



2015  
highlights der **physik**

# Licht spiele

**Wissenschaftsmagazin**

---



*Dies ist eine Zusammenfassung in „Leichter Sprache“. → Siehe auch [www.leichtesprache.org](http://www.leichtesprache.org)*

# Licht und Laser-Physik

Ohne das Licht der Sonne gäbe es kein Leben auf der Erde.



Bäume und Blumen können Sonnenstrahlen fangen und sie in Energie umwandeln.  
Das nennt man Photosynthese.  
Dadurch wachsen die Pflanzen.  
Dabei geben sie den für uns lebenswichtigen Sauerstoff ab.



Die Sonne sieht für uns meistens gelb oder weiß aus.  
Doch in Wirklichkeit setzt sich ihr Licht aus allen Farben zusammen.  
Das erleben wir, wenn wir einen Regenbogen anschauen.



Das Licht ist nicht wie die anderen Dinge, die wir kennen.  
Es bewegt sich wie eine Welle im Ozean.  
Man kann mit physikalischen Geräten aber auch winzige Teilchen erkennen.  
Diese Licht-Teilchen nennt man Photonen.



Das Licht wird nie schneller oder langsamer.  
Es hat immer genau dieselbe Geschwindigkeit.  
Das hat der berühmte Physiker Albert Einstein herausgefunden.  
Die Lichtgeschwindigkeit beträgt etwa 300.000 Kilometer pro Sekunde.



Erst vor 130 Jahren ist die Glühbirne erfunden worden.  
Seitdem können die Menschen ihre Häuser und Städte künstlich beleuchten.  
Heute werden immer mehr LED-Lampen genutzt.  
Sie verbrauchen weniger Energie als Glühbirnen.



Im Jahr 1960 wurde der Laser erfunden.  
Im Laserlicht schwingen alle Licht-Teilchen gleich.  
Der Laserstrahl sendet daher gebündeltes Licht.  
Dieser Strahl ist besonders stark und genau.



Der Laser war eine wichtige Erfindung.  
Er spielt überall in unserem Leben eine große Rolle.  
Er schneidet Autoteile, er spielt DVDs ab, er misst auch die kleinsten Dinge sehr genau.  
Und die Ärzte nutzen ihn zum Operieren.



# Mit Licht ...

Licht im  
Gleichtakt –  
der **Laser**  
Seite 14

leben

4

beleuchten

10

beobachten

16

heilen

20

messen & filmen

22

kommunizieren

26

## IMPRESSUM

### HERAUSGEBER

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
Deutsche Physikalische Gesellschaft e. V. (DPG)

### AUTOR

Dr. Thomas Bührke

### WISSENSCHAFTLICHE BERATUNG

Prof. Dr. Eberhard Wassermann

### REDAKTION

Prof. Dr. Matthias Bartelmann, Dr. Axel Carl, Dr. Ralph Dieter,  
Ruben Düchting, Dr. Jens Kube, Prof. Dr. Arnulf Quadt

### KONZEPT UND GESTALTUNG

iserundschmidt GmbH (ius)  
Agentur für Wissenskommunikation  
(Verantwortlich: Ruben Düchting, Marleen Schwalm)  
ius.pr@dpg-physik.de

August 2015

Die Highlights der Physik im Internet:  
[www.physik-highlights.de](http://www.physik-highlights.de)



### HINWEIS

Einige Stellen im Heft verweisen auf interessante Video-Clips und Internetseiten. Wer sein Smartphone mit einem QR-Code-Scanner ausgestattet hat, kommt leicht auf die verknüpften Seiten. Für externe Inhalte sind die Urheber verantwortlich.





# Mit Licht leben

**Ohne Licht kein Leben. Die Sonne versorgt unseren Planeten und seine Biosphäre mit Energie, sie hält ihn auf der richtigen Temperatur und erhellt unsere Umwelt. Aus physikalischer Sicht ist das Licht nur ein verschwindend kleiner Teil des weiten Spektrums elektromagnetischer Wellen.**



Sommer, Sonnenschein und blauer Himmel – so sieht für uns ein schöner Tag aus. Das **Licht** der Sonne wandelt das Dunkel der Nacht in die Helle des Tages, es wärmt unseren Planeten und macht ihn wohnlich.

Die Sonne erscheint uns in gelblich-weißem Licht, doch in Wirklichkeit setzt sich dieses aus allen Farben zusammen, wie uns beispielsweise ein **Regenbogen** vor Augen führt. Er entsteht, wenn das Sonnenlicht Wassertröpfchen durchquert und darin in sein – wie Physiker sagen – Farbspektrum aufgespalten wird.

Sonnenlicht ist der Treibstoff für das Leben auf der Erde. Pflanzen, Algen und einige Bakteriengruppen sind in der Lage,

Sonnenstrahlung einzufangen und diese Energie in mehreren Schritten so umzuwandeln, dass sie am Ende organische Verbindungen für ihr Wachstum herstellen. Bei den Pflanzen setzt diese Photosynthese den für uns lebenswichtigen Sauerstoff frei. Jedes Blatt ist ein kleines Biokraftwerk.

## Das Farbspektrum

Die in einem Regenbogen erkennbare Farbverteilung beginnt im Violett und verläuft über Blau, Grün, Gelb zum Roten. Nach dem von Max Planck zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckten Strahlungsgesetz sind diese Farbanteile nicht alle gleich intensiv. Sie besitzen ein Maximum

im gelben Licht und fallen zu den beiden „Enden“ hin ab. Planck fand heraus, dass dieses Gesetz universell ist und die Intensitätsverteilung in ihrer Form etwa der einer Glocke ähnelt. Diese Kurve hängt ausschließlich von der Temperatur eines strahlenden Körpers ab. Die Sonne besitzt an der Oberfläche, wo das sichtbare Licht entsteht, eine Temperatur von etwas mehr als 6000 Grad Celsius. Ist ein Körper, beispielsweise ein Stern, wesentlich heißer, so wird er am intensivsten im blauen Licht leuchten und uns auch so erscheinen. Ist er kühler, so strahlt er vorwiegend im roten Licht: die Glockenkurve verschiebt sich also.

Das menschliche Auge ist optimal auf die Farbintensitätsverteilung des Sonnenlichts eingestellt. So ist es im gelb-grünen Bereich, in dem die Sonne am hellsten strahlt, am empfindlichsten. Unser Farbsystem beruht auf drei Arten von Molekülen auf der Netzhaut, die jeweils



◀ Nicht jeder nimmt seine Umwelt wie ein Mensch wahr (links). Bienen können zum Beispiel UV-Licht sehen (rechts), was ihnen die Orientierung erleichtert und bei der Nahrungssuche hilft. (Bild: Dr. Schmitt, Weinheim, uvir.eu)

► Die Bildung eines Regenbogens: Das weiße Licht der Sonne wird in Regentropfen gebrochen und wie in einem Prisma in seine einzelnen Farben (also Wellenlängen) aufgespalten. Vom Boden aus ist von diesem Vorgang jeweils nur die Farbe mit dem passenden Austrittswinkel zu sehen – im Auge des Betrachters entsteht der charakteristische Farbverlauf. (Bild: ius)

Weißes Licht von der Sonne

1. Lichtbrechung

Lichtspiegelung an der Rückseite des Regentropfens

2. Lichtbrechung

speziell von einer Farbe des Sonnenlichts angeregt werden. Die hierbei entstehenden Pulse werden über Nervenzellen ans Gehirn weiter geleitet und dort in ein Farbbild umgewandelt. Im Laufe der Evolution hat das Farbsehen zu ganz unterschiedlichen Fähigkeiten geführt. So können viele Vögel und Bienen **UV-Licht sehen**, was sie bei der Nahrungssuche und der Orientierung nutzen.

Wenn man das Sonnenlicht mit einem Fernrohr fokussiert und in einem Glasprisma in seine Farben aufspaltet, erkennt man darin eine Vielzahl von schwarzen Linien. An diesen Stellen fehlt Licht.

Diese aufregende Entdeckung machte im März 1814 Joseph von Fraunhofer in Benediktbeuern: Er erblickte „mit dem Fernrohr in diesem horizontal stehenden Farbenbilde fast unzählig viele starke und schwache vertikale Linien.“ Erst 45 Jahre später erkannten Gustav Kirchhoff und Robert Bunsen in den **Fraunhofer-Linien** die Fingerabdrücke der chemischen Elemente in der Sonnenatmosphäre. Sie verschlucken das Licht an einer für sie charakteristischen Stelle im Spektrum. Physiker sprechen von Absorptionslinien. Sie ermöglichen es, die chemische Zusammensetzung von Stoffen zu ermitteln.

Für Astronomen ist Licht und insbesondere das Spektrum die einzige Möglichkeit, um etwas über die fernen Himmelskörper zu erfahren. Was aber sind Licht und Farben aus physikalischer Sicht?

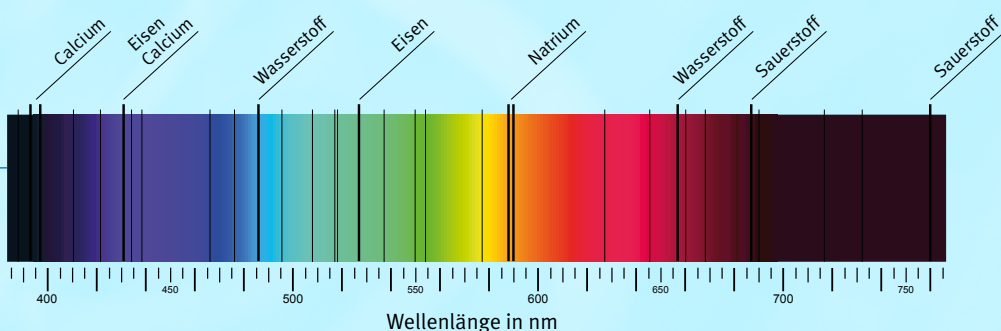
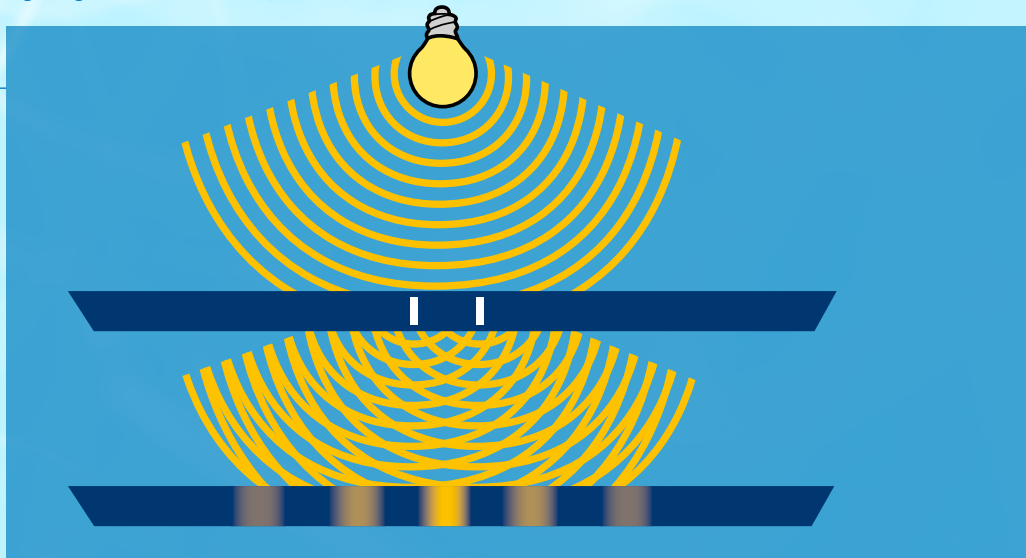
► Wichtige Fraunhoferlinien im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Sie ermöglichen Rückschlüsse auf die Zusammensetzung und Temperatur von Sternen. (Bild: ius)

## Licht als Welle

Eine Antwort liefert das berühmte **Doppelspalitexperiment**. Lässt man Licht durch zwei enge Spalte auf einen dahinter befindlichen Schirm fallen, so wird man dort nicht einfach nur zwei helle Lichtstreifen erkennen, sondern mehrere. Dieses Streifenmuster erklärt man mit der

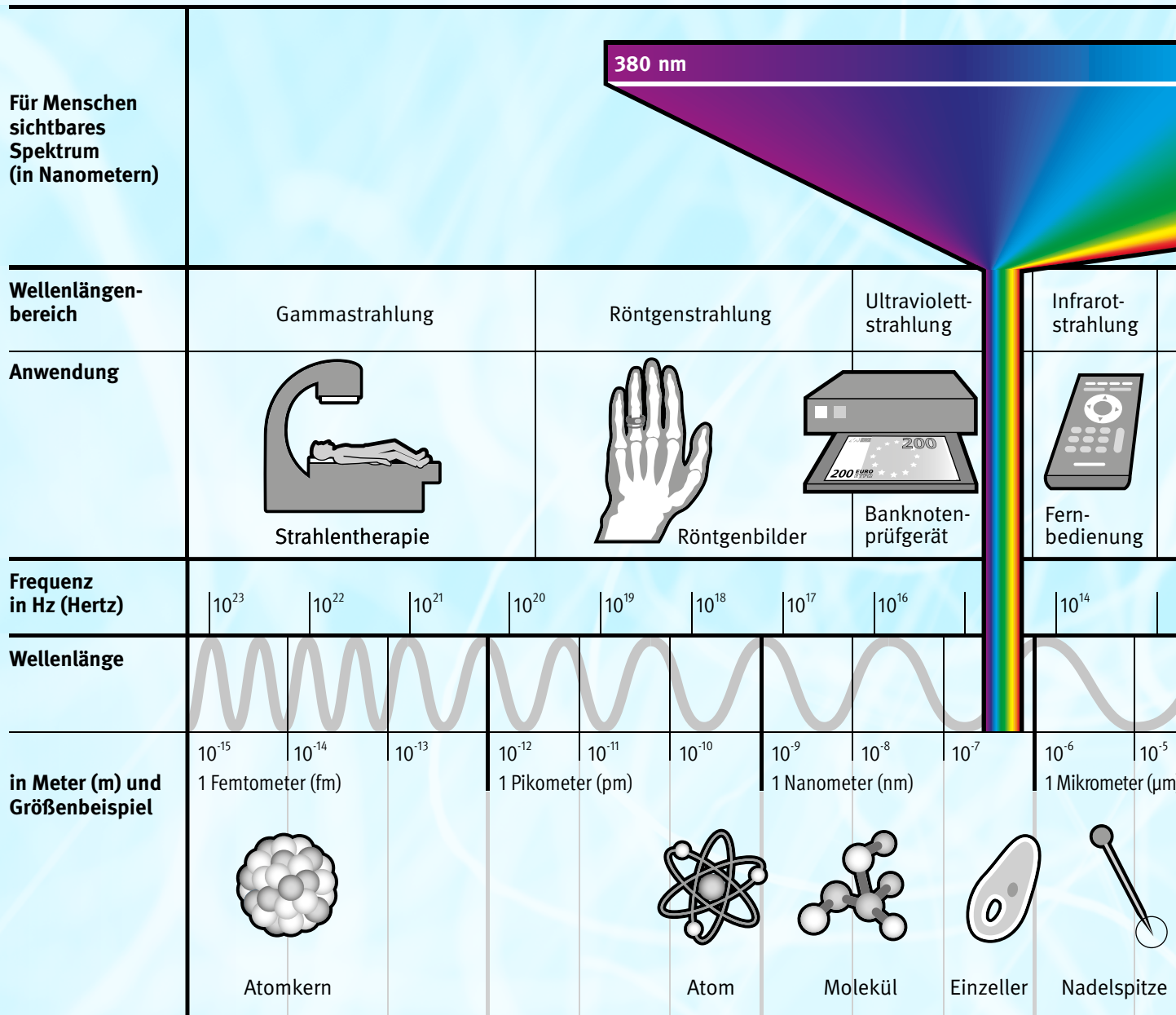
Annahme, dass Licht eine Welle ist. Hinter den beiden Spalten breiten sich zwei halbkreisförmige Wellen aus, die sich überlagern. Treffen auf dem Schirm ein Wellenberg und ein Tal zusammen, so heben sie sich auf, und es ist dunkel. Wo sich zwei Berge oder Täler überlagern, ist es hell. Aber was schwingt bei dieser Welle?

▼ Schematischer Aufbau des Doppelspalitexperiments: Fällt Licht durch zwei Öffnungen auf einen Schirm, ist dort ein Streifenmuster zu sehen. Vor dem Schirm kommt es zu Überlagerungen der Lichtwellen. (Bild: ius)





# Das elektromagnetische Spektrum



▲ Das elektromagnetische Spektrum mit seiner gängigen Einteilung. Auffällig: Nur ein Bruchteil der Wellenlängen kann vom Menschen wahrgenommen werden. (Bild: ius)

Die entscheidende Theorie hierfür lieferte der schottische Physiker James Clerk Maxwell vor 150 Jahren in seinem Werk über elektromagnetische Felder. Demnach ist Licht eine Überlagerung von Wellen, in denen elektrische und magnetische Felder schwingen und sich mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. In dieser Theorie erklären sich auch die Farben auf einfache Weise: Vom ultravioletten zum roten Ende des Sonnenspektrums nimmt die Wellenlänge dieser elektromagnetischen Welle zu. Sie reicht etwa von 380 bis 780 Nanometer, wobei ein Nanometer ein Milliardstel Meter ist.

Die Fraunhofer-Linien erklären sich dann auf folgende Weise: Wenn ein Atom Licht

aufnimmt, so springt ein Elektron von einem niedrigen in ein höheres Energieniveau. Laut Quantenphysik kann dieser Energiesprung nicht beliebige, sondern nur ganz spezielle Werte annehmen. Diese sind charakteristisch für jedes Elektron in dem Atom eines chemischen Elements.

## Das unermessliche Spektrum

Das Spektrum setzt sich auf der einen Seite zu kleineren und auf der anderen zu größeren Wellenlängen hin fort. Jenseits der Farbe Rot schließt sich zu größeren Wellenlängen das Infrarote an. Bei größeren Wellenlängen von 0,03 bis 1 Millimeter existieren die Terahertz-Wellen. Dank ihrer Fähigkeit, Materialien wie Kunststoff oder Kleidung durchdringen zu können, kommen an einigen Flughäfen Terahertz-Wellen in Körperscannern zum Einsatz, um verbotene Objekte auf-



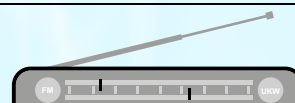
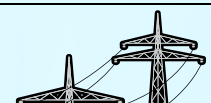
zufinden. Der Wellenlängenbereich zwischen einem Millimeter und 300 Millimetern gehört den Mikrowellen, jenseits davon beginnt das Reich der Radiowellen. Auch bei kürzeren Wellenlängen setzt sich das Spektrum fort. Unterhalb des violetten Bereichs schließen sich zunächst das Ultraviolette (UV), dann der Röntgen- und schließlich der Gammabereich an.

Diese Strahlungsarten können wir mit unseren Augen nicht wahrnehmen, aber wir haben technische Geräte entwickelt, mit denen das möglich ist.

Trickreich war die Entdeckung der Infrarotstrahlung durch Friedrich Wilhelm Herschel. Im Jahr 1800 spaltete er mit einem Prisma Sonnenlicht auf und brachte neben dem roten Ende ein Thermometer an. Als die Temperatur dort anstieg, schloss Herschel daraus, dass eine unsichtbare Form von Energie oder Strahlung wirksam





Terahertzstrahlung	Mikrowellen	Radiowellen	Wechselströme
 <p>Körperscanner</p>	 <p>Mikrowelle</p>	 <p>Radio</p>	 <p>Stromtransport</p>

Farbe und Wellenlänge stehen also in einem eindeutigen Zusammenhang. Es gibt eine weitere physikalische Größe, die mit ihnen verbunden ist: die Energie. Je kleiner die Wellenlänge, desto größer die Energie der Strahlung. Das ist zum Bei-

Man kann das elektromagnetische Spektrum auf Wellenlängen etwa zwischen einem Femtometer ( $10^{-15}$  Meter) und zehn-tausend Kilometer ( $10^7$  Meter) begrenzen. Diesen riesigen, 22 Größenordnungen

Der Physiker Heinrich Hertz und sein Mitarbeiter Wilhelm Hallwachs hatten 1886





## Wenn Hochhäuser zu Brennsiegeln werden

Als Martin Lindsay am 29. August 2013 zu seinem im Londoner Bankenviertel geparkten Jaguar zurückkehrte, staunte er nicht schlecht: Ein Außenspiegel war geschmolzen, das Armaturenbrett war beschädigt. Aber nicht Vandalen waren Schuld, sondern ein nahe stehendes Hochhaus namens Walkie Talkie. Dessen voll verspiegelte und gewölbte Form hatte das Sonnenlicht am Boden extrem stark fokussiert. Reporter brutzelten auf dem Bürgersteig sogar Spiegeleier in der Pfanne.

Seit Großbauten mit kurvig gekrümmten Glasfassaden architektonisch möglich geworden sind, häufen sich Meldungen dieser Art. So wurden Badende im Swimmingpool zu Füßen des Vdara-Hotels in Las Vegas vor „Todesstrahlen“ gewarnt.

Dieser Brennglaseneffekt lässt sich im Computer modellieren und mit verkleinerten Modellen experimentell nachvollziehen. Physiker der FH Brandenburg fanden mit einem Modell 1:200 des Vdara-Hotels heraus, dass sich eine dünne schwarze Folie binnen Sekunden erhitzte und bei etwa 200 Grad Celsius zu schmelzen begann, ein rohes Ei begann nach zwei Minuten zu gerinnen.

◀ Das Hotel-Hochhaus Vdara in Las Vegas begünstigt durch das Zusammenspiel seiner verspiegelten Gebäudefront und ihrer gewölbten Form eine Bündelung des Sonnenlichts. Zur Mittagszeit wurde bereits von Verbrennungen bei Poolbesuchern berichtet. (Bild: Kris1123, CC BY 3.0)

beobachtet, dass manche Metalle Elektronen abgaben, wenn sie ihre Oberfläche mit Licht bestrahlten. Überraschenderweise waren die wegfliegenden Elektronen umso schneller, je kurzweiliger das eingestrahelte Licht war. Nach der Wellentheorie erwartete man etwas anderes: Die kinetische Energie der Elektronen sollte mit steigender Intensität des Lichts zunehmen. Je intensiver die Einstrahlung, desto schneller sollten die Elektronen herausfliegen. Stattdessen variierte ihre Geschwindigkeit nun in Abhängigkeit von der Farbe, also der Wellenlänge beziehungsweise Frequenz des Lichts. Wie war das zu erklären?

Albert Einstein veröffentlichte 1905 einen Lösungsvorschlag. Er nahm an, dass ein Lichtstrahl „aus einer endlichen Zahl von Energiequanten besteht.“ Kurz: Licht sollte ein Schwarm von Teilchen sein, die man später als Photonen bezeichnete. Die Energie eines Photons wächst mit der Frequenz. Diese Photonen können – wenn ihre Energie hoch genug ist – Elektronen aus einem Metall heraus schlagen.

Mit dieser Hypothese konnte Einstein den bis dahin rätselhaften photoelektrischen Effekt erklären. Er war sich aber darüber im Klaren, dass die alte Wellen-

theorie des Lichts nicht ganz falsch sein konnte. Er ahnte damals, dass „eine tiefgehende Änderung unserer Anschauungen vom Wesen und von der Konstitution des Lichts unerlässlich“ sein würde, um das Rätsel zu lösen. Nach der modernen Quantenphysik kann Licht in einem Experiment als Welle und einem anderen als Teilchen auftreten. Man nennt dies den Welle-Teilchen-Dualismus.

Einstein erhielt für seine revolutionäre Hypothese 1921 den Physik-Nobelpreis. Berühmt wurde er jedoch für die Spezielle Relativitätstheorie, und die hatte auch zentral mit Licht zu tun. Einstein postulierte nämlich, dass das Licht immer dieselbe Geschwindigkeit besitzt. Egal wie sich ein Messgerät relativ zu einem Lichtstrahl bewegt, stets wird es eine Geschwindigkeit von knapp 300.000 Kilometer pro Sekunde messen.

Dieses überraschende Naturgesetz hat seltsame Konsequenzen. Die spektakulärste ist die Zeitdehnung, wonach die Zeit in einem schnell bewegten System langsamer vergeht als in einem langsamen. Dieser Effekt macht sich allerdings erst nahe der Lichtgeschwindigkeit deutlich bemerkbar. In unserem Alltagsleben ist er unmerklich klein. Zum Glück für uns, denn andernfalls gäbe es kein einheitliches Zeitsystem, und Termine ließen sich nur schwer vereinbaren.

Es gibt jedoch eine Anwendung, die ohne Einstein nicht funktionieren würde: Die auf dem Satellitensystem GPS basierenden Navis in Autos und Smartphones. Sie funktionieren mit Atomuhren an Bord der Satelliten, die beständig Zeitsignale ausstrahlen. Aus denen bestimmt der Empfänger am Boden seinen Ort relativ zu den Satelliten, deren Positionen jederzeit bis auf etwa zwei Zentimeter genau bekannt sind.

▼ Mit diesem Bild simulierten Forscher, wie die Tübinger Marktgasse aussähe, wenn sie mit 95 Prozent der Lichtgeschwindigkeit durchfahren werden würde. (Bild: Theoretische Astrophysik, Uni Tübingen / MPI für biologische Kybernetik)







▲ Gewaltige Sonneneruption im August 2012. Erhöhte Aktivitäten an der Oberfläche der Gaskugel lassen erahnen, welche Energiemengen von ihr Sekunde für Sekunde abgestrahlt werden. (Bild: NASA/SDO/AIA)

► Boot vor aufgehender Sonne: 1872 schuf Monet sein berühmtes Gemälde „Impression – soleil levant“. Das Bild zeigt den morgendlichen Hafen der nordfranzösischen Stadt Le Havre. (Bild: wartburg.edu, CCo)

Hierbei muss man aber berücksichtigen, dass die Satellitenuhren anders gehen als die Uhren auf der Erde. Zum einen bewegen sie sich mit den Satelliten schneller als eine Uhr am Boden. Dadurch vergeht die Zeit um etwa 7 Millionstel Sekunden pro Tag langsamer als auf der Erde. Es kommt jedoch ein weiterer Effekt zum Tragen, den Einstein 1915 in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie beschrieb. In 20.000 Kilometern Abstand von der Erdoberfläche ist die Schwerkraft schwächer als am Boden. Deshalb vergeht die Zeit in den Satelliten schneller, und zwar um 46 Millionstel Sekunden pro Tag. Unter dem Strich laufen die Uhren an Bord also um 39 Millionstel Sekunden pro Tag schneller als auf der Erdoberfläche. Die GPS-Konstrukteure berücksichtigen diesen Zeiteffekt. Sie stellen die Satellitenuhren so ein, dass diese am Boden um 39 Millionstel Sekunden pro Tag zu langsam laufen. Würde man die Uhren nicht entsprechend anpassen, so würden Navis täglich einen Fehler von 11 Kilometern aufweisen.

Und das alles wegen der einen verblüffenden Eigenschaft: der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

## INFO



### Licht im Impressionismus

Mit Instrumenten lassen sich die physikalischen Eigenschaften des Lichts, wie Intensität oder Farbe, eindeutig messen. Die menschliche Wahrnehmung des Lichts ist hingegen subjektiv. Stimmungen und persönliche Eindrücke wie das Flirren der Luft bei großer Hitze prägen den Gesamteindruck. Dieses Phänomen hielten die Maler des Impressionismus in ihren Gemälden fest. Meist in freier Natur fingen sie den optischen Eindruck ihrer Motive ein. Farbe war wichtiger als zeichnerische Genauigkeit. Diese Art der Kunstrichtung erhielt ihren Namen von Claude Monets Gemälde *Impression – soleil levant* aus dem Jahre 1872 (Musée Marmottan, Paris).





# Mit Licht beleuchten

**Seit der Erfindung der Glühbirne vor rund 130 Jahren hat die künstliche Beleuchtung unserer Häuser und Städte immer größere Ausmaße angenommen. Leuchtdioden arbeiten sehr effizient und helfen, Energie zu sparen.**

Noch findet man sie in den Haushalten, die alte Glühbirne, aber ihre Tage sind definitiv gezählt. Seit Ende 2012 dürfen sie nicht mehr verkauft werden. Damit geht eine Ära zu Ende, die mit Thomas Alva Edison im Jahre 1879 begonnen hatte. Glühbirnen setzen nur etwa vier Prozent der Energie in Licht um. Der Rest geht in Form von Wärme verloren und heizt bestenfalls die Wohnung mit. Moderne Energiesparlampen, Leuchtstoffröhren und vor allem Leuchtdioden (LED) sind wesentlich effizienter.

Hintergrund dieses historischen Wechsels ist das Einsparen von wertvoller Energie. Rund ein Viertel des weltweiten Stromver-

brauchs wird dazu verwendet, um Büros, Wohnzimmer und Straßen zu beleuchten. Der Wechsel auf effizientere Lichtquellen lohnt sich also – auch finanziell.

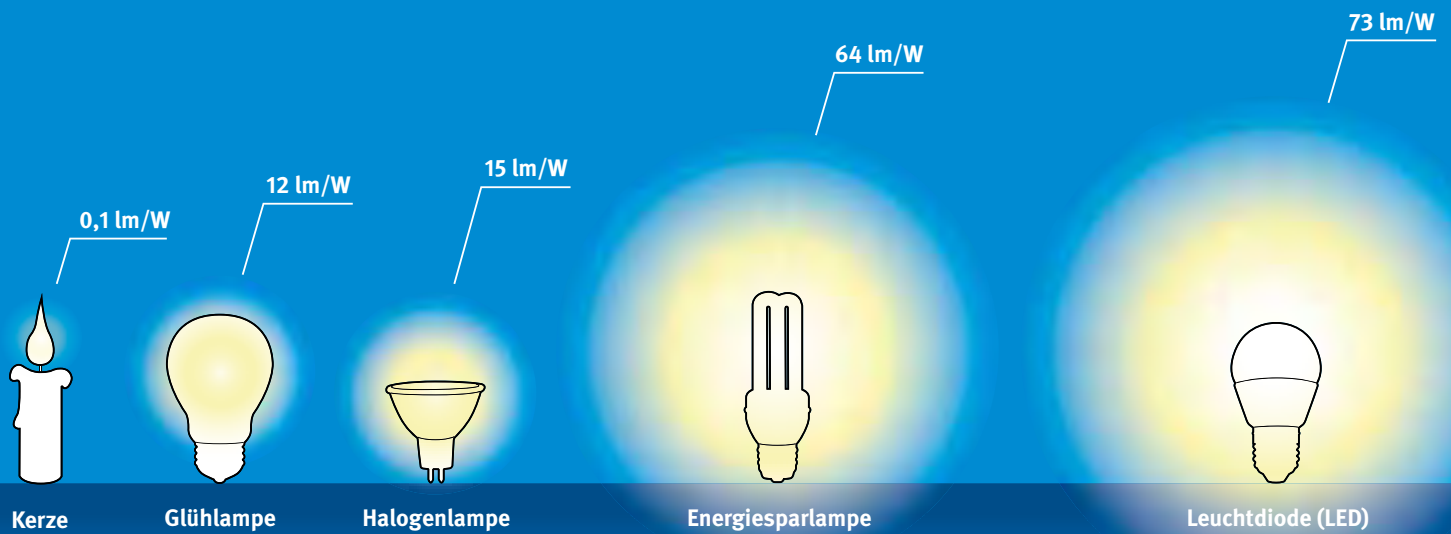
Leuchtstoffröhren sind noch häufig in Gebrauch, weisen aber eine geringere Lichtausbeute auf als LEDs. Energiesparlampen „der ersten Generation“ enthalten Schadstoffe wie Quecksilber. Deswegen müssen sie speziell entsorgt werden.

LEDs erzeugen Licht auf andere Art und Weise. Es handelt sich um Dioden, die aus zwei Lagen unterschiedlicher Halbleiter bestehen. Eine Lage enthält einen Überschuss an negativ geladenen Elek-

tronen und bildet einen n-Halbleiter. Der angrenzenden Schicht fehlen hingegen Elektronen, sie ist ein p-Halbleiter. Diesen Bereich im Halbleiter kann man sich so vorstellen, als befänden sich Löcher im „See der Elektronen“, die als effektive positive Ladungsträger durch das Atomgitter hüpfen.

Zwischen der n- und der p-Schicht befindet sich ein sogenannter **pn-Übergang**, auch aktive Zone genannt. Sobald eine elektrische Spannung mit richtiger Polung an die Diode angelegt wird, wandern in diese Zone die negativen Elektronen von der n-Seite und die positiven Löcher von der p-Seite hinein. Treffen sie aufeinander, so vereinigen sie sich und setzen Energie frei. Bei Leuchtdioden entweicht diese Energie in Form von Licht. Es kann auch vorkommen, dass ein Teil der Energie beispielsweise in Schwingungen des Atomgitters

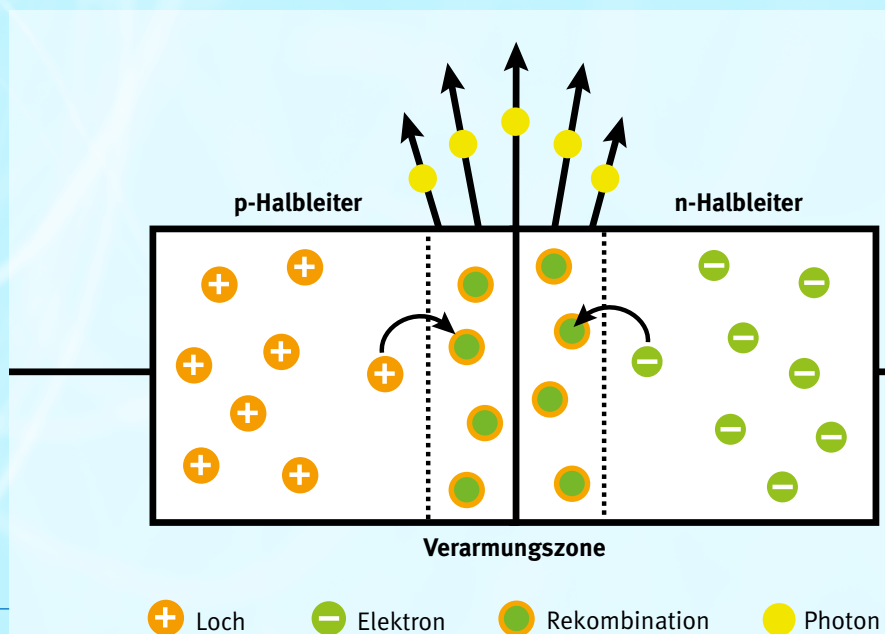




▲ Gleiche Leistung, ungleiches Ergebnis:  
Die erzeugte Lichtausbeute (lm/W für Lumen pro Watt) konnte bei modernen Energiesparlampen im Vergleich zu herkömmlichen Lichtquellen signifikant gesteigert werden. (Bild: ius)

◀ Einmal jährlich werden Berliner Sehenswürdigkeiten beim „Festival of Lights“ ins rechte Licht gesetzt. Durch aufwändige Projektion erfahren Wahrzeichen wie der Berliner Dom eine erstaunliche Verwandlung. (Bild: Thomas Wolf, CC BY-SA 3.0 DE)

► Aufbau einer LED. Am pn-Übergang kommt es zur Vereinigung von negativen Elektronen und positiven Löchern. Die freigesetzte Energie entweicht als Licht. (Bild: ius)



umgewandelt wird. Das verringert die Lichtausbeute. Forscher unternehmen deshalb große Anstrengungen, aus jedem Watt an zugeführter elektrischer Leistung möglichst viel Licht herauszuholen.

Die frei werdende Energie stammt von Elektronen, die aus einem energiereicheren Bereich des Halbleiters in einen energieärmeren springen. Physiker sprechen vom Leitungs- und Valenzband. Die Energiedifferenz wird in Form von Lichtquanten frei. Die Farbe des Lichts hängt von der Höhe dieses Quantensprungs zwischen den beiden Energiebändern ab – und damit von dem Material des Halbleiters. LEDs bilden gewissermaßen die Umkehrung der Solarzelle: LEDs machen Licht aus Strom und Solarzellen Strom aus Licht.

In den 1960er Jahren wurden die ersten Infrarotlicht emittierenden Leuchtdioden

▼ Auch bei Lichtsignalanlagen wie dieser Verkehrsampel kommen inzwischen vermehrt LEDs zum Einsatz. (Bild: Smuconla, CC BY 3.0)







## Lichtverschmutzung

Goethe soll auf seinem Sterbebett gerufen haben: „Mehr Licht!“ Astronomen warnen hingegen mit den Worten: „Weniger Licht!“ Grund ist die zunehmende Beleuchtung unserer Städte. Das Licht wird in der Atmosphäre gestreut und erhellt den Nachthimmel. Moderne Observatorien werden auch deswegen fern von der Zivilisation auf hohen Bergen errichtet.

Mittlerweile hat das Problem der Lichtverschmutzung auch andere Bereiche erreicht. So schätzen Biologen, dass jährlich allein in Deutschland 150 Milliarden Nachtfalter und andere Insekten im Lichte von Laternen verenden. Diese Tiere fehlen in der Nahrungskette. Künstliches Nachtlicht bildet ebenso eine Gefahr für Zugvögel. Selbst Menschen kann die helle Nacht krank machen, wenn sie dadurch ihren Tag-Nacht-Rhythmus verlieren. Und wer nicht aus der Großstadt herauskommt, hat noch nie die Milchstraße gesehen. UNESCO, Internationale Astronomische Union und die Internationale Beleuchtungskommision plädieren seit vielen Jahren dafür, beim Aufstellen von Straßenlaternen darauf zu achten, dass diese möglichst wenig Licht in den Himmel abgeben.

◀ Die zentralistisch geprägte Ausrichtung von England und Frankreich wird auch bei Nacht deutlich: Wie zwei große Lichtkleckse heben sich die Metropolen London (oben links) und Paris deutlich von ihrer Umwelt ab. (Bild: ESA/NASA)

▼ 40.000 Leuchtdioden setzen das Ars Electronica Center in Linz sechs Stunden täglich ins rechte Licht. Ein Vorgang, der nach Angaben der Betreiber dank energiesparender Technik nur 3000 Euro pro Jahr kostet. (Bild: karlroth.zenfolio.com)



aus Galliumarsenid entwickelt. Es folgten rote und gelb-grüne LEDs. Doch die Erzeugung von blauem Licht wollte lange Zeit einfach nicht gelingen, weil die Forscher kein geeignetes Material fanden. Dann setzten die drei japanischen Forscher Isamu Akasaki, Hiroshi Amano und Shuji Nakamura auf Galliumnitrid. Das besaß zwar hoffnungsvolle physikalische Eigenschaften, aber fast alle Physiker waren der Meinung, dass es sich nicht in geeigneter Form herstellen lässt. Doch mit unkonventionellen Methoden gelang es den Japanern. So verwendeten sie Saphir als Substrat, auf dem sie einen Kristall aus Galliumnitrid wachsen ließen. Alle Kollegen waren der Ansicht, dass sich Saphir dafür nicht eignen würde, doch zu Beginn der 1990er Jahre präsentierten sie die erste blaue LED. Für diese Leistung, mit der sie eine Revolution in der Beleuchtungstechnik einleiteten, wurden sie 2014 mit dem Physik-Nobelpreis geehrt.

Will man LEDs für Beleuchtung im Alltag anwenden, benötigt man natürlich weißes Licht. Das lässt sich jedoch mit einer LED nicht direkt produzieren. Man muss dafür Tricks anwenden.

Eine Möglichkeit besteht darin, drei LEDs in den Farben Rot, Blau und Grün zu

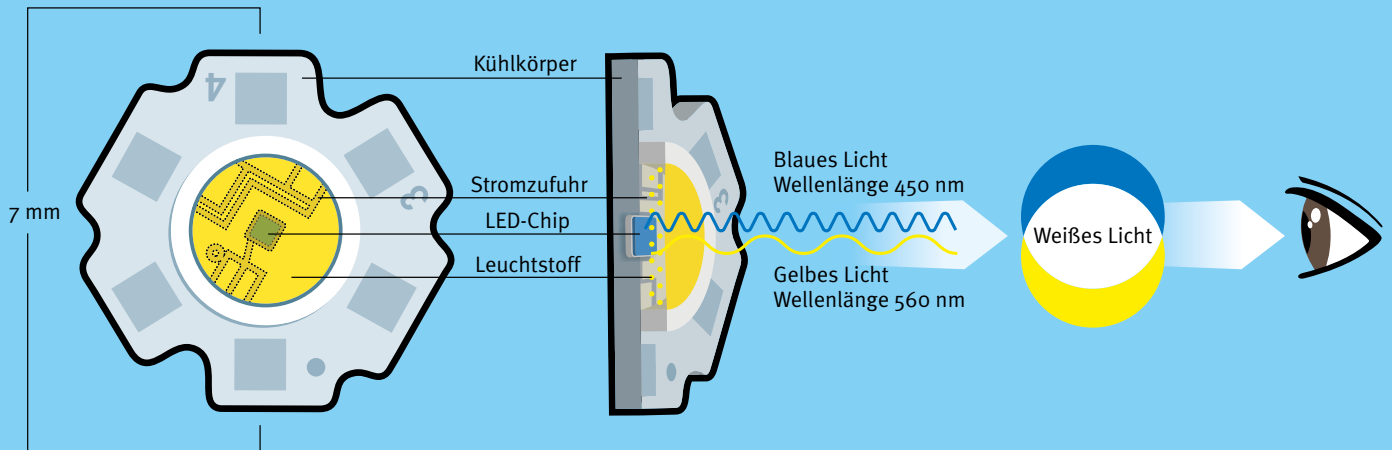
kombinieren. Sie ergeben in der Mischung weiß. Diese Technik hat aber Nachteile, so erfordert sie eine aufwändige Betriebselektronik, und wenn die LEDs unterschiedlich schnell altern, ändert sich der Farbeindruck des Lichts.

Heute wird weißes Licht überwiegend mit einem anderen Verfahren erzeugt. Hierfür

▼ Regenbogen-Effekt in umgekehrter Richtung: Überlagert man Lichtstrahler der Farben Rot, Blau und Grün erscheint die Schnittmenge in Weiß. Viele LEDs machen sich die Regeln dieser „additiven Farbmischung“ zunutze, indem sie gelbes und blaues Licht mischen. (Bild: ius)







▲ Bei der Lumineszenzkonversion kommt eine blaue LED zum Einsatz, die von einem gelben Leuchtstoff umgeben ist. Fließt Strom, regt ein Teil des blauen Lichts den Leuchtstoff zum Leuchten an, während der andere Teil unverändert durch die Leuchtstoffschicht dringt. Durch additive Farbmischung (s. 12) entsteht weißes Licht. (Bild: ius)

nutzt man, dass die beiden Komplementärfarben Blau und Gelb sich zu weiß mischen. In der Praxis fällt das Licht einer blauen LED in der Plastikkapsel auf ein teilweise transparentes Konvertermaterial, das dadurch angeregt nun gelbes Licht aussendet. Durch Streuung und Farbmischung entsteht **weißes Licht**. Diese Technik entwickelte 1995 ein Forscherteam um Jürgen Schneider vom Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik. Zeitgleich und unabhängig kam Shuji Nakamura auf dieselbe Idee.

Mit einer idealen Lichtausbeute weißer LEDs von über 150 Lumen pro Watt ist heute im Vergleich zur klassischen Glühlampe eine Energieeinsparung von bis zu 80 Prozent möglich. Lumen ist die internationale Einheit für den Lichtstrom oder die Lichtmenge. Außerdem besitzen LEDs eine sehr hohe Lebensdauer. Das prädestiniert die leuchtenden Halbleiter für alle möglichen Anwendungen, zum Beispiel im Auto. Ingenieure forschen unter anderem an intelligenten Scheinwerfern. Setzt man diese aus vielen kleinen LED-Birnen zusammen, so können diese einzeln angesteuert werden. Das ermöglicht es, dass das Scheinwerferlicht selektiv und aktuell bestimmte Bereiche am Straßenrand wie Schilder oder Passanten ausleuchtet.

#### Licht aus Kunststoff

Völlig andere Möglichkeiten für Beleuchtungstechnik und Lichtdesign eröffnen zukünftig organische Leuchtdioden, kurz OLED genannt. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem organischen Halbleitermaterial, einem phosphoreszierenden

► 100 bis 200 Meter Wassertiefe ist das Revier des Schwarzanglers, der mit seinem markanten Leuchtorgan Beutetiere anlockt. (Bild: Sven Tränkner, Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum)

Stoff, der bei Anschluss an eine elektrische Gleichspannung leuchtet. Licht aus Kunststoff gewissermaßen.

LEDs sind kleine Halbleiter-Bauelemente und werden deshalb als Punktstrahler bezeichnet. OLEDs sind hingegen ausge dehnte Flächenstrahler. Die aktiven, organischen und größtenteils transparenten Schichten sind mit weniger als einem Tausendstel Millimeter extrem dünn und lassen sich auf Kunststofffolien aufbringen. Ein komplettes OLED-Beleuchtungssystem kann deshalb ultraflach, transparent und biegsam sein und zudem eine große Fläche abdecken. Da OLEDs auch so hergestellt werden können, dass sie im ausgeschalteten Zustand durchsichtig sind, ließen sie sich in Fenstergläser integrieren. Im ausgeschalteten Zustand erlauben sie den Blick nach draußen, eingeschaltet leuchten sie in allen gewünschten Farben und verhindern gleichzeitig den Blick ins Wohnungsinnere. Mit diesen Eigenschaften sind der Phantasie von Designern kaum noch Grenzen gesetzt.

Allerdings bedarf es hier noch erheblicher Forschung. Insbesondere die Lichtausbeute und die Haltbarkeit der leuchtenden Folien müssen noch verbessert werden. Bislang findet man sie vor allem in Displays einiger Smartphones. Sie besitzen einen stärkeren Kontrast und reagieren schneller als LED-Displays.

## INFO



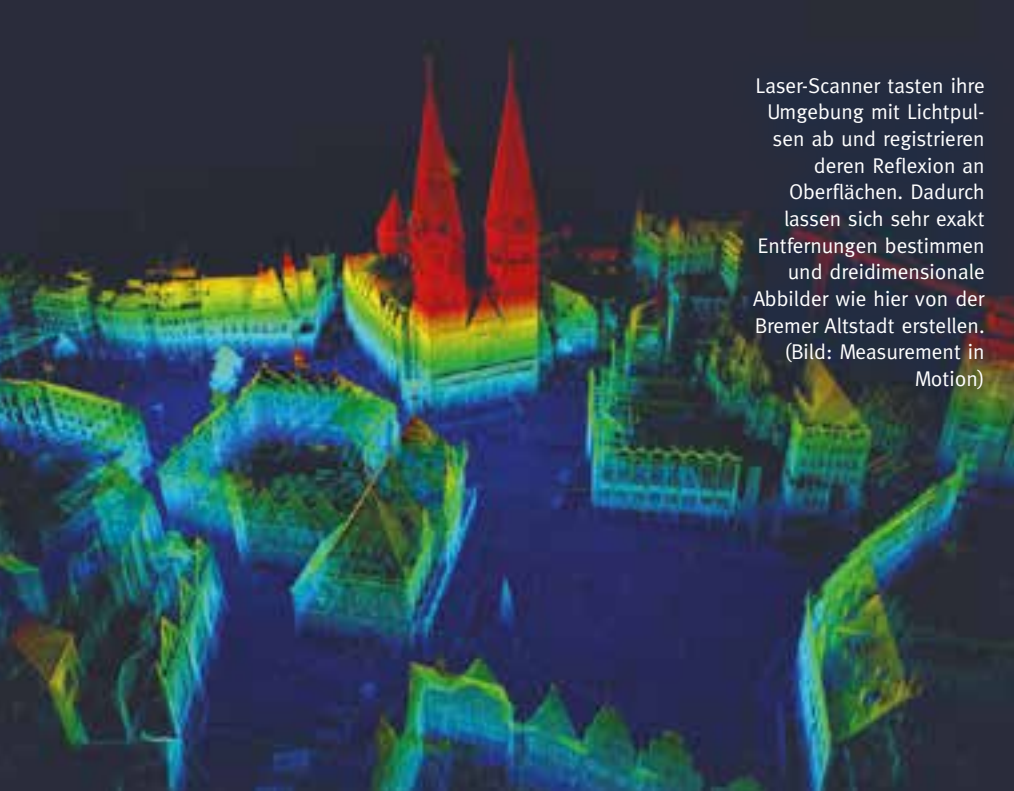
### Lebende Laternen

Die Natur hat manche Pflanzen und Tiere mit eigenen Lampen ausgestattet. Damit können sie Beute anlocken, ihre Umgebung erhellen oder auch kommunizieren.

Biolumineszenz, oft auch kaltes Licht genannt, basiert auf chemischen Reaktionen. Meistens nimmt ein Biomolekül molekularen Sauerstoff auf. Das neue Molekül gibt Kohlendioxid ab und sendet dabei Licht aus.

Am häufigsten tritt die Biolumineszenz bei Fischen auf. Auffällige Beispiele sind die Angler- und Taschenlampenfische. Allerdings besitzen sie gar keine körpereigenen Lampen, sondern sie leben in einer Symbiose mit Leuchtbakterien, die das Licht erzeugen. Manche Fische können ihre Lampen sogar verdunkeln, indem sie das Lichtorgan nach innen drehen, oder eine Art Lid darüber ziehen. Bei Glühwürmchen und Glühkäfern erzeugen hingegen körpereigene Zellen das Licht.

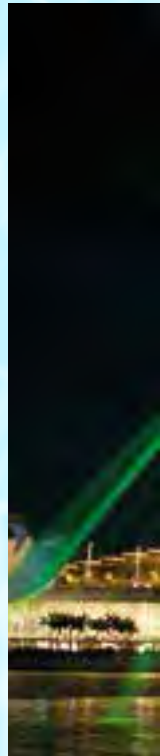




Laser-Scanner tasten ihre Umgebung mit Lichtpulsen ab und registrieren deren Reflexion an Oberflächen. Dadurch lassen sich sehr exakt Entfernungen bestimmen und dreidimensionale Abbilder wie hier von der Bremer Altstadt erstellen. (Bild: Measurement in Motion)

## Das unterschätzte Universalgenie

Anfangs galt der Laser als „Erfindung auf der Suche nach einer Anwendung“. Heute ist er im Alltag, der Industrie und Forschung unverzichtbar. Er schweißt, poliert und schneidet Werkstücke, spielt CDs und DVDs ab, scannt Barcodes ein, ist präzises Messinstrument in der Forschung und vieles mehr.



## Lichtlawine im Spiegelkabinett

Im August 1916 kam Einstein auf einen folgenreichen Gedanken. Wenn ein Photon mit passender Energie auf ein Atom trifft, springt ein Elektron auf eine energiereichere „Bahn“. Den Vorgang nennt man Absorption. Das Atom befindet sich danach in einem angeregten Zustand. Fällt das Elektron wieder auf das energetisch tiefer liegende Niveau herunter, wird ein Photon abgegeben. Diesen Vorgang nennt man spontane Emission.

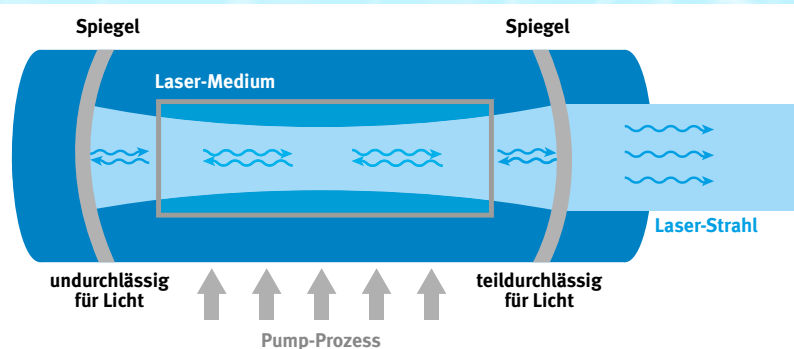
Doch dieses Herunterfallen geschieht nicht nur spontan. Es ist unter bestimmten Bedingungen auch möglich, dass ein Photon in einem angeregten Atom das Elektron vom höheren Energieniveau gezielt in den Grundzustand „zurückschubst“, und zwar genau dann, wenn die Energie des anregenden Photons exakt so groß ist wie die Energie, die das gebundene Elektron bei seinem Quantensprung abgeben soll. Das nennt man stimulierte Emission. Hierbei wird ein zweites Photon frei, das mit dem auslösenden Photon im Takt schwingt. Die beiden Photonen können nun zwei weitere Atome zur Emission stimulieren und so weiter. Es entsteht eine Lawine aus Photonen, die alle dieselbe Energie besitzen. Das austretende Licht ist deshalb einfarbig, anders gesagt: Das Licht schwingt ausschließlich mit einer Wellenlänge. Damit dieser Prozess funktioniert, müssen sich immer ausreichend viele Atome im angeregten Zustand befinden. Physiker sagen, sie werden in diesen Zustand gepumpt. Dies geschieht auf unterschiedliche Weise, beispielsweise mit elektrischen Entladungen, Blitzlampen oder einem anderen Laser.

Man kann dieses Experiment in unterschiedlichen Materialien ausführen. Der Erfinder des Lasers, Theodore Maiman, nutzte 1960 einen länglichen Rubin, dessen beide Enden er verspiegelte. Dadurch laufen die Photonen wie in einem Spiegelkabinett hin und her und verstärken sich immer weiter. Ist einer der beiden Spiegel teilweise für Licht durchlässig, so kann das im Innern erzeugte, im Gleichtakt schwingende Laserlicht in Form eines gebündelten Strahls austreten.

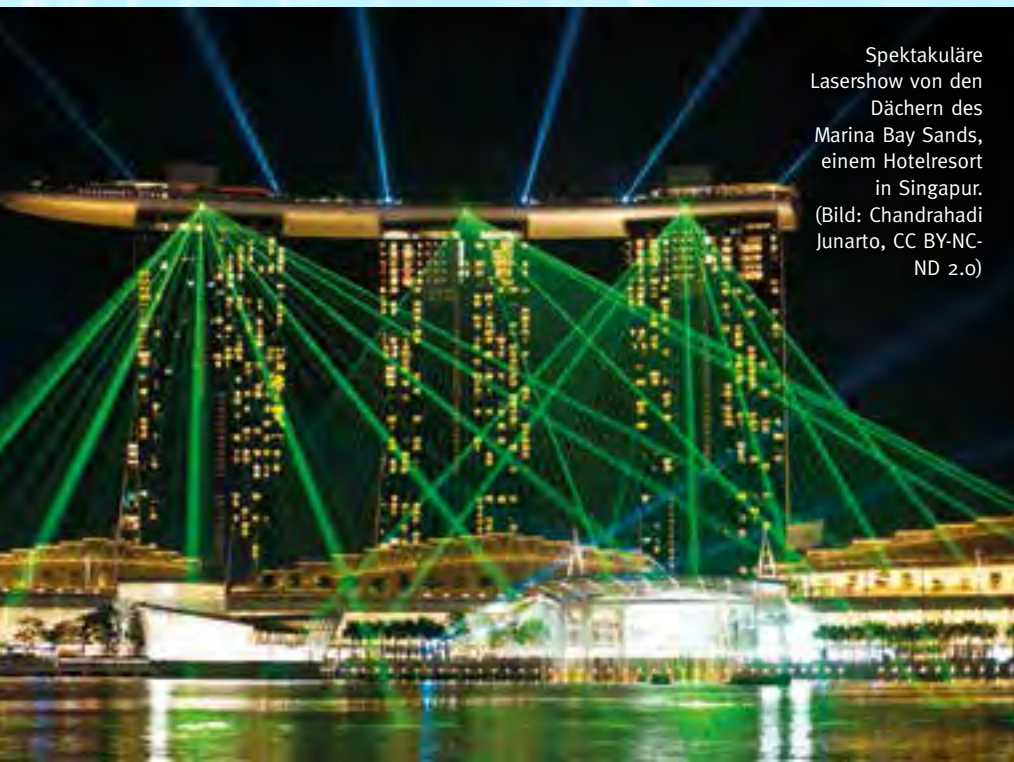
## Licht im Gleichtakt – der Laser



Beim Laserschneiden von Metallblechen fallen keine zusätzlichen Werkzeugkosten und Rüstzeiten an – die Produktion kann schnell an den Bedarf angepasst werden. (Bild: Fraunhofer IWS Dresden)







Spektakuläre Lasershow von den Dächern des Marina Bay Sands, einem Hotelresort in Singapur. (Bild: Chandrahadi Junarto, CC BY-NC-ND 2.0)



## Das extreme Laser-Trio

In östlichen Ländern der Europäischen Union entstehen zurzeit Laserzentren der Superlative, die unter dem gemeinsamen Namen European Extreme Light Infrastructure (ELI) auftreten. Drei Zentren sind bereits geplant, ein viertes soll später hinzukommen. Sie haben unterschiedliche, sich ergänzende wissenschaftliche Ziele:

- **Prag, Tschechische Republik:**  
Femtosekunden-Laserpulse höchster Intensität für Grundlagenforschung und Anwendungen.
- **Szeged, Ungarn:**  
Attosekunden-Laserpulse zur Untersuchung elektronischer Vorgänge in Atomen und Molekülen.
- **Magurele, Rumänien:**  
Erzeugung von Gammastrahlung mit Lasern zum Studium von Atomkernen.

Neben Fragen der Grundlagenforschung soll ELI auch den Weg für neue Anwendungen von Superlasern bereiten, beispielsweise für kompakte Beschleuniger in der Tumorthherapie. Am Projekt sind etwa 40 Forschungseinrichtungen und Universitäten aus 13 EU-Staaten beteiligt.

Als europäisches Forschungszentrum wird ELI Forschenden in und außerhalb Europas zur Verfügung stehen.



Mit Laserlicht machen Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt Luftströmungen an den Flügeln eines Passagierjets sichtbar. Die Erkenntnisse helfen, zukünftige Tragflächen für langsamere und leisere Anflüge zu optimieren. (Bild: DLR, CC BY 3.0)

Der Laserresonator: Die über einen Pump-Prozess (→ Kasten links) im Lasermedium erzeugten Photonen (wellenförmige Pfeile) werden durch Reflexion zwischen zwei Spiegeln verstärkt. Durch den teiltransparenten Spiegel verlässt schließlich ein gebündelter Strahl mit sehr reiner Lichtfarbe und im Gleichtakt schwingenden Photonen den Laser. (Bild: ius)

## Kurz – kürzer – am kürzesten

Mit ultrakurzen Laserpulsen lassen sich Vorgänge im Innern eines Atoms untersuchen. Der Weltrekord der kürzesten Pulse liegt bei etwa 50 Attosekunden, wobei eine Attosekunde der Milliardste Teil einer Milliardstel Sekunde ist. Diese Zeitdauer verhält sich zu einer Sekunde wie eine Sekunde zum Alter des Universums von 13,7 Milliarden Jahren. In diesem kurzen Zeitraum vollführt eine Welle des sichtbaren Lichts gerade einmal ein Tausendstel einer Schwingung. Damit eine Welle überhaupt sinnvoll definiert ist, muss sie mindestens eine Schwingung ausgeführt haben. Das ist innerhalb einer Attosekunde nur bei Wellen im extremen ultravioletten oder Röntgenlicht der Fall, weswegen Attosekundenpulse in diesen Spektralbereichen erzeugt werden. Das wird zukünftig in dem Röntgenlicht-Freie-Elektronenlaser XFEL möglich sein, der zurzeit in Hamburg entsteht.





# Mit Licht beobachten

Wer zum ersten Mal mit einem Mikroskop die Tierwelt in einem Wassertropfen entdeckt oder mit einem Fernrohr Berge und Täler auf dem Mond erkundet, wird diese Momente wohl nie vergessen. Heutige Mikroskope und Teleskope können unvergleichlich viel mehr. Insbesondere nutzen sie die Möglichkeiten, das Licht in seine spektralen Anteile zu zerlegen. Mit trickreichen Techniken lassen sich sogar physikalische Grenzen umgehen.



Zum Biologieunterricht gehört es, dass die Schüler und Schülerinnen mit einem [Mikroskop](#) Details eines Fliegenauges untersuchen oder am Beispiel einer Zwiebel den Grundbauplan von Pflanzenzellen zu verstehen lernen. Diese schon seit Jahrhunderten verwendete Form des Lichtmikroskops hat nichts von ihrer Faszination verloren. Heutige Laborinstrumente sehen allerdings ganz anders aus. Sie sind auf Forschungsbereiche wie Biologie, Medizin, Materialanalyse oder Halbleitertechnologie spezialisiert, mit Digitalkameras und Bildschirmen bestückt, und individuelle Software erleichtert die Inter-

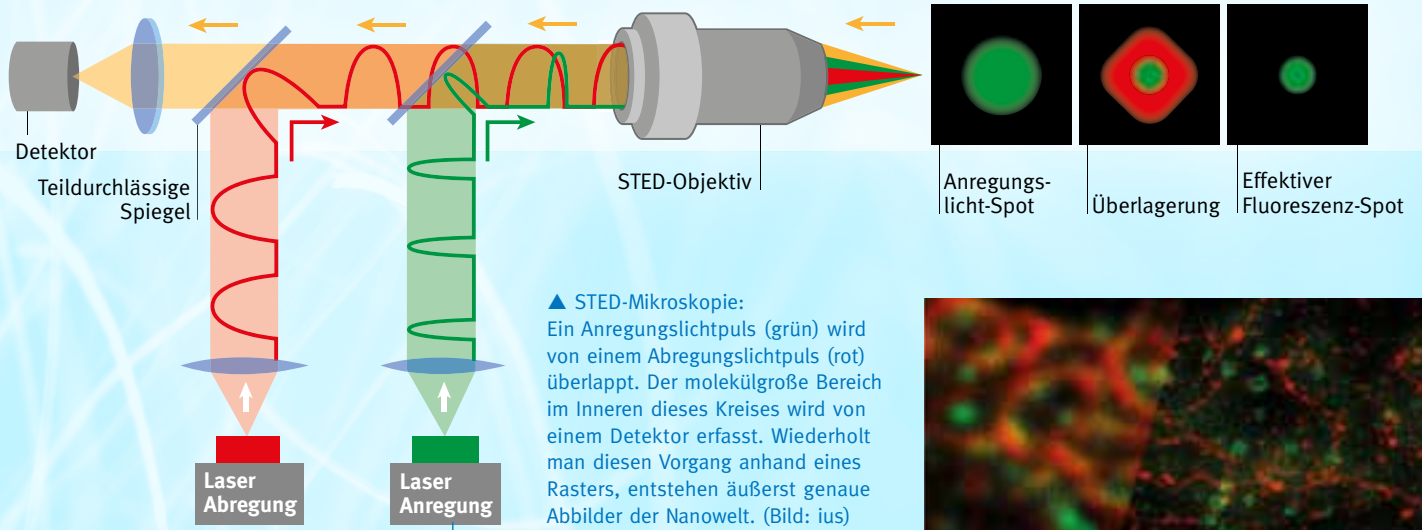
pretation der Messdaten, ja macht sie unter Umständen erst möglich. Dafür gibt es sogar schon Apps für Smartphones und Tablets.

Für eine Vielzahl von Aufgaben gibt es Lösungen: Undurchsichtige Stoffe werden von oben angestrahlt, sehr dünne Objekte durchleuchtet man. Unabhängig von der Qualität der Optik setzt jedoch ein physikalisches Gesetz eine Grenze in dem Erkennen von Details. Ihre Ursache ist die Welleneigenschaft des Lichts. Wie der deutsche Physiker Ernst Abbe, der den größten Teil seines Lebens in Jena wirkte, 1873 he-

rausfand, kann die Auflösung eines optischen Mikroskops nie nennenswert über die halbe Wellenlänge des Lichts hinausgehen. Für blaues Licht bedeutet das: Alles, was kleiner als etwa 200 Nanometer, entsprechend einem Fünftausendstel Millimeter, ist, lässt sich nicht mehr detailliert erkennen. Das ist zwar immer noch rund 300-mal weniger als die Dicke eines Haares, dennoch fühlten sich einige Physiker angespornt, diese Grenze zu überwinden, um noch kleinere Details sichtbar zu machen.

In den 1990er Jahren begannen sie mit Entwicklungen, die in dem sogenannten STED-Mikroskop mündeten (STED steht für Stimulated Emission Depletion). Hierfür wurde Stefan Hell, Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen, zusammen mit zwei amerikanischen Forschern 2014 mit dem Chemie-Nobelpreis geehrt.





Bei Hells Technik werden zunächst Moleküle, die sich zum Beispiel im Inneren einer Zelle befinden können, mit einem Farbstoff versehen. Nun wird die Zelle mit einem sehr scharf gebündelten Laserstrahl abgerastert. Trifft der Strahl auf eines der Farbstoffmoleküle, so leuchtet es wie ein winziges Lämpchen auf. Auf diese Weise entsteht Punkt für Punkt ein Bild. Allerdings unterliegt diese Abbildung immer noch der Abbe-Grenze: Alle Lämpchen, die weniger als 200 Nanometer voneinander getrennt sind, verschwimmen zu einem Fleck. Jetzt kommt der Trick: Kurz nach der Leuchtanregung mit dem Laser-

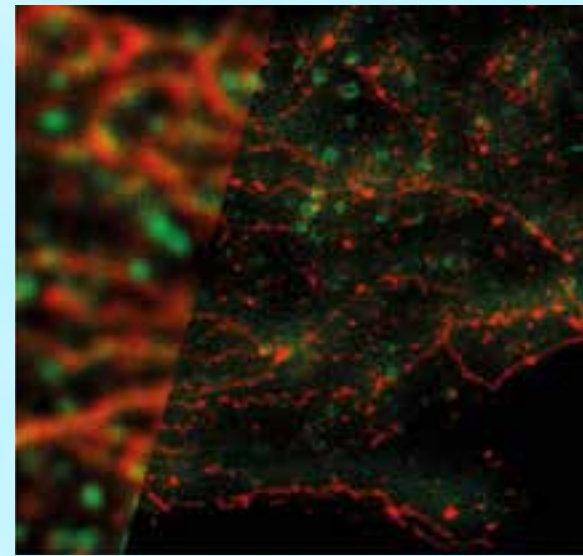
◀ Durch bezahlbare Lichtmikroskope können auch Schüler und Amateurforscher von den Möglichkeiten der optischen Technologien profitieren. Laborinstrumente versprechen hingegen weit komplexere Einsatzgebiete. (Bild: Pavel L Photo and Video, Shutterstock)

▼ Der Nordamerika-Nebel, eine Wolke aus kosmischem Staub und Gas. Die linke Aufnahme zeigt ein Bild, wie es beim Blick durch ein optisches Teleskop entsteht. In der Infrarot-Aufnahme rechts werden Strukturen und Sterne sichtbar, die beim „normalen“ Betrachten verborgen geblieben wären. (Bild: NASA)

puls schaltet ein zweiter, ringförmiger Laserstrahl alle Farbstoffmoleküle in der Umgebung des leuchtenden Moleküls aus. Hierzu muss die Wellenlänge des Laserstrahls genau so eingestellt sein, dass die Elektronen aus dem höheren Energieniveau auf das untere Grundniveau zurückfallen. Die Information über den präzisen Ort der noch leuchtenden Moleküle liefert die Position des Laserstrahls, die sich bis auf wenige Nanometer genau bestimmen lässt. Anschließend werden die Rasterpunkte am Computer zu einem lichtmikroskopischen Bild zusammengesetzt, das nur wenige Nanometer kleine Strukturen scharf abbildet und damit weit unter dem Abbe'schen Limit liegt. Hells STED-Mikroskop wird insbesondere zur Untersuchung von Strukturen und biophysikalischen Vorgängen in Zellen eingesetzt.

### Blicke in unermessliche Weiten

Mit Mikroskopen erforscht man den Mikrokosmos, mit Teleskopen den Makrokosmos. In den vergangenen 50 Jahren haben Astronomen Techniken entwickelt,



▲ Zwei-Farben-STED-Aufnahme des Hirntumors Glioblastom – grün das Protein Clathrin, rot das Protein  $\beta$ -Tubulin (rechts). Das linke Bild ist mit einem Standardmikroskop erzeugt. (Bild: Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie)

mit denen sie den gesamten Bereich des elektromagnetischen Spektrums vom Radio- bis zum Gammabereich abdecken. Jeder Wellenlängenbereich lässt das Universum im wahrsten Sinne des Wortes in einem anderen Licht erscheinen: Im Infrarotbereich blicken Astronomen ins Innere von Staubwolken, wo neue Sterne und Planeten entstehen, im energiereichen Röntgenbereich offenbaren sich die heißesten Objekte wie die Gaswolken explodierender Sterne.







▼ Für den Aufbau optischer Pinzetten sind normalerweise teure Gerätschaften erforderlich. Forscher der Universität Osnabrück bewiesen aber im Rahmen ihres Projekts „LEGO Photonics“, dass sich einige Teile kostensparend durch die weltbekannten Bausteine ersetzen lassen. (Bild: Imlau research group)

## INFO



### Lichtpinzetten

Licht besitzt keine Ruhemasse, dennoch überträgt es auf den Körper einen Impuls. Das macht man sich bei der optischen Pinzette zu Nutze. Hier zieht ein stark fokussierter Laserstrahl Nano- und Mikropartikel zum Brennpunkt hin. Weiterentwicklungen wie die holografische optische Pinzette ermöglichen es, Hunderte von verschiedenen Objekten zu fangen und zu bewegen. So lassen sich lebende Zellen einfangen und ungestört mit einem Mikroskop untersuchen.

▲ Eine Aufgabe des Röntgenteleskops XMM-Newton ist das Erforschen von Anfang und Ende eines Sternenlebens. Das Weltraumobservatorium der ESA ist bereits seit 1999 im All; ursprünglich war seine Mission nur bis 2005 geplant. (Bild: ESA)

Gewaltige Spiegel sammeln im Innern der Teleskope die Strahlung und fokussieren sie auf einen Detektor, zum Beispiel eine Kamera. Je größer der Spiegel, desto mehr Licht sammelt das Gerät und desto lichtschwächere Himmelskörper lassen sich nachweisen. Dafür muss die Oberfläche extrem genau poliert sein. Sie darf nicht mehr als rund ein Zehntel der Beobachtungswellenlänge von der Idealform abweichen. Im Bereich des sichtbaren Lichts sind das einige zehn Nanometer, entsprechend einige Hunderttausendstel Millimeter, während die Parabolantennen von Radioteleskopen nur bis auf einige Millimeter oder Zentimeter genau geformt sein müssen.

Je kleiner die Wellenlänge ist, desto höher sind die Ansprüche an die Genauigkeit. Röntgenteleskope stehen in dieser Hinsicht an der Spitze. Hier kommt noch erschwerend hinzu, dass diese energiereiche Strahlung Spiegeloberflächen durchdringt. Eine optische Abbildung ist nur möglich, wenn die Strahlen in sehr flachem Winkel auf eine Metalloberfläche treffen. Dies erinnert an das Verhalten eines glatten Steins, der über eine Wasseroberfläche hüpfert, wenn man ihn sehr flach wirft.

Die genauesten jemals hergestellten Spiegel arbeiten in den Weltraum-Röntgenteleskopen XMM-Newton der Europäischen Weltraumorganisation ESA sowie in Chandra der NASA. Auf der Oberfläche sind Unebenheiten durchschnittlich nicht höher als wenige Zehnmillionstel Millimeter. Vergrößert man einen der XMM-Spiegel in Gedanken etwa auf die Größe des Boden-

sees, so gäbe es keine Unebenheiten von mehr als einem Hundertstel Millimeter.

Derzeit ist eine neue Generation von optischen Riesenteleskopen im Bau. Das größte entsteht auf einem hohen Berg in den chilenischen Anden. Dieses Extremely Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO wird einen Hauptspiegel mit 39 Metern Durchmesser erhalten, der jedoch aus fast 800 sechseckigen Elementen zusammengesetzt sein wird. Ein solcher Gigant lässt sich nicht am Stück fertigen.

Doch die beste Teleskopoptik nützt nur wenig, wenn die Sicht durch die Atmosphäre getrübt ist. Selbst unter besten Bedingungen nehmen wir mit bloßem Auge ein Flimmern der Sterne wahr. Dies beruht darauf, dass die Luft ständig in Bewegung ist und das Sternenlicht auf dem Weg zum Erdboden wegen der auftretenden Dichteschwankungen mehrfach gebrochen wird.

Astronomen haben eine geniale Technik erfunden, mit der sich dieses bis dahin als unüberwindbar geltende Problem wirkungsvoll umgehen lässt: die adaptive Optik. Bevor das vom Hauptspiegel reflektierte Licht in den Detektor gelangt, wird es von einem sogenannten Wellenfrontanalysator einer Prüfung unterzogen. Er stellt fest, auf welche Weise die Lichtwelle beim Weg durch die Atmosphäre verbogen wurde. Diese Information geht an die adaptive Optik. Sie besteht aus vielen kleinen Druckelementen auf der Rückseite eines dünnen, flexiblen Spiegels. Diese verbiegen dessen Ober-

▼ In Chile soll 2024 das Extremely Large Telescope (in dieser Illustration ohne Kuppel) der Europäischen Südsternwarte in Betrieb gehen. Es wird mit 39 Metern Durchmesser zu diesem Zeitpunkt das größte Teleskop der Erde sein. (Bild: ESO, CC BY 4.0)





fläche computergesteuert mehrere hundert Mal pro Sekunde genau so, dass die verbogene Lichtwelle nach der Reflexion wieder nahezu eben ist. Erst dann gelangt sie in den Detektor, wo ein nahezu perfektes Bild entsteht.

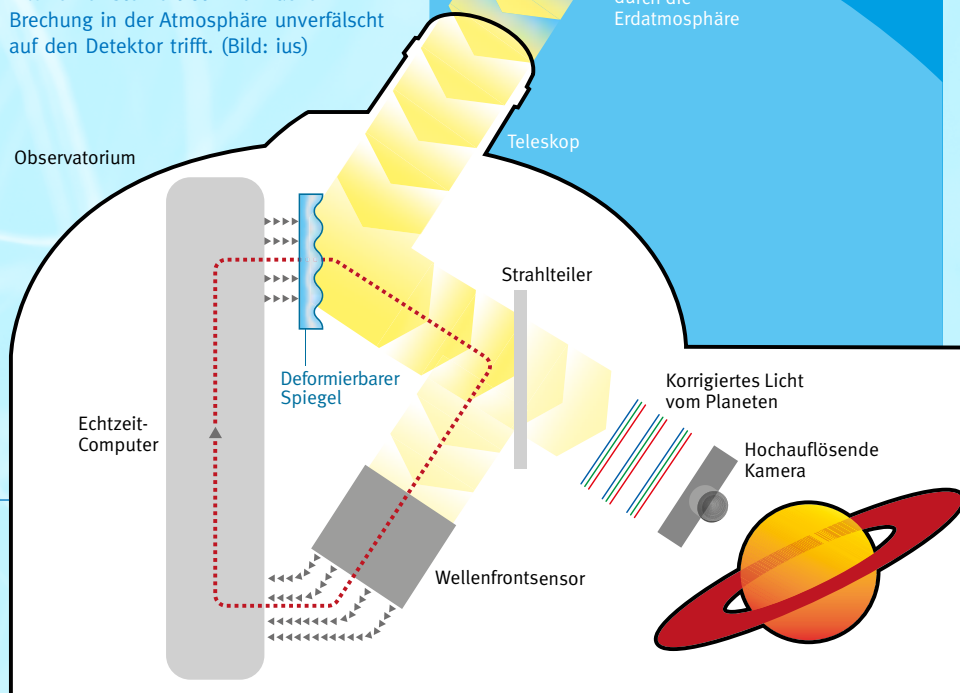
Allerdings benötigt der Wellenfrontanalysator einen ausreichend hellen Stern im Blickfeld. Ist dies nicht der Fall, behelfen sich die Astronomen an einigen Observatorien wie dem Very Large Telescope der ESO mit einem künstlichen Stern. Sie erzeugen ihn mit einem Laser, den sie parallel zur Beobachtungsrichtung in den Himmel schießen. In etwa 90 Kilometern Höhe regt er Natriumatome zum Leuchten an, die so einen kleinen hellen Fleck bilden: den künstlichen Referenzstern für die adaptive Optik.

Man kann ein Teleskop durchaus mit einem Auge vergleichen. Dann entsprechen der Sammelspiegel der Linse und die Detektoren der Netzhaut. Letztere werden gerne vergessen, wenn man nur über die großen Spiegel redet, aber letztlich sorgen sie dafür, das Licht der Sterne und Galaxien zu empfangen und so „aufzubereiten“, dass die Astronomen ihm die verborgenen Informationen entlocken können. Hierfür verwenden sie CCD-Chips, wie sie auch in Digitalkameras stecken. Astronomische CCDs besitzen jedoch eine wesentlich bessere Qualität und registrieren abhängig von der Wellenlänge des Lichts über 90 Prozent der ankommenden Photonen. Fotografische Filme kamen nur auf 5 bis 10 Prozent.

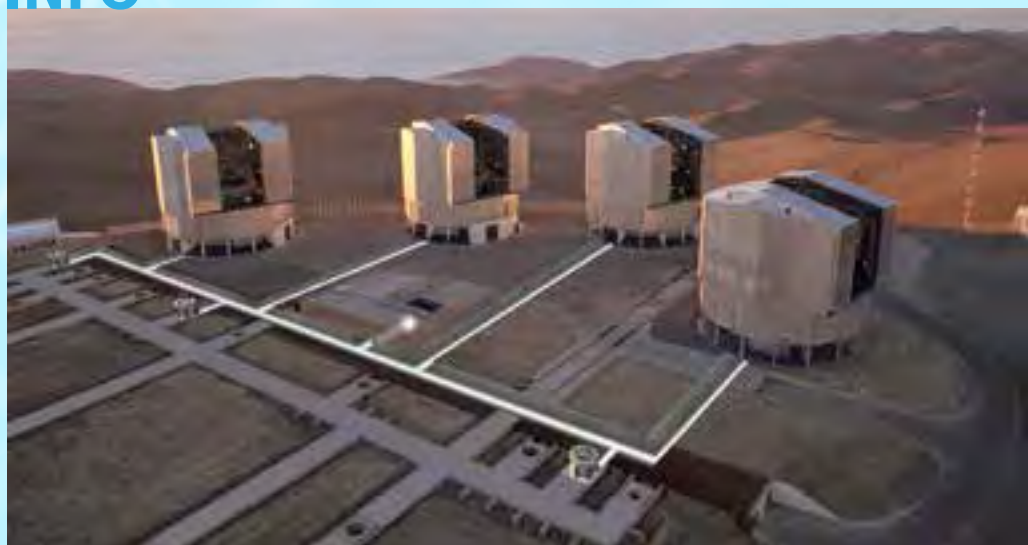
► Das Very Large Telescope (hier mit drei kleineren und vier großen Teleskopen) und die Wege, auf denen die Informationen zum interferometrischen Labor in der Mitte des Komplexes (Stern) übertragen werden. (Bild: ESO)

Neben Kameras sind Spektrografen die wichtigsten Teleskopinstrumente. So wie Joseph von Fraunhofer vor 200 Jahren das Sonnenlicht in seine Spektralfarben zerlegte, analysieren heute noch Astronomen das Licht der Sterne. Aktuelles Beispiel: der Multi Unit Spectroscopic Explorer MUSE am Very Large Telescope. Dieses sieben Tonnen schwere, aus Optik, Mechanik und Elektronik bestehende Meisterwerk fertigt nicht nur Bilder an, sondern liefert gleichzeitig für jeden Detektor-Pixel ein Spektrum. MUSE sammelt bei jeder Aufnahme um die 90.000 Spektren und zeichnet somit unglaublich detaillierte Karten von der chemischen Zusammensetzung, der Bewegung und anderen Eigenschaften des beobachteten Himmelskörpers auf. Fraunhofer würde staunen.

► Schematischer Aufbau einer adaptiven Optik. Durch ständiges Korrigieren der Spiegeloberfläche wird erreicht, dass das Bild ferner Sterne trotz mehrfacher Brechung in der Atmosphäre unverfälscht auf den Detektor trifft. (Bild: ius)



## INFO

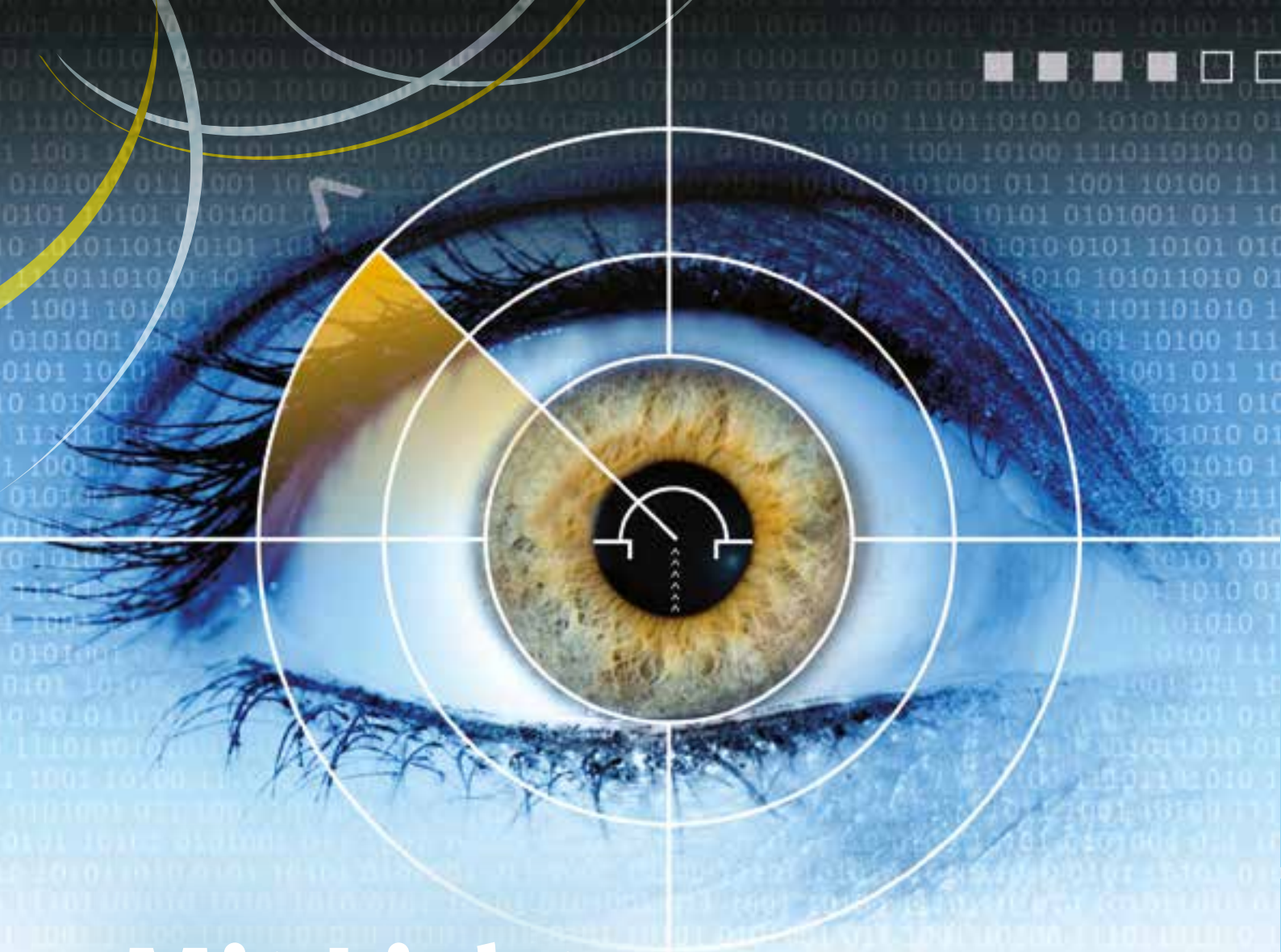


## Vereint beobachten

Je größer der Sammelspiegel eines Teleskops ist, desto kleinere Details lassen sich mit ihm wahrnehmen. Es ist auch möglich, mit zwei Teleskopen gleichzeitig einen Himmelskörper anzuvisieren. Führt man die beiden Strahlengänge in einem Fokus zusammen, so entspricht die Auflösung eines solchen Interferometers der eines Einzelspiegels mit dem Durchmesser, entsprechend dem Abstand der beiden Spiegel. Die Überlagerung der Lichtwellen muss bis auf ein Tausendstel Millimeter genau erfolgen.

Beim Very Large Telescope der ESO in Chile lassen sich sogar vier Acht-Meter- und vier 1,8-Meter-Teleskope zu einem Interferometer zusammenschalten. Die Auflösung entspricht dann der eines 120-Meter-Teleskops, mit dem sich theoretisch die beiden Scheinwerfer eines Autos auf dem Mond unterscheiden ließen. Astronomen nutzen diese Technik zum Beispiel, um möglichst kleine Details in fernen Galaxien zu entdecken.





# Mit Licht heilen

**Ein feiner, intensiver Laserstrahl kann zum Skalpell werden und Hautmale entfernen oder Augenleiden heilen, Hirnforschern ist er ein willkommenes Präzisionswerkzeug. Licht kann uns unter Umständen aber auch schaden.**

Tattoos sind weit verbreitet. Doch was man als Jugendlicher cool fand, gefällt einem im fortgeschrittenen Alter vielleicht nicht mehr. Was dann? Das Mittel der Wahl ist der Laser. Der erwärmt die beim Tätowieren in die Haut eingebrachten Farbpigmente bis sie verdampfen. Eine Narbenbildung ist allerdings nicht ausgeschlossen.

Feuermale, Besenreiser und Blutschwämme sind unschöne Hautveränderungen, die sich ebenfalls mit Laserlicht entfernen lassen. Der auftreffende Strahl schneidet hierbei nicht das Gewebe weg, sondern er erwärmt es sehr stark. Als Folge davon gerinnen die Eiweißbestandteile der Zellen und sterben ab.

Die Behandlung solcher Feuermale gehörte zu den ersten Anwendungen des Lasers in der Medizin. Seitdem hat sich dessen scharfer Strahl in vielen Bereichen der Medizin etabliert, wobei die Wahl der Intensität, Wellenlänge und Pulslänge des Strahls genau auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten ist: Der Zahnarzt greift anstelle des nervtötenden Bohrers zum gepulsten Infrarotlaser, um Karies zu entfernen, der Chirurg setzt einen energiereichen CO<sub>2</sub>-Laser als Skalpell an, um ganz feine Schnitte auszuführen. Der Vorteil: Blutgefäße werden direkt verschlossen, die Wunden bluten nicht. Auch in der Krebstherapie kommen Laser hin und wieder zum Einsatz.

Während der Laser in diesen Bereichen bislang nur sporadisch eingesetzt wird, ist er in der Augenheilkunde nicht mehr wegzudenken. Der erste Einsatz bestand darin, eine abgelöste Netzhaut durch Koagulation am Augenhintergrund wieder zu befestigen. Hierbei wird die Netzhaut um bereits abgelöste Gebiete herum verschweißt (koaguliert), wodurch sich dort Narbengewebe bildet. Dies beugt einer weiteren Ablösung der Netzhaut vor.

Ein wahrer Helfer in der Not ist der Laser beim Grauen Star, einer Trübung der Augenlinse. Bei der Operation wird die natürliche Linse mit einem Laserstrahl zertrümmert, abgesaugt und durch eine Kunstlinse ersetzt. Dieser Eingriff erfolgt allein in Deutschland etwa 800.000-mal pro Jahr.

Eine andere Domäne ist das Behandeln von Kurz- oder Weitsichtigkeit. Dieses



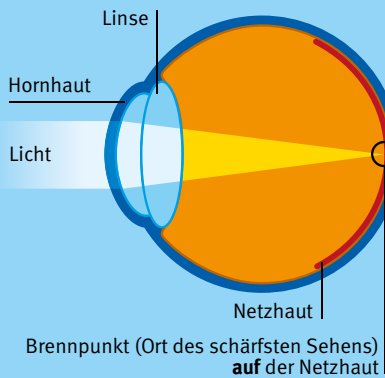
◀ Das Auge im Fokus der Technik. In der Medizin profitiert besonders unser Sinnesorgan von den Fortschritten der Lasertechnik. (Bild: Santiago Cornejo, Fotolia)

▶ Ozon-Messungen vom September 2014 zeigen das aktuelle Ausmaß des Ozonlochs (dunkelblau) über der Antarktis. (Bild: DLR, CC BY 3.0)

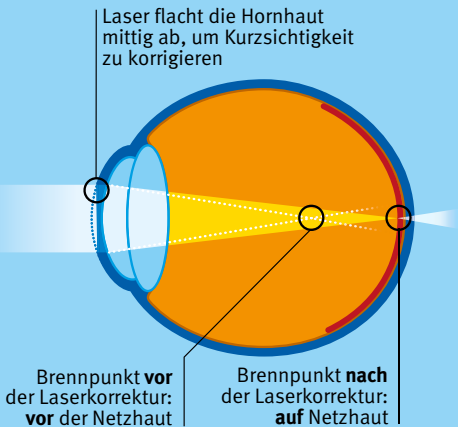
Problem geht mit einer zu starken beziehungsweise zu schwachen Wölbung der Hornhaut einher. Da ungefähr zwei Drittel der Lichtbrechung beim Übergang des Lichts von der Luft in die Hornhaut und nur ein Drittel in der Linse selbst erfolgt,

lassen sich diese Fehlsichtigkeiten mit einer **Hornhautbearbeitung** korrigieren. Genauer gesagt, wird zur Korrektur der Kurzsichtigkeit die Hornhaut in der Mitte abgeflacht, bei Weitsichtigkeit angehoben. Mit einem hochpräzisen Femtosekunden-Laser geht dies mit einer Genauigkeit von weniger als einem halben Mikrometer bei Abtragtiefen von ungefähr hundert Mikrometern.

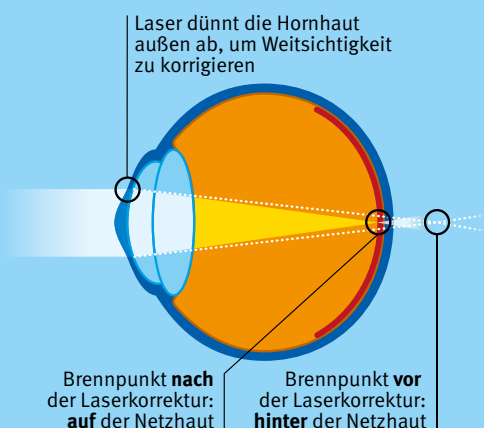
## Normalsichtigkeit



## Korrektur Kurzsichtigkeit



## Korrektur Weitsichtigkeit



## Gehirnzellen mit Licht steuern

Ein Protein namens Kanalrhodopsin in der Membran der Zellen von Grünalgen bewirkt, dass diese auf Licht reagieren. Fällt blaues Licht ein, öffnet sich ein Ionenkanal, und positiv geladene Atome (Ionen) strömen in die Zelle hinein. Ein ähnlicher Mechanismus lässt auch Gehirnzellen feuern. Bringt man nun – so die Idee – das Kanalrhodopsin gezielt in Gehirnzellen von Säugetieren ein, so lassen sich diese mit Licht steuern. Das gelang tatsächlich mit einer gentechnischen Methode, wobei die Forscher den Algen nicht die Ionenkanäle selbst entnehmen, sondern nur deren genetische Bauanleitung auf die Nervenzellen der Säugetiere übertragen. Damit war das neue Forschungsgebiet der Optogenetik geboren.

So hat man zum Beispiel Gehirnzellen von Mäusen lichtempfindlich gemacht und kann diese ganz gezielt mit Laserlicht anregen. Damit lassen sich Vorgänge wie Gedächtnisbildung und Lernprozesse untersuchen. Zukünftig soll die optogenetische Forschung helfen, Nervensystemerkrankungen wie Alzheimer und Parkinson besser zu verstehen und heilen zu können.

Im Jahr 2013 wurde Peter Hegemann (Humboldt-Universität Berlin) zusammen mit fünf weiteren Wissenschaftlern für diese Forschung, welche die Fachzeitschrift Science 2010 zum Durchbruch des Jahrzehnts erklärt hatte, mit dem renommierten „Brain Prize“ ausgezeichnet.

▶ Entfernung eines Muttermals mit einem medizinischen Laser. (Bild: mkrberlin, Shutterstock)

◀ Beim Augenlasern wird durch Korrekturen an der Hornhaut der Fokus der Lichtstrahlen, die auf die Linse treffen, zurück auf die Netzhaut verschoben – der Patient sieht wieder scharf. (Bild: ius)

## Wenn der natürliche Filter fehlt

Licht kann Moleküle verändern und zerstören. Diese Eigenschaft macht man sich in manchen medizinischen Anwendungen des Lasers zu Nutze. Aber diese Eigenschaft kann auch negative Folgen haben. So sendet die Sonne energiereiches UV-Licht aus, welches das menschliche Erbgut, die DNA, schädigt und zu Hautkrebs führen kann. In einem Höhenbereich von 20 bis 25 Kilometern beschützen uns jedoch Ozonmoleküle, indem sie diese Strahlung verschlucken. Deswegen ist ein Abbau der Ozonschicht, verursacht vor allem durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), für uns Menschen sehr gefährlich. Ein weltweites Abkommen hat die Emission der FCKW in die Atmosphäre 1987 im Rahmen des Montreal-Abkommens verboten. Diese Substanzen bleiben jedoch viele Jahrzehnte in der Luft aktiv, so dass sich die Ozonschicht vermutlich erst bis Mitte des 21. Jahrhunderts erholen und das Ozonloch über der Antarktis schließen wird.







# Mit Licht messen & filmen

**Licht ist als Messgerät ein Allrounder: Forscher untersuchen damit die Atmosphäre und strömende Flüssigkeiten ebenso wie den „Paartanz“ von Elektronen im Atom oder Details der Photosynthese. Ultrazeitlupenfilme aus dem Nanokosmos sind der derzeitige Hit.**

Viele kennen die Situation: Das Wohnzimmer muss renoviert und dafür zuvor vermessen werden. Aber dann passiert's: Der Zollstock ist zu kurz, er passt nicht in die Nische und biegt sich immer durch. Mit Licht geht das heutzutage viel einfacher und genauer. Ein Gerät sendet einen gepulsten Laserstrahl aus, der wird an der Wand reflektiert und kehrt zum Gerät zurück. Aus der verstrichenen Zeit und der bekannten Lichtgeschwindigkeit berechnet das Instrument die Entfernung. Solche Laserzollstöcke sind bis auf etwa drei Millimeter genau. Da Licht in einer Sekunde 300.000 Kilometer zurücklegt, muss das Instrument die Zeitspanne auf den beeindruckenden Wert von einer Hundertmilliardenstel Sekunde genau bestimmen.

Das Prinzip dieses Alltagsgerätes findet sich in einer Vielzahl physikalischer Experimente wieder. Das Besondere an dieser Methode ist das berührungslose Messen, bei dem die Forscher den Untersuchungsgegenstand nicht verändern. Das zeichnet den Laser in der Atmosphären- und Klimaforschung aus, zum Beispiel in der Umweltforschungsstation [Schneefernerhaus](#).

Von dieser in 2650 Metern Höhe knapp unterhalb des Gipfels der Zugspitze gelegenen Forschungsstation aus haben Wissenschaftler einen freien Blick in die Atmosphäre. Mit einer Vielzahl von Geräten werden hier täglich die Konzentrationen von Schwebstoffen (Aerosolen) sowie rund 40 Substanzen gemessen, darunter

die Treibhausgase Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan sowie Ozon, Stickoxide und der Ozonkiller FCKW.

Ein wichtiges Instrument ist ein sogenanntes LiDAR, was für Light Detection And Ranging steht. Ein solches Instrument schießt parallel zwei gepulste Laserstrahlen in den Himmel. Die Wellenlängen sind so gewählt, dass die des einen Strahls von der Molekülsorte, die man messen möchte, absorbiert wird und die des anderen nicht. Nehmen wir als Beispiel Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Ein Teleskop registriert das von den Molekülen rückgestreute Licht. Bei der Wellenlänge des einen Strahls verschlucken die  $\text{CO}_2$ -Moleküle das Licht teilweise, so dass dieser zurückgestreute Teil im Detektor dunkler erscheint als der des anderen Strahls. Ein Computer berechnet aus dem Vergleich der beiden Signale die Konzentration des Kohlendioxids. Die Höhe ergibt sich – wie



◀ Dank Messraten von mehr als einer Million 3D-Punkten pro Sekunde bietet LiDAR zahlreiche Einsatzmöglichkeiten zur Erfassung der Umgebung. Dadurch lassen sich digitale räumliche Karten erstellen, die unter anderem für zukünftige selbstfahrende Autos eine Rolle spielen können. (Bild: IKG, Leibniz Universität Hannover)

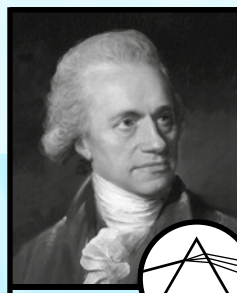
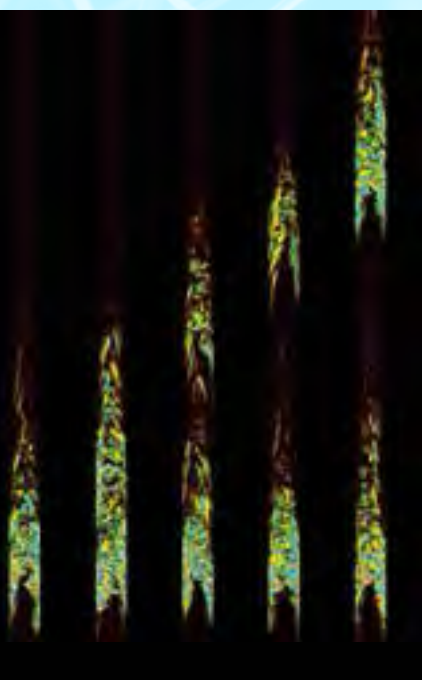
beim Laserzollstock – aus der Laufzeit der Laserpulse. Das Gerät im Schneefernerhaus ist so empfindlich, dass es sogar als Folge von Waldbränden in Kanada erhöhte Rußkonzentrationen feststellen konnte.

### Chaos und Turbulenzen

In der Atmosphäre spielen Turbulenzen eine sehr große Rolle, vor allem bei der klimatisch wichtigen Wolkenbildung. Theoretisch lassen sie sich allerdings nur schwer beschreiben, Experimente sind deshalb umso wichtiger. Das gilt auch für Vorgänge auf kleineren Skalen, wie sie im Alltag auftauchen.

Die Situation ist bekannt: Aus einem Hahn fließt Wasser gleichmäßig heraus. Dreht man ihn weiter auf, so fängt das Wasser irgendwann an zu sprudeln – es wird turbulent. Die Ursachen für das plötzliche Umschlagen ins Chaos sind noch längst nicht ausreichend verstanden. Sie sind aber unerwünscht, zum Beispiel beim Transport von Öl durch Pipe-

▼ In Wasserrohren können Turbulenzen (hier in Falschfarben gekennzeichnet) schon an kleinen Unebenheiten der Rohrwand entstehen. In dieser Simulation teilt sich ein solcher „Wirbelfleck“ in zwei. (Bild: MPI, Marc Avila)



**1800**

**Friedrich W. Herschel** spaltet mit einem Prisma das Licht der Sonne und entdeckt dabei die Infrarotstrahlung.

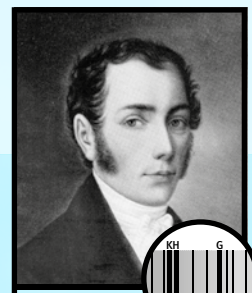
→ Seite **6**



**1801**

**Johann W. Ritter** entdeckt die Ultraviolett-Strahlung, als ihm auffällt, dass diese Silberchloridpapier schwarz färbt.

→ Seite **7**



**1814**

**Joseph von Fraunhofer** beobachtet und systematisiert dunkle Bereiche im Sonnenspektrum – die Fraunhoferlinien.

→ Seite **5**

▲ Eine Auswahl berühmter Physiker, die sich in den vergangenen 200 Jahren um die Erforschung des elektromagnetischen Spektrums verdient gemacht haben. In den blauen Kästchen ist die Seitenzahl zu finden, auf der sie in diesem Heft (erstmalig) erwähnt werden. (Grafik: ius)

lines oder von Wasser durch städtische Versorgungsrohre. Turbulente Verwirbelungen verschlingen hierbei oft mehr als zehnmals so viel Pumpenergie wie eine gleichförmige, laminare Strömung derselben Geschwindigkeit.

Mit modernster Technik gehen Physiker am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen diesem Phänomen nach. Sie lassen eine Flüssigkeit durch eine lange Glasröhre fließen

und fügen ihr winzige Teilchen bei, die ein Laser hell aufleuchten lässt. Das erlaubt es, mit Hochgeschwindigkeitskameras die Entwicklung von Turbulenzen zu verfolgen. Dabei fanden Forscher unter anderem heraus, dass ab einer bestimmten Strö-

▼ Bis 1992 war das Schneefernerhaus Deutschlands höchstgelegenes Luxushotel. Nach dessen Aus wurde die Anlage umgebaut und beherbergt seit 1999 die gleichnamige Forschungsstation. (Bild: ESA)







**1859**  
**Gustav Kirchhoff, Robert Bunsen**  
deuten die Fraunhofer-Linien und schließen daraus auf die chemischen Elemente der Sonnenatmosphäre.

→ Seite **5**



**1873**  
**Ernst Abbe**  
erkennt, dass die Auflösung optischer Mikroskope nie über die halbe Wellenlänge des Lichts steigen kann.

→ Seite **16**



**1886**  
**Heinrich R. Hertz, Wilhelm Hallwachs**  
beobachten, dass manche Metalle Elektronen abgeben, wenn ihre Oberfläche mit Licht bestrahlt wird.

→ Seite **7**



**1900**  
**Max Planck**  
leitet das nach ihm benannte Strahlungsgesetz her, Voraussetzung für die spätere Quantenphysik.

→ Seite **4**



**1905**  
**Albert Einstein**  
definiert Licht als eine endliche Zahl von Energiequanten und erweitert damit die Wellentheorie.

→ Seite **8**



**1865**  
**James Clerk Maxwell**  
definiert Licht als Überlagerung von Wellen und erkennt, dass seine Farbe durch die Wellenlänge bestimmt wird.

→ Seite **6**



**1879**  
**Thomas Alva Edison**  
entwickelt und produziert die ersten dauerhaft funktionstüchtigen und wirtschaftlichen Glühlampen.

→ Seite **10**



**1895**  
**Wilhelm C. Röntgen**  
entdeckt im kurzwelligen Bereich des elektromagnetischen Spektrums die Röntgenstrahlen.

→ Seite **7**

▲ Bildquellen Physiker Seite 23 bis 25:  
Hecht Collection, Weizmann Institute of Science (beide AIP) / Nobel Media, A. Mahmoud / Bernd Schuller, MPI für biophysikalische Chemie (CC BY-SA 3.0) / Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik / Gemeinfreie Bilder

Takt von einer Femtosekunde zwischen zwei Zuständen hin und her. Zum Vergleich: Eine Femtosekunde ( $10^{-15}$  Sekunden) verhält sich zu einer Sekunde wie sieben Minuten zum Alter des Universums.

Einblicke in die Nanowelt ermöglichen der am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg beheimatete Röntgenlaser FLASH und PETRA III, die weltweit intensivste Röntgenlichtquelle. PETRA III ist ein 2,3 Kilometer langer Ring, in dem Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit kreisen. An einigen Stellen durchqueren die Teilchen sogenannte **Undulatoren**. Das sind Abfolgen von starken Magneten mit abwechselnder Polarität. Sie zwingen die Elektronen auf rasante Slalombahnen. Dabei werden die Teilchen stark beschleunigt und senden in Flugrichtung gebündelte Röntgenstrahlung aus – wie winzige Scheinwerfer. Das Röntgenlicht schießt in kurzen Pulsen aus dem Beschleuniger heraus.

Der Strahl ist bis zu 5000-mal feiner als ein menschliches Haar und ermöglicht erstaunliche Untersuchungen. So entdeckten Physiker damit Details der Photosynthese, beobachteten live, wie bestimmte Biomoleküle in einer Zellmembran agieren und welche



Flussungsgeschwindigkeit Wirbel punktuell entstehen und sich wieder auflösen. Erst wenn sich im zeitlichen Mittel mehr Wirbel bilden als zerfallen, wird die gesamte Strömung turbulent. Fügt man der Flüssigkeit geeignete Stoffe wie Polyacrylamid zu, lassen sich Turbulenzen vermeiden. Betreiber von Pipelines mengen dem Öl eine winzige Menge Polyacrylamid bei und verringern so die Reibungsverluste um 80 Prozent.

Mit Lasern kann man zu noch weit kleineren Dimensionen vorstoßen und Vorgänge in Atomen „sichtbar“ machen. Das geschieht in sogenannten Anregungs-Abfrage-Experimenten, auch Pump-Probe-Experimente genannt. Dabei wird ein Atom mit einem ultrakurzen Laserpuls

beschossen und eines oder mehrere Elektronen angeregt. Mit einem zweiten, verzögerten Laserpuls wird das nun veränderte Atom „abgefragt“, indem man zum Beispiel untersucht, ob das Atom den Strahl bei einer bestimmten Wellenlänge verschluckt oder nicht.

Variiert man die Verzögerungszeit zwischen Anregungs- und Abfrage-Puls und misst für jede Verzögerung den Zustand des Atoms, so erhält man eine Art Film der im Atom ablaufenden Vorgänge. Diese sind rasend schnell, weswegen für die Einblicke in den Mikrokosmos die schnellsten Laser nötig sind. Auf diese Weise konnten Physiker zum Beispiel den „Tanz“ der beiden Elektronen in einem Heliumatom filmen: Sie springen im

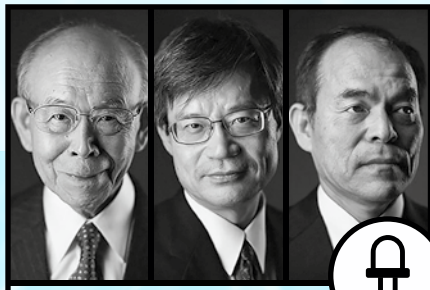




**1960**

**Theodore Maiman** erfindet den Laser, in dem er eine stimulierte Emission in einem beidseitig verspiegelten Rubin durchführt.

→ Seite **14**



**1990**

**Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura** läuten mit der Entwicklung der blauen LED eine Revolution in der Beleuchtungstechnik ein.

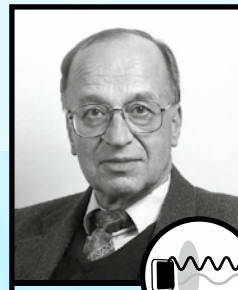
→ Seite **12**



**1990**

**Stefan Hell** entwickelt das STED-Mikroskop, das Bilder jenseits der Abbe'schen Auflösungsgrenze ermöglicht.

→ Seite **16**



**1995**

**Jürgen Schneider** nutzt die Technik blauer LEDs, um durch Streuung und Farbmischung eine weiße LED zu erzeugen.

→ Seite **13**



**2000**

**Ada Yonath** entschlüsselt mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse die atomare Struktur von Ribosomen.

→ Seite **25**

**1960**

**1980**

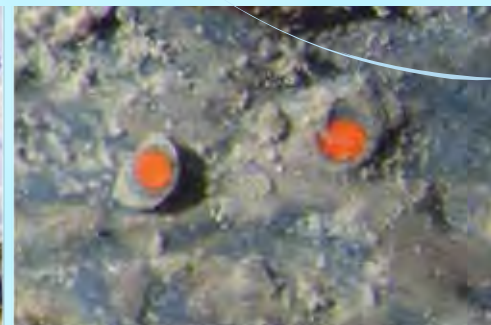
**1970**

**1990**

**2000**

► Mit Hilfe von PETRA III erstellten Forscher vom Van Gogh-Gemälde „Heuschober an einem Regentag“ anhand einer mikroskopisch kleinen Probe ein Tiefenprofil, das bei herkömmlichen Methoden ein Aufschneiden erfordert hätte. Der weiße Kreis ist die Entnahmestelle, die rechts oben im Detail zu sehen ist. Rechts unten: Aufnahme der Farbprobe. (Bild: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim)

Materialien **berühmte Maler** verwendeten. Mit einer Zeitauflösung von 0,2 Milliardenstel Sekunden konnten Forscher verfolgen, wie sich in einem Festkörper die Magnetisierungsrichtung änderte: Nanophysik in Superzeitlupe. Mit einem ähnlichen „Röntgenmikroskop“ gelang es der israelischen Biologin Ada Yonath, die atomare Struktur von Ribosomen aufzuklären, wofür sie 2009 mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt wurde.



Die Zukunft leuchtet noch heller: Ein vom DESY-Gelände ausgehender, 3,4 Kilometer langer Beschleuniger namens European **XFEL** soll in wenigen Jahren extrem energiereiches Laserlicht im Röntgenbereich mit Wellenlängen von 0,05 bis 6 Nanometern erzeugen. Mit seinen Laserblitzen werden Forscher im Nanokosmos Vorgänge mit einer „Belichtungszeit“ von weniger als einer Hundertbilliardstel Sekunde untersuchen können.

► Das Strahlrohr von PETRA III zwischen den Magneten eines Undulators (oben und unten). Durch Ablenkung im Magnetfeld können Teilchen auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. (Bild: DESY)







# Mit Licht kommunizieren

**Die täglich um den Erdball rasende Datenmenge erhöht sich unaufhaltsam. Die Netze werden immer stärker belastet, die Energiekosten steigen. Dem effektiven Datenträger Licht gehört deshalb die Zukunft.**

Eben noch schnell den Status von Melissa checken, dann Franks E-Mail beantworten, bevor ich das neue Video meiner Lieblingsgruppe anschau – so oder ähnlich geht es heute zu im Zeitalter der digitalen Welt und der sozialen Medien. Alle Informationen müssen unverzüglich, schnell, zuverlässig und in technischer Topqualität verfügbar sein. Doch das globale Netz hat seinen Preis, und es droht an Grenzen zu stoßen. Kein Wunder, angesichts schwindelerregender Zahlen.

In jeder Minute werden rund 200 Millionen E-Mails verschickt, Hunderttausende Fotos und Hunderte von Stunden Videomaterial hochgeladen. Das kostet Energie. Große Serverfarmen fressen jährlich

2,3 Millionen Megawattstunden Strom. Damit ließe sich eine Großstadt mit 200.000 Haushalten ein ganzes Jahr lang versorgen. Und ein Ende ist nicht absehbar – im Gegenteil. Fachleute erwarten im Jahr 2020 ein 50-mal höheres Datenaufkommen als heute.

Damit das Internet nicht zum Opfer des eigenen Erfolgs wird, suchen Forscher nach Möglichkeiten, die Übertragungskapazität zu erhöhen und gleichzeitig den Energieverbrauch zu senken. Die Datenübertragung mit Licht bietet sich hier in vielen Bereichen an, denn die Frequenz – also die Schwingungszahl der Lichtwelle pro Zeiteinheit – von Laserlicht ist wesentlich höher als die von Funkwellen. Dement-

sprechend können mehr Informationen in der gleichen Zeit übertragen werden. Dies geschieht im Allgemeinen über Glasfasern.

Optische Datenautobahnen gibt es schon lange, sie bilden heute das Rückgrat des weltweiten Informationsaustausches. Bereits 1986 wurde im Ärmelkanal das erste Glasfaser-Seekabel verlegt. Allein in Deutschland liegt ein Netz von Glasfaserkabeln mit mehr als 340.000 Kilometern Länge im Boden, wobei jedes Kabel im Durchschnitt mindestens hundert Fasern enthält. Mit Glasfasern können via Internet bis zu 200 Megabit pro Sekunde übertragen werden. In Testaufbauten lassen sich sogar bereits mehr als ein Terabit, also 1000 Gigabit, pro Sekunde durch Glasfasern übertragen. Das entspricht der Kapazität von 40 Blu-ray Discs.

Neue Datenautobahnen entstehen zudem im All. Satelliten für die Kommunikation



◀ Künstlerische Interpretation des globalen Aufkommens von Kurznachrichten. Die Kreise verbinden zwei Regionen, die durch Nachrichten und deren Beantwortung einen regen Datenaustausch pflegen. (Bild: Eric Fischer, CC BY 2.0)

► 2014 wurde zwischen dem in rund 700 Kilometern Höhe kreisenden Erdbeobachtungssatelliten Sentinel 1A (oben) und dem Kommunikationssatellit Alphasat I-XL in 36.000 Kilometern Höhe (unten) ein Datentransfer per Laser getestet. Die Technik verspricht in Zukunft eine 30-mal schnellere Informationsübertragung. (Bild: DLR)

oder für die Beobachtung der Erde und Atmosphäre produzieren immer mehr Daten. Bisher war es möglich, durch höhere Funkfrequenzen und den Einsatz neuer Elektroniksysteme die Geschwindigkeit der Datenübertragung zu steigern. Dem sind jedoch aus physikalischen Gründen Grenzen gesetzt. Jetzt laufen erste Experimente, in denen Satelliten Daten per Laserlicht austauschen.

Wissenschaftler und Ingenieure bereiten darüber hinaus Konzepte vor, mit denen wir im Alltag noch effektiver Informationen erhalten können. Warum nicht die uns ständig umgebenden Lichtquellen für die Datenübertragung nutzen? So könnte die Deckenbeleuchtung zu Hause, im Büro, im Flugzeug, in der Bahn oder auch in Produktionshallen zusätzliche Datenhighways eröffnen.

Mit technischen Tricks wird so die handelsübliche LED zum Sender eines optischen WLAN. Die digitale Information wird übertragen, indem ein Modulator die Leuchtdioden in schnellem Rhythmus ein- und ausschaltet. Dieses Flackern geht so schnell, dass es für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar ist. Der Datenfluss lässt sich erhöhen, indem das weiße Licht aus drei LEDs in den Grundfarben Rot, Grün und Blau erzeugt wird. So stehen drei parallele optische Kanäle für den Datentransfer zur Verfügung.

Mit dieser **Visible Light Communication** genannten Technik lassen sich schon jetzt Datenraten bis 1,25 Gigabit pro Sekunde erzielen. Das reicht problemlos für das Übertragen von Videos in HD-Qualität. So könnten Passagiere im Flugzeug oder im Zug an ihrem Platz individuelle Programme empfangen.

Aber hier zeigt sich auch ein Nachteil von Licht gegenüber Funk- und Radiowellen: Es kann keine Hindernisse durchqueren. Schon eine unachtsam bewegte Hand kann die optische Verbindung unterbrechen. Deswegen arbeiten Forscher der-



▲ Mit Visible Light Communication könnten in Zukunft Daten wie Internetseiten oder Filme ohne Beeinträchtigung der Beleuchtung von einer Lichtquelle zu einem Abspielgerät übertragen werden. (Bild: kurhan, Shutterstock / ius)



zeit an Verfahren, damit die Verbindung anschließend wieder aufgenommen wird.

Licht wird auch zukünftig in Wissenschaft und Technik eine zentrale Rolle spielen, zum Beispiel im **Auto von morgen**, das uns womöglich selbstständig fährt. Dafür muss der Bordcomputer die Umgebung des Fahrzeugs ständig beobachten und die Fahrsituation analysieren. Ingenieure experimentieren hierfür mit Geräten, die mit vielen Laserstrahlen die Umgebung abtasten und von ihr eine dreidimensionale Karte erstellen.

Ein ganz anderes Anwendungsfeld könnte sich in der Medizin eröffnen. So lassen

sich Teilchen wie Elektronen oder Protonen mit intensiven Laserstrahlen beschleunigen. Diese kompakte Technik könnte zukünftig große Beschleuniger durch die preiswertere Lasertechnik ersetzen, die für manche Arten der Strahlentherapie nötig sind.

Licht hat für uns eine vielfältige Bedeutung: Es wärmt unseren Planeten, das Sehen mit Licht ermöglicht uns die Orientierung in der Umwelt. Wir erkunden mit Licht das Universum und den Mikrokosmos, wir heilen, vermessen und kommunizieren mit Licht. Kein anderes physikalisches Phänomen ist für uns so universell nutzbar und bedeutend wie Licht.



## Veranstalter

EINE INITIATIVE VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

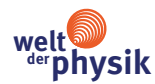


Friedrich-Schiller-Universität Jena

## Partner



Klaus Tschira Stiftung  
gemeinnützige GmbH



We make it visible.



Carl Zeiss Stiftung



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015

## Förderer



## Medienpartner



Inspiziert und begeistert durch den Erfolg des „Jahres der Physik 2000“ veranstalten das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Physikalische Gesellschaft seit 2001 ein jährliches Physikfestival: die „Highlights der Physik“. Das Festival zieht mit jährlich wechselnder Thematik von Stadt zu Stadt. Mitveranstalter sind stets ortsansässige Institutionen. Die vorliegende Broschüre erscheint zu den „Highlights der Physik 2015: Lichtspiele“ (Jena, 22. – 26.09.2015).  
Infos: [www.physik-highlights.de](http://www.physik-highlights.de)