



Vom Exoten zum Alleskönner

Ohne Licht kein Leben – Licht vermag uns auf ganz unterschiedliche Art zu begeistern. Ein besonders faszinierendes Lichtbündel ist der Laserstrahl. Meist ist er selbst unsichtbar. Seine enorme Energie wird erst sichtbar, wenn er sie an ein Werkstück abgibt.

In den letzten drei Jahrzehnten drang der Laser in nahezu alle Bereiche der industriellen Materialbearbeitung vor. Als wir 1978 den ersten Laser kauften und an eine unserer Maschinen anbauten, war diese Entwicklung nicht abzusehen. Auch 1985, als TRUMPF den ersten eigenen Laser präsentierte, galt der künstlich erzeugte Lichtstrahl außerhalb des Forschungslabors noch eher als exotisch. Das hat sich gründlich geändert. Wie selbstverständlich der Laser heute in der industriellen Materialbearbeitung geworden ist, zeigt dieses Buch.

Es folgt dem Laserstrahl von seiner Quelle, dem Laseraggregat, über das Strahlführungssystem bis zum Werkstück, das er mit unterschiedlichsten Verfahren bearbeitet. Viele Beispiele vermitteln einen Eindruck davon, wie universell der Laser im industriellen Alltag eingesetzt wird. Und fast täglich kommen neue Anwendungen hinzu. Der Laser ist immer für eine Überraschung gut.

Tauchen Sie ein in die faszinierende Welt eines Werkzeugs aus Licht!

A handwritten signature in black ink that reads "Berthold Leibinger". The signature is written in a cursive, slightly slanted style.

Professor Dr.-Ing. E.h. Berthold Leibinger
Vorsitzender des Aufsichtsrats der TRUMPF GmbH + Co. KG, Ditzingen

INHALTSVERZEICHNIS

10		FASZINIERENDES LICHT
32		STRAHLQUELLEN FÜR DIE MATERIALBEARBEITUNG
72		WERKZEUG AUS LICHT
104		WAS LASER KÖNNEN
220		LASER IN ALLEN LEBENSLAGEN
244		LEUCHTENDE ZUKUNFT
262		GLOSSAR
268		INDEX
278		BILDNACHWEIS
280		DANKSAGUNG

FASZINIERENDES LICHT

FUNKELN. GLITZERN. SCHIMMERN.
STRAHLEN. LEUCHTEN. LICHT MACHT
HELL. LICHT IST ENERGIE. LICHT TRÄGT
INFORMATION. LICHT LÄSST SICH ALS
WERKZEUG NUTZEN. ES BEGLEITET
DEN MENSCHEN TAG FÜR TAG – VOM
AUFGANG DER SONNE AM MORGEN BIS
ZUM KÜNSTLICHEN LICHT WÄHREND
DER NACHTSCHICHT. IN DER TECHNIK
FASZINIERT EIN BESONDERER LICHT-
STRAHL: DER LASER.

12 | LICHT IST ÜBERALL

Es werde Licht
Von Sonne, Mond und Glühwürmchen
Licht auf Knopfdruck

20 | WAS IST LICHT?

Was Newton noch nicht wusste
Lichtphänomene im Alltag
Die Farben des Regenbogens
Wie Licht entsteht

28 | LASER – EIN LICHTSTRAHL EROBERT DIE WELT

Das Laserprinzip
Was macht den Laserstrahl so besonders?
Vom ersten Laserblitz zum Massenprodukt
Das Jahrhundert des Lichts

Licht ist überall

ES WERDE LICHT

Wenn die Welt im Dunkeln liegt, weist Licht den Weg zum Leben. Das lässt sich am besten vom Gipfel eines Berges, am Strand oder vom Flugzeug aus erleben. Beleuchtete Häuser und Straßen glitzern in der Ferne mit dem Sternenhimmel um die Wette. Sie zeigen: Wo es leuchtet, leben Menschen. In den alten Schöpfungsmythen steht die Erschaffung des Lichts ganz am Anfang. In der Bibel spricht Gott: „Es werde Licht.“

Dieses erste Licht hat eine kosmische Dimension. Erst danach werden im Mythos die Gestirne geschaffen. Sonne und Sterne werden zu Göttern und Göttinnen – und sind es in vielen Kulturen bis heute geblieben.

Im alten Ägypten galt die Sonne zeitweise als oberste Gottheit: mächtig genug, um Leben zu geben, es aber auch in Trockenzeiten zu vernichten. In Indien gehört Vishnu, der Sonnengott, bis heute zu den obersten Göttern.



- 1 Sonnenaufgang über der Erde
- 2 Echsen sonnen sich, um ihre Körpertemperatur zu erhöhen.
- 3 Blitze zerreißen den Himmel und machen die Nacht taghell.

Energie und Lebensquelle Die Sonne ist die größte Lichtquelle unseres Planeten: Ein riesiger Gasball aus Wasserstoff und Helium mit einer Temperatur von rund 5 500 Grad Celsius an der Oberfläche. Pro Sekunde werden viele Millionen Tonnen Wasserstoff in Helium umgewandelt. Aus einem Bruchteil dieser Masse entsteht Licht. In 150 Millionen Kilometer Entfernung fängt die Erde gerade den 500-millionsten Teil davon auf. Das reicht aus für das Leben von Pflanzen, Tieren und Menschen.

Lebenselixier | Das Tageslicht ist die Grundlage für das Leben – nicht nur in Religion und Mythologie, sondern auch, nüchtern betrachtet, in der Energiebilanz unseres Planeten. Mit dem Sonnenlicht kommt die Energie auf die Erde, aus der das Leben in all seinen Facetten entsteht. In der Atmosphäre wird es in Wärme umgewandelt, Pflanzen nutzen es für die Photosynthese, bei der Kohlenhydrate und Sauerstoff entstehen. Reptilien sonnen sich, um ihre Körpertemperatur zu erhöhen, und sind dann aktiver.

Vieles spricht dafür, dass auch der Mensch in der Lage ist, Licht direkt zu nutzen. Der Blick in den blauen Himmel an einem Frühlingstag hebt sofort die Stimmung, weil über die Augen Nerven und Gehirnareale aktiviert und Hormone ausgeschüttet werden. Ende des 20. Jahrhunderts konnten Forscher zeigen, dass Licht viel weiter in den Körper eindringt als bisher angenommen. Der Mensch nimmt es nicht nur über die Augen, sondern auch über die Haut auf.

Die Meridiane der traditionellen chinesischen Medizin, die lange vergeblich gesucht wurden, entpuppten sich als Lichtleiter, die Licht zu den Organen transportieren. Farbtherapie und -akupunktur nutzen das, um zu heilen.

Kein Wunder also, dass der Begriff des Lichts positiv besetzt ist. Das Helle, das Gute, das Schöne sind Assoziationen, die Menschen weltweit damit verbinden.

Wortwörtlich | In der Sprache zeigt sich noch ein weiterer Aspekt: Licht steht in enger Verbindung mit Erkenntnis, Wissen und Weisheit. Schlaue Menschen sind Leuchten, weise Menschen lassen ihren Geist leuchten, und nicht nur Genies haben Geistesblitze. Wer Dinge gut erklären möchte, beleuchtet sie am besten von allen Seiten. Und wenn die Wahrheit ans Licht kommt, heißt es oft, den Standpunkt zu wechseln und die Dinge in einem anderen Licht zu betrachten.



2



3

Blut oder Ketchup? Dass chemische Reaktionen leuchten, machen sich Kriminaltechniker zu Nutze, um Blut aufzuspüren. Luminol, eine chemische Substanz, leuchtet, wenn sie mit Bestandteilen des Blutes reagiert. Um herauszufinden, woher die roten Flecken auf dem Teppich stammen, muss man sie nur mit Luminol besprühen. Wenn sie dann bläulich leuchten, ist die Sache klar: Blut und kein Ketchup.



VON SONNE, MOND UND GLÜHWÜRMCHEN

In der Natur strahlt Licht in den verschiedensten Formen und an ganz unterschiedlichen Stellen. Leuchtvorgänge werden allgemein unter dem Begriff Lumineszenz (von lateinisch lumen = Licht) zusammengefasst.

Heiß und kalt | Wer nach Lichtquellen in der Natur fragt, bekommt meist zuerst die thermischen genannt: Sonne, Blitz und Feuer. Die Sonne ist ein leuchtender Gasball, in dessen Kern Wasserstoffatome zu Heliumatomen verschmelzen. Diese Kernfusionen setzen Unmengen von Energie frei. Ein Teil davon wird von der Photosphäre als Licht abgestrahlt.

Die Helligkeit von Blitzen stammt dagegen von einer Gasentladung. Ihre extrem hohen Spannungen und Ströme ionisieren die Gasteilchen der Luft. Diese wiederum stoßen andere Teilchen an und bringen sie zum Leuchten. Im Feuer senden glühend heiße Holzsplitter und Rußpartikel in flackernden Flammen sichtbares Licht aus.

Die Natur kennt jedoch auch kalte Leuchtvorgänge. Sie sind oft überraschender und faszinierender als die heißen. Man denke an Glühwürmchen in lauen Sommernächten, Kristalle, die unter UV-Licht farbig strahlen, oder faulende Baumstümpfe, die in der Dunkelheit fahl glimmen.

Leuchtende Lebewesen | Stoffe, die in lebenden Organismen chemisch miteinander reagieren, können leuchten. Solche Vorgänge werden als Biolumineszenz bezeichnet. Eines der bekanntesten Beispiele ist sicherlich der Leuchtkäfer, umgangssprachlich meist Glühwürmchen genannt. Glühwürmchen besitzen Leuchtzellen an der Bauchseite des Hinterleibes. Dort findet eine biochemische Reaktion statt, in der das Molekül Luciferin mit Sauerstoff reagiert und oxidiert. Die Energie, die bei dieser Reaktion frei wird, wird fast

- 1 Biolumineszenz unter Wasser: eine leuchtende Qualle
- 2 Fluoreszierende Flüssigkeiten leuchten unter UV-Licht hell auf.
- 3 Phosphoreszierende Kristalle leuchten im Dunkeln nach.

ausschließlich in Licht umgesetzt. Die umgebenden Zellen sorgen dafür, dass das Lichtsignal optimal abgestrahlt wird.

Tiefseefische wie der Laternenfisch lassen leuchten: In ihren Leuchtorganen siedeln sich leuchtende Bakterien an. Leuchtende Bakterien siedeln sich ebenfalls bei Zersetzungsprozessen an und machen so auch die vermeintlich toten Baumstümpfe zu geisterhaften Erscheinungen.

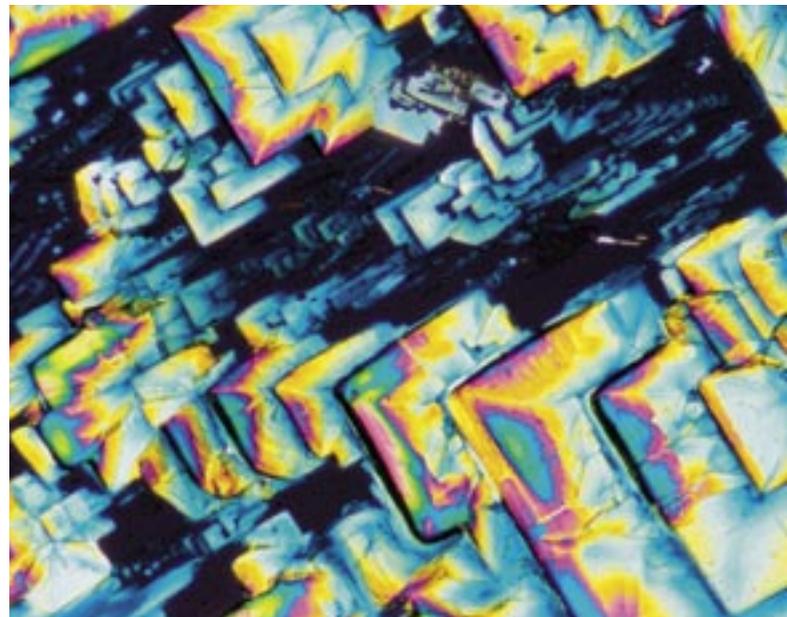
Noch mehr Leuchten | Nicht ganz so bekannt sind Leuchteffekte, die Kristalle zeigen. Einige Gesteine und Kristalle leuchten farbig auf, wenn sie mit weißem oder UV-Licht bestrahlt werden: Sie fluoreszieren. Das lässt sich auch an Farbstofflösungen beobachten. Röhren-Bildschirme in Fernsehern oder Computermonitoren funktionieren auf die gleiche

Weise: Die Monitorscheibe trägt eine fluoreszierende Schicht. Elektronenstrahlen regen diese Schicht zum Leuchten an und erzeugen so ein Bild. Manche Stoffe sind in der Lage, die Anregungsenergie länger zu speichern. Sie leuchten nach, auch wenn das Anregungslicht ausgeschaltet ist. Dieser Effekt nennt sich Phosphoreszenz und lässt sich auch an Kristallen beobachten. Der Mensch macht sich phosphoreszente Stoffe technisch zu Nutze, zum Beispiel in Form von Leuchtziffern an Uhren oder leuchtenden Aufklebern und Kunststoffen.

Wärme, Schall und Reibung können ebenfalls Leuchtvorgänge auslösen. Letzteres kann jeder feststellen, der einen selbstklebenden Briefumschlag im Dunkeln aufreißt: An der Klebestelle leuchtet es blau. Diesen Effekt bezeichnet man als Tribolumineszenz.



2



3

Der Laternenanzünder Petroleum- und Gaslampen erhellten bis zur Einführung der elektrischen Beleuchtung die nächtlichen Straßen. Sie anzuzünden war Aufgabe des Laternenanzünder. In großen Städten arbeiteten mehrere Laternenanzünder. In kleinen übernahm der Nachtwächter diese Aufgabe. In Berlin, Düsseldorf und Mainz trifft man auch heute noch auf Gaslaternen. Sie werden jedoch automatisch gezündet.

LICHT AUF KNOPFDRUCK

Licht lässt sich nicht dauerhaft speichern. Die einzige Möglichkeit, es jederzeit zur Verfügung zu haben, ist, es bei Bedarf zu produzieren. Die Geschichte der Lichtquellen lässt sich bis in die Frühgeschichte der Menschheit zurückverfolgen.



Feuer und Co. | Über Hunderttausende von Jahren hinweg erhellten Feuerstellen und Fackeln menschliche Behausungen mit ihrem flackernden Licht. Einige Hölzer brennen und glühen besonders hell, zum Beispiel harzreiches Kiefernholz. Aus diesen Holzsorten schnitt man lange, dünne Späne und nutzte sie als Lichtquelle. Die so genannten Kienspäne waren bis ins Mittelalter hinein weit verbreitet.

Auch die Geschichte der Öllampen ist einige zehntausend Jahre alt. Ihre Funktionsweise ist bis heute gleich geblieben: In Behältern aus Glas, Ton oder Metall befindet sich Petroleum, das an einem geflochtenen Runddocht verbrennt.

Kerzen sind jünger. Ihr Siegeszug beginnt etwa 2000 Jahre vor Christus. Damals stellte man Kerzen aus Rindertalg oder Bienenwachs her. Erst im 19. Jahrhundert entdeckte man Stearin und Paraffin, die Substanzen, aus denen heute die meisten Kerzen bestehen. Egal ob Feuer, Kienspan oder Kerze – diese Lichtquellen waren und sind nicht besonders hell.



- 1 Petroleum wurde einst aufwändig beworben.
- 2 Gaslampen beleuchten auch heute noch so manche Straße.
- 3 Industrielle Glühlampenherstellung zu Beginn des 20. Jahrhunderts
- 4 Doppelt spiralisiert: die Glühwendel einer Glühlampe

Die Ewigkeitsglühlampe Anfang der 1980er Jahre bekam Dieter Binninger, ein deutscher Erfinder, das Patent für eine Glühlampe, die er Ewigkeitsglühlampe nannte. Sie sollte 150 000 Stunden lang brennen und deutlich weniger Energie verbrauchen als herkömmliche Glühlampen. Diese Glühbirne kam allerdings nie auf den Markt: Kurz nachdem er eine Firma für die Produktion gefunden hatte, verunglückte Dieter Binninger 1991 mit seinem Privatflugzeug tödlich. Seine Idee wurde nicht weiter verfolgt.

Gasflammen | Heller leuchteten Gaslampen, die sich zu Beginn des 19. Jahrhunderts ausbreiteten. Darin brannte eine offene Flamme. Aufgrund der gestiegenen Helligkeit konnten Gaslampen größere Flächen beleuchten. Im April 1814 ging die erste Gas-Straßenbeleuchtung in London in Betrieb.

Einige Jahrzehnte später entwickelte Carl Auer von Welsbach den Glühstrumpf, der die Lichtausbeute und damit die Helligkeit der Gaslaternen vervielfacht: Die Flamme brennt in einem feinen Keramiknetz und erhitzt es buchstäblich bis zur Weißglut. Das Keramiknetz leuchtet und erzeugt ein helles, weißes Licht. Glühstrümpfe finden sich heute noch in Gaslampen, die beim Camping und Trekking genutzt werden.

Glühlampen | Die Entdeckung der Elektrizität ermöglichte neue Lichtquellen. Die erste war die Glühlampe. Meist wird Thomas Edison als Erfinder der Glühlampe genannt. Tatsächlich war es jedoch Heinrich Göbel, der 1854 die Glühlampe entwickelte und dafür das Patent erhielt. Edison kam erst 25 Jahre später ins Spiel. Er entwickelte die erste Glühlampe mit einer Leuchtdauer von 40 Stunden und ebnete damit den Weg zur Nutzung und industriellen Fertigung im großen Stil.

Die weiteren Entwicklungen hatten zum Ziel, Glühlampen heller und langlebiger zu machen. Die Kohlefäden der ersten Lampen wichen schließlich feinsten Drahtwendeln aus einer Osmium-Wolfram-Legierung. Außerdem füllte man die Lampen mit einer Stickstoff-Argon-Mischung.

In Wohn- und Geschäftsräumen finden sich heute oft Halogenglühlampen. Sie enthalten zusätzlich Spuren von Halogenen. Beim Betrieb verdampft ein geringer Teil der Drahtwendel. Dank der Halogene schlagen sich die Dampfpartikel nicht am Glaskolben nieder, sondern lagern sich wieder an der Drahtwendel an. Vorteil: Die Drahtwendel lässt sich heißer betreiben, und die Halogenglühlampe strahlt heller.



3



4

- 1 Leuchtdioden schaffen in dieser Bar Atmosphäre.
- 2 Großstädte verwandeln sich bei Nacht in ein Lichtermeer.



Gasentladungslampen | Neben den Glühlampen entstanden neue Formen der Gaslampen: die Gasentladungslampen, zu denen Glimmlampen, Bogenlampen und Leuchtstofflampen zählen. In diesen Lampen befindet sich Gas zwischen zwei Elektroden. Durch die Spannung werden Gasmoleküle ionisiert und ein Strom beginnt zu fließen. Bei Glimmlampen entsteht dabei eine schwache Entladung. Bekannt sind die gelben Natriumdampflampen, die häufig zur Straßenbeleuchtung eingesetzt werden. In Bogenlampen dagegen bildet sich ein Lichtbogen – ähnlich einem stehenden Blitz. Im täglichen Leben begegnet man Bogenlampen in Xenon-Scheinwerfern von Autos oder in Flutlichtern.

Leuchtstoffröhren | Weit mehr als die Hälfte des künstlichen Lichts wird von Leuchtstoffröhren erzeugt. Sie finden sich in Büros ebenso wie in Industriegebäuden, Schulen und Krankenhäusern. Umgangssprachlich werden Leuchtstoffröhren häufig Neonröhren genannt. Sie enthalten jedoch kein Neon, sondern Argon und Quecksilber. Das Quecksilber im Innern strahlt vor allem unsichtbares ultraviolettes Licht ab. Von innen sind die Glasröhren mit einem Leuchtstoff beschichtet, der das UV-Licht in sichtbares Licht umwandelt.

Leuchtstoffröhren eignen sich besonders gut zum Beleuchten großer Flächen. Sie verbrauchen dank ihrer höheren Lichtausbeute weniger Energie als Glühlampen. Zudem erreichen sie Brenndauern von bis zu 18 000 Stunden.

Dioden | Das 20. Jahrhundert brachte neue Formen der Lichterzeugung: die Leuchtdioden, die auch LEDs (englisch für light emitting diode) genannt werden. Leuchtdioden wandeln Strom direkt in Licht um und haben daher wesentlich geringere Wärmeverluste als Glühlampen.

Ihre Einsatzbereiche sind ganz unterschiedlich: Sie zeigen den Status von Geräten aller Art an, beleuchten Displays, sitzen zu hunderten in Laufschriftbändern und werden immer häufiger auch in Heckleuchten von Autos sowie für häusliche und industrielle Beleuchtungszwecke eingesetzt. Leuchtdioden erreichen Brenndauern von über 100 000 Stunden. Experten sagen bereits heute voraus, dass sie auf lange Sicht die Glühlampen ablösen werden.

Licht und Lebensrhythmus | Künstliche Lichtquellen entwickelten sich parallel zur zunehmenden Technisierung und prägten den Lebensrhythmus der Industriegesellschaft. In den frühen bäuerlichen Kulturen begann der Tag mit dem Sonnenaufgang und endete mit dem Sonnenuntergang.

Lichtbotschaften Noch immer schaffen die natürlichen Lichtquellen Leben. Noch immer fesseln uns Sternbilder in klaren Nächten. Doch heute senden Menschen ihre Lichtzeichen auch von unten in den Himmel. Ein Netz aus Lichtern bewegt sich mit der Nacht immer und immer wieder um unseren Globus – im Wechselspiel mit der Sonne.

Nachtschichten bei Kerzenschein? Fehlanzeige. Der Lebensrhythmus war geprägt vom natürlichen Wechselspiel des Lichts. Heute findet man solche Lebensrhythmen nur noch bei Naturvölkern. In der technisierten Gesellschaft hingegen ist die Nacht keine Zeit der Ruhe mehr: Sobald der Lichtschalter umgelegt wird, kann die Arbeit beginnen oder weitergehen. In Großstädten wird es nicht mehr richtig dunkel.

Das Streulicht der Straßen, Gebäude und Leuchtreklamen ist so hell, dass die Sterne dagegen verblassen.

Licht, so könnte man meinen, ist entzaubert, verstanden und bekannt. Doch wer seine Sinne öffnet, kann die Faszination, die Licht ausübt, wiederentdecken – im Flackern eines Feuers, im Schillern einer Pfauenfeder oder im Lichtschwert eines Science-Fiction-Helden.



2

Was ist Licht?

WAS NEWTON NOCH NICHT WUSSTE

Die Frage, was Licht ist, bewegt die Menschheit seit eh und je. Forscher, Philosophen und Mystiker aller Zeiten beschäftigten sich mit Lichtphänomenen und entwarfen unterschiedliche physikalische Modelle, um Licht zu beschreiben.

Licht besteht aus Teilchen | Die alten Griechen entwickelten bereits zwei widersprüchliche Theorien, mit denen sie Licht erklärten. Empedokles spricht von Augenstrahlen, die einen Gegenstand abtasten. Pythagoras stellte dagegen die These auf, dass Licht aus Teilchen besteht, die von einem Gegenstand ausgesandt werden.

Rund eineinhalb Jahrtausende später, im Jahr 1665, stellte Isaac Newton seine Korpuskulartheorie vor. Sie besagt ebenfalls, dass Licht aus Teilchen besteht. Einige Lichtphänomene lassen sich damit vollständig erklären, andere hingegen nur

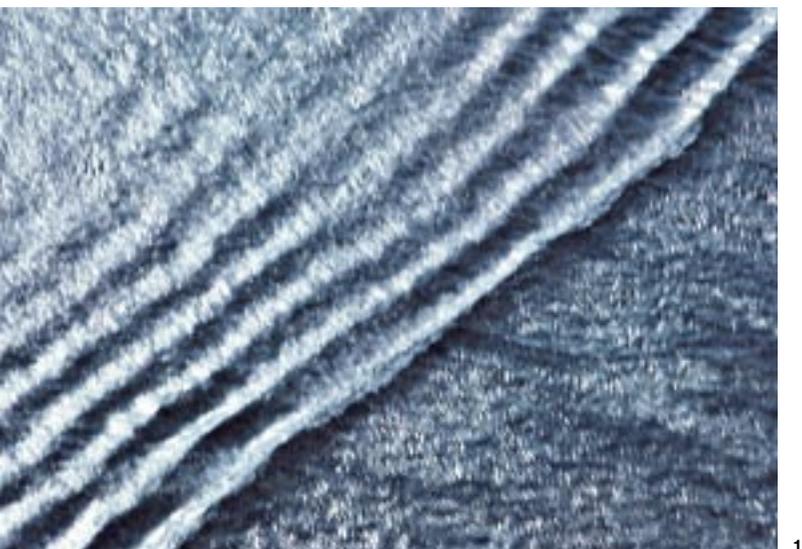
teilweise. Was Newton damals noch nicht wissen konnte: Die Theorie des Lichts würde noch mehrmals verändert werden, bevor das Bild entstand, das heute anerkannt ist.

Licht besteht aus Wellen | Wenige Jahre nach dem Erscheinen der Korpuskulartheorie brachte der niederländische Astronom, Mathematiker und Physiker Christiaan Huygens eine neue Sichtweise ein. Huygens beschäftigte sich in seinen Forschungen unter anderem mit Wellen. Er studierte ihre Form und ihr Verhalten anhand von Wasserwellen und entwickelte daraus seine Wellentheorie und die Brechungsgesetze. Huygens schloss, dass auch Licht eine Welle sein muss.

Diese Sichtweise wurde von dem Schotten James Clerk Maxwell und dem Deutschen Heinrich Rudolf Hertz vervollständigt. Maxwell stellte 1871 die grundlegenden Gleichungen der Elektrodynamik auf. Hertz gelang 1888 der experimentelle Nachweis elektromagnetischer Wellen. Seither wissen wir, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist – wie Radiowellen und Röntgenstrahlen.

Welle-Teilchen-Dualismus | Zu Beginn des 20. Jahrhunderts postulierte der deutsche Physiker Max Planck, dass Energie in Form von elektromagnetischen Wellen nur in fest definierten Mengen – den so genannten Quanten – abgestrahlt werden kann. Albert Einstein führte kurz darauf den Begriff der Lichtquanten ein. Das Lichtquant wird auch als Photon bezeichnet.

Mit dieser Definition erklärte Einstein den Photoeffekt. Beim Photoeffekt lässt sich beobachten, dass Licht Elektronen aus einer Stahlplatte herausschlagen kann. Dabei zeigt Licht eine typische Teilcheneigenschaft: Das Photon muss eine genau definierte Energiemenge besitzen, um ein Elektron aus der Stahlplatte herausschlagen zu können. Andererseits

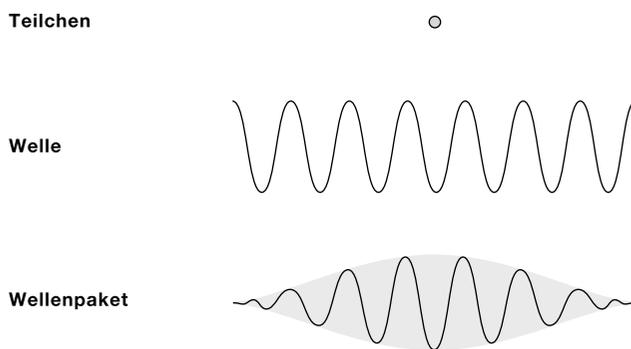


Das Maß aller Dinge Licht bewegt sich sehr schnell. Es flitzt mit rund 300 000 Kilometern pro Sekunde in der Luft von Ort zu Ort. Das entspricht etwa 7,5 Erdumrundungen. In gut einer Sekunde ist es beim Mond, und die Sonne erreicht es in etwa 500 Sekunden. Die Lichtgeschwindigkeit ist die höchste mögliche Geschwindigkeit.

zeigte Licht auch weiterhin typische Welleneigenschaften, etwa in Beugungs- und Interferenzmustern. So bildete sich der Begriff des Welle-Teilchen-Dualismus. Für Berechnungen, die einzelne Photonen betrachteten, verwendete man die Formeln der Quantenmechanik. Wo Licht als Strahl vieler Photonen auftrat, mussten die Wellengleichungen erhalten.

Wellenpakete | Im heutigen Modell des Lichts sind die Gegensätze vereint. Das Modell beschreibt ein Photon als einen Wellenzug, auch Wellenpaket genannt. Wellenpakete sind elektromagnetische Wellen, die aber nicht unendlich fortlaufen, sondern räumlich geschlossen sind. Ihre Schwingungsamplitude beginnt bei null, wird dann immer größer und nimmt schließlich wieder ab.

Ein Wellenpaket enthält also eine bestimmte Menge an Energie, wie es die Quantenmechanik fordert, hat aber gleichzeitig Welleneigenschaften. Viele Wellenzüge bilden einen Lichtstrahl, sie lassen sich aber auch einzeln betrachten.

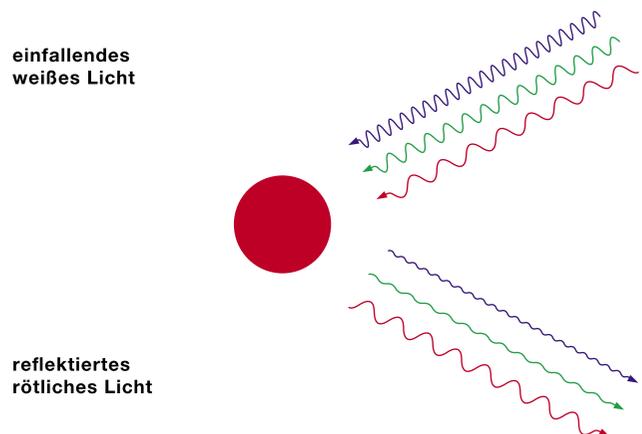


Lichtmodelle: Heute stellt man sich Photonen als Wellenpakete vor.

LICHTPHÄNOMENE IM ALLTAG

Selbst wer sich noch nie gefragt hat, was Licht eigentlich ist, kennt seine wesentlichen Eigenschaften aus dem Alltag. Einige Lichtphänomene scheinen nicht weiter beachtenswert. Der Spiegel zeigt das Spiegelbild. Ja sicher, was sonst. Andere, wie der Regenbogen oder farbenprächtige Sonnenuntergänge, lassen einen entzückt staunen.

Reflexion | Wer sein Spiegelbild betrachtet, sich an glitzernden Wasserwellen erfreut oder feststellt, dass Tomaten rot sind, nimmt reflektiertes Licht wahr. Alles was nicht selbst leuchtet, wird erst dadurch sichtbar, dass es Licht reflektiert. Die Tomate ist also nur deshalb rot, weil sie aus dem weißen Sonnenlicht die roten Lichtanteile stärker reflektiert als die übrigen.



Ein rotes Objekt reflektiert die roten Lichtanteile stärker als die übrigen.

Diamonds are a girl's best friend Brechung und Reflexion – gäbe es diese Phänomene nicht, dann würden geschliffene Diamanten weder glitzern noch funkeln. Für die Damenwelt wären sie dann vermutlich kaum mehr von Interesse.

- 1 Nebelschwaden streuen das Scheinwerferlicht diffus.
- 2 Brechung: Der Löffel im Teeglas scheint einen Knick zu haben.
- 3 Interferenz: Schillernde Farben entstehen, wenn Licht gebeugt wird.
- 4 Dunkler Asphalt absorbiert das Sonnenlicht und heizt sich dadurch auf.



1

Bei der Reflexion entspricht der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel. Auch dies lässt sich intuitiv erfahren: Der Lichtpunkt, den ein Spiegel an die Wand wirft, bewegt sich, wenn der Spiegel bewegt wird. Denn dann verändert sich der Einfallswinkel des Lichts und damit auch der Ausfallswinkel. Aus diesem Grund verstellen wir auch die Rückspiegel im Auto, wenn vor uns eine größere oder kleinere Person auf dem Fahrersitz saß.

Streuung | Blaue Sommerhimmel, weiße Wolken und rote Sonnenuntergänge haben eines gemeinsam: Sie entstehen durch Streuung. Von Streuung spricht man, wenn Partikel Licht aufnehmen und es sofort wieder abgeben. Dabei spielen sowohl Wellenlänge als auch Schwingungsrichtung (Polarisation) eine Rolle. Das Licht setzt seinen Weg in anderer Richtung fort. Es wird zerstreut. Streuung zeigt sich auch im Lichtkegel, den ein Autoscheinwerfer in den Nebel wirft.

Brechung | Viele optische Bauteile nutzen die Gesetzmäßigkeiten der Brechung, um Lichtstrahlen abzulenken: Lupen und Brillengläser oder Linsen in Objektiven und Teleskopen sind nur einige Beispiele von vielen.

Gebrochen wird Licht immer dann, wenn es von einem Medium in ein anderes übergeht, das optisch dichter oder dünner ist, zum Beispiel aus der Luft in ein Wasserbecken. Im Wasser ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts kleiner als in der Luft, weil Wasser optisch dichter ist. Beim Übergang ins Wasser verändert der Lichtstrahl deshalb seine Richtung. Von außen betrachtet, bekommt der Strahl einen Knick. Man sagt, der Strahl wird gebrochen.

Wo Licht abgelenkt wird, lassen sich verschiedene Effekte beobachten: Kleines wird groß, Licht wird in seine Farben aufgefächert. Der Fotograf zoomt das Motiv heran. Der Zauberer lässt eine Münze im Wasserglas verschwinden, indem er den Betrachtungswinkel zum Publikum verändert.



2

Interferenz zwischen Zeige- und Mittelfinger Wer sofort erfahren möchte, wie ein Interferenzmuster aussieht, braucht dazu nur seine Hand und eine helle Lichtquelle – zum Beispiel eine Glühbirne. Man lege Zeige- und Mittelfinger so aneinander, dass sie sich fast berühren und halte sie nahe vor das Auge. Nun beobachte man das Licht durch den Spalt. Statt eines gleichmäßigen Verlaufes zeigen sich dort helle und dunkle Streifen. Die Streifen verlaufen parallel zu den Fingern und sind symmetrisch angeordnet. Ein Interferenzmuster!

Beugung und Interferenz | Beugungs- und Interferenzmuster entstehen dort, wo sich Lichtstrahlen überlagern. Zum Beispiel zeigen sich helle und dunkle Streifen auf einem Schirm hinter einem Spalt, auf dem man eigentlich eine einheitliche Lichtverteilung erwarten würde. Die Oberflächen von dünnen Schichten schimmern farbig, obwohl die Substanz selbst farblos ist, wie bei Seifenblasen. Kerzenflammen und Autoscheinwerfer werden zu Mustern aus hellen Punkten mit Farbverläufen, wenn man sie durch einen feinen Vorhang oder ein gespanntes Seidentuch betrachtet. In all diesen Mustern zeigt Licht seine Welleneigenschaften.

Schillernde Schmetterlinge, Kolibris und Pfauenfedern bekommen ihre leuchtenden Farben ebenfalls nicht durch besondere Farbpigmente. Die Federn oder Schuppen haben eine so fein strukturierte Oberfläche, dass das Licht an ihr gebeugt wird. Für den Betrachter schillert der Flügel oder das Gefieder dann in den schönsten Farben.



3

Absorption | Bei der Absorption werden Lichtstrahlen aufgenommen. Meist wird ihre Energie dabei in Wärme umgewandelt. Wie viel Licht und welche Wellenlängen absorbiert werden, hängt von der Beschaffenheit und der Farbe des Gegenstandes ab. Jeder kennt das: Dunkle Kleidung ist wärmer als helle. Träger schwarzer Anzüge kommen im Hochsommer ins Schwitzen, während Träger weißer Anzüge einen kühlen Kopf bewahren. Die Ursache: Schwarze Gegenstände absorbieren alle Farben des sichtbaren Lichtes; weiße Gegenstände reflektieren das Licht fast vollständig.

Emission | Die Emission ist das Gegenteil der Absorption. Sie beschreibt das grundlegende Lichtphänomen: die Aussendung von Licht, zum Beispiel bei Energieübergängen in Atomen. Hierbei entsteht das Strahlen, Leuchten, Schimmern, das uns durch den Tag folgt. Es kommt aus unzähligen Lichtquellen, die die Welt erhellen.



4

Auf die Frequenz kommt's an Radiowellen und Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, genau wie Licht. Aber wir würden sie nicht als Licht bezeichnen, weil wir sie nicht sehen. Frequenzen, die nahe am sichtbaren Spektrum liegen, bilden eine Ausnahme: Ultraviolette und infrarote Strahlung bezeichnet man als Licht, obwohl das menschliche Auge sie nicht wahrnimmt.

DIE FARBEN DES REGENBOGENS

Weißes Licht an sich gibt es nicht. Was weiß scheint, ist die Summe verschiedener Farben. Newton untersuchte das Phänomen, indem er Sonnenlicht mit Hilfe eines Prismas zerlegte. Er stellte fest, dass weißes Licht sich in farbiges Licht zerlegen lässt und dass die Farben nicht mehr weiter zerlegbar sind. Doch woher kommen die Farben überhaupt?

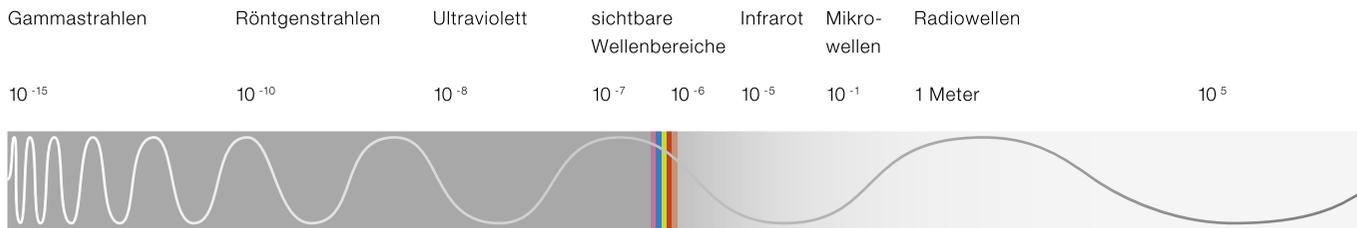
Frequenz und Wellenlänge | Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen. Jede Welle schwingt mit einer bestimmten Frequenz (Zahl der Schwingungen pro Sekunde) und hat eine bestimmte Wellenlänge (Weg von einem Wellenkamm zum nächsten). Den Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge liefert die Lichtgeschwindigkeit.

In Luft ist die Lichtgeschwindigkeit konstant. Je öfter die Welle also in der Sekunde schwingt, je höher also ihre Frequenz ist, desto kürzer wird die Wellenlänge. Die unterschiedlichen Frequenzen nimmt das menschliche Auge in Form von verschiedenen Farben wahr.

Das ganze Spektrum | Der Regenbogen zeigt das ganze Spektrum des sichtbaren Lichts. Sichtbares Licht hat eine Wellenlänge von 380 (violett) bis 780 (rot) Nanometern. Dies ist jedoch nur ein kleiner Ausschnitt aus dem gesamten Spektrum der elektromagnetischen Wellen, das auch Gammastrahlen, Röntgenstrahlen, Mikrowellen und Radiowellen umfasst.



1



Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Das Auge des Menschen nimmt nur einen kleinen Ausschnitt davon als sichtbares Licht wahr.

- 1 Newton zerlegte Sonnenlicht mit einem Prisma.
- 2 Im Regenbogen brechen Millionen Tropfen das Sonnenlicht.



2

Nach Hause oder ins Verderben? Licht zieht Mensch und Tier magisch an; sie folgen ihm instinktiv. Doch kann man Licht immer trauen? Seeleute vertrauen auf Leuchttürme als Wegweiser, die sie zum sicheren Hafen führen. In Märchen und Sagen locken dagegen Irrlichter den Wanderer im Moor immer weiter von zu Hause weg. Und auch Fische, die dem Licht des Laternenfisches folgen, schwimmen ins Verderben. Denn der Laternenfisch nutzt sein Licht, um Beute anzulocken.

WIE LICHT ENTSTEHT

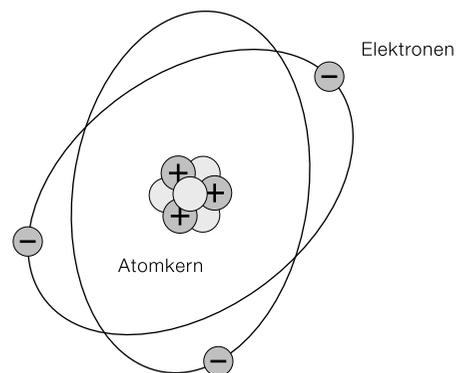
Licht entsteht auf verschiedene Arten. Einige davon wurden in diesem Kapitel bereits angesprochen. Ganz allgemein betrachtet entsteht Licht immer dort, wo Vorgänge auf molekularer oder atomarer Ebene Energie in Form von Photonen freisetzen. Was im Detail geschieht, wenn Licht in einem Atom entsteht, lässt sich anhand des Bohr'schen Atommodells nachvollziehen.



1 Wenn die Sonne untergeht, weisen Leuchttürme den Weg.

Licht entsteht | Das Bohr'sche Atommodell beschreibt den Aufbau des Atoms folgendermaßen: Um den Atomkern aus Protonen und Neutronen bewegen sich die Elektronen auf bestimmten Bahnen – ähnlich wie Planeten um die Sonne. Die Bahnen werden auch als Schalen bezeichnet. Sie entsprechen unterschiedlichen Energieniveaus und sind voneinander getrennt. Zwischenzustände gibt es nicht.

Im Grundzustand sind die unteren Energieniveaus, also die kernnahen Bahnen, voll besetzt. Das Atom befindet sich in einem stabilen Zustand. Wenn nun das Atom Energie aufnimmt, gerät es in einen angeregten Zustand. Dabei wechselt ein Elektron in eine größere Umlaufbahn und damit in ein höheres Energieniveau. Dieser angeregte Zustand ist jedoch nicht stabil. Deshalb bleibt das Elektron nur kurze Zeit auf der neuen Umlaufbahn und geht dann wieder in den Grundzustand über. Während des Übergangs wird die aufgenommene Energie in Form von Licht wieder frei. Das Atom sendet ein Photon aus.



Das Bohr'sche Atommodell: Die Elektronen bewegen sich auf bestimmten Bahnen um den Atomkern.

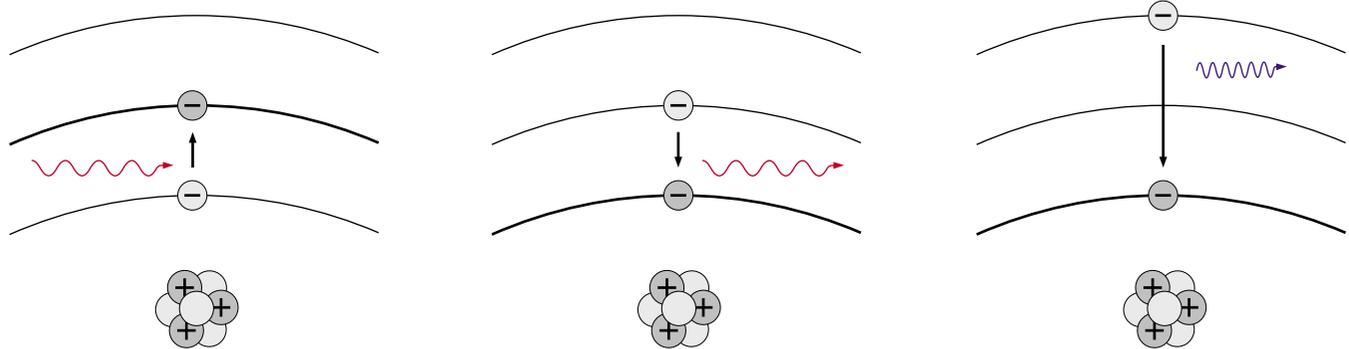
UV-Schutz statt Sonnenbrand Die Werbung für Sonnencremes und andere Pflegeprodukte hebt besonders den Schutz vor ultraviolettem Licht (UV-Licht) hervor. Aus gutem Grund: UV-Licht hat eine wesentlich höhere Frequenz als sichtbares Licht. Es ist damit auch viel energiereicher und belastet unsere Haut daher stärker als sichtbares Licht oder infrarotes Licht.

Welche Farbe hat das Licht? | Die Frequenz beziehungsweise die Wellenlänge eines Photons bestimmt seine Farbe. Wer die Frequenz eines Photons weiß, kann seine Energie berechnen. Den Zusammenhang zwischen der Frequenz und der Energie eines Photons formulierte Max Planck. Frequenz und Energie des Photons sind proportional. Das bedeutet: Je höher die Frequenz, desto größer die Energie. Dieser Zusammenhang gilt auch umgekehrt. Die Energie, die das Elektron freisetzt, wenn es in ein niedrigeres Energieniveau übergeht, bestimmt die Frequenz des ausgesendeten Photons und damit seine Farbe. Die unterschiedlichen Farben kommen dadurch zustande, dass Elektronen aus verschiedenen hohen Energieniveaus in tiefere Niveaus oder in den Grundzustand übergehen.

Leuchtende Moleküle | Moleküle können ebenfalls Licht aussenden, wenn sie von einem angeregten Zustand in einen niedrigeren Energiezustand übergehen. Moleküle kennen

jedoch zwei unterschiedliche Arten von Anregungszuständen. Der erste Anregungszustand: Elektronen in den Atomen wechseln in eine höhere Umlaufbahn. Der zweite: Einzelne Atome oder Teile des Moleküls beginnen zu schwingen oder zu rotieren. Moleküle besitzen mehrere mögliche Schwingungs- und Rotationszustände. Diese entsprechen unterschiedlich hohen Energieniveaus.

Termschema | Um die Energieniveaus eines Atoms oder Moleküls und die Energieübergänge darzustellen, nutzen Physiker ein Termschema. Es besteht aus waagrechten, übereinander liegenden Linien. Jede Linie steht für ein Energieniveau. Pfeile zeigen die Energieübergänge. Dabei wird auch dargestellt, bei welchem Übergang Licht frei wird. Bei mehrstufigen Übergängen geschieht es oft, dass ein Übergang leuchtet und der nächste nicht. Anstelle von sichtbarem Licht kann beispielsweise langwellige Wärmestrahlung freigesetzt werden.



In Atomen entsteht Licht, wenn Elektronen Energie aufnehmen, in eine höhere Schale wechseln und dann wieder in den Grundzustand übergehen. Je größer die Energiedifferenz, desto höher ist die Frequenz.