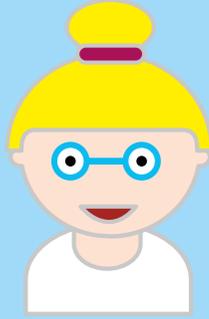
### Zusammenfassung

Unsere Kurzreise durch die Welt der natürlichen und künstlichen Atome endet hier. Wir haben uns mit einer Reihe von Fragen beschäftigt, die einen Einblick in diese faszinierenden Welten liefern. Einige Grundideen konnten wir nur kurz und qualitativ erläutern. Mehr Information kann man zum Beispiel im Internet finden. Ein tiefergehendes und quantitatives Verständnis der Quantenmechanik und der diskutierten Konzepte erfordert aber meistens ein Physikstudium.

Während die Forschung in den Bereichen der natürlichen und künstlichen Atome bis vor kurzem praktisch unabhängig voneinander von unterschiedlichen Gruppen von PhysikerInnen vorangetrieben wurde, versucht zur Zeit ein Netzwerk von europäischen WissenschaftlerInnen, diese „zwei Welten“ im Rahmen eines Projektes namens „Hybrid Natural and Artificial Systems“ (kurz HANAS) zusammenzubringen. Einerseits wird die Forschung an diesem Thema aus wissenschaftlicher Neugier betrieben, andererseits könnte die Kombination von künstlichen Atomen und Wolken von natürlichen Atomen zu neuen Bauelementen mit Anwendung im Bereich der Quantenkommunikation führen. Dieser Bereich setzt sich zum Ziel, die Sicherheit der Datenübertragung mittels der merkwürdigsten Gesetze der Quantenmechanik (wie z.B. das Superpositionsprinzip und Kollaps der Wellenfunktion) deutlich zu erhöhen.

Eine Reihe von neuen „Quanten“-Bausteine sind dafür notwendig. Die künstlichen Atome, die aus herkömmlichen Halbleitermaterialien bestehen, eignen sich als hervorragende Quellen von Quantensignalen (Photonen). Die natürlichen Atome hingegen können sehr gut zur Zwischenspeicherung dieser Signale dienen, welche eine Voraussetzung für die Übertragung von Quanteninformationen über große Distanzen (mehrere hundert Kilometer) ist.

Auf dem Weg zu diesem Ziel ergeben sich ständig neue Fragestellungen, die zur Entwicklung neuer technologischer Ansätze und zu neuen Lösungen von Problemen führen. Dabei „spielen“ WissenschaftlerInnen mit quantenmechanischen Systemen, die mithilfe einer Reihe von Klein- und Großgeräten zugänglich gemacht werden.



Bildnachweis  
und Impressum

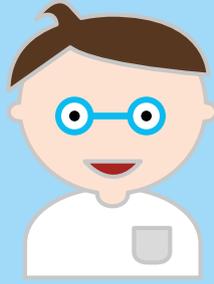
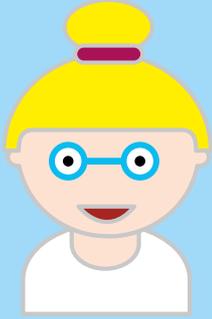
### Bildnachweis

- Abb. 1 Spektrum einer Glühbirne aufgenommen mit Spektrograf, (Seite 19)  
Abb. 2 Spektrum einer Gasentladungslampe (Sparlampe)/ (Seite 19)
- Abb. 3 Transmissionselektronenmikroskop-Aufnahme eines Quantenpunktes/  
Elisabeth Müller/ ETH Zürich/ 2003/ (Seite 28)
- Abb. 4 MBE/ Nathalie Rastelli-Hudelmaier/ Institut für Halbleiter- und Festkörper  
physik/ JKU/ Linz/ 2015/ (Seite 30)
- Abb. 5 AFM-Aufnahme von Nanolöchern auf einer AlGaAs- Oberfläche / Yongheng Huo/  
Institut für integrative Nanowissenschaften / IFW / Dresden/ 2012/ (Seite 32)
- Abb. 6 (Seite 32) Messkopf eines Rasterkraftmikroskopes (AFM)/  
Nathalie Rastelli-Hudelmaier/ Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik/ JKU/  
Linz/ 2015
- Abb. 7 „Nano-Trompete“ mit Quantenpunkt / Julien Claudon/ Institut NEEL/  
Grenoble/ 2014/ (Seite 38)
- Abb. 8 Zelle für Rubidium-Wolke/ ©Josef Schupp, Stephan Ritter/ Max-Planck-Institut für  
Quantenoptik/ München 2015/ (Seite 44)

- Abb. 9 Quantenpunkt-LED auf Piezo/ Rinaldo Trotta/ Institut für Halbleiter- und  
Festkörperphysik/ JKU/ Linz/ 2015/ (Seite 49)

### Impressum

- Herausgeber: ©Institut für Halbleiter- und Festkörperphysik,  
Johannes Kepler Universität, Linz 2015  
Altenbergerstr. 69, 4040 Linz, Austria,  
Tel. +43 732 2468 9600, Fax +43 732 2468 8650
- Text: Univ.Prof. Dr. Armando Rastelli  
a.Univ.Prof. Dr. Julian Stangl  
Dr. Stephan Ritter
- Lektorat: Mag. Susanne Schwindt, a.Univ.Prof. Dr. Julian Stangl  
Übersetzung (engl./deutsch): Mag. Susanne Schwind, B.Sc. Stefanie Siebeneichler
- Gestaltung u. Layout: Nathalie Rastelli-Hudelmaier DI (FH)  
Illustration: Nathalie Rastelli-Hudelmaier DI (FH)
- Druck: Kontext Druckerei GmbH, Spaunstraße 3a, 4020 Linz



*Ein weiterer Dank geht an:*

Mag. Rudolf Uhlmann/ Akademisches Gymnasium Linz

Constanze Raach (Danke für das Lektorat)

Amelie und Sofia Rastelli (Danke für euer Verständnis für die Arbeit auch am Wochenende!)

In diesem Booklet wird ein hochaktuelles Forschungsthema an der Schnittstelle zwischen Halbleiter- und Atomphysik auf allgemein verständliche Weise einem breiten Publikum präsentiert.

Ausgehend von der Entdeckung von „künstlichen Atomen“, winzigen Halbleiter-Nanostrukturen, und den Fortschritten im Bereich der Atomphysik, versucht zur Zeit ein Netzwerk von Europäischen Physikern in einem von der EU geförderten Projekt mit dem Titel „Hybrid Artificial and Natural Atomic Systems“ (kurz HANAS) diese zwei bisher getrennten Welten zusammenzubringen.

Ein Ziel dieser Forschungsrichtung ist es, neuartige „Schaltkreise“ zu bauen, welche die Sicherheit der Internetkommunikation mit Hilfe der Quantenmechanik deutlich erhöhen sollen. Gleichzeitig faszinieren künstliche und natürliche Atome durch ihr wundersames Verhalten die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen.

Dieses Booklet soll einen Einblick in das Universum der Atome und künstlichen Atome vermitteln. Mit einer reichen lebendigen Illustrationswelt und ausgewählten Experimenten eignet es sich sowohl für Schüler in der Oberstufe, als auch für interessierte Erwachsene.